



HIDROGEOLOGÍA

TABLA DE CONTENIDO

5	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA	1
5.1	MEDIO ABIÓTICO.....	1
5.1.6	HIDROGEOLOGÍA	1
5.1.6.1	Evaluación geológica/geofísica.....	3
5.1.6.2	Evaluación hidrológica.....	73
5.1.6.3	Evaluación hidráulica.....	128
5.1.6.4	Evaluación hidrogeoquímica e isotópica	152
5.1.6.5	Modelo Hidrogeológico Conceptual	399
5.1.6.6	Modelo numérico del flujo de las aguas subterráneas	428

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1.6.1	Estudios base para la caracterización hidrogeológica	2
Tabla 5.1.6.2	Diagrama de rosas de las direcciones preferenciales de fracturas, diaclasas, fallas, zonas de cizalla y diques a partir de perforaciones. Fuente: GCL (2026)	8
Tabla 5.1.6.3	Clasificación de la calidad de la roca en función del índice RQD....	15
Tabla 5.1.6.4	Datos de perforaciones según la profundidad.	17
Tabla 5.1.6.5	Clasificación de los datos estructurales medidos en campo	20
Tabla 5.1.6.6	Clasificación de los datos estructurales medidos en campo	22
Tabla 5.1.6.7	Comparación entre las direcciones de las familias más frecuentes y las familias con mayor peso hidráulico del área de estudio.	23
Tabla 5.1.6.8	Resumen de las conductividades hidráulicas (m/s) asociadas a las fallas del área de estudio y su respectiva fuente de información.	26
Tabla 5.1.6.9	Resumen de las conductividades hidráulicas (m/día) asociadas a las fallas del área de estudio y su respectiva fuente de información	26
Tabla 5.1.6.10	Resumen de las conductividades hidráulicas (m/día) asociadas a las fallas del área de estudio luego de corrección.	27
Tabla 5.1.6.11	Unidades geológicas y sus resistividades.....	28
Tabla 5.1.6.12	Sondeos eléctricos verticales ejecutados en el área de estudio del proyecto 30	
Tabla 5.1.6.13	Ubicación de las líneas de geoeléctrica continua	37
Tabla 5.1.6.14	Localización de las líneas de refracción sísmica Inteinsa, 2025 ..	63
Tabla 5.1.6.15	Conductividad hidráulica del lecho de las corrientes superficiales	75
Tabla 5.1.6.16	Clasificación de los cuerpos de agua superficial por conexión hidráulica con las aguas subterráneas	75
Tabla 5.1.6.17	Descripción del grupo de suelo	80
Tabla 5.1.6.18	Áreas aferentes por polígonos de Thiessen	82
Tabla 5.1.6.19	Clasificación de componentes del coeficiente de escorrentía	85
Tabla 5.1.6.20	Pendientes en la zona de estudio.....	85
Tabla 5.1.6.21	Tipos de coberturas en la zona de estudio	86
Tabla 5.1.6.22	Datos tomados durante el inventario de puntos de agua	89
Tabla 5.1.6.23	Puntos de agua subterránea levantados en campo.....	90
Tabla 5.1.6.24	Resultados de parámetros fisicoquímicos in situ. pH: potencial hidrógeno; ORP: potencial de óxido – reducción; CE: conductividad eléctrica, SDT: sólidos disueltos totales; S: salinidad; T: Temperatura.....	103

Tabla 5.1.6.25	Resumen de las características de los piezómetros analizados para el sistema de flujo subterráneo	121
Tabla 5.1.6.26	Resumen estadístico de la cota piezométrica.....	123
Tabla 5.1.6.27	Pruebas Slug en piezómetros. GEOSUB y PERFOTEC, 2012..	129
Tabla 5.1.6.28	Resumen pruebas Slug en las UHG-5 y UHG-7	131
Tabla 5.1.6.29	Resultados pruebas Lefranc y Lugeon, 2012 y 2013	132
Tabla 5.1.6.30	Resultados pruebas Lefranc y Lugeon, 2024 y 2025	138
Tabla 5.1.6.31	Resumen de los pozos de bombeo con pruebas a caudal constante, GEOSUB 2012	144
Tabla 5.1.6.32	Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-01 y el piezómetro PZA-12-01-1...	145
Tabla 5.1.6.33	Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-03 y el piezómetro PZA-12-03-1...	146
Tabla 5.1.6.34	Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-06 y el piezómetro PZA-12-06-1...	147
Tabla 5.1.6.35	Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-08 y el piezómetro PZA-12-08-1...	148
Tabla 5.1.6.36	Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-10.....	149
Tabla 5.1.6.37	Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-11 y el piezómetro PZA-12-11-1...	149
Tabla 5.1.6.38	Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-14 y el piezómetro PZA-12-14-1...	150
Tabla 5.1.6.39	Resumen de parámetros hidráulicos de las unidades de la zona de estudio 151	
Tabla 5.1.6.40	Red de monitoreo hidrogeoquímico e isotópico	152
Tabla 5.1.6.41	Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 1.....	155
Tabla 5.1.6.42	Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 2.....	159
Tabla 5.1.6.43	Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 3.....	163
Tabla 5.1.6.44	Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 4.....	167
Tabla 5.1.6.45	Campañas de monitoreo hidroquímica anteriores a 2025.....	171
Tabla 5.1.6.46	Tipo de agua identificada para las distintas campañas de monitoreo hidroquímico (2012-2017)	171

Tabla 5.1.6.47	Resultados de laboratorio de los puntos de monitoreo. Campaña 1.	
(2025)	178	
Tabla 5.1.6.48	Resultados de parámetros microbiológicos de los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	180
Tabla 5.1.6.49	Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	182
Tabla 5.1.6.50	Error aceptable de balance iónico según la conductividad eléctrica	190
Tabla 5.1.6.51	Clasificación hidrogeoquímica de los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	194
Tabla 5.1.6.52	Resultados de laboratorio de los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)	207
Tabla 5.1.6.53	Resultados de parámetros microbiológicos de los puntos de monitoreo. Campaña 2.....	209
Tabla 5.1.6.54	Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 2.....	211
Tabla 5.1.6.55	Error de balance iónico según la conductividad eléctrica.....	219
Tabla 5.1.6.56	Clasificación hidrogeoquímica de los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)	224
Tabla 5.1.6.57	Límites de detección de tritio	242
Tabla 5.1.6.58	Puntos de la red de monitoreo isotópico de los años 2020 y 2021	243
Tabla 5.1.6.59	Puntos de monitoreo isotópico y parámetros de campo. Enero de 2020	246
Tabla 5.1.6.60	Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 1. Enero 2020..	250
Tabla 5.1.6.61	Resultados de tritio campaña 1 – época seca. Laboratorio Wessling. Enero 2020	252
Tabla 5.1.6.62	Puntos de monitoreo isotópico y parámetros de campo. Febrero 2020	253
Tabla 5.1.6.63	Resultados de deuterio y oxígeno 18 de campaña 2. Febrero 2020	257
Tabla 5.1.6.64	Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de mayo 2020.....	258
Tabla 5.1.6.65	Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 3. Mayo 2020...	262
Tabla 5.1.6.66	Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de junio 2020	263
Tabla 5.1.6.67	Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 4. Junio 2020...	267
Tabla 5.1.6.68	Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de julio 2020	268
Tabla 5.1.6.69	Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 5. Julio 2020	271

Tabla 5.1.6.70	Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de agosto 2020	272
Tabla 5.1.6.71	Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 6. Agosto 2020	275
Tabla 5.1.6.72	Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de septiembre-octubre de 2020	276
Tabla 5.1.6.73	Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 7. Septiembre 2020	279
Tabla 5.1.6.74	Resultados de tritio campaña 7 – época húmeda. Laboratorio Wessling	280
Tabla 5.1.6.75	Puntos de monitoreo y parámetros en sitio medidos durante la campaña 8 –octubre 2020.....	281
Tabla 5.1.6.76	Resultados de deuterio y oxígeno 18	283
Tabla 5.1.6.77	Puntos de monitoreo y parámetros en sitio medidos durante la campaña 9 – noviembre 2020	285
Tabla 5.1.6.78	Resultados de análisis de los isótopos deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo. Noviembre 2020	287
Tabla 5.1.6.79	Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 10 enero del 2021.....	289
Tabla 5.1.6.80	Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo –campaña 10. Enero 2021	292
Tabla 5.1.6.81	Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 11 febrero del 2021	294
Tabla 5.1.6.82	Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo – campaña 11. febrero 2021.....	296
Tabla 5.1.6.83	Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 12 marzo del 2021	298
Tabla 5.1.6.84	Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo – campaña 12. marzo 2021	301
Tabla 5.1.6.85	Resultados de tritio campaña 7 – época transición seca-húmeda. Laboratorio Wessling	302
Tabla 5.1.6.86	Ubicación y cota de los recolectores de agua lluvia.....	303
Tabla 5.1.6.87	Parámetros del ajuste lineal de la línea meteórica local	308
Tabla 5.1.6.88	Estimación del tiempo de decaimiento suponiendo un modelo de flujo pistón y función de entrada de tritio constante	316
Tabla 5.1.6.89	Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 1 febrero 2025.	320
Tabla 5.1.6.90	Resultados de tritio campaña 1 febrero de 2025	321
Tabla 5.1.6.91	Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 2 marzo 2025 ..	324
Tabla 5.1.6.92	Resultados de tritio campaña 2 Marzo de 2025.....	325

Tabla 5.1.6.93	Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 3 abril (2025)...	328
Tabla 5.1.6.94	Resultados de tritio campaña 3 abril de 2025.....	330
Tabla 5.1.6.95	Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 4 abril (2025)...	333
Tabla 5.1.6.96	Resultados de tritio campaña 4. mayo de 2025.....	335
Tabla 5.1.6.97	Número de muestras aplicando la ecuación de Price	351
Tabla 5.1.6.98	Ejemplo de aseguramiento de la calidad/control de la calidad (QA/QC)	353
Tabla 5.1.6.99	Resumen de Pruebas Geoquímicas – Roca de Desmonte y Paredes del Tajo.....	362
Tabla 5.1.6.100	Resumen de Pruebas Geoquímicas – Relaves	364
Tabla 5.1.6.101	Resultados del análisis de difracción de rayos X (%) para réplicas de muestras de barriles	369
Tabla 5.1.6.102	Resumen de parámetros que exceden diez veces las abundancias corticales.....	385
Tabla 5.1.6.103	Resumen de concentraciones estables para parámetros seleccionados pruebas de celdas de humedad en roca estéril (en mg/L).....	387
Tabla 5.1.6.104	Resumen de concentraciones estables para parámetros seleccionados pruebas de celdas de humedad en roca estéril (en mg/L).....	387
Tabla 5.1.6.105	Resumen de promedios de pruebas en barril. Concentraciones de lixiviados para parámetros seleccionados	392
Tabla 5.1.6.99	Subunidades que conforman la Unidad Hidrogeológica 1 (UHG-1)	400
Tabla 5.1.6.100	Resumen Unidades Hidrogeológicas en asociación con las unidades geológicas	404
Tabla 5.1.6.101	Valoración de la vulnerabilidad con el método GOD	410
Tabla 5.1.6.102	Clasificación parámetros GOD	412
Tabla 5.1.6.103	Resumen de las áreas – Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos – GOD	413
Tabla 5.1.6.104	Valoración de parámetros para el método DRASTIC.....	415
Tabla 5.1.6.105	Factores de ponderación para el método DRASTIC	417
Tabla 5.1.6.106	Grados de vulnerabilidad general del método DRASTIC	417
Tabla 5.1.6.107	Pesos asignados a las diferentes variables evaluadas. Método DRASTIC	418
Tabla 5.1.6.108	Resumen de las áreas – Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos – DRASTIC.....	424
Tabla 5.1.6.109	Asignación de las conductividades hidráulicas iniciales para la calibración del modelo numérico.	453

Tabla 5.1.6.110	Objetivos de calibración estacionaria incorporados al modelo numérico.	457
Tabla 5.1.6.111	Parámetros del modelo numérico de flujo en escenario inicial y final de calibración	459
Tabla 5.1.6.112	Síntesis de las métricas estadísticas de evaluación de ajuste .	460
Tabla 5.1.6.113	Resultado del balance hídrico en estado estacionario en el modelo calibrado.....	461
Tabla 5.1.6.114	Variaciones temporales mensuales del nivel piezométrico registrados en los puntos de monitoreo.....	464
Tabla 5.1.6.115	Asignación de los parámetros de almacenamiento a las unidades hidrogeológicas dentro del modelo numérico	466
Tabla 5.1.6.116	Síntesis del balance hídrico en el dominio del modelo en promedio temporal para el año de simulación.	472
Tabla 5.1.6.117	Parametrización de las obras mineras proyectadas e incorporadas dentro del modelo numérico de flujo subterráneo	478
Tabla 5.1.6.118	Caudales proyectados de ingreso hacia las obras mineras proyectadas e incorporadas dentro del modelo numérico de flujo subterráneo	520
Tabla 5.1.6.119	Caudales proyectados de infiltración desde las obras mineras proyectadas e incorporadas dentro del modelo numérico de flujo subterráneo	520
Tabla 5.1.6.120	Variables y parámetros del análisis de afectación en la quebrada Guacas	526
Tabla 5.1.6.121	Síntesis de la variación de parámetros y los resultados de la sensibilidad de las variables frente a dichos parámetros.....	527

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1.6.1Área externa e interna del tajío Gramalote y ubicación de las perforaciones. Fuente: (GCL 2026).....	6
Figura 5.1.6.2Metodología para el cálculo del índice RQD.....	15
Figura 5.1.6.3Frecuencia del RQD registrado en las perforaciones	16
Figura 5.1.6.4RQD registrado en las perforaciones según la profundidad.	18
Figura 5.1.6.5Metodología de la Ley Cúbica.....	19
Figura 5.1.6.6Diagrama de frecuencia de Kamp para los 451 datos y la proyección estereográfica de los cuatro (4) grupos identificados con mayor frecuencia....	21
Figura 5.1.6.7Diagrama de conductividades usando la Ley Cúbica y la proyección estereográfica de los cuatro (4) grupos identificados con mayor conductividad hidráulica.	22
Figura 5.1.6.8Peso hidráulico de los 451 datos medidos en campo y la proyección estereográfica de las cinco (5) familias de discontinuidades más frecuentes y conductoras según la metodología de Chica, (1979).....	24
Figura 5.1.6.9Localización de los puntos que cuentan con información de conductividad hidráulica y su ubicación con respecto a las fallas del área de estudio.	25
Figura 5.1.6.10Ubicación de los sondeos eléctricos verticales.....	29
Figura 5.1.6.11 Perfil geológico – geoelectrico A-A'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle del río Nus	33
Figura 5.1.6.12 Perfil geológico – geoelectrico B-B'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle de la quebrada Guacas	34
Figura 5.1.6.13 Ubicación en planta de los perfiles geoelectricos verticales	39
Figura 5.1.6.14 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-1 (A-A')41	
Figura 5.1.6.15 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-2 (B-B')42	
Figura 5.1.6.16 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-3 (C-C')44	
Figura 5.1.6.17 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-4 (D-D')46	
Figura 5.1.6.18 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-5 (E-E')47	
Figura 5.1.6.19 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-6 (F-F')48	
Figura 5.1.6.20 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-7 (G-G')50	
Figura 5.1.6.21 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-8 (H-H')51	
Figura 5.1.6.22 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-9 (I-I') 52	
Figura 5.1.6.23 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-10 (J-J')53	
Figura 5.1.6.24 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-11 (K-K')55	

Figura 5.1.6.25 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-12 (L-L')56	
Figura 5.1.6.26 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-13 (M-M')58	
Figura 5.1.6.27 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-14 (N-N')59	
Figura 5.1.6.28 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-15 (O-O')60	
Figura 5.1.6.29 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-16 (P-P')62	
Figura 5.1.6.30 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-17 (Q-Q')63	
Figura 5.1.6.31 Localización en planta de los ensayos de refracción sísmica y MASW llevados a cabo en el área de interés del proyecto.....	64
Figura 5.1.6.32 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-1	65
Figura 5.1.6.33 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-166	
Figura 5.1.6.34 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-2	67
Figura 5.1.6.35 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-268	
Figura 5.1.6.36 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-3	69
Figura 5.1.6.37 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-370	
Figura 5.1.6.38 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-4	71
Figura 5.1.6.39 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-472	
Figura 5.1.6.40 Bloque diagrama de unidades geológicas.....	73
Figura 5.1.6.41 Mapa de grupos hidrológicos en el área de influencia.....	80
Figura 5.1.6.42 Mapa de coberturas de suelo en el área de estudio.....	81
Figura 5.1.6.43 Distribución espacial de la recarga anual por el método de Balance Hídrico para el área de influencia.....	83
Figura 5.1.6.44 Distribución espacial de la recarga anual por el método de Kennessey para el área de influencia	87
Figura 5.1.6.45 Zonas de recarga.....	88
Figura 5.1.6.46 Inventario de puntos de agua realizado enero y febrero del 2025 ..	99
Figura 5.1.6.47 Unidad geológica superficial donde afloran los manantiales	102
Figura 5.1.6.48 Valores de sólidos totales disueltos para los puntos inventariados	108
Figura 5.1.6.49 Distribución espacial de los valores de Tds de los puntos inventariados.....	109
Figura 5.1.6.50 Valores de conductividad eléctrica para los puntos inventariados	110
Figura 5.1.6.51 Distribución espacial de los valores de conductividad eléctrica de los puntos inventariados	111
Figura 5.1.6.52 Valores de pH para los puntos inventariados	112
Figura 5.1.6.53 Distribución espacial de los valores de pH de los puntos inventariados.....	113

Figura 5.1.6.54 Valores de temperatura para los puntos inventariados.....	114
Figura 5.1.6.55 Distribución espacial de los valores de temperatura de los puntos inventariados.....	115
Figura 5.1.6.56 Valores de óxido - reducción para los puntos inventariados.....	116
Figura 5.1.6.57 Distribución espacial de los valores de óxido - reducción de los puntos inventariados.....	117
Figura 5.1.6.58 Valores de salinidad para los puntos inventariados.....	118
Figura 5.1.6.59 Distribución espacial de los valores de salinidad de los puntos inventariados.....	119
Figura 5.1.6.60 Ubicación de piezómetros para análisis de flujo subterráneo	120
Figura 5.1.6.61 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-3 – Depósitos aluviales.....	124
Figura 5.1.6.62 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-5 – Saprolito arenoso. Piezómetros PZS 12-12, PZ4 y PZS12-14.....	125
Figura 5.1.6.63 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-5 – Saprolito arenoso. Piezómetros PZS 13-17, DH-TM-100 y PZS-12-05.....	125
Figura 5.1.6.64 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-7 – Roca fresca fracturada. Piezómetros PZR 13-07, DH-FS-309 y BH-5M-08	126
Figura 5.1.6.65 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-7 – Roca fresca fracturada. Piezómetros BH-5M-03, PZR 13-09 y PZR 13-05	126
Figura 5.1.6.66 Mapa de isopiezas	128
Figura 5.1.6.67 Distribución espacial de los piezómetros en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Slug – GEOSUB y PERFOTEC 2012.....	130
Figura 5.1.6.68 Distribución espacial de los piezómetros en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Lefranc y Lugeon – 2012 y 2013	137
Figura 5.1.6.69 Distribución espacial de las perforaciones en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Lefranc y Lugeon – 2024 - 2025.....	143
Figura 5.1.6.70 Distribución espacial de los puntos donde se llevaron a cabo las pruebas de bombeo – GEOSUB 2012	145
Figura 5.1.6.71 Puntos de la red de Monitoreo	154
Figura 5.1.6.72 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1	157
Figura 5.1.6.73 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 1.....	158
Figura 5.1.6.74 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1	159

Figura 5.1.6.75 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2	161
Figura 5.1.6.76 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 2.....	161
Figura 5.1.6.77 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2	162
Figura 5.1.6.78 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 3	165
Figura 5.1.6.79 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 3. pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 3	165
Figura 5.1.6.80 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 3	166
Figura 5.1.6.81 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 4	168
Figura 5.1.6.82 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 4.....	169
Figura 5.1.6.83 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 4	170
Figura 5.1.6.84 Diagrama de Piper. Campaña 1 (marzo 2012)	175
Figura 5.1.6.85. Diagrama de Piper. Campaña 2 (octubre 2012)	175
Figura 5.1.6.86 Diagrama de Piper. Campaña 4 (marzo 2016) y campaña 5 (noviembre 2016)	176
Figura 5.1.6.87 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	183
Figura 5.1.6.88 Distribución espacial de la temperatura en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	184
Figura 5.1.6.89 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 1. (2025)....	185
Figura 5.1.6.90 Distribución espacial del pH en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	185
Figura 5.1.6.91 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	186
Figura 5.1.6.92 Distribución espacial de la conductividad eléctrica en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	187
Figura 5.1.6.93 Oxígeno disuelto registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	188
Figura 5.1.6.94 Distribución espacial del oxígeno disuelto los puntos de monitoreo. Campaña 1. (2025)	189
Figura 5.1.6.95 Valor absoluto del error de balance iónico en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	190
Figura 5.1.6.96 Diagramas de Stiff para el reservorio artificial y los puntos de agua superficial Campaña 1 (2025)	191
Figura 5.1.6.97 Diagramas de Stiff para el aljibe y manantiales. Campaña 1. Campaña 1 (2025)	192

Figura 5.1.6.98 Diagramas de Stiff para los piezómetros. Campaña 1 (2025)	193
Figura 5.1.6.99 Diagrama de Piper para el reservorio artificial y puntos de agua superficial. Campaña 1. (2025)	195
Figura 5.1.6.100 Diagrama de Piper para el aljibe y manantiales. Campaña 1 (2025)	196
Figura 5.1.6.101 Diagrama de Piper para los piezómetros. Campaña 1. (2025) ...	196
Figura 5.1.6.102 Perfil esquemático con las facies hidroquímicas de algunos puntos de monitoreo	197
Figura 5.1.6.103 Diagrama de Chadha. Campaña 1. (2025).....	198
Figura 5.1.6.104 Isoconcentraciones de Calcio - Campaña 1 febrero 2025	199
Figura 5.1.6.105 Isoconcentraciones de Conductividad eléctrica - Campaña 1 febrero 2025.....	200
Figura 5.1.6.106 Isoconcentraciones de hierro - Campaña 1 febrero 2025.....	201
Figura 5.1.6.107 Isoconcentraciones de potasio - Campaña 1 febrero 2025.....	202
Figura 5.1.6.108 Isoconcentraciones de magnesio - Campaña 1 febrero 2025.....	203
Figura 5.1.6.109 Isoconcentraciones de sodio - Campaña 1 febrero 2025.....	204
Figura 5.1.6.110 Isoconcentraciones de pH - Campaña 1 febrero 2025	205
Figura 5.1.6.111 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)	213
Figura 5.1.6.112 Distribución espacial de la temperatura en los puntos de monitoreo Campaña 2	213
Figura 5.1.6.113 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)...	214
Figura 5.1.6.114 Distribución espacial del pH en los puntos de monitoreo Campaña 2 (2025)	214
Figura 5.1.6.115 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)	215
Figura 5.1.6.116 Distribución espacial de la conductividad eléctrica en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2015)	216
Figura 5.1.6.117 Oxígeno disuelto registrado en los puntos de monitoreo Campaña 2 (2025)	217
Figura 5.1.6.118 Distribución espacial del oxígeno disuelto los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)	218
Figura 5.1.6.119 Valor absoluto del error de balance iónico en los puntos de monitoreo Campaña 2 (2025)	219
Figura 5.1.6.120 Diagramas de Stiff para el reservorio artificial y los puntos de agua superficial. Campaña 2 (2025)	220
Figura 5.1.6.121 Diagramas de Stiff para el aljibe y manantiales. Campaña 2 (2025)	221
Figura 5.1.6.122 Diagramas de Stiff para los piezómetros Campaña 2 (2025).....	223

Figura 5.1.6.123 Diagrama de Piper para el reservorio artificial y puntos de agua superficial. Campaña 2 (2025)	226
Figura 5.1.6.124 Diagrama de Piper para el aljibe y manantiales. Campaña 2 (2025).....	226
Figura 5.1.6.125 Diagrama de Piper para los piezómetros. Campaña 2 (2025)	227
Figura 5.1.6.126 Isoconcentraciones de Calcio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-CA).....	228
Figura 5.1.6.127 Isoconcentraciones de Conductividad eléctrica - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-CH)	229
Figura 5.1.6.128 Isoconcentraciones de hierro - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-FE)	230
Figura 5.1.6.129 Isoconcentraciones de potasio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-K)	231
Figura 5.1.6.130 Isoconcentraciones de magnesio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-MG).....	232
Figura 5.1.6.131 Isoconcentraciones de sodio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-NA).....	233
Figura 5.1.6.132 Isoconcentraciones de pH - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-PH).....	234
Figura 5.1.6.133 Línea Meteorica Mundial	239
Figura 5.1.6.134 Desviaciones de la línea meteórica	240
Figura 5.1.6.135 Estación de medición de tritio Bogotá - Colombia	241
Figura 5.1.6.136 Estaciones de tritio en Colombia y algunos países fronterizos ...	242
Figura 5.1.6.137 pH de los puntos que conforman la red de monitoreo de isótopos. Enero 2020	248
Figura 5.1.6.138 Conductividad eléctrica de los puntos que conforman la red de monitoreo de isótopos. Enero 2020.....	248
Figura 5.1.6.139 Conductividad eléctrica vs profundidad en pozos y piezómetros	249
Figura 5.1.6.140 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno 18 y deuterio campaña 1. Enero 2020	250
Figura 5.1.6.141 Estación de medición de tritio Bogotá - Colombia	252
Figura 5.1.6.142 Estaciones de tritio en Colombia y algunos países fronterizos ...	252
Figura 5.1.6.143 pH de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Febrero 2020.....	255
Figura 5.1.6.144 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Febrero 2020	256
Figura 5.1.6.145 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno 18 y deuterio campaña 2. Febrero 2020	257
Figura 5.1.6.146 pH de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Mayo 2020..	260

Figura 5.1.6.147 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Mayo 2020	261
Figura 5.1.6.148 Línea Meteorica Mundial y composición isotópica de los puntos de muestreo campaña 3. Mayo 2020	262
Figura 5.1.6.149 pH de los puntos que conforman la red de monitoreo. Junio 2020	265
Figura 5.1.6.150 Conductividad eléctrica de los puntos que conforman la red de monitoreo. Junio 2020.....	266
Figura 5.1.6.151 Composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo y línea meteorica mundial campaña 4. Junio 2020	267
Figura 5.1.6.152 pH de los puntos de la red de monitoreo. Julio 2020.....	270
Figura 5.1.6.153 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 5. Julio 2020	270
Figura 5.1.6.154 Línea meteorica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 5. Julio 2020.....	271
Figura 5.1.6.155 pH de los puntos de la red de monitoreo Campaña 6.....	274
Figura 5.1.6.156 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 6	274
Figura 5.1.6.157 Línea meteorica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 6. Agosto 2020	275
Figura 5.1.6.158 pH de los puntos de la red de monitoreo. Septiembre 2020	277
Figura 5.1.6.159 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 7 Septiembre 2020	278
Figura 5.1.6.160 Línea meteorica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 7. Septiembre 2020	279
Figura 5.1.6.161 pH de los puntos de la red de monitoreo. Octubre 2020.....	282
Figura 5.1.6.162 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo. Octubre 2020	283
Figura 5.1.6.163 Línea meteorica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 8. Octubre 2020	284
Figura 5.1.6.164 pH de los puntos de la red de monitoreo campaña 9. Noviembre 2020.....	286
Figura 5.1.6.165 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 9 Noviembre 2020	287
Figura 5.1.6.166 Línea meteorica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 9. Noviembre 2020.....	289
Figura 5.1.6.167 pH de los puntos de monitoreo campaña 10. Enero 2021	291
Figura 5.1.6.168 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 10. Enero 2021	291

Figura 5.1.6.169 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 10. Enero 2021	293
Figura 5.1.6.170 pH de los puntos de monitoreo campaña 11. Febrero 2021.	295
Figura 5.1.6.171 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 11. Febrero 2021	296
Figura 5.1.6.172 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 11. Febrero 2021	298
Figura 5.1.6.173 pH de los puntos de monitoreo campaña 12. Marzo 2021.....	300
Figura 5.1.6.174 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 12. Marzo 2021	300
Figura 5.1.6.175 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 12. Marzo 2021	302
Figura 5.1.6.176 Variación temporal del volumen registrado en los recolectores de agua lluvia.....	304
Figura 5.1.6.177 Precipitación media multianual para la zona de estudio	304
Figura 5.1.6.178 Variación temporal de la concentración de deuterio en el agua lluvia	305
Figura 5.1.6.179 Evolución temporal del exceso de deuterio en el agua lluvia.....	306
Figura 5.1.6.180 Línea meteórica mundial, local y resultados de isótopos ambientales en el agua lluvia	307
Figura 5.1.6.181 Línea meteórica mundial y composición isotópica del agua superficial.....	308
Figura 5.1.6.182 Evolución temporal del oxígeno 18 en las aguas superficiales y lluvia	309
Figura 5.1.6.183 Composición isotópica del agua subterránea, LMM y marca ponderada del agua lluvia	310
Figura 5.1.6.184 Marca ponderada del agua lluvia, marca promedio del agua subterránea y ciclo isotópica del agua lluvia	311
Figura 5.1.6.185 Deuterio vs altura en el agua lluvia	312
Figura 5.1.6.186 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia.....	312
Figura 5.1.6.187 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia totalizadores T1 y T3.....	312
Figura 5.1.6.188 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia totalizadores T1 y T3.....	313
Figura 5.1.6.189 Marca isotópica promedio del agua subterránea y gradiente de oxígeno 18 en la precipitación.....	314
Figura 5.1.6.190 Marca isotópica promedio del agua subterránea y gradiente de deuterio en la precipitación	314
Figura 5.1.6.191 Resultados de tritio	315

Figura 5.1.6.192 Ubicación espacial de los puntos que conforman la red de monitoreo.....	318
Figura 5.1.6.193 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio. Campaña 1 - febrero de 2025	319
Figura 5.1.6.194 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio. Campaña 2 - marzo de 2025.....	323
Figura 5.1.6.195 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio. Campaña 3 - abril de 2025.....	328
Figura 5.1.6.196 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio. Campaña 4 - abril de 2025.....	333
Figura 5.1.6.197 Concentración de tritio en el agua lluvia en campañas de 2025 .	336
Figura 5.1.6.198 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de pH en piezómetros	338
Figura 5.1.6.199 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de oxígeno disuelto en piezómetros	339
Figura 5.1.6.200 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de conductividad eléctrica en piezómetros	340
Figura 5.1.6.201 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de pH en manantiales	341
Figura 5.1.6.202 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de oxígeno disuelto en manantiales.....	342
Figura 5.1.6.203 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de conductividad eléctrica en manantiales	343
Figura 5.1.6.204 Esquema de protocolo de muestreo para análisis de Drenaje ácido	345
Figura 5.1.6.205 Distribución litológica a partir de testigos de exploración tajo Gramalote	346
Figura 5.1.6.206 Modelo de alteración del yacimiento - distribución en planta	347
Figura 5.1.6.207 Modelo de alteración del yacimiento – Distribución sección B-B’	347
Figura 5.1.6.208 Modelo de alteración del depósito – Sección del núcleo del depósito	348
Figura 5.1.6.209 Representación de mecanismo de formación de drenaje ácido..	350
Figura 5.1.6.210 Paredes y fondo de tajo	351
Figura 5.1.6.211 Distribución del porcentaje de muestras ensayos ABA según tipo de roca y suelo.....	352
Figura 5.1.6.212 Distribución porcentual de materiales en la zona de explotación	354
Figura 5.1.6.213 Distribución en planta de tipos de alteraciones	355
Figura 5.1.6.214 Distribución del tipo de alteraciones sección A-A’	355
Figura 5.1.6.215 Distribución del tipo de alteraciones sección B-B’	356
Figura 5.1.6.216 Distribución del tipo de alteraciones sección C-C’	356

Figura 5.1.6.217 Distribución del porcentaje de muestras por litología	357
Figura 5.1.6.218 Distribución del porcentaje de muestras por alteración (dominios geoquímicos)	358
Figura 5.1.6.219 Distribución del porcentaje de muestras por litología y alteración (dominios geoquímicos)	359
Figura 5.1.6.220 Distribución de las muestras para caracterización de DAR en zona de explotación.....	360
Figura 5.1.6.221 Discretización de la posición de las muestras (cota en m.s.n.m.).	361
Figura 5.1.6.222 Sulfuro de azufre versus azufre total por tipo de roca (n= 70)	371
Figura 5.1.6.223 Sulfuro de azufre versus azufre total por tipo de alteración (n= 26)	371
Figura 5.1.6.224 Diagrama de cajas y bigotes de azufre total por tipo de roca	372
Figura 5.1.6.225 Diagrama de cajas y bigotes de azufre total por tipo de alteración	373
Figura 5.1.6.226 NP de carbonato versus potencial ácido por tipo de roca (n=585)	374
Figura 5.1.6.227 Detalle a escala amplia de NP de carbonato versus potencial ácido por tipo de roca (n=585).....	374
Figura 5.1.6.228 Azufre total vs CO ₃ -NPR (ABA) Tonalita.....	375
Figura 5.1.6.229 Azufre total vs CO ₃ -NPR (Total Carbono) – Tonalita	375
Figura 5.1.6.230 Azufre total vs CO ₃ -NPR – Saprolito.....	376
Figura 5.1.6.231 Azufre total vs CO ₃ -NPR (Total Carbono) – Saprolito	376
Figura 5.1.6.232 Azufre total vs CO ₃ -NPR – roca saprolítica.....	377
Figura 5.1.6.233 Azufre total vs CO ₃ -NPR (Total Carbono) – roca saprolítica.....	377
Figura 5.1.6.234 Sulfuro de azufre versus pH NAG en réplicas de muestras de barril	378
Figura 5.1.6.235 Distribución en planta y sección de muestras clasificada como no-PAG, PAG y UC.....	381
Figura 5.1.6.236 Clasificación DAR por litologías.	382
Figura 5.1.6.237 Clasificación DAR por alteraciones.	382
Figura 5.1.6.238 Tendencias temporales de concentraciones de lixiviados en celdas de humedad a) pH campo, b) sulfato, c) cobre y d) molibdeno.....	389
Figura 5.1.6.239 Tendencias temporales de concentraciones de lixiviados en barriles a) pH campo, b) sulfato, c) cobre y d) molibdeno.	393
Figura 5.1.6.240 Distribución en planta de mineralización y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.	395
Figura 5.1.6.241 Distribución en sección A-A' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.....	396
Figura 5.1.6.242 Distribución en sección B-B' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.....	397

Figura 5.1.6.243. Distribución en sección C-C' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.....	398
Figura 5.1.6.212 Unidades hidrogeológicas de estudios previos y su correlación con las unidades definidas en este estudio.....	399
Figura 5.1.6.213 Unidades hidrogeológicas	405
Figura 5.1.6.214 Sistema de flujos de agua subterránea	406
Figura 5.1.6.215 Zonas de recarga y descarga.....	407
Figura 5.1.6.216 Direcciones de flujo.....	408
Figura 5.1.6.217 Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca.	410
Figura 5.1.6.218 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos. Metodología GOD	412
Figura 5.1.6.219 Parámetro nivel freático (Dr). Método DRASTIC	419
Figura 5.1.6.220 Parámetro Recarga (Rr). Método DRASTIC.....	419
Figura 5.1.6.221 Parámetro medio acuífero (Ar). Método DRASTIC.....	420
Figura 5.1.6.222 Parámetro tipo de suelo (Sr). Método DRASTIC	420
Figura 5.1.6.223 Parámetro Topografía (Tr). Método DRASTIC	421
Figura 5.1.6.224 Parámetro naturaleza de la zona no saturada (Ir). Método DRASTIC	421
Figura 5.1.6.225 Parámetro conductividad hidráulica (Cr). Método DRASTIC	422
Figura 5.1.6.226 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos. Método DRASTIC	423
Figura 5.1.6.227 Unidades hidrogeológicas del área de estudio previas a la construcción del proyecto.....	426
Figura 5.1.6.228 Unidades hidrogeológicas del área de estudio con zonas de depósitos proyectados	427
Figura 5.1.6.229 Perfil esquemático del flujo subterráneo en la zona de estudio ..	427
Figura 5.1.6.230 Bloque diagrama esquemático de las unidades hidrogeológicas en la zona de estudio.	428
Figura 5.1.6.231 Teoría de los ciclos crecientes en los sistemas de aguas subterráneas.....	430
Figura 5.1.6.232 Teoría de los ciclos crecientes en los sistemas de aguas subterráneas	431
Figura 5.1.6.233 a) Cuadrícula de diferencias finitas en 2D ilustrando la notación de nodos, b) malla de elementos finitos en 2D ilustrando la notación de nodos y elementos	433

Figura 5.1.6.234 a) Vista en planta de una porción de elementos alrededor del nodo L en una malla de elementos finitos. (b) Vista tridimensional de la función base nodal $N(x,y)$	434
Figura 5.1.6.235 Área de influencia para el modelo hidrogeológico conceptual y numérico propuesto	436
Figura 5.1.6.236 Zona activa de modelamiento incorporada en FEFLOW y elementos que definen la malla principal (supermesh: líneas azules – representan fallas, drenajes dobles y sencillos, puntos verdes – representan puntos de agua subterránea, polígono fucsia – representa el área del proyecto).....	437
Figura 5.1.6.237 Geometría de la malla de elementos finitos construida para el modelo numérico con sus respectivas zonas de refinamiento	438
Figura 5.1.6.238 Tamaño de los elementos finitos que componen la malla computacional, denotando la implementación multiescalar, pasando de tamaños regionales (106 m) hasta tamaños locales (0,25 m)	439
Figura 5.1.6.271 Ángulos interiores máximos de los elementos finitos que componen la malla computacional, denotando optimización de la malla con ángulos alrededor de 60 y 80°	440
Figura 5.1.6.240 Elevación (top) de cada una de las capas y cortes (slices) que representan las UHG en la geometría vertical del modelo.....	442
Figura 5.1.6.241 Espesores de las unidades hidrogeológicas incorporados dentro del modelo numérico de flujo y que definen su configuración geométrica vertical.....	443
Figura 5.1.6.242 Vistas 3D de la configuración geométrica del modelo numérico, representando las elevaciones (panel superior izquierdo) y las elevaciones con la configuración de la malla 3D de elementos finitos (panel superior derecho y panel inferior).....	444
Figura 5.1.6.243 Corte transversal del borde Este del dominio del modelo donde se evidencia la configuración de las capas y espesores de las unidades hidrogeológicas de interés	445
Figura 5.1.6.244 Representación de los nodos configurados con la condición de frontera tipo Constant Head (HH) en el modelo. a) vista en planta capa 1, b) vista 3D.....	447
Figura 5.1.6.245 Representación de los nodos configurados con la condición de frontera tipo Transfer Flow (TFBC) en el modelo. a) vista en planta capa 1, b) vista 3D.....	448
Figura 5.1.6.246 Serie diaria de variaciones del almacenamiento hídrico subterráneo (GWS) para la zona de estudio en promedio espacial derivados de GRACE y GLDAS – CLSM.....	450
Figura 5.1.6.247 Comparación del comportamiento diario, mensual y anual de GWS y la precipitación en la zona de estudio.....	451
Figura 5.1.6.248 Ciclo promedio anual de GWS y la precipitación para el periodo 2003 – 2024 en la zona de estudio	452

Figura 5.1.6.249 Materiales asignados a la capa 1 – corte 1 y capa 6 – corte 6 en el modelo numérico, representando la distribución espacial de las UHG	454
Figura 5.1.6.250 Unidades hidrogeológicas (UHG) representadas como materiales en el modelo 3D, incluyendo las fallas regionales.	455
Figura 5.1.6.251 Tasa de recarga potencial (en m/d) incorporada al modelo numérico para fines de calibración estacionaria	456
Figura 5.1.6.252. Localización de los piezómetros y manantiales que constituyen los objetivos de calibración	458
Figura 5.1.6.253 Diagrama de dispersión entre los niveles piezométricos (hydraulic head) observados y simulados a partir del modelo numérico de flujo calibrado en estado estacionario	460
Figura 5.1.6.254 Piezometría 3D simulada en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio).....	462
Figura 5.1.6.255 Isopiezas simuladas en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio) y ubicación de perfiles.	462
Figura 5.1.6.256 Perfiles piezométricos en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio)	463
Figura 5.1.6.257 Variaciones temporales de nivel piezométrico observadas en los puntos de monitoreo	464
Figura 5.1.6.258 Recarga asignada en m/d para el trimestre Enero – Marzo (superior) y Abril – Junio (inferior)	467
Figura 5.1.6.259 Recarga asignada en m/d para el trimestre Julio – Septiembre (superior) y Octubre – Diciembre (inferior)	468
Figura 5.1.6.260 Piezometría simulada en la zona de modelamiento en condiciones transitorias (final del año normal)	469
Figura 5.1.6.261 Perfiles piezométricos en la zona de modelamiento en condiciones transitorias (final del año normal)	470
Figura 5.1.6.262 Variaciones de nivel piezométrico en los puntos de calibración simuladas para un año normal en el modelo numérico de flujo	471
Figura 5.1.6.263 Diagrama de dispersión entre los niveles piezométricos (hydraulic head) observados y simulados a partir del modelo numérico de flujo ajustado en estado transitorio.....	471
Figura 5.1.6.264 Configuración topográfica del Tajo Gramalote entre 2029 y 2038: perfiles en dirección Sur – Norte (superior) y Oeste – Este (inferior).....	475
Figura 5.1.6.265 Configuración topográfica del depósito San Antonio para el año 2038. Perfil en dirección SW – NE.	475
Figura 5.1.6.266 Configuración topográfica del depósito San Antonio (línea roja) para el año 2038. perfil en dirección NW -SE.....	476
Figura 5.1.6.267 Configuración topográfica del depósito San Antonio para el año 2038. perfil en dirección NW – SE.....	476

Figura 5.1.6.268 Configuración topográfica del depósito de relaves y el contrafuerte de arenas (presa o pila) para los años iniciales (línea verde) y para la condición final del proyecto (línea roja). Perfiles en dirección W-E (superior) y S-N (inferior).	477
Figura 5.1.6.269 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2029 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.	479
Figura 5.1.6.270 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2030 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.	479
Figura 5.1.6.271 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2031 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.	480
Figura 5.1.6.272 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2032 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.	480
Figura 5.1.6.273 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2033 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.	481
Figura 5.1.6.274 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2034 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.	481
Figura 5.1.6.275 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2035 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.	482
Figura 5.1.6.276 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2036 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.	482
Figura 5.1.6.277 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2037 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.	483
Figura 5.1.6.278 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2038 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.	483
Figura 5.1.6.279 Configuración de cambios en la recarga en la huella de las obras mineras del año 2029 en el modelo hidrogeológico numérico 3D.....	484
Figura 5.1.6.280 Configuración de cambios en la recarga en la huella de las obras mineras del año 2038 en el modelo hidrogeológico numérico 3D.....	484
Figura 5.1.6.281 Configuración de las condiciones de frontera tipo Constant Head con Seepage Face para representar las obras mineras del año 2029 en el modelo hidrogeológico numérico 3D.	485
Figura 5.1.6.282 Configuración de las condiciones de frontera tipo Constant Head para representar las obras mineras del año 2038 en el modelo hidrogeológico numérico 3D.....	485
Figura 5.1.6.283 Configuración de las condiciones de frontera tipo Transfer Flow representando los túneles en la capa 7.....	486
Figura 5.1.6.284 Asignación de los nodos Transfer Flow representando los túneles en el modelo hidrogeológico numérico 3D.	486

Figura 5.1.6.285 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2029 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.	489
Figura 5.1.6.286 Superficie piezométrica simulada a 2029 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).	490
Figura 5.1.6.287 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2029 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.	491
Figura 5.1.6.288 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2030 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.	492
Figura 5.1.6.289 Superficie piezométrica simulada a 2030 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).	493
Figura 5.1.6.290 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2030 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.	494
Figura 5.1.6.291 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2031 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.	495
Figura 5.1.6.292 Superficie piezométrica simulada a 2031 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).	496
Figura 5.1.6.293 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2031 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.	497
Figura 5.1.6.294 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2032 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.	498
Figura 5.1.6.295 Superficie piezométrica simulada a 2032 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).	499
Figura 5.1.6.296 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2032 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.	500
Figura 5.1.6.297 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2033 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.	501
Figura 5.1.6.298 Superficie piezométrica simulada a 2033 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).	502

Figura 5.1.6.299 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2033 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.....	503
Figura 5.1.6.300 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2034 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.	504
Figura 5.1.6.301 Superficie piezométrica simulada a 2034 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).	505
Figura 5.1.6.302 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2034 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.....	506
Figura 5.1.6.303 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2035 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.	507
Figura 5.1.6.304 Superficie piezométrica simulada a 2035 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).	508
Figura 5.1.6.305 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2035 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.....	509
Figura 5.1.6.306 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2036 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.	510
Figura 5.1.6.307 Superficie piezométrica simulada a 2036 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).	511
Figura 5.1.6.308 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2036 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.....	512
Figura 5.1.6.309 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2037 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.	513
Figura 5.1.6.310 Superficie piezométrica simulada a 2037 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).	514
Figura 5.1.6.311 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2037 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.....	515
Figura 5.1.6.312 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2038 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.	516

Figura 5.1.6.313 Superficie piezométrica simulada a 2038 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).	517
Figura 5.1.6.314 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2038 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.....	518
Figura 5.1.6.315 Piezometría simulada después del periodo de cierre y pos-cierre.	519
Figura 5.1.6.316 Caudales de descarga hacia el Tajo Gramalote durante los años de operación de la obra de acuerdo con el avance minero del PTO	521
Figura 5.1.6.317 Caudales de descarga hacia el túnel de decantación durante los años de operación del proyecto	521
Figura 5.1.6.318 Caudales de descarga hacia el túnel de desviación durante los años de operación del proyecto	522
Figura 5.1.6.319 Caudales potenciales de filtración hacia el depósito San Antonio y El Balsal de acuerdo con los avances proyectados del PTO.....	522
Figura 5.1.6.320 Caudales potenciales de filtración hacia las obras de la zona de manejo de colas de acuerdo con los avances proyectados del PTO.....	523
Figura 5.1.6.321 Caudales potenciales de filtración desde el depósito San Antonio y El Balsal de acuerdo con los avances proyectados del PTO.....	524
Figura 5.1.6.322 Caudales potenciales de filtración desde las obras de la zona de manejo de colas de acuerdo con los avances proyectados del PTO.....	525

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 5.1.6.1 Aljibe localizado en el campamento La Mayoría.....	100
Fotografía 5.1.6.2 Piezómetro PZS 12 12 en el sector del Topacio.....	101
Fotografía 5.1.6.3 Manantial M100 localizado en la vereda Guacas abajo.....	101

MODIFICACIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DEL PROYECTO DE MINERÍA DE ORO A CIELO ABIERTO GRAMALOTE.

ATENCION A REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN ADICIONAL ACTA 30 DE 30 DE JUNIO DE 2026

5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

5.1 MEDIO ABIÓTICO

5.1.6 HIDROGEOLOGÍA

Este numeral presenta las principales características hidrogeológicas de los terrenos pertenecientes al proyecto aurífero a cielo abierto Gramalote, teniendo en cuenta los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA Proyectos de Explotación Minera (ANLA, Términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA Proyectos de Explotación Minera , 2016). Dentro de este informe, se presenta la caracterización hidrogeológica para el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote con el fin de describir la dinámica del régimen de aguas subterráneas en las cercanías del proyecto y su interacción con las aguas superficiales, partiendo de la premisa de que un modelo hidrogeológico conceptual (MHC), integra información geológica, hidrológica, hidrodinámica, hidráulica, hidrogeoquímica e isotópica para ilustrar los procesos y flujos que ocurren en las dimensiones espaciales de su dominio.

El estudio de hidrogeología consta de cuatro componentes que alimentan el MHC y presentan los aspectos teóricos fundamentales asociados al estudio de las aguas subterráneas. El primer componente está conformado por la evaluación geológica-geofísica, en donde a partir de métodos directos e indirectos de exploración se caracteriza la geología de superficie y subsuperficie. El segundo componente es la evaluación hidrológica, este se centra en los procesos hidrológicos superficiales, como las precipitaciones, escurrimientos y la evaporación, con la finalidad de estimar la recarga del sistema acuífero (infiltración) por precipitación producto de estos fenómenos. El tercer componente es la evaluación hidráulica, donde se determinan los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas. El cuarto componente es la evaluación hidrogeoquímica e isotópica, la cual permite reconocer facies hidrogeoquímicas, validar sistemas de flujos, precisar edad y origen de las aguas subterráneas y reconocer afectaciones por actividad antrópica. A partir del MHC se construye el modelo hidrogeológico numérico (MHN), que permite simular las condiciones y comportamiento del sistema de aguas en la zona de interés, teniendo en cuenta la configuración actual del proyecto.

En la Tabla 5.1.6.1 se presentan los estudios más relevantes con información hidrogeológica usados en la actualización del actual componente para el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote.

Tabla 5.1.6.1 Estudios base para la caracterización hidrogeológica

Nombre del informe	Autor	Año	Información usada
Estudio hidrogeológico para la línea base del Proyecto Gramalote en el municipio de San Roque en el departamento de Antioquia	Hidrogeocol	2012	Información sobre ensayos geofísicos (perfiles geoelectricos)
Reporte Técnico – Evaluación hidrogeológica – documento técnico – feed rev 0	Golder Associates Perú S.A	2017	Información de localización y diseño de los piezómetros
Respuesta de requerimientos de información adicional Modificación de licencia ambiental - I-0010208-GA Resp Autos R00	Integral S.A	2018	Información sobre ensayos geofísicos (Sondeos eléctricos verticales – SEV y tomografías eléctricas)
Modificación de Licencia Ambiental - I-0010208-GA-ML-R00	Integral S.A.	2018	Obras claves del proyecto
Hydrogeological Conceptual Model Gramalote Feasibility Stage	Golder Associates Perú S.A	2020	Datos de permeabilidad K
Memorando técnico: requerimiento licencia - potencial de generación de drenaje ácido, proyecto Gramalote, Colombia.	Golder Associates Colombia S.A.S.	2020	Información de drenaje minero ácido
Muestreo Isotópico durante un año hidrológico e inventario de puntos de agua subterránea de acuerdo con los términos de referencia de la ANLA para explotación minera, en el proyecto Gramalote ubicado en el municipio de San Roque, Departamento de Antioquia. Informe Final	SHI SAS	2021	Isotopos de 2021
Diseño de la red hidrogeológica del proyecto Gramalote	SHI SAS	2022	Puntos de monitoreo de años anteriores
Actualización del modelo hidrogeológico conceptual y numérico para el proyecto minero Gramalote	SHI SAS	2025	Modelo numérico actualizado
Reporte del diagnóstico y monitoreo de niveles	SHI SAS	2025	Piezómetros activos y mediciones de niveles

Nombre del informe	Autor	Año	Información usada
piezométricos, Monitoreo de isótopos ambientales y muestreo hidroquímico para el Proyecto Minero Gramalote Colombia			
Ensayos geofísicos de refracción sísmica y masw zona la planta	Inteinsa	2025	Información sobre ensayos geofísicos para la zona de la planta

Fuente: Integral S.A. 2025

5.1.6.1 Evaluación geológica/geofísica

5.1.6.1.1 Geología

El área de influencia abiótica para la modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote está localizada en el extremo norte de la cordillera Central al nordeste del departamento de Antioquia. La unidad geológica principal en la zona del proyecto minero la constituye el Batolito Antioqueño, cuerpo intrusivo que conforma el núcleo de la cordillera Central de los Andes colombianos. En el capítulo 5.1.1 Geología se presenta toda la geología del proyecto, incluyendo la figura de la geología regional del proyecto, a continuación, se presenta la información más relevante.

El Batolito Antioqueño (cuarzodiorita (Kqd) y gabros (Kg)) tuvo origen durante el periodo Cretácico, donde ocurrieron eventos de intensa actividad magmática que dieron origen a cuerpos plutónicos de gran importancia. El Batolito Antioqueño presenta variadas facies composicionales con predominio de rocas tipo cuarzodioritas, que varían localmente desde gabros a granodioritas (González I, 2001) y que cubren gran parte del departamento de Antioquia.

La mineralización en este cuerpo se asocia a las últimas fases de cristalización con un alto contenido de sustancias volátiles que se apoyan en la presencia de aplitas y pegmatitas (Gramalote Colombia Limited, 2018), las cuales ocurren en varios episodios de intrusión a lo largo de las fracturas de la roca caja, la cual corresponde al mismo batolito previamente cristalizado, resultando en una red de venas rellenas de feldespato, cuarzo y pirita, calcopirita, molibdenita y otros minerales accesorios (Golder Associates Perú S.A., 2020). El proceso de mineralización aurífera se agrupa en diferentes alteraciones como la potásica y la cuarzo-sericítica que dan cuenta de procesos hidrotermales (Gramalote Colombia Limited, 2015).

Sobre el Batolito Antioqueño se ha desarrollado un perfil de meteorización con espesores importantes de suelos residuales y saprolito, principalmente en zonas de pendientes bajas a moderadas, cimas amplias, quiebres de pendiente, colinas y fondos de los valles, llegando a presentar entre 5,0 y 40,0 m de espesor.

El suelo residual presenta una textura limo arcillosa a arcillosa de color amarillo a rojizo, cubre gran parte del área del proyecto y presenta espesores entre 1,0 a 10,0 m. Por su parte, el saprolito presenta variaciones texturales entre arenoso y limo arenoso de acuerdo con la proporción de cuarzo y minerales máficos en la roca parental. Este horizonte presenta un espesor entre 5,0 y 40,0 m muestra rasgos heredados como planos de diaclasas y bloques con meteorización esferoidal. La zona de transición entre el saprolito y el macizo rocoso (IC-IIA) se caracteriza por presentar bloques frescos a moderadamente

meteorizados en una matriz limosa a arenosa con una proporción de suelo-roca de 60:40 y un espesor de aproximadamente 10,0 m. Los afloramientos de roca con menor grado de meteorización son escasos; en los sitios donde se presenta como en el sector de La Cascada y algunos cortes en taludes viales, suele ser característica la ocurrencia de meteorización esferoidal como núcleos esféricos de roca que se superponen entre ellos con presencia de suelo saprolitizado entre ellos (Gramalote Colombia Limited, 2015).

Sobre el Batolito Antioqueño se encuentran varios depósitos asociados a dinámicas recientes. Los depósitos aluviales (Qal), los cuales son el resultado de la dinámica fluvial de zona que favorece la acumulación de material aluvial en los cauces activos y llanuras de inundación, se asocian principalmente al río Nus y drenajes secundarios que atraviesan la zona como las quebradas San Antonio, Guacas, Palestina, La Colorada, La Bella y La Linda. (Gramalote Colombia Limited, 2015). Están compuestos de grava, arena, limo y arcilla con espesores entre 3 y 15 m (INTEGRAL S.A., 2025).

Se reconocen depósitos coluviales (Qc), especialmente en zonas de pendiente alta a moderada, donde la gravedad es el agente principal, combinada con factores detonantes como la saturación de suelos y el avance de procesos erosivos. Estos depósitos suelen estar constituidos por suelo y bloques de roca que han sido removidos de los horizontes de meteorización más superficiales. Son matriz-soportados, con fragmentos angulosos a subangulosos, meteorizados, y de tamaños generalmente centimétricos. La textura de la matriz varía desde limo arcilloso hasta limo arenoso, y tiene una consistencia principalmente blanda (INTEGRAL S.A., 2025). Los depósitos muestran poco transporte, acumulándose en la base de las laderas o en zonas de cambio de pendiente hacia áreas menos inclinadas. Su ocurrencia se clasifica como puntual, con espesores usualmente menores a 10,0 m, cubriendo áreas pequeñas (Gramalote Colombia Limited, 2015).

Además, se presentan depósitos de flujo (Qfl), constituidos por material matriz-soportado proveniente del suelo residual del batolito antioqueño, que se acumulan en vaguadas con poca cobertura vegetal (INTEGRAL S.A., 2025) y se identifican depósitos antrópicos (Qll) asociados a los rellenos de las obras de infraestructura vial que conducen de Barbosa a Puerto Berrío, así como a la disposición de material sobrante contiguo a su trazado. Estos depósitos están compuestos por material heterogéneo con una relación variable entre tamaños gruesos y finos (INTEGRAL S.A., 2025).

Finalmente, dentro del diseño minero se contempla la construcción de 13 zonas de disposición de material. Entre ellas se encuentran los depósitos de material estéril de San Antonio y El Balsal, los cuales se utilizarán principalmente para almacenar tonalita y granodiorita extraídas durante las operaciones mineras, dispuestas en forma de guijos, cantos de roca, grava, arena y una pequeña fracción de finos (Gramalote Colombia Limited, 2015).

Por otra parte, los residuos generados en el procesamiento del mineral se depositarán en la presa de colas o relaves, la cual se construirá en la cuenca de la quebrada Palestina. El diseño de esta presa incluye una estructura inicial o "presa de arranque", conformada por material residual y saprolito compactado. A medida que se generen las colas de flotación, se construirá la presa de arena utilizando como material base la fracción gruesa de dichos relaves, mientras que la fracción fina se depositará en el embalse de colas (Gramalote Colombia Limited, 2015).

Adicionalmente se tiene proyectada la construcción de otros 10 depósitos de materiales sobrantes - ZODMES, en donde se dispondrá material removido de los horizontes de meteorización proveniente de las excavaciones de las vías para construcción y plataformas (Gramalote Colombia Limited, 2015), el material de estos depósitos corresponderá principalmente a una mezcla de limos con arenas limosas y arcillosas (INTEGRAL S.A., 2025).

A. Geología estructural

a. Geología estructural regional

A nivel regional predominan 2 grandes sistemas de fallas que limitan el cuerpo batolítico; al occidente se encuentra el sistema de fallas Romeral, mientras que el sistema de fallas Palestina define el marco tectónico al oriente. Al interior del batolito se han definido fallas asociadas a la intrusión con rumbos predominantes en sentido NW-SE (SGC, 2015).

Chica (2012) identificó en la zona de influencia del proyecto varias fallas geológicas, configurando un modelo estructural a escala más detallada, destacando un primer sistema de fallas en sentido N45°W a N60°W que controla tramos del río Nus y la quebrada Guacas. Se considera una estructura inferida por el control estructural ejercido en los drenajes, aunque localmente se observan geoformas tipo escarpes, silletas y bermas alrededor del eje del río.

El segundo sistema presenta un sentido N40°E a N60°E que controla el tramo inferior de la quebrada Guacas en inmediaciones de su desembocadura al río Nus. Se definen además sistemas de falla complementarios, unos en sentido N-S se consideran evidencias locales de fallas regionales, mientras que estructuras en sentido E-W se asocian a estructuras derivadas de los esfuerzos que generaron el fracturamiento del macizo rocoso. Finalmente, se reconoció la Falla Cisneros como una estructura en sentido N70°W con buzamiento al norte y una longitud de hasta 45 km; se localiza al este de la cabecera urbana de San José del Nus. (Chica, 2012)

La mayoría de los lineamientos presentan un sentido E-W a NW-SE como estructuras secundarias que se ramifican desde la falla de Palestina e incluyen las fallas La Caldera, Bizcocho y Nare, las zonas de cizalla Cristales y Playa Rica y el lineamiento regional del río Nus. El movimiento diferencial a lo largo de los lineamientos del Nus y El Socorro, aparentemente generan una dilatación tensional en dirección N-NW, N-S y NE, los cuales se refleja en la formación de vetas de cuarzo y carbonato tipo stockwork en estructuras de tercer orden (Gramalote Colombia Limited, 2015).

A partir de la actualización de la geología estructural se logra identificar una mayor densidad de fracturamiento relacionada a fallas secundarias concordantes con las estructuras que controlan los drenajes del río Nus y la quebrada Guacas. Dentro del nuevo marco estructural se sugiere que algunas fallas principales cruzan los Tajo de Gramalote y Trinidad, definiendo bloques estructurales (Integral S.A., 2025). Aunque estas estructuras se localizan dentro del área del proyecto, las perforaciones realizadas indican estas estructuras no presentan características para favorecer el flujo de agua y por tanto se considera que no tienen significancia hidrogeológica (Golder Associates Perú S.A., 2020).

b. Geología estructural local

Para el análisis estructural a nivel local se utilizó la base de datos de perforaciones de GCL Colombia (2026), aquí se hizo una diferenciación de las perforaciones que se encontraban por fuera del tajo Gramalote (externas) y las perforaciones que se encontraban dentro del tajo Gramalote, la ubicación espacial de estas se presenta en la Figura 5.1.6.1. Los datos de la zona externa corresponden a mediciones estructurales de afloramientos superficiales e información de sondeos, mientras que los datos de la zona del Tajo provienen de sondeos y de datos acústicos.

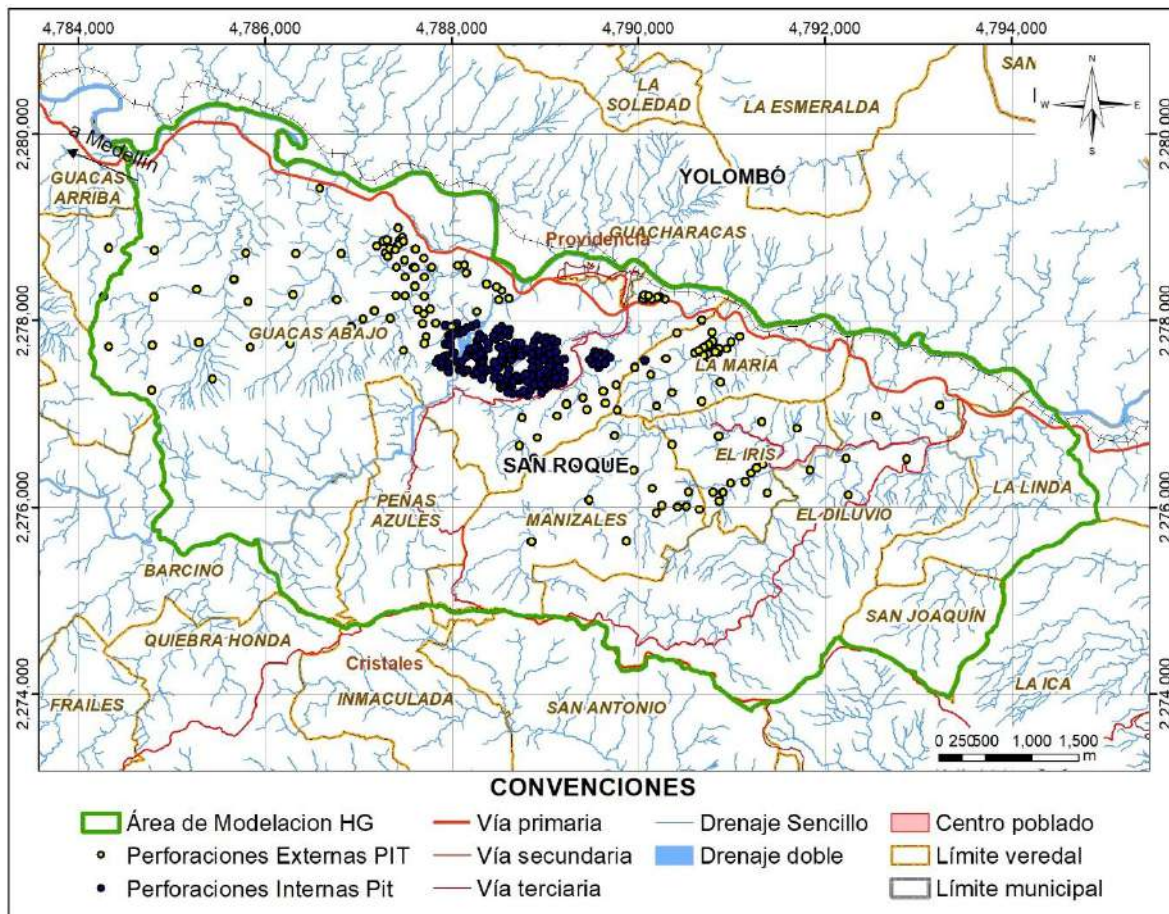


Figura 5.1.6.1 Área externa e interna del tajo Gramalote y ubicación de las perforaciones.
Fuente: (GCL 2026)

De ambas bases se extrajo la información relevante para el análisis estructural, incluyendo el tipo de estructura, la dirección de buzamiento (Dip Direction) y el ángulo de buzamiento (Dip) de cada estructura registrada.

A partir de esta información, las estructuras fueron agrupadas en las siguientes categorías estructurales para su análisis conjunto: Joints y Fracturas; Zonas de cizalla; Vetas y venillas; Fallas (Faults); Extensional Dúplex y Dúplex; Diques; Contactos; y brechas tectónicas.

Adicionalmente, en la base de datos correspondiente a la zona interna del Tajo se reportó información de estructuras adicionales, no presentes en la zona externa, propias del registro

de sondeos y datos acústicos: Voids, zonas de rotura (Broken Zone), zonas de alta deformación (High Strain Zone), brechas tectónicas e intrusiones.

Con la información de dirección de buzamiento y buzamiento de cada grupo estructural, se generaron diagramas de rosas y diagramas de contornos (estereogramas), con el objetivo de visualizar las orientaciones dominantes diferenciando el tipo de estructura.

El análisis de los diagramas de rosas y de contornos para el grupo de diaclasas y fracturas evidencia una tendencia dominante. La dirección N20°E-N50°E, con ángulo de buzamiento alto predominante hacia el NW. En el diagrama se muestra una segunda dirección N80°W, con ángulo de buzamiento inclinado hacia el NE, sin embargo, no se considera predominante. Estas orientaciones son consistentes al sistema que controla el tramo inferior que la quebrada Guacas y a la falla Cisneros respectivamente.

Las zonas de cizalla presentan una tendencia estructural dominante con dirección N10°E-N40°E con buzamientos predominantemente subverticales, lo que sugiere una relación con la orientación de las estructuras regionales mayores. Esta orientación coincide con las familias dominantes observadas en el grupo de diaclasa y fracturas, lo que podría indicar un control estructural. Se tiene otra orientación preferencial para la zona externa del tajo con dirección N40°E-N80°E.

Las vetas y venillas muestran una orientación preferencial N20°E-N50°E, con buzamientos hacia el NW, concordante a la dirección del tramo inferior de la quebrada Guacas, cabe resaltar que de este tipo de estructuras solo se tienen datos estructurales superficiales y sondeos de la zona del TAJO. Adicionalmente, se tienen otras dos tendencias. La dirección N20°W-N40°W asociada al sistema de fallas que controla tramos del río Nus y la quebrada Guaca. Y la dirección N80°E, la cual se relaciona con otros sistemas complementarios.

Los diagramas de las fallas representan las direcciones de las principales fallas del área. El sistema de fallas que controla el tramo inferior de Guacas, con dirección N30°E-N60°E, y sistemas complementarios N - S y E - W. Las mismas tendencias de direcciones se muestran en las brechas tectónicas.

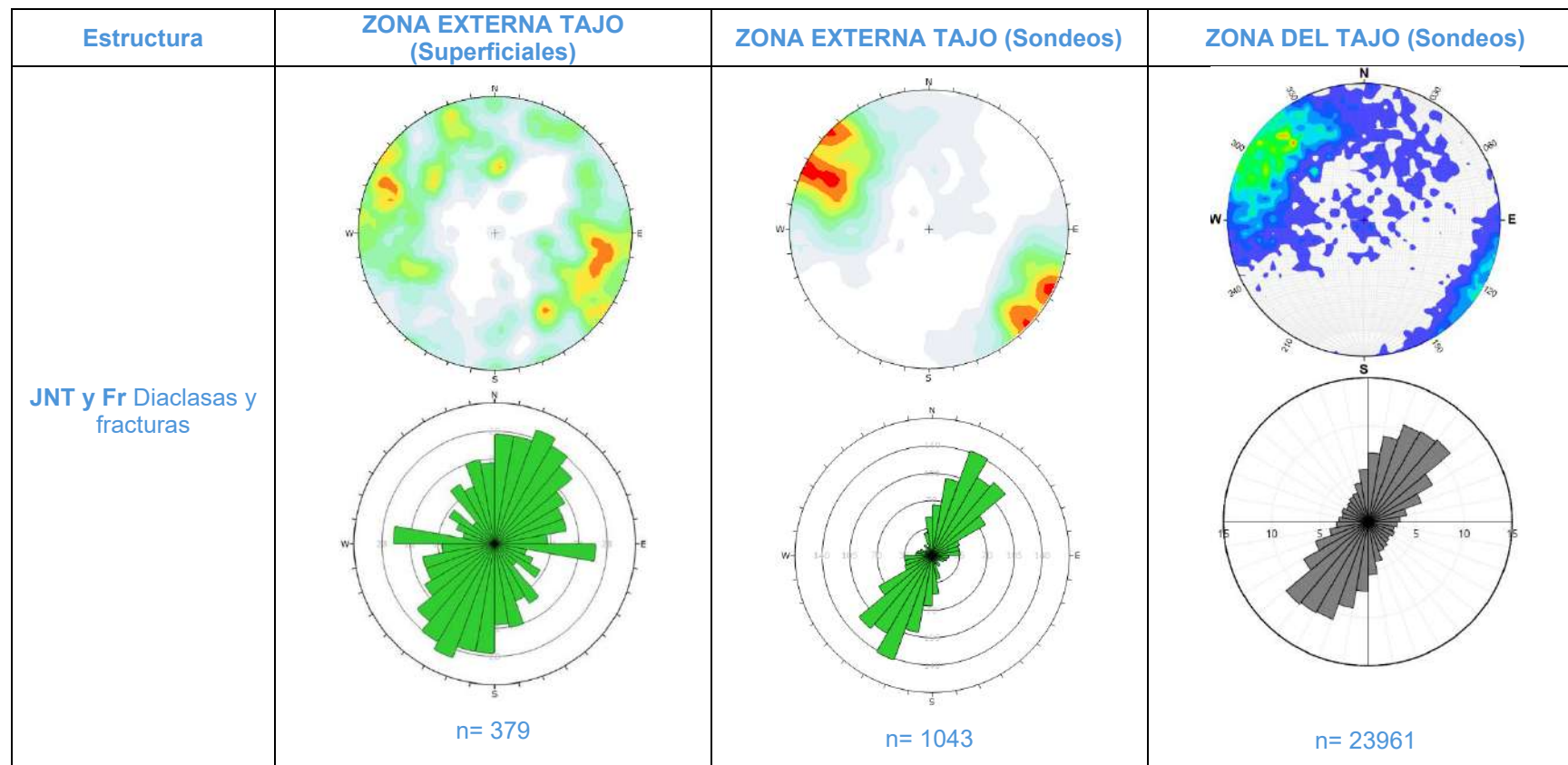
Las estructuras tipo *Extensional Dúplex* y *Dúplex* asociados a dilatación tensional muestran tendencias con direcciones N10°E-N20°E, N50°E-N80°E, N10°W-N30°W y NS. Asociados a los sistemas de falla de la zona.

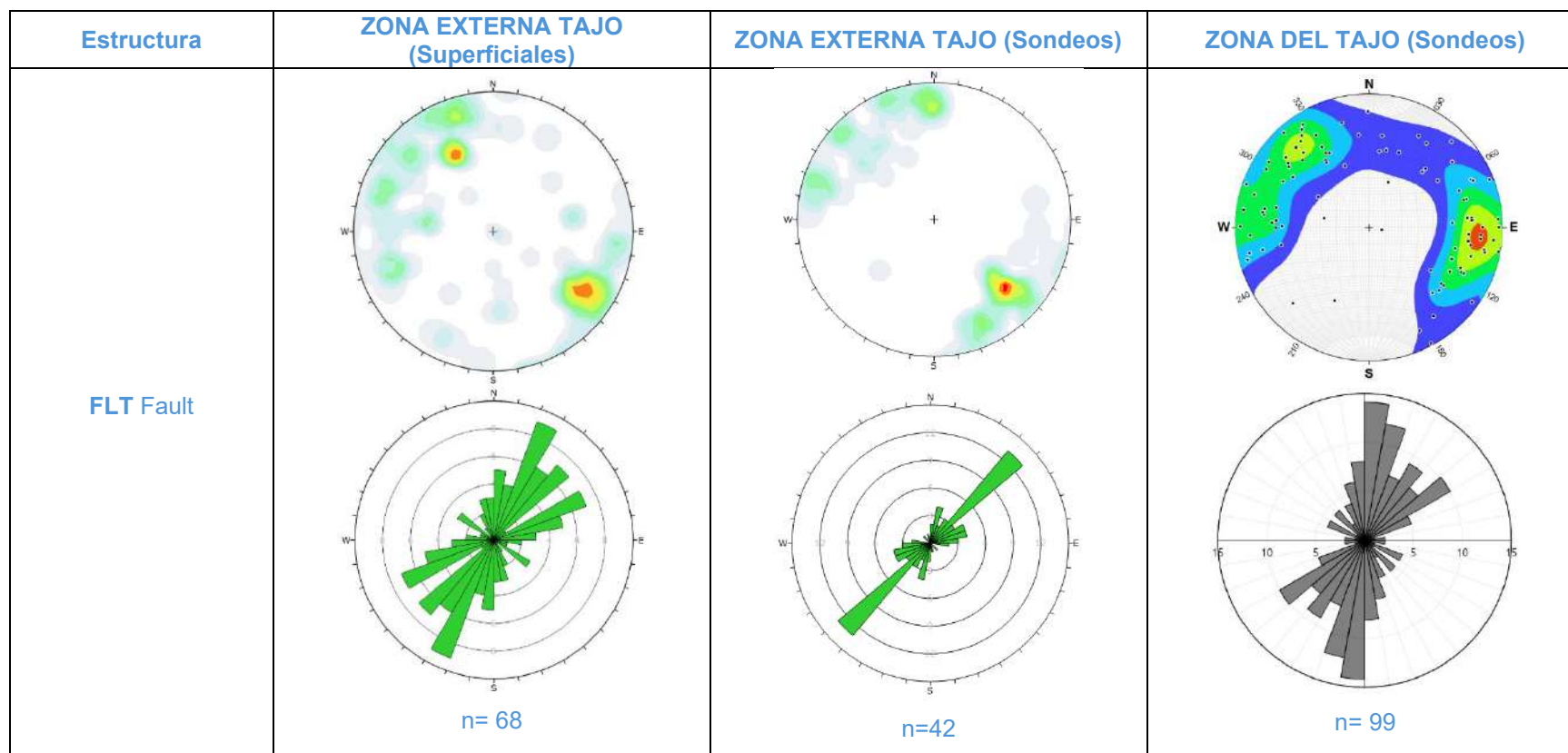
Los contactos litológicos presentan tres orientaciones principales. La primera N30°E-N60°E buzando hacia NW. La segunda N10°W-N40°W, buzando hacia SW, y la tercera con una dirección E-W.

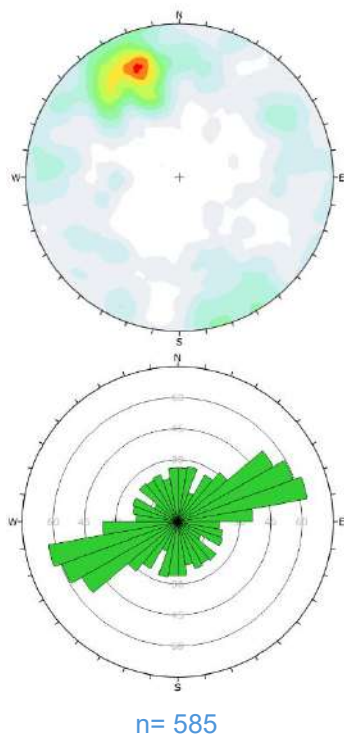
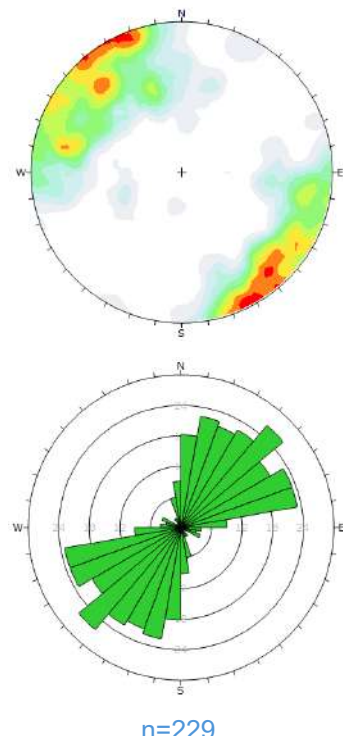
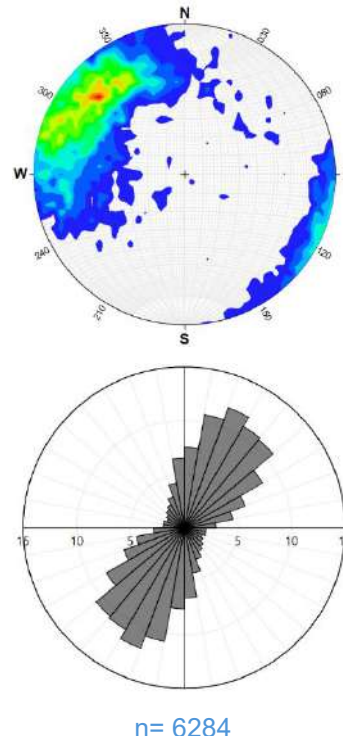
Los diques muestran un sentido variable, en la zona externa en datos superficiales hay pocos datos para definir una dirección dominante, en la zona externa en sondeos el sentido es NNE-SSE, con buzamientos altos con ligera tendencia al W. En zona del Tajo en sondeos (profundidad) predominan E-W aunque direcciones secundarias no tienen orientaciones preferenciales, solo una ligera disminución general en direcciones N-S, aquí los buzamientos tienden a ser de medio-bajo ángulo a subhorizontales hacia el SW.

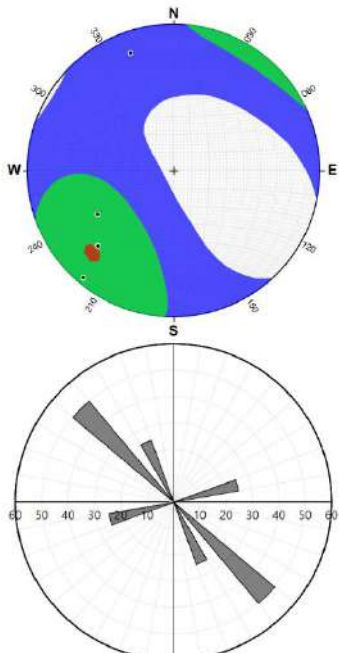
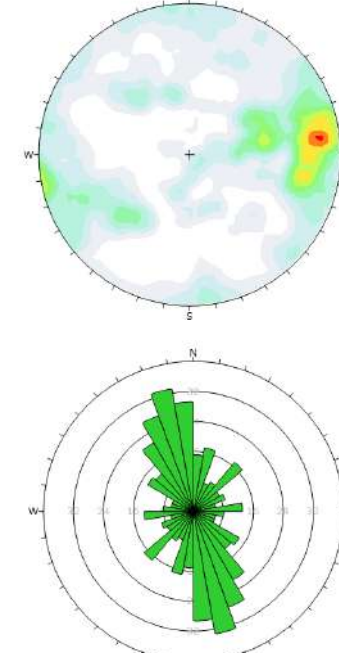
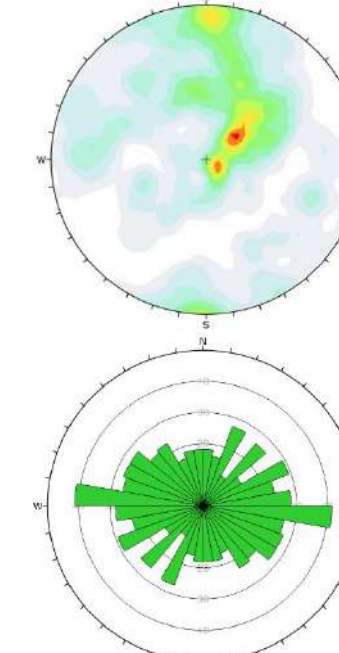
La Tabla 5.1.6.2 muestra un resumen de los diagramas de rosas de las direcciones preferenciales de fracturas, diaclasas zonas de cizalla y diques intrusivos tomados a partir de perforaciones.

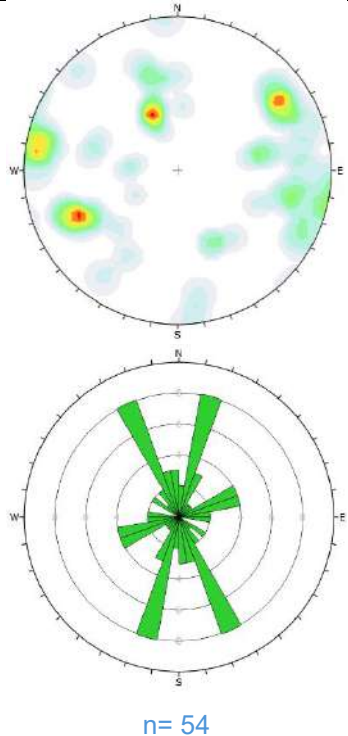
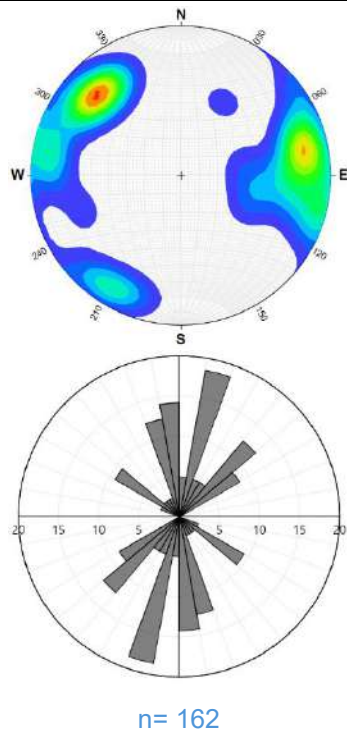
Tabla 5.1.6.2 Diagrama de rosas de las direcciones preferenciales de fracturas, diaclasas, fallas, zonas de cizalla y diques a partir de perforaciones. Fuente: GCL (2026)

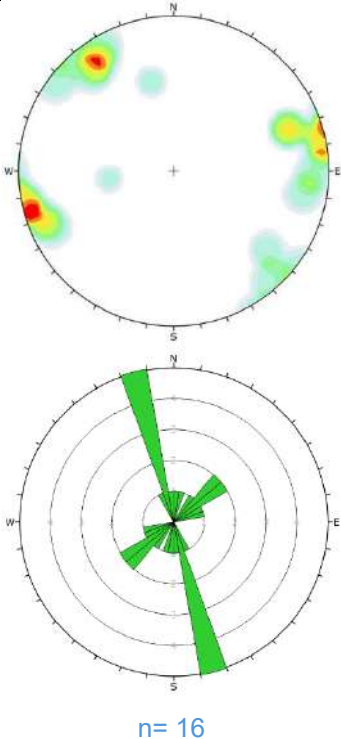
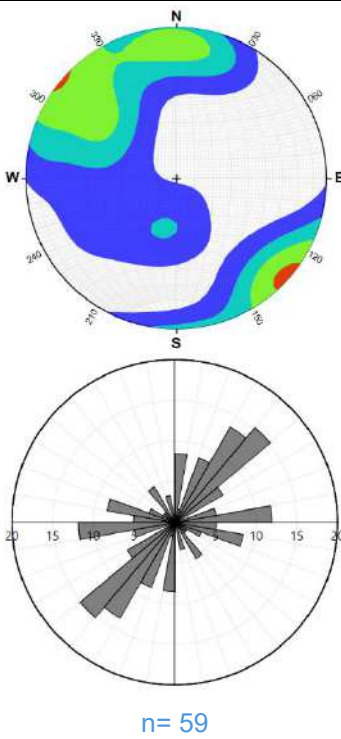


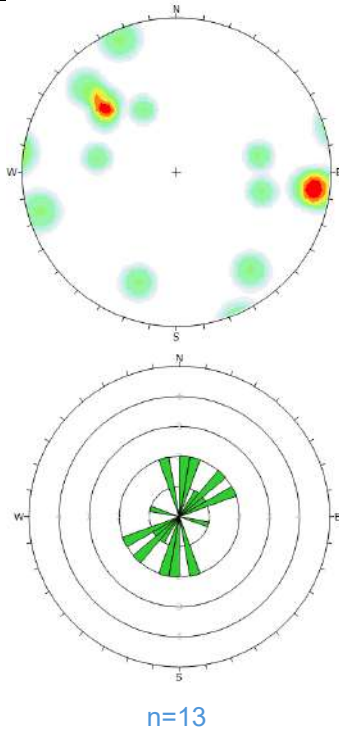
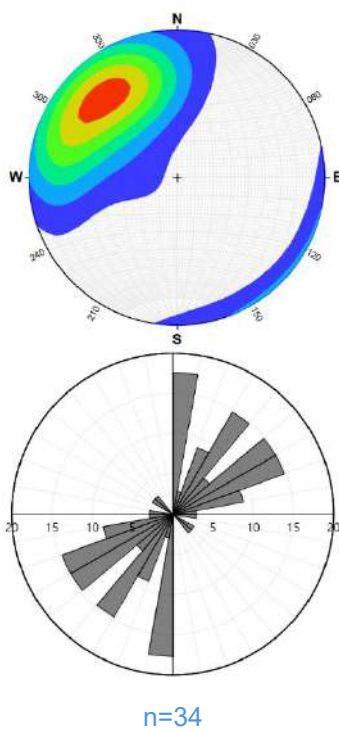


Estructura	ZONA EXTERNA TAJO (Superficiales)	ZONA EXTERNA TAJO (Sondeos)	ZONA DEL TAJO (Sondeos)
SH Zona de cizalla	 <p>n= 585</p>	 <p>n=229</p>	 <p>n= 6284</p>

Estructura	ZONA EXTERNA TAJO (Superficiales)	ZONA EXTERNA TAJO (Sondeos)	ZONA DEL TAJO (Sondeos)
DIKE Diques	 <p>n= 4</p>	 <p>n= 325</p>	 <p>n= 656</p>

Estructura	ZONA EXTERNA TAJO (Superficiales)	ZONA EXTERNA TAJO (Sondeos)	ZONA DEL TAJO (Sondeos)
<p>EXTDUP_SEXDUP (Extensional duplex y secondary extensional duplex)</p> <p>DUP</p>	 <p>n= 54</p>	<p>Sin informacion</p>	 <p>n= 162</p>

Estructura	ZONA EXTERNA TAJO (Superficiales)	ZONA EXTERNA TAJO (Sondeos)	ZONA DEL TAJO (Sondeos)
<p>CNT Contacto</p>	 <p>n= 16</p>	<p>Sin informacion</p>	 <p>n= 59</p>

Estructura	ZONA EXTERNA TAJO (Superficiales)	ZONA EXTERNA TAJO (Sondeos)	ZONA DEL TAJO (Sondeos)
BRX Tectonic breccia	 <p>n=13</p>	Sin informacion	 <p>n=34</p>

Fuente: Propia a partir de GCL (2026)

c. Análisis RQD

El grado de fracturamiento del macizo rocoso se define por el número, espaciado y condiciones de las discontinuidades, independientemente de su origen y clase (González de Vallejo, 2002). Habitualmente, el índice RQD (Rock Quality Designation) ayuda a expresar el grado de fracturamiento (útil como una predisposición a la alteración) y se define como la relación porcentual entre la suma de las longitudes de testigos de perforación que sean mayores a 10cm en una longitud total del tramo analizado (Figura 5.1.6.2), siguiendo la siguiente ecuación:

$$RQD = \frac{\sum \text{Longitud de fragmentos del testigo} > 10\text{cm}}{\text{Longitud total del tramo}} \times 100$$

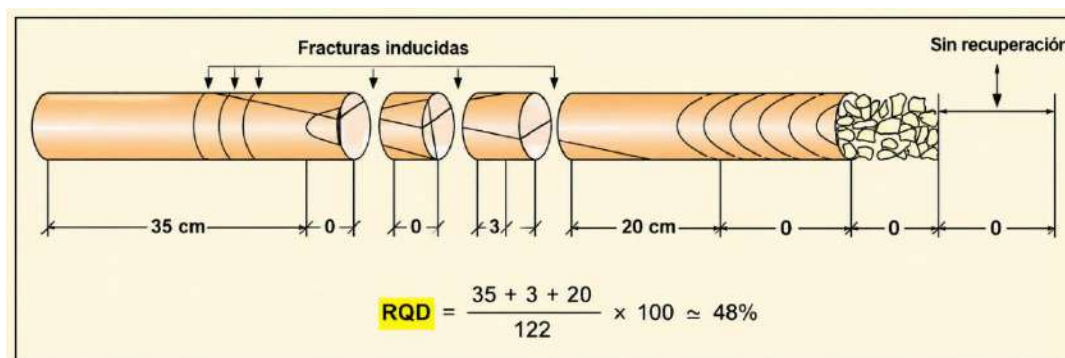


Figura 5.1.6.2 Metodología para el cálculo del índice RQD.

Fuente: Adaptado de Clayton *et al* (1995) en González de Vallejo (2002)

De esta manera, valores altos de RQD suelen asociarse con macizos relativamente masivos o poco fracturados, mientras que valores bajos indican una mayor intensidad de fracturamiento, disgregación o alteración estructural del medio rocoso. En la estimación se excluyen los sectores con grado de meteorización avanzada (a partir del horizonte IV de meteorización o roca altamente meteorizada), a los que se les asigna un RQD=0%. Para este ejercicio se utilizó la clasificación de calidad de roca (Tabla 5.1.6.3) en función del RQD propuesta por González de Vallejo (2002):

Tabla 5.1.6.3 Clasificación de la calidad de la roca en función del índice RQD.

Calidad	RQD (%)
Muy mala	<25
Mala	25-50
Media	50-75
Buena	75-90
Muy buena	90-100

Fuente: González de Vallejo (2002)

Existen además correlaciones desarrolladas por diversos autores entre este índice y la frecuencia del espaciado de las discontinuidades en el macizo, clasificaciones de resistencia de la roca como el índice de calidad RMR, módulos de deformación in-situ, índices de velocidades relativas, etc.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el análisis del RQD adquiere relevancia debido a que el grado de fracturamiento del macizo puede ejercer un control importante sobre los procesos de circulación, almacenamiento y transmisión de agua subterránea en un medio fracturado. En sistemas fracturados, las discontinuidades como fracturas (singulares), diaclasas (sistemáticas), planos de falla o zonas de cizallamiento pueden constituir rutas preferenciales para el flujo, siempre y cuando la interconexión hidráulica entre ellas sea efectiva. En este sentido, el RQD puede considerarse una aproximación útil para la evaluación preliminar de las condiciones de fracturamiento del macizo y, por consiguiente, de su potencial comportamiento hidrogeológico como medio fracturado; sin embargo, es importante resaltar que este índice no permite determinar directamente la conectividad hidráulica entre las discontinuidades, ni las propiedades asociadas a dichas estructuras como la apertura, persistencia, relleno, transmisividad o continuidad espacial. Por lo tanto, su interpretación debe entenderse como un indicador indirecto de la presencia relativa de discontinuidades y no como una medida directa de conductividad hidráulica.

Los intervalos con valores bajos de RQD pueden sugerir sectores con mayor densidad de fracturamiento y, potencialmente, con mayores posibilidades de desarrollo de flujo subterráneo en caso de existir interconexión efectiva entre discontinuidades. En contraste, unidades caracterizadas por valores elevados de RQD suelen corresponder a macizos más competentes y menos fracturados, en los cuales la capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea tiende a restringirse principalmente a fracturas discretas, estructuras localizadas o zonas de alteración específicas.

En general, en la zona predomina un macizo rocoso de muy buena calidad a lo largo de la mayoría de las profundidades, mostrando un comportamiento homogéneo, estos en conjunto representan el 53% de la información obtenida de las perforaciones. Seguido a estos se encuentran los de calidad buena, con un 14% del total de los datos. Por su parte los macizos rocosos de muy mala calidad abarcan el 13%, mientras que las calidades malas y media corresponden al 4% y 9% respectivamente como se observa en la Figura 5.1.6.3.

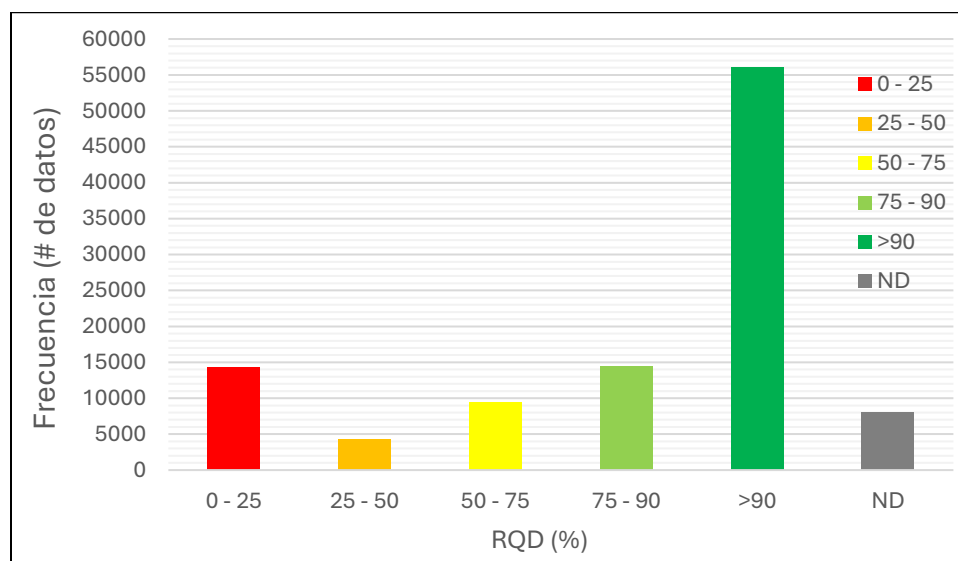


Figura 5.1.6.3 Frecuencia del RQD registrado en las perforaciones
Fuente: (GCL 2026).

Las zonas fracturadas se distribuyen desde superficie hasta los 900 metros de profundidad; sin embargo, la intensidad del fracturamiento tiende a disminuir con la profundidad. Como se observa en la [Figura 5.1.6.4](#), los valores de RQD inferiores al 25% se concentran en los primeros 50 metros, en este intervalo predominan suelos residuales y la zona de transición suelo-roca. Estos materiales aportan peso estadístico a esta categoría, pero no reflejan un incremento en la densidad de fracturas en el macizo rocoso. A partir de los 50 metros hay un aumento gradual de los RQD mayores a 90%, asociados a la aparición de los horizontes de roca, constituyendo la fracción dominante en profundidad.

Por lo tanto, considerando las condiciones de fracturamiento del macizo en el área de estudio, donde los valores de RQD entre 0 y 25 % representan el 14 % de los datos y los valores entre 25 y 50 % corresponden al 4 %, se interpreta que la mayor capacidad para favorecer el flujo y almacenamiento de agua subterránea se concentra principalmente en los primeros 50 m, asociada al desarrollo de los horizontes de suelo y del perfil de meteorización (ver [Tabla 5.1.6.4](#)).

Tabla 5.1.6.4 Datos de perforaciones según la profundidad.

Datos según profundidad							
RQD							
Profundidad	0-25	25-50	50-75	75-90	90-100	ND	Suma %
0-50	42.9	3.8	5.6	6.4	18.1	23.2	100.0
50-100	5.0	4.4	10.0	15.4	62.7	2.4	100.0
100-150	1.9	3.4	9.6	15.4	67.6	2.1	100.0
150-200	2.0	4.2	10.6	16.7	65.1	1.5	100.0
200-250	2.0	4.1	10.9	16.5	65.7	0.8	100.0
250-300	1.9	4.1	9.6	16.9	66.8	0.7	100.0
300-350	1.3	3.3	9.9	18.4	66.0	1.1	100.0
350-400	2.0	4.3	9.1	15.2	67.9	1.4	100.0
400-500	2.0	4.3	10.9	16.9	64.2	1.6	100.0
500-600	1.4	5.2	11.3	17.2	62.3	2.7	100.0
600-700	1.0	4.0	8.2	16.8	65.2	4.8	100.0
700-800	0.2	1.6	4.8	13.0	64.2	16.2	100.0
800-900	2.0	0.0	8.2	14.3	67.3	8.2	100.0

Fuente: GCL (2026)

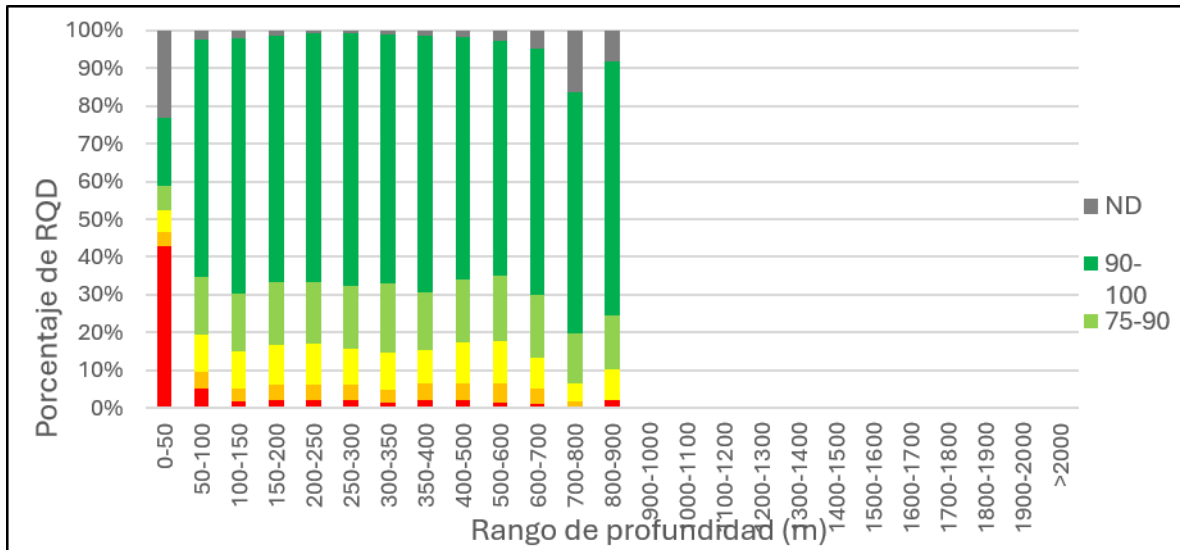


Figura 5.1.6.4RQD registrado en las perforaciones según la profundidad.
Fuente: (GCL 2026)

d. Análisis Hidroestructural

El flujo del agua en los macizos rocosos está principalmente controlado por las estructuras geológicas como fallas, fracturas, diaclasas, foliación y estratificación (Romero, 2014) (Singhal & Gupta, 2010), sin embargo, son las características físicas y la dirección de dichas estructuras las que permiten definir la ocurrencia del flujo de agua subterránea y el régimen hidráulico comprendido por el conjunto de estructuras del macizo (Sceci, 2007).

En la actualidad, existen varias metodologías determinísticas y probabilísticas que permiten correlacionar el comportamiento hidráulico de las estructuras, pero el uso de cada metodología depende de la información geológica e hidrogeológica disponible, donde una de las metodologías más utilizadas e implementada en este análisis hidroestructural es la metodología de Ley Cúbica propuesta por Snow (1970). Adicionalmente, dado que esta metodología considera solo dos parámetros, se ha implementado una segunda, que es la de Chica (1979). En la carpeta Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_Hidroestructural se presenta la base de datos usada en el desarrollo de este numeral.

I. Metodología

- Análisis de frecuencia de estructuras

Para el análisis se realizó el diagrama de polos en coordenadas cartesianas para representar la tendencia del rumbo y buzamiento de las estructuras, todo esto mediante el software gratuito RStudio y los códigos de Morales (2021).

Adicionalmente, tomando como base la representación cartesiana de los polos, se hace el conteo de Kamb (1959), de tal forma que el valor esperado m (ecuación (1)) de la distribución binomial, sea 3 veces la desviación estándar, donde m se estima como:

$$m = f * N, \text{ siendo } N \text{ el \# de datos; } f = \frac{l^2}{L^2} \text{ es relación área contador y área red.}$$

En la representación cartesiana, la red es un cuadrado de lado $L=180^\circ$ y el tamaño del contador (un cuadrado de lado l) depende del número de datos N que, en este caso, son 451 puntos y se calcula según la siguiente ecuación (2). Para este número de datos el área del contador fue de 18° .

$$l = \frac{3 * L}{\sqrt{N + 9}}$$

El número de polos en cada punto de la cuadrícula de conteo se convierte a desviaciones estándar y las concentraciones por encima de 3 desviaciones estándar son estadísticamente significativas, pero por debajo de 3 desviaciones estándar no son estadísticamente distintas de un dato aleatorio. En este estudio, para expresar los datos con significancia estadística en porcentajes y no en desviaciones estándar se hace el conteo de Smichdt, pero empleando el lado del contador de Kamb estimado como se indicó previamente (18°).

- **Ley Cúbica**

La Ley Cúbica es un método cuantitativo que permite estimar la conductividad hidráulica de un macizo rocoso a partir de datos estructurales que tengan información de espaciamiento (como el inverso de la frecuencia o densidad en metros) y abertura (en milímetros). Esta metodología propuesta por Snow (1970) solo es válida para estructuras planas y lisas en flujo laminar, que involucra la constante de viscosidad del agua y la gravedad, como se muestra en la Figura 5.1.6.5.

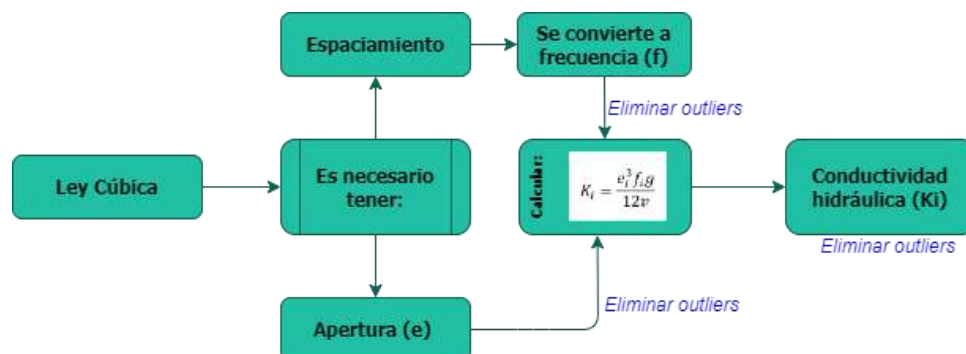


Figura 5.1.6.5 Metodología de la Ley Cúbica.

Fuente: (Snow, 1970)

Para la implementación de esta metodología fue necesario asumir lo siguiente: considerar que las estructuras (diaclasas) de la base de datos suministrada son planas y lisas y que el espesor total de las diaclasas reportadas como cerradas tuvieran una abertura mínima libre de 1 mm, los datos de frecuencia que no tenía valor se asumieron como 1 m. También en esta estimación no se incluyeron las fallas debido a los altos valores que se reportan como espesor total, pues no es posible saber si ese espesor total está relleno o cuenta con una abertura libre, por donde podría estar fluyendo agua.

Finalmente, para el cálculo de la conductividad hidráulica por Ley Cúbica se utilizó una base de datos con 451 discontinuidades.

i. **Peso Hidráulico (Chica A. , 1979)**

Un diagrama hidroestructural es un diagrama de frecuencias geoestadísticas, donde se busca evaluar la importancia de los conjuntos de discontinuidades de acuerdo con su potencial para permitir que el agua fluya a través de estas. Para la construcción de estos diagramas se siguió la metodología propuesta por Chica (1979)

Inicialmente se representaron las estructuras inventariadas en campo, en un diagrama de frecuencias de Kamb y posteriormente se construyó este mismo diagrama de frecuencias con las familias que tuvieron un mayor peso hidráulico, el cual se estimó a partir de parámetros geomecánicos medidos por SHI SAS en campo, como la frecuencia, abertura, continuidad y rugosidad de las discontinuidades, según la siguiente ecuación:

$$PHi = 1 \frac{R * P * F * A}{X}$$

Donde: PHi = Peso Hidráulico, R = Factor de rugosidad, P = Continuidad/Persistencia, F =Frecuencia, A =Abertura,

X = Factor ponderador tal que el peso hidráulico esté entre [1-100].

Se resalta que en todo este procesamiento se deben eliminar los datos anómalos o outliers, tanto en las cuatro variables usadas, como en la estimación final del peso hidráulico. Estos outliers se definen a partir del rango intercuartil, un valor anómalo es aquel menor a $P25 - 1.5 * (P75 - P25)$ o aquel mayor a $P75 + 1.5 * (P75 - P25)$.

ii. Información disponible para el análisis

La información de campo contiene 474 registros iniciales, se identificaron y eliminaron 25 valores atípicos (*outliers*). En consecuencia, los análisis posteriores se llevaron a cabo utilizando la base de datos depurada, la cual consta de 451 datos estructurales con dirección de buzamiento, buzamiento, tipo de discontinuidad, densidad, continuidad, rugosidad, abertura, relleno, composición del relleno, filtraciones y flujos de agua (Tabla 5.1.6.5).

Tabla 5.1.6.5 Clasificación de los datos estructurales medidos en campo

Tipo de estructura	Cantidad
Diaclasas	412
Vetas	59
Fallas	2

Fuente: GCL (2026)

Se emplearon un total de 451 discontinuidades de las cuales 59 corresponden a venillas o vetas de cuarzo y 412 corresponden a diaclasas. La estimación del peso hidráulico de Chica (1979) se realizó para el total de los 451 datos, los cuales contaban con todos los parámetros hidro estructurales necesarios para esta estimación.

II. Resultados

III. Diagramas de frecuencia de las estructuras geológicas

En la Figura 5.1.6.6 se presenta el diagrama de frecuencia de estructuras generado a partir de los 451 datos de la base de datos hidroestructural. De allí se identifica que las tendencias predominantes son 4 conjuntos de estructuras, las cuales se listan a continuación. El grupo

1, corresponde a la zona de mayor concentración (color rojo intenso) en el cuadrante inferior derecho, la cual representa estructuras con un rumbo Noroeste y un buzamiento muy alto hacia el Noreste. El grupo 2, se encuentra en el cuadrante superior derecho, y son estructuras con rumbo Noreste y buzamiento alto hacia el Sureste. El grupo 3, está ubicado en el cuadrante superior izquierdo y representa la familia de discontinuidades con rumbo Noreste y buzamiento subvertical hacia el Noroeste. Y el grupo 4, se encuentra en el cuadrante inferior izquierdo y es la familia con rumbo Noroeste y buzamiento casi vertical hacia el Suroeste.

1. N27°W - N60°W / 63°-85° NE
2. N36°E - N70°E / 60°-81° SE
3. N50°E - N72°E / 72°-90° NW
4. N27°W - N54°W / 81°-90° SW

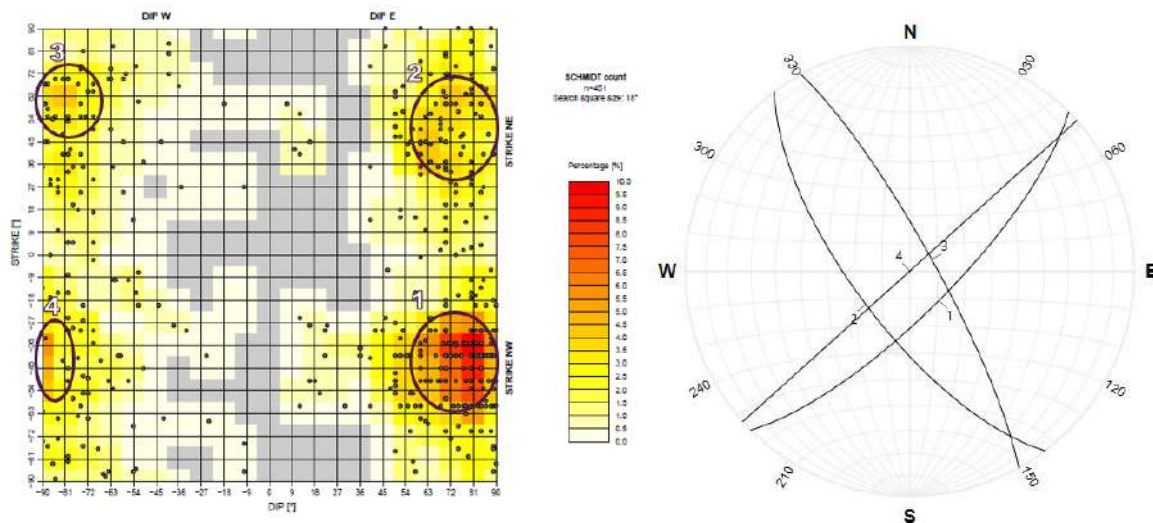


Figura 5.1.6.6 Diagrama de frecuencia de Kamp para los 451 datos y la proyección estereográfica de los cuatro (4) grupos identificados con mayor frecuencia.

Fuente: GCL (2026)

i. Conductividad hidráulica mediante Ley Cúbica

La Figura 5.1.6.7 muestra el diagrama de conductividad hidráulica que se obtuvo mediante Ley Cúbica y su proyección estereográfica; en general se observan que los valores se concentran entre 0,001 m/s a 0,035 m/s, mientras que las tendencias con valores mayores a 0,055 m/s son las estructuras con orientación N36°W - N72°W / 50°-72° NE; N36°E - N85°E / 45°-81° SE; N5°E - N45°E / 65°-90° NW; y N5°W - N27°W / 60°-81° SW, de las cuales, dos de estas coinciden parcialmente con unas de las 4 familias más abundantes de la Figura 5.1.6.6 (Tabla 5.1.6.6).

Es de anotar que para esta estimación se asumió una abertura mínima de 1 mm en la mayoría de las diaclasas, lo cual puede estar sesgando el resultado y aumentando los valores de permeabilidad de las fracturas. Asimismo, los valores de permeabilidad de las fracturas estimados con esta metodología son muy altos, por lo tanto, deben ser

considerados como una primera aproximación para entender cuáles son las familias que podrían tener mayor permeabilidad dentro de todo el macizo.

Tabla 5.1.6.6 Clasificación de los datos estructurales medidos en campo

Familias más frecuentes		Familias más conductoras (Ley Cúbica)
N27°W - N60°W / 63°-85° NE	➡	N36°W - N72°W / 50°-72° NE
N36°E - N70°E / 60°-81° SE	➡	N36°E - N85°E / 45°-81° SE
N50°E - N72°E / 72°-90° NW		N5°E - N45°E / 65°-90° NW
N27°W - N54°W / 81°-90° SW		N5°W - N27°W / 60°-81° SW

Fuente: GCL (2026)

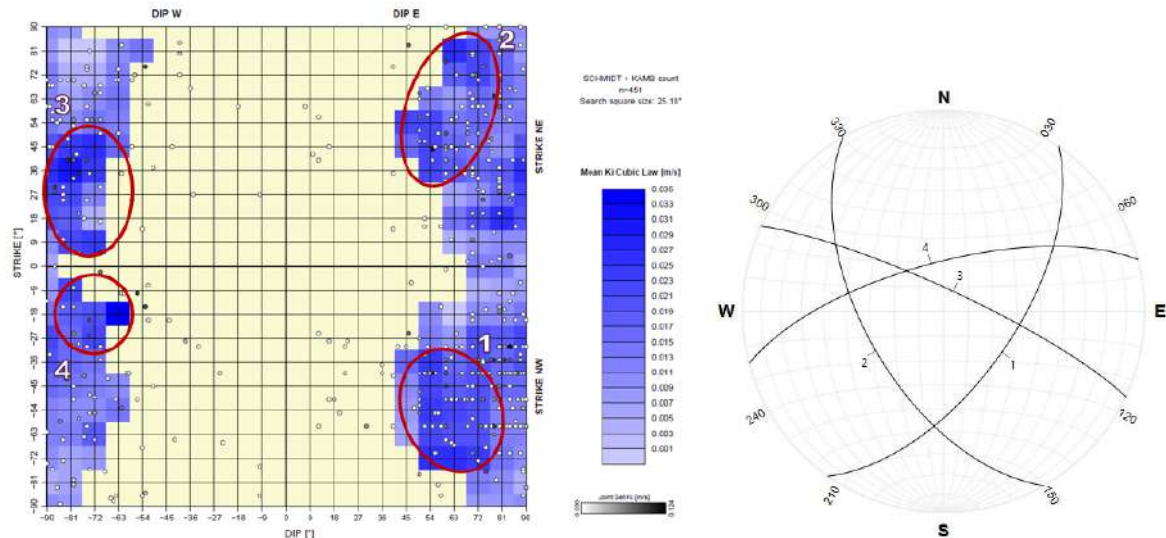


Figura 5.1.6.7 Diagrama de conductividades usando la Ley Cúbica y la proyección estereográfica de los cuatro (4) grupos identificados con mayor conductividad hidráulica.

Fuente: GCL (2026)

ii. Peso hidráulico -PH (Chica A. , 1979)

De acuerdo con la metodología de Chica (1979), las familias que presentan mayor potencial conductor en la zona tienen las siguientes orientaciones:

1. N15°W - N45°W / 50° - 90° NE (Coincide con frecuencia)
2. N36°E - N60°E / 45° - 81° SE (Coincide con frecuencia)
3. N - N15°E / 72°-90° SE
4. N5°E – N15°E / 81°-90° NW
5. N22°W - N30°W / 81°-90° SW (Coincide con frecuencia)

La Figura 5.1.6.8, representa las familias de discontinuidades más conductoras a partir de un conjunto de 451 datos. A diferencia de los diagramas de frecuencia (Figura 5.1.6.6), esta gráfica muestra las familias con el mayor potencial de flujo de agua subterránea. De estas

5 familias identificadas, 3 coinciden con las familias de mayor frecuencia. Durante el análisis se identifican familias principales y secundarias de discontinuidades (Tabla 5.1.6.7).

Tabla 5.1.6.7 Comparación entre las direcciones de las familias más frecuentes y las familias con mayor peso hidráulico del área de estudio.

Familias más frecuentes		Familias más conductoras (Chica, 1979)
N27°W - N60°W / 63°-85° NE	⇒	N15°W - N45°W / 50°- 90° NE
N36°E - N70°E / 60°-81° SE	⇒	N36°E - N60°E / 45°- 81° SE
N50°E - N72°E / 72°-90° NW		N - N15°E / 72°-90° SE
		N5°E – N15°E / 81°-90° NW
N27°W - N54°W / 81°-90° SW	⇒	N22°W - N30°W / 81°-90° SW

Fuente: GCL (2026)

Las familias principales de mayor potencial hidráulico identificadas fueron 2. La Familia 2, la cual es la de mayor extensión y densidad de conductividad localizada en el cuadrante superior derecho. Al coincidir también con una alta frecuencia de datos, se confirma como el sistema de flujo principal. Su buzamiento alto a subvertical hacia el sureste sugiere que estas fracturas pueden conectar diferentes niveles de manera vertical. Adicionalmente coinciden con la dirección preferencial identificada en los análisis estructurales anteriores (orientadas al NE). La segunda familia, fue la Familia 1, ubicada en el cuadrante inferior derecho. Esta presenta también zonas de azul muy intenso, lo que indica que estas discontinuidades tienen mayor apertura. Es una familia con rumbo Noroeste que buza hacia el noreste, actuando como la segunda dirección preferencial de flujo.

Las familias secundarias que presentan una conductividad más localizada son: la Familia 3, ubicada cerca del eje central en el lado derecho. Son discontinuidades casi norte-sur con buzamiento muy alto hacia el este, donde se muestran zonas de flujo de menor extensión en comparación con las familias principales, pero altamente eficientes para la conductividad. La Familia 4, ubicada en el margen izquierdo superior son discontinuidades subverticales con rumbo norte-noreste. Su posición en el extremo del gráfico indica que son estructuras casi verticales que podrían actuar como conductos secundarios de flujo de agua. Por último, la Familia 5, ubicada en el margen izquierdo inferior, coincide con una alta frecuencia de datos, lo que indica que es una familia persistente. Al ser casi vertical y con rumbo noroeste, complementa hidráulicamente a la Familia 1, formando en conjunto un sistema de alta permeabilidad.

Los resultados muestran que el macizo rocoso presenta anisotropía hidráulica. El flujo de agua no es uniforme, sino que está influenciado por dos direcciones preferenciales: NW-SE (Familia 1) y NE-SW (Familia 2). La intersección de las Familias 1 y 2 crea una red de fracturas posiblemente interconectadas, por lo cual, las zonas donde estas dos familias se cruzan en el terreno serán posiblemente los puntos de mayor transmisividad.

Las familias 3, 4 y 5, que presentan buzamientos superiores a 70°-80°, indican que el transporte de agua en estas discontinuidades tiene un componente vertical fuerte, lo que implica una fuerte conexión vertical de las unidades hidrogeológicas.

Por otro lado, comparando este resultado con la estimación de la conductividad hidráulica para los 451 datos estructurales (Figura 5.1.6.6) se concluye que, si hay diferencias entre los resultados usando la metodología de la Ley Cúbica, y la metodología modificada de Chica (1979). En el primer análisis (ley cúbica) se identificaron 4 familias de

discontinuidades, mientras que, usando la metodología de Chica, se identificaron 2 familias de discontinuidades principales y 3 familias secundarias más localizadas.

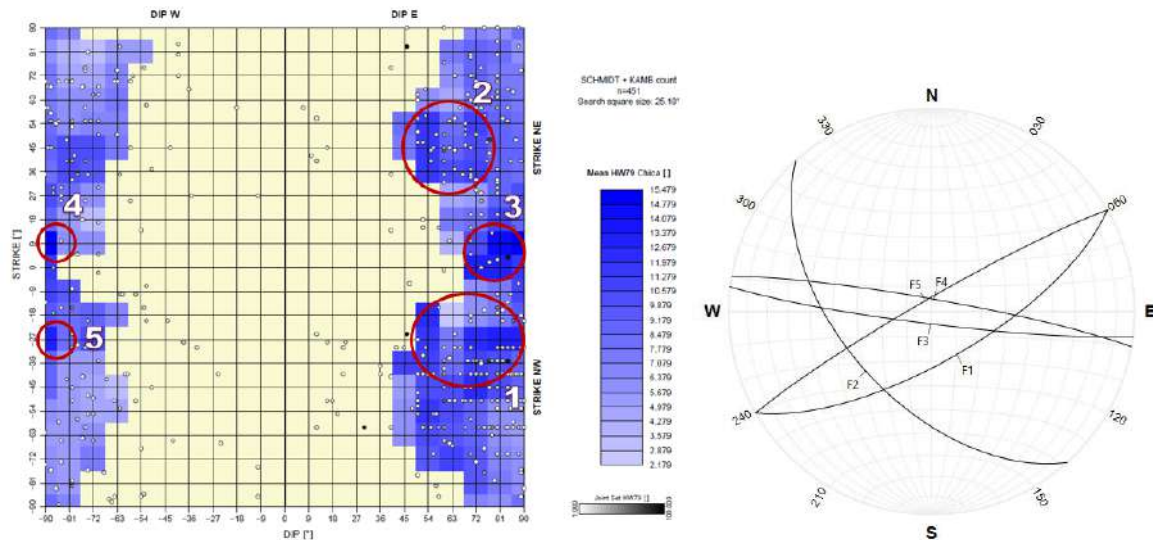


Figura 5.1.6.8Peso hidráulico de los 451 datos medidos en campo y la proyección estereográfica de las cinco (5) familias de discontinuidades más frecuentes y conductoras según la metodología de Chica, (1979).

Fuente: GCL (2026)

Se encontró además que, de los 451 datos tomados, hay un total de 230 datos que no se agrupan en las familias de mayor peso hidráulico estimado. Sin embargo, con la información actual, tampoco podría descartarse que algunas de estas familias no pudieran tener pesos hidráulicos altos puesto que podrían pertenecer a otro conjunto de familias que no se lograron medir en las minas visitadas en campo.

iii. Análisis de conductividades hidráulicas asociadas a las fallas de la zona de estudio

La caracterización de la conductividad hidráulica en el área de estudio se estima a partir de datos de campo y estudios técnicos anteriores. Para este análisis se realizó una revisión de los valores de conductividad hidráulica en pozos de monitoreo reportados en el estudio de (Golder Associates Colombia S.A.S., 2017), y también se tuvo en cuenta los resultados del peso hidráulico detallado en este mismo informe, lo cual permitió vincular la información de los pozos, y las propiedades hidráulicas de las discontinuidades estructurales con el sistema de Fallas de la zona de estudio.

Para asignar parámetros a las fallas, se llevó a cabo un análisis geoespacial que correlacionó la información de conductividad de los pozos y los puntos de levantamiento hidroestructural con el sistema de fallas identificado en la zona. Se establecieron criterios de proximidad (buffer de 500m) para asociar los valores de conductividad reportados a la falla más cercana. Para cada estructura analizada se calculó un valor promedio, integrando la totalidad de los datos, aunque también se presentan resultados de valores mínimos y máximos detectados.

Los resultados de esta integración se presentan en la Figura 5.1.6.9 donde se muestra la distribución espacial de los puntos de información con el sistema de fallas. Asimismo, se presenta una tabla resumen que detalla el comportamiento hidráulico de las estructuras, especificando los rangos de variación y los promedios calculados. Es importante señalar que la asignación de valores se limitó estrictamente a aquellas fallas que cuentan con puntos de control en su área de influencia inmediata. Por lo tanto, las estructuras que no presentan mediciones cercanas se mantienen sin un valor asignado para evitar incertidumbres en la modelación hidroestructural del sector.

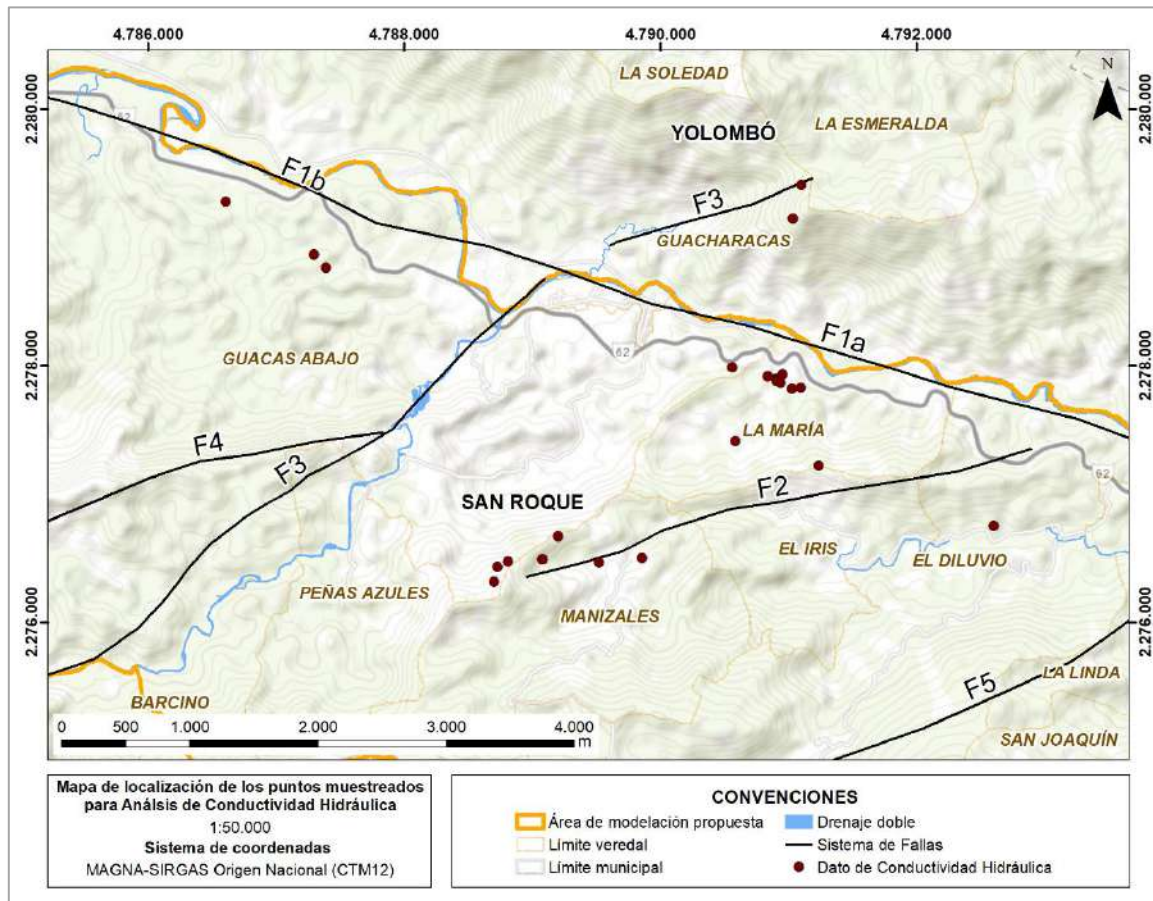


Figura 5.1.6.9 Localización de los puntos que cuentan con información de conductividad hidráulica y su ubicación con respecto a las fallas del área de estudio.

Fuente: GCL (2026)

La tabla de conductividades hidráulicas muestra heterogeneidad estructural, con variaciones de hasta cinco órdenes de magnitud entre las diferentes fallas (Tabla 5.1.6.8). Las estructuras F1a y F3 presentan los valores promedio más elevados, según los datos recolectados en campo. Por el contrario, la falla F1b actúa como una unidad de baja permeabilidad, mientras que la falla F2 exhibe el comportamiento más complejo y contrastante, con un rango que oscila entre $3,6 \times 10^{-2}$ y $3,4 \times 10^{-7}$ m/s, lo que puede indicar una compartimentación hidráulica.

Tabla 5.1.6.8 Resumen de las conductividades hidráulicas (m/s) asociadas a las fallas del área de estudio y su respectiva fuente de información.

Falla	Conductividad Hidráulica (m/s)			Fuente de Información
	Mínima	Máxima	Promedio	
F1a	$1,35 \times 10^{-3}$	$3,57 \times 10^{-2}$	$1,58 \times 10^{-2}$	SHI, (2026)
F1b	$1,7 \times 10^{-6}$	2×10^{-5}	$8,03 \times 10^{-6}$	Golder, (2017)
F2	$3,4 \times 10^{-7}$	$3,6 \times 10^{-2}$	$1,02 \times 10^{-2}$	Golder, (2017) & SHI, (2026)
F3	$3,77 \times 10^{-3}$	$1,51 \times 10^{-2}$	$9,44 \times 10^{-3}$	SHI, (2026)

Fuente: GCL (2026)

Tabla 5.1.6.9 Resumen de las conductividades hidráulicas (m/día) asociadas a las fallas del área de estudio y su respectiva fuente de información

Falla	Conductividad Hidráulica (m/d)			Fuente de Información
	Mínima	Máxima	Promedio	
F1a	116,64	3084,48	1365,12	SHI, (2026)
F1b	0,147	1,72	0,694	Golder, (2017)
F2	0,029	3110,4	881,28	Golder, (2017) & SHI, (2026)
F3	325,73	1304,6	815,62	SHI, (2026)

Fuente: GCL (2026)

Los valores iniciales obtenidos mediante el método de peso hidráulico de (Chica A. , 1979) (Tabla 5.1.6.8 y Tabla 5.1.6.9) presentaron una sobreestimación significativa de la conductividad hidráulica, atribuible a la consideración de continuidad y abertura hidráulica plena de discontinuidades. Para ajustar los resultados a las condiciones reales del macizo rocoso, se realizó calibración con ensayos hidráulicos tipo Lugeon y Lefranc (Golder Associates Perú S.A., 2020) & (Geodrill, 2025) ejecutados en el área de estudio. A partir de la comparación entre valores estructurales estimados y conductividades medidas en roca sana y levemente meteorizada (Horizontes I-II), se obtuvo un factor correctivo promedio del orden de 10^{-6} , aplicado a las familias estructurales analizadas. Con base en estas pruebas hidráulicas, en la Tabla 5.1.6.10, se presenta el resumen de las conductividades hidráulicas de las principales fallas asociadas al área de estudio. Los valores corregidos oscilan entre 2×10^{-6} y 4×10^{-3} m/día, consistentes con un medio fracturado anisotrópico de baja conectividad entre las fracturas.

Finalmente, es importante recalcar que el método basado en la ley cúbica y peso hidráulico de (Chica A. , 1979) constituye una aproximación teórica útil para evaluar el potencial hidráulico relativo de familias estructurales; sin embargo, presenta limitaciones inherentes relacionadas con la asunción de abertura hidráulica plena, continuidad efectiva de discontinuidades, ausencia de rellenos minerales y simplificación geométrica del flujo en fracturas, lo cual puede conducir a sobreestimaciones significativas de la conductividad hidráulica en macizos cristalinos de baja permeabilidad.

Tabla 5.1.6.10 Resumen de las conductividades hidráulicas (m/día) asociadas a las fallas del área de estudio luego de corrección.

Falla	Conductividad Hidráulica (m/día)			Fuente de Información
	Mínima	Máxima	Promedio	
F1a	$3,5 \times 10^{-4}$	$9,25 \times 10^{-3}$	0,0041	SHI, (2026)
F1b	$4,41 \times 10^{-7}$	$5,1 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-6}$	Golder, (2017)
F2	$8,7 \times 10^{-8}$	$9,33 \times 10^{-3}$	0,00264	Golder, (2017) & SHI, (2026)
F3	$9,77 \times 10^{-4}$	$3,91 \times 10^{-3}$	0,00245	SHI, (2026)

Fuente: GCL (2026)

B. Conclusiones

La integración de la información estructural regional, el análisis de perforaciones y la caracterización hidroestructural permitió establecer que el comportamiento hidrogeológico del macizo rocoso está controlado principalmente por los sistemas estructurales regionales con orientaciones NW-SE y NE-SW, asociados al marco tectónico definido por las fallas Romeral y Palestina. Estas direcciones se reproducen consistentemente en las estructuras identificadas en perforaciones y levantamientos de campo, evidenciando un fuerte control tectónico sobre la geometría del macizo y la circulación del agua subterránea.

El análisis estructural local muestra que las familias de diaclasas, fallas, zonas de cizalla, vetas y demás discontinuidades conservan las mismas orientaciones preferenciales descritas a escala regional. El análisis permitió establecer que el macizo rocoso presenta un comportamiento homogéneo, con predominio de valores de RQD correspondientes a roca de muy buena (53 %) y buena calidad (14 %). En contraste, las categorías de mala (4 %) y muy mala calidad (13 %) se concentran principalmente en los primeros 50 m, asociados a los suelos residuales y a la zona de transición suelo-roca. A partir de esta profundidad predominan valores de RQD superiores al 90 %, lo que evidencia una disminución del fracturamiento indicando que el mayor potencial para el almacenamiento y la circulación de agua subterránea se concentra en el perfil de meteorización de la roca.

Los análisis hidroestructurales demuestran que la frecuencia de las discontinuidades no constituye por sí sola un indicador de su importancia hidrogeológica. La capacidad de conducción depende de la combinación de parámetros como abertura, continuidad, rugosidad y conectividad hidráulica. En este sentido, la metodología de peso hidráulico de (Chica A. , 1979) permitió discriminar de manera más adecuada las familias con mayor potencial conductor respecto a la Ley Cúbica, identificando dos familias principales asociadas a los sistemas NW-SE y NE-SW, cuya intersección representa las zonas con mayor potencial de peso hidráulico dentro del macizo fracturado.

La comparación entre la información estructural y los resultados hidrogeológicos confirma que la presencia de una falla no implica necesariamente un incremento de la permeabilidad. El comportamiento hidráulico de cada estructura depende de sus condiciones geomecánicas y del grado de apertura efectiva de las discontinuidades, lo que explica la coexistencia de estructuras con alta capacidad conductora y otras que actúan como barreras hidráulicas o presentan baja influencia sobre el flujo subterráneo.

Finalmente, es importante recalcar que el método basado en la ley cúbica y peso hidráulico de (Chica A. , 1979) constituye una aproximación teórica útil para evaluar el potencial hidráulico relativo de familias estructurales; sin embargo, presenta limitaciones inherentes

relacionadas con la asunción de abertura hidráulica plena, continuidad efectiva de discontinuidades, ausencia de rellenos minerales y simplificación geométrica del flujo en fracturas, lo cual puede conducir a sobreestimaciones significativas de la conductividad hidráulica en macizos cristalinos de baja permeabilidad por lo cual se realizó la calibración de los resultados estructurales mediante ensayos hidráulicos para ajustar las sobreestimaciones inherentes a los métodos teóricos, obteniendo conductividades compatibles con un macizo rocoso fracturado de baja permeabilidad regional y comportamiento anisotrópico.

5.1.6.1.2 Geofísica

El método geofísico empleado fue el eléctrico, mediante la ejecución de sondeos eléctricos verticales (SEV) y tomografías eléctricas.

La incertidumbre asociada a la interpretación de los SEV y las tomografías eléctricas se minimizó utilizando la información del logueo o descripción geológica de las perforaciones exploratorias y de las perforaciones hidrogeológicas para la instalación de piezómetros que se realizaron cerca de los sitios donde se ejecutaron los diferentes sondeos y líneas geoeléctricas. Es decir, se correlacionó cada unidad litológica, con un rango de valores de resistividad eléctrica interpretada, haciendo una “calibración” directa de la geología de la zona con los valores de resistividad medidos. En esta “calibración” se tuvo en cuenta si los suelos y rocas estaban secos, saturados y grado de fracturamiento.

Otra consideración que minimizó la incertidumbre en la interpretación geoeléctrica, es la geología misma de la zona del proyecto, que, por su homogeneidad, obedece simplemente al perfil de meteorización del batolito antioqueño sin cambios sustanciales en composición geológica, sin presencia de estratos con salinidad detectada u otras condiciones específicas identificadas, como variables que puedan afectar o agregar condicionantes en dicha interpretación. La correlación de la información litológica de los cientos de metros perforados durante la exploración del proyecto, teniendo como soporte los respectivos núcleos, con las resistividades de los sondeos geoeléctricos y tomografías ejecutadas en sus cercanías, permitió definir los siguientes rangos de resistividad para la interpretación y análisis de la campaña geofísica (Tabla 5.1.6.11).

Tabla 5.1.6.11 Unidades geológicas y sus resistividades

Formación geológica	Valores de resistividad (Ohm-m)	Características hidrogeológicas
Unidad cuaternario no consolidada a poco consolidada		
Suelos	15 – 20	Suelo limo arcillosos, seco
Suelos	40 – 70	Suelo limo-arenoso, seco
Suelos	80 – 160	Suelo areno-limoso, seco
Suelos	260 – 510	Suelo gravoso, seco
Depósito de Terraza (Qt)	40 – 50	Limo y arena de grano fino. Capa permeable, saturada
Depósito de Terraza (Qt)	70 – 100	Arena de grano fino a medio. Capa permeable, saturada
Depósito de Terraza (Qt)	120 – 830	Arena gruesa y grava fina a muy gruesa. Capa permeable, saturada
Saprolito del Batolito Antioqueño	100 – 150	Compuesto por arcilla y limo arcillosos, seco. Capa poco permeable, saturada

Formación geológica	Valores de resistividad (Ohm-m)	Características hidrogeológicas
Saprolito del Batolito Antioqueño	1.000 – 1.700	Compuesto por arena de grano fino a grueso y limo. Capa poco permeable. Seca
Unidad Cretácica consolidada		
Roca ígnea del Batolito Antioqueño	2.900 – 8.700	Rocas ígneas parcialmente meteorizadas. Capa impermeable.
Roca ígnea del Batolito Antioqueño	10.000 – 11.000	Roca ígnea fresca. Capa impermeable.

Fuente: GCL, 2015 en (Integral S.A., 2018)

A. Sondeos eléctricos verticales (Prospección geoelectrica puntual)

En total fueron realizados 16 sondeos eléctricos verticales (SEV's) (Figura 5.1.6.10 y Tabla 5.1.6.12), con el objetivo de evaluar las condiciones geométricas en superficie y profundidad de los cuerpos aluviales potencialmente acuíferos.

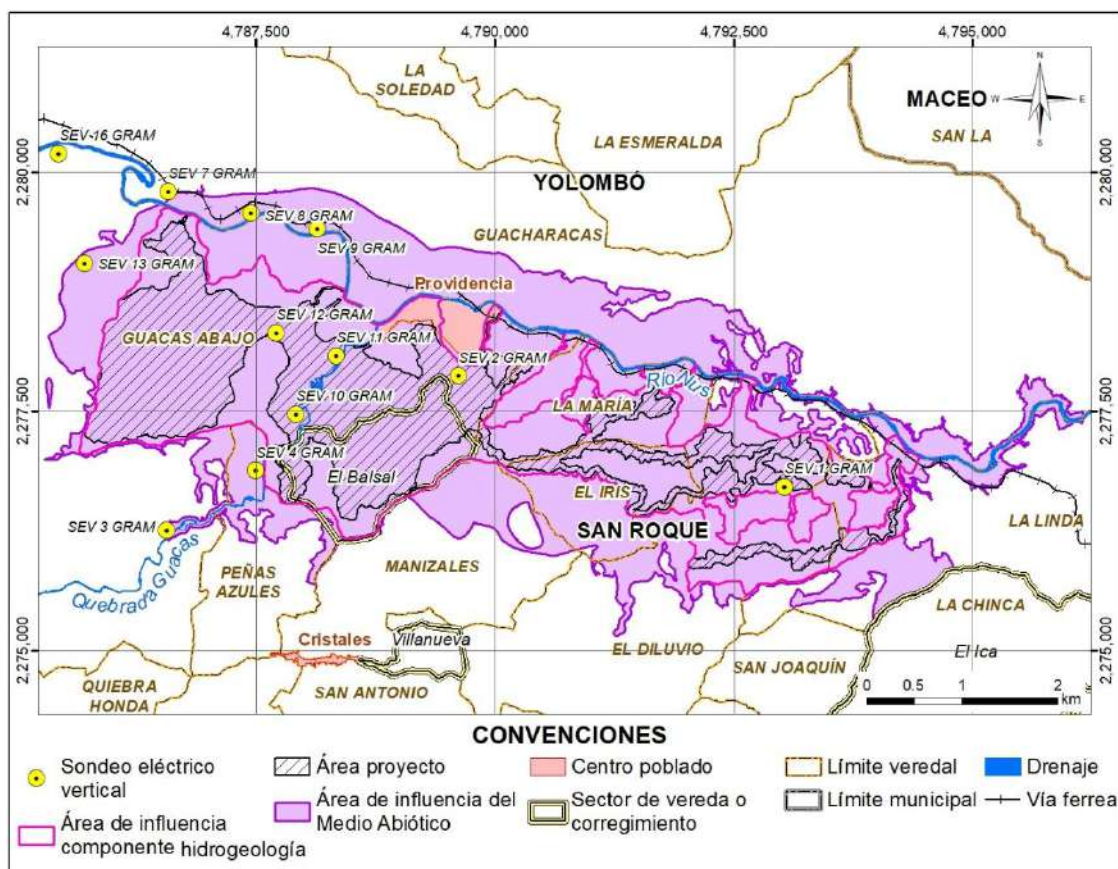


Figura 5.1.6.10 Ubicación de los sondeos eléctricos verticales

Fuente: Integral S.A. 2025 a partir de Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.12 Sondeos eléctricos verticales ejecutados en el área de estudio del proyecto

Identificar sondeo	Coordenadas			AB/2 (m)	Rumbo	Localización
	Este (m)	Norte (m)	Z			
SEV 1 GRAM	4.793.036,21	2.276.709,16	813,99	300	N87°E	Depósito de Terraza de la Q. La Palestina en la Y del carretable que une a la población de Cristales con el Iris
SEV 2 GRAM	4.789.617,29	2.277.867,86	824,00	300	N88°W	Al Norte del carretable que conduce al cerro Gramalote, sobre el depósito de la Q. La Colorada
SEV 3 GRAM	4.786.567,41	2.276.251,65	951,51	250	N62°E	Depósito de Terraza de la Quebrada Guacas.
SEV 4 GRAM	4.787.498,05	2.276.879,09	932,27	250	N15°E	Deposito Quebrada Guacas en la Finca Los Cachos
SEV 5 GRAM	4.782.965,26	2.280.668,73	831,76	300	N62°W	Depósito de Terraza del Río Nus, por la entrada a las fincas La Gitana y Guacharaca, costado Occidental del puente.
SEV 6 GRAM	4.783.867,82	2.280.614,15	828,33	300	N87°E	Al sur de la antigua carrilera en la finca Guacharaca, 400 m adelante del puente; sobre depósitos del Río Nus
SEV 7 GRAM	4.786.582,46	2.279.797,20	819,77	300	N45°W	Depósito de Terraza del Río Nus, costado Sur de la antigua carrilera vía Guacharaca - Providencia 800 m aproximadamente delante de la casa-finca.
SEV 8 GRAM	4.787.447,30	2.279.569,71	818,96	300	N80°E	Al sur de la carrilera vía Guacharaca-Providencia, sobre Depósitos de Terrazas del Río Nus.
SEV 9 GRAM	4.788.141,92	2.279.405,53	817,21	300	N85°E	Depósitos del Río Nus, al Sur de la carrilera vía Guacharaca - Providencia
SEV 10 GRAM	4.787.915,79	2.277.467,53	912,22	125	N45°W	Margen Izquierda de la Q. Guacas en el sector de la Garrucha, frente a la casa abandonada.
SEV 11 GRAM	4.788.335,99	2.278.080,14	818,37	300	E W	Depósito de la Q. Guacas, en el sector de la hidroeléctrica y la Finca La Bateíta

Identificar sondeo	Coordenadas			AB/2 (m)	Rumbo	Localización
	Este (m)	Norte (m)	Z			
SEV 12 GRAM	4.787.715,79	2.278.320,46	824,24	200	N45°W	Sector de San Antonio, depósitos de la Q. La Batea
SEV 13 GRAM	4.785.704,17	2.279.045,00	834,84	300	N S	Finca El Topacio, depósito de la Q. El Topacio
SEV 14 GRAM	4.784.605,85	2.275.857,77	978,94	200	N73°E	Aguas arriba de la Quebrada Guacas, en su margen izquierda.
SEV 15 GRAM	4.783.540,07	2.276.304,62	984,65	250	E W	En la cancha de futbol que existe aguas arriba de la Quebrada Guacas, en su margen izquierda.
SEV 16 GRAM	4.785.435,83	2.280.194,82	821,96	300	E W	Costado izquierdo vía Cisneros-San José de Nus, frente a la entrada de la Finca El Topacio, en la cancha de futbol, depósitos del Rio Nus y la Q. El Topacio

Fuente: Integral S.A., 2018

a. Interpretación de los sondeos eléctricos verticales

A partir de la interpretación matemática empleando el programa computacional EarthImager 1D v.1.0.2 (2007), se genera para cada uno de los SEV's, un perfil geológico-geoeléctrico, en el que se correlacionan los valores obtenidos de resistividad verdadera y su variación con la profundidad, con la litología de las diferentes capas de las unidades geológicas sondeadas. Se determinan varios tipos de SEV's, según el número de capas de estos, obteniéndose sondeos de cuatro y cinco capas, debido a delgadas y gruesas intercalaciones litológicas que conforman las capas que constituyen principalmente los depósitos Cuaternarios. La interpretación de los SEV's se presenta en el Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_Inter_perfil_Geoele.

I. Suelos

La mayoría de los SEV's levantados sobre el Depósito de Terrazas, muestran una capa superficial menor de 1,0 m de espesor correspondiente a varios tipos de material seco, desde limo arcillosos con resistividades entre 15,0 y 20,0 Ohm-m los cuales se encuentran en baja proporción, siendo los más frecuentes los tipos limo arenoso con resistividades entre 40,0 y 70,0 Ohm-m y los areno limosos con resistividades desde 80,0 hasta 160,0 Ohm-m. En algunos lugares se desarrollan suelos constituidos por arenas y gravas donde la resistividad aumenta de 260 a 510 Ohm-m. Esta situación permite inferir que las capas de suelo funcionan como una zona de tránsito del agua infiltrada proveniente la precipitación y del agua superficial y por ello permanecen secos.

II. Depósitos aluviales de terraza

En los depósitos de terrazas asociados a los valles de las principales corrientes superficiales, a partir de la base de la capa de suelos, desde los 0,50 y 1,0 m de

profundidad, hasta profundidades que comúnmente varían de 5,0 a los 10,0 m, los perfiles de los SEV's muestran capas intercaladas y saturadas con agua representadas por limo arenoso que reflejan valores de resistividad entre 40 y 50 Ohm-m, arenas finas a media con resistividades desde 70 hasta 100 Ohm-m, y capas de gravas finas a gruesas y muy gruesas, que reflejan valores de resistividad entre 120 y 830 Ohm-m. En algunos sectores este depósito cuaternario adelgaza su espesor, fluctuando entre 3,0 y 6,0 m, como respuesta a la depositación discordante de las terrazas sobre una paleo topografía irregular constituida por material saprolitizado de las rocas ígneas del Batolito Antioqueño.

III. Saprolito del Batolito Antioqueño

En la sub-cuenca de la quebrada Guacas, algunos SEV's levantados sobre depósitos de terraza producto de la erosión del saprolito, reflejan valores de resistividad desde 100 hasta 150 Ohm-m en su parte superior, como respuesta a la presencia de limo, limos arcillosos y arenas finas saturadas y entre 1000 y 1700 Ohm-m cuando el Saprolito contiene arena fina a gruesa parcialmente saturada.

IV. Rocas Ígneas del Batolito Antioqueño

Las rocas ígneas del Batolito Antioqueño que infrayacen al saprolito, se caracterizan por contener un grado moderado de meteorización al reflejar valores de resistividad desde 2900 hasta 8700 Ohm-m, indicando que generalmente se encuentran secas. Cuando desaparece ésta delgada capa, la resistividad aumenta hasta 11000 Ohm-m.

b. Perfiles geológicos – geoelectricos

A partir de la interpretación matemática de cada SEV's realizada y su ubicación, se elaboran dos perfiles esquemáticos geológicos-geoelectricos, empleando el programa Hidrogeanalysis v.1 (2009). Los perfiles se obtienen con los sondeos levantados sobre niveles de terrazas cuaternarias asociadas a los valles del Río Nus y la Quebrada Guacas, en los cuales se correlacionan la litología de las diferentes capas de las unidades geológicas sondeadas y los valores obtenidos de resistividad verdadera y su variación con la profundidad. La topografía de la línea de los perfiles no se ajusta al relieve existente porque no todos los SEV's empleados para la interpretación se encuentran sobre la línea del perfil, ni a la misma altura y por ello al extrapolarse se produce la irregularidad topográfica. Estas líneas de cortes se identifican en el mapa GRA-INT-DCAA-04-14 con las siglas A – A' y B – B (Hidrogeocol, 2012). El perfil A-A' abarca la zona al NE fuera del área de influencia.

I. Perfil geológico geoelectrico A-A'

Se elabora con una dirección NW-SE a lo largo del depósito de terraza del río Nus, conformado por los SEV's 5, 6, 16, 7, 8 y 9, donde el primero (SEV-5) se ubica aguas arriba cerca a la entrada a las fincas La Gitana y Guacharacas, y el último (SEV-9) aguas abajo, en la parte posterior del poblado Providencia. El perfil se muestra en la Figura . La parte superior del perfil entre los SEV 5 y 6, señala la presencia de una capa con espesor no mayor de 1,0 m compuesta aguas arriba por limos y arenas finas permeables que reflejan valores de resistividad entre 17 y 144 Ohm-m, representadas por el color azul intenso. Desde el SEV-7 hasta la parte final del perfil (SEV-9), esta capa superior corresponde a suelos desde limo-arenosos hasta gravosos muy permeables, representados por el tono grisáceo. Debajo de las dos capas anteriores, aparece una tercera constituida por arenas de grano fino a muy grueso saturadas con agua, representada por un color amarillento.

Refleja valores de resistividad desde 66 hasta 175 Ohm-m, variando su espesor desde los 3,0 hasta aproximadamente los 6,0 m: Debajo aparece una secuencia de gravas finas a muy gruesa, incluyendo la presencia de cantos embebidos en matriz arenosa, igualmente saturada (de color verde en el perfil), la cual desarrolla espesores desde 4,0 hasta 12,0 m, reflejando resistividades entre 296 y 1013 Ohm-m. Los mayores espesores de ésta última capa ocurren en y cercanías al SEV-6. Las capas de gravas cubren discordantemente al Saprolito de las rocas ígneas del Batolito Antioqueño (en tono morado), no saturadas, al reflejar valores de resistividad desde 1.480 hasta 8.700 Ohm-m, conformando la gruesa capa meteorizada que cubre al basamento impermeable del perfil. La paleo topografía conformada por el Saprolito controla el espesor del Depósito de Terraza disminuyéndolo entre los SEV 7 y 8, haciendo desaparecer la capa arenosa por cambios laterales de facies. Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones geológicas-geoeléctricas, se infiere que la zona para perforación de piezómetros exploratorios con profundidades entre 5,0 y 10,0 m, es aquella situada en y alrededores del SEV-6.

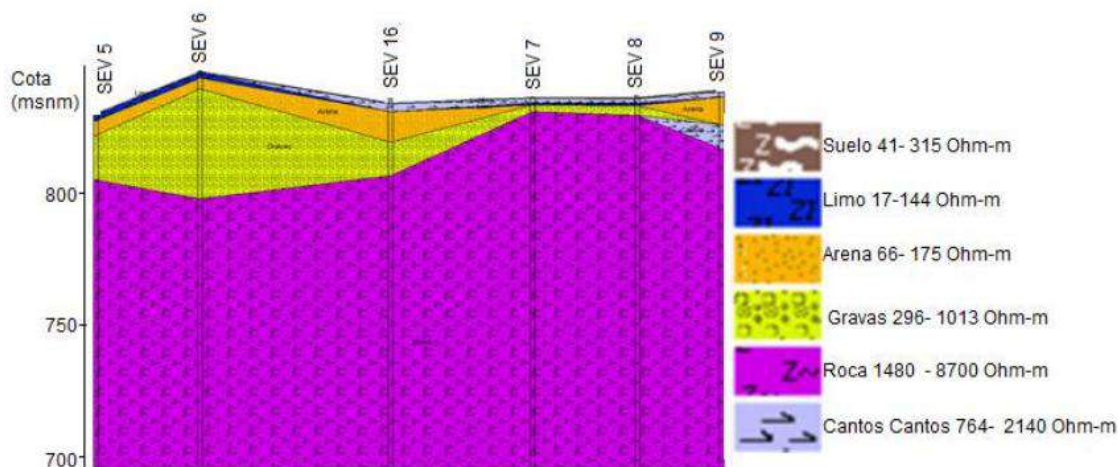


Figura 5.1.6.11 Perfil geológico – geoeléctrico A-A'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle del río Nus

Fuente: Hidrogeocol, 2012 en Integral S.A., 2018

II. Perfil geológico geoeléctrico B-B'

Este perfil de corta longitud (Figura 5.1.6.12), conformado por los SEV's 3, 4, 10 y 11, se ha elaborado sobre el depósito de terraza asociado al estrecho valle de la quebrada Guacas, extendido en dirección SW-NE, desde la parte media de la quebrada, aguas arriba de la hidroeléctrica, hasta el sector de la finca La Bateíta, aguas abajo.

Se caracteriza por contener delgados niveles de terraza, prevaleciendo hacia la parte alta en el sector SW, entre los SEV's -3, 4 y 10, niveles de gravas saturadas, con espesores promedios de 4,0 m que reflejan resistividades entre 296 y 1.013 Ohm-m. A partir del SEV-10 hacia aguas abajo donde se levanta el SEV-11, las gravas gradan a arenas de grano fino a medio e igualmente saturadas, con resistividades entre 66 y 175 Ohm-m, donde el espesor aumenta hasta aproximadamente los 10,0 m. Ambas litologías están cubriendo discordantemente al material saprolítico que cubre a las rocas ígneas del Batolito Antioqueño. El escaso espesor del depósito cuaternario en la quebrada Guacas solo permite la construcción de piezómetros hasta los 8,0 m de profundidad.

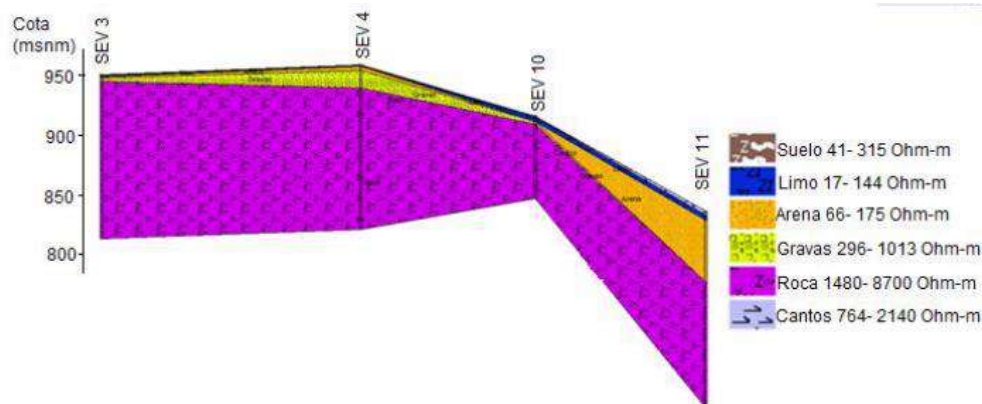


Figura 5.1.6.12 Perfil geológico – geoelectrico B-B'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle de la quebrada Guacas

Fuente: Hidrogeocol, 2012 en Integral S.A., 2018

B. Prospección geoelectrica continua

En la determinación de la profundidad y espesor del material saprolítico producto de la meteorización de la roca ígnea asociada al Batolito Antioqueño y de los depósitos Cuaternarios representados por terrazas relacionadas con las principales corrientes superficiales, se ejecuta el levantamiento de 17 líneas de geoelectrica continua con longitud que varía de 550 m a 670 m y separación de electrodos de corriente de 10,0 m y 12,0 m. Esta disposición permite alcanzar una profundidad de investigación de aproximadamente 100 m, a partir del contraste de los valores de resistividad reflejadas por las unidades geológicas subyacentes.

Con el fin de elegir la mejor disposición electródica que se ajuste a las condiciones topográficas del terreno y a la geología del área versus la relación de afectación por ruido, se realizan varias pruebas antes de la ejecución del primer perfil. Para ello se corrieron en modo prueba los arreglos Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Polo-Dipolo, concluyendo que los dos primeros poseen menos afectación por ruido y por consiguiente se convierten en los de mejor resolución para las condiciones del área. Para la adquisición de la información de campo igualmente se emplea el equipo de resistividad digital de alta resolución y precisión, marca SuperSting™ R8 IP.

La geoelectrica continua es una metodología de prospección en la cual, para evaluar la resistividad del subsuelo, tanto en profundidad como lateralmente, se mantienen constantes las separaciones del arreglo de electrodos, dispuestos equidistantemente a lo largo del perfil de investigación. Una vez disparada la corriente desde el punto central del perfil, en cada punto de medida (electrodo) se registra el gradiente de voltaje y la corriente a una distancia conocida y a una profundidad dada desde la superficie del terreno. Este proceso lo lleva a cabo el equipo (SuperSting™ R8 IP) en forma automática, después de procesar la información obtenida durante aproximadamente una hora, según el arreglo electródico seleccionado (Wenner, Schlumberger, o Dipolo-Dipolo).

Para la realización del levantamiento geoelectrico se utiliza el equipo de resistividad SuperSting® R8 IP con salida de 8 canales y medición continua de resistividades mediante el uso de 8 cables con 56 electrodos en total.

Para lograr dicho objetivo, la información digital es ingresada al programa EarthImager® 2D vs. 2.2., de propiedad de AGIUSA® y debidamente licenciado para Hidrogeocol Ltda. Cada perfil es procesado individualmente utilizando algoritmos adecuados para la inversión y considerando la técnica y la experiencia del consultor en este tipo de tareas. Las bases de datos generadas del levantamiento fueron ingresadas al Sistema de Información Geográfica GIS, creada para el proyecto (ARCGIS 9.3, ESRI®, licenciado para Hidrogeocol Ltda.).

Las resistividades aparentes medidas en campo y la información topográfica a lo largo de los perfiles de prospección, son los datos de entrada para el algoritmo del programa computacional (Earthimager 2D). Con las mediciones de campo, se obtiene una imagen del subsuelo de la distribución de los valores de resistividad aparente en el terreno, imagen que elabora el programa con base en la interpolación lineal de los valores de resistividad aparente registrados en campo. A cada uno de estos valores le corresponde un punto de ubicación que está referenciado por la profundidad, desde la superficie del terreno y la distancia de separación desde el punto de inicio de las medidas de resistividad.

Para el proceso de interpretación, el programa dispone de diversas opciones que van desde la edición de los datos de campo, para la eliminación y ajuste de datos anómalos, hasta la selección de alternativas de operación para el proceso matemático de inversión y modelación (ya sea por elementos finitos o diferencias finitas). La selección adecuada de las diferentes opciones que el programa presenta depende en gran medida del conocimiento de las condiciones geológicas (estratigrafía y tectónica) del terreno, del factor topográfico que imprime el relieve del terreno y de las características y comportamiento de los datos de resistividad aparente tomados en campo.

El proceso de interpretación es iterativo por ensayo y error, en el cual se busca que el modelo de interpretación matemática (modelo de resistividades reales) genere una imagen de resistividades aparentes calculadas, similar a la obtenida en campo con RMS (Root Mean Square) equivalente a la Raíz de la sumatoria de los mínimos cuadrados, indicando el grado de certidumbre de los resultados reportados. Se elige como valor máximo de RMS $\leq 10\%$ para el post-procesamiento de acuerdo con la experiencia del consultor, a las bases teóricas y al ruido de fondo existente en el sitio de estudio.

Cuando el RMS es menor a 5%, se considera que matemáticamente el modelo de resistividad real se aproxima con buena precisión a las condiciones de campo. En segunda instancia, se verifica que el modelo de resistividad real resultante tenga similitud con la interpretación geológica, para lo cual se requiere tener conocimiento de las condiciones y características geológicas presentes en el subsuelo, a fin de tener criterios de clasificación claros para seleccionar la respuesta que se aproxime con mejor detalle a las condiciones naturales presentes.

a. Localización de los perfiles de geoeléctrica continua

La ubicación de los perfiles geoeléctricos se realiza tomando en cuenta un arreglo geométrico y espacial que permita cubrir la mayor parte del área posible y que a su vez admita establecer la correlación de las unidades geoeléctricas presentes obtenidos en cada uno de los perfiles.

Los perfiles PG-2 y PG-15, se sitúan sobre un depósito de terraza aluvial aledaña al río Nus, en la margen izquierda de la confluencia de la quebrada Guacas con el citado río, de tal manera que permita identificar los espesores del depósito sedimentario y las estructuras asociadas a la tectónica local.

Los perfiles PG-3, PG-5, PG-9, PG-10, PG-11 y PG-12 se ubican en las colinas de los sectores de la quebrada Guacas abajo, Guacas arriba y Monjas, para conocer los espesores del saprolito. Los demás perfiles están distribuidos por toda el área de influencia indirecta del proyecto.

La Tabla 5.1.6.13 muestra la ubicación y características de cada perfil ejecutado y la Figura 5.1.6.13 se muestra el respectivo trazado.

En el Anexos_Caracterización_Hidrogeologia_AXO_Inter_perfil_Geoele, se presenta la interpretación de cada perfil de geoelectrica continua levantado.

Tabla 5.1.6.13 Ubicación de las líneas de geoelectrica continua

Identificación	Ubicación	Electrodo de inicio			Electrodo final			Rumb o	Long. (m)	Máxima prof. (m)
		Coordenadas		Cota Z	Coordenadas		Cota Z			
		X	Y		X	Y				
Perfil geoelectrico 1	Finca El Topacio	4.785.155,40	2.279.090,75	846,98	4.784.648,42	2.279.118,76	971,65	266	560	112
Perfil geoelectrico 2	Finca Guacharaca, Norte del Rio Nus	4.789.134,83	2.278.778,91	819,97	4.788.517,39	2.278.944,39	842,77	290	672	126
Perfil geoelectrico 3	Finca San Antonio, al occidente de la Hidroeléctrica	4.788.322,71	2.278.528,09	823,67	4.787.862,88	2.278.084,84	839,33	224	672	123
Perfil geoelectrico 4	Gramalote, al Occidente del Campamento	4.789.052,74	2.278.254,16	826,72	4.788.723,16	2.277.870,40	855,08	209	560	103
Perfil geoelectrico 5	Cerro Gramalote parte alta	4.788.472,27	2.277.147,27	917,08	4.788.110,98	2.277.594,78	925,97	321	672	105
Perfil geoelectrico 6	Vereda el Iris, al norte del trapiche	4.790.581,12	2.277.028,92	951,90	4.789.968,40	2.276.871,31	941,61	232	672	89
Perfil geoelectrico 7	Vereda el Iris, frente a la casa de la Estrella	4.791.536,79	2.276.151,02	899,28	4.791.216,87	2.276.688,36	859,55	327	672	123
Perfil geoelectrico 8	Vereda el Iris, entre la Quebrada Palestina y el carreteable del Iris	4.792.872,21	2.276.968,85	859,25	4.792.939,93	2.276.390,50	836,87	180	560	135
Perfil geoelectrico 9	Guacas Abajo	4.787.046,77	2.275.705,94	1.033,37	4.786.688,81	2.276.136,56	998,49	40	560	112
Perfil geoelectrico 10	Guacas Abajo, Monjas	4.785.414,57	2.276.089,19	1.069,59	4.785.235,93	2.276.695,00	1.098,96	354	672	1 35

Identificación	Ubicación	Electrodo de inicio			Electrodo final			Rumb o	Long. (m)	Máxima prof. (m)
		Coordenadas		Cota	Coordenadas		Cota			
		X	Y	Z	X	Y	Z			
Perfil geoelectrónico 11	Guacas Abajo	4.784.435,67	2.275.653,97	1.006,00	4.784.468,06	2.276.256,95	1.069,92	19	672	135
Perfil geoelectrónico 12	Guacas Arriba	4.782.823,85	2.276.282,45	987,03	4.782.919,74	2.276.757,16	1.105,35	18	560	112
Perfil geoelectrónico 13	Finca Guacharaca, Norte del Rio Nus	4.788.721,61	2.278.486,50	816,00	4.789.078,23	2.278.883,15	817,84	44	560	112
Perfil geoelectrónico 14	Sector San Antonio al Nor-Occidente del Campamento del Obras Públicas	4.786.724,51	2.278.291,39	846,02	4.786.871,50	2.278.787,88	832,34	17	550	110
Perfil geoelectrónico 15	Finca Guacharaca, Norte del Rio Nus	4.789.554,60	2.275.921,81	1.024,95	4.789.814,76	2.276.406,47	957,20	28	550	110
Perfil geoelectrónico 16	Parte Sur-Central del área, en el sector de Peñas Azules	4.787.183,70	2.275.790,14	1.001,06	4.787.733,77	2.275.787,97	990,60	90	550	110
Perfil geoelectrónico 17	Sector de la Hidroeléctrica, cruzando la Quebrada Guacas hacia el cerro Gramalote	4.788.261,47	2.277.964,24	818,74	4.788.778,19	2.277.875,19	889,19	100	550	110

Fuente: Integral S.A., 2018

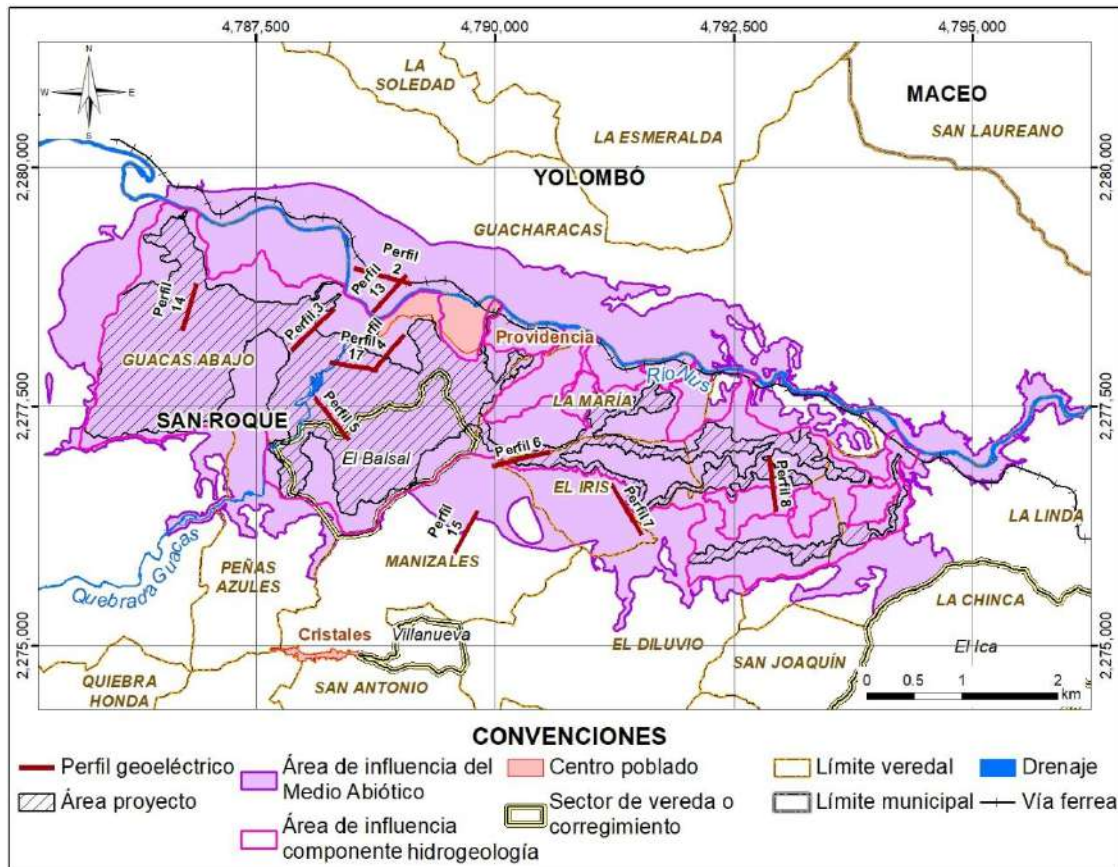


Figura 5.1.6.13 Ubicación en planta de los perfiles geoelectricos verticales

Fuente: Integral S.A. 2025 a partir de Integral S.A., 2018

b. Lectura de los perfiles de prospección de geoelectrica continua

Una vez obtenida la información de campo, se procede a organizar y filtrar los datos para su posterior procesamiento, de tal manera que la interpretación de los perfiles levantados en el área permita evaluar las condiciones en profundidad de las unidades geológicas presentes.

En el modelo de resistividad real que se genera con base en la información de campo, se aprecian las diferentes unidades geoelectricas presentes en el terreno (diferenciadas de acuerdo con los intervalos de resistividad real), condiciones estructurales, espesores, profundidades, etc., características que, al correlacionarlas con la información existente y la geología de campo, permiten obtener un modelo de la situación geológica en el subsuelo evaluado bajo la línea de prospección o pseudosección.

Cada imagen muestra la resistividad aparente medida en campo (imagen superior) y la imagen de la resistividad aparente calculada, resultante de simular en el programa computacional el proceso de campo con base en el modelo de resistividad real (imagen intermedia). En la medida que las dos anteriores imágenes muestren distribuciones de los valores de resistividad similares, es decir que haya una clara relación de correspondencia

mutua entre los valores medidos en campo y los simulados o calculados, (RMS menor a 5%), se le da validez al modelo de resistividad real, desde el punto de vista matemático.

Con base en el modelo de resistividad real resultante y teniendo en cuenta la topografía de superficie (integración y corrección que efectúa directamente el programa de interpretación), se elabora el modelo final de interpretación geológica, en el cual se definen las diferentes formaciones geológicas y las estructuras que conforman el subsuelo, hasta la profundidad de investigación estipulada.

Los diferentes valores de resistividad reflejados están asociados a las diferentes gammas de colores, y son productos de las condiciones matemáticas del modelo de interpretación. Es indispensable que la información de campo sea filtrada y corroborada utilizando técnicas geoestadísticas comúnmente aceptadas como parte del QA/QC para la presentación de datos y del modelo geoelectrico

I. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-1 (A-A')

Está ubicado hacia el sector de la finca El Topacio en la parte alta del cerro, aproximadamente un kilómetro al Sur del Río Nus, con un rumbo de N5°W y una longitud de 560 m., logrando un espaciamiento entre electrodos de 10,0 m., para alcanzar una profundidad aproximada a los 131,0 m en las partes topográficamente más altas. Se utilizó el arreglo Schlumberger (Figura).

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente tres (3) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, del orden de 3,61%.

Desde el electrodo No.14 hasta el electrodo No. 50 (representados por los puntos negros ubicados en la parte superficial de la imagen inferior), se puede observar que en la parte superior aflora una unidad geoelectrica caracterizada por resistividades que van desde 1.050 hasta los 2.700 Ohm-m, representada por las tonalidades verdes y cuyos espesores promedios varía desde 52,0 m en la parte alta y va decreciendo hacia las partes más bajas (26,0 m.). Esta unidad geoelectrica es correlacionable a una secuencia geológica dominada por material saprolitizado, cuyo protolito ígneo corresponde a la unidad geoelectrica más inferior reconocida en la imagen.

Una segunda unidad ocurre hacia el sector del Río Nus, reflejando las resistividades más bajas del orden de 229 Ohm-m hasta los 1.050 Ohm-m, representados en la figura por las tonalidades que van desde el azul hasta el celeste. Se presenta desde el electrodo No. 1 hasta el No. 13 y su espesor no excede los 12,0 m en profundidad. Esta unidad corresponde a materiales de terrazas constituidos por arenas, cantos y bloques que cubren a delgadas capas producto de la meteorización de las rocas ígneas (color celeste), posiblemente relacionada con terrazas de la Quebrada el Topacio.

La tercera unidad geoelectrica está representada por la variación de las tonalidades amarillas hasta las rojas con resistividades entre los 2.700 Ohm-m y superiores a los 10.000 Ohm-m, la cual no aflora, presentando una continuidad lateral con espesores que sobrepasan a la profundidad de estudio (mayores a 100 m.). Dicha unidad geoelectrica se correlaciona con el basamento ígneo, constituido por tonalitas, cuarzodioritas muy poco o no meteorizados.

En general la imagen representa con claridad la respuesta de las secuencias geológicas presentes en donde no se observan discontinuidades asociadas a la presencia de

fallamientos locales o regionales. Las coberturas relacionadas con el material saprolítico en general tienen espesores máximos de 50,0 m en las partes altas, observándose una disposición concordante de este material con el basamento ígneo. En la Figura 5.1.6.14 se muestra la imagen de resistividad generada, también en el Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_Inter_perfil_Geoele

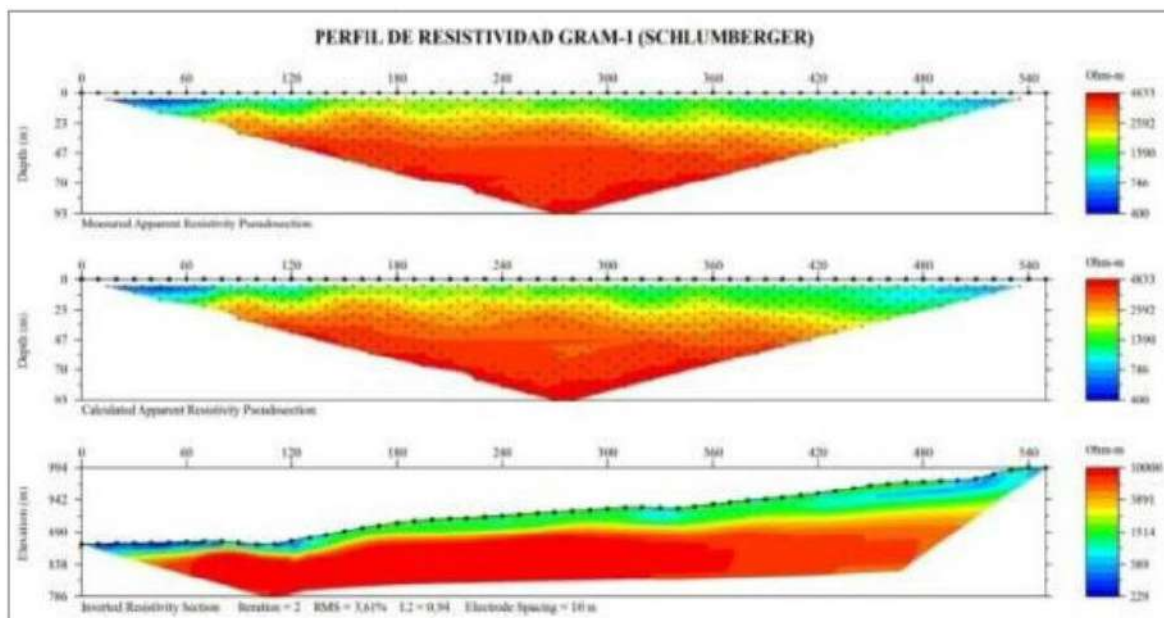


Figura 5.1.6.14 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-1 (A-A')

Fuente: Integral S.A., 2018

II. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-2 (B-B')

El perfil tiene una longitud de 550,0 m., en sentido SE-NW, a lo largo del cual se instalan 56 electrodos separados una distancia de 10,0 m. La profundidad de estudio alcanza los 150,0 m., aproximadamente a lo largo de todo el perfil.

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado utilizando la configuración Schlumberger se diferencian principalmente tres (3) unidades geoelectricas, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, de 4,82%.

La primera unidad geoelectrica corresponde a las resistividades que varían en el rango de 21,7 Ohm-m hasta los 200 Ohm-m, representados en la Figura por los matices azules hasta celestes. Se encuentra prácticamente aflorando en todo el perfil hacia la parte superficial desde el electrodo No. 1 hasta el electrodo No. 44 con espesores máximos de 15 m hacia el Oriente, disminuyendo hacia el Occidente en el pie de colina con espesores que no superan los 7,0 m. Esta unidad corresponde a Depósitos de Terrazas de edad Cuaternaria, constituidos por sedimentos poco consolidados, con granulometría de grano medio a muy grueso como arenas limosas y gravas.

La segunda unidad geoelectrica refleja resistividades que van desde los 200 Ohm-m hasta los 1.015 Ohm-m, representados por coloraciones verdes. En general se encuentra subyaciendo a la primera unidad y se observa un aumento de espesor importante (70,0 m.) hacia la parte izquierda del perfil (sector Oriental) por donde se ubican los electrodos No.

27 y No. 28; mientras hacia el lado derecho del perfil (sector Occidental) los espesores no exceden los 25,0 m. Geológicamente correspondiente al saprolito producto de la meteorización diferencial del basamento ígneo.

La tercera unidad está representada por las tonalidades amarillas hasta rojizas cuyos valores de resistividad aparecen por encima de los 1.000 Ohm-m. Se encuentra cubriendo prácticamente la parte derecha del perfil desde el electrodo No. 28 hasta el electrodo No. 56 y subyaciendo a las unidades anteriormente mencionadas. Los espesores hasta la profundidad de estudio varían desde la parte izquierda del perfil con 32,0 m. hasta los 136,0 m. en la parte derecha. Geológicamente corresponde al basamento ígneo con predominio de granodioritas y granitos de altamente compactos especialmente en donde las resistividades superan a los 5.000 Ohm-m.

El contraste lateral en las resistividades que representan la segunda y tercera unidad geoelectrica es evidente en la Figura 5.1.6.15Figura y permite establecer una serie de hipótesis relacionadas con la presencia de una tectónica activa en el sitio. Al parecer existe una falla de alto ángulo de buzamiento que afecta al sector, provocando que el “bloque” izquierdo (sector Oriental B) haya sufrido un proceso de alteración saprolítica mucho más intenso, mientras hacia el lado derecho del perfil (sector Occidental B') muestre una predominancia absoluta del basamento rocoso hasta la profundidad de estudio. Estas evidencias coinciden con los estudios geológicos superficiales llevados a cabo en el sector que indican la presencia de lineamientos regionales asociados a una tectónica activa post-Cretácica.

En general la imagen representa con claridad la respuesta de las secuencias geológicas regionales en donde se observan discontinuidades marcadas posiblemente asociadas a la presencia de fallamientos locales o regionales. Las coberturas relacionadas con el material saprolítico son marcadas por el contraste de sus espesores e hidrológicamente únicamente existirían unidades potencialmente acuíferas de pobre capacidad de almacenamiento hacia el lado izquierdo del perfil, debido a la fina granulometría que prevalece en la matriz del material saprolítico (arcilloso).

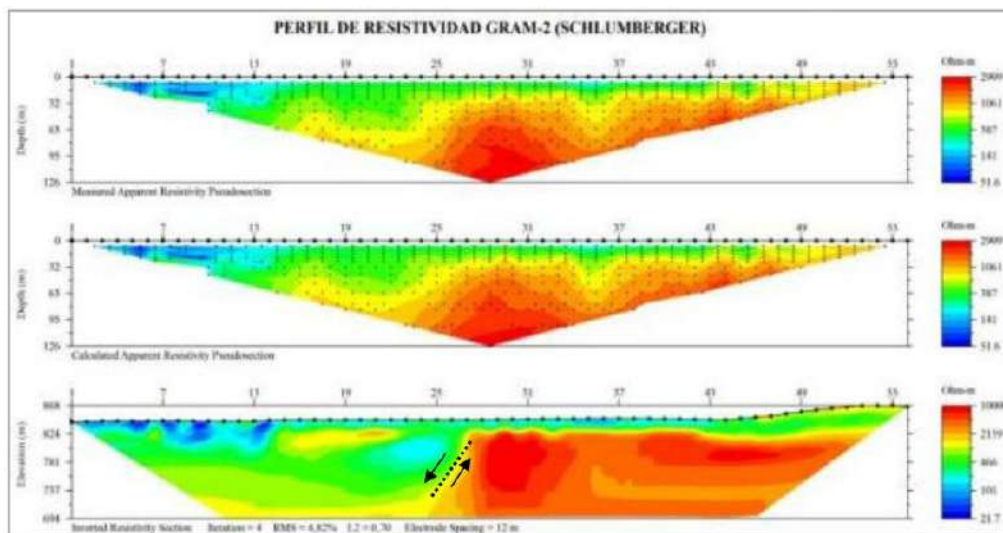


Figura 5.1.6.15 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-2 (B-B')

Fuente: Integral S.A., 2018

III. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-3 (C-C')

Este perfil fue propuesto para investigar el extremo Nor-Occidental del área de Gramalote en el sector de San Antonio, cerca de la pequeña central hidroeléctrica en un sitio topográficamente compuesto por una zona alta de potreros y de colinas suaves (lado izquierdo del perfil) y una zona pantanosa más baja (lado derecho del perfil) en una altitud promedio de 850 msnm. Se utilizó el arreglo Schlumberger (Figura 5.1.6.16).

El espaciamiento entre cada electrodo es de 12,0 m, llegando a alcanzar una longitud total de 660 m lineales con rumbo N46°W. La profundidad máxima de exploración alcanza aproximadamente los 143,0 m. En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,54%.

La primera unidad geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales superficiales que presentan rangos de resistividad entre 1.500 y 3.000 Ohm-m representados en el perfil por las tonalidades rojizas y que afloran entre los intervalos de electrodos No. 1 al No. 6, del No. 11 al. 27 y desde el No. 31 hasta el No. 36. Sus espesores son variables, pero se estima que no exceden los 12,0 m., en las partes más altas. La correlación geológica para esta unidad se asocia con fragmentos de rocas cuarzodioríticas de tamaños centimétricos embebidos dentro de una matriz limo arenosa que han sido transportados por gravedad, como se puede observar en algunos pequeños afloramientos existentes entre los electrodos No. 20 y 24.

La segunda unidad se caracteriza por aflorar hacia las partes bajas en una zona pantanosa, entre los electrodos No 39 al No. 42 y del No. 47 al No. 53. En estos sitios se tuvo que hincar los electrodos a una de 2,0 m. para asegurar una correcta inyección de corriente. Los valores de resistividad son bajos y corresponden a los sedimentos acumulados en el fondo del lecho de la quebrada con rangos que van desde los 70 hasta los 240 Ohm-m, representados en el perfil por las gamas azules y celestes. El espesor promedio no supera los 10,0 m.

La tercera unidad geoelectrica se encuentra representada por el rango de resistividades que va desde los 250 hasta los 800 Ohm-m (rango de tonalidades verdes en la imagen), distribuida a lo largo de todo el perfil con espesores entre 22,0 m. y 36,0 m. Geológicamente corresponde al Saprolito que va alterando su textura conforme alcanza la superficie del terreno, el cual al compactarse alcanza rangos de resistividad desde 800 Ohm-m hasta 1200 Ohm-m.

La cuarta unidad geoelectrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho. El rango de resistividad se encuentra entre los 1.200 y los 3.500 Ohm-m y simbolizado por las tonalidades rojizas. Dicha unidad es correlacionable con rocas meteorizadas del Batolito Antioqueño. Con base en los valores de resistividad y en el reconocimiento de campo, se nota una predominancia de rocas tipo cuarzodioríticas y dioríticas cuyos espesores promedios a lo largo del perfil son de 100 m hasta la profundidad de estudio.

A lo largo del perfil C-C' se presentan las unidades expuestas casi periclinalmente aproximándose a las formas del terreno y en donde no se evidencian estructuras asociadas a la tectónica predominante de la región, pero se observa un mecanismo de alteración diferencial marcado por las variaciones progresivas en resistividad de las unidades (saprolitización). El espesor total aproximado que conforman las unidades poco

consolidadas que se encuentran por encima del macizo rocoso es de 30,0 a 47,0 m., y corresponden a una unidad hidrogeológica de muy baja capacidad de almacenamiento de agua.

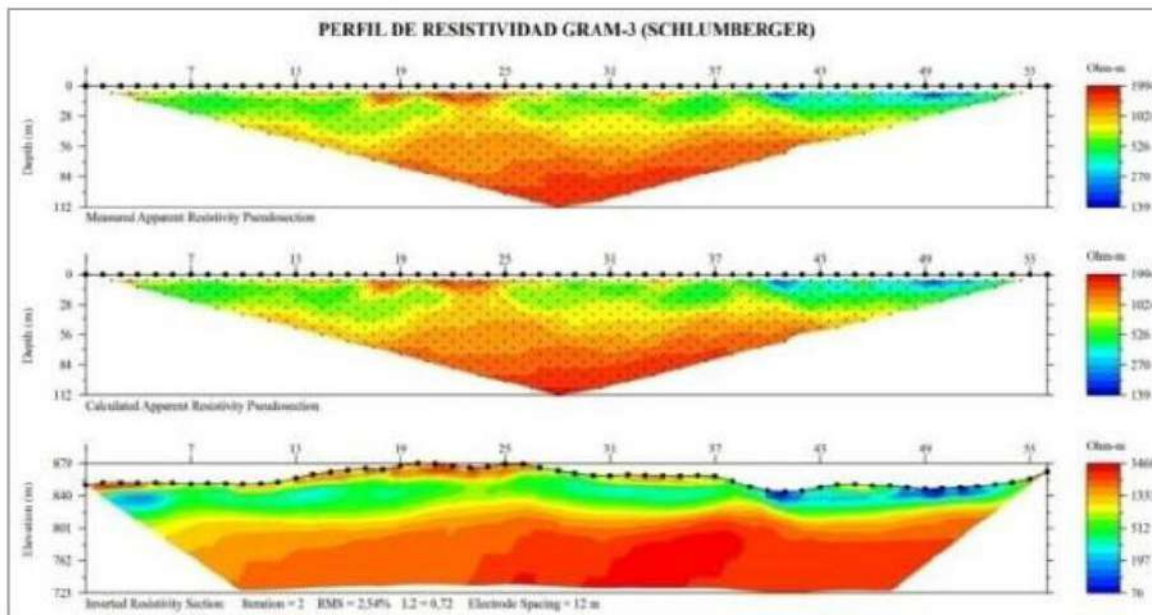


Figura 5.1.6.16 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-3 (C-C')

Fuente: Integral S.A., 2018

IV. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-4 (D-D')

El perfil tiene una longitud de 550,0 m en dirección N40°W, a lo largo del cual se instalaron 56 electrodos separados una distancia de 10,0 m. La profundidad máxima de estudio utilizando la metodología Schlumberger es de aproximadamente 140 m., medidos desde la cota más alta del terreno (Figura 5.1.6.17).

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado (parte inferior de las imágenes) se pueden agrupar principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, del 2,42%. Cabe resaltar que, durante la ejecución del perfil en campo, se reporta “ruido de fondo” que afecta parcialmente la calidad de los datos, especialmente hacia la parte baja del cauce de una quebrada que por allí transita, lo cual fue tomado en cuenta al momento de procesar la información para minimizar dichos errores posiblemente de origen natural.

La primera unidad geoelectrica está caracterizada por valores altos de resistividad del orden de 1.600 Ohm-m hasta 2.200 Ohm-m, representados en el perfil por la variación de matices desde amarillo hasta naranjas, restringidas a las partes más superficiales a lo largo de casi todo el perfil (Electrodos No. 5 al No. 14 y No. 26 al No. 52). Los espesores son casi constantes a lo largo del perfil, con promedios que bordean los 13,0 m. y corresponden a depósitos de materiales transportados por gravedad como bloques de rocas dentro de una matriz saprolítica de grano medio como arenas y limos. En el sitio no se divisan afloramientos que permitan corroborar lo señalado, pero morfológicamente se puede

apreciar que existen mecanismos asociados a movimientos de masas, derrumbes y deslizamientos.

La segunda unidad interpretada corresponde a las resistividades que se encuentran restringidas a las partes topográficamente más bajas por donde cruza la quebrada y en donde se aprecia una disminución en los valores de resistividad (135 Ohm-m hasta los 220 Ohm-m); representados en el perfil por las gammas azules. El espesor promedio es de 12,0 m. y geológicamente pertenece a depósitos de materiales fluviales poco consolidados como limos arenosos y arenas parcialmente saturadas. La configuración mostrada y los espesores asociados generan cierta incertidumbre que es atribuida al “ruido de fondo” del sector.

Una tercera unidad geoelectrica en el rango de resistividades de 220 Ohm-m hasta 1.160 Ohm-m representada por la gama de tonalidades verdes, aparece a lo largo del perfil subyaciendo a la primera unidad y aflorando en varios tramos de este. El espesor es variable de tal manera que en el sector de la mencionada quebrada (electrodos No. 16 al No. 19) alcanza los 11,0 m., mientras hacia el lado derecho de la imagen (sector sur-oeste D') aumenta considerablemente hasta los 70,0 m. Los valores de resistividad y el conocimiento geológico del área permiten asociar estos valores a materiales saprolíticos poco consolidados, producto de la alteración del basamento ígneo.

Una cuarta unidad geoelectrica se presenta en el rango de resistividades superiores a 1.160 Ohm-m, representadas por las tonalidades amarillas hasta el rojo intenso y atribuible geológicamente a la secuencia del Batolito Antioqueño con una predominancia de cuarzodioritas y dioritas. Hacia la parte izquierda de la imagen se observa la forma de un lacolito cuyo espesor hasta la profundidad de estudio es de 70,0 m y va disminuyendo hacia la parte derecha del perfil. En general el trazo de las unidades geológicas-geoelectricas difiere del comportamiento de los perfiles anteriormente mencionados, pero se resalta nuevamente la presencia de una secuencia de materiales poco compactos suprayaciendo al basamento rocoso del Batolito Antioqueño.

Hidrogeológicamente las respuestas de las resistividades no indican la existencia de acuíferos importantes, pero en los sectores donde aparece la segunda unidad con tonos azules y resistividades entre 135 y 220 Ohm-m, reflejadas por materiales de grano medio, podría existir la posibilidad de encontrar cuerpos de agua muy localizados, recargados por la quebrada que por allí transita.

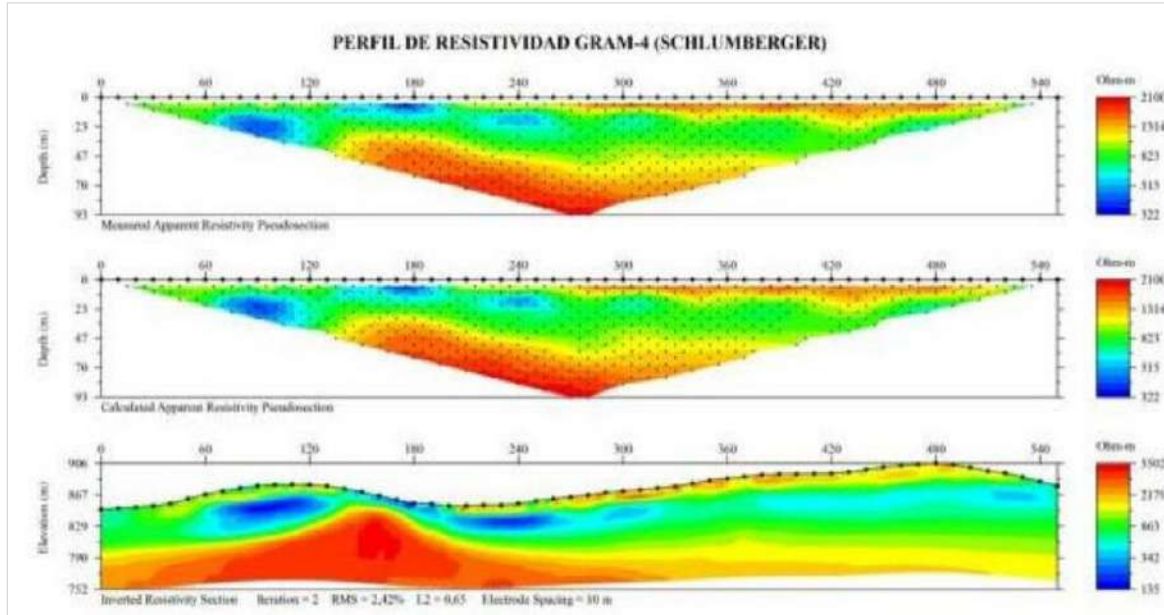


Figura 5.1.6.17 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-4 (D-D')

Fuente: Integral S.A., 2018

V. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-5 (E-E')

Perfil geoelectrico ubicado al oriente de la quebrada Guacas en el sector conocido como El Balsal. Se dispuso un espaciamento medido en terreno entre electrodos de 12,0 m., para alcanzar una profundidad de 153,0 m. En general el terreno presenta fuertes escarpes con una morfología de colinas abruptas. La longitud total en terreno es de 660 m, con rumbo N39°W y configuración Schlumberger (Figura 5.1.6.18).

Se pueden agrupar las resistividades en cuatro rangos principales de acuerdo con los contrastes de las unidades presentes y su disposición a lo largo del perfil.

La primera unidad geológico- geoelectrica corresponde a los materiales que se encuentran en las partes altas de las colinas con rangos de resistividad del orden de 4.000 Ohm-m hasta 5.000 Ohm-m (tonalidades rojizas) pertenecientes a restos de rocas saprolitizadas medianamente compactas con presencia de escasos bloques de carácter diorítico, lo que se puede corroborar al observar algunos pequeños afloramientos encontrados entre los electrodos No. 45 al No. 49. Su ocurrencia es más bien restringida y los espesores asociados no sobrepasan los 12,0 m.

La segunda unidad geológico- geoelectrica corresponde a los materiales de más baja resistividad (menores a 500 Ohm-m), relacionadas a sedimentos de rellenos de cauces y/o paleocauces. Afloran principalmente en la Quebrada Guacas donde se dispusieron los electrodos No. 23 al No. 26. Se presentan en los tonos azules a celestes y los espesores asociados no superan los 7,0 m.

La tercera unidad geológico-geoelectrica se encuentra presente a lo largo de todo el perfil E-E' y está representada por las tonalidades verdes con rangos de resistividad desde los 500 hasta los 2.000 Ohm-m aproximadamente, marcando un contraste definido con el

basamento subyacente. Geológicamente estos materiales corresponden al Saprolito muy alterado, con espesores variables entre 20,0 m y 40,0 m.

La cuarta unidad geológico-geoelectrica aparece representada por las tonalidades amarillas rojizas en rangos de resistividad mayores a los 200 Ohm-m, expuestas a lo largo de todo el perfil subyacentes a las unidades anteriores. Corresponde al basamento de rocas ígneas (granodioritas, cuarzodioritas) con espesores que superan los 100 m. hasta la profundidad de estudio.

En general el perfil presenta el mismo esquema geológico que los perfiles anteriores y no se distinguen discontinuidades marcadas lateralmente que hagan pensar en la presencia de fallamientos en este sector. Hidrogeológicamente no se considera la existencia de unidades potencialmente acuíferas.

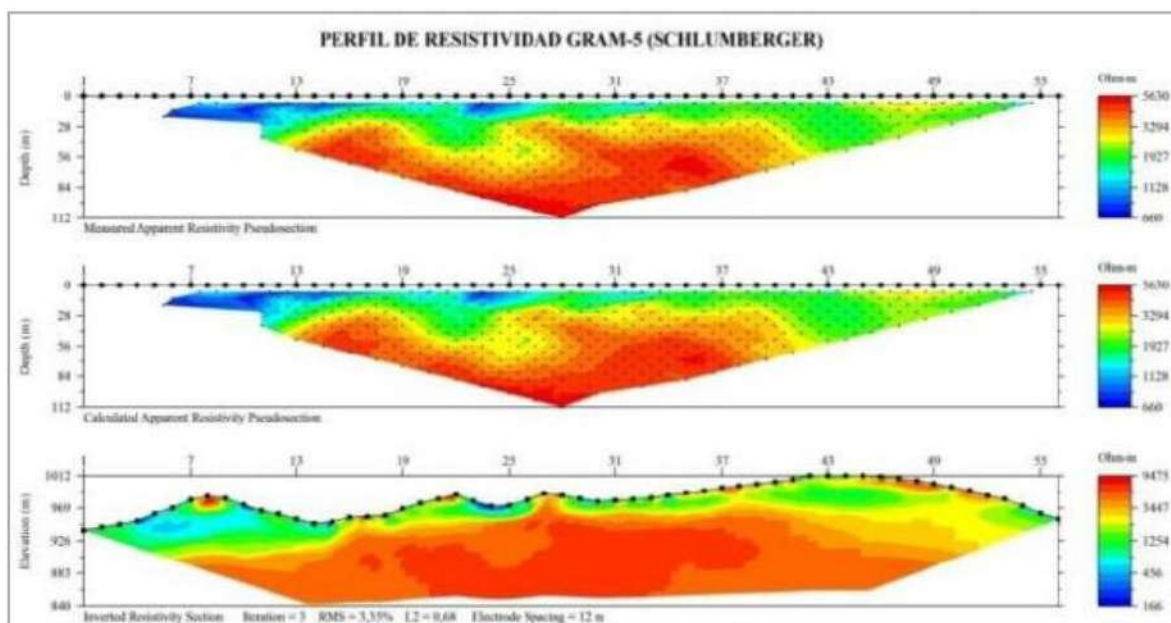


Figura 5.1.6.18 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-5 (E-E')

Fuente: Integral S.A., 2018

VI. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-6 (F-F')

En el sector denominado "Vereda del Iris", el cual corresponde a una zona de escarpes pronunciados, se dispuso el perfil PG-6 (Figura 5.1.6.19.) con un espaciamiento entre electrodos de 12,0 m., cubriendo una longitud total en terreno de 660 m., en dirección N15°E. La configuración utilizada, Wenner, permite alcanzar profundidades de hasta 100,0 m con respecto a la superficie del terreno.

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente tres (3) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,73%.

La primera unidad de resistividad representa a las gamas azules con resistividades entre 60 Ohm-m y 200 Ohm-m, aflorando en superficie a lo largo del perfil. Estas resistividades están asociadas a materiales poco consolidados del tipo arenas limosas y/o arcillosas que

se forman sobre todo en las partes bajas de las quebradas. El espesor no supera los 10,0 m., y se dispone en general de manera concordante con el relieve del terreno.

La segunda unidad aparece representada por matices verdes con rangos de resistividad de 200 Ohm-m hasta 1.100 Ohm-m, aproximadamente. Se encuentra suprayaciendo al basamento ígneo con espesores de 12,0 m hasta 35,0 m, geológicamente asociada al material Saprolítico del Batolito Antioqueño.

La tercera unidad se encuentra asociada tanto a las rocas ígneas del Batolito propiamente dicho (colores rojizos) como al material saprolitizado (matices amarillos) que caen en los rangos de resistividad desde 1.100 hasta 2.800 Ohm-m. En general se trata de un cuerpo periclinal a la morfología del terreno con espesores que superan la profundidad de estudio (mayores a 70,0 m) que ha sufrido procesos de alteración diferencial hacia las partes más superficiales. Las resistividades no se presentan tan altas como los observados en perfiles anteriores, pero la respuesta es coherente con la geología local en donde se muestra claramente la disposición espacial de las secuencias presentes. Por otra parte, no se evidencian variaciones laterales importantes en los valores de resistividad que indiquen la presencia de estructuras asociadas a la tectónica local.

Las unidades descritas no presentan las condiciones ideales que permitan inferir la existencia de acuíferos importantes a lo largo del perfil.

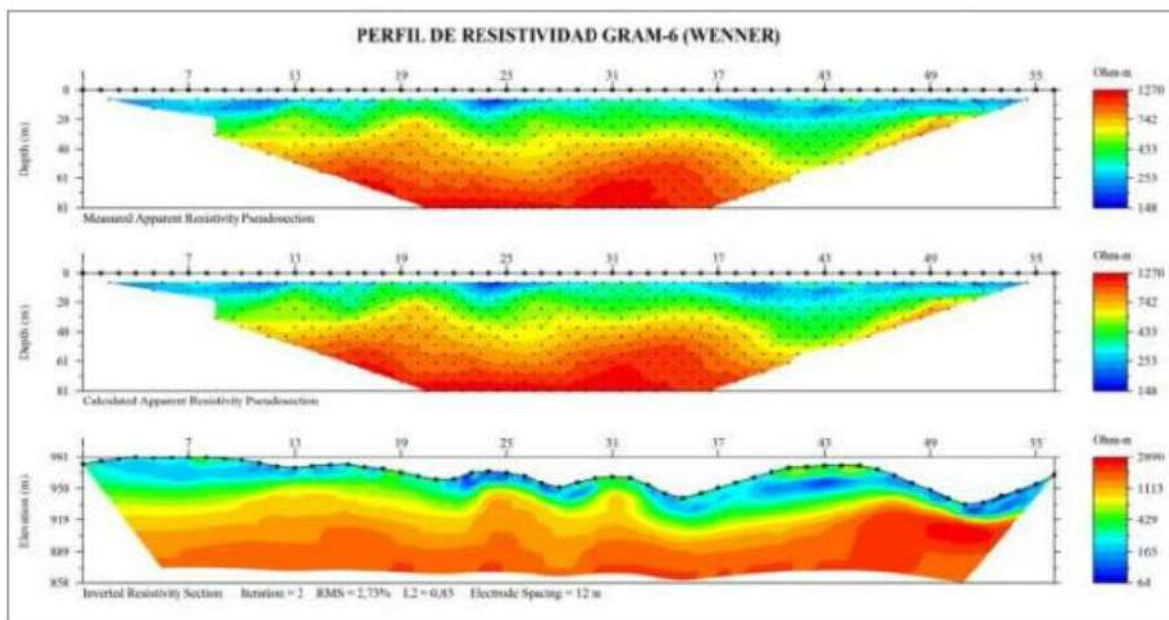


Figura 5.1.6.19 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-6 (F-F')

Fuente: Integral S.A., 2018

VII. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-7 (G-G')

El perfil (Figura 5.1.6.20) atraviesa una sección de la quebrada La Palestina situada al suroriente del cerro Gramalote. Morfológicamente el centro del perfil se encuentra sobre una terraza aluvial relativamente plana y hacia los límites laterales se aprecian colinas que sobrepasan los 900 msnm.

En el modelo geológico-geoeléctrico interpretado se diferencian principalmente cinco (5) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,89% y por su posición espacial en el perfil. Se utilizan configuraciones Schlumberger y Wenner proporcionando similares resultados en ambos casos.

La primera unidad geológico-geoeléctrica corresponde a los materiales presentes en la parte superior de la colina, correspondiente al lado derecho del perfil (sector suroriental) entre los electrodos No. 41 al No. 48, cuyas resistividades caen en el rango de 1.200 Ohm-m hasta los 2.300 Ohm-m, valores reflejados por cantos y bloques caídos, alterados y embebidos en una matriz saprolítica. Su ocurrencia es restringida y su espesor no supera los 11,0 m. En el perfil están representados por las tonalidades amarillas y rojas hacia la parte superior.

La segunda unidad geológica-geoeléctrica se encuentra definida por los rangos de resistividad desde 12 hasta los 130 Ohm-m, expresado por los matices azules hasta celestes y restringidos a las partes bajas en las terrazas aluviales cuaternarias (electrodos No. 20 hasta el No. 35) con un espesor que no excede los 10,0 m.

La tercera unidad agrupa las resistividades del orden de 130 Ohm-m hasta los 1.000 Ohm-m y se representan en el perfil por tonalidades verdes. Se encuentran expuestas a lo largo de todo el perfil y corresponden geológicamente al saprolítico del Batolito Antioqueño, con un alto grado de alteración. Su espesor es variable, aumentando progresivamente desde el lado izquierdo del perfil (G) donde alcanza los 12,0 m hasta los 45,0 m en su parte derecha (G').

La cuarta unidad representa geológicamente al material saprolítico con un grado menor de alteración que la unidad anterior. Está simbolizado por los tonos anaranjadas y amarillos con resistividades del orden de 1.000 Ohm-m hasta los 2.000 Ohm-m.

La quinta unidad representa el macizo rocoso correlacionable con rocas ígneas fresca del Batolito Antioqueño, el cual muestra valores de resistividad superiores a los 2.000 Ohm-m y representados en el perfil por las tonalidades rojas. Los espesores asociados superan a la profundidad de estudio. El perfil permite observar una discontinuidad lateral en los valores de resistividad, desde su centro hacia la derecha, lo que hace pensar en la existencia de una posible falla asociada a una tectónica post-Cretácica. Posiblemente se trate de una falla de fuerte buzamiento que provoca el desplazamiento de un bloque y su posterior alteración saprolítica diferencial.

Hidrogeológicamente no se presentan unidades interesantes que posean características hidráulicas y dimensiones favorables para el almacenamiento de importantes volúmenes de agua subterránea.

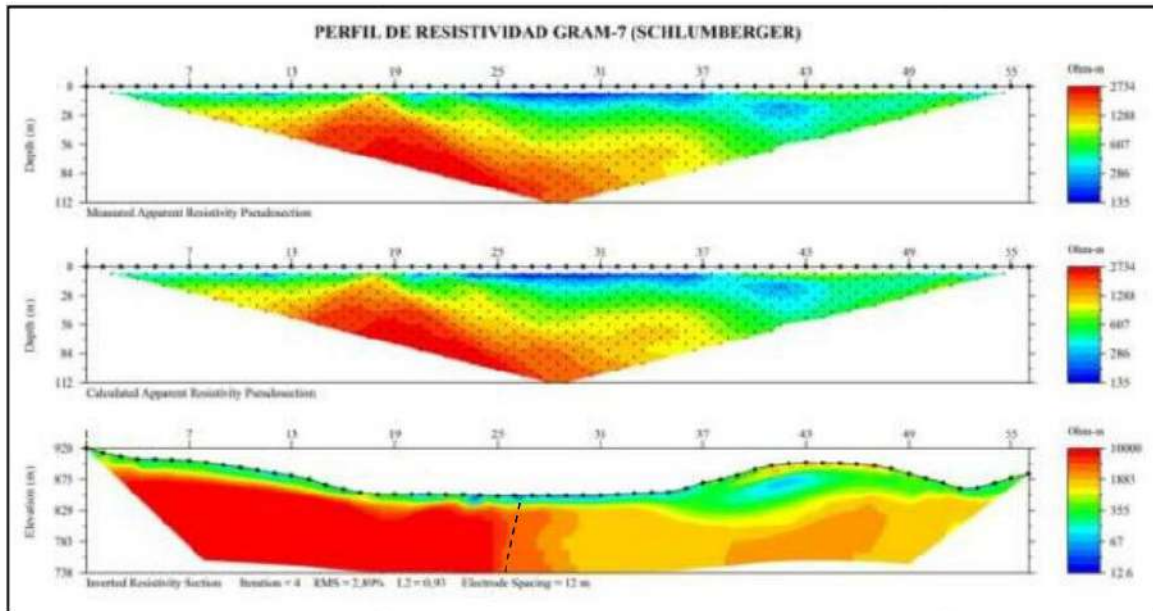


Figura 5.1.6.20 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-7 (G-G')

Fuente: Integral S.A., 2018

VIII. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-8 (H-H')

Perfil ubicado en dirección norte-sur, cubriendo una sección de la quebrada Palestina y el carretable a la finca del Iris. La longitud total es de 660 m., con un espaciamento entre electrodos de 12,0 m., para alcanzar una profundidad de exploración aproximada de 150,0 m (Figura).

El modelo geológico – geoelectrico agrupa cuatro (4) unidades basadas en el contraste de las resistividades, en el conocimiento de la geología local y su distribución a lo largo del perfil. Las configuraciones Wenner y Schlumberger arrojaron resultados similares.

La primera unidad corresponde a los materiales aflorantes en las partes superiores del perfil, específicamente entre los electrodos No. 12 al No. 18 y No. 43 al No.56 con resistividades promedio de 2.000 Ohm-m (matices amarillos y rojos). Los pequeños afloramientos presentes en campo corresponden a bloques y cantos de rocas dioríticas caídas y alteradas hasta de tamaños métricos. El espesor de esta unidad no excede los 12,0 m.

La segunda unidad agrupa resistividades desde 32 hasta 180 Ohm-m aproximadamente, las cuales en el perfil están representadas por las gamas azules. Esta unidad aparece restringida hacia las zonas de piedemonte en las quebradas y geológicamente corresponden a sedimentos poco consolidados como arenas y limos que forman la base del lecho de estas y de antiguos paleocauces. El espesor de esta unidad no excede 1,0 m. La tercera unidad es más continua a lo largo del perfil G-G' y está representada por las tonalidades celestes y verdes. Los valores de resistividades oscilan entre los 180 y los 900 Ohm-m, con espesores muy variables desde los 30,0 m (electrodos No. 32 al No. 35) hasta los 100,0 m. Geológicamente corresponden al Saprolito producto de la alteración del basamento ígneo existente.

La cuarta unidad incumbe a los materiales que aparecen hasta la profundidad de estudio y a lo largo de todo el perfil con resistividades superiores a los 900 Ohm-m, representados por las coloraciones amarillas (Saprolito) y tonalidades rojizas que representan a rocas del Batolito Antioqueño en donde se observa que existen alteraciones diferenciales. Al parecer pueden ocurrir componentes tectónicos locales que provocan las grandes variaciones en espesores de la segunda unidad geológica-geoeléctrica, relacionados a posibles fallamientos, considerando la uniformidad de dicha unidad en varios perfiles interpretados anteriormente.

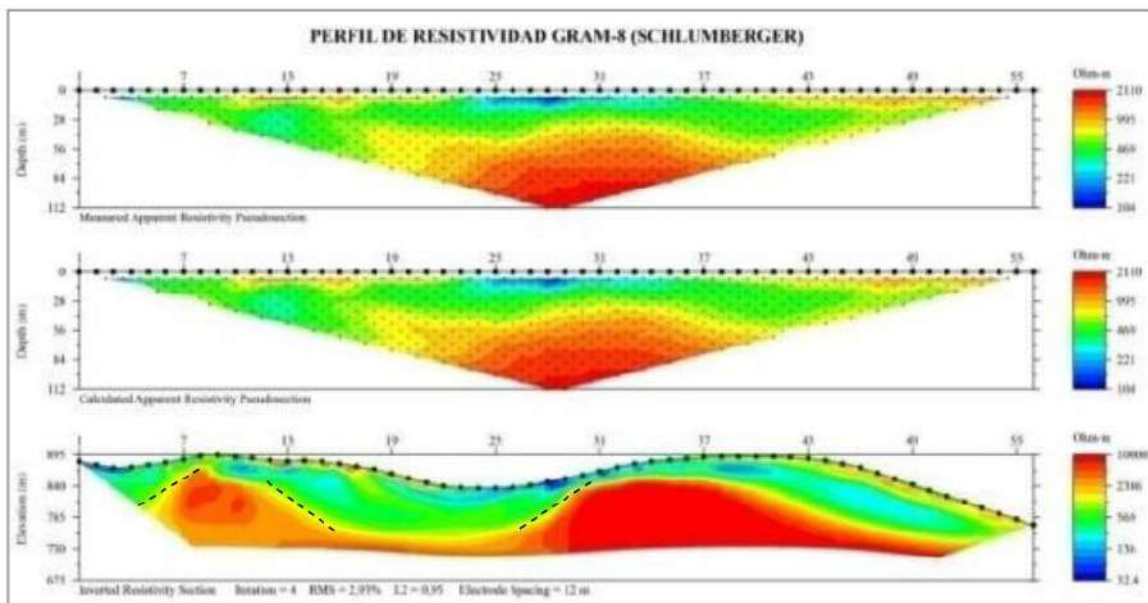


Figura 5.1.6.21 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-8 (H-H')

Fuente: Integral S.A., 2018

IX. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-9 (I-I')

Ubicado sobre una sección de la quebrada Guacas. Morfológicamente el sitio está conformado por una colina que alcanza los 1.026 msnm. hacia el sector suroriental y desciende hasta los 960 msnm., formando una planicie aluvial hacia la parte central y noroccidental. La longitud total es de 550 m., con espaciamento entre electrodos de 10,0 m. La profundidad total alcanzada que utiliza la configuración Schlumberger es de 108,0 m con respecto a la superficie del terreno (Figura 5.1.6.22).

Con base a la respuesta de las resistividades obtenidas en el perfil PG-9, se interpretan cuatro (4) unidades geológicas geoelectricas correlacionables con las unidades anteriormente reportadas en los perfiles PG-1 al PG-8. El Error Medio Porcentual es de 2,71% lo que indica una buena respuesta del subsuelo frente a la inyección de corriente.

La primera unidad corresponde a bloques caídos embebidos en material saprolítico expuestos hacia las partes altas de la colina entre los electrodos No. 8 al No. 14. Están representados en el perfil por las tonalidades amarillas y rojizas cuyas resistividades fluctúan de 1.500 Ohm-m hasta 3.000 Ohm-m.

La segunda unidad interpretada corresponde a los materiales propios del relleno de la terraza aluvial (limos arenosos, arcillas limosas), caracterizados por estar saturados y poseer bajas resistividades. Afloran desde el piedemonte de la colina por toda la planicie, representados en el perfil por los tonos azules, reflejando valores de resistividad entre 51 y 200 Ohm-m. Los espesores asociados promedios no exceden los 8,0 m.

La tercera unidad asociada a la colina presente en el extremo izquierdo del perfil se encuentra simbolizada por las tonalidades verdes que se exponen desde el electrodo No.1 hasta el No.22 que reflejan resistividades desde 200 Ohm-m hasta los 1.300 Ohm-m. Geológicamente equivale al material saprolítico con moderado grado de alteración, alcanzando un espesor cercano a los 40,0 m.

La cuarta unidad que refleja valores de resistividad superiores a los 1.300 Ohm-m, está representada por los matices amarillos (valores entre 1.300 y 1.800 Ohm-m aproximadamente) que atañen a rocas moderadamente saprolitizadas y por las tonalidades rojas (valores superiores a 1.800 Ohm-m) que equivalen al basamento ígneo propiamente dicho. No se evidencian discontinuidades laterales en los valores de resistividad que permitan el reconocimiento de estructuras tectónicas a lo largo del perfil.

Según los valores de resistividad y el conocimiento de la geología, no existen unidades hidrogeológicas de buena permeabilidad que indiquen potenciales acuíferos.

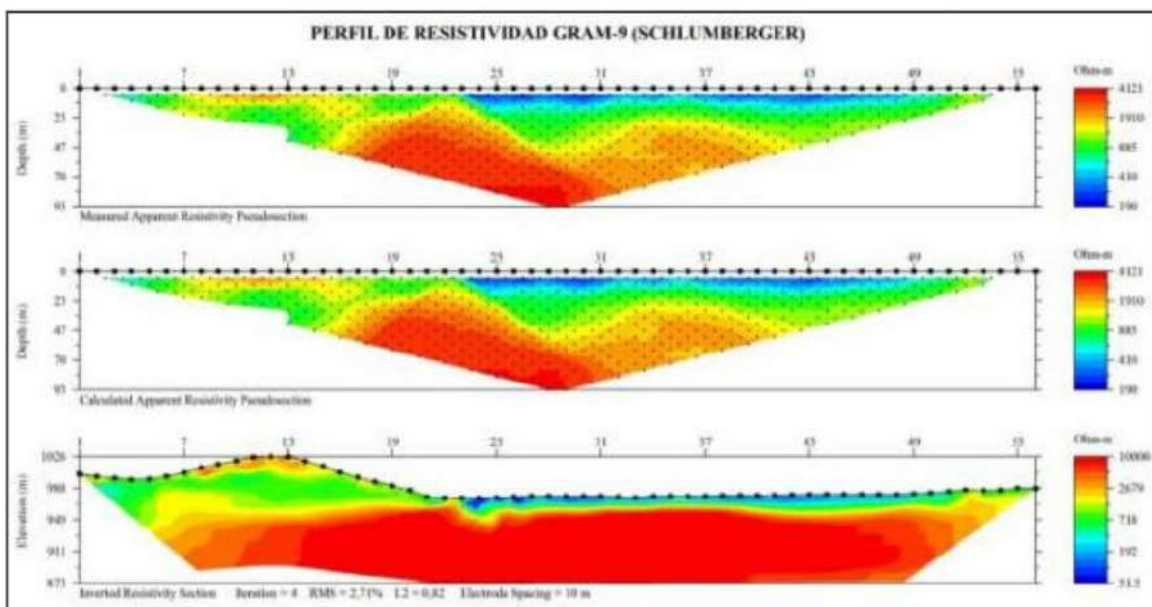


Figura 5.1.6.22 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-9 (I-I')

Fuente: Integral S.A., 2018

X. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-10 (J-J')

Se levanta cercano al sector Las Margaritas. Tiene una dirección N73°W con un espaciamiento entre electrodos de 12,0 m., para alcanzar la longitud total de 660 m y una profundidad máxima de investigación de 136,0 m (Figura 5.1.6.23).

De la interpretación de la imagen generada utilizando la configuración Schlumberger se agrupan según los contrastes de resistividad al menos tres (3) unidades geológico-geoelectricas localizadas a lo largo del perfil y que son correlacionables con las existentes en los perfiles anteriores.

La unidad representada por las tonos azules y celestes restringidos hacia el sector de la quebrada (electrodos No. 38 al No. 43), presentan rangos de resistividad del orden de 79 Ohm-m hasta 350 Ohm-m, reflejados por sedimentos poco consolidados que forman el lecho de la quebrada y cuyo espesor no sobrepasa los 10,0 m. En general están constituidos por arenas limosas y gravas arenosas saturadas.

Una segunda unidad se presenta a lo largo de todo el perfil y está representada por las tonalidades verdes cuyas resistividades van desde los 350 Ohm-m hasta los 1100 Ohm-m y representan al Saprolito. Sus espesores son variables, pero en general oscilan entre 20,0 y 50,0 m.

La tercera y última unidad geológica-geoelectrica, ocurre hacia la base del perfil con valores de resistividad desde 1.100 Ohm-m hasta 2.200 Ohm-m, simbolizados por los matices naranjados amarillentos que equivalen al material saprolítico moderadamente alterado.

Los tonos rojos que representan resistividades mayores a 2.200 Ohm-m están reflejados por rocas ígneas algo alteradas del Batolito Antioqueño. Los espesores superan a la profundidad de estudio (mayores a 80,0 m.).

No se observan discontinuidades laterales que indiquen zonas activas de fallamientos e hidrogeológicamente las unidades presentes no poseen propiedades hidráulicas óptimas para corroborar la existencia de acuíferos importantes en el sector.

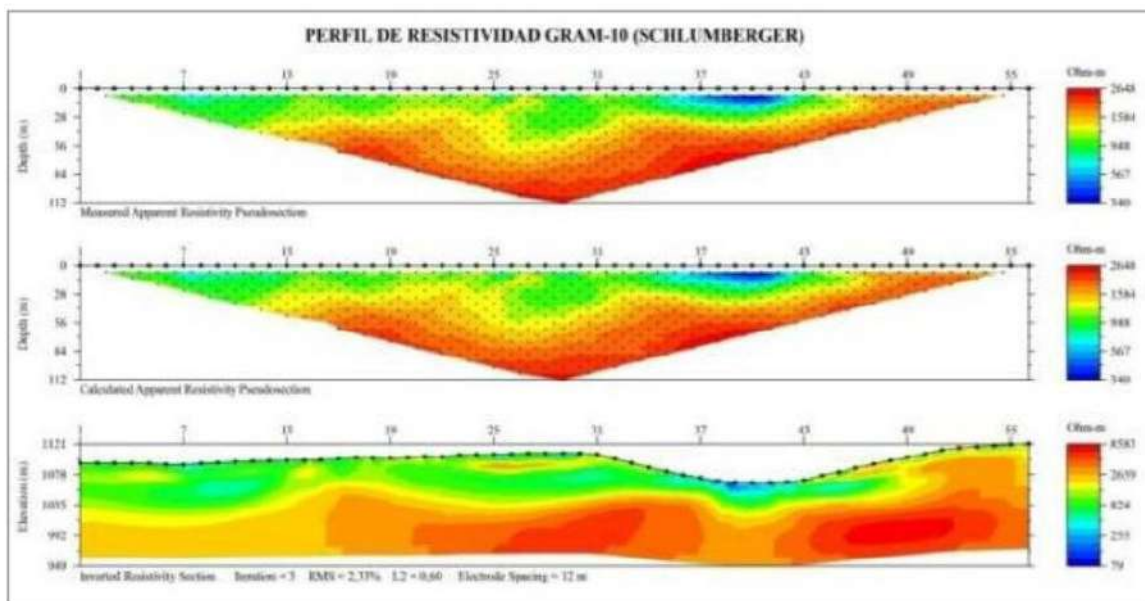


Figura 5.1.6.23 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-10 (J-J')

Fuente: Integral S.A., 2018

XI. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-11 (K-K')

Ubicado sobre una sección de la Quebrada Guacas, al Sur del cerro Gramalote. Se levanta en un sector topográficamente semiplano que supera los 1.000 m.s.n.m (Figura 5.1.6.24). La longitud total de 660 m. El espaciamiento entre electrodos se hace cada 12,0 m., logrando alcanzar una máxima profundidad de investigación cercana a los 120,0 m con respecto al nivel de la superficie del terreno.

El modelo geológico-geoelectrico bajo configuración Schlumberger muestra contrastes de resistividades bien marcados que permiten agruparlas en cuatro unidades bien diferenciadas. El RMS es bajo del orden de 2,65% indicando con ello que el tratamiento de los datos tiene un buen grado de confiabilidad.

La primera unidad geológica-geoelectrica representa los valores de resistividad altos que se encuentran aflorando en la sección derecha del perfil entre los electrodos No. 49 al No. 56, simbolizados por matices rojizos con resistividades de 2.900 Ohm-m hasta 3.500 Ohm-m. Por su ubicación y considerando la presencia de materiales sueltos, esta unidad es correlacionable con bloques y cantos caídos por gravedad embebidos en matriz saprolítica, la cual rellena un flanco de la colina.

Una segunda unidad que exhibe tonalidades celestes y azules (resistividades en el orden de 44 Ohm-m hasta 180 Ohm-m), representa los sedimentos saturados asociados a las terrazas aluviales cuaternarias aflorantes en casi toda la sección. El espesor asociado no sobrepasa los 12,0 m con respecto al nivel circundante.

Una tercera unidad se relaciona con material saprolítico que refleja valores de resistividad entre 180 y 900 Ohm-m (tonos verdes), los cuales subyacen discordantemente a las unidades anteriores. El espesor es variable entre 20,0 m. y 40,0 m.

La cuarta unidad representa tanto el material saprolítico de poco espesor como el basamento constituido por rocas ígneas inalteradas del Batolito Antioqueño. Las resistividades superan los 900 Ohm-m hasta los 4000 Ohm-m y los espesores hasta la profundidad de estudio superan los 80,0 m.

No se observa claramente la existencia de discontinuidades laterales que puedan asociarse a posibles fallamientos tectónicos.

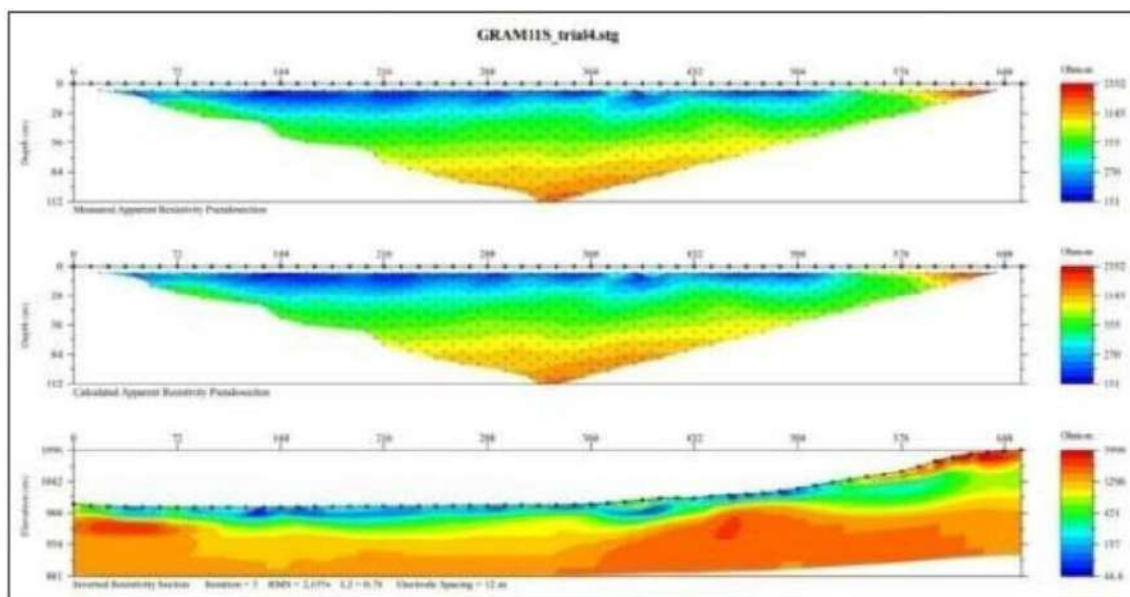


Figura 5.1.6.24 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-11 (K-K')

Fuente: Integral S.A., 2018

XII. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-12 (L-L')

Este perfil fue propuesto para investigar el extremo suroccidental del área de influencia directa de Gramalote, hacia las partes altas de la quebrada Guacas a una altitud superior a los 1.045 msnm. El espaciamiento entre cada electrodo es de 10,0 m, llegando a alcanzar una longitud total 550,0 m lineales con rumbo N18°E. La profundidad máxima de exploración cercana a los 130,0 m, aproximadamente (Figura 5.1.6.25).

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,95%.

La primera unidad geológica-geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales superficiales que presentan rangos superiores a 4.000 Ohm-m, representados en el perfil por las tonalidades rojizas y que afloran entre los intervalos de electrodos No. 4 al No. 7 y del No. 49 al No. 53. Sus espesores son variables, pero no superan los 10,0 m., en las partes más altas. La correlación geológica para esta unidad se asocia con bloques de rocas cuarzodioríticas de tamaños métricos embebidos dentro de una matriz saprolítica que han sido trasladados por gravedad, como se puede observar en algunos afloramientos existentes en el sector.

La segunda unidad geológica-geoelectrica se presenta hacia el centro del perfil y hacia el lado izquierdo con espesores importantes (30,0 m). Los valores de resistividad son bajos y van desde los 140 Ohm-m hasta los 500 Ohm-m, representados por las gamas azules y celestes. Geológicamente corresponde tanto a material saprolítico muy alterado como a depósitos de paleocauces que han sido rellenos por sedimentos areno limosos.

La tercera unidad está representada por el rango de resistividades que va desde los 500 Ohm-m hasta los 2.000 Ohm-m (rango de tonalidades verdes), distribuida a lo largo de todo

el perfil con espesores promedios de 40,0 m. Geológicamente corresponde al Saprolito con una meteorización diferencial hacia la superficie.

La cuarta unidad geológica-geoeléctrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho, el cual está compuesto por materiales más compactos que los anteriores. El rango de resistividad supera los 2.000 Ohm-m, representado por las gammas rojizas. Dicha unidad es correlacionable con el Batolito Antioqueño.

A lo largo del perfil L-L' se presentan las unidades expuestas discordantemente y posiblemente existan fallamientos asociados a la tectónica predominante de la región. Por la litología fina a muy fina predominante en las unidades expuestas, permite colegir que presentan una pobre capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas.

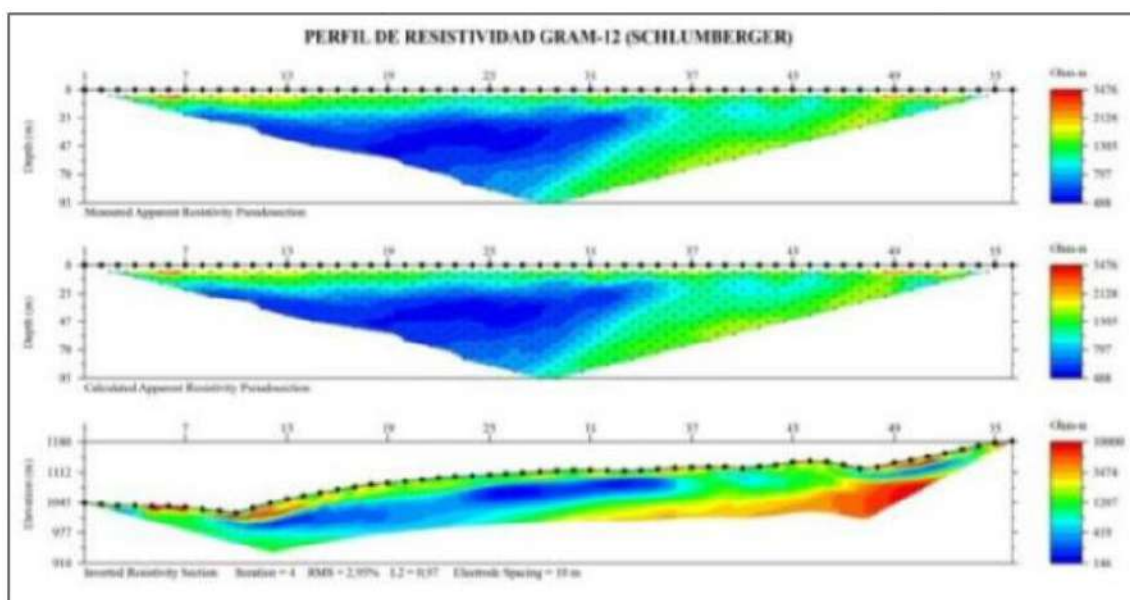


Figura 5.1.6.25 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-12 (L-L')

Fuente: Integral S.A., 2018

XIII. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-13 (M-M')

El perfil en general cubre la terraza aluvial del extremo Norte del Río Nus. La profundidad máxima de estudio alcanza los 113,0 m., con respecto al nivel circundante, utilizando un espaciamiento entre electrodos de 10,0 m bajo configuración Schlumberger.

La imagen interpretada (Figura 5.1.6.26) permite discriminar las unidades geológico-geoeléctricas por el contraste de resistividades que presentan cada una de estas a lo largo del perfil, que posee un RMS bajo de 2,38% y que asegura que la inversión matemática del modelo sea confiable.

Para corroborar los resultados obtenidos en el perfil PG-2 en el cual se observan variaciones laterales que hacen pensar en posibles fallamientos asociados a una tectónica regional, se localiza el perfil PG-13. Un total de tres (3) unidades geológico-geoeléctricas son reconocidas a lo largo del perfil.

La primera corresponde a sedimentos limo arenosos saturados asociados a las terrazas aluviales formadas a lo largo del Río Nus, con un espesor promedio de 10,0 m, las cuales aparecen a lo largo del perfil desde el electrodo No. 14 hasta el No.19 y del electrodo No. 30 al 56, con resistividades desde 45 Ohm-m hasta 170 Ohm-m, representados por las tonalidades azules.

La segunda unidad aparece relacionada con el material saprolítico producto de la alteración de la roca ígnea del Batolito Antioqueño, y representado en el perfil por las tonalidades desde celestes hasta amarillas, con rango de resistividades entre 170 Ohm-m y 1.100 Ohm-m. Subyace a la unidad anterior, observándose un incremento importante en el espesor a partir del electrodo No. 34, que supera los 70,0 m.

La tercera unidad está representada por las tonalidades naranjas hasta rojizas cuyos valores de resistividad se encuentran por encima de los 1,100 Ohm-m. Aparece cubriendo prácticamente la parte izquierda del perfil desde el electrodo No. 1 hasta el electrodo No. 34 y se encuentra subyaciendo a las unidades anteriormente mencionadas. Los espesores hasta la profundidad de estudio van desde los 100,0 m. (parte izquierda del perfil) hasta los 30,0 m. (parte derecha del perfil). Geológicamente corresponde al basamento ígneo formado en el sector posiblemente con una predominancia de granodioritas y granitos totalmente competentes, especialmente en donde las resistividades superan a los 5.000 Ohm-m, y por material saprolitizado de poco espesor asociadas a las tonalidades naranjas. El contraste lateral en las resistividades que representan la segunda y tercera unidad geológica-geoelectrica es evidente en la Figura , y permite junto con la interpretación del perfil PG-2 asociar la presencia de elementos tectónicos en el sitio. Estas evidencias coinciden con los estudios geológicos superficiales llevados a cabo en el sector que indican la presencia de lineamientos regionales asociados a una tectónica activa post-Cretácica

Hidrológicamente la única unidad que puede considerarse potencialmente acuífera, son los cuerpos aluviales, que, aunque presenta poco espesor, presentan una granulometría y comportamiento apropiado para la acumulación y transmisividad de agua. Las unidades geológicas dos y tres, no se consideran unidades potencialmente acuíferas dado que correspondiente a los materiales saprolíticos, por su fina granulometría, presentan condiciones muy pobres de almacenamiento de aguas subterráneas.

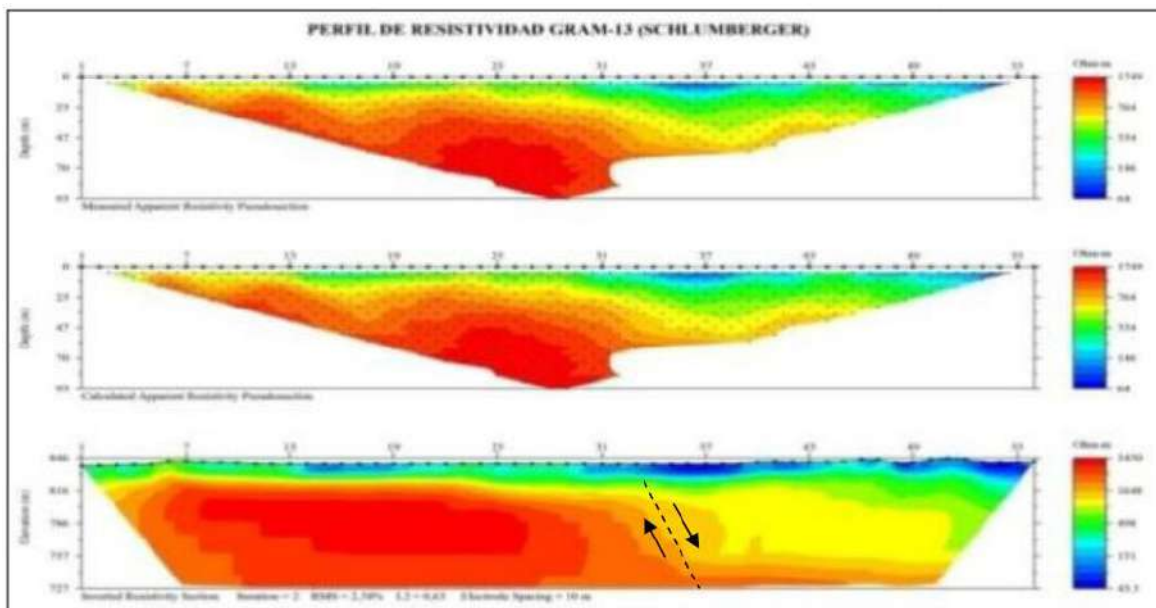


Figura 5.1.6.26 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-13 (M-M')

Fuente: Integral S.A., 2018

XIV. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-14 (N-N')

Perfil ubicado en el sector denominado “El Banco” al Occidente de las instalaciones del campamento del proyecto Gramalote. Se levanta sobre potreros en donde no se observan afloramientos de roca. En general la cobertura corresponde a material saprolítico conformado por arena arcillosa seca de color, a una altitud cercana a los 850 msnm. El espaciamiento entre cada electrodo es de 10,0 m, llegando a alcanzar una longitud total 550,0 m lineales con rumbo casi norte - sur. La profundidad máxima de exploración es cercana a los 110,0 m., aproximadamente (Figura 5.1.6.27).

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado en comando Dipolo-Dipolo se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 3,59%.

La primera unidad geológica-geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales muy superficiales que presentan rangos entre 1.550 y 2.350 Ohm-m, representados en el perfil por la tonalidades rojizas y amarillentas que afloran entre los intervalos de electrodos No.16 al No.55. Hacia el lado occidental del perfil, entre los electrodos No.1 al No.15 representada por la gama azul, refleja valores de resistividad de 150 Ohm-m. Sus espesores son variables, pero no superan los 10,0 m. La correlación geológica para esta unidad se asocia con fragmentos de rocas ígneas de poco diámetro embebidos dentro de una matriz saprolítica.

La segunda unidad geológica-geoelectrica se presenta hacia el centro del perfil y hacia el lado izquierdo con espesores importantes (30,0 m.). Los valores de resistividad son bajos y van desde los 112 Ohm-m hasta los 350 Ohm-m, representados por las gamas azules y celestes. Geológicamente corresponde a material saprolítico muy alterado como a depósitos de paleocauces que han sido rellenados por sedimentos areno limosos.

La tercera unidad está representada por el rango de resistividades que va desde los 400 Ohm-m hasta los 2.000 Ohm-m (rango de tonalidades verdes y amarillas), distribuida a lo largo de todo el perfil con espesores promedios de 25,0 m. Geológicamente corresponde al Saprolito con una meteorización diferencial hacia la superficie, especialmente hacia el lado izquierdo del perfil.

La cuarta unidad geológica-geoeléctrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho, el cual está compuesto por materiales más compactos que los anteriores. El rango de resistividad oscila desde los 4.000 hasta los 7.500 Ohm-m, representado por las gammas rojizas. Dicha unidad es correlacionable con el Batolito Antioqueño. A lo largo del perfil N-N' se presentan las unidades expuestas discordantemente. La morfología corresponde a relieves de colinas donde no se evidencian estructuras tectónicas. Por la litología fina a media predominante en las unidades expuestas, permite colegir que presentan una moderada capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas.

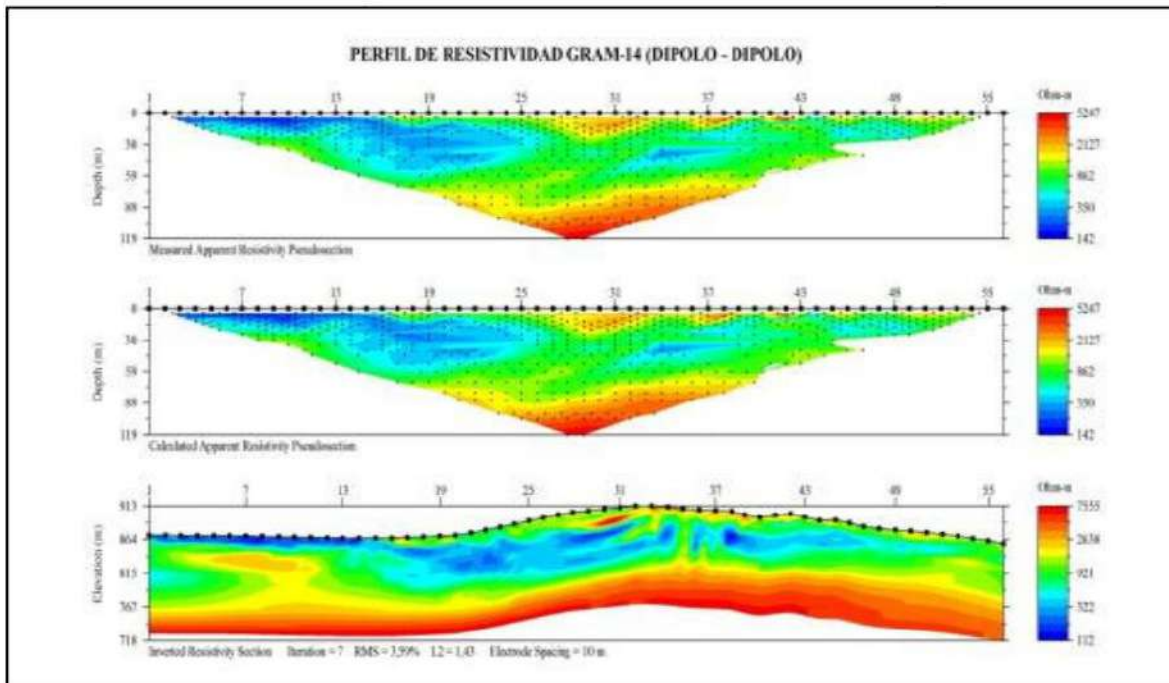


Figura 5.1.6.27 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-14 (N-N')

Fuente: Integral S.A., 2018

XV. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-15 (O-O')

Está ubicado hacia el sector denominado “Manizales” sobre potreros de pendiente pronunciada en donde no se observan afloramientos de roca. En general corresponden a material saprolítico compuesto por limos arcillosos de color marrón claro. A partir del electrodo No. 47 se aprecian cárcavas de meteorización, reflejadas por matices azules que presentan valores de resistividad bajos, del orden de 65 Ohm-m. El mencionado perfil (Figura 5.1.6.28) se dispuso con un rumbo de N 26°E y tiene una longitud de 550 m.,

logrando un espaciamiento entre electrodos de 10,0 m., para alcanzar una profundidad aproximada a los 110,0 m en las partes topográficamente más altas.

La corrida se realiza bajo el comando Wenner. En el modelo geológico-geoeléctrico interpretado se diferencian principalmente dos (2) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, del orden de 2,73%. Se puede observar que en la parte superior de la Figura aflora una unidad geoeléctrica caracterizada por resistividades que van desde 480 hasta los 820 Ohm-m, representada por las tonalidades amarillentas y verdes con espesores aproximados a los 30,0 m. Esta unidad geoeléctrica es correlacionable a una secuencia geológica dominada por material saprolitizado, cuyo protolito ígneo corresponde a la unidad geoeléctrica más inferior

La unidad geoeléctrica inferior está representada por la variación de las tonalidades amarillas hasta las rojas con resistividades entre los 850 Ohm-m y los 3.500 Ohm-m, la cual no aflora, presentando una discontinuidad lateral a partir del electrodo No.37 que puede corresponder zona de fracturamiento de dirección N60°E. Dicha unidad geoeléctrica se correlaciona con el basamento ígneo, constituido por tonalitas, y cuarzodioritas poco y no meteorizados.

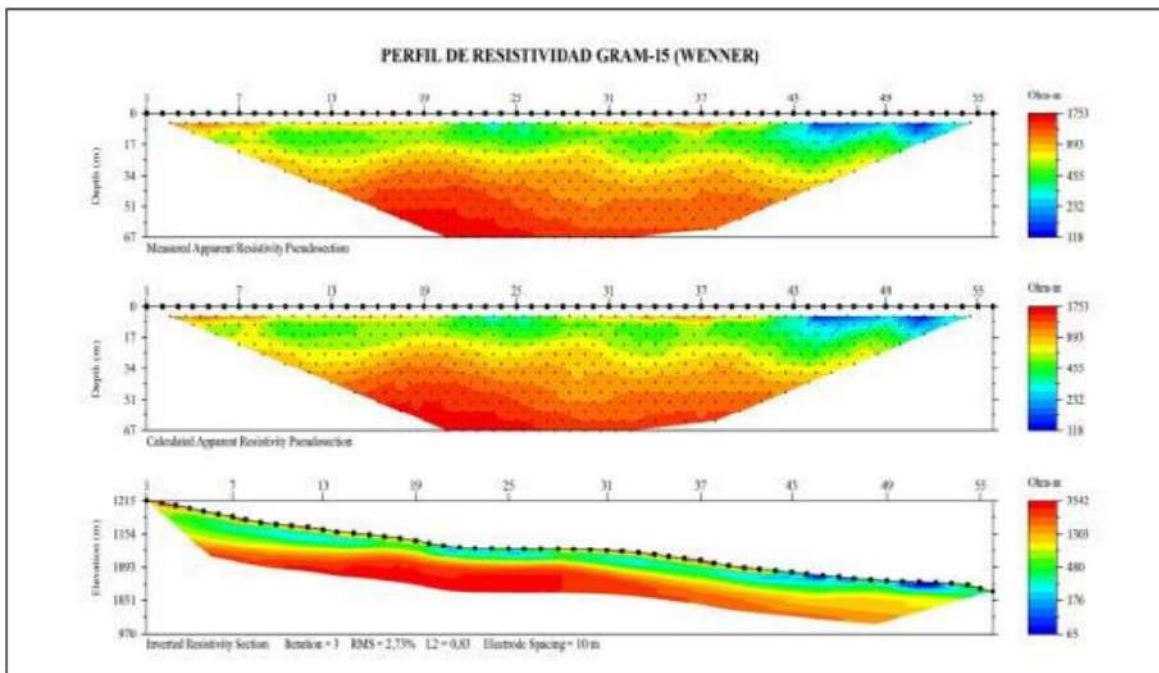


Figura 5.1.6.28 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-15 (O-O')

Fuente: Integral S.A., 2018

XVI. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-16 (P-P')

Este perfil (Figura 5.1.6.29) ubicado en el sector conocido como Peñas Azules, es propuesto para investigar el extremo sur central del área de influencia directa de Gramalote, hacia las partes altas de la quebrada La Palestina, a una altitud cercana a los 1.011 msnm. La morfología es abrupta con colinas de fuerte pendientes, extendiéndose la línea sobre una zona de potreros con cobertura saprolítica. El espaciamiento entre cada electrodo es

de 10,0 m, llegando a alcanzar una longitud total 550,0 m lineales con rumbo este-oeste. La profundidad máxima de exploración cercana a los 110,0 m aproximadamente.

En el modelo geológico-geoeléctrico interpretado se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 3,30%.

La primera unidad geológica-geoeléctrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales superficiales que presentan rangos desde 1.700 hasta 2.600 Ohm-m, representados en la parte central del perfil (Figura) por la tonalidades pardo-amarillentas, las cuales afloran entre los intervalos de electrodos No. 1 al No. 45 y del No. 46 al No. 56 por matices azules con resistividades bajas del orden de 98 Ohm-m. Sus espesores son variables, pero no superan los 10,0 m., en las partes más altas. La correlación geológica para esta unidad se asocia con bloques de rocas ígnea de tamaños métricos embebidos dentro de una matriz saprolítica que han sido trasladados por gravedad, como se puede observar en algunos afloramientos existentes en el sector y hacia el extremo oriental la presencia de limos arenosos.

La segunda unidad geológica-geoeléctrica se presenta hacia el centro del perfil y hacia el lado izquierdo con espesores importantes (30,0 m.). Los valores de resistividad son bajos y van desde los 98 Ohm-m hasta los 290 Ohm-m, representados por las gamas azules y celestes. Geológicamente corresponde a material saprolítico muy alterado de granulometría fina.

La tercera unidad está representada por el rango resistividades de 870 Ohm-m, representado por la gama verdes, distribuida a lo largo de todo el perfil con espesores promedios de 40,0 m. Geológicamente corresponde al saprolito con una meteorización diferencial hacia la superficie.

La cuarta unidad geológica-geoeléctrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en la zona de meteorización incipiente del basamento ígneo propiamente dicho, el cual está compuesto por materiales más compactos que los anteriores y ocurre hacia los bordes del perfil. El rango de resistividad oscila entre 1.720 y 2.590 representado por las gamas café-amarillentas. A lo largo del perfil P-P' se presentan las unidades expuestas discordantemente y no existen fallamientos asociados a la tectónica predominante de la región. Por la litología fina a muy fina predominante en las unidades expuestas, permite inferir que presentan una pobre capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas.

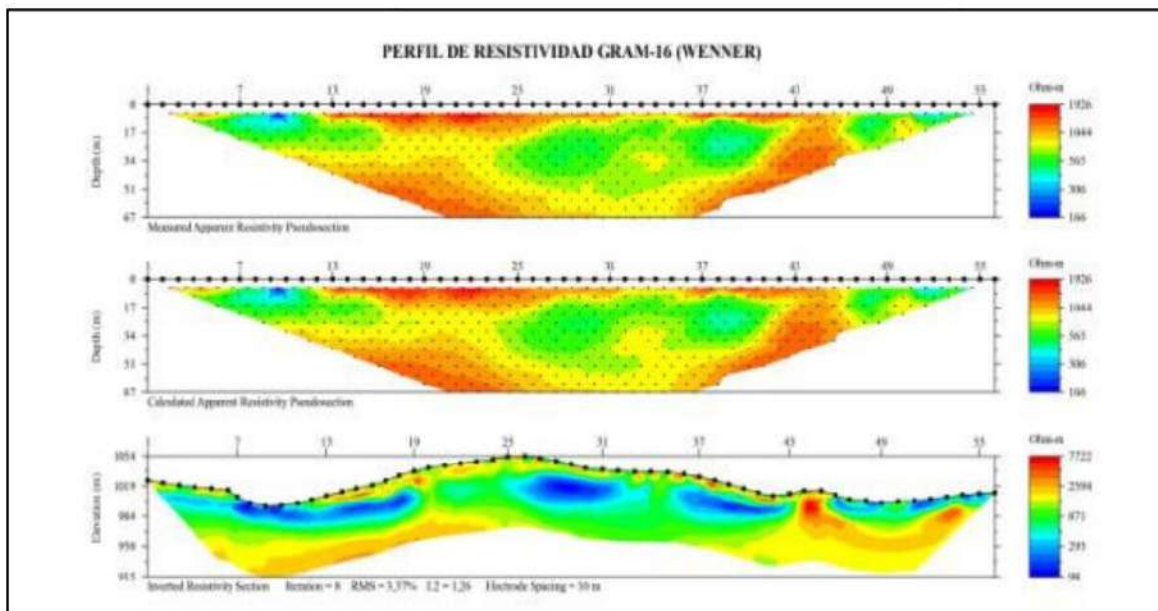


Figura 5.1.6.29 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-16 (P-P')

Fuente: Integral S.A., 2018

XVII. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-17 (Q-Q')

Este perfil (Figura 5.1.6.30) se levanta en el sector de la pequeña central Hidroeléctrica La Cascada, cruzando la Quebrada Guacas hacia el cerro Gramalote. En general se observa hacia la izquierda del perfil las terrazas aluviales y hacia la derecha la cobertura de roca saprolitizada, poco consolidada, con una altitud promedio de 910 msnm. Se utilizó el arreglo de Wenner con un espaciamiento entre cada electrodo es de 10,0 m, llegando a alcanzar una longitud total de 550 m lineales con rumbo N80°E.

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,95%.

La primera unidad geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales superficiales que presentan rangos de resistividad entre 44 y 170 Ohm-m representados en el perfil por los tonos azul y celeste y que afloran entre los intervalos de electrodos No. 1 al No. 6 y del No. 20 al. No.48. Sus espesores son variables, pero se estima que no exceden los 10,0 m., en las partes más altas. La correlación geológica para esta unidad se asocia con material saprolítico de granulometría fina. Entre los electrodos 7 y 19 que corresponde al cruce de la Quebrada Guacas, la resistividad aumenta al rango de 500 Ohm-m, equivalente a sedimentos de arenas y grava de la terraza aluvial, representada por la gama verde claro.

La segunda unidad que infrayace a la anterior, se caracteriza por ocurrir a lo largo de todo el perfil, alcanzando a aflorar entre los electrodos No.49 al No.55, representado por el tono verde que corresponde al material saprolítico más arenoso, reflejando valores de resistividad alrededor de los 650 Ohm-m. El espesor promedio no supera los 20,0 m.

La tercera unidad geológica-geoeléctrica se encuentra representada por el rango de resistividades que va desde los 1.900 hasta los 2.580 Ohm-m, representado por las tonalidades amarilla y café-amarillentas, distribuida hacia los bordes del perfil con espesores mayores de 50,0 m. Geológicamente corresponde a la roca ígnea que va alterando su textura conforme alcanza la superficie del terreno.

La cuarta unidad geoeléctrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho. El rango de resistividad se encuentra entre los 2.600 y los 10.000 Ohm-m y simbolizado por las tonalidades rojizas. Dicha unidad es correlacionable con rocas frescas del Batolito Antioqueño. En esta roca posiblemente exista una estructura de falla hacia el sector del electrodo No.37, la cual puede estar asociada al tren de fallas que existe entre las quebradas Guacas y La Colorada.

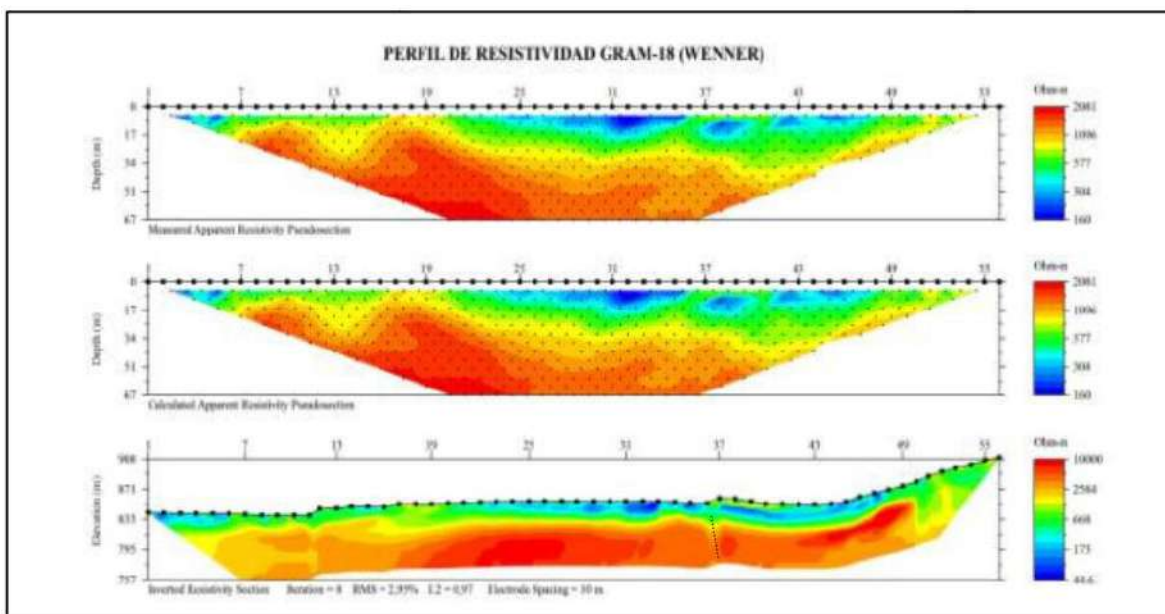


Figura 5.1.6.30 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-17 (Q-Q')

Fuente: Integral S.A., 2018

C. Ensayos de refracción sísmica y MASW Inteinsa, 2025

En la Tabla 5.1.6.14 y Figura 5.1.6.31 se presentan los ensayos de refracción sísmica y MASW llevados a cabo por Inteinsa en el área de estudio del proyecto.

Tabla 5.1.6.14 Localización de las líneas de refracción sísmica Inteinsa, 2025

Ensayo	Coordenadas Punto inicial			Coordenadas punto final			Longitud
	Este (m)	Norte (m)	Z	Este (m)	Norte (m)	Z	
Línea 1	4.789.402	2.277.694	865	4.789.462	2.277.590	884	115
Línea 2	4.789.600	2.277.515	880	4.789.496	2.277.456	857	115
Línea 3	4.789.640	2.277.606	881	4.789.700	2.277.502	852	115
Línea 4	4.789.223	2.277.465	848	4.789.305	2.277.555	858	115

Fuente: Inteinsa, 2025

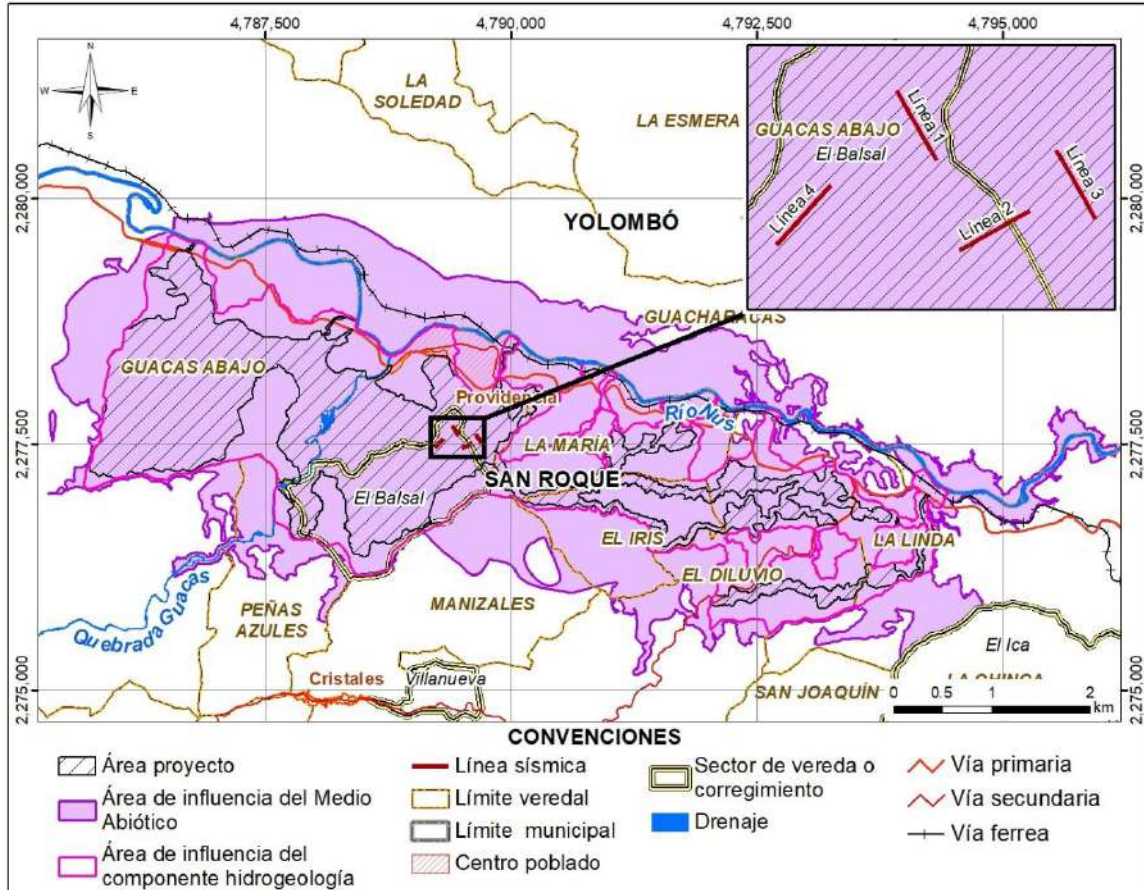


Figura 5.1.6.31 Localización en planta de los ensayos de refracción sísmica y MASW llevados a cabo en el área de interés del proyecto

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de Inteinsa, 2025

a. Resultados Línea 1

I. Línea de refracción sísmica LRS-1

Los resultados obtenidos y en correlación con el sondeo PG25-003B, muestran una estratigrafía compuesta por cuatro horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo-roca (IV) y roca parcialmente meteorizada a masiva (III-II).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 388 m/s para el suelo residual, 944 m/s para el saprolito, 1202 m/s para la zona de transición, y 1975 m/s para el horizonte rocoso.

La Figura 5.1.6.32 muestra la distribución metro a metro de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

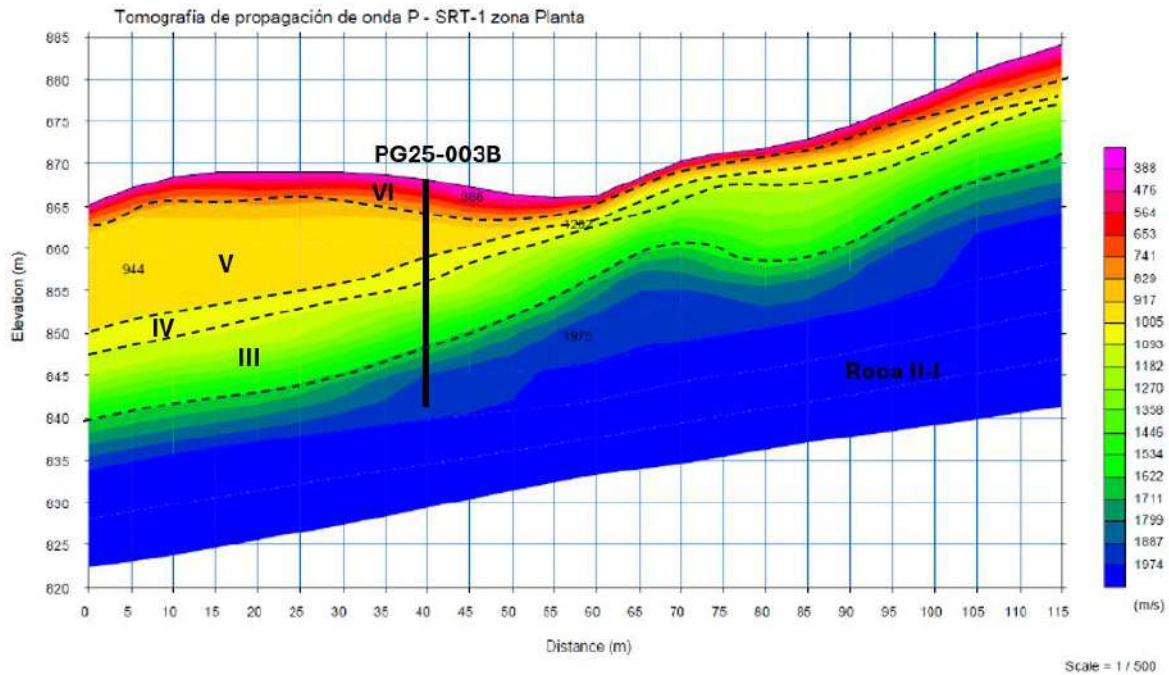


Figura 5.1.6.32 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-1

Fuente: Inteinsa, 2025

II. Ensayo MASW-1

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en el Anexos_Caracterización_Hidrogeologia_AXO_Geof_Inte_2025, se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.6.33, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-1, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo, lo cual está relacionado con la longitud total disponible para la ejecución del ensayo y el tipo de material en la zona.

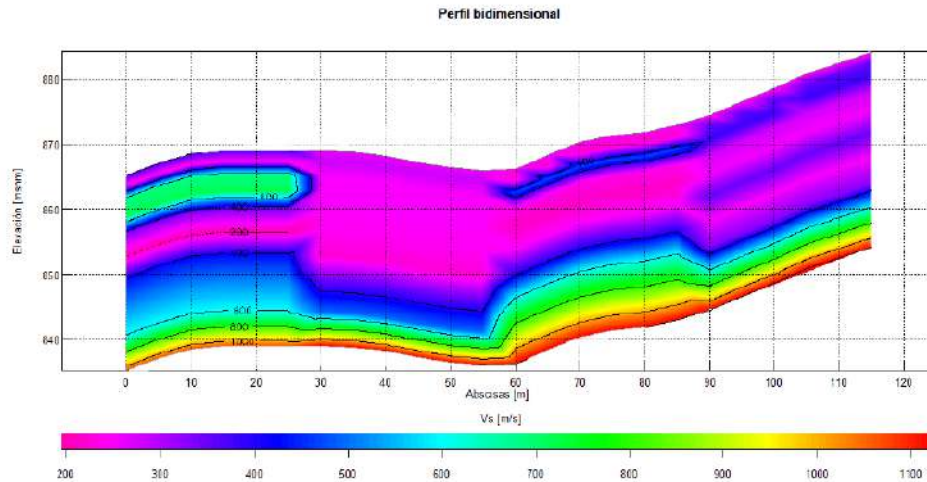


Figura 5.1.6.33 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-1

Fuente: Inteinsa, 2025

La velocidad promedio de la onda S para la línea 1 es de 468 m/s.

b. Resultados Línea 2

I. Línea de refracción sísmica LRS-2

Los resultados obtenidos muestran una estratigrafía compuesta por cuatro horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo–roca (IV) y roca parcialmente meteorizada a masiva (III–II).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 427 m/s para el suelo residual, 998 m/s para el saprolito, 1427 m/s para la zona de transición, y 1855 m/s para el horizonte rocoso.

La Figura 5.1.6.34 muestra la distribución de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

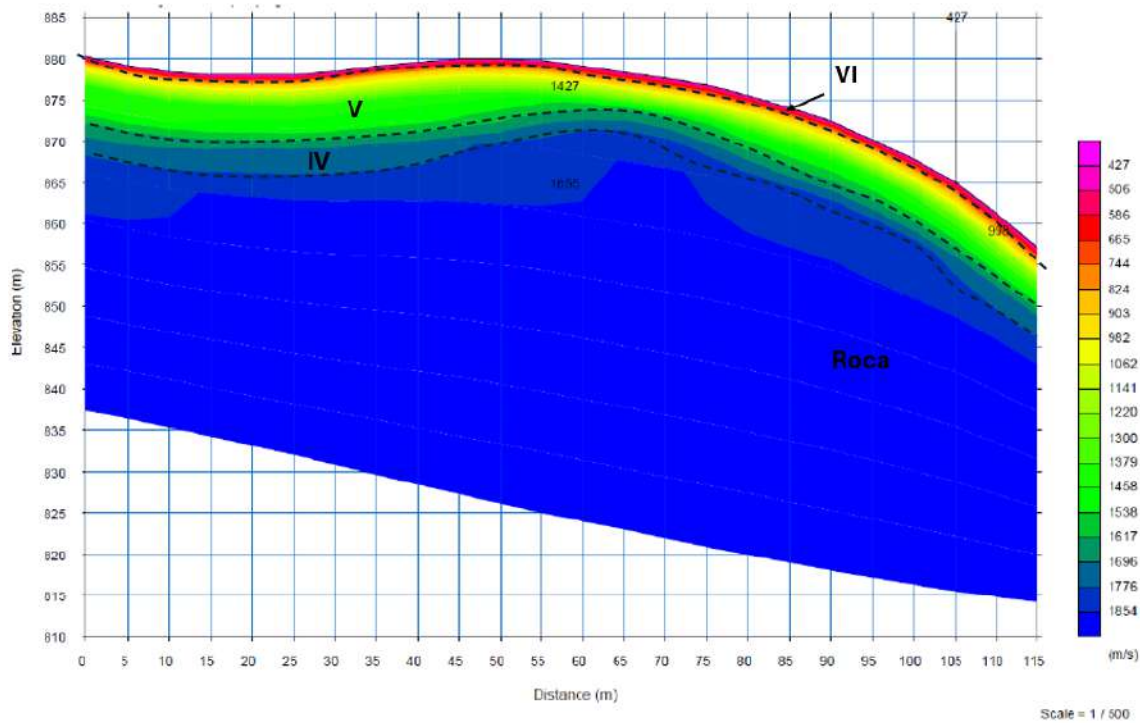


Figura 5.1.6.34 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-2

Fuente: Inteinsa, 2025

II. Ensayo MASW-2

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en el Anexos_Caracterización_Hidrogeologia_AXO_Geof_Inte_2025 se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.6.35, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-2, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo, lo cual está relacionado con la longitud total disponible para la ejecución del ensayo y el tipo de material en la zona.

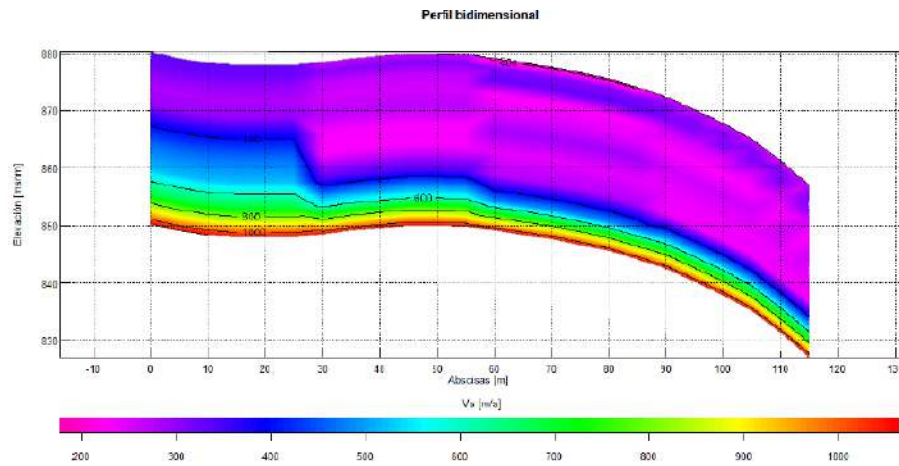


Figura 5.1.6.35 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-2

Fuente: Inteinsa, 2025

La velocidad de onda S promedio para la Línea 2 es de 312 m/s.

c. Resultados Línea 3

I. Línea de refracción sísmica LRS-3

Los resultados obtenidos y en correlación con el sondeo PG24-018, muestran una estratigrafía compuesta por cinco horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo-roca (IV), roca moderadamente meteorizada (III) y roca poco meteorizada a masiva (II - I).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 370 m/s para el suelo residual, 579 m/s para el saprolito, 927 m/s para la zona de transición, 1137 m/s para el horizonte roca tipo III y 1416 m/s para el horizonte rocoso tipo II-I.

La Figura 5.1.6.36 muestra la distribución de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

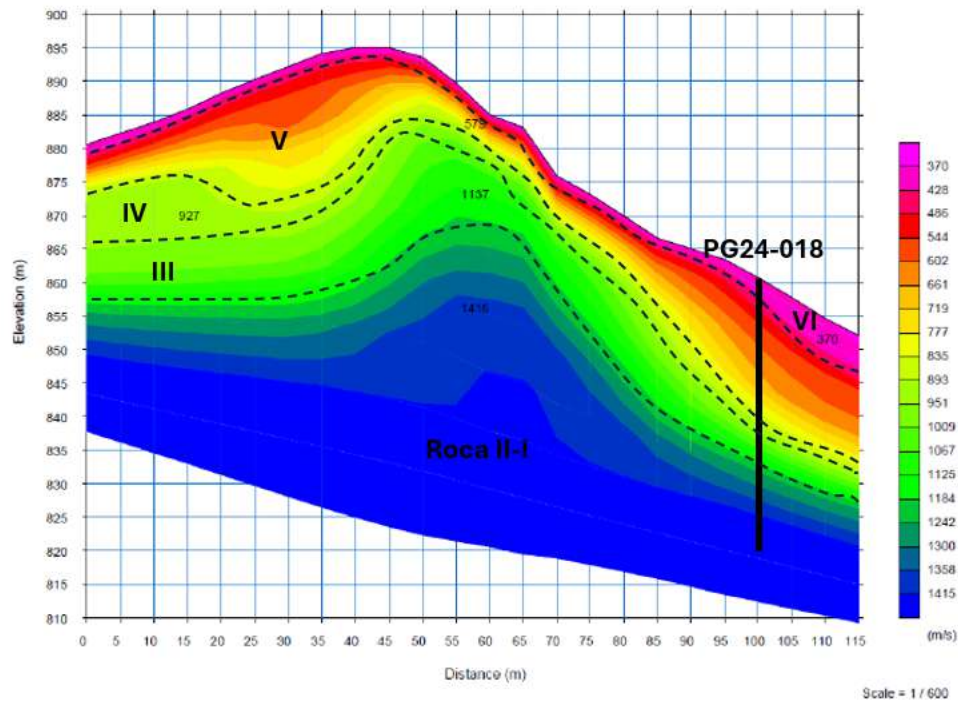


Figura 5.1.6.36 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-3

Fuente: Inteinsa, 2025

II. Ensayo MASW-3

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en el Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_Geof_Inte_2025, se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.6.37, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-3, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo.

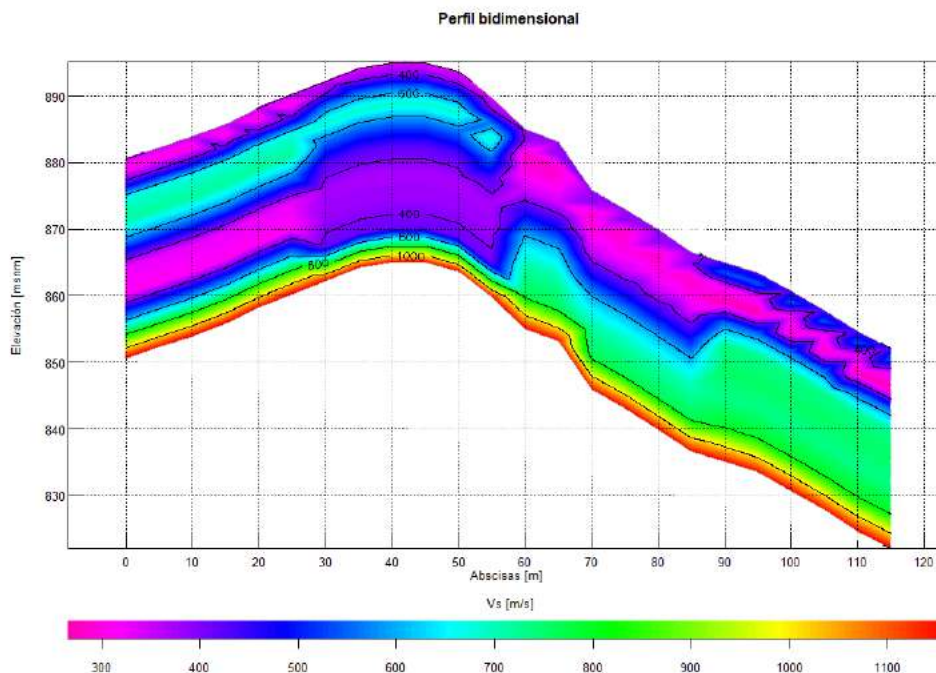


Figura 5.1.6.37 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-3

Fuente: Inteinsa, 2025

La velocidad promedio de la onda S para la línea 3 es de 504 m/s.

d. Resultados Línea 4

I. Línea de refracción sísmica LRS-4

Los resultados obtenidos y en correlación con el sondeo PG25-001B, muestran una estratigrafía compuesta por cinco horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo-roca (IV), roca moderadamente meteorizada – III y roca poco meteorizada a masiva (II – I).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 353 m/s para el suelo residual, 809 m/s para el saprolito y la transición, 1113 m/s para la zona de roca tipo III, y 1315 m/s para la roca poco meteorizada (II – I).

La Figura 5.1.6.38 muestra la distribución de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

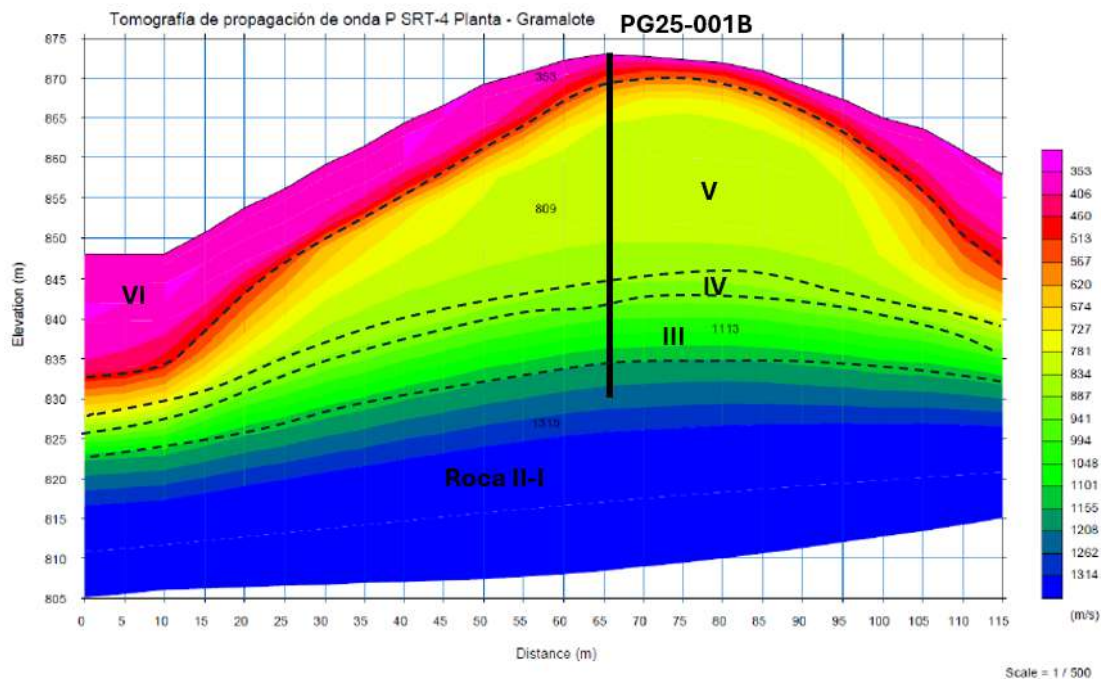


Figura 5.1.6.38 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-4

Fuente: Inteinsa, 2025

II. Ensayo MASW-4

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en el Anexos_Caracterización_Hidrogeologia_AXO_Geof_Inte_2025 se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.6.39, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-4, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo, lo cual está relacionado con la longitud total disponible para la ejecución del ensayo y el tipo de material en la zona.

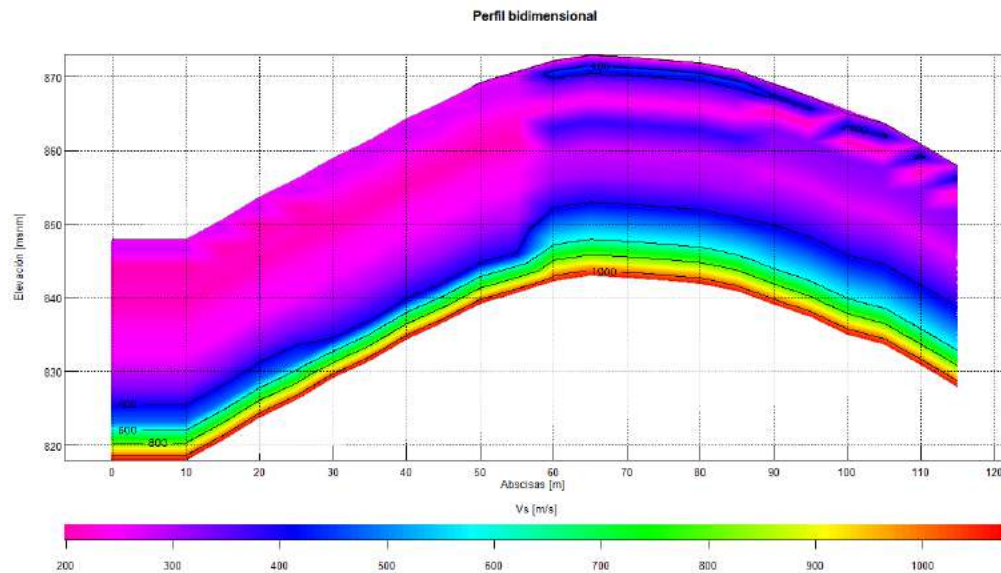


Figura 5.1.6.39 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-4

Fuente: Inteinsa, 2025

La velocidad promedio de la onda S para la línea 4 es de 304 m/s.

D. Interpretación a partir de la prospección geofísica

A partir de la información geofísica, y en correlación con los sondeos directos, en la Figura 5.1.6.40 se presenta el bloque diagrama geológico, integrando ambos conjuntos de datos.

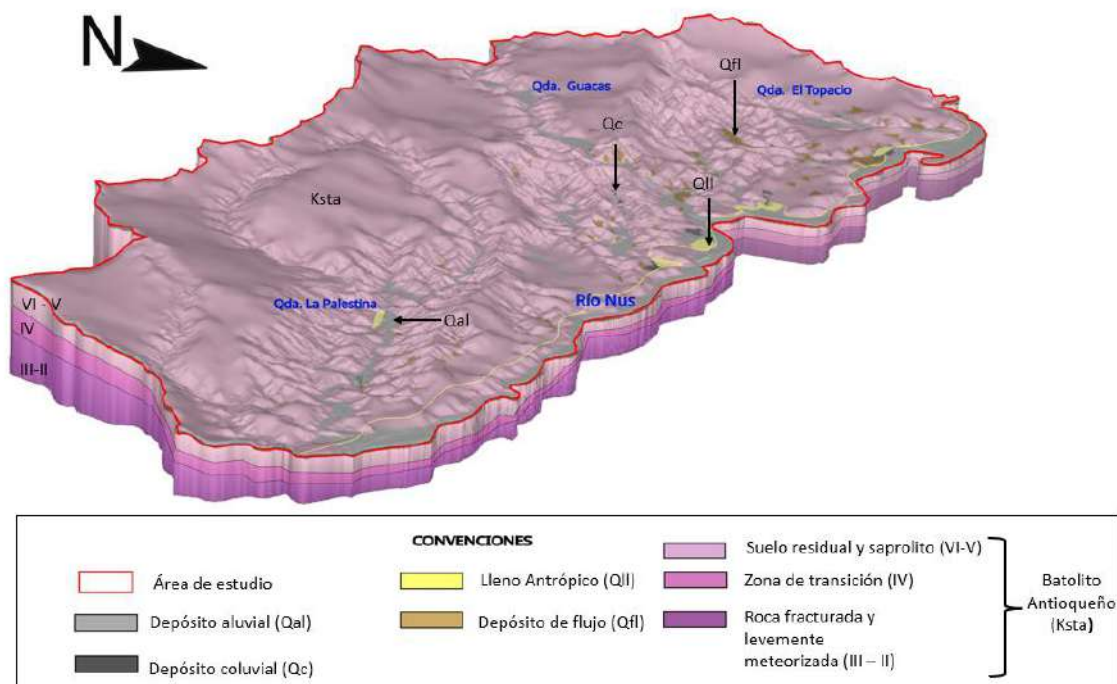


Figura 5.1.6.40 Bloque diagrama de unidades geológicas

Fuente: GCL, 2015 en Integral S.A., 2018

5.1.6.2 Evaluación hidrológica

5.1.6.2.1 Clasificación de cuerpos de agua superficial

Este apartado tiene la finalidad de clasificar los cuerpos de agua superficial en virtud de su conexión hidráulica con las unidades hidrogeológicas para comprender como es la relación entre la recarga, los cuerpos de agua y las unidades hidrogeológicas. Para revisar la fluctuación estacional se usarán los registros de los piezómetros asociados a cada cuerpo de agua.

Los cuerpos de agua superficial, objetos de clasificación, se describen ampliamente en el capítulo de hidrología y son: río Nus, quebrada el Topacio, quebrada San Antonio, quebrada Guacas, quebrada Palestina, quebrada La Colorada y su afluente el Balsal, quebrada La Maria, quebrada El Banco y afluente en el sector El Torito.

Se observa que el agua subterránea se direcciona siguiendo las pendientes del terreno, en sentido principal de sur a norte. La tendencia del flujo se direcciona hacia las corrientes superficiales, sugiriendo la posibilidad de que una parte del sistema hidrogeológico contribuye al aporte de agua a las corrientes superficiales, lo cual es confirmado por los niveles piezométricos que registran niveles en los depósitos aluviales del río Nus y la quebrada Guacas y quebrada Palestina.

Los sondeos exploratorios realizados permiten concluir que se han desarrollado perfiles de suelo, los cuales suelen contribuir a la infiltración de agua y acumulación de la transición suelo roca (horizonte IV).

El proyecto ha realizado mediciones quincenales en piezómetros entre febrero y junio de 2015 y con esta información se analizaron las fluctuaciones de los niveles de agua, en piezómetros cercanos a cuerpos de agua.

Los cuerpos de agua que serán potencialmente afectados por el proyecto son:

- Quebrada San Antonio, por la implantación del depósito San Antonio.
- Quebrada Guacas, por la construcción del canal de desvío de la quebrada Guacas.
- Quebrada Colorada y su afluente Balsal, por la implantación del depósito El Balsal.
- Quebrada La Palestina, por la implantación del depósito G, depósito O y depósito M.
- Afluente en el sector El Torito, por la implantación del depósito El Torito.
- Quebrada La María (afluente), por la implantación del depósito G.
- Afluente sin nombre entre la quebrada La María y quebrada La Colorada, por la implantación del depósito E.
- Afluente sin nombre a la derecha de la quebrada El Torito, por la implantación de depósito L.

La estimación de la conductancia hidráulica se obtendrá con los resultados obtenidos en el modelo numérico como un parámetro de calibración. La estimación de la recarga potencial desde o hacia dichas corrientes y su posible afectación por el proyecto, se presenta en el numeral 5.1.6.2.2

La descripción litológica de los lechos de las principales corrientes es:

- Río Nus: El sustrato es de tipo rocoso-arenoso. aunque en algunas partes hay presencia de limo. Aguas abajo de la desembocadura de la quebrada La Bella. se observan abundantes rocas que hacen parte del sustrato rocoso en este punto. formando playas arenosas sobre el costado izquierdo.
- Quebrada La Colorada: El sustrato es de tipo rocoso y limoso.
- Quebrada El Balsal: El sustrato es principalmente arenoso con presencia de algunas rocas. Aguas abajo de la confluencia de las quebradas La Colorada y El Balsal. el sustrato en su mayoría es de tipo arenoso con fragmentos rocosos distribuidas en todo el lecho. hacia las orillas. en algunos puntos. se observa un sustrato limoso.
- Quebrada El Banco: El sustrato es de tipo arenoso y rocoso. con algunas zonas arcillosas.
- Quebrada San Antonio: El sustrato es de tipo rocoso-arenoso.
- Quebrada La Bella: El sustrato es de tipo arenoso-rocoso con presencia de cantos y bloques en la parte alta. en la parte baja de la quebrada el tamaño de las rocas corresponde a gravas finas a gruesas.
- Quebrada Guacas: El sustrato es de tipo rocoso y arenoso.

- Quebrada La Trinidad: Sustrato arenoso y rocoso.
- Quebrada El Topacio: Esta quebrada presenta características de planicie. ya que el flujo de agua es constante, pero de corriente débil y el sustrato combina limos. arenas finas y arenas de grano grueso.
- Quebrada La Palestina: Presenta sustrato de tipo rocoso-arenoso.

Con base en la descripción del material de los lechos de los ríos, se establece y se presenta en la Tabla 5.1.6.15 el valor de la conductividad hidráulica del lecho de las corrientes reportada por Hidrogeocol, (2012).

Tabla 5.1.6.15 Conductividad hidráulica del lecho de las corrientes superficiales

Cuerpo de agua superficial	Descripción lecho	K (m/d)
Río Nus	Rocoso-Arenoso con presencia de limo	0,5
Quebrada La Colorada	Rocoso-Limoso	0,5
Quebrada El Balsal	Arenoso	2,0
Quebrada El Banco	Arenoso y Rocoso con arcilla	0,1
Quebrada San Antonio	Rocoso-Arenoso	10,0
Quebrada La Bella	Arenoso-Rocoso	5,0
Quebrada Guacas	Rocoso-Arenoso	10,0
Quebrada La Trinidad	Arenoso-Rocoso	5,0
Quebrada El Topacio	Arenoso	2,0
Quebrada La Palestina	Rocoso-Arenoso	10,0

Fuente: Hidrogeocol, 2012

La clasificación de los cuerpos de agua superficial por conexión hidráulica con las aguas subterráneas se presenta en la Tabla 5.1.6.16.

Tabla 5.1.6.16 Clasificación de los cuerpos de agua superficial por conexión hidráulica con las aguas subterráneas

Cuerpo de agua superficial	Conexión hidráulica	Fluctuación estacional de la conexión	Tipo de recarga potencial	Unidad hidrogeológica relacionada
Río Nus	Si	Se presenta fluctuación estacional en los piezómetros PZA-12-03 PZA-12-08	Recarga indirecta hacia las aguas subterráneas y viceversa según época hidrológica.	UHG-3 Depósitos aluviales
Quebrada Topacio	Si	No registra fluctuación en los meses lluviosos PZS-12-12 No desarrolla deposito aluviales de espesor considerable	Recarga entre la UHG-5 y el cuerpo de agua. El nivel piezométrico fluctúa por encima de la cota del cauce	UHG-5 Saprolito arenoso

Cuerpo de agua superficial	Conexión hidráulica	Fluctuación estacional de la conexión	Tipo de recarga potencial	Unidad hidrogeológica relacionada
Quebrada El Banco	Parcial (solo en los sectores donde hay depósito aluvial)	DH-WR-201 No tiene datos suficientes para determinar fluctuación. No se registran fluctuaciones PZS-12-03	Solo recarga en la parte baja de la quebrada entre el cuerpo de agua y la UHG- 3 (Aluvial). En la parte media de la quebrada no hay recarga entre el cuerpo e agua y la UHG-4	UHG-4 Suelo residual Los niveles se presentan a 2 m por debajo del cauce de la quebrada El Banco.
Quebrada San Antonio	No	No se registran fluctuaciones en los piezómetros DH-WR-203 y PZS-12-03 Ligeras fluctuaciones se registraron en PZR-12-02 y PZA-12-07.	Sin recarga entre el cuerpo de agua y la UHG- 5, UHG-6, UHG-7	UHG-5 Saprolito arenoso y UHG-6 zona de transición entre la roca fresca y el Saprolito. Todas las fluctuaciones de los niveles registradas en piezómetros se encuentran por debajo del cauce de la quebrada San Antonio.
Quebrada Guacas Se analizó en la parte alta, media y baja	Parcial (solo en los sectores donde hay depósito aluvial) en la parte media y en la parte baja de la quebrada Guacas	Se presenta fluctuación estacional en los piezómetros PZA-12-02 PZA-12-03 No se registran fluctuaciones en los piezómetros en roca PZR-13-05 PZR-13-07 PZR-13-09 No se registran fluctuaciones en los piezómetros en suelo PZS 13-17	Recarga indirecta hacia las aguas subterráneas y viceversa según época hidrológica.	UHG-3 Depósitos aluviales y UHG-7 Roca Fresca fracturada UHG-6 zona de transición entre la roca fresca y el Saprolito.

Cuerpo de agua superficial	Conexión hidráulica	Fluctuación estacional de la conexión	Tipo de recarga potencial	Unidad hidrogeológica relacionada
Quebrada La Colorada	Si En la Quebrada La Colorada parte alta, también se da en los sectores donde hay depósito aluvial	Se presenta fluctuación estacional en los piezómetros PZR-13-06	Recarga indirecta hacia las aguas subterráneas y viceversa según época hidrológica.	UHG-7 Roca Fresca fracturada UHG-3 Depósitos aluviales
Quebrada La Maria	Si	La fluctuación en el piezómetro PZS-13-18 (Golder, 2017), localizado en la parte bajo muestra ascensos en mayo y noviembre, coincidiendo con el pico de lluvia. La fluctuación en el piezómetro BH-5M-08 (Golder, 2017), muestra ascenso en octubre, coincidiendo con el pico de lluvia. Los niveles de agua en los piezómetros BH-5M-08 y BH-5M-03, fluctúa en la misma cota que el cauce de la quebrada La Maria.		UHG-6 zona de transición entre la roca fresca y el Saprolito. El piezómetro BH-5M-03 (Golder, 2017), No muestra fluctuación.

Cuerpo de agua superficial	Conexión hidráulica	Fluctuación estacional de la conexión	Tipo de recarga potencial	Unidad hidrogeológica relacionada
Afluente sector El Torito	No	La fluctuación en el piezómetro PZR-12-04 (Golder, 2017) es suave y sin picos y refleja que no hay relación con las épocas lluviosas. Los niveles se presentan a 32 m por debajo del cauce del afluente del sector El Torito.	No recarga	UHG-7 Roca Fresca fracturada
Quebrada Palestina	Parcial (solo en los sectores donde hay depósito aluvial)	PZA-12-05 PZS-12-05 DH-TM-100 Los registros de Golder (2017) muestran fluctuación de niveles en los meses más lluviosos en el piezómetro PZA-12-05. La fluctuación en los piezómetros DH-TM-100 y PZS-12-05 (Golder, 2017) indica que no hay conexión entre las lluvias y la fluctuación de niveles, y los niveles registrados se encuentran 2m por debajo del cauce base de la quebrada Palestina.	Recarga indirecta (solo en el aluvial) hacia las aguas subterráneas y viceversa según época hidrológica.	UHG-3 Depósitos aluviales, en la parte baja de la quebrada. UHG-5 Saprolito arenoso.

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.2.2 Estimación de la recarga potencial

A. Balance Hídrico

El método de balance hídrico para la estimación de la recarga por precipitación utiliza el principio de la conservación de masa para un volumen definido, y es el resultado de la diferencia entre los flujos de entrada y salida del sistema, menos el cambio en el almacenamiento. Para su cálculo se hace uso de la Ecuación 5.1.6.1.

$$R = P - ESC - ETP - \Delta S_{max}$$

Ecuación 5.1.6.1 Recarga potencial

Donde:

R: recarga potencial, en mm/año

P: precipitación, en mm/año

ESC: escorrentía superficial, en mm/año

ETP: evapotranspiración potencial, en mm/año

ΔS_{max} : coeficiente de capacidad de almacenamiento

El cálculo de la escorrentía superficial (Ecuación 5.1.6.2) de la zona de interés se realizó mediante el método desarrollado por el Soil Conservation Service (S.C.S.), el cual relaciona la precipitación y el coeficiente de capacidad de almacenamiento S, teniendo en cuenta las pérdidas por infiltración, evapotranspiración y retención definidas según el método.

$$ESC = \frac{(P - 0,2 \times S)^2}{P + 0,8 \times S}$$

Ecuación 5.1.6.2 Escorrentía superficial o Precipitación efectiva

Dónde:

ESC: escorrentía superficial, en mm/día

P: precipitación diaria, en mm

ΔS_{max} : coeficiente de capacidad de almacenamiento

El coeficiente de capacidad de almacenamiento representa el almacenamiento máximo en un área determinada debido principalmente a fenómenos de infiltración, y en menor medida a la detención, intersección y evaporación. Esta variable está relacionada con la definición del número de curva (CN), que a su vez es función de las siguientes características: (1) Cobertura vegetal, (2) Tipo y uso del suelo, (3) Impermeabilidad y (4) Humedad antecedente (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Para este proceso se utilizó la Ecuación 5.1.6.3.

$$S = \frac{25.400}{CN} - 254$$

Ecuación 5.1.6.3 Coeficiente de capacidad de almacenamiento

Para la definición del número de curva, se clasificó el tipo de suelo en cuatro categorías hidrológicas, según el método del S.C.S. (Tabla 5.1.6.17). En orden decreciente de permeabilidad las categorías hidrológicas son: A, B, C y D, donde la categoría "A" corresponde a suelos gravosos y/o arenosos con una alta permeabilidad hidráulica y la categoría "D" está conformada por suelos arcillosos altamente plásticos (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Tabla 5.1.6.17 Descripción del grupo de suelo

Grupo de suelo	Descripción
A	Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados
B	Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa
C	Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcilla.
D	Suelos que se expanden significativamente cuando se moja, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos

Fuente: Hidrología aplicada (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

Según la litología del suelo, en la zona de estudio se encuentran depósitos coluviales y coluvio-aluviales, rocas ígneas, sedimentos coluvio-aluviales, zonas urbanas y cuerpos de agua. Los cuales en términos de permeabilidad se pueden definir con una capacidad media, lo cual hace alusión a tipo de suelo C (Figura 5.1.6.41).

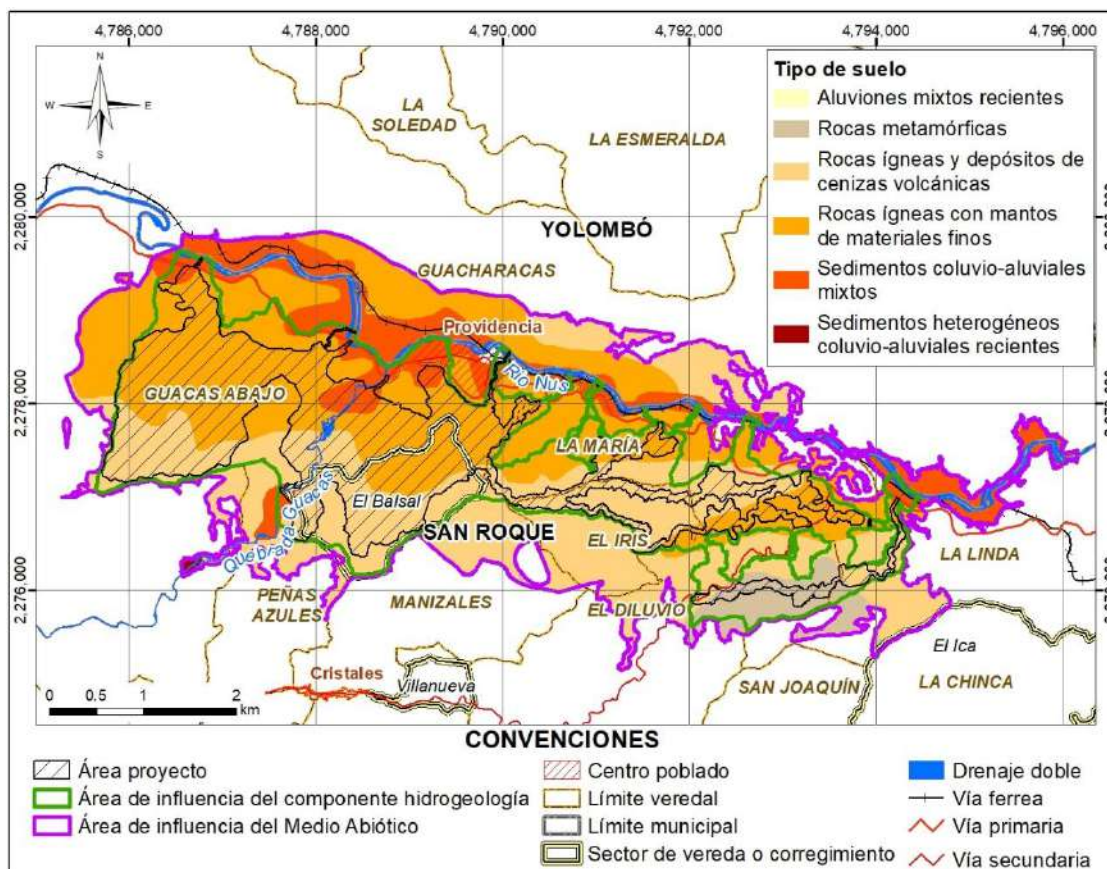


Figura 5.1.6.41 Mapa de grupos hidrológicos en el área de influencia

Fuente: Integral S.A., 2025

En la Figura 5.1.6.42 se presentan las coberturas encontradas en el área de estudio.

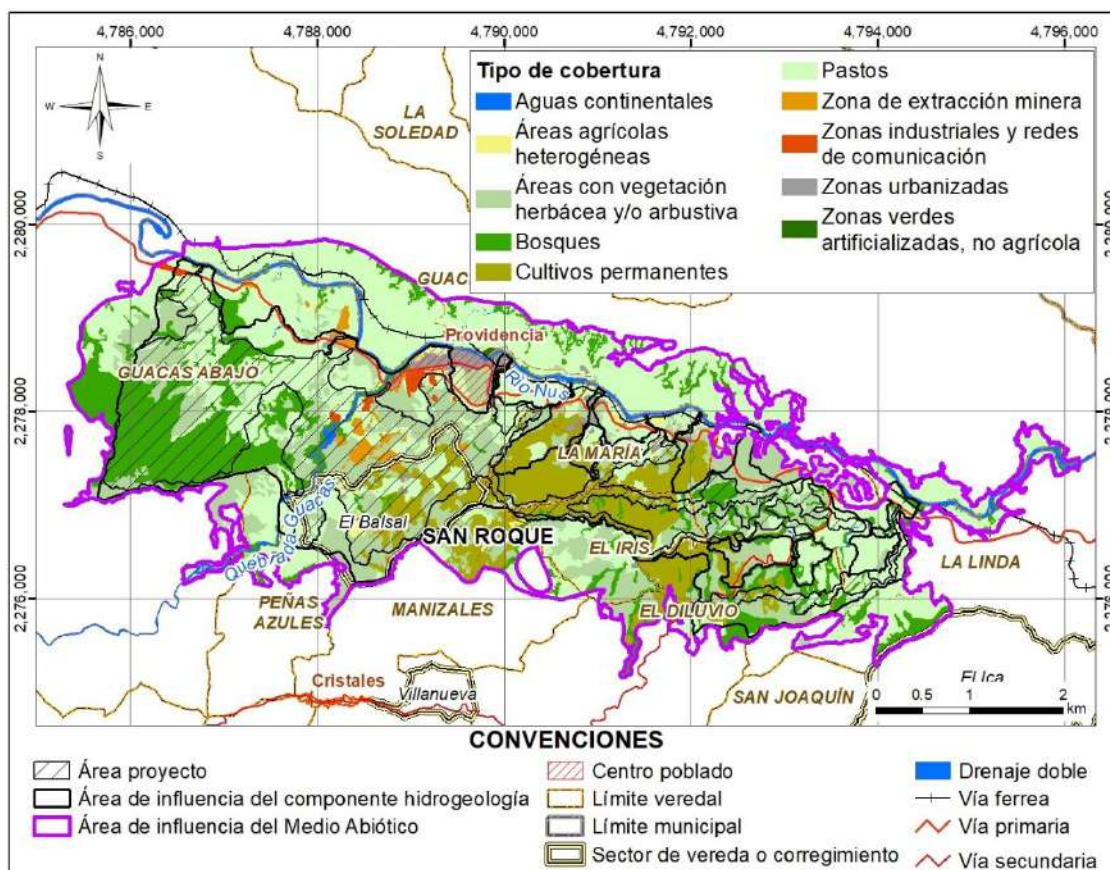


Figura 5.1.6.42 Mapa de coberturas de suelo en el área de estudio

Fuente: Integral S.A., 2026

De acuerdo con las coberturas de suelo y los grupos hidrológicos encontrados en el análisis se definieron los números de curva según el método del S.C.S., utilizando valores de CN entre 71 y 94 coherentes con la cobertura Figura 5.1.6.42. Una vez definidos los números de curva para cada zona se calcula el coeficiente de capacidad de almacenamiento (S_{max}) -Ver Ecuación 5.1.6.3.

Con el fin de estimar la recarga bajo las tres condiciones extremas (normal, cálida y húmeda), se analizaron los registros de precipitación mensual de las estaciones de precipitación cercanas a la zona de estudio a partir de los índices de fenómenos macroclimáticos ONI (Índice Oceánico del Niño), el cual es el índice estándar que utiliza la NOAA para identificar eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) en el océano Pacífico tropical, y el MEI (Índice Multivariado del Fenómenos de El Niño) que a partir de una combinación de seis variables atmosféricas y marinas, reconoce las anomalías características del fenómeno ENSO

A partir de esa comparación, se caracteriza como escenario medio o normal, el año 2020 como un año neutro cuyo comportamiento es similar a las condiciones medias de los datos históricos analizados. Definido el periodo de análisis, se realizó un análisis espacial de la lluvia, con las estaciones con información disponible para este año mediante la aplicación de los polígonos de Thiessen. En la Tabla 5.1.6.18 se muestra las áreas aferentes de cada

estación y su porcentaje de influencia, con estos valores se estimó la serie de precipitación para el año de análisis.

Tabla 5.1.6.18 Áreas aferentes por polígonos de Thiessen

Estación	San Roque	Santo Domingo	Guayabito	Yolombo	Granja Exp. El Nus
Área aferente (m ²)	138.296.992,90	20.498.730,88	54.264.863,71	45.068.110,17	41.623.970,97
%Área	46,14%	6,84%	18,10%	15,04%	13,89%

Fuente: Integral S.A., 2025

Con la serie de precipitación diaria definida, se realizó el cálculo de la escorrentía (Ver Ecuación 5.1.6.2) con base en la abstracción inicial (i_a) asumida como el 20% del almacenamiento potencial (S). El resultado a escala diaria de esta variable fue acumulado para obtener el valor mensual de la escorrentía para cada área. Posteriormente se realizó la estimación de la infiltración, a nivel mensual, como la diferencia entre la precipitación y la escorrentía.

Una vez se estiman la infiltración y la evapotranspiración potencial a nivel mensual se evalúa la humedad del suelo como la diferencia entre estas dos variables, con el fin de verificar la posibilidad de que se presente recarga.

En la Figura 5.1.6.43 se presentan los resultados obtenidos para la zona de estudio.

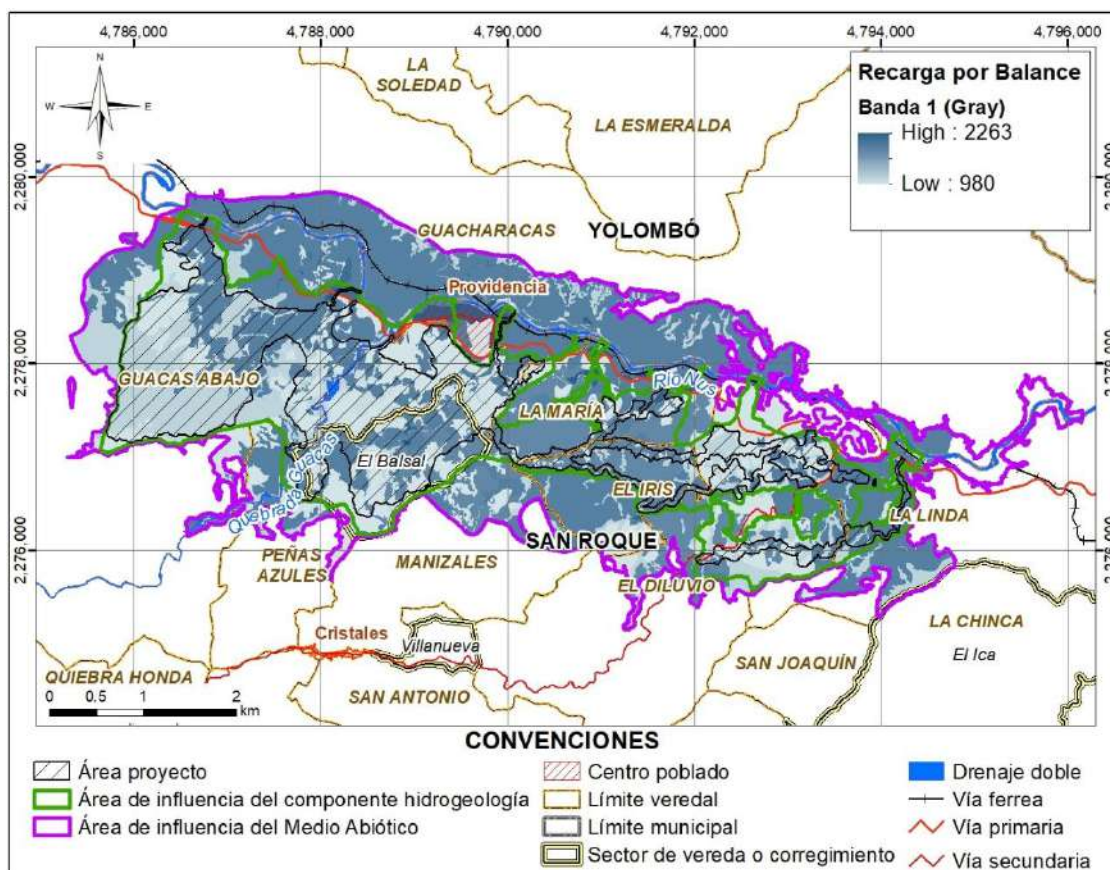


Figura 5.1.6.43 Distribución espacial de la recarga anual por el método de Balance Hídrico para el área de influencia

Fuente: Integral S.A., 2025

Como se observa en la Figura 5.1.6.43, los valores de recarga para la zona de estudio varían entre 980 y 2.263 mm/año, con un valor medio de 1.622 mm/año, donde los valores más bajos se encuentran en las zonas más cercanas a los afluentes presentes en la zona de estudio (río Nus y quebradas aferentes) y algunas zonas en la parte alta de la cuenca, y los valores más altos se presentan en los sectores cuyas coberturas corresponden a áreas agrícolas, bosques y áreas de pastizales.

B. Método de Kennessey

Por otra parte, se calculó la recarga hídrica a partir del método desarrollado por (Kennessey, 1930). Este método ha sido aplicado con resultados exitosos y es particularmente versátil, ya que, permite cuantificar la recarga a partir de los elementos principales que influyen en el proceso de escorrenría, como: (1) Pendiente del terreno, (2) Permeabilidad, (3) Cobertura vegetal, (4) Uso del suelo, (5) Precipitación y (6) Temperatura presente en la zona de estudio.

El método permite calcular el coeficiente de escorrenría (CK), definido como la capa de agua que fluye sobre la superficie, el cual es determinado por la suma de tres componentes: (1) Pendiente del terreno (CA), (2) Distribución de la cobertura vegetal (CV) y (3)

Permeabilidad de la roca y terrenos aflorantes (CP); esto se hace mediante la aplicación de la Ecuación 5.1.6.4.

$$CK = CA + CV + CP$$

Ecuación 5.1.6.4 Coeficiente de escorrentía

En la Tabla 5.1.6.19 se presenta la clasificación de los componentes con cada una de sus categorías; estos son utilizados para asignar los coeficientes de acuerdo con lo propuesto por Kennessey, esto partiendo del Índice de Aridez (Ia) calculado para el área de estudio. De acuerdo con lo propuesto por (Tardi & Vittorini, 1977) el la valorado con el Método de (Martonne, 1926), es el parámetro en función del cual se hace la elección del coeficiente de escorrentía (CK). El Ia se calcula aplicando la Ecuación 5.1.6.5.

$$Ia = \frac{\left[\frac{P}{T + 10} + 12 \frac{p}{t} \right]}{2}$$

Ecuación 5.1.6.5 Índice de Aridez

Donde:

Ia : Índice de Aridez medio anual

P : precipitación media anual, en mm

T : temperatura media anual, en °C

p : precipitación media mensual, en mm

t : temperatura media mensual, en °C

El cálculo del Índice de Aridez dio como resultado 90, por lo tanto, se toman los valores resaltados de la Tabla 5.1.6.19.

Tabla 5.1.6.19 Clasificación de componentes del coeficiente de escorrentía

Índice de aridez		<25	25 - 40	>40
Pendiente (CA)				
Ca1	A > 35%	0,22	0,26	0,30
Ca2	10% < A < 35%	0,12	0,16	0,20
Ca3	3,5% < A < 10%	0,01	0,03	0,05
Ca4	A < 3,5%	-	0,01	0,03
Cobertura vegetal (CV)				
Cv1	Roca desnuda	0,26	0,28	0,30
Cv2	Pastizales	0,17	0,21	0,20
Cv3	Tierra de cultivo, bosques	0,07	0,11	0,15
Cv4	Bosque de árboles altos	0,03	0,04	0,05
Permeabilidad (CP)				
Cp1	Impermeable	0,21	0,26	0,30
Cp2	Media	0,12	0,16	0,20
Cp3	Buena	0,06	0,08	0,10
Cp4	Elevada	0,03	0,04	0,05

Fuente: (Tardi & Vittorini, 1977)

La asignación del coeficiente CA se realiza a partir de las pendientes encontradas en el área de estudio. Los valores por facilidad de cálculos fueron reclasificados de la siguiente manera:

- $0,0 \% \leq P < 3,5 \%$ corresponde a 1.
- $3,5 \% \leq P \leq 10,0 \%$ corresponde a 2.
- $10,0 \% \leq P \leq 35,0 \%$ corresponde a 3.
- $P \geq 35 \%$ corresponde a 4

En la Tabla 5.1.6.20 se presentan los valores de pendientes reclasificados y el correspondiente valor de coeficiente CA

Tabla 5.1.6.20 Pendientes en la zona de estudio.

Pendiente (%)	Coeficiente CA
1	0,02
2	0,05
3	0,1

Fuente: Integral S.A., 2025

Por otra parte, para tomar el valor correspondiente al coeficiente CV se categorizó el tipo de coberturas establecidos en esta metodología. En la Tabla 5.1.6.21 se presentan las coberturas finales obtenidas y la asignación de cada valor de coeficiente CV.

Tabla 5.1.6.21 Tipos de coberturas en la zona de estudio

Coberturas Cv	Coefficiente CV
Bosque de árboles altos	0,05
Pastizales	0,2
Roca desnuda	0,3

Fuente: Integral S.A., 2025

Para encontrar el valor del coeficiente CP se hizo uso del grupo hidrológico (suelo tipo C para toda el área de estudio), cuyo valor correspondiente fue estimado en 0,2.

Después de calcular todos los índices se hizo uso de la Ecuación 5.1.6.4 para obtener el coeficiente CK. Una vez calculado se procedió a estimar la escorrentía superficial considerando la precipitación media a partir de la Ecuación 5.1.6.6, esta estimación se hizo a través de la herramienta “calculadora ráster” del software QGis versión 3.38.0.

$$ESC = CK \times P$$

Ecuación 5.1.6.6 Escorrentía superficial.

Donde:

ESC: escorrentía superficial, en mm/año

CK: coeficiente de escorrentía

P: Precipitación media anual, en mm/año

Utilizando la misma herramienta anterior, se calculó la recarga anual en el subsuelo a través de la aplicación de la Ecuación 5.1.6.7.

$$R = P - ETR - ESC$$

Ecuación 5.1.6.7 Balance hidrológico – Infiltración

Donde:

R: recarga anual en el subsuelo, en mm/año

P: precipitación media anual, en mm/año

ETR: evapotranspiración real media anual, en mm/año

ESC: escorrentía superficial o escurrimiento medio anual, en mm/año

En la Figura 5.1.6.44 se presenta el ráster de la recarga anual en el subsuelo estimada para el área de estudio por el método de Kennesey (ver mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-REC-CN1).

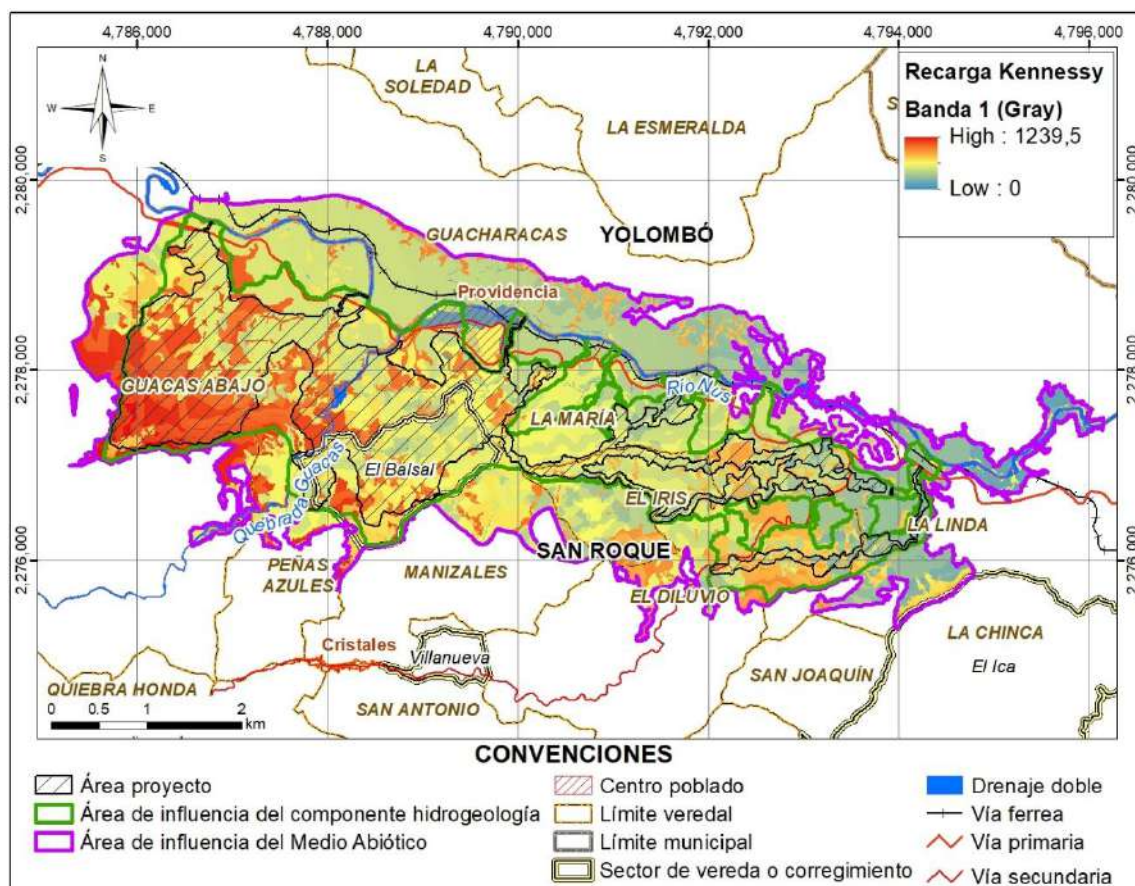


Figura 5.1.6.44 Distribución espacial de la recarga anual por el método de Kennessey para el área de influencia

Fuente: Integral S.A., 2025

Como se observa en la Figura 5.1.6.44, los valores de recarga para la zona de estudio varían entre 43,5 y 1.926 mm/año, con un valor medio de 985 mm/año, donde al igual que con el cálculo de recarga por el método de balance hídrico, los valores más bajos se encuentran en los sectores más cercanos a los afluentes presentes en la zona de estudio (río Nus y quebradas aferentes), mientras que los valores más altos se presentan en sitios cuyas coberturas corresponden a bosques y pastos.

- Análisis de recarga

Los resultados obtenidos mediante la metodología de balance hídrico y la metodología Kennessey permiten identificar diferencias significativas en la interpretación del proceso de recarga. La metodología Kennessey, al incluir la pendiente del terreno como una de sus variables, proporciona una mejor interpretación de la recarga asociada al terreno. Esto se debe a que la pendiente influye directamente en el proceso de recarga, permitiendo una evaluación más precisa y detallada de cómo el agua se infiltra y se almacena en el suelo. En el Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_Recarga se presentan los archivos para el cálculo de la recarga.

Para la clasificación cualitativa de la recarga hídrica estimada mediante el método de Kennessy, se adoptaron rangos porcentuales basados en la relación entre la recarga efectiva (mm/año) y la precipitación media anual (mm/año). Esta clasificación se fundamenta en los criterios técnicos establecidos por el IDEAM en el Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2018), donde se categoriza la recarga como un componente fundamental de la oferta hídrica subterránea.

Los rangos se presentan a continuación, y su clasificación se presentan en la [Figura 5.1.6.45](#).

- Muy Alta: >40%,
- Alta: 25-40%,
- Moderada: 15-25%,
- Baja: 5-15%,

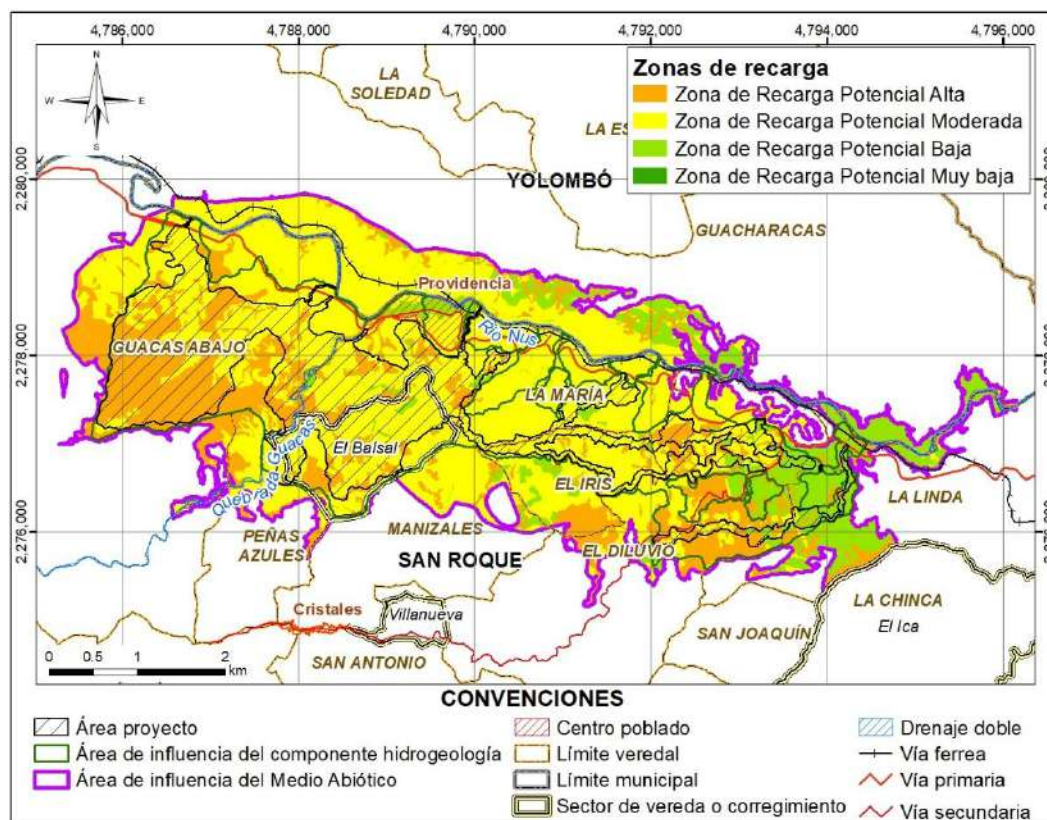


Figura 5.1.6.45 Zonas de recarga

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.2.3 Inventario de puntos de agua

El principal objetivo del inventario de puntos de agua es obtener información básica del agua subterránea, que permita el entendimiento de los flujos en el área de influencia del medio abiótico del proyecto.

En la Tabla 5.1.6.23 se presenta el listado de los datos registrados en cada punto inventariado. Además, se llevó a cabo la caracterización in situ de las propiedades fisicoquímicas del agua, como la temperatura (°C), pH, conductividad eléctrica (μS/cm), salinidad (PSU) y STD (mg/l) por medio de una sonda multiparámetro portátil HANNA HI98195 en aquellos puntos en donde fue posible tomar dichos parámetros.

Tabla 5.1.6.22 Datos tomados durante el inventario de puntos de agua

DATOS GENERALES	Identificación
	Fecha del inventario (día/mes/año)
	Coordenada Este
	Coordenada Norte
	Cota msnm.
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	Temperatura agua (°C)
	pH
	Conductividad eléctrica (μS/cm)
	Salinidad (psu)
	STD (mg/l)
	Análisis de potencial de oxido – reducción (ORP)

Fuente: Integral S.A. 2025

El inventario de puntos de agua se llevó a cabo en dos campañas de campo, la primera realizada entre el 23 y 28 de enero, y la segunda entre el 17 y 19 de febrero del 2025. Dentro del área de influencia del medio abiótico se llevó a cabo el levantamiento de los puntos hidrogeológicos como son manantiales, aljibes y piezómetros.

En total, fueron visitados **125 puntos hidrogeológicos**, correspondientes a un aljibe, un reservorio artificial de agua, **73 manantiales** y 52 piezómetros. En el Anexos_Caracterización_Hidrogeologia_AXO_InvePAgua se encuentran los respectivos formatos FUNIAS debidamente diligenciados.

Es importante resaltar que, de **estos 125 puntos**, tres (3) manantiales se encuentran en el predio Las Margaritas en el cual no se tiene permiso de ingreso y no pudieron ser visitados, cuatro (4) manantiales no pudieron ser levantados debido a las condiciones topográficas y de acceso asociado con vegetación boscosa, siete (7) manantiales se encuentran secos, catorce (14) piezómetros no fueron encontrados y siete (7) se encuentran secos u obstruidos. **Por lo que el análisis de parámetros fisicoquímicos se llevó a cabo para un total de 90 puntos.**

En la Tabla 5.1.6.23 se muestran un resumen de los puntos inventariados con sus respectivas observaciones de campo. En la Figura 5.1.6.46 se muestra su localización en planta (ver mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-PHIDRO).

Tabla 5.1.6.23 Puntos de agua subterránea levantados en campo

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	822,16	4.789.186,43	2.278.003,58	Sin observación	28/01/2025	Monitoreo
2	Aljibe La Mayoría	Aljibe	819,82	4.789.157,00	2.278.274,00	Sin observación	27/01/2025	Monitoreo
3	M18	Manantial	860,62	4.785.026,00	2.279.282,00	Sin observación	26/01/2025	Reserva
4	M20	Manantial	894,31	4.784.820,00	2.279.262,00	Sin observación	26/01/2025	Reserva
5	M22	Manantial	1.076,35	4.785.560,76	2.276.890,75	Sin observación	23/01/2025	Reserva
6	M23	Manantial	1.101,62	4.785.574,08	2.276.970,71	Sin observación	23/01/2025	Reserva
7	M24	Manantial	1.096,38	4.785.601,02	2.276.953,60	Sin observación	23/01/2025	Reserva
8	M25	Manantial	1.071,29	4.785.684,61	2.276.847,25	Sin observación	23/01/2025	Reserva
9	M84	Manantial	883,08	4.790.944,26	2.277.048,48	Sin observación	28/01/2025	Reserva
10	M85	Manantial	853,99	4.791.007,05	2.276.993,23	Sin observación	28/01/2025	Reserva
11	M86	Manantial	880,64	4.791.134,24	2.277.037,73	Sin observación	28/01/2025	Reserva
12	M87	Manantial	901,56	4.791.172,47	2.277.086,67	Sin observación	28/01/2025	Reserva
13	M88	Manantial	902,54	4.791.253,45	2.277.087,27	Sin observación	28/01/2025	Reserva
14	M89	Manantial	865,82	4.793.019,72	2.277.092,28	Sin observación	17/02/2025	Reserva
15	M90	Manantial	906,62	4.791.355,27	2.277.035,86	Sin observación	28/01/2025	Reserva
16	M91	Manantial	899,30	4.791.703,07	2.276.972,47	Sin observación	28/01/2025	Reserva
17	M92	Manantial	909,62	4.791.736,15	2.276.993,34	Sin observación	28/01/2025	Reserva
18	M99	Manantial	1.025,24	4.788.428,44	2.276.433,33	Sin observación	27/01/2025	Reserva
19	M100	Manantial	1.073,01	4.788.591,86	2.276.281,66	Sin observación	27/01/2025	Reserva
20	M101	Manantial	1.017,03	4.788.747,93	2.276.546,09	Sin observación	27/01/2025	Reserva
21	M103	Manantial	962,42	4.788.767,44	2.276.673,03	Sin observación	27/01/2025	Reserva
22	M104	Manantial	905,02	4.788.766,21	2.276.867,07	Sin observación	27/01/2025	Reserva
23	M105	Manantial	868,70	4.788.588,48	2.277.196,82	Seco. Se verificó desde la parte superior debido a que no había acceso. Sin embargo, este estaba seco.	26/01/2025	Reserva
24	M108	Manantial	913,27	4.788.421,98	2.277.329,50	Sin observación	26/01/2025	Reserva

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
25	M109	Manantial	908,90	4.788.330,48	2.277.458,89	Sin observación	26/01/2025	Reserva
26	M110	Manantial	944,81	4.789.191,23	2.276.856,39	Seco. No se puede acceder a la ubicación exacta del punto, sin embargo, se verificó aguas arriba y aguas abajo y no se ve rastros de agua.	27/01/2025	Reserva
27	M113	Manantial	890,86	4.789.366,75	2.276.980,71	No hay acceso al punto. Pendiente abrupta. Mucha maleza.	27/01/2025	-
28	M116	Manantial	836,53	4.789.984,76	2.277.717,38	Sin observación	27/01/2025	Reserva
29	M118	Manantial	838,83	4.790.870,00	2.277.586,00	Sin observación	29/01/2025	Reserva
30	M121	Manantial	846,63	4.790.623,00	2.277.240,00	Sin observación	28/01/2025	Reserva
31	M124	Manantial	926,40	4.789.841,30	2.277.101,85	Sin observación	18/02/2025	Reserva
32	M128	Manantial	962,24	4.787.647,95	2.277.353,57	Sin observación	19/02/2025	Reserva
33	M145	Manantial	1.042,42	4.785.933,94	2.276.920,27	Sin permisos para el acceso al predio.	-	-
34	M147	Manantial	1.051,23	4.785.933,19	2.276.982,29	Sin permisos para el acceso al predio.	-	-
35	M148	Manantial	1.056,91	4.785.911,76	2.276.623,31	Sin permisos para el acceso al predio.	-	-
36	M180	Manantial	859,21	4.785.832,23	2.278.512,96	No acceso. Mucha maleza.	24/01/2025	-
37	M181	Manantial	949,54	4.785.000,26	2.277.800,12	El manantial se identificó a aprox. 90 m aguas arriba del punto original definido en el inventario.	24/01/2025	Reserva
38	M182	Manantial	939,55	4.785.046,50	2.277.859,95	Sin observación	24/01/2025	Reserva
39	M183	Manantial	953,66	4.784.961,97	2.277.730,26	Sin observación	24/01/2025	Reserva
40	M184	Manantial	963,15	4.784.935,73	2.277.670,36	Sin observación	24/01/2025	Reserva

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
41	M189	Manantial	862,80	4.791.361,59	2.277.365,17	Sin observación	28/01/2025	Reserva
42	M192	Manantial	962,96	4.785.521,77	2.277.399,99	No hay acceso. Mucho bosque.	23/01/2025	-
43	M193	Manantial	936,30	4.785.486,97	2.277.453,14	Sin observación	23/01/2025	Reserva
44	M194	Manantial	938,05	4.785.644,05	2.277.719,56	Sin observación	24/01/2025	Reserva
45	M195	Manantial	887,67	4.785.309,35	2.278.313,99	Sin observación	24/01/2025	Reserva
46	M196	Manantial	974,03	4.785.315,45	2.277.329,79	Seco.	23/01/2025	Reserva
47	M197	Manantial	914,26	4.785.793,93	2.277.933,01	Sin observación	24/01/2025	Reserva
48	M200	Manantial	959,10	4.786.407,76	2.277.359,48	Se toman los parámetros hasta donde se pudo acceder. Una Cascada impide el paso.	25/01/2025	Reserva
49	M201	Manantial	1.031,69	4.786.406,20	2.277.217,46	No hay acceso. Afloramiento rocoso con pendientes verticales.	25/01/2025	-
50	M203	Manantial	865,74	4.786.693,34	2.277.997,46	El manantial se identificó aprox. 60 m aguas abajo del punto original definido en el inventario.	25/01/2025	Reserva
51	M205	Manantial	970,45	4.786.721,71	2.277.332,23	No hay acceso al punto, por tanto, se toma muestra hasta donde se pudo acceder.	25/01/2025	-
52	M206	Manantial	948,94	4.786.824,02	2.277.406,84	No hay acceso al punto, por tanto, se toma muestra hasta donde se pudo acceder.	25/01/2025	-

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
53	M207	Manantial	906,32	4.787.130,78	2.277.584,66	El cauce del manantial M207 se encontró completamente seco desde su desembocadura hasta el punto definido en el inventario, donde se encontraba su nacimiento.	25/01/2025	Reserva
54	M208	Manantial	848,06	4.787.204,63	2.278.303,48	Sin observación	25/01/2025	Reserva
55	M212	Manantial	877,11	4.786.220,14	2.277.969,32	El manantial se identificó a aprox. 100 m aguas arriba del punto original definido en el inventario.	25/01/2025	Reserva
56	M213	Manantial	936,01	4.786.138,04	2.277.441,56	El manantial se identificó a aprox. 40 m aguas arriba del punto original definido en el inventario.	23/01/2025	Reserva
57	M215	Manantial	1.037,33	4.785.857,12	2.277.220,63	Por dificultades en el acceso al punto exacto donde se encuentra el manantial, se tomaron los parámetros fisicoquímicos aguas abajo de este, aprox. a 50 m del nacimiento y del punto definido en el inventario.	23/01/2025	-
58	M216	Manantial	964,07	4.786.012,65	2.277.349,04	Seco.	23/01/2025	Reserva
59	M217	Manantial	956,24	4.786.034,72	2.277.364,95	Seco.	23/01/2025	Reserva
60	M 219	Manantial	883,37	4.786.032,00	2.278.195,11	Sin observación	26/01/2025	Reserva
61	M 220	Manantial	861,36	4.786.019,55	2.278.332,18	Sin observación	26/01/2025	Reserva

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
62	M222	Manantial	889,34	4.792.247,91	2.277.167,34	Sin observación	28/01/2025	Reserva
63	M226	Manantial	844,87	4.793.626,02	2.276.386,79	Sin observación	17/02/2025	Reserva
64	M228	Manantial	904,69	4.788.771,20	2.276.865,05	Pared húmeda. No se alcanza a tomar muestra para toma de parámetros.	27/01/2025	
65	M229	Manantial	947,58	4.788.930,93	2.276.790,41	Sin observación	27/01/2025	Reserva
66	M230	Manantial	899,74	4.789.056,43	2.276.911,93	Sin observación	27/01/2025	Reserva
67	M233	Manantial	897,24	4.788.618,36	2.276.912,66	Sin observación	27/01/2025	Reserva
68	M242	Manantial	845,98	4.787.071,94	2.278.639,06	El manantial se identificó aprox. 60 m aguas arriba del punto original definido en el inventario.	25/01/2025	Reserva
69	M250	Manantial	894,90	4.787.588,90	2.277.595,84	Sin observación	19/02/2025	Reserva
70	PZA 12 01	Piezómetro	822,79	4.789.697,28	2.277.901,69	Sin observación		Monitoreo
71	PZA 12 02	Piezómetro	933,53	4.787.620,27	2.276.874,59	Sin tapa metálica y sin tapón, recibe aguas lluvias.	26/01/2025	Monitoreo
72	PZA 12 03	Piezómetro	819,16	4.788.695,00	2.278.385,00	Piezómetro con tapa metálica, con tapón y sin candado, se encuentra en explanación antrópica de suelos residuales del Batolito Antioqueño y en cobertura vegetal de pastos.	27/01/2025	Monitoreo
73	PZA 12 05	Piezómetro	814,01	4.793.048,54	2.276.687,07	El bailer no alcanza a tomar agua. Al parecer el piezómetro se encuentra sedimentado.	28/01/2025	Inactivo

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
74	PZA 12 06	Piezómetro	831,32	4.787.563,80	2.278.148,99	Con tapa metálica. Sin tapón. Sin candado.	25/01/2025	Monitoreo
75	PZA 12 08	Piezómetro	819,30	4.786.818,00	2.279.510,00	Sin candado. Con tapa metálica. Con tapón.	24/01/2025	Monitoreo
76	PZS-12-03	Piezómetro	901,95	4.786.574,24	2.277.991,01	Sin candado, con tapa metálica. Con tapón. En suelo residual.	25/01/2025	Monitoreo
77	PZS 12 05	Piezómetro	832,46	4.794.234,12	2.276.778,46	Sin candado. Con tapa metálica y sin tapón.	28/01/2025	Monitoreo
78	PZS 12 09	Piezómetro	805,20	4.794.373,00	2.276.956,00	Sin tapa metálica, sin tapón. recibe aguas lluvias.	28/01/2025	Monitoreo
79	PZS 12 10	Piezómetro	829,05	4.791.419,07	2.276.561,94	Piezómetro obstruido a los 11,1 m y seco. Con tapa, sin candado y con tapón.	18/02/2025	Inactivo
80	PZS 12 11	Piezómetro	888,27	4.786.086,58	2.278.740,95	Piezómetro no encontrado.	26/01/2025	Inactivo
81	PZS 12 12	Piezómetro	833,94	4.785.710,98	2.279.056,64	Con tapa metálica. Sin tapón. Sin candado.	23/01/2025	Monitoreo
82	PZS 12 14	Piezómetro	818,42	4.789.241,20	2.278.423,32	Con candado, con tapón.	27/01/2025	Monitoreo
83	PZS 13 15	Piezómetro	868,04	4.788.999,08	2.278.089,34	No se encontró.	26/01/2025	Inactivo
84	PZS 13 17	Piezómetro	818,00	4.788.803,74	2.278.276,30	Con tapa y cerrado con tornillos	18/02/2025	Monitoreo
85	PZR 12 02	Piezómetro	831,60	4.787.574,08	2.278.157,17	Sin observación	25/01/2025	Monitoreo
86	PZR 12 03	Piezómetro	867,94	4.789.858,95	2.277.757,94	Sin observación	-	Monitoreo
87	PZR 12 04	Piezómetro	857,85	4.791.548,81	2.277.500,72	Seco. Sin candado, con tapa, profundidad 22,67 m. Posiblemente se encuentra obstruido.	-	Inactivo
88	PZR 12 08	Piezómetro	849,12	4.791.389,69	2.276.621,12	No se encontró.	18/02/2025	Inactivo

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
89	PZR 13 05	Piezómetro	818,03	4.788.795,74	2.278.273,32	Con tapa y cerrado con tornillos.	19/02/2025	Monitoreo
90	PZR 13 06	Piezómetro	928,26	4.788.519,39	2.277.683,17	Con tornillos. Con tapa metálica. Sin tapón.	26/01/2025	Monitoreo
91	PZR 13 07	Piezómetro	914,16	4.788.059,71	2.277.532,15	Debido a actividades mineras informales excavaron la zona donde se encuentra el piezómetro dejando 1 m de tubería del piezómetro expuesto.	26/01/2025	Monitoreo
92	PZR 13 09	Piezómetro	824,66	4.788.416,71	2.278.012,22	Sin observación	26/01/2025	Monitoreo
93	BH-2-1	Piezómetro	880,91	4.789.033,24	2.277.118,05	Sin observación		Monitoreo
94	BH-01	Piezómetro	958,02	4.790.522,57	2.277.026,38	Con tapa, tapón y candado, en suelo residual.	18/02/2025	Monitoreo
95	BH 5M 01	Piezómetro	909,34	4.789.872,30	2.277.228,02	Seco. Sin candado y sin con tapa, profundidad 28,9 m	18/02/2025	Inactivo
96	BH-5M-03	Piezómetro	872,01	4.790.577,00	2.277.496,00	Con tapa metálica, con tapón y candado dañado, se encuentra en el tope de una colina, en suelos residuales del Batolito Antioqueño y en cobertura de pastos y bosque.	29/01/2025	Monitoreo
97	BH-5M-08	Piezómetro	866,39	4.790.827,00	2.277.484,00	Con tapa metálica, con tapón y candado dañado, se encuentra en tope de una colina, en suelos residuales del Batolito Antioqueño	29/01/2025	Monitoreo

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
						y en cobertura de pastos.		
98	DH FS 307	Piezómetro	937,01	4.790.622,17	2.277.039,76	Sin observación	-	Monitoreo
99	DH FS 309	Piezómetro	916,16	4.792.271,49	2.277.047,34	Sin tapa metálica , sin tapón. Recibe aguas lluvias.	29/01/2025	Monitoreo
100	DH FS 315	Piezómetro	808,75	4.794.134,26	2.276.696,50	Sin tapa metálica, con tapón.	28/01/2025	Monitoreo
101	DH TM 01	Piezómetro	860,40	4.792.603,32	2.276.750,88	Sin tapa metálica, con tapón.	28/01/2025	Monitoreo
102	DH TM 02	Piezómetro	866,63	4.792.586,14	2.276.355,58	Sin candado, con tapa metálica. Sin tapón.	28/01/2025	Monitoreo
103	DH TM 03	Piezómetro	822,79	4.793.387,38	2.276.723,32	No se encontró.	28/01/2025	Inactivo
104	DH TM 04	Piezómetro	966,88	4.791.234,97	2.277.217,36	No se encontró.	29/01/2025	Inactivo
105	DH TM 10	Piezómetro	838,20	4.792.884,72	2.276.589,88	Sin tapa metálica, con tapón. Inclinado 45.	28/01/2025	Monitoreo
106	DH TM 100	Piezómetro	814,11	4.793.025,14	2.276.684,86	Sin tapa metálica, con tapón.	28/01/2025	Monitoreo
107	DH TM 109	Piezómetro	954,60	4.792.557,35	2.276.001,96	Sin observación		Monitoreo
108	DH TM 110	Piezómetro	954,61	4.792.028,19	2.276.993,19	Seco	29/01/2025	Inactivo
109	DH TM 115	Piezómetro	864,77	4.791.211,87	2.276.181,30	Con tornillos y tapón. Huele fétida, color café.	28/01/2025	Monitoreo
110	DH TM 116	Piezómetro	832,93	4.791.458,52	2.276.589,38	Obstruido a las 2 m.	-	Inactivo
111	DH TM 123	Piezómetro	945,79	4.790.856,42	2.277.093,84	Sin observación		Monitoreo
112	DH WR 09	Piezómetro	871,00	4.785.657,63	2.278.437,37	No se encontró.	24/01/2025	Inactivo
113	DH WR 201	Piezómetro	822,45	4.786.607,73	2.279.278,00	Con tapa y sin candado.	19/02/2025	Monitoreo
114	DH WR 203	Piezómetro	868,63	4.786.840,96	2.278.147,90	Con tapa metálica, con tapón y sin candado, se encuentra en el tope de un lomo y en cobertura	25/01/2025	Monitoreo

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
						vegetal de pastos limpios.		
115	DH WR 204	Piezómetro	951,61	4.785.556,48	2.277.577,88	No se encontró.	23/01/2025	Inactivo
116	DH GA 501	Piezómetro	808,84	4.793.974,28	2.276.694,45	Sin tapa metálica, con tapón. Agua color café debido a coloides.	28/01/2025	-
117	DH GA 503	Piezómetro	940,84	4.792.370,45	2.277.046,84	El byler no alcanza a recuperar muestra de agua para parámetros. La poca agua que rescata es de color café olor fétida.	29/01/2025	Inactivo
118	DH GA 504	Piezómetro	944,38	4.792.169,50	2.277.065,64	El byler no alcanza a recuperar muestra de agua para parámetros. La poca agua que rescata es de color gris olor fétida.	29/01/2025	Inactivo
119	DH GA 506	Piezómetro	867,31	4.791.604,72	2.276.889,85	Sin observación	-	Monitoreo
120	DH GA 509	Piezómetro	872,05	4.792.482,12	2.276.453,32	Con tornillos en la tapa metálica. Sin tapón.	28/01/2025	Monitoreo
121	PZ4	Piezómetro	939,09	4791328,00	2277254,00	Sin observación	02/2025	Monitoreo
122	M301	Manantial	855,20	4.791.624,58	2.277.439,27	Sin observación	07/2026	Reserva
123	M303	Manantial	842,08	4.790.172,15	2.277.865,06	Sin observación	07/2026	Reserva
124	M304	Manantial	852,05	4.792.437,81	2.276.869,13	Sin observación	07/2026	Reserva
125	M305	Manantial	851,82	4.792.230,76	2.276.879,30	Sin observación	07/2026	Reserva

*Las cotas de los puntos levantados se obtuvieron a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) generado con la topografía LIDAR

Fuente: Integral S.A. 2026

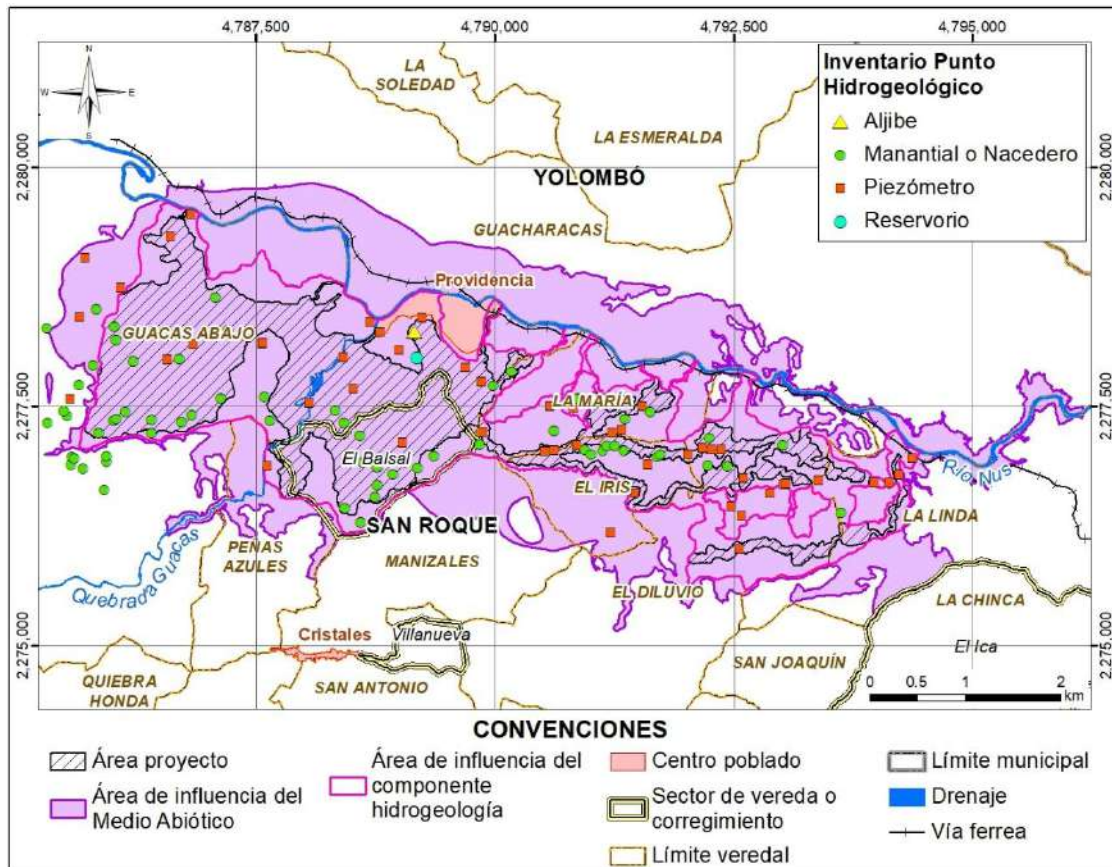


Figura 5.1.6.46 Inventario de puntos de agua realizado enero y febrero del 2025

Fuente: Integral S.A., 2026

A. Aljibes

En el área de estudio se identificó un aljibe que suministra agua para las actividades domesticas del campamento de Gramalote “La Mayoría”. En la Fotografía 5.1.6.1 se muestra el aljibe en mención.



Fotografía 5.1.6.1 Aljibe localizado en el campamento La Mayoría

Fuente: Integral S.A. 2025

B. Piezómetros

Estos puntos son utilizados para el monitoreo de las aguas subterráneas para fines hidrogeológicos en el sector de interés (Fotografía 5.1.6.2). De los sitios no se hace ningún tipo de extracción de agua. Quince (15) de estos piezómetros hacen parte de la Red de Monitoreo.

En total fueron inventariados 52 piezómetros de los cuales siete (7) se encuentran obstruidos y 14 no fueron encontrados.



Fotografía 5.1.6.2 Piezómetro PZS 12 12 en el sector del Topacio

Fuente: Integral S.A. 2025

C. Manantiales

En el área de estudio fueron levantados **71 manantiales**, de los cuales siete (7) son estacionales, dado que en esta inspección se encontraban secos, tres (3) en el predio de Las Margaritas no se visitaron debido a que no se cuenta con permiso de ingreso y cuatro (4) no pudieron ser visitados teniendo en cuenta las condiciones topográficas y boscosas.

En la Fotografía 5.1.6.3 se muestra el manantial M100 localizado en la vereda de Guacas abajo.



Fotografía 5.1.6.3 Manantial M100 localizado en la vereda Guacas abajo

Fuente: Integral S.A. 2025

En el área de estudio del proyecto también fue levantado un reservorio artificial de agua, localizado en las inmediaciones del campamento la Mayoría, cerca al Aljibe.

En el diagrama de la Figura 5.1.6.47 se presenta la distribución porcentual de los manantiales según unidad geológica superficial donde afloran.

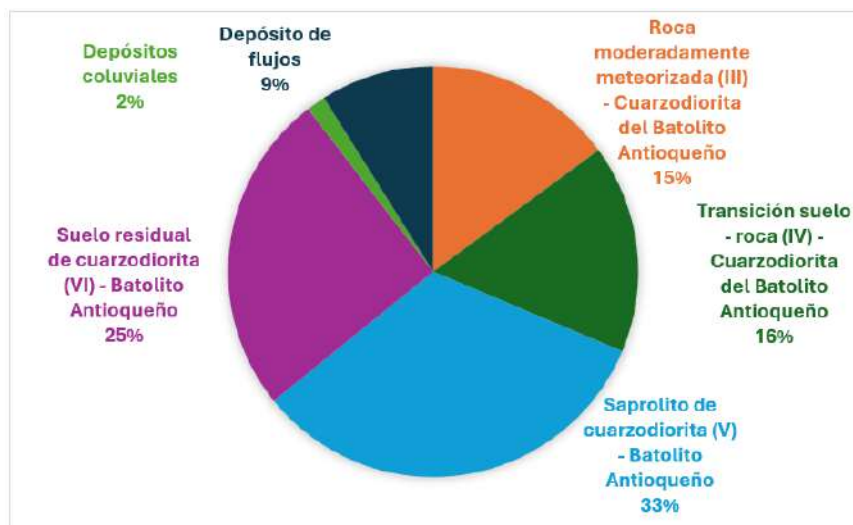


Figura 5.1.6.47 Unidad geológica superficial donde afloran los manantiales

Fuente: Integral S.A. 2025

D. Parámetros fisicoquímicos in situ

A continuación, se presenta el monitoreo reciente de los parámetros fisicoquímicos tomados en el área de estudio del proyecto Gramalote. Entre el 23 y 29 de enero y el 17 y 19 de febrero se realizó el monitoreo y los análisis in situ de las muestras identificadas como manantiales, piezómetros y aljibes; con el principal objetivo de actualizar la información de los puntos hidrogeológicos dentro del área de estudio. Es relevante mencionar que también fue monitoreado el reservorio artificial.

La caracterización fisicoquímica de los parámetros de campo: pH, conductividad eléctrica (CE), potencial de óxido reducción (redox), temperatura (T), sólidos disueltos totales (SDT) y oxígeno disuelto (OD) se realizó con una sonda multiparamétrica marca Hanna HI98195 y HI98194.

De los 125 puntos verificados, se pudo realizar toma de parámetros fisicoquímicos in situ en 89 puntos. En los 36 puntos restantes, no fue posible, debido a las restricciones de acceso por parte de los propietarios, obstrucciones en algunos piezómetros y otros no fueron encontrados.

De los puntos analizados, 57 corresponden a manantiales, 30 a piezómetros, un aljibe y un reservorio artificial al cual también se le tomaron parámetros in situ.

En la Tabla 5.1.6.24 se muestra el resumen de los parámetros obtenidos.

Tabla 5.1.6.24 Resultados de parámetros fisicoquímicos in situ. pH: potencial hidrógeno; ORP: potencial de óxido – reducción; CE: conductividad eléctrica, SDT: sólidos disueltos totales; S: salinidad; T: Temperatura.

	ID	Tipo	Vereda	Nivel estático (m)	pH	ORP	CE (μ S/cm)	SDT	S (PSU)	T(°C)
1	M18	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Topacio)		6,67	374,00	118	59	0,05	21,71
2	M20	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Topacio)		6,37	368,60	93	46	0,04	22,25
3	M22	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Sector Monjas)		6,82	419,10	365	182	0,17	22,20
4	M23	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Sector Monjas)		7,08	482,80	173	86	0,08	22,12
5	M 24	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Sector Monjas)		7,01	450,80	142	71	0,07	21,75
6	M25	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Sector Monjas)		6,46	413,10	686	343	0,33	23,29
7	M84	Manantial	Vereda El Iris		6,72	310,00	586	293	0,28	23,60
8	M85	Manantial	Vereda El Iris		6,65	291,50	742	371	0,36	23,55
9	M86	Manantial	Vereda El Iris		7,46	301,10	280	140	0,13	23,29
10	M87	Manantial	Vereda El Iris		6,63	309,50	257	129	0,12	23,91
11	M88	Manantial	Vereda El Iris		6,92	315,40	240	120	0,11	23,64
12	M89	Manantial	Vereda El Diluvio		6,43	202,00	401	201	0,19	24,27
13	M90	Manantial	Vereda El Iris		6,47	314,70	217	109	0,10	23,70
14	M91	Manantial	Vereda El Iris		7,19	321,30	153	76	0,07	23,93
15	M92	Manantial	Vereda El Iris		7,51	329,50	207	104	0,10	23,92
16	M99	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Balsal)		7,15	233,40	432	216	0,21	22,86
17	M100	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Balsal)		6,19	278,10	267	134	0,13	23,03
18	M101	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Balsal)		6,88	296,70	206	103	0,10	22,75
19	M103	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Balsal)		6,34	270,00	176	88	0,08	23,62
20	M104	Manantial	Quebrada el Balsal		8,07	180,80	367	183	0,18	22,72

	ID	Tipo	Vereda	Nivel estático (m)	pH	ORP	CE (μ S/cm)	SDT	S (PSU)	T(°C)
21	M108	Manantial	Quebrada el Balsal		7,97	134,00	138	69	0,06	22,39
22	M109	Manantial	Quebrada el Balsal		7,72	115,30	175	88	0,08	22,99
23	M116	Manantial	Quebrada la Colorada		8,08	181,20	141	71	0,07	23,59
24	M118	Manantial	Vereda La María		6,96	285,50	382	191	0,18	23,35
25	M121	Manantial	Vereda La María		6,24	319,00	156	78	0,07	23,13
26	M124	Manantial	Vereda La María		7,41	151,20	263	131	0,12	23,71
27	M128	Manantial	San Antonio - El Balsal		6,53	135,30	125	63	0,06	22,88
28	M181	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Topacio)		5,49	502,70	105	53	0,05	22,14
29	M182	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Topacio)		6,49	506,50	112	56	0,05	21,78
30	M183	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Topacio)		6,12	514,60	141	70	0,07	22,63
31	M184	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Topacio)		6,16	509,80	100	50	0,05	22,51
32	M189	Manantial	Vereda La María		6,62	373,10	213	107	0,10	23,68
33	M193	Manantial	Topacio		7,56	200,00	243	122	0,12	21,81
34	M194	Manantial	Topacio		8,13	189,70	150	75	0,07	21,97
35	M 195	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Topacio)		5,30	518,90	50	25	0,02	23,33
36	M197	Manantial	Topacio		8,17	187,10	247	123	0,12	22,22
37	M200	Manantial	San Antonio		8,04	163,90	181	90	0,08	21,76
38	M 203	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada San Antonio)		5,44	413,40	76	38	0,03	22,76
39	M205	Manantial	San Antonio		7,68	145,70	145	73	0,07	23,52
40	M206	Manantial	San Antonio		7,98	184,00	469	234	0,23	23,05
41	M208	Manantial	San Antonio		7,74	209,90	256	128	0,12	24,24
42	M 212	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada San Antonio)		6,65	382,70	218	109	0,10	21,82

	ID	Tipo	Vereda	Nivel estático (m)	pH	ORP	CE (μ S/cm)	SDT	S (PSU)	T(°C)
43	M 213	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Banco)		6,65	495,80	200	100	0,09	22,39
44	M 215	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Banco)		6,87	481,20	93	47	0,04	22,26
45	M 219	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Banco)		6,47	361,70	104	52	0,05	22,26
46	M 220	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Banco)		6,64	304,40	89	45	0,04	22,33
47	M222	Manantial	Vereda el Diluvio		6,76	300,40	170	85	0,08	22,87
48	M226	Manantial	Palestina		6,11	196,30	436	218	0,21	25,02
49	M229	Manantial	Quebrada el Balsal		7,94	203,70	266	133	0,13	23,44
50	M230	Manantial	Quebrada el Balsal		7,64	221,30	210	105	0,10	24,22
51	M 233	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Balsal)		6,91	322,70	70	35	0,03	22,99
52	M 242	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada San Antonio)		5,76	343,90	187	93	0,09	22,63
53	M250	Manantial	San Antonio		7,19	129,40	168	84	0,08	22,45
54	M301	Manantial	Vereda La María	-	8,09	159,3	174	87	0,08	23,04
55	M303	Manantial	Vereda Guacas abajo (Sector la Colorada)	-	6,63	188,7	143	72	0,07	23,80
56	M304	Manantial	Vereda El Diluvio	-	7,73	171,9	167	84	0,08	23,07
57	M305	Manantial	Vereda El Diluvio	-	7,02	106,3	164	82	0,08	23,36
58	PZA 12 02	Piezómetro	Peñas azules	2,20	7,13	249,10	432	216	0,21	25,06
59	PZA 12 03	Piezómetro	Vereda Guacas Abajo (Cerca del corregimiento de Providencia, margen izquierda del puente de la quebrada Guacas)	6,31	5,45	270,00	128	64	0,06	26,46
60	PZA 12 06	Piezómetro	San Antonio	4,14	7,04	2,66	203	102	0,10	25,86
61	PZA 12 08	Piezómetro	Báscula	3,00	7,28	100,30	181	90	0,08	26,21
62	PZS-12-03	Piezómetro	San Antonio	45,98	6,94	-18,00	445	222	0.21	23.75

	ID	Tipo	Vereda	Nivel estático (m)	pH	ORP	CE (μ S/cm)	SDT	S (PSU)	T(°C)
63	PZS 12 05	Piezómetro	Palestina	28,23	7,57	196,40	566	283	0,27	24,79
64	PZS 12 09	Piezómetro	Vereda La Linda (Quebrada la Palestina)	3,55	7,30	189,30	519	259	0,25	24,93
65	PZS 12 12	Piezómetro	Topacio	4,05	7,16	222,00	328	164	0,16	25,56
66	PZS 12 14	Piezómetro	Providencia	1,54	7,34	235,00	158	79	0,07	26,85
67	PZS 13 17	Piezómetro	Obras públicas	3,65	5,88	196,90	152	76	196,90	26,54
68	PZR 12 02	Piezómetro	San Antonio	4,40	5,17	385,20	99	49	0,05	24,77
69	PZR 13 05	Piezómetro	Obras públicas	3,76	7,38	145,50	555	278	0,27	25,90
70	PZR 13 06	Piezómetro	Mirador	44,00	7,60	-106,50	476	238	0,23	24,52
71	PZR 13 07	Piezómetro	Garrucha	1,00	8,00	71,00	255	127	0,12	23,63
72	PZR 13 09	Piezómetro	La Bateita	8,60	7,76	5,00	347	173	0,16	26,88
73	BH-01	Piezómetro	El Iris - La Maria	37,67	6,62	-77,10	559	279	0,27	24,90
74	BH-5M-03	Piezómetro	Vereda La María	42,74	6,20	286,80	174	87	0,08	24,10
75	BH-5M-08	Piezómetro	Vereda La María	27,74	6,98	288,90	738	369	0,36	24,82
76	DH FS 309	Piezómetro	Diluvio Medio	19,45	7,83	251,50	60	30	0,03	23,07
77	DH FS 315	Piezómetro	Palestina	3,49	7,63	83,90	322	161	0,15	25,20
78	DH TM 01	Piezómetro	Diluvio Medio	39,64	8,13	197,20	215	107	0,10	25,43
79	DH TM 02	Piezómetro	Diluvio Medio	30,00	7,86	184,80	359	179	0,17	24,21
80	DH TM 10	Piezómetro	Palestina	27,86	7,63	196,30	431	216	0,21	25,95
81	DH TM 100	Piezómetro	Palestina	2,23	7,52	200,00	172	86	0,08	25,94
82	DH TM 115	Piezómetro	La Unión	8,27	8,08	115,50	81	40	0,04	24,42
83	DH WR 201	Piezómetro	El Banco (ceca a la báscula)	2,48	6,66	-70,60	127	63	0,06	25,31
84	DH WR 203	Piezómetro	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada San Antonio)	30,43	5,81	325,10	597	298	0,29	25,22
85	DH GA 501	Piezómetro	Palestina	2,82	7,73	173,90	386	193	0,18	25,52
86	DH GA 509	Piezómetro	Diluvio Medio	33,91	7,32	223,30	101	51	0,05	24,41

	ID	Tipo	Vereda	Nivel estático (m)	pH	ORP	CE (μ S/cm)	SDT	S (PSU)	T(°C)
87	Aljibe	Aljibe	Vereda Guacas Abajo (Sector La Mayoría)	0,25	7,73	113,90	85	42	0,04	24,07
88	Reservorio artificial	Reservorio artificial	Vereda Guacas Abajo (Sector La Mayoría)		6,55	358,90	41	21	0,02	23,95
89	PZ4	Piezómetro	Vereda la María	18	6,4	23,7	176	107	-	23,4

Fuente: Integral S.A., 2026

a. Sólidos disueltos totales (SDT)

Los parámetros de STD (Sólidos Disueltos totales) y conductividad eléctrica, son indicadores del grado de mineralización del agua. A partir de la medición de los puntos inventariados en la zona del proyecto, las concentraciones de sólidos disueltos se encuentran entre 30 y 369 mg/l, para los piezómetros (Figura izquierda) siendo el valor más bajo para el punto DH FS 309 y los más alto para el piezómetro BH-5M-08.

Para el caso de los manantiales los valores se encuentran entre 25 y 371 mg/l, siendo este último valor del manantial M85 sobresaliente con respecto al rango de los demás datos (Figura 5.1.6.48 derecha).

Según (Fetter, C., 2001) estos valores de sólidos totales disueltos que no superan los 1000 mg/l permiten clasificar el agua como “agua dulce”.

El valor de sólidos disueltos para el aljibe y reservorio artificial es de 42 mg/l y 21 mg/l respectivamente.

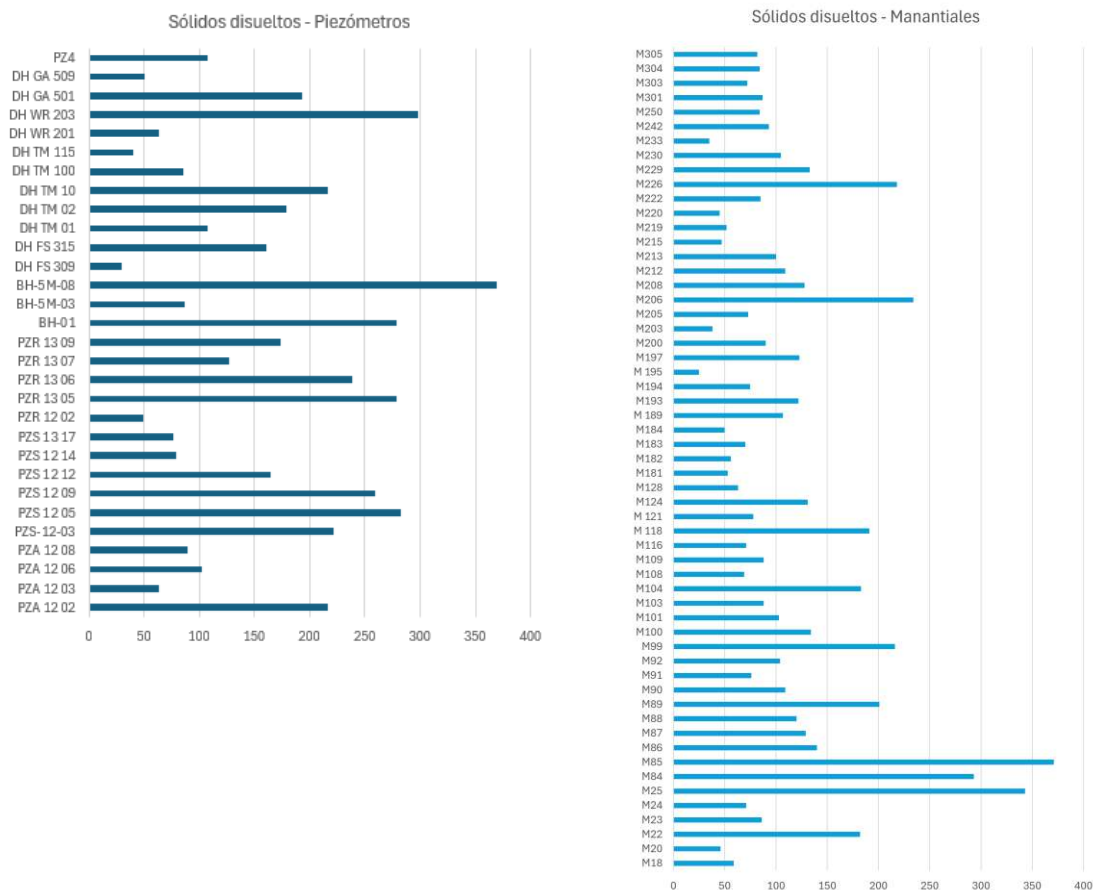


Figura 5.1.6.48 Valores de sólidos totales disueltos para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2026

En la Figura 5.1.6.49 se presenta la distribución espacial de los valores de sólidos disueltos totales.

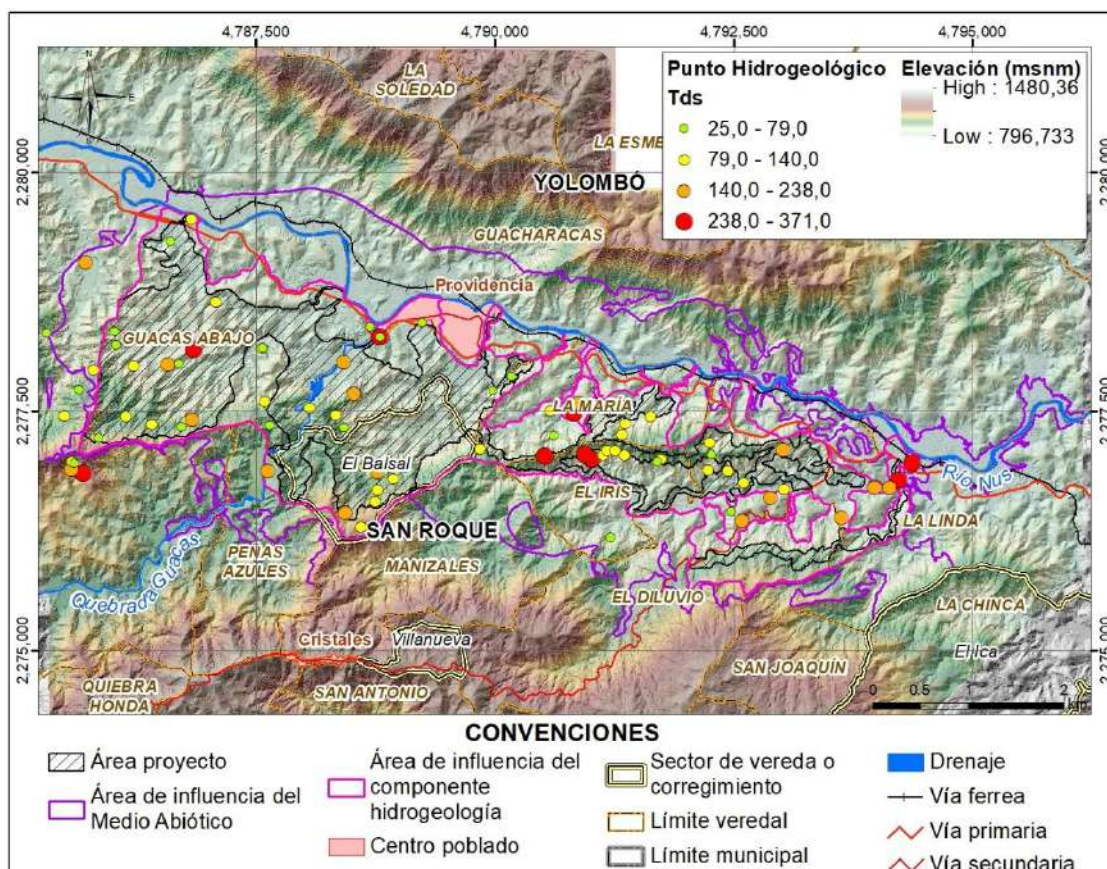


Figura 5.1.6.49 Distribución espacial de los valores de Tds de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2026

b. Conductividad eléctrica

Como consecuencia de su contenido iónico, el agua se hace conductora de la electricidad. A medida que la concentración iónica aumenta, también aumenta hasta cierto límite la conductividad o capacidad de un agua para conducir la corriente eléctrica. La unidad de medida de conductividad es el $\mu\text{S/cm}$ (microsiemens/centímetro). Los valores de este parámetro varían entre 60 y 738 $\mu\text{S/cm}$ para los piezómetros, siendo el piezómetro DH FS 309 el de menor valor y el más alto el BH-5M-08 (Figura 5.1.6.50 izquierda).

Para el caso de los manantiales el rango de valores está entre 50 y 742 $\mu\text{S/cm}$ siendo menor para el manantial 195 y mayor para M85 (Figura 5.1.6.50 derecha), correspondiendo así con el análisis realizado para los sólidos totales disueltos.

El valor de la conductividad eléctrica para el aljibe y reservorio artificial es de 85 mg/l y 41 mg/l respectivamente.

Mediciones de la conductividad eléctrica solo en los piezómetros (durante las 13 campañas analizadas) indican que esta se mantiene estable, con valores entre 49,0 y 333,00 $\mu\text{S/cm}$,

correspondientes a mineralizaciones de muy débiles a medias. Presentando variaciones generalmente menores a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre las diferentes campañas. Los puntos que registraron los mayores cambios en este parámetro corresponden al punto PZA 12-08 y BH-5M-03 llegando a presentar variaciones mayores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tanto positivas como negativas, que pueden indicar una mayor sensibilidad a las fluctuaciones en el aporte de agua de recarga reciente o ingreso de agua contaminada. Sin embargo, para la mayoría de los puntos este parámetro muestra variaciones pequeñas. (SHI, 2025).

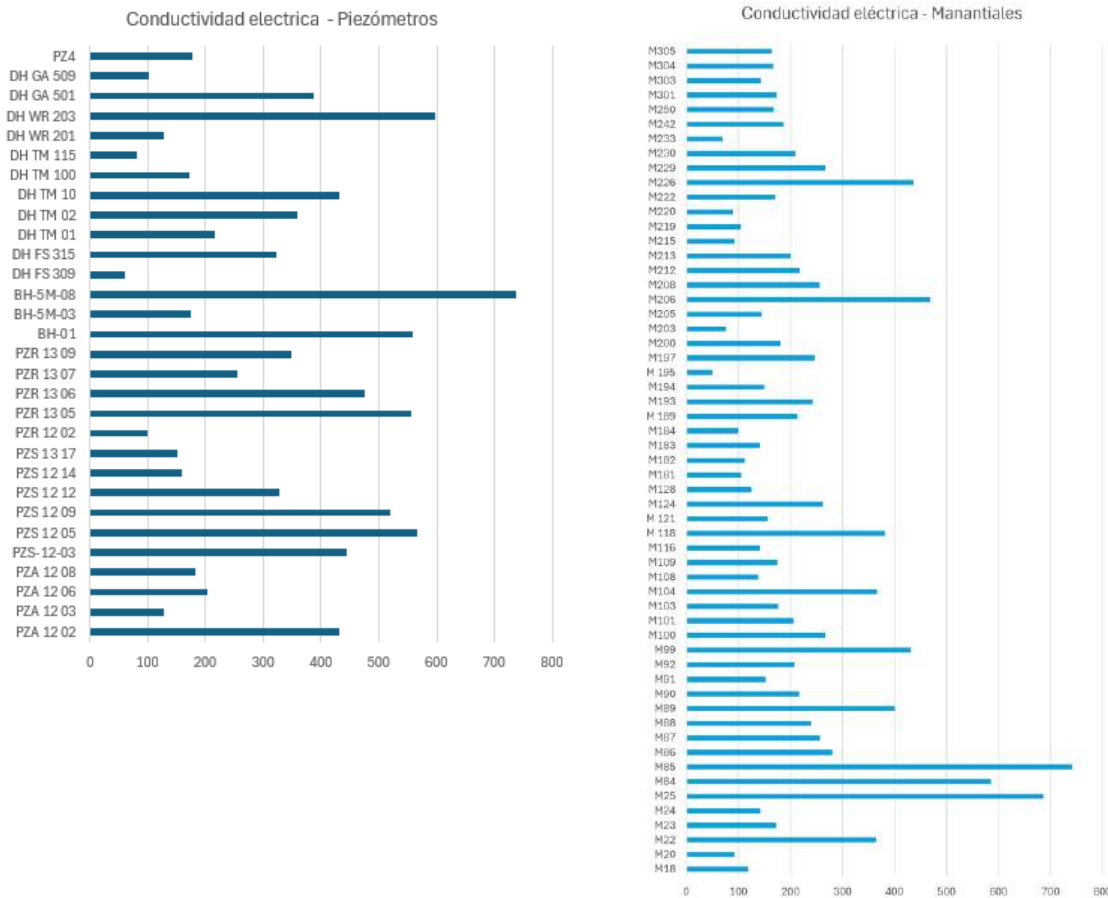


Figura 5.1.6.50 Valores de conductividad eléctrica para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2026

La distribución espacial de la conductividad eléctrica según este inventario de puntos de agua se puede ver en la Figura 5.1.6.51.

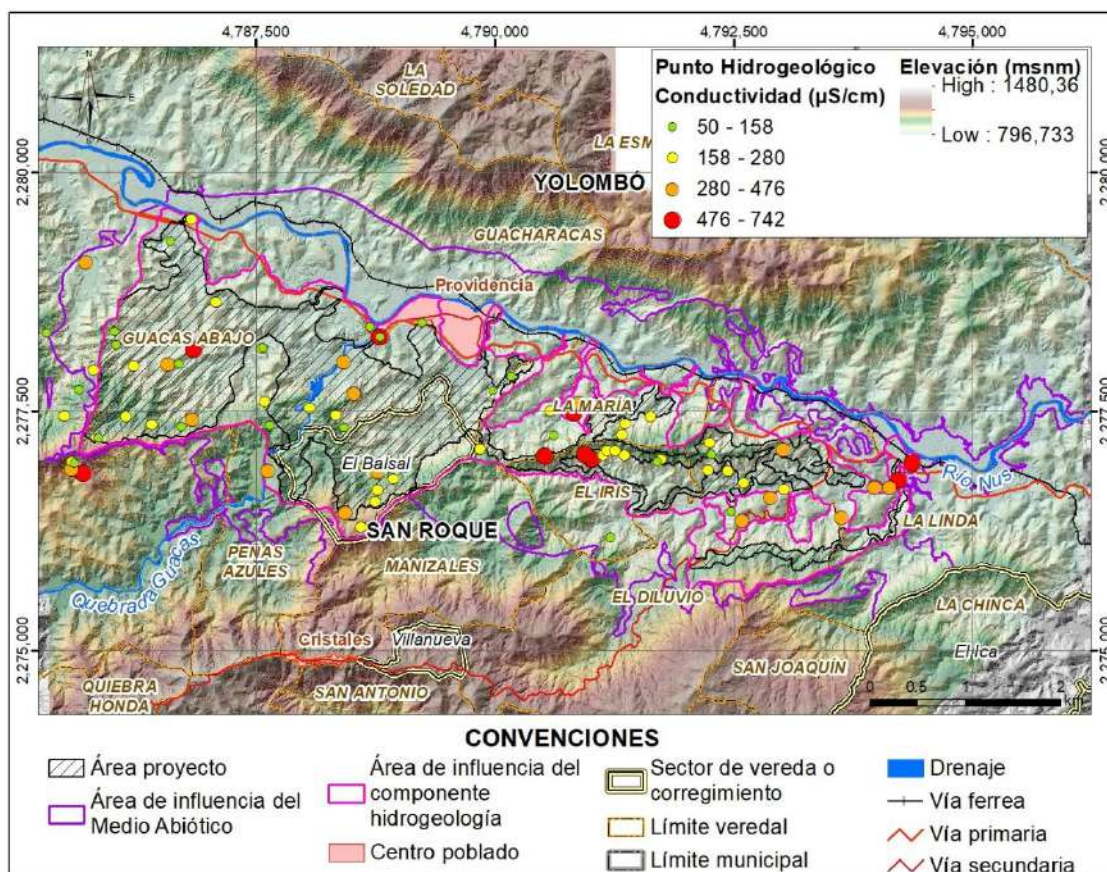


Figura 5.1.6.51 Distribución espacial de los valores de conductividad eléctrica de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2026

c. Potencial de hidrogeno (pH)

El valor del pH define la acidez del agua, siendo para aguas neutras $\text{pH}=7$, para aguas ácidas $\text{pH}<7$ y para aguas básicas $\text{pH}>7$. El pH juega un papel importante en muchos procesos químicos y biológicos de las aguas subterráneas naturales (equilibrio carbonatado, procesos redox, etc.); es fácilmente alterable por lo que su determinación debe hacerse en el momento de la toma de muestra.

En la Figura 5.1.6.52 se presentan los valores medidos en campo, que, para el caso de piezómetros (Figura 5.1.6.52 izquierda), varían entre 5 y 8 unidades de pH, indicando que estas muestras varían de ligeramente ácidas / neutras a ligeramente básicas, con un predominio de aguas neutras y básicas. Por otro lado, los manantiales (Figura 5.1.6.52 derecha) tienen un rango de variación es el mismo, entre 5 y 8 unidades de pH, con un predominio de aguas neutras.

El pH para el aljibe y el reservorio artificial localizado en los campamentos la Mayoría es de 8 y 7 respectivamente.



Figura 5.1.6.52 Valores de pH para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2026

En la Figura 5.1.6.53 se muestra la distribución espacial:

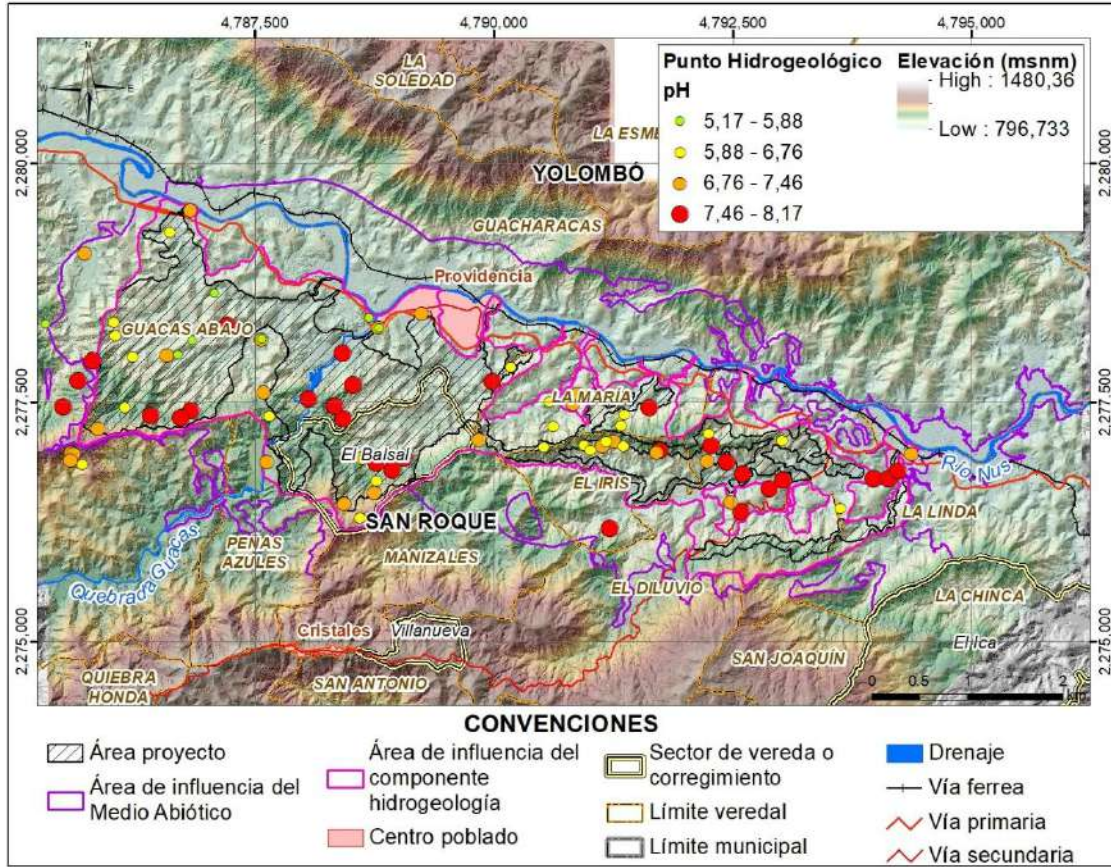


Figura 5.1.6.53 Distribución espacial de los valores de pH de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2026

d. Temperatura

La temperatura del agua subterránea, en un punto y momento determinado, representa un estado de equilibrio entre los "aportes" y las "extracciones" caloríficas en ese punto. La distribución espacial de temperaturas en un acuífero depende de la conductividad térmica e hidráulica del medio, de la relación longitud/profundidad de la cuenca, configuración del nivel freático, distribución de la temperatura ambiente respecto a las zonas de recarga y descarga, etc.

La temperatura en los piezómetros monitoreados varía entre 23 y 27°C (Figura 5.1.6.54 izquierda), y para los manantiales entre 22 y 25°C (Figura 5.1.6.54 derecha). Los valores de este parámetro para el aljibe y el reservorio artificial es de 24°C.



Figura 5.1.6.54 Valores de temperatura para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2026

En la Figura 5.1.6.55 se presenta la distribución espacial de los puntos:

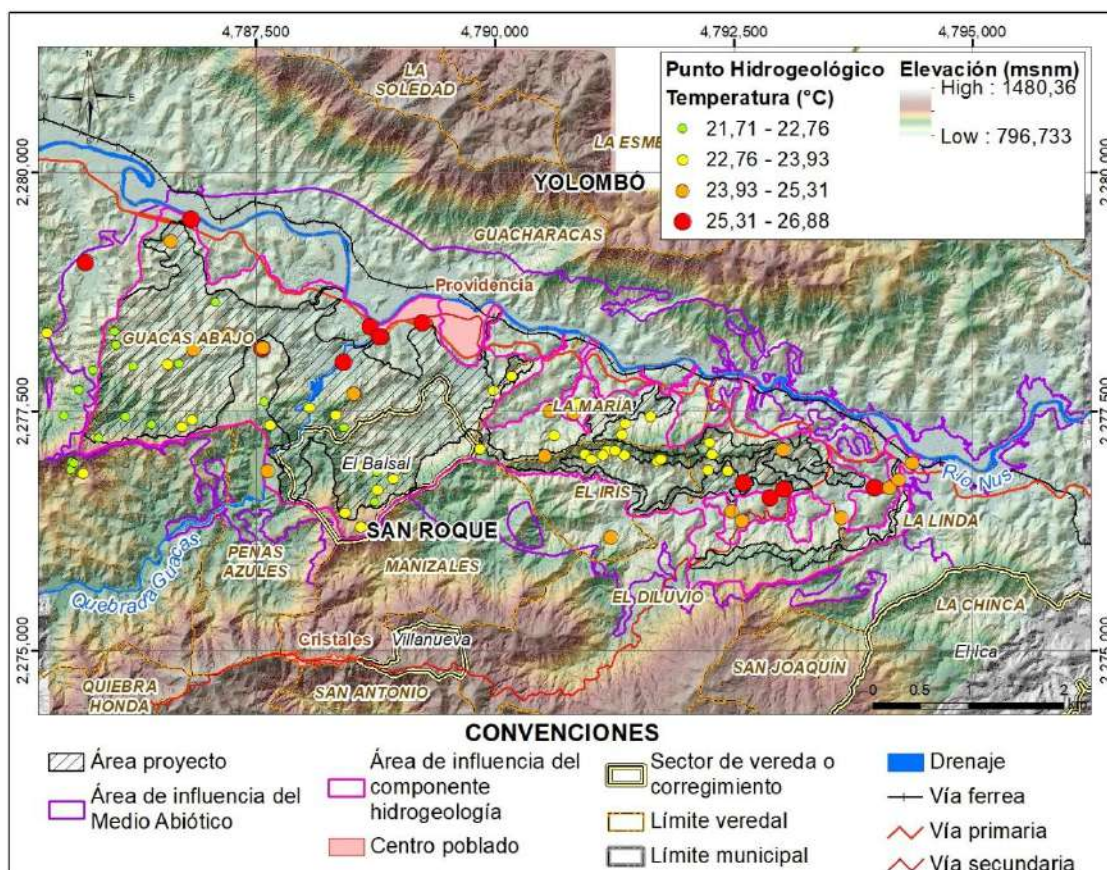


Figura 5.1.6.55 Distribución espacial de los valores de temperatura de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A., 2026

e. Potencial de óxido – reducción (ORP)

El potencial de óxido reducción es un conjunto general de reacciones químicas que pueden describirse como la transferencia de electrones de los átomos de una especie química a los átomos de otra. Algunas sustancias o elementos donan o pierde electrones y se le conoce como reductor, mientras que la sustancia que los roba o recibe se denomina el oxidante.

Al realizar una medición de ORP, si se presenta el caso de que la muestra de agua sea más oxidante que el electrodo, habrá un potencial redox positivo como es el caso de todos los manantiales inventariados (Figura 5.1.6.56 derecha), mientras que, si la muestra juega el papel de reductor, se medirá un potencial redox negativo (Microlab Industrial, 2017), como es el caso de los piezómetros DH WR 201, BH-01, PZR 13 06 y PZS-12-03 (Figura 5.1.6.56 izquierda). Esto significa que hay una menor cantidad de oxígeno disponible para la oxidación de sustancias. La materia orgánica presente en el suelo o en la zona de saturación puede ser degradada por microorganismos, consumiendo oxígeno y generando condiciones reductoras. La presencia de sulfatos, hierro o manganeso también puede contribuir a un ORP bajo, ya que pueden ser reducidos a sulfuros, hierro ferroso o manganeso soluble, respectivamente. (Freeze Cherry, 1979)

El valor de este parámetro para el aljibe y el reservorio artificial es de 113,9 y 358,9 respectivamente.

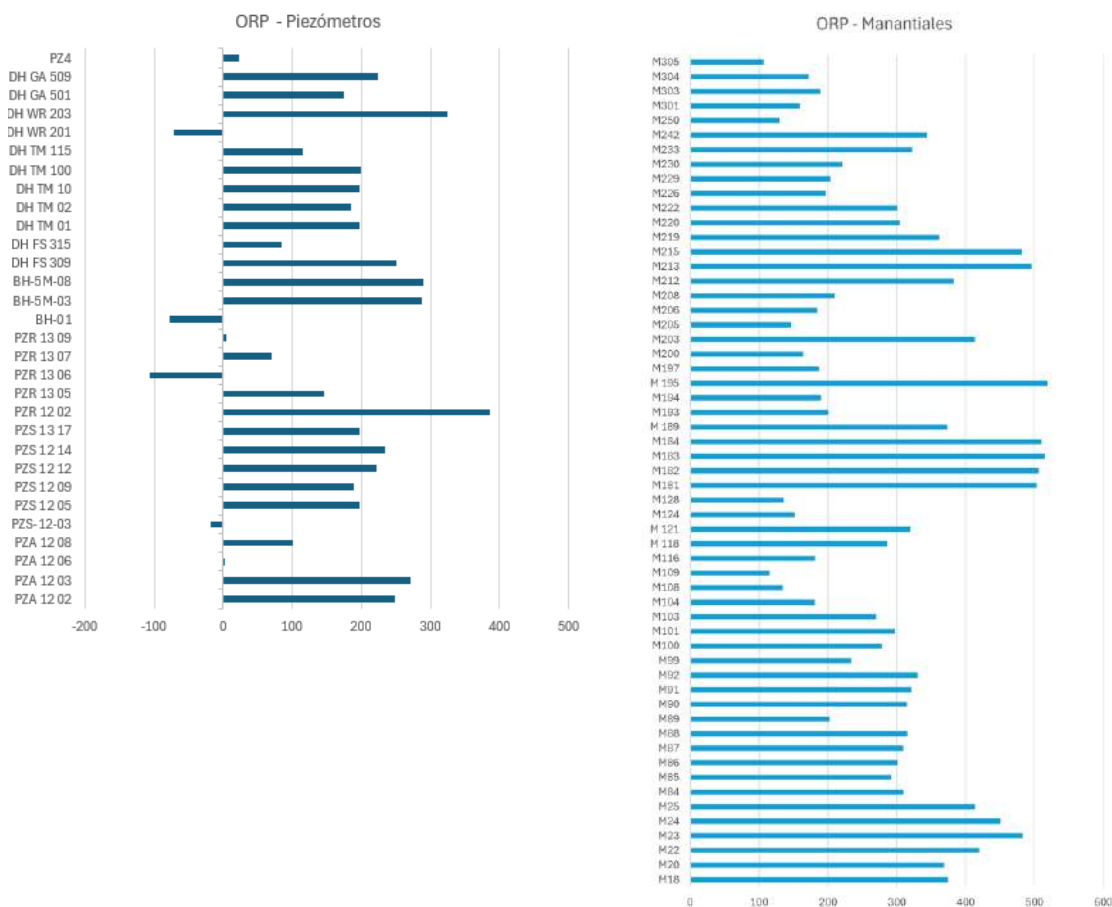


Figura 5.1.6.56 Valores de óxido - reducción para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2026

La distribución espacial de los puntos inventariados se muestra en la Figura 5.1.6.57:

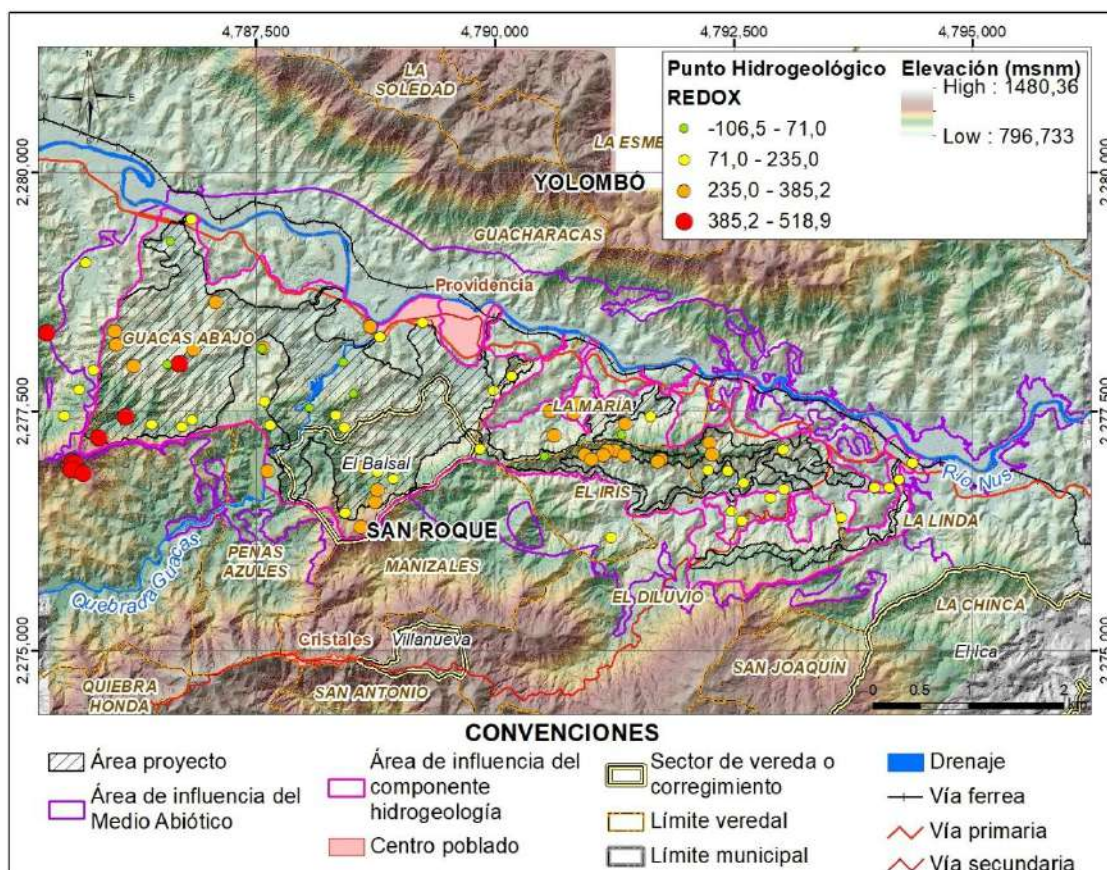


Figura 5.1.6.57 Distribución espacial de los valores de óxido - reducción de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2026

f. Salinidad

El agua en forma líquida es un compuesto con una gran capacidad para disolver sales que inicialmente se hallaban en fase sólida e incorporarlas al medio acuoso. La salinidad es la suma de la totalidad de los iones inorgánicos disueltos, en la naturaleza la mayor contribución a dicho valor la realizan los compuestos mayoritarios (Ribera, 2016).

La profundidad del agua subterránea se relaciona directamente con la salinidad de esta, sin embargo, bajo determinadas condiciones hidrogeológicas naturales, como elevados tiempos de residencia, muy bajos gradientes geológicos, existencia de fracturas que conecten niveles a profundidades diversas, variaciones locales en el grado de confinamiento, etc., pueden existir aguas muy salinas incluso en bajas profundidades (Ribera, 2016).

Con base a los datos obtenidos en campo en la Figura 5.1.6.58 se presentan los valores de salinidad obtenidos en el levantamiento de los manantiales y piezómetros, con un patrón bastante similar a los valores de conductividad. En la Figura 5.1.6.59 se muestra su distribución espacial en el área de estudio.

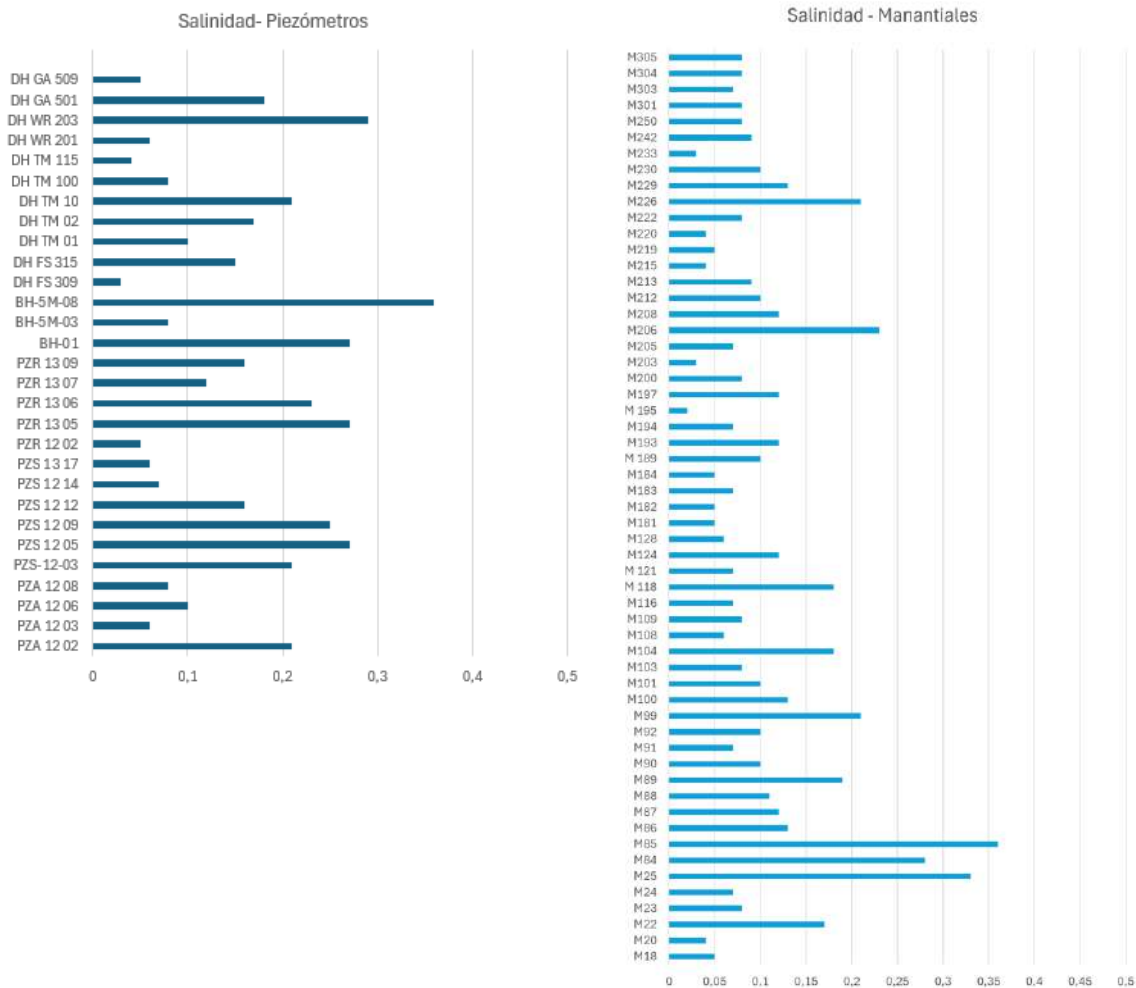


Figura 5.1.6.58 Valores de salinidad para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2026

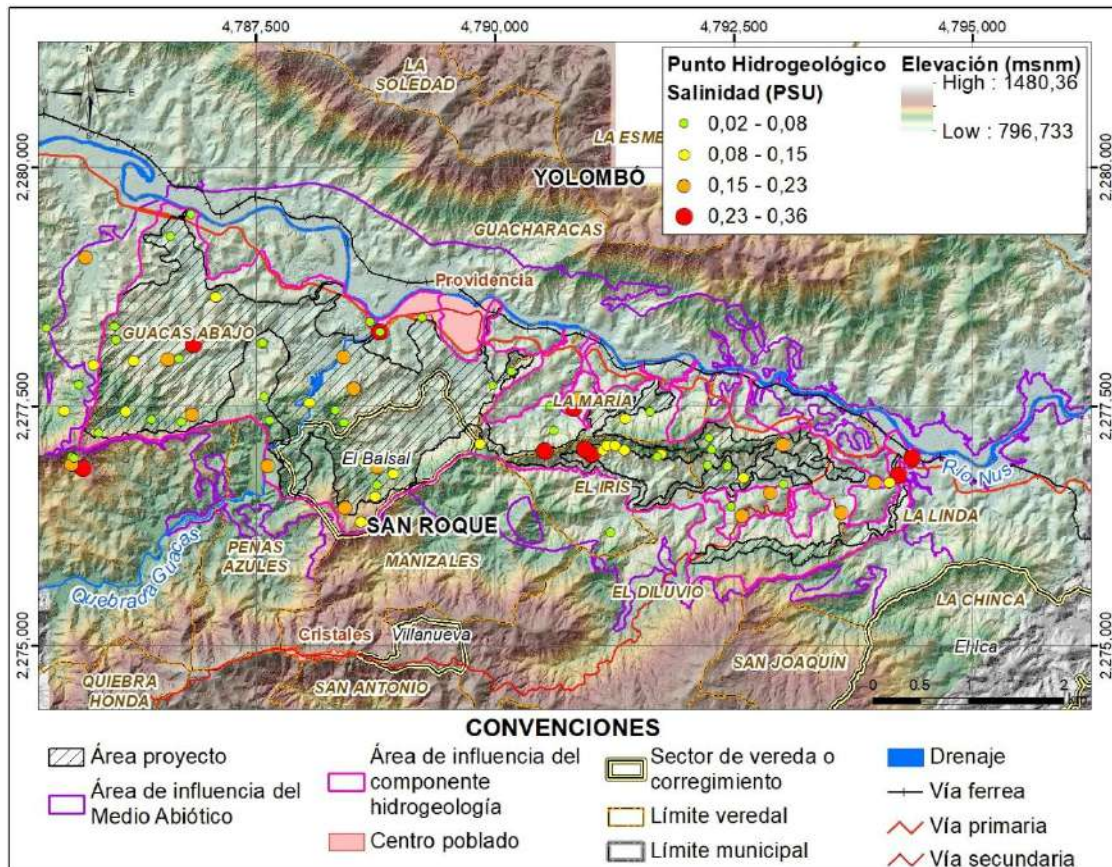


Figura 5.1.6.59 Distribución espacial de los valores de salinidad de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A., 2026

E. Sistema de flujo subterráneo

Con la finalidad de conocer la profundidad de la superficie piezométrica y sus variaciones en el tiempo, la zona de estudio cuenta con 15 piezómetros que hacen parte de la red de monitoreo y se encuentran distribuidos en diferentes sectores como se presenta en la Figura 5.1.6.60. De los cuales, tres captan de la unidad hidrogeológica depósito aluvial (UHG-3), seis captan de la unidad hidrogeológica saprolito arenoso (UHG-5) y seis de la unidad hidrogeológica Roca Fresca Fracturada (UGH-7).

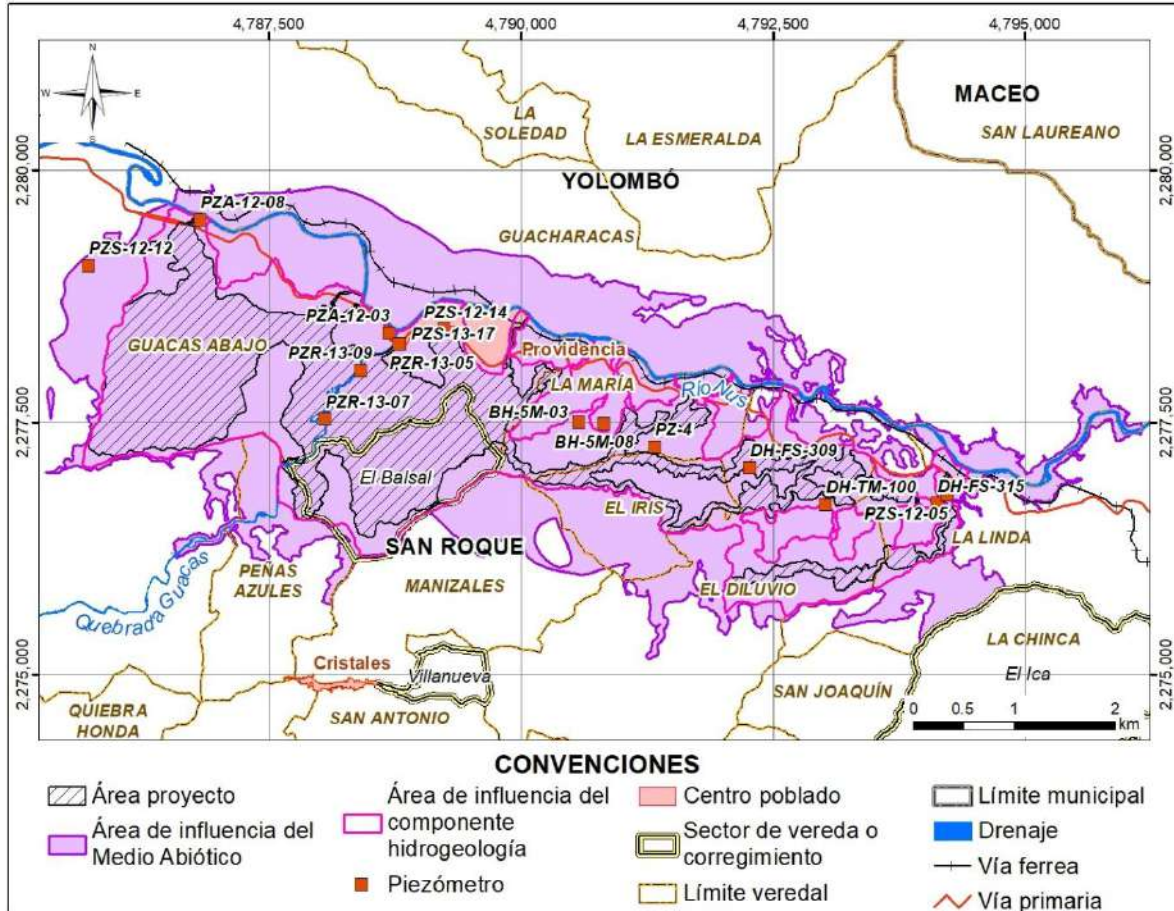


Figura 5.1.6.60 Ubicación de piezómetros para análisis de flujo subterráneo

Fuente: Integral S.A., 2026

En la Tabla 5.1.6.25 se muestra un resumen de las características de los piezómetros empleados para el análisis. Y en el Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_Piezometros se presenta la información compilada de los piezómetros y los niveles históricos que se han registrado desde el año 2016. Para efectos de actualización de línea base, desde febrero de 2025 hasta la fecha los 15 piezómetros mencionados tienen medición de niveles con frecuencia quincenal.

Tabla 5.1.6.25 Resumen de las características de los piezómetros analizados para el sistema de flujo subterráneo

ID Piezómetro	Este	Norte	Cota (m.s.n.m)	Prof. (m)	Prof. Rejilla (m)	Saliente (m)*	Diámetro (in)	Unidad Hidrogeológica	Sector
PZA12-03	4.788.695,00	2.278.385,00	819,60	9,50	2-9	0,59	4	UHG-3 Depósito aluvial	Guacas Abajo
PZA12-08	4.786.818,00	2.279.510,00	819,30	7,00	1-6	0,24	4	UHG-3 Depósito aluvial	Guacas Abajo
DH-FS-315	4.794.134,26	2.276.696,50	808,75	24,60	4-7	0,25	1,5	UHG-3 Depósito aluvial	La Linda
PZS12-12	4.785.710,98	2.279.056,64	833,94	13,00	5-13	0,40	4	UHG-5 Saprolito arenoso	Guacas Abajo
PZS12-14	4.789.241,20	2.278.423,32	818,42	9,90	0-10,5	0,40	4	UHG-5 Saprolito arenoso	Guacas Abajo
DH-TM-100	4.793.025,14	2.276.684,86	814,11	21,90	3-10	0,10	1	UHG-5 Saprolito arenoso	El Diluvio
PZS-12-05	4.794.234,12	2.276.778,46	832,46	39,00	13-33	0,28	2	UHG-5 Saprolito arenoso	La Linda
PZ4	4791328,00	2277254,00	939,09	38,00	20-39	0,20	4	UHG-5 Saprolito arenoso	La María
PZS 13-17	4.788.803,74	2.278.276,30	818,00	15,21	9-15	0,10	4	UHG-5 Saprolito arenoso	Guacas Abajo
PZR 13-05	4.788.795,74	2.278.273,32	818,03	151,00	55- 145	0,00	2	UHG-7 Roca fresca fracturada	Guacas Abajo
PZR 13-07	4.788.059,71	2.277.532,15	914,16	150,00	53-133	0,10	2	UHG-7 Roca fresca fracturada	Guacas Abajo
PZR 13-09	4.788.416,71	2.278.012,22	824,66	150,00	60-140	0,08	2	UHG-7 Roca fresca fracturada	Guacas Abajo

ID Piezómetro	Este	Norte	Cota (m.s.n.m)	Prof. (m)	Prof. Rejilla (m)	Saliente (m)*	Diámetro (in)	Unidad Hidrogeológica	Sector
DH-FS-309	4.792.271,49	2.277.047,34	916,16	42,00	17-28	0,20	1,5	UHG-7 Roca fresca fracturada	El Diluvio
BH-5M-03	4.790.577,00	2.277.496,00	872,01	50,00	43-48	0,22	2	UHG-7 Roca fresca fracturada	La María
BH-5M-08	4.790.827,00	2.277.484,00	866,39	56,90	41-56	0,46	2	UHG-7 Roca fresca fracturada	La María

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de Golder Associates, (2017)

a. Variación de niveles piezométricos

El análisis de la variación piezométrica se llevó a cabo a partir de la medición de niveles en 15 piezómetros activos que se encuentran distribuidos en el sector. Dichos puntos presentan datos desde febrero del año 2016 hasta junio del 2025. Aunque entre mayo del 2018 y entre enero del 2025 solo se presentan cinco mediciones; en el mes de noviembre 2019, junio, septiembre y octubre del 2020 y enero del 2021.

A continuación, en la Tabla 5.1.6.26 se presenta el resumen estadístico de los datos de profundidad del nivel de agua.

Tabla 5.1.6.26 Resumen estadístico de la cota piezométrica

Piezómetro	Cota piezométrica (m.s.n.m)					Unidad hidrogeológica
	# de datos	Promedio	máximo	mínimo	Mediana	
PZA12-03	38	812,72	813,68	812,32	812,61	UHG-3 Depósito aluvial
PZA12-08	39	816,77	817,23	816,36	816,69	
DH-FS-315	39	780,59	780,75	780,05	780,60	
PZS 13-17	41	816,00	817,57	814,53	816,09	UHG-5 Saprolito arenoso
PZS-12-05	39	779,39	779,74	777,97	779,42	
PZS12-12	39	929,72	929,94	929,45	929,75	
PZS12-14	38	817,08	817,55	816,67	817,08	
DH-TM-100	42	786,61	787,18	786,00	786,59	
PZ4	10	929,75	936,92	928,37	929,03	UHG-7 Roca fresca fracturada
PZR 13-07	38	910,36	911,22	909,49	910,37	
PZR 13-09	38	816,38	817,26	815,82	816,34	
BH-5M-03	42	834,07	835,51	833,36	833,75	
BH-5M-08	23	838,74	839,58	838,43	838,66	
DH-FS-309	42	876,11	877,55	875,04	876,02	
PZR 13-05	38	815,83	816,27	815,35	815,84	

Fuente: Integral S.A. 2025

A continuación, se presentan las gráficas de la variación temporal de los niveles freáticos en los piezómetros en mención y la precipitación con registros mensuales de las estaciones Providencia (entre febrero del 2025 y junio del 2025), y GJA EXP. EL NUS del IDEAM (entre febrero del 2016 a septiembre del 2024). Entre octubre del 2016 a agosto del 2017, septiembre y noviembre del 2018, marzo del 2018, agosto del 2022 y octubre del 2024 hasta enero del 2025 no se tienen datos de precipitación en la estación GJA EXP. EL NUS.

Los piezómetros fueron agrupados por la Unidad Hidrogeológica de la cual captan agua. Para el caso de análisis se tienen tres piezómetros en la UHG-3 – Depósitos aluviales (Figura 5.1.6.61), seis piezómetros en la UHG-5 – Saprolito arenoso (Figura 5.1.6.62 y Figura 5.1.6.63) y seis piezómetros en la UHG-7 (Figura 5.1.6.64 y Figura 5.1.6.65).

Los puntos que captan en la UHG-3 presentan variaciones en la cota piezométrica que oscilan entre 817 y 780 m.s.n.m (Figura 5.1.6.61), con variaciones en el nivel freático entre 2,50 y 6,78 m en las últimas mediciones llevadas a cabo entre febrero y junio del 2025

(gráficas a la derecha en la Figura 5.1.6.61). En términos generales, entre 2016 y 2018 se observan bajas fluctuaciones con un comportamiento en el nivel constante.

En las lecturas efectuadas en el 2025 se observan algunas variaciones en el nivel freático cuyos picos en los piezómetros PZA12-03 y DH-FS-315 concuerdan con los registros de mayores precipitaciones registradas en la estación Providencia, que corresponde a los meses de abril, mayo y junio. En cuanto al piezómetro PZA12-08 el incremento es paulatino a partir del mes de abril, lo cual también se ajusta a las épocas lluviosas en el sector.

Es importante mencionar que la ubicación del piezómetro DH-FS-315 se encuentra en la vereda La Linda en inmediaciones de la quebrada La Palestina, cuya ubicación topográfica es más baja en comparación a los otros dos piezómetros que captan de la misma unidad hidrogeológica. Por tanto, su cota piezométrica se observa un poco más profunda en la Figura 5.1.6.61. No obstante, sus fluctuaciones en el nivel se mueven alrededor de los 3,80 y 3,90 m.

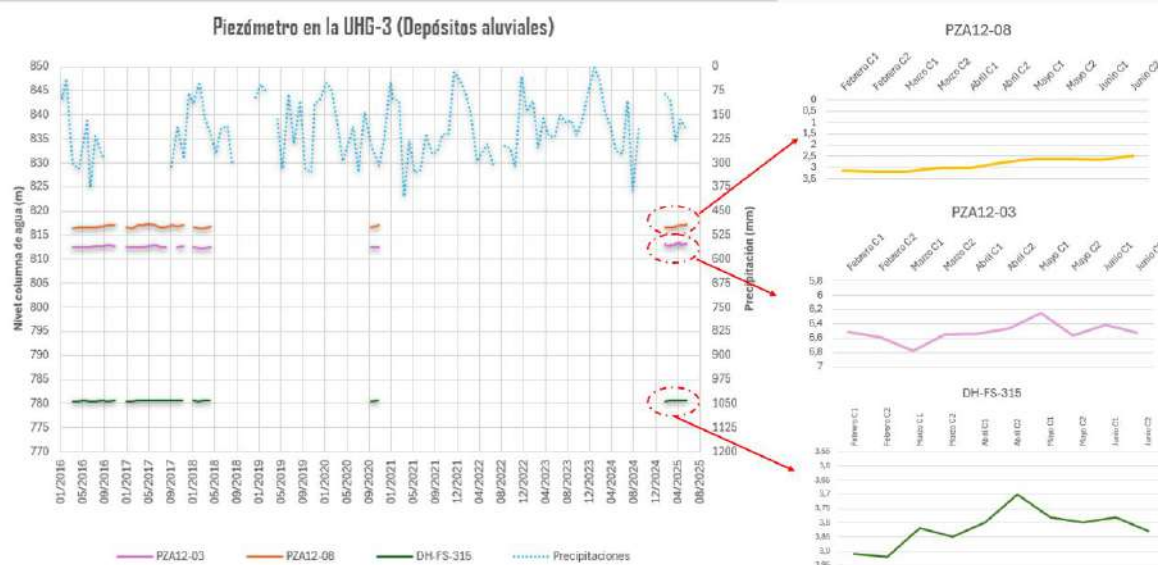


Figura 5.1.6.61 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-3 – Depósitos aluviales

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI, (2025) y Gramalote_Groundwater Level_Data 06-2021

En cuanto a los seis piezómetros que captan de la UHG-5 – Saprolito arenoso, se observa un comportamiento en la cota piezométrica entre 830 y 937 msnm., con variaciones en el nivel freático en las últimas mediciones llevadas a cabo entre febrero y junio del 2025, entre 1,5 y 4,6 m (gráficas a la derecha en la Figura 5.1.6.62 y Figura 5.1.6.63), a excepción de los piezómetros PZ4 y PZS13-12 que oscilan entre 10 y 28 m, en estos piezómetros las rejillas se localizan a mayor profundidad.

En términos generales, el comportamiento en los niveles entre el 2016 y 2018 es más o menos homogéneo, sin embargo, en las últimas mediciones efectuadas, entre febrero y junio del 2025 se evidencian unos incrementos en los niveles en los puntos PZS12-12, PZ4 y PZS12-14 (gráficas a la derecha en la Figura 5.1.6.62) en los meses de abril y mayo cuyo comportamiento se relaciona con las épocas de lluvia registradas en la estación

Providencia. En cuanto a los otros piezómetros presentados en la Figura 5.1.6.63 no hay relación del nivel con el régimen de lluvias.

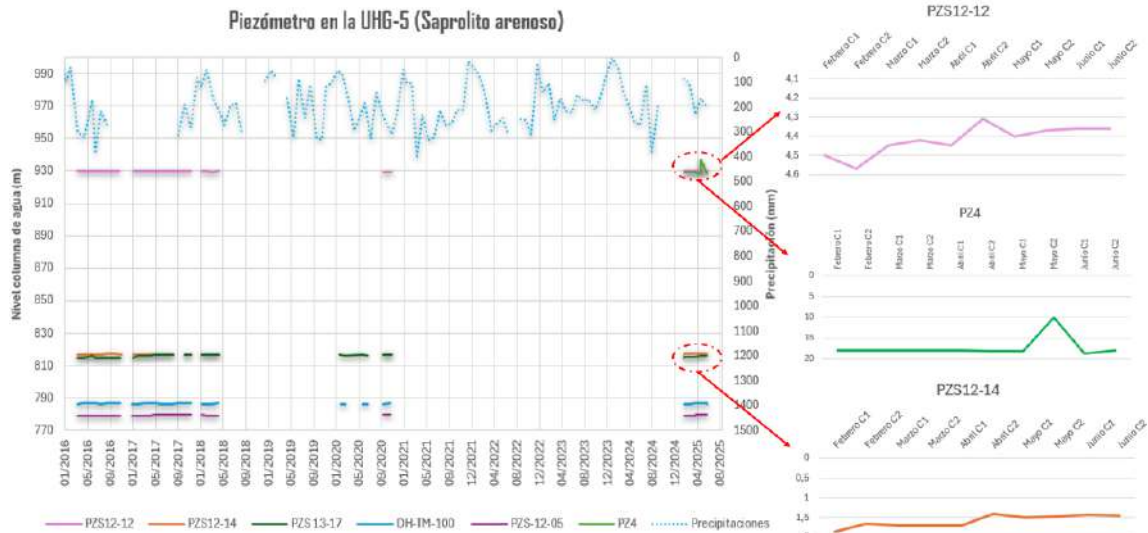


Figura 5.1.6.62 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-5 – Saprolito arenoso. Piezómetros PZS 12-12, PZ4 y PZS 12-14

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI, (2025) y Gramalote_Groundwater Level_Data 06-2021

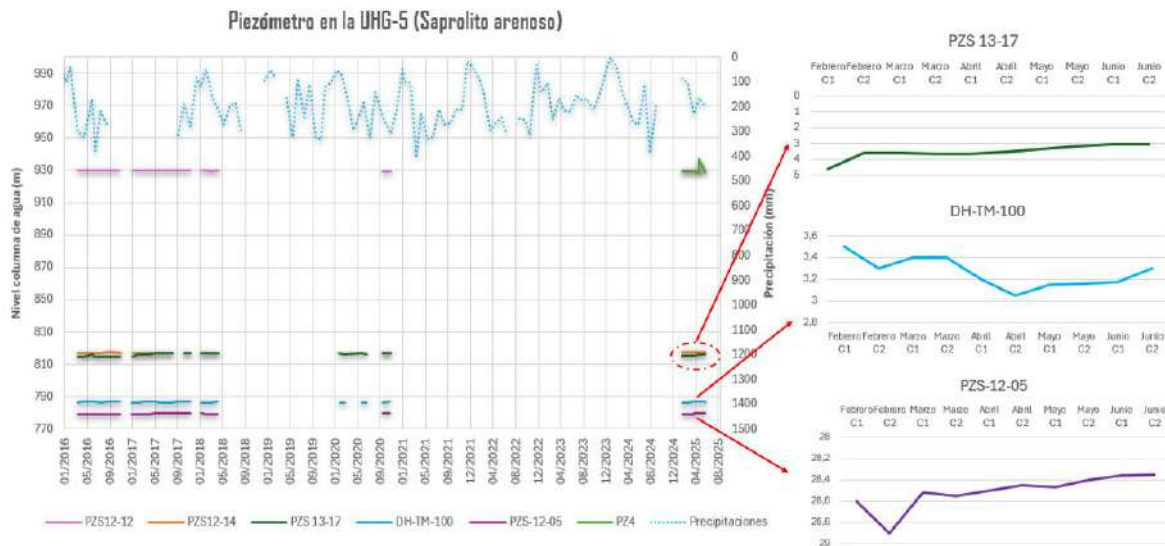


Figura 5.1.6.63 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-5 – Saprolito arenoso. Piezómetros PZS 13-17, DH-TM-100 y PZS-12-05

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI, (2025) y Gramalote_Groundwater Level_Data 06-2021

Finalmente, el comportamiento de la cota piezométrica de los seis puntos que captan de la UHG-7 – Roca fresca fracturada, oscila entre 849 y 911 msnm., con variaciones en el nivel estático entre 1,5 y 9,5 m y 20,0 y 38,0 m (graficas a la derecha en la Figura 5.1.6.64 y Figura 5.1.6.65).

En términos generales en los datos de niveles entre 2016 y 2018 parece mostrar un comportamiento constante, sin drásticas variaciones. En las últimas mediciones efectuadas, entre febrero y junio del 2025, no se evidencia un comportamiento relacionado con régimen de lluvias registrado en la estación Providencia.

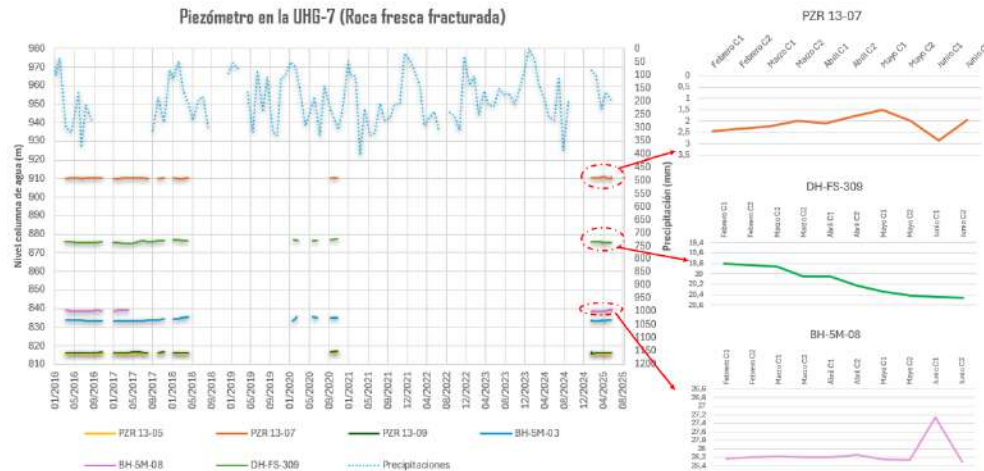


Figura 5.1.6.64 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-7 – Roca fresca fracturada. Piezómetros PZR 13-07, DH-FS-309 y BH-5M-08

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI, (2025) y Gramalote_Groundwater Level_Data 06-2021

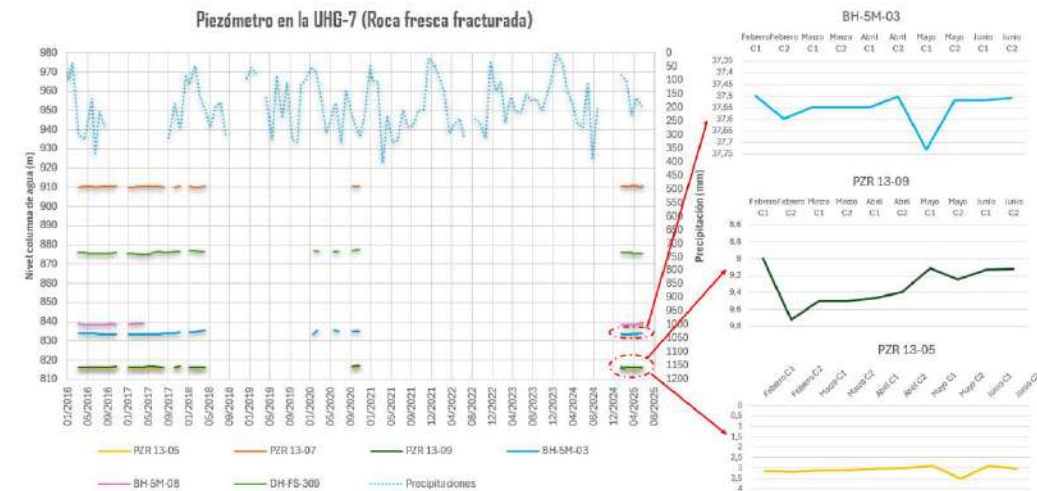


Figura 5.1.6.65 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-7 – Roca fresca fracturada. Piezómetros BH-5M-03, PZR 13-09 y PZR 13-05

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI, (2025) y Gramalote_Groundwater Level_Data 06-2021

El monitoreo de niveles piezométricos realizado entre febrero y agosto de 2025 evidencia una estabilidad general en los niveles, con variaciones mínimas entre campañas. No obstante, se identificó que las variaciones puntuales en el punto PZ4 son transitorios, ya que los registros en la campaña 10 demuestra que la columna de agua vuelve a su profundidad habitual. Estos cambios repentinos, aunque aislados, resaltan la importancia de mantener un monitoreo continuo y detallado para detectar posibles alteraciones en el sistema acuífero, ya sea por causas naturales o antrópicas. (SHI, 2025).

La comparación entre los niveles piezométricos registrados durante las campañas de 2025 y los eventos de precipitación sugiere que el sistema hidrogeológico presenta un comportamiento mayormente estable frente a variaciones climáticas. A pesar de su naturaleza heterogénea y anisotrópica, evidenciada por la amplia variabilidad en los niveles estáticos, la respuesta general del acuífero ante la lluvia ha sido leve, con fluctuaciones menores a 1 m. Solo un punto, como PZ4, presentaron cambios atípicos que requieren seguimiento. En conjunto, los resultados respaldan la necesidad de continuar con el monitoreo periódico para confirmar estas tendencias y comprender mejor la dinámica del flujo subterráneo bajo distintos escenarios hidrológicos. (SHI, 2025).

b. Mapa piezométrico y direcciones de flujo

La configuración de la red de flujo se determinó a partir de los piezómetros de la red de monitoreo dentro del área de influencia abiótica, dado que son los puntos con mayor número de mediciones. Para la interpolación se empleó la técnica “Spline with Barriers”; la cuál interpola una superficie ráster, utilizando barreras, mediante la técnica de curvatura mínima. La Figura 5.1.6.66 y el mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISOP muestra la red de flujo generada.

El agua subterránea se desplaza en la dirección de mayor a menor nivel piezométrico, las líneas de flujo son perpendiculares a las líneas equipotenciales en los medios isótropos como se puede observar en la Figura 5.1.6.66 . En términos generales, la dirección de flujo en la zona oeste del área de influencia abiótica va de sur a norte, descargando en el río Nus; mientras que en la zona este sigue una dirección este-oeste, paralela con el curso del río Nus.

En la zona central hacia el norte del área de influencia abiótica se observa una variación en las isopiezas que podría estar relacionada con condiciones locales no completamente caracterizadas, lo que sugiere que la interpolación podría no representar con total precisión el comportamiento real.

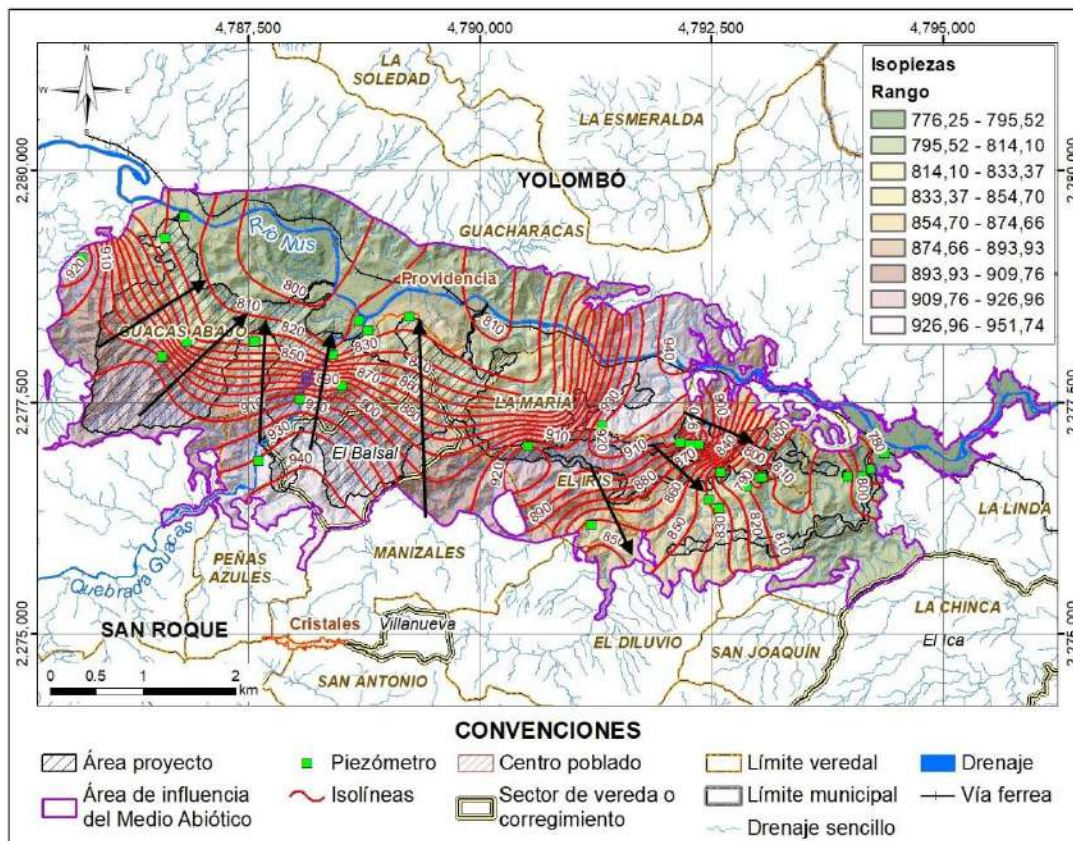


Figura 5.1.6.66 Mapa de isopiezas

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.3 Evaluación hidráulica

En el área de interés, se han realizado ensayos hidráulicos para determinar los parámetros hidrogeológicos de las unidades hidrogeológicas, entre los que se cuenta con ensayos Slug, Lefranc, Lugeon y pruebas de bombeo. El mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-PERF presenta el compilado de la evaluación hidráulica ejecutada en el proyecto.

5.1.6.3.1 Pruebas de permeabilidad

Las pruebas de permeabilidad realizadas en campo corresponden a ensayos de tipo slug, Lefranc y Lugeon.

A. Pruebas tipo slug en piezómetros GEOSUB y PERFOTEC, 2012

Para este tipo de pruebas se presentan los ensayos realizados por las empresas GEOSUB y PERFOTEC en los meses de mayo y julio del año 2012.

El cálculo de la permeabilidad o conductividad hidráulica en las unidades hidrogeológicas del área se determina en varios casos mediante pruebas Slug Falling head. Esta prueba se lleva cabo si el volumen extraído con un bayler, (1 litro), es inferior al 10% del volumen

almacenado en el piezómetro, se adiciona agua al piezómetro, generando un ascenso en el nivel de agua, y se toman los datos de recuperación hasta que se alcanza nuevamente el nivel estático.

En la Tabla 5.1.6.27 y Figura 5.1.6.67 se muestran los piezómetros en los cuales se llevaron a cabo las pruebas.

Tabla 5.1.6.27 Pruebas Slug en piezómetros. GEOSUB y PERFOTEC, 2012

Id piezómetro	Coordenadas		Prof (m)	Diámetro (pulg)	Total, filtros (m)	Tipo de prueba	Unidad captada
	Este	Norte					
PZS-12-03	4.789.070,11	2.278.069,81	60	2	35	Slug Falling Head	Saprolito
PZS-12-05	4.793.423,93	2.276.372,13	38	2	20	Slug Falling Head	Saprolito
PZS-12-12	4.787.949,01	2.277.838,28	13	4	6	Slug Falling Head	Saprolito
PZR-12-02	4.787.949,01	2.277.842,28	46	2	9	Slug Falling Head	Roca Ígnea
PZR-12-03*	4.790.234,36	2.277.442,54	66,7	2	13	Slug Falling Head	Roca Ígnea
PZR-12-08*	4.791.765,39	2.276.305,68	56,4	2	22	Slug Falling Head	Roca Ígnea

Nota: Los piezómetros con () indican que, durante la campaña de campo de inventario de puntos de agua llevada a cabo entre enero y febrero del año 2025, no fueron encontrados.

Fuente: Modificado de Integral S.A., (2018)

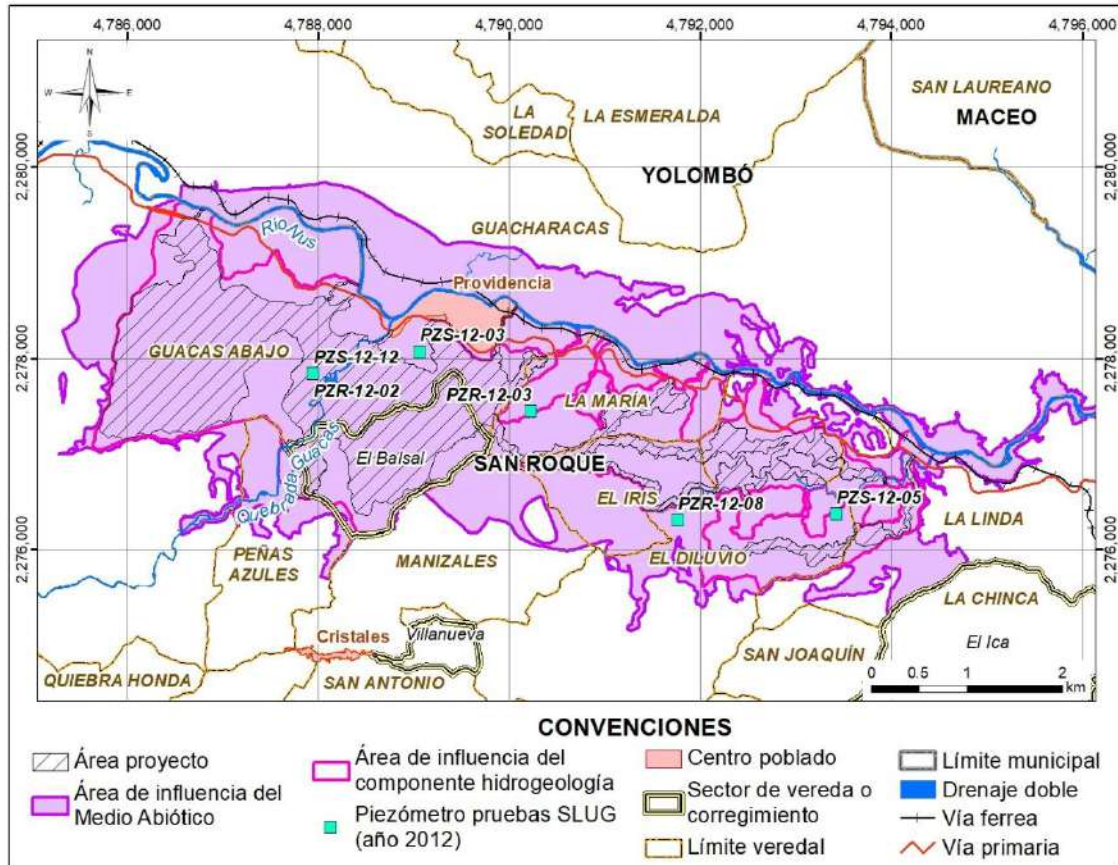


Figura 5.1.6.67 Distribución espacial de los piezómetros en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Slug – GEOSUB y PERFOTEC 2012

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de Integral S.A., 2018

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas slug llevadas a cabo:

En la Tabla 5.1.6.28 se muestra el resumen de las pruebas Slug realizadas y los resultados de conductividad hidráulica obtenidos.

Tabla 5.1.6.28 Resumen pruebas Slug en las UHG-5 y UHG-7

Identificación	Profundidad (m)	Tipo de prueba	Tiempo de prueba	Nivel estático (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	UHG
PZS-12-03	60,0	Slug Falling Head	256	44,7	2,08E-03	UHG-5 – Saprolito arenoso
PZS-12-05	38,0	Slug Falling Head	327	27,8	1,20E-03	UHG-5 – Saprolito arenoso
PZS-12-12	13,0	Slug Falling Head	108	4,2	3,01E-02	UHG-5 – Saprolito arenoso
PZR-12-02	46,0	Slug Falling Head	92	3,72	1,44E-02	UHG-7 – Roca fresca fracturada
PZR-12-03	66,7	Slug Falling Head	250	39,48	3,86E-02	UHG-7 – Roca fresca fracturada
PZR-12-08	56,4	Slug Falling Head	109	19,24	3,17E-02	UHG-7 – Roca fresca fracturada

Fuente: Modificado de Integral S.A., (2018)

B. Pruebas de tipo Lefranc y Lugeon, 2012 y 2013

En el año 2012 y 2013, dentro de la investigación geotécnica en las áreas de las diferentes facilidades mineras del proyecto, se realizaron pruebas hidráulicas tipo Falling Head Test (Lefranc) y ensayos Lugeon (ensayos Packer) en el saprolito y en la roca respectivamente, con el fin de estimar la conductividad hidráulica de estas unidades.

En la Tabla 5.1.6.29 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de la conductividad hidráulica. Y la localización espacial de los pozos donde se efectuaron los ensayos se muestran en la Figura 5.1.6.68.

Tabla 5.1.6.29 Resultados pruebas Lefranc y Lugeon, 2012 y 2013

Perforación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo Superior (m)	Tramo ensayo Inferior (m)	Longitud (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	Conductividad hidráulica (m/s)
BH-01	4.790.522,57	2.277.026,38	Lefranc	suelo residual	3,5	5	1,5	3,02E-01	3,50E-06
BH-01	4.790.522,57	2.277.026,38	Lefranc	saprolito	8,7	10	1,3	8,04E-02	9,31E-07
BH-01	4.790.522,57	2.277.026,38	Lefranc	saprolito	13,5	15	1,5	1,73E-02	2,00E-07
BH-01	4.790.522,57	2.277.026,38	Lugeon	tonalita	46,25	50,15	3,9	1,47E-01	1,70E-06
BH-2-1	4.789.033,24	2.277.118,05	Lefranc	suelo residual	3,5	5	1,5	1,04E-01	1,20E-06
BH-2-1	4.789.033,24	2.277.118,05	Lefranc	saprolito	8,5	10	1,5	2,07E-01	2,40E-06
BH-2-1	4.789.033,24	2.277.118,05	Lefranc	saprolito	13,2	15	1,8	1,12E-01	1,30E-06
BH-2-1	4.789.033,24	2.277.118,05	Lugeon	quarzodiorita	35,63	40,3	4,67	7,43E-02	8,60E-07
BH-5M-01	4.789.872,30	2.277.228,02	Lefranc	saprolito	7,4	8	0,6	8,04E-02	9,31E-07
BH-5M-01	4.789.872,30	2.277.228,02	Lugeon	quarzodiorita	37	40,1	3,1	5,44E-03	6,30E-08
BH-5M-03	4.790.577,00	2.277.496,00	Lefranc	suelo residual	8,1	9,6	1,5	2,85E-02	3,30E-07
BH-5M-03	4.790.577,00	2.277.496,00	Lefranc	suelo residual	13,9	15,9	2	3,02E-02	3,50E-07
BH-5M-03	4.790.577,00	2.277.496,00	Lugeon	tonalita	42,5	48,5	6	2,16E-01	2,50E-06
BH-5M-03	4.790.577,00	2.277.496,00	Lugeon	tonalita	46,6	50	3,4	8,29E-03	9,59E-08
BH-5M-08	4.790.827,00	2.277.484,00	Lefranc	saprolito	20,3	21,6	1,3	2,68E-02	3,10E-07
BH-5M-08	4.790.827,00	2.277.484,00	Lugeon	quarzodiorita	50,3	54,3	4	5,36E-03	6,20E-08
BH-5M-08	4.790.827,00	2.277.484,00	Lugeon	quarzodiorita	53,7	56,9	3,2	1,15E-01	1,33E-06
DH-TM-01	4.792.603,32	2.276.750,88	Lefranc	suelo residual-saprolito	0,4	2,65	2,25	6,05E-02	7,00E-07
DH-TM-01	4.792.603,32	2.276.750,88	Lefranc	saprolito-saprock	9	17	8	3,46E-02	4,00E-07
DH-TM-01	4.792.603,32	2.276.750,88	Lugeon	tonalita	52,6	56,6	4	1,47E-02	1,70E-07
DH-TM-01	4.792.603,32	2.276.750,88	Lugeon	tonalita	57,7	65	7,3	7,78E-03	9,00E-08

Perforación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo Superior (m)	Tramo ensayo Inferior (m)	Longitud (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	Conductividad hidráulica (m/s)
DH-TM-02	4.792.586,14	2.276.355,58	Lefranc	suelo residual-saprolito	3,2	5,6	2,4	5,18E-01	6,00E-06
DH-TM-02	4.792.586,14	2.276.355,58	Lefranc	saprolito	7,2	10,8	3,6	4,32E-01	5,00E-06
DH-TM-02	4.792.586,14	2.276.355,58	Lugeon	tonalita	32,9	37,5	4,6	8,64E-04	1,00E-08
DH-TM-02	4.792.586,14	2.276.355,58	Lugeon	tonalita	38,3	45,5	7,2	8,64E-04	1,00E-08
DH-TM-03	4.793.387,38	2.276.723,32	Lefranc	suelo residual	0	7	7	8,64E-03	1,00E-07
DH-TM-03	4.793.387,38	2.276.723,32	Lefranc	saprock	8,5	17	8,5	1,73E-02	2,00E-07
DH-TM-03	4.793.387,38	2.276.723,32	Lugeon	tonalita	33	39	6	2,25E-03	2,60E-08
DH-TM-03	4.793.387,38	2.276.723,32	Lugeon	tonalita	42,9	49,9	7	1,47E-02	1,70E-07
DH-TM-04	4.791.234,97	2.277.217,36	Lefranc	suelo residual-saprolito	0	7,5	7,5	4,32E-03	5,00E-08
DH-TM-04	4.791.234,97	2.277.217,36	Lefranc	saprock	7	14,4	7,4	7,78E-02	9,00E-07
DH-TM-04	4.791.234,97	2.277.217,36	Lugeon	tonalita	42,5	46,5	4	2,07E-02	2,40E-07
DH-TM-04	4.791.234,97	2.277.217,36	Lugeon	tonalita	46,5	50,4	3,9	2,33E-02	2,70E-07
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lefranc	suelo residual	0,3	6,8	6,5	1,73E-02	2,00E-07
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lefranc	suelo residual	5,2	15,6	10,4	2,59E-02	3,00E-07
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	39	43	4	4,41E-03	5,10E-08
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	43	47	4	7,95E-03	9,20E-08

Perforación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo Superior (m)	Tramo ensayo Inferior (m)	Longitud (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	Conductividad hidráulica (m/s)
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	47,5	51,5	4	8,29E-03	9,59E-08
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	57	61	4	8,64E-04	1,00E-08
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	67,5	71,5	4	1,38E-02	1,60E-07
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	70,5	74,5	4	1,30E-02	1,50E-07
DH-TM-100	4.793.025,14	2.276.684,86	Lefranc	aluvial-saprolito	0	7,2	7,2	2,59E-02	3,00E-07
DH-TM-100	4.793.025,14	2.276.684,86	Lugeon	tonalita	13,1	17,1	4		
DH-TM-100	4.793.025,14	2.276.684,86	Lugeon	tonalita	16,7	21,9	5,2	9,50E-02	1,10E-06
DH-TM-109	4.792.557,35	2.276.001,96	Lefranc	suelo residual-saprolito	0	6,2	6,2	1,73E-02	2,00E-07
DH-TM-109	4.792.557,35	2.276.001,96	Lefranc	saprolito-saprock	7,5	16,3	8,8	3,46E-03	4,00E-08
DH-TM-109	4.792.557,35	2.276.001,96	Lugeon	tonalita	16	20,7	4,7	1,12E-01	1,30E-06
DH-TM-109	4.792.557,35	2.276.001,96	Lugeon	tonalita	20,6	26,3	5,7	2,59E-01	3,00E-06
DH-TM-110	4.792.028,19	2.276.993,19	Lefranc	suelo residual	0	5	5	3,46E-03	4,00E-08
DH-TM-110	4.792.028,19	2.276.993,19	Lefranc	suelo residual-saprolito	5,4	12	6,6	1,73E-01	2,00E-06
DH-TM-110	4.792.028,19	2.276.993,19	Lugeon	tonalita	41,6	46,1	4,5	3,20E-02	3,70E-07
DH-TM-110	4.792.028,19	2.276.993,19	Lugeon	tonalita	47,6	52,3	4,7	9,50E-05	1,10E-09
DH-TM-115	4.791.211,87	2.276.181,30	Lefranc	saprock	0	5	5	2,59E-02	3,00E-07

Perforación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo Superior (m)	Tramo ensayo Inferior (m)	Longitud (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	Conductividad hidráulica (m/s)
DH-TM-115	4.791.211,87	2.276.181,30	Lugeon	tonalita	14,4	18,6	4,2	9,50E-02	1,10E-06
DH-TM-123	4.790.856,42	2.277.093,84	Lefranc	suelo residual	0	5,5	5,5	6,91E-03	8,00E-08
DH-TM-123	4.790.856,42	2.277.093,84	Lefranc	saprock	9	15	6	3,46E-02	4,00E-07
DH-TM-123	4.790.856,42	2.277.093,84	Lugeon	tonalita	26,8	31,4	4,6	1,21E-03	1,40E-08
DH-TM-123	4.790.856,42	2.277.093,84	Lugeon	tonalita	29,8	34,6	4,8	8,64E-04	1,00E-08
DH-WR-09	4.785.657,63	2.278.437,37	Lefranc	saprolito	0,4	4	3,6	3,46E-02	4,00E-07
DH-WR-09	4.785.657,63	2.278.437,37	Lefranc	saprolito-saprock	6	15	9	1,73E-02	2,00E-07
DH-WR-09	4.785.657,63	2.278.437,37	Lugeon	tonalita	29,5	35,5	6	3,54E-02	4,10E-07
DH-WR-09	4.785.657,63	2.278.437,37	Lugeon	tonalita	33,5	39,5	6	1,81E-03	2,09E-08
DH-WR-201	4.786.607,73	2.279.278,00	Lefranc	material removido	0	4,3	4,3	4,32E-02	5,00E-07
DH-WR-201	4.786.607,73	2.279.278,00	Lefranc	saprock	9,2	12,6	3,4	1,73E-02	2,00E-07
DH-WR-201	4.786.607,73	2.279.278,00	Lugeon	tonalita	25,8	28,8	3	3,46E-02	4,00E-07
DH-WR-201	4.786.607,73	2.279.278,00	Lugeon	tonalita	28,7	32,6	3,9	4,92E+01	5,69E-04
DH-WR-203	4786840,96	2.278.147,90	Lefranc	suelo residual	0	4,4	4,4	6,91E-03	8,00E-08
DH-WR-203	4786840,96	2.278.147,90	Lefranc	saprock	21	35,3	14,3	1,73E-02	2,00E-07
DH-WR-203	4786840,96	2.278.147,90	Lugeon	tonalita	42,4	46,4	4	8,64E-04	1,00E-08

Perforación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo Superior (m)	Tramo ensayo Inferior (m)	Longitud (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	Conductividad hidráulica (m/s)
DH-WR-203	4786840,96	2.278.147,90	Lugeon	tonalita	44	49	5	6,65E-03	7,70E-08
DH-WR-204	4785556,48	2.277.577,88	Lefranc	saprock	0	4,9	4,9	8,64E-03	1,00E-07
DH-WR-204	4785556,48	2.277.577,88	Lefranc	saprock	7,5	11,7	4,2	6,05E-03	7,00E-08
DH-WR-204	4785556,48	2.277.577,88	Lugeon	tonalita	21,4	25,9	4,5	3,72E-02	4,31E-07
DH-WR-204	4785556,48	2.277.577,88	Lugeon	tonalita	24,8	29	4,2	9,50E-03	1,10E-07

Fuente: Modificado de Intgral S.A., 2018

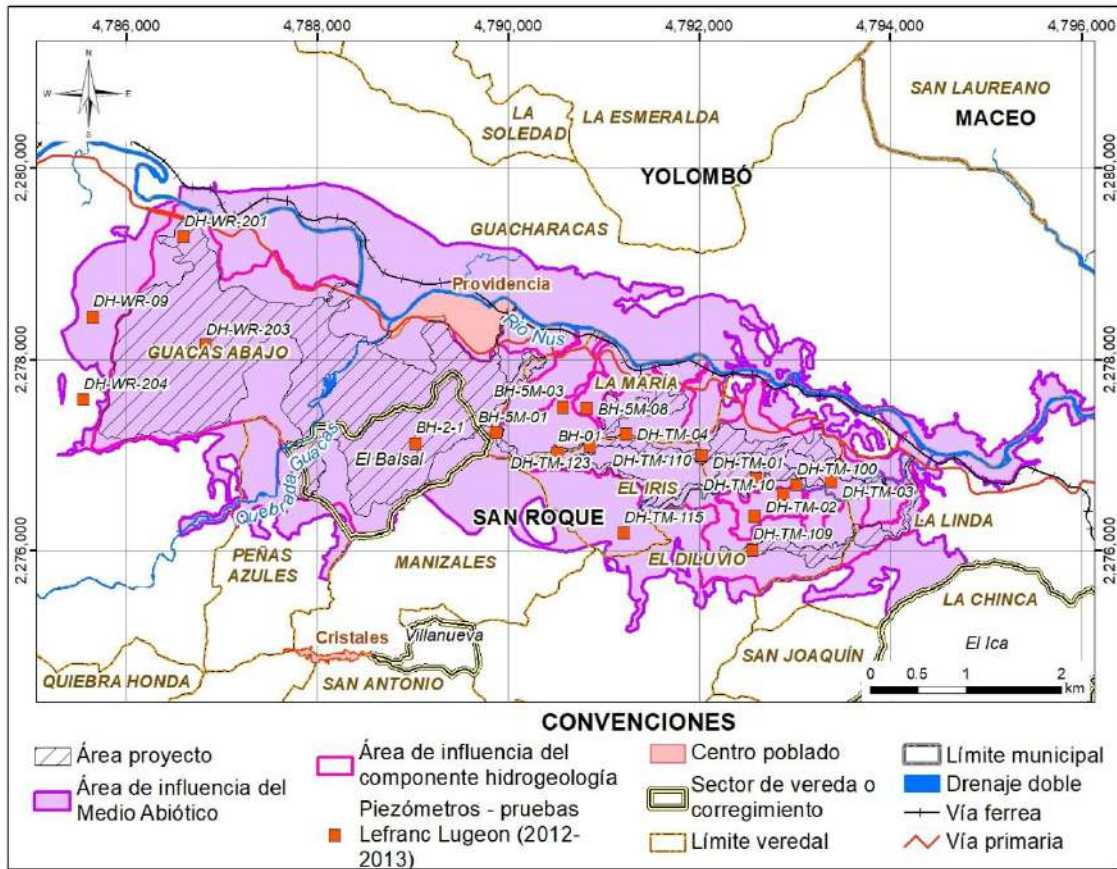


Figura 5.1.6.68 Distribución espacial de los piezómetros en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Lefranc y Lugeon – 2012 y 2013

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de Integral S.A., 2018

C. Pruebas de tipo Lefranc y Lugeon 2024-2025

Dentro de los estudios actuales de Diseño del proyecto, Geodrill llevó a cabo pruebas de tipo Lefranc y Lugeon en suelo y roca respectivamente para determinar el valor de permeabilidad de los materiales. En la Tabla 5.1.6.30 se muestra un resumen de las pruebas llevadas a cabo en las diferentes perforaciones ejecutadas y en la Figura 5.1.6.69 su ubicación espacial (Ver Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_prueperm.)

Tabla 5.1.6.30 Resultados pruebas Lefranc y Lugeon, 2024 y 2025

Perforación	Este	Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo			Conductividad hidráulica (m/s)
					Superior (m)	Inferior (m)	Longitud (m)	
PG24_006	4.789.689,62	2.277.555,77	Lefranc	Saprolito (V)	15,60	16,70	1,10	3,60E-06
PG24_010	4.789.860,08	2.277.665,12	Lefranc	Saprolito (V)	22,40	23,40	1,00	2,13E-06
PG24_010	4.789.860,08	2.277.665,12	Lugeon	Roca moderadamente meteorizada (III)	28,30	30,70	2,40	0,00E+00
PG24_009	4.789.859,89	2.277.615,11	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	8,80	10,00	1,20	4,65E-08
PG24_008	4.789.779,87	2.277.615,43	Lefranc	Saprolito (V)	17,90	19,50	1,60	3,53E-07
PG24_008	4.789.779,87	2.277.615,43	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	34,00	36,01	2,01	5,01E-08
PG24_018	4.789.689,47	2.277.515,77	Lefranc	Saprolito (V)	13,20	13,80	0,60	6,87E-08
PG24_018	4.789.689,47	2.277.515,77	Lugeon	Roca fresca meteorizada (I)	38,17	39,17	1,00	2,76E-07
PG24_013	4.789.689,62	2.277.555,77	Lefranc	Saprolito (V)	13,40	15,10	1,70	4,43E-06
PG24_013	4.789.689,62	2.277.555,77	Lefranc	Saprolito (V)	23,20	24,10	0,90	8,33E-07
PG24_013	4.789.689,62	2.277.555,77	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	57,05	59,20	2,15	3,93E-08
PG25_017	4.789.629,46	2.277.516,01	Lefranc	Saprolito (V)	28,20	29,50	1,30	6,12E-06
PG25_017	4.789.629,46	2.277.516,01	Lefranc	Saprolito (V) - Transición (IV)	34,20	35,00	0,80	6,84E-06
PG25_017	4.789.629,46	2.277.516,01	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II) - Roca fresca (I)	38,50	41,00	2,50	4,65E-08
PG25_012	4.789.629,62	2.277.556,01	Lefranc	Saprolito (V)	13,20	15,00	1,80	3,80E-06

Perforación	Este	Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo			Conductividad hidráulica (m/s)
					Superior (m)	Inferior (m)	Longitud (m)	
PG25_012	4.789.629,62	2.277.556,01	Lefranc	Saprolito (V)	23,70	25,00	1,30	6,98E-07
PG25_012	4.789.629,62	2.277.556,01	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	37,63	40,73	3,10	2,97E-09
PG25_016	4.789.569,45	2.277.516,24	Lefranc	Saprolito (V)	29,70	31,00	1,30	2,74E-06
PG25_016	4.789.569,45	2.277.516,24	Lefranc	Saprolito (V)	34,20	36,00	1,80	1,01E-05
PG25_016	4.789.569,45	2.277.516,24	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	41,51	45,11	3,60	0,00E+00
PG25_011	4.789.569,45	2.277.516,24	Lefranc	Saprolito (V)	28,20	30,00	1,80	2,03E-06
PG25_019B	4.789.542,10	2.277.465,48	Lefranc	Saprolito (V)	14,50	16,00	1,50	2,07E-06
PG25_019B	4.789.542,10	2.277.465,48	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	34,20	37,25	3,05	9,88E-09
PG25_020	4.789.629,30	2.277.476,00	Lefranc	Saprolito (V)	8,70	10,00	1,30	2,58E-06
PG25_020	4.789.629,30	2.277.476,00	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	21,65	25,15	3,50	1,22E-08
PG25_015B	4.789.424,63	2.277.574,15	Lefranc	Saprolito (V)	9,00	10,00	1,00	8,48E-06
PG25_015B	4.789.424,63	2.277.574,15	Lefranc	Saprolito (V)	19,00	20,00	1,00	4,86E-07
PG25_015B	4.789.424,63	2.277.574,15	Lugeon	Roca fresca (I)	30,58	33,08	2,50	0,00E+00
PG25_021	4.789.689,31	2.277.475,76	Lefranc	Depósito aluvial (Ambiente lagunar)	1,50	2,00	0,50	3,97E-06
PG25_021	4.789.689,31	2.277.475,76	Lugeon	Roca fresca (I)	13,00	15,00	2,00	3,93E-08
PG25_003B	4.789.419,24	2.277.658,54	Lefranc	Saprolito (V)	9,00	10,00	1,00	7,44E-06
PG25_026	4.789.665,51	2.277.457,18	Lefranc	Saprolito (V)	11,1	11,90	0,80	4,07E-06
PG25_026	4.789.665,51	2.277.457,18	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	20,07	22,35	2,28	Red de r

Perforación	Este	Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo			Conductividad hidráulica (m/s)
					Superior (m)	Inferior (m)	Longitud (m)	
PG25_001B	4.789.270,14	2.277.510,62	Lefranc	Saprolito (V)	12,20	13,20	1,00	3,16E-06
PG25_001B	4.789.270,14	2.277.510,62	Lefranc	Saprolito (V)	33,35	34,35	1,00	1,01E-04
PG25_001B	4.789.270,14	2.277.510,62	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	41,15	43,15	2,00	8,13E-08
PG25_025	4.789.637,93	2.277.394,52	Lefranc	Saprolito (V)	14,00	15,00	1,00	4,19E-05
PG25_025	4.789.637,93	2.277.394,52	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	32,00	34,00	2,00	3,93E-08
PG25_004B	4.789.710,13	2.277.540,32	Lefranc	Saprolito (V)	4,7	5,50	0,80	1,63E-05
TG25-BH-01	4.788.905,07	2.277.197,28	Lefranc	Material arenoso con fracciones de finos	4,1	5,1	1,00	4,3E-06
TG25-BH-01	4.788.905,07	2.277.197,28	Lugeon	Roca	13,05	15,05	2,00	9,88E-09
TG25-BH-02	4.788.811,42	2.277.086,19	Lefranc	Grano grueso con limos y arcilla en tramos puntuales	5,25	6,25	1,00	2,20E-03
TG25-BH-02	4.788.811,42	2.277.086,19	Lugeon	Roca	22,8	25	2,2	0,00E+00
TG25-BH-02	4.788.811,42	2.277.086,19	Lefranc	Grano grueso con limos y arcilla en tramos puntuales	10,1	11,1	1,00	2,21E-05
TG25-BH-03	4.788.747,33	2.277.052,4	Lefranc	Material compuesto por Bloques y arenas	5,5	6,5	1,00	5,73E-06
TG25-BH-05	4.788.672.64	2.277.086.24	Lugeon	Roca	8,5	10,4	1,5	0,00E+00
TG25-BH-07	4.789.121,66	2.277.181,09	Lefranc	Material arenoso con fracciones de finos	6,05	7,05	1,00	1,88E-05
TG25-BH-07	4.789.121,66	2.277.181,09	Lugeon	Roca	22,9	23,9	1,00	4,50E-09

Perforación	Este	Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo			Conductividad hidráulica (m/s)
					Superior (m)	Inferior (m)	Longitud (m)	
TG25-BH-06	4.788.860,42	2.276.866,77	Lefranc	Material arenoso con fracciones de finos	4,25	5,25	1,00	5,43E-06
TG25-BH-04	4.788.987,02	2.277.015,23	Lefranc	Material arenoso y bloques de roca	8,2	9,2	1,00	1,43E-05
TG25-BH-04	4.788.987,02	2.277.015,23	Lugeon	Roca	11,45	13,45	2,00	0,00E+00
TG25-BH-08-01	4.792.718,51	2.276.652,72	Lefranc	Intercalación de material arenoso y arcillo-limoso	4,30	5,30	1,00	3,45E-07
TG25-BH-08-02	4.792.718,51	2.276.652,72	Lefranc	Material arenoso con fracciones de finos	8,55	10,05	1,50	4,97E-07
TG25-BH-08-03	4.792.718,51	2.276.652,72	Lefranc	Zona de transición y roca muy fracturada	13,95	15,10	1,15	2,29E-08
TG25-BH-08A-01	4.792.718,77	2.276.653,74	Lefranc	Material compuesto por arcillas y limos	0,20	1,50	1,30	5,33E-07
TG25-BH-08A-02	4.792.718,77	2.276.653,74	Lefranc	Material compuesto por arcillas y limos	1,7	3,00	1,30	4,80E-07
TG25-BH-09-01	4.792.840,66	2.276.745,09	Lefranc	Material compuesto por finos con fracciones de arena	7,95	9,45	1,50	9,99E-08
TG25-BH-09-02	4.792.840,66	2.276.745,09	Lefranc	Material compuesto por arenas	20,05	21,05	1,00	1,34E-04
TG25-BH-10-01	4.792.959,4	2.276.672,57	Lefranc	Material compuesto por finos con	2,6	3,6	1,00	3,44E-07

Perforación	Este	Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo			Conductividad hidráulica (m/s)
					Superior (m)	Inferior (m)	Longitud (m)	
				fracciones de arena				
TG25-BH-10-02	4.792.959,40	2.2766.72,57	Lefranc	Material compuesto por arenas	8,85	10,9	2,05	2,50E-07
TG25-BH-09	4.792.840,66	2.276.745,09	Lugeon	Roca	29,74	31,74	2,00	4,47E-05

Fuente: Fuente: Integral S.A., 2025 a partir anexos de ensayos de permeabilidad Geodrill (Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_prueperm)

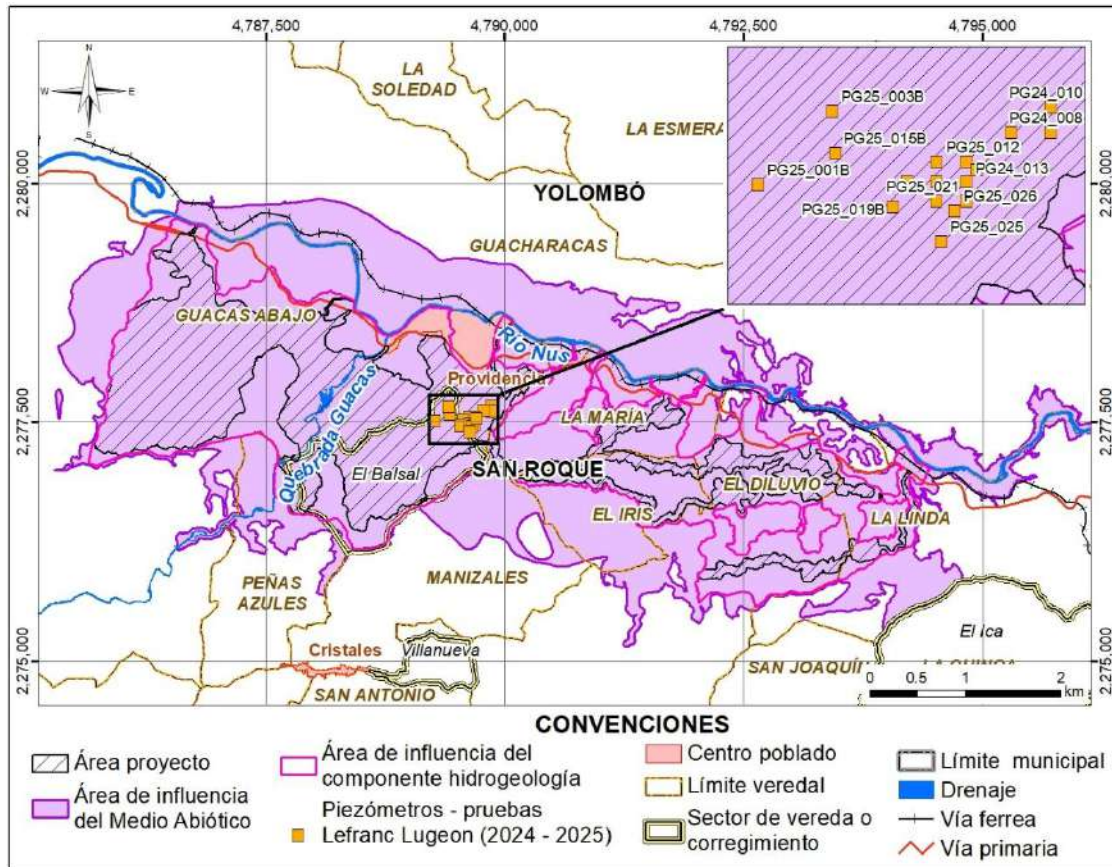


Figura 5.1.6.69 Distribución espacial de las perforaciones en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Lefranc y Lugeon – 2024 - 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir anexos de ensayos de permeabilidad Geodrill

5.1.6.3.2 Pruebas de Bombeo, GEOSUB 2012

En el año 2012 GEOSUB llevó a cabo la construcción de los pozos de bombeo y piezómetros que se muestran en la Tabla 5.1.6.31 y Figura 5.1.6.70.

Tabla 5.1.6.31 Resumen de los pozos de bombeo con pruebas a caudal constante, GEOSUB 2012

Id	Localiz.	Coordenadas		Prof. (m)	Diámetro (pulg)	Total filtros (m)	Tipo de prueba	Unidad captada
		Este	Norte					
POZO PZA-12-01	Margen Izquierda Q. La Colorada	4.790.072, 72	2.277.586, 84	9	4	6	Constante Y Recuperación	Depósito de Terraza Q. La Colorada
POZO PZA-12-03	Desembocadura Q. Guacas al R. Nus	4.789.070, 11	2.278.069, 81	9	4	6	Constante Y Recuperación	Depósito de Terraza Q. Guacas
POZO PZA-12-06	La Estrella	4.787.563, 80	2.278.148, 99	7,5	4	3	Constante Y Recuperación	Depósito de Terraza Q. San Antonio
POZO PZA-12-08	Sector El Banco	4.787.193, 17	2.279.194, 42	6	4	4,5	Constante Y Recuperación	Depósito de Terraza R. Nus
POZO PZS-12-10	Finca La Estrella	4.791.794, 25	2.276.246, 64	8,5	4	6	Constante Y Recuperación	Saprolito
POZO PZS-12-11	Sector San Antonio	4.786.086, 58	2.278.740, 95	14	4	6	Constante Y Recuperación	Saprolito
POZO PZS-12-14	Providencia	4.789.617, 00	2.278.108, 62	9	4	6	Constante Y Recuperación	Saprolito

Fuente: Modificado de Integral S.A., 2018

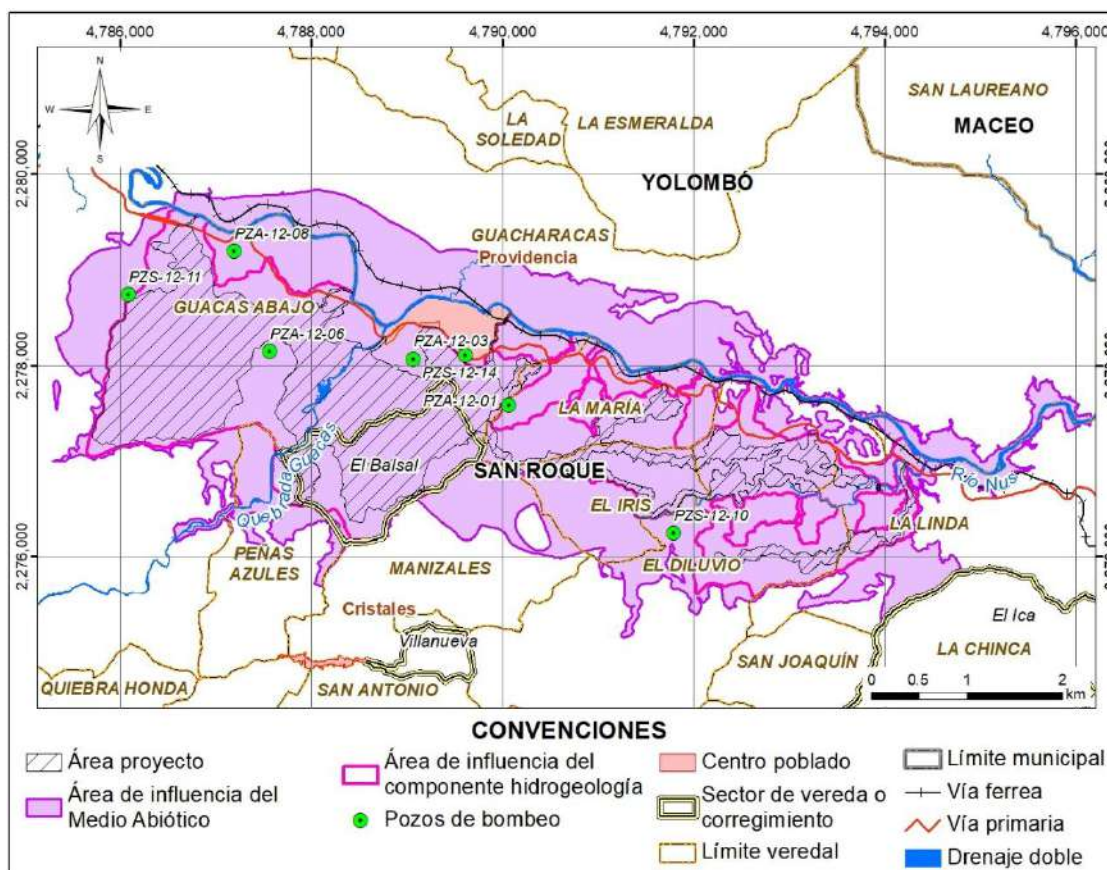


Figura 5.1.6.70 Distribución espacial de los puntos donde se llevaron a cabo las pruebas de bombeo – GEOSUB 2012

Fuente: Integral S.A., a partir de Integral S.A., 2018

Los resultados de las pruebas de bombeo se presentan en la Tabla 5.1.6.32 hasta la Tabla 5.1.6.38

Tabla 5.1.6.32 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-01 y el piezómetro PZA-12-01-1

Identificador	Piezómetro				Promedio
	PZA 12-01 -1	PZA 12-01 -1	Pozo PZA 12-01	PZA 12-01 -1	
Tipo de prueba	Caudal Constante (Sector Confinado)	Caudal Constante (Sector Libre)	Recuperación	Recuperación	
Caudal (l/s)	0,40	0,40	0,40	0,40	
Tiempo prueba (min)	720	720	60	60	

Identificador	Piezómetro				Promedio
	PZA 12-01 -1	PZA 12-01 -1	Pozo PZA 12-01	PZA 12-01 -1	
Método de interpretación	Neuman	Neuman	Theis Recovery	Theis Recovery	
T (m ² /día)	15,60	14,20	24,40	20,30	20,0
S		2,65 E-01			2,65E-01
K. real (m/día)	2,60	2,37	4,07	3,39	3,0
Porosidad eficaz (%)		0,26			0,26

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.33 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-03 y el piezómetro PZA-12-03-1

Captación	Piezómetro PZA 12-03 -1	Piezómetro PZA 12-03 -1	Pozo PZA 12-03	PROMEDIO
Aparato o medida de nivel	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	
Tipo de prueba	Caudal Constante (Sector Confinado)	Caudal Constante (Sector Libre)	Recuperac,	
Caudal (l/s)	0,26	0,26	0,26	
Tiempo de prueba(min)	720	720	300	
Método de interpretación	Neuman	Neuman	Theis Recovery	
T (m ² /día)	59,2	63,40	63,20	60,0
S		3,01 E-01		3,01E-01
K. real (m/día)	9,87	10,60	10,50	10,0
Porosidad eficaz (%)		0,30		0,30

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.34 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-06 y el piezómetro PZA-12-06-1

Captación	Piezómetro PZA 12-06 -1	Piezómetro PZA 12-06 -1	Pozo PZA 12-06	Piezómetro PZA 12-06-1	Promedio
Aparato o medida de nivel	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	
Tipo de prueba	Caudal Constante (Sector Confinado)	Caudal Constante (Sector Libre)	Recuperación	Recuperación	
Caudal (l/s)	0,20	0,20	0,20	0,20	
Tiempo de prueba(min)	1440	1440	60	60	
Método de interpretación	Neuman	Neuman	Theis Recovery	Theis Recovery	
T (m ² /día)	24,40	22,20	23,40	24,50	23,6
S	1,86 E-01	1,74 E-01			1,80 E-01
K. real (m/día)	8,13	7,42	7,79	8,17	7,85
Porosidad eficaz (%)	0,18	0,17			0,17

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.35 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-08 y el piezómetro PZA-12-08-1

Captación	Aparto de medida de nivel	Tipo de prueba	Caudal	Tiempo de prueba	Método de interpretación	T (m ² /día)	S	K. Real	Resistencia hidráulica	Porosidad eficaz (%)
			(l/s)	(min)				(m/día)	(min)	
Pozo PZA12-08	Sonda Eléctrica	Caudal Constante	0,86	720	Walton	48,8	1,09 E-03	10,9	6,64 E+3	
Piezómetro PZA12-08 - 1	Sonda Eléctrica	Caudal Constante (Sector Confinado)	0,86	720	Neuman	58		13		
Piezómetro PZA 12-08 -1	Sonda Eléctrica	Caudal Constante (Sector Libre)	0,86	720	Neuman	49,9	1,31 E-01	11,1		0,13
Pozo PZA 12-08	Sonda Eléctrica	Recuperac.	0,86	420	Theis Recovery	60,3		13,4		
Promedio						54	1,31 E-01	12	6,64 E+3	0,13

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.36 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZS-12-10

Captación	Pozo PZS 12-10	Pozo PZS 12-10	Pozo PZS 12-10	Promedio
Aparato medida de nivel	Diver	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	
Tipo de prueba	Caudal Constante	Caudal Constante	Recuperación	
Caudal (l/s)	0,1	0,1	0,1	
Tiempo prueba (min)	480	480	60	
Método de interpretación	Theis	Theis	Theis Recovery	
T (m ² /día)	3,63	3,49	2,5	3,2
S	1,44 E-05	2,29 E-05		1,86 E-05
K. Real (m/día)	0,6	0,58	0,41	0,52

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.37 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA 12-11 y el piezómetro PZS-12-11-1

Captación	Piezómetro PZA 12-11 -1	Pozo PZA 12-11	Pozo PZA 12-11	Piezómetro PZA 12-11 -1	Promedio
Aparato medida de nivel	Sonda Eléctrica	Diver	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	
Tipo de prueba	Caudal Constante	Recuperación	Recuperación	Recuperación	
Caudal (l/s)	0,19	0,19	0,19	0,19	
Tiempo prueba (min)	720	720	720	720	
Método de interpretación	Theis	Theis Recovery	Theis Recovery	Theis Recovery	
T (m ² /día)	92,4	83	84,6	85,7	86,5
S	9,80 E -04				9,80E -04
K. Real (m/día)	15,4	13,8	14,1	14,3	14,5

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.38 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZS-12-14 y el piezómetro PZS-12-14-1

Captación	Piezómetro PZS 12-14 -1	Piezómetro PZS 12-14 -1	Pozo PZS12-14	Piezómetro PZS 12-14 -1	Promedio
Aparato Medida del Nivel	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	
Tipo de prueba	Caudal Constante (Sector Confinado)	Caudal Constante (Sector Libre)	Recuperación	Recuperación	
Caudal (l/s)	0,17	0,17	0,17	0,17	
Tiempo de prueba(min)	720	720	120	120	
Método de interpretación	Neuman	Neuman	TheisRecovery	TheisRecovery	
T (m ² /día)	52,8	44,9	44,5	53,2	48
S		1,09 E-01			1,0 E-01
K. Real (m/día)	4,8	4,09	4,05	4,84	4,45
Resistencia hidráulica (min)		0,1			0,1

Fuente: Integral S.A., 2018

5.1.6.3.3 Resumen de resultados de valores de conductividad hidráulica

Para caracterizar las propiedades hidráulicas de las unidades geológicas en la zona de estudio, se recopiló información proveniente de pruebas hidráulicas orientadas a estimar la conductividad hidráulica (K) de los materiales presentes. Estas pruebas fueron desarrolladas por Hidrogeocol (2012), Knight Piésold (2013), Golder (2013) y Gramalote (2016), y se encuentran consignadas en los informes técnicos de Gramalote (2018) y Golder (2020). Adicionalmente, se dispone de información más reciente proveniente de los ensayos realizados por Geodrill S.A.S. en 2025.

En el marco del plan minero se proyecta el desarrollo de 13 zonas de disposición de material. Para estos depósitos, se ha estimado una conductividad hidráulica entre 8,6 y 8,6E-2 m/día (INTEGRAL S.A., 2025), basada en la granulometría y el tipo de material que se prevé disponer, compuesto principalmente por limos con arenas limosas y arcillosas (SHI SAS, 2026).

Hidrogeocol (2012) reportaron seis pruebas de bombeo realizadas en piezómetros instalados en diferentes depósitos de terrazas aluviales del río Nus y de las quebradas Guacas, San Antonio y La Colorada. Estas pruebas arrojaron una conductividad hidráulica promedio de 10,1 m/día para esta unidad.

También se cuenta con datos de seis pruebas slug realizadas en el horizonte de suelo residual del Batolito Antioqueño, y siete pruebas de bombeo ejecutadas en el saprolito de esta misma unidad, también reportadas por Hidrogeocol (2012). Los valores promedio obtenidos fueron de 4,53E-03 m/ día para el suelo residual y 6,96 m/día para el saprolito (SHI SAS, 2026).

En estudios posteriores, se han realizado pruebas hidráulicas de tipo Lefranc y pruebas de infiltración en las unidades de depósitos aluviales, suelo residual y saprolito. Estos ensayos son de corta duración y permiten evaluar la capacidad de infiltración de la capa superficial (zona vadosa), y la permeabilidad de los materiales de forma local, a diferencia de las pruebas de bombeo y slug, en las que se observa la variación del nivel del agua durante varias horas o incluso días, permitiendo evaluar la conductividad hidráulica de la unidad de interés a una escala más regional. Por esta razón, se decide priorizar los valores obtenidos mediante pruebas de bombeo y slug para estas unidades, al considerarse más representativos del comportamiento hidrogeológico a gran escala (SHI SAS, 2026).

En 2025, Geodrill S.A.S. desarrolló pruebas hidráulicas alrededor de la zona de planta de beneficio, enfocadas principalmente en la caracterización de las unidades de saprolito y roca mediante ensayos Lefranc y Lugeon, respectivamente. Se realizaron dos ensayos Lefranc en la zona de transición (horizontes IC-IIA), con un valor promedio de conductividad hidráulica de 0,39 m/día; un ensayo Lefranc en el horizonte de roca moderadamente meteorizada que arrojó un valor de 0,195 m/día; y once ensayos Lugeon en horizontes de roca sana a levemente meteorizada, los cuales arrojaron un valor promedio de 0,0029 m/día. Adicionalmente se cuenta con el resultado de un ensayo Lefranc realizado en depósitos coluviales que presentó un valor de 0,343 m/día. La Tabla 5.1.6.39 resume las propiedades hidráulicas de las diferentes unidades analizadas.

Tabla 5.1.6.39 Resumen de parámetros hidráulicos de las unidades de la zona de estudio

Litología	Horizonte		Conductividad Hidráulica (m/día)			Número de ensayos
	BS 5930	Deere y Patton	Max	Min	Media Geom.	
Depósitos antrópicos (ZODMES)	-	-	8,64	8,64E-02	0,864	-
Depósitos coluviales y de flujo	-	-	-	-	0,343	1
Depósitos aluviales	-	-	45,0	3,0	10,1	6
Suelo residual	VI	IB	0,03	0,001	0,0045	6
Saprolito	V	IC	50,0	0,52	6,96	7
Zona de transición	IV	IC-IIA	4,48	0,073	0,57	2
Roca moderadamente meteorizada	III	IIA	-	-	0,195	1
Roca sana y levemente meteorizada	II y I	IIB y III	0,007	0,00026	0,0029	4

Fuente: (SHI SAS, 2026) partir de Hidrogeocol (2012) y Geodrill (2025)

5.1.6.4 Evaluación hidrogeoquímica e isotópica

5.1.6.4.1 Red de monitoreo hidrogeoquímico e isotópico

La red de monitoreo para el MEIA en el año 2025 consiste en 37 puntos que se presentan en la Tabla 5.1.6.40. En la columna 3 se presenta el tipo de punto al que pertenece.

La red de monitoreo tuvo en cuenta los puntos que se han monitoreado en campañas anteriores en otras fases del proyecto. En la Figura 5.1.6.71 se presenta la distribución de estos.

Tabla 5.1.6.40 Red de monitoreo hidrogeoquímico e isotópico

Nombre del punto	Unidad geológica	Profundidad (m)	Tipo de Punto	Magna Sirgas – Origen Nacional		Elevación (msnm.)
				Este (m)	Norte (m)	
Reservorio artificial La Mayoría	Saprolito	NA	Reservorio artificial	4.789.186,43	2.278.003,58	822,16
Aljibe La Mayoría	Saprolito	3,7	Aljibe	4.789.157,00	2.278.274,00	819,82
M18	Saprolito	NA	Manantial	4.785.026,00	2.279.282,00	860,62
M20	Saprolito	NA	Manantial	4.784.820,00	2.279.262,00	894,31
M87	Saprolito	NA	Manantial	4.791.172,47	2.277.086,67	901,56
M118	Saprolito	NA	Manantial	4.790.870,00	2.277.586,00	838,83
M121	Saprolito	NA	Manantial	4.790.623,00	2.277.240,00	846,63
M189	Transición suelo – roca	NA	Manantial	4.791.361,59	2.277.365,17	862,80
M242	Depósito de vertiente	NA	Manantial	4.787.071,94	2.278.639,06	845,98
M233	Saprolito	NA	Manantial	4.788.618,36	2.276.912,66	897,24
M100	Suelo residual	NA	Manantial	4.788.591,86	2.276.281,66	1.073,01
M195	Suelo residual	NA	Manantial	4.785.309,35	2.278.313,99	887,67
M215	Saprolito	NA	Manantial	4.785.857,12	2.277.220,63	1.037,33
M222	Depósito de vertiente	NA	Manantial	4.792.247,91	2.277.167,34	889,34
PZA12-03	Depósito aluvial	9,5	Piezómetro	4.788.695,00	2.278.385,00	819,16
PZA12-08	Depósito aluvial	7,0	Piezómetro	4.786.818,00	2.279.510,00	819,30
PZS12-12	Saprolito	13,0	Piezómetro	4.785.710,98	2.279.056,64	833,94
PZS12-14	Saprolito	9,9	Piezómetro	4.789.241,20	2.278.423,32	818,42
PZR 13-05	Roca	151,0	Piezómetro	4.788.795,74	2.278.273,32	818,03
PZR 13-07	Roca	150,0	Piezómetro	4.788.059,71	2.277.532,15	914,16
PZR 13-09	Roca	150,0	Piezómetro	4.788.416,71	2.278.012,22	824,66
PZS 13-17	Saprolito	15,2	Piezómetro	4.788.803,74	2.278.276,30	818,00

Nombre del punto	Unidad geológica	Profundidad (m)	Tipo de Punto	Magna Sirgas – Origen Nacional		Elevación (msnm.)
				Este (m)	Norte (m)	
DH-FS-309	Roca	42,0	Piezómetro	4.792.271,49	2.277.047,34	916,16
DH-FS-315	Roca	24,6	Piezómetro	4.794.134,26	2.276.696,50	808,75
DH-TM-100	Roca	21,9	Piezómetro	4.793.025,14	2.276.684,86	814,11
BH-5M-03	Roca	50,0	Piezómetro	4.790.577,00	2.277.496,00	872,01
BH-5M-08	Roca	56,9	Piezómetro	4.790.827,00	2.277.484,00	866,39
PZS 12-05	Saprolito	39,0	Piezómetro	4.794.234,12	2.276.778,46	832,46
PZ4	Saprolito – Zona de transición	38,0	Piezómetro	4.791.328,00	2.277.254,00	939,09
Totalizado r 1 La Mayoría	NA	NA	Lluvia	4.789.134,00	2.278.266,00	836,00
Totalizado r 2 Manizales	NA	NA	Lluvia	4.789.432,00	2.275.309,00	1.260,00
Totalizado r 3 La Bella	NA	NA	Lluvia	4.782.560,00	2.277.999,00	1.301,00
Quebrada Palestina	NA	NA	Agua Superficial	4.794.124,00	2.276.916,00	841,00
Quebrada Topacio	NA	NA	Agua Superficial	4.785.448,00	2.280.030,00	836,00
Quebrada San Antonio	NA	NA	Agua Superficial	4.788.129,00	2.278.624,00	844,00
Quebrada El Balsal	NA	NA	Agua Superficial	4.789.274,00	2.277.710,00	856,00
Quebrada El Banco	NA	NA	Agua Superficial	4.786.606,00	2.278.560,00	878,00

*La columna número corresponde a las etiquetas en la Figura 5.1.6.71

Fuente: Integral S.A., 2025

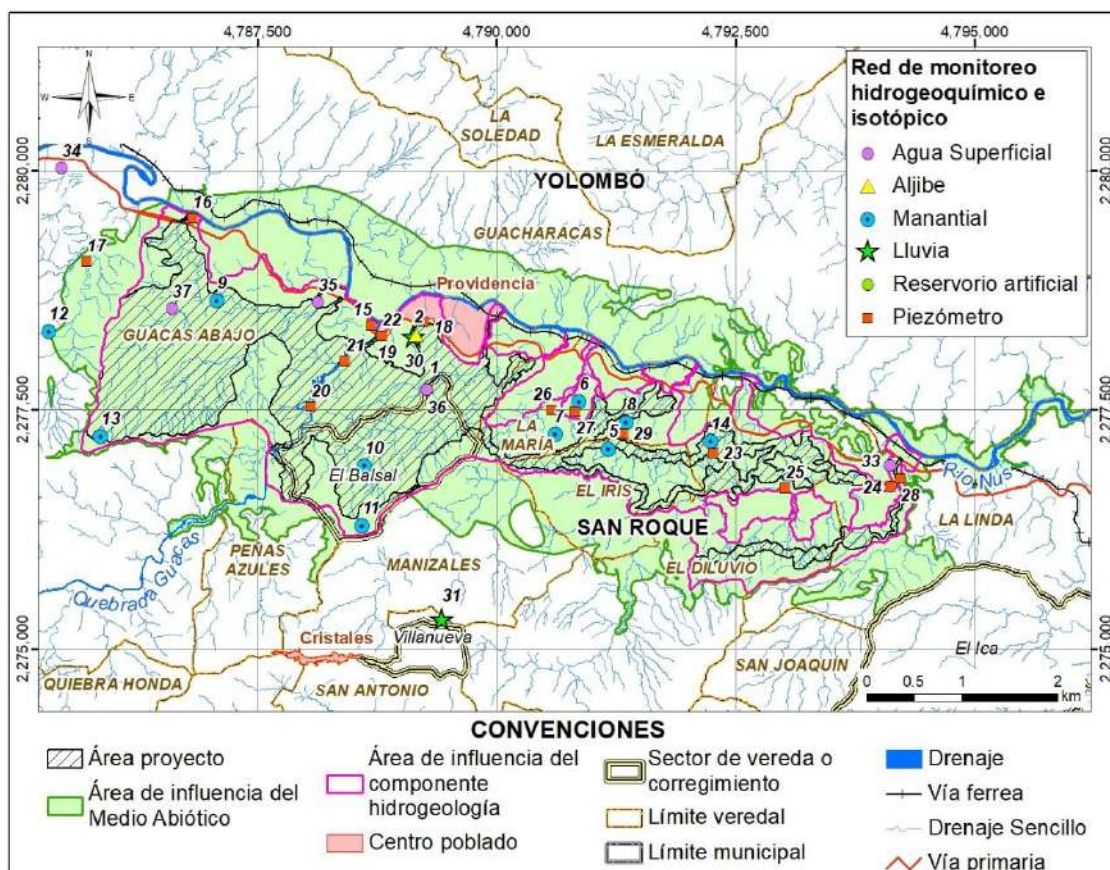


Figura 5.1.6.71 Puntos de la red de Monitoreo

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.4.2 Parámetros fisicoquímicos

La medición de parámetros in situ de los puntos de la red de monitoreo, como el pH y la conductividad eléctrica, es esencial para entender el comportamiento de las aguas subterráneas y los valores necesarios para los análisis isotópicos e hidroquímicos. Estos valores pueden proporcionar información sobre las condiciones fisicoquímicas del sistema hidrogeológico, reflejando procesos de interacción agua-roca, posibles influencias antrópicas y la dinámica del flujo subterráneo. Así mismo, contribuyen a la identificación de fuentes potenciales de contaminación y permiten inferir el origen y evolución del agua dentro del sistema hidrogeológico.

En el Anexos_Caracterización_Hidrogeologia_AXO_Hidrogeo_e_isotopia se presentan los resultados de los laboratorios de las campañas realizadas.

A. Metodologías medición de parámetros de campo

a. pH

El principio básico de la medida electrométrica del pH es la determinación de la actividad de los iones hidrógeno por medición potenciométrica, usando un electrodo estándar de

hidrógeno y un electrodo de referencia. La fuerza electromotriz (FEM) producida sobre el vidrio del electrodo varía linealmente con el pH. Esta relación lineal es descrita graficando la FEM medida contra el pH de diferentes sustancias buffers. El pH de la muestra es determinado por extrapolación.

El valor de pH se midió siguiendo el procedimiento 4500-H⁺ B (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2023) utilizando una sonda tipo PHC301 marca HACH.

b. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es el inverso de la resistencia específica, y se expresa en micromho por centímetro ($\mu\text{mho/cm}$), equivalentes a microsiemens por centímetro ($\mu\text{S/cm}$) en el Sistema Internacional de Unidades. La conductividad, k , es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transportar la corriente eléctrica. Esta habilidad depende de la presencia de iones; de su concentración total, movilidad, y valencia; y de la temperatura de la medición. Soluciones cuya composición es en mayor parte de compuestos inorgánicos son relativamente buenas conductoras. Consecuentemente, moléculas de compuestos orgánicos que no se disocian en solución acuosa conducen muy pobremente la corriente eléctrica.

La conductividad eléctrica se midió siguiendo el procedimiento 2510 B (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2023) utilizando una sonda tipo CDC301 marca HACH.

c. Temperatura

Las sondas de pH (PHP-301), conductividad eléctrica (CDC301) y oxígeno disuelto (LDO101) cuentan con sensor de temperatura incorporado con resolución de medida, $0,1^{\circ}\text{C}$, sin embargo, cada sensor cuenta con un rango de medición distinto.

La temperatura se midió siguiendo el procedimiento 2550 B (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2023) y el valor reportado es el del sensor de la sonda de pH. Periódicamente se prueba la desviación de los dispositivos contra una referencia certificada como estrategia de control de calidad.

SHI S.A.S realizó 4 campañas, una cada mes entre febrero y mayo de 2025.

B. Medición de parámetros fisicoquímicos

a. Campaña 1

A continuación, se presentan los resultados de la campaña de los parámetros fisicoquímicos medidos en estos puntos entre el 4 de febrero y 20 de febrero de 2025, debido a que aportan información adicional para comprender las interacciones entre la precipitación y las fuentes de agua superficiales y subterránea.

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo se presentan en la Tabla 5.1.6.41.

Tabla 5.1.6.41 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 1

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[µS/cm]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	10/2/2025	24,9	6,43	72,2
Aljibe La Mayoría	Aljibe	10/2/2025	27,4	6,57	85,8
M18	Manantial	4/2/2025	24,9	7,28	75,7
M20	Manantial	4/2/2025	23,5	7,27	75,2
M87	Manantial	13/02/2025	24,6	7,06	177,3
M118	Manantial	12/2/2025	24,2	6,60	154,8
M121	Manantial	11/2/2025	25,1	7,61	151,8
M189	Manantial	13/02/2025	22,2	7,02	176,7
M242	Manantial	10/2/2025	22,9	6,58	58,9
M233	Manantial	9/2/2025	23,1	6,57	62,5
M100	Manantial	9/2/2025	22,7	6,03	104
M195	Manantial	5/2/2025	El punto de muestreo se encuentra seco		
M215	Manantial	5/2/2025	23,5	6,88	91,5
M222	Manantial	11/2/2025	23,2	6,59	133,8
PZA12-03	Piezómetro	11/2/2025	25,1	6,31	57,9
PZA12-08	Piezómetro	7/2/2025	28,1	6,36	214,2
PZS12-12	Piezómetro	7/2/2025	28,7	6,40	242
PZS12-14	Piezómetro	14/02/2025	27,5	5,97	128,3
PZR 13-05	Piezómetro	14/02/2025	25,1	7,51	229
PZR 13-07	Piezómetro	18/02/2025	24,7	7,81	283
PZR 13-09	Piezómetro	12/2/2025	25,7	6,77	221
PZS 13-17	Piezómetro	10/2/2025	28,7	6,28	72,3
DH-FS-309	Piezómetro	20/02/2025	23,3	6,40	197,4
DH-FS-315	Piezómetro	13/02/2025	26,7	6,47	170,7
DH-TM-100	Piezómetro	18/02/2025	26,9	6,51	160,1
BH-5M-03	Piezómetro	19/02/2025	26,3	7,06	254
BH-5M-08	Piezómetro	19/02/2025	26,6	6,96	256
PZS 12-05	Piezómetro	14/02/2025	26,7	6,77	150,1
PZ4	Piezómetro	20/02/2025	23,4	6,36	176
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/02/2025	27,1	6,47	23,6
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/02/2025	24,3	6,58	27,9

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[µS/cm]
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/02/2025	23,9	6,45	37,8
Quebrada Palestina	Agua Superficial	11/2/2025	25,6	7,96	128,5
Quebrada Topacio	Agua Superficial	6/2/2025	34,8	7,16	91,3
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	7/2/2025	28,4	7,20	89,4
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	9/2/2025	23,5	7,74	226
Quebrada El Banco	Agua Superficial	6/2/2025	26,8	7,21	93,5

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Se resalta que el manantial M195 no presentaba flujo de agua al momento del muestreo.

La temperatura del agua en los puntos de muestreo (Figura 5.1.6.72) varía entre 22,2 y 34,8 °C, con valores que reflejan la influencia de las condiciones meteorológicas al momento del muestreo. En el caso de los puntos de agua subterránea estos valores se pueden asociar con sistemas hidrogeológicos superficiales y poco profundos, donde la temperatura del agua puede verse afectada por la interacción con la radiación solar.

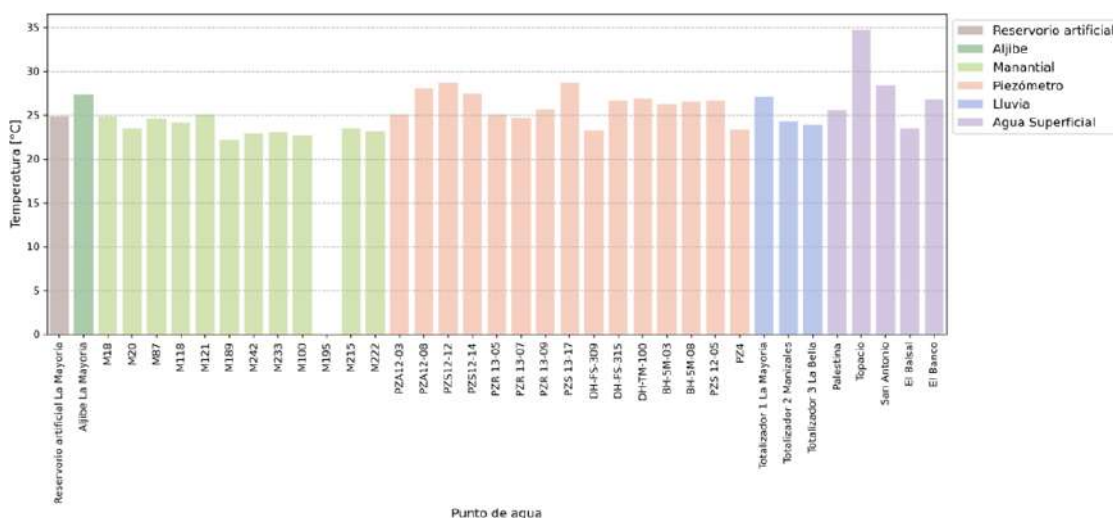


Figura 5.1.6.72 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El pH registrado (Figura 5.1.6.73) oscila entre 5,97 y 7,96 unidades de pH, lo que indica un carácter ligeramente ácido a ligeramente alcalino. Estos valores son característicos de

sistemas hidrogeológicos donde el agua mantiene una interacción moderada con materiales orgánicos y minerales, sin evidencias claras de procesos intensos de acidificación.

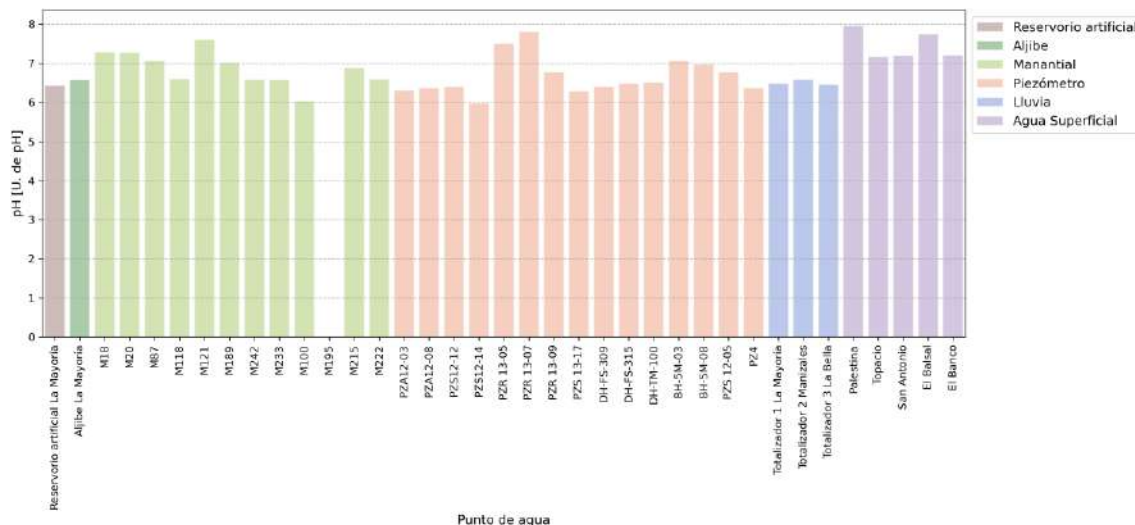


Figura 5.1.6.73 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 1

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Al considerar la conductividad eléctrica (Figura 5.1.6.74), se puede evidenciar que el agua recolectada en los totalizadores presenta los valores más bajos de este parámetro, con un rango entre 23,6 y 37,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que es característico de este tipo de aguas. Por su parte, los puntos de aguas superficiales exhiben una mayor variabilidad, con valores entre 89,4 y 226 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo la quebrada El Balsal el punto con la conductividad eléctrica más alta, entre todas las aguas superficiales.

El reservorio artificial La Mayoría presenta una conductividad eléctrica de 72,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que sugiere una mineralización baja y una posible influencia de aguas de recarga reciente.

Los manantiales presentan valores de conductividad eléctrica bajo, los cuales varían entre 58,9 y 177,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los cuales indican un grado de mineralización muy bajo a bajo, asociado a poco tiempo de residencia en el medio subterráneo.

En los piezómetros y aljibe la conductividad eléctrica registrada es ligeramente más alta respecto a los manantiales, variando entre 57,9 – 283 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo, la mayoría de estos puntos se caracterizan por valores entre 100 – 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, asociados a un grado de mineralización bajo a medio. Los valores más elevados se registran en los piezómetros PZR 13-07 (283 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y PZS12-12 (242 $\mu\text{S}/\text{cm}$), los cuales podrían estar captando aguas con mayor tiempo de residencia o con interacción con materiales más solubles. Por otro lado, valores bajos, como en PZS 13-17 (72,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y en el aljibe La Mayoría (85,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indican aguas menos mineralizadas, posiblemente de recarga reciente.

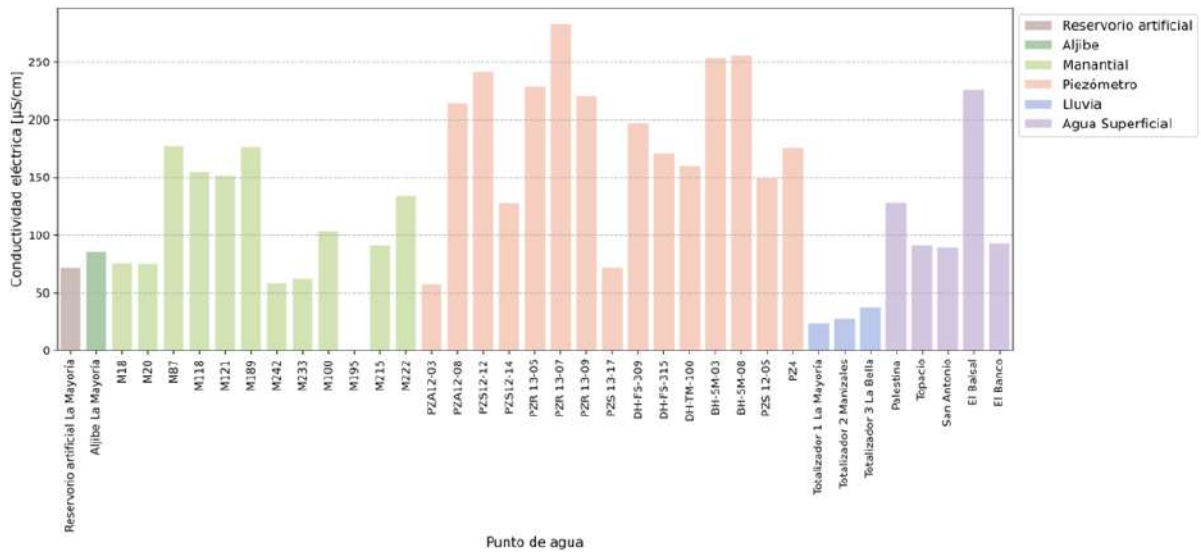


Figura 5.1.6.74 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1

Fuente: SHI S.A.S, 2025

b. Campaña 2

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la segunda campaña de medición de parámetros fisicoquímicos, realizada entre el 10 y el 16 de marzo de 2025, los cuales ofrecen datos adicionales para comprender las interacciones entre la precipitación y las fuentes de agua superficiales y subterráneas. Los resultados de estas mediciones de campo se detallan en la Tabla 5.1.6.42.

Tabla 5.1.6.42 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 2

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[µS/cm]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	11/3/2025	23,8	6,41	75,8
Aljibe La Mayoría	Aljibe	11/3/2025	23,6	6,63	79,7
M18	Manantial	11/3/2025	22,9	7,30	81,1
M20	Manantial	11/3/2025	23,2	7,39	87,4
M87	Manantial	16/03/2025	24,6	7,01	171,1
M118	Manantial	14/03/2025	24,9	6,86	154,8
M121	Manantial	14/03/2025	26,5	7,84	143,3
M189	Manantial	15/03/2025	22,7	7,27	171,5
M242	Manantial	13/03/2025	22,0	6,81	60,7
M233	Manantial	13/03/2025	25,1	7,17	62,1

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[μS/cm]
M100	Manantial	14/03/2025	23,2	6,36	99,9
M195	Manantial	15/03/2025	26,4	6,63	69,9
M215	Manantial	11/3/2025	21,9	6,91	95,7
M222	Manantial	15/03/2025	23,3	5,63	130,3
PZA12-03	Piezómetro	10/03/2025	26,4	6,35	88,7
PZA12-08	Piezómetro	10/3/2025	27,1	6,42	214,9
PZS12-12	Piezómetro	10/3/2025	27,7	6,67	149,8
PZS12-14	Piezómetro	23/03/2025	26,8	5,92	113,1
PZR 13-05	Piezómetro	10/3/2025	25,5	7,31	264,0
PZR 13-07	Piezómetro	13/03/2025	24,0	7,75	318,0
PZR 13-09	Piezómetro	13/03/2025	25,5	6,50	202,0
PZS 13-17	Piezómetro	15/03/2025	26,0	6,12	79,6
DH-FS-309	Piezómetro	15/03/2025	25,6	6,72	185,5
DH-FS-315	Piezómetro	13/03/2025	25,5	6,65	186,5
DH-TM-100	Piezómetro	13/03/2025	26,1	6,37	163,6
BH-5M-03	Piezómetro	14/03/2025	23,8	6,64	106,5
BH-5M-08	Piezómetro	14/03/2025	25,8	7,19	222,0
PZS 12-05	Piezómetro	15/03/2025	25,6	6,59	130,8
PZ4	Piezómetro	15/03/2025	26,4	6,57	169,7
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/03/2025	27,2	6,38	11,17
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/03/2025	24,7	6,86	15,22
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/03/2025	25,1	6,97	6,87
Quebrada Palestina	Agua Superficial	15/03/2025	27,3	7,85	137,7
Quebrada Topacio	Agua Superficial	10/3/2025	29,2	7,32	84,6
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	10/3/2025	28,9	7,29	88,2
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	13/03/2025	27,1	7,92	277,0
Quebrada El Banco	Agua Superficial	11/3/2025	23,8	6,41	75,8

Fuente: SHI S.A.S, 2025

La temperatura del agua en los puntos de muestreo (Figura 5.1.6.75) oscila entre 21,9 y 29,2 °C, es importante destacar que, los valores dependen de las condiciones climáticas presentes durante el muestreo. En los puntos de agua subterránea, estos rangos de

temperatura pueden estar relacionados con sistemas hidrogeológicos superficiales y poco profundos, donde la temperatura del agua se ve influenciada por la interacción con la radiación solar. Adicionalmente, el valor más alto lo sigue registrando la quebrada el Topacio (29,2 °C), aunque en comparación con la campaña anterior registra una disminución considerable.

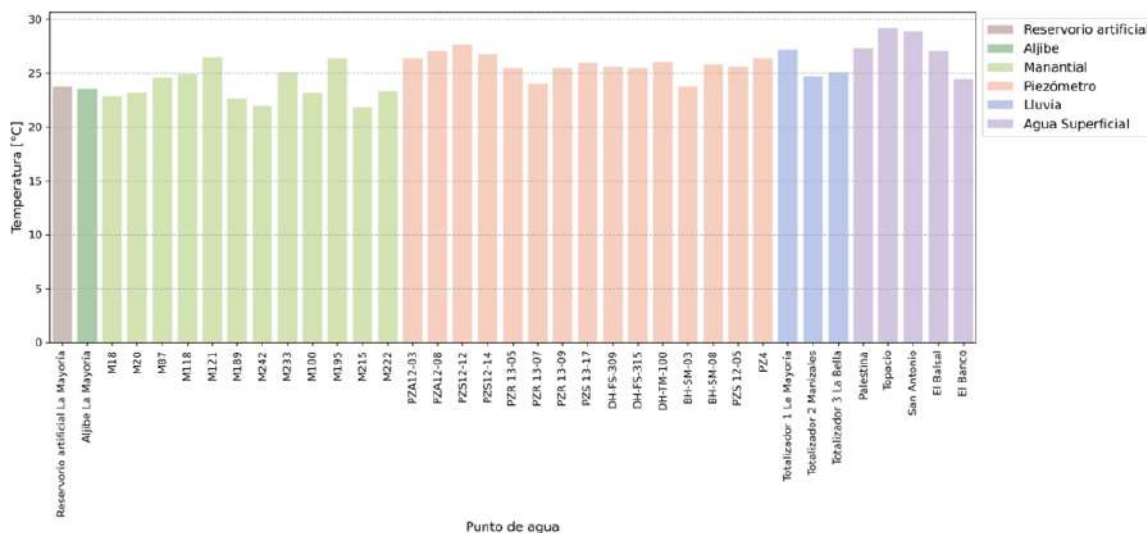


Figura 5.1.6.75 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El pH observado (Figura 5.1.6.76) varía entre 5,63 y 7,92 unidades, lo que sugiere un carácter que va de ligeramente ácido a ligeramente alcalino. Al igual que la campaña anterior, estos valores son típicos de sistemas hidrogeológicos en los que el agua presenta una interacción moderada con materiales orgánicos y minerales, sin mostrar indicios evidentes de procesos de acidificación intensos.

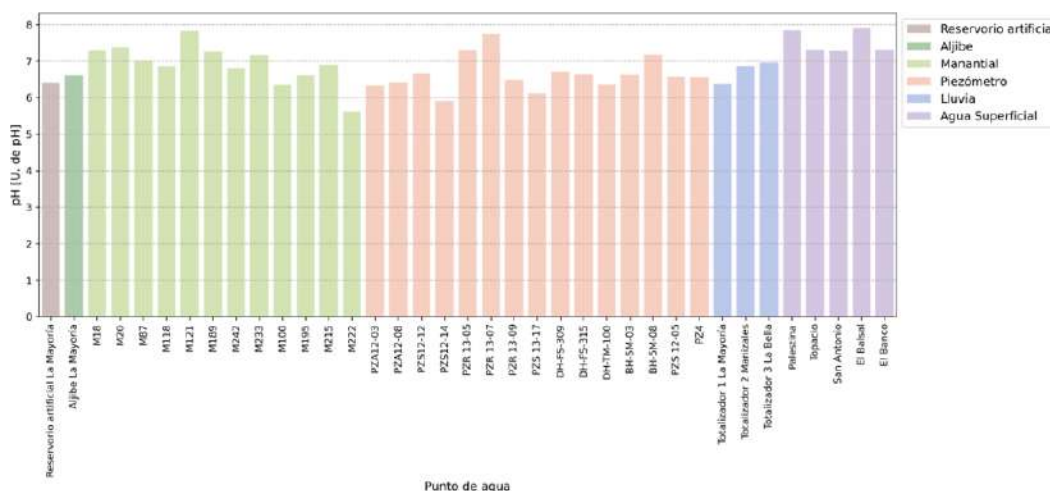


Figura 5.1.6.76 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 2

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Los resultados de conductividad eléctrica (Figura 5.1.6.77), permite confirmar un comportamiento similar a la campaña anterior, en donde el agua recolectada en los totalizadores presenta los valores más bajos de este parámetro, con un rango entre 6,87 y 15,22 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que es característico de este tipo de aguas. Por su parte, los puntos de aguas superficiales exhiben una mayor variabilidad, con valores entre 75,8 y 277 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo la quebrada El Balsal el punto con la conductividad eléctrica más. El reservorio artificial La Mayoría y la quebrada el Banco presentan una conductividad eléctrica de 75,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que sugiere una mineralización baja y una posible influencia de aguas de recarga recientemente.

Los manantiales presentan valores de conductividad eléctrica bajo, los cuales varían entre 60,7 y 171,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los cuales indican un grado de mineralización muy bajo a bajo, asociado a poco tiempo de residencia en el medio subterráneo.

En los piezómetros y aljibe la conductividad eléctrica registrada es ligeramente más alta respecto a los manantiales, variando entre 79,6 – 318 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo, la mayoría de estos puntos se caracterizan por valores entre 100 – 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, asociados a un grado de mineralización bajo a medio. Los valores más elevados se registran en los piezómetros PZR 13-07 (318 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y PZR 13-05 (264 $\mu\text{S}/\text{cm}$), los cuales podrían estar captando aguas con mayor tiempo de residencia o con interacción con materiales más solubles. Por otro lado, valores bajos, como en PZS 13-17 (79,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y en el aljibe La Mayoría (79,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indican aguas menos mineralizadas, posiblemente de recarga reciente.

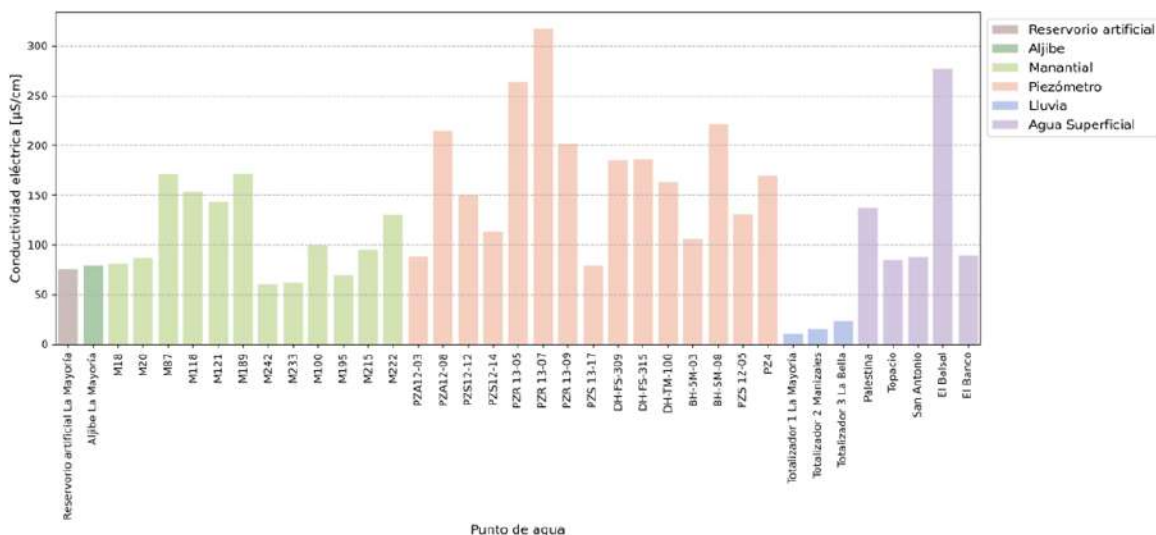


Figura 5.1.6.77 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2

Fuente: SHI S.A.S, 2025

c. Campaña 3

A continuación, se presenta los resultados obtenidos durante la tercera campaña de medición de parámetros fisicoquímicos, realizada entre el 23 y el 29 de abril de 2025, los cuales ofrecen datos adicionales para comprender las interacciones entre la precipitación y las fuentes de agua superficiales y subterráneas. Los resultados de estas mediciones de campo se detallan en la Tabla 5.1.6.43.

Cabe anotar que en esta campaña se encontró el Totalizador 2 con la caneca protectora fuera de su posición y destapada, sin agua en su interior, lo que sugiere que pudo haber sido manipulada o saqueada. Adicionalmente, en el punto M195 no se evidenciaba flujo de agua.

Tabla 5.1.6.43 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 3

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[μS/cm]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	23/04/2025	24,7	6,7	32,5
Aljibe La Mayoría	Aljibe	23/04/2025	25,3	6,79	34,7
M18	Manantial	23/04/2025	23	7,03	66,6
M20	Manantial	23/04/2025	23,1	7,03	82,6
M87	Manantial	24/04/2025	25,1	6,95	209,9
M118	Manantial	27/04/2025	24,1	6,81	142,6
M121	Manantial	27/04/2025	25	7,18	152,5
M189	Manantial	27/04/2025	24,6	7,00	182,7
M242	Manantial	26/04/2025	23,1	6,86	36
M233	Manantial	27/04/2025	23,6	7,09	56,2
M100	Manantial	26/04/2025	23,4	6,42	110,5
M195	Manantial	26/04/2025	El punto de muestreo se encuentra seco		
M215	Manantial	25/04/2025	23,3	6,79	85,1
M222	Manantial	29/04/2025	23,9	6,27	113,1
PZA12-03	Piezómetro	28/04/2025	25,3	6,41	82,7
PZA12-08	Piezómetro	28/04/2025	23,6	6,28	219
PZS12-12	Piezómetro	28/04/2025	23,5	6,26	144,6
PZS12-14	Piezómetro	28/04/2025	25,8	5,92	98,3
PZR 13-05	Piezómetro	28/04/2025	25,5	7,31	266
PZR 13-07	Piezómetro	28/04/2025	25,6	7,41	314
PZR 13-09	Piezómetro	28/04/2025	24,8	6,58	245
PZS 13-17	Piezómetro	28/04/2025	24,8	6,26	92,6
DH-FS-309	Piezómetro	29/04/2025	24,5	6,28	192,9
DH-FS-315	Piezómetro	28/04/2025	24,9	6,17	190
DH-TM-100	Piezómetro	28/04/2025	23,3	6,4	153,1
BH-5M-03	Piezómetro	29/04/2025	25,1	6,21	97
BH-5M-08	Piezómetro	29/04/2025	26,0	6,89	229
PZS-12-05	Piezómetro	28/04/2025	23,5	6,42	139,9

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[μS/cm]
PZ4	Piezómetro	29/04/2025	25,2	6,23	175,1
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	24/04/2025	27,6	6,40	7,94
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	24/04/2025	La caneca protectora estaba fuera de su posición y destapada, sin agua en su interior, posiblemente manipulada o saqueada		
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	24/04/2025	24,3	6,61	17,46
Quebrada Palestina	Agua Superficial	25/04/2025	27,2	7,47	138,2
Quebrada Topacio	Agua Superficial	23/04/2025	29,7	7,01	65,6
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	25/04/2025	30,5	6,98	88,7
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	27/04/2025	23,2	7,44	439
Quebrada El Banco	Agua Superficial	26/04/2025	23,6	7,00	84,6

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El manantial M195 no presentaba flujo de agua al momento del muestreo.

La temperatura del agua en los puntos de muestreo (Figura 5.1.6.78) oscila entre 23,0 y 30,5 °C, es importante destacar que, los valores dependen de las condiciones climáticas presentes durante el muestreo. En los puntos de agua subterránea, estos rangos de temperatura pueden estar relacionados con sistemas hidrogeológicos poco profundos, donde la temperatura del agua se ve influenciada por la interacción con la radiación solar. Adicionalmente, el valor más alto se presenta en la quebrada San Antonio (30,5 °C), registrando un aumento de aproximadamente dos grados en comparación con la anterior campaña.

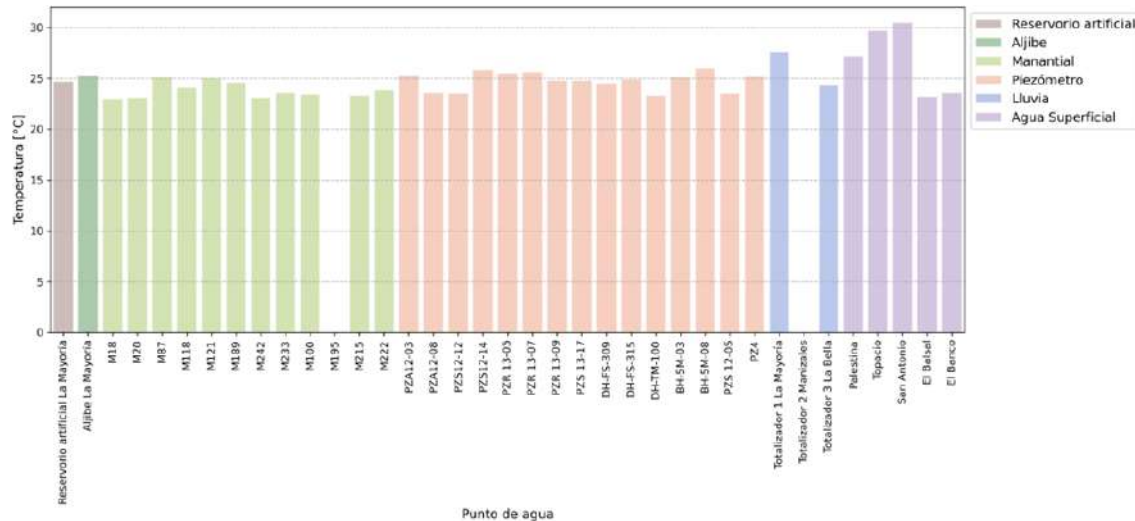


Figura 5.1.6.78 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 3

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El pH observado (Figura 5.1.6.79) varía entre 5,92 y 7,47, presentando un carácter que va de ligeramente ácido a ligeramente alcalino. Al igual que la campaña anterior, estos valores son típicos de sistemas hidrogeológicos en los que el agua presenta una interacción moderada con materiales orgánicos y minerales, sin mostrar indicios evidentes de procesos de acidificación intensos.

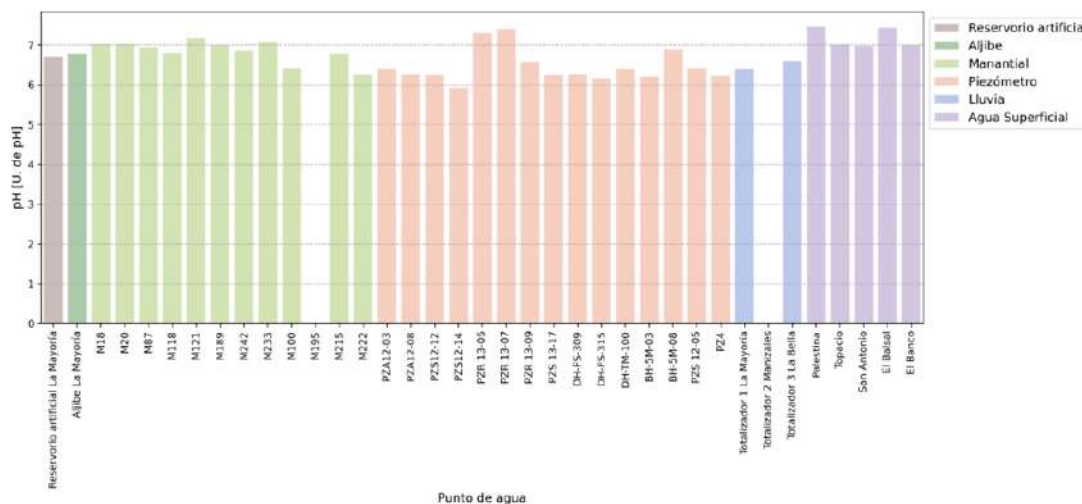


Figura 5.1.6.79 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 3. pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 3

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Los resultados de conductividad eléctrica (Figura 5.1.6.80), mantienen un comportamiento similar a la campaña anterior, en donde el agua recolectada en los totalizadores presenta los valores más bajos de este parámetro, con un rango entre 7,94 y 17,46 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que es

característico de este tipo de aguas. Por su parte, los puntos de aguas superficiales exhiben una mayor variabilidad, con valores entre 32,5 y 439 $\mu\text{S/cm}$, siendo la quebrada El Balsal el punto con la conductividad eléctrica más alta y registrando un aumento de 162 $\mu\text{S/cm}$ desde la campaña anterior. Por su parte el punto de agua superficial con menor conductividad eléctrica es el reservorio artificial La Mayoría, el cual presentan una conductividad eléctrica de 32,5 $\mu\text{S/cm}$, disminuyendo en 42,5 $\mu\text{S/cm}$ con respecto a la anterior campaña. Esto sugiere una mineralización baja y una posible influencia de aguas de recarga recientemente.

Los manantiales presentan valores de conductividad eléctrica bajo, los cuales varían entre 36,0 y 209,9 $\mu\text{S/cm}$, los cuales indican un grado de mineralización muy bajo a bajo, asociado a poco tiempo de residencia en el medio subterráneo y medio para el caso del punto M87, lo que puede sugerir un tiempo de residencia en el medio ligeramente mayor o condiciones de contaminación en el punto.

En los piezómetros y aljibe la conductividad eléctrica registrada es ligeramente más alta respecto a los manantiales, variando entre 34,7 – 314 $\mu\text{S/cm}$. Sin embargo, la mayoría de estos puntos se caracterizan por valores entre 100 – 300 $\mu\text{S/cm}$, asociados a un grado de mineralización bajo a medio. Los valores más elevados se registran en los piezómetros PZR 13-07 (314 $\mu\text{S/cm}$) y PZR 13-05 (266 $\mu\text{S/cm}$), los cuales podrían estar captando aguas con mayor tiempo de residencia o con interacción con materiales más solubles. Por otro lado, valores bajos, como en PZS 13-17 (92,6 $\mu\text{S/cm}$) y en el aljibe La Mayoría (34,7 $\mu\text{S/cm}$), indican aguas menos mineralizadas, posiblemente de recarga reciente, en especial en el último en donde se registra una disminución de 45 $\mu\text{S/cm}$ desde la anterior campaña.

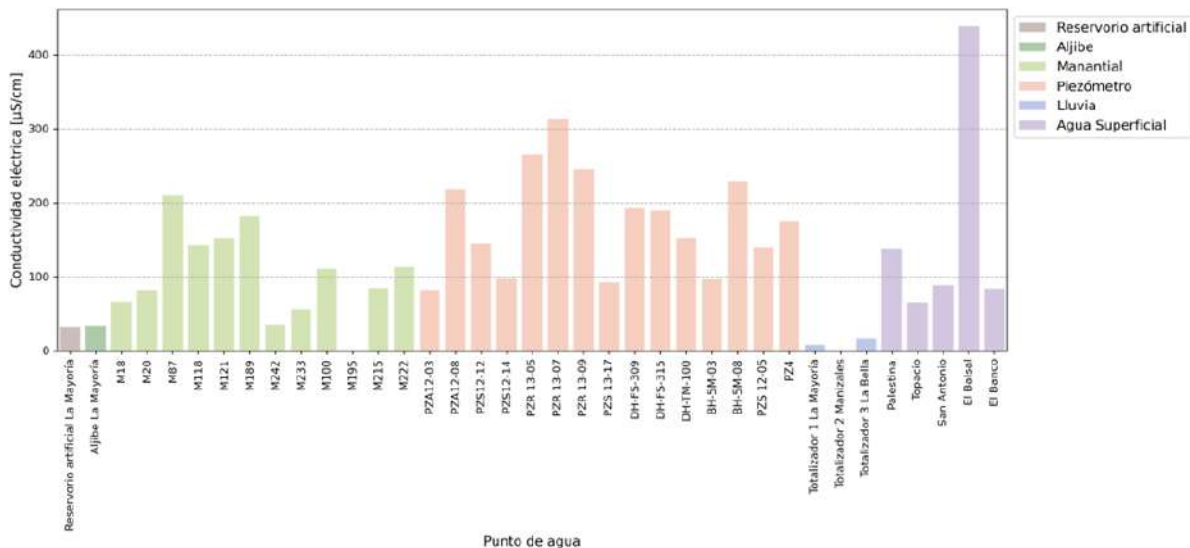


Figura 5.1.6.80 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 3

Fuente: SHI S.A.S, 2025

d. Campaña 4

Este capítulo presenta los resultados obtenidos durante la cuarta campaña de medición de parámetros fisicoquímicos, realizada entre el 4 y el 20 de mayo de 2025, los cuales ofrecen datos adicionales para comprender las interacciones entre la precipitación y las fuentes de agua superficiales y subterráneas. Los resultados de estas mediciones de campo se detallan en la Tabla 5.1.6.44. Es importante señalar que en esta campaña se encontró el manantial M195 seco, por lo cual no es posible realizar la toma de muestra y la medición de parámetros fisicoquímicos de este punto.

Tabla 5.1.6.44 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 4

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[μS/cm]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	12/5/2025	27,1	6,78	64,1
Aljibe La Mayoría	Aljibe	12/5/2025	25,4	6,52	61,4
M18	Manantial	5/5/2025	22,8	7,43	73,4
M20	Manantial	5/5/2025	23,1	7,5	73,5
M87	Manantial	19/5/2025	24,3	7,01	162,1
M118	Manantial	14/5/2025	24,1	6,97	134,8
M121	Manantial	13/5/2025	26,0	7,75	174,6
M189	Manantial	15/5/2025	24,2	7,81	140,3
M242	Manantial	9/5/2025	24,0	7,11	43,7
M233	Manantial	19/5/2025	24,2	7,42	45,5
M100	Manantial	18/5/2025	22,8	6,26	99,5
M195	Manantial	15/5/2025	El punto de muestreo se encuentra seco		
M215	Manantial	6/5/2025	22,7	6,93	70,7
M222	Manantial	16/5/2025	23,5	6,46	125,7
PZA12-03	Piezómetro	7/5/2025	24,6	6,58	74,1
PZA12-08	Piezómetro	4/5/2025	27,5	6,01	106,1
PZS12-12	Piezómetro	4/5/2025	24,6	6,48	175,9
PZS12-14	Piezómetro	12/5/2025	26,9	6,06	98,6
PZR 13-05	Piezómetro	11/5/2025	29,7	7,61	223
PZR 13-07	Piezómetro	11/5/2025	24,4	7,63	274
PZR 13-09	Piezómetro	7/5/2025	24,0	6,66	235
PZS 13-17	Piezómetro	11/5/2025	28,8	6,33	84,2
DH-FS-309	Piezómetro	16/5/2025	23,8	6,51	188,4
DH-FS-315	Piezómetro	18/5/2025	25,4	6,49	198
DH-TM-100	Piezómetro	4/5/2025	25,1	6,31	147,9

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[μS/cm]
BH-5M-03	Piezómetro	13/5/2025	24,4	6,88	164,5
BH-5M-08	Piezómetro	14/05/2025	24,4	7,22	225
PZS-12-05	Piezómetro	13/5/2025	26,7	6,6	133
PZ4	Piezómetro	15/05/2025	24,3	6,57	153
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	20/5/2025	27,5	5,66	14,69
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	20/5/2025	25,2	5,07	10,09
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	20/5/2025	23,5	5,98	8,47
Quebrada Palestina	Agua Superficial	5/5/2025	25,9	7,82	126,6
Quebrada Topacio	Agua Superficial	6/5/2025	27,8	7,33	69,6
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	8/5/2025	26,3	7,44	73,3
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	19/5/2025	22,8	7,44	151,8
Quebrada El Banco	Agua Superficial	9/5/2025	26,4	6,8	74,4

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El manantial M195 no presentaba flujo de agua al momento del muestreo.

Las temperaturas registradas en los puntos de muestreo (Figura 5.1.6.81) se encuentran en un rango de 22,7 a 29,7 °C. Estos valores están fuertemente influenciados por las condiciones atmosféricas al momento del muestreo, especialmente dado que la mayoría de los puntos representan sistemas hidrogeológicos someros.

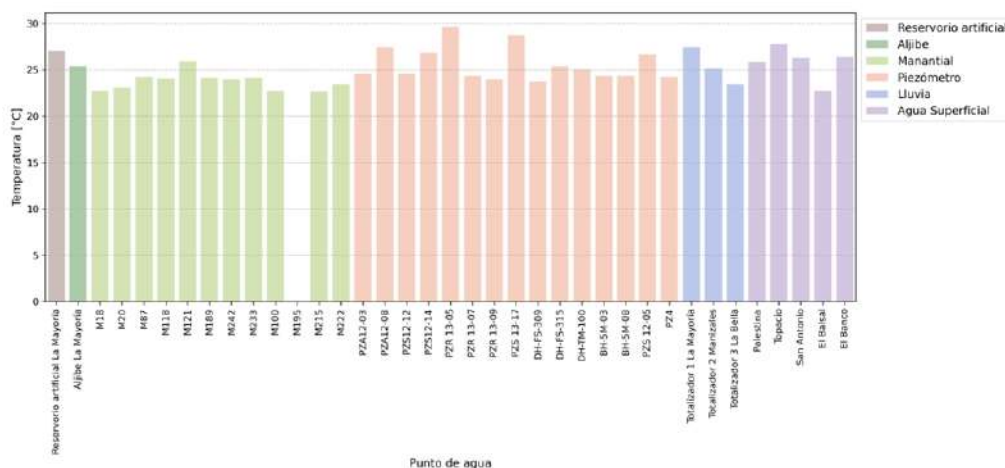


Figura 5.1.6.81 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 4

Fuente: SHI S.A.S, 2025

En cuanto al pH (Figura 5.1.6.82), los valores obtenidos oscilan entre 5,07 y 7,82, lo que corresponde a aguas con características que van desde ligeramente ácidas hasta ligeramente alcalinas. Al igual que lo registrado en la campaña anterior, este comportamiento es indicativo de un sistema con interacción moderada entre el agua y los minerales del medio geológico, sin evidencias de procesos intensos de acidificación o alteración química significativa.

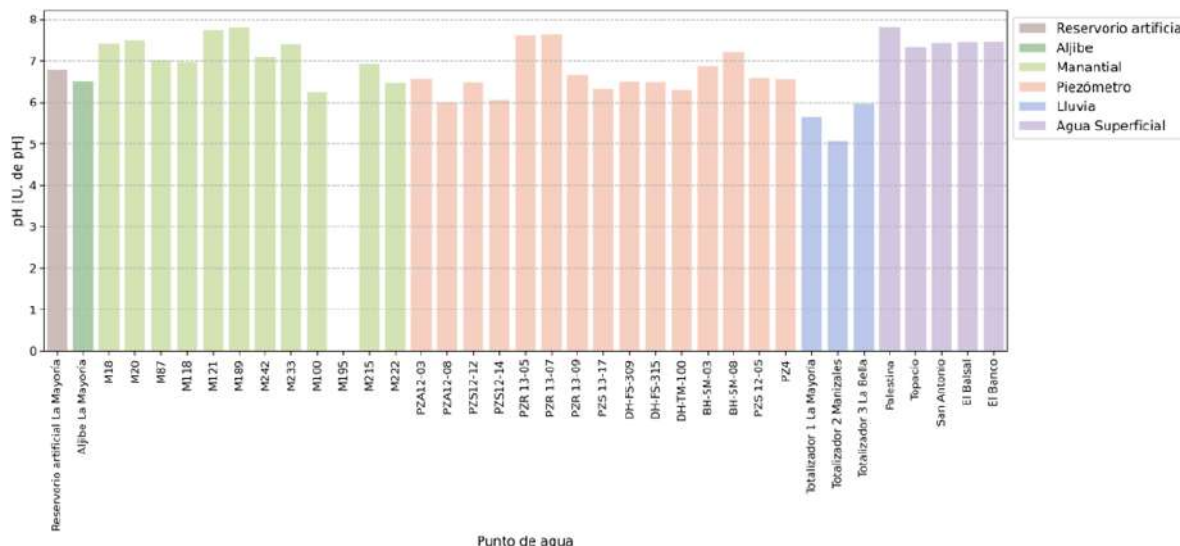


Figura 5.1.6.82 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 4

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Los valores de conductividad eléctrica obtenidos (Figura 5.1.6.83) reflejan una tendencia comparable a la observada en la campaña anterior. Las muestras recolectadas en los totalizadores presentan las conductividades más bajas del conjunto, con un rango que va de 8,47 a 14,69 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual es característico de aguas de precipitación reciente. En contraste, los puntos de agua superficial muestran una mayor dispersión en los valores, que oscilan entre 69,6 y 151,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo la quebrada El Balsal la que registra el valor más elevado, mientras que el reservorio artificial La Mayoría presenta la menor conductividad eléctrica entre estos puntos, con 61,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En cuanto a los manantiales, los valores registrados se sitúan en un rango de 43,7 a 174,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que indica un nivel de mineralización bajo. Sin embargo, en los puntos M121 y M87 se observa una ligera elevación de este parámetro, lo que podría estar relacionado con un mayor tiempo de permanencia del agua en el subsuelo.

Finalmente, los piezómetros y el aljibe presentan conductividades eléctricas ligeramente superiores a las de los manantiales, con valores que oscilan entre 61,4 y 274 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La mayoría de las muestras se ubican entre 100 y 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que corresponde a aguas de baja a moderada mineralización. Los valores más altos se registran en los piezómetros PZR 13-07 (274 $\mu\text{S}/\text{cm}$), PZR 13-09 (235 $\mu\text{S}/\text{cm}$), BH-5M-08 (225 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y PZR 13-05 (223 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo cual sugiere una mayor interacción agua-roca y un tiempo de residencia más prolongado. Por el contrario, puntos como PZA 12-03 (74,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el aljibe La Mayoría

(61,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$) muestran una mineralización más baja, posiblemente asociada a una recarga reciente.

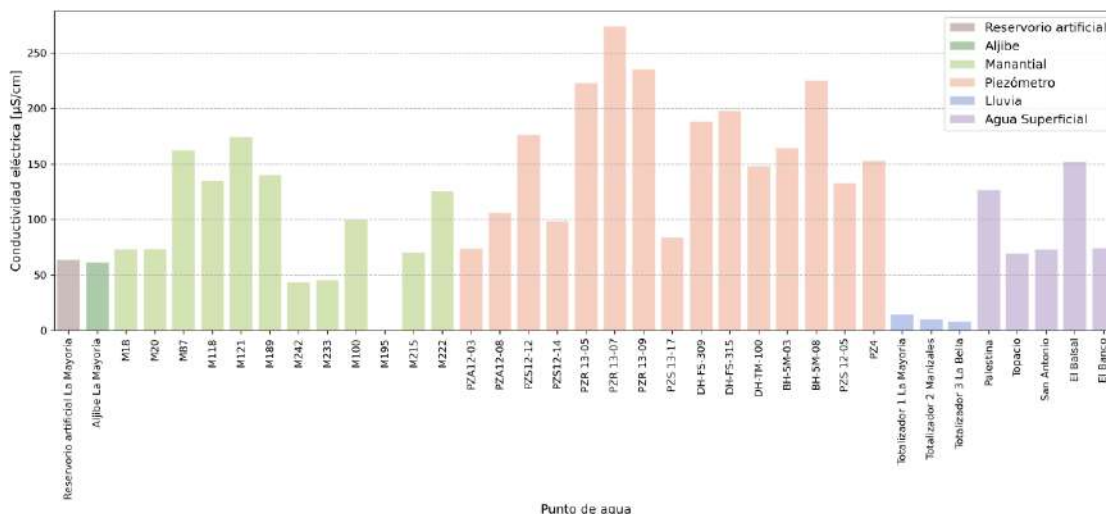


Figura 5.1.6.83 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 4

Fuente: SHI S.A.S, 2025

5.1.6.4.3 Caracterización hidrogeoquímica

A. Campañas anteriores a 2025

El análisis hidrogeoquímico de aguas subterráneas es una herramienta que permite comprender la interacción entre el agua y el medio geológico, identificar procesos de disolución, mezcla o contaminación, y caracterizar la calidad del recurso hídrico. Los diagramas de Stiff y Piper pueden ser empleados para analizar las características químicas del agua subterránea, permitiendo clasificar los tipos hidroquímicos y visualizar variaciones espaciales o temporales en la composición iónica de las muestras recolectadas.

Para la línea base, en el marco del Estudio de Impacto Ambiental, se llevaron a cabo 3 campañas de monitoreo y análisis de agua subterránea entre el 2012 y el 2014 con el objetivo de realizar la caracterización hidroquímica de las unidades hidrogeológicas dentro del área de influencia. Posteriormente, una vez obtenida la licencia ambiental, se realizaron otras campañas de monitoreo hidroquímico entre 2016 y 2017, con el objetivo de caracterizar el agua subterránea en la salida de las cuencas intervenidas con las facilidades mineras, como el tajo Gramalote, la presa de relaves y el material estéril. El resumen de los puntos monitoreados en cada campaña se presenta en la Tabla 5.1.6.45. En la Tabla 5.1.6.46 se presenta el tipo de agua identificada en cada una de las campañas de monitoreo realizadas entre 2012-2017 (SHI SAS, 2026).

Tabla 5.1.6.45 Campañas de monitoreo hidroquímica anteriores a 2025

Número de campaña	Fecha de monitoreo	Periodo climático	Manantiales	Reservorio artificial	Aljibe	Piezómetros	Total puntos
1	Marzo – junio de 2012	Fin de periodo seco	12	1	1	15	29
2	Octubre de 2012	Periodo húmedo	11	1	1	17	30
3	Junio de 2014	Fin del periodo húmedo	3	1		17	21
4	Mayo 2016	Periodo húmedo	3	1		15	19
5	Octubre 2016	Periodo húmedo	6	1		17	24
6	Marzo 2017	Periodo seco	6	1		16	23

Fuente: SHI SAS, 2025

Tabla 5.1.6.46 Tipo de agua identificada para las distintas campañas de monitoreo hidroquímico (2012-2017)

Punto	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5	Campaña 6
Aljibe La Mayoría	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Na-Ca-Mg-HCO ₃	-	-	-	-
Reservorio artificial La Mayoría	-	Na-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	Ca-Na-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃
M100	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	-	-	-
M105	-	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	-	-	-
M117	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃	-	-	-	-
M120	-	-	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Mg-Ca-Na-HCO ₃
M121	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	-	-	-
M138	Na-HCO ₃	-	-	-	-	-
M189	Ca-Mg-HCO ₃	-	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃	Mg-HCO ₃
M219	Na-HCO ₃	Na-HCO ₃	-	-	-	-
M118	-	-	-	-	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃

Punto	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5	Campaña 6
M47	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	-	-	-
M55	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	-	-	-
M74	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	-	-	-
M79	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	-	-	-
M87	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Error Balance	Ca-Na-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃
M92	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	-	-	-
M20	-	-	-	-	Ca-Na-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃
M18	-	-	-	-	Na-Ca-HCO ₃	Na-HCO ₃
BH-5M-03	-	-	-	-	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
BH-5M-08	-	-	-	-	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃
DH-FS-309	-	-	Error Balance	Na-Ca-Mg-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃	Na-Ca-Mg-HCO ₃
DH-FS-315	-	-	Ca-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Mg-Ca-HCO ₃
DH-TM-100	-	-	Mg-Ca-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Mg-HCO ₃
PZA 12-01 P1*	Na-HCO ₃	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃	-	-	-
PZA 12-01 P2**	Na-HCO ₃	-	-	-	-	-
PZA 12-02	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃	-	-	-	-
PZA 12-03	Na-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃	Na-Ca-Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Na-Ca-Mg-HCO ₃	Na-HCO ₃
PZA 12-04 P1*	Ca-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Mg-Ca-HCO ₃	-	-	-
PZA 12-04 P2**	Ca-HCO ₃	-	-	-	-	-
PZA 12-05	Na-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	-	-	-
PZA 12-07 P1*	Ca-HCO ₃	-	-	-	-	-
PZA 12-07 P2**	Na-Mg-HCO ₃	-	-	-	-	-

Punto	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5	Campaña 6
PZA 12-08	-	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Na-Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃
PZR 12-01	Ca-Na-HCO ₃	Ca-HCO ₃	-	-	-	-
PZR 12-02	Na-Ca-HCO ₃	Na-HCO ₃	-	-	-	-
PZR 12-04	Ca-Mg-Na-HCO ₃	-	Error Balance	-	-	-
PZR 12-08 P1*	Ca-Na-HCO ₃	-	-	-	-	-
PZR 12-08 P2**	Ca-Mg-Na-HCO ₃	-	-	-	-	-
PZR 12-04	-	-	-	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃
PZR 13-05	-	-	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃
PZR 13-06	-	-	Ca-Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄			
PZR 13-07	-	-	Ca-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
PZR 13-09	-	-	Ca-Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄	Ca-Na-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄
PZR 13-11	-	-	-	Ca-Na-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃
PZS 12-01	Ca-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃	-	-	-	-
PZS 12-02	Ca-HCO ₃		-	-	-	-
PZS 12-03	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Error Balance	-	-	-
PZS 12-04	-	Ca-Mg-Na-HCO ₃	-	-	-	-
PZS 12-05	Na-HCO ₃	Na-HCO ₃	-	-	-	-
PZS 12-08	-	Na-HCO ₃	-	-	-	-
PZS 12-09	-	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
PZS 12-10	Ca-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	-	-	-	-
PZS 12-12	-	Na-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃
PZS 12-13	-	Ca-Mg-Na-HCO ₃	-	-	-	-
PZS 12-14	-	-	-	Ca-Na-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃

Punto	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5	Campaña 6
PZS 13-15	-	-	Error Balance	-	-	-
PZS 13-17	-	-	Na-Ca-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃
PZS 13-18	-	-	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃	-
* P1 indica muestra tomada antes de una prueba hidráulica ** P2 indica muestra tomada después de una prueba hidráulica						

Fuente: Modificado de (Gramalote Colombia Limited, 2018)

A partir de las distintas campañas de monitoreo, se puede evidenciar que el agua subterránea captada en el depósito aluvial se caracteriza por presentar la menor mineralización entre las unidades hidrogeológicas evaluadas. Su composición química varía entre bicarbonatada cálcica y bicarbonatada sódica, con predominancia de calcio y sodio como cationes mayoritarios, seguidos de magnesio. La ausencia de sulfatos y cloruros es una característica que resalta en este tipo de aguas (SHI SAS, 2026). ver Figura 5.1.6.84, Figura 5.1.6.85 y Figura 5.1.6.86.

Adicionalmente, los análisis muestran que el contenido de sólidos disueltos en esta unidad es bajo, lo que sugiere tiempos de residencia cortos y una limitada interacción agua-roca. Además, las aguas con mayor presencia de sodio generalmente presentan una menor mineralización.

Por su parte, las aguas captadas en el saprolito presentan una mineralización superior a la del depósito aluvial, lo que se atribuye a un mayor tiempo de residencia del agua y, posiblemente, a una mayor solubilidad de los minerales presentes en esta unidad. La composición química predominante en esta unidad también es bicarbonatada cálcica y bicarbonatada sódica; no obstante, se registran concentraciones elevadas de hierro en comparación con otros cationes mayoritarios. La liberación de hierro en estas aguas podría estar relacionada con la alteración de minerales ferromagnesianos presentes en la matriz del saprolito (SHI SAS, 2026)..

Finalmente, las aguas subterráneas almacenadas en la roca ígnea presentan una composición similar a las del saprolito, predominando los tipos bicarbonatados cálcicos y bicarbonatados sódicos. En este caso, estas aguas muestran una mineralización levemente mayor que las del saprolito, lo que sugiere un mayor tiempo de residencia y una interacción más prolongada con la matriz rocosa. Además, se evidencia una tendencia al incremento de la mineralización con la profundidad.

La ausencia de sulfatos y cloruros en los análisis de laboratorio es una característica común en toda el área de influencia, mientras que los cationes predominantes son calcio, sodio y magnesio. Además, las mayores concentraciones de iones se identifican en la parte baja de la cuenca, en proximidad al río Nus. En particular, se observa una acumulación significativa de hierro y manganeso en estas zonas, lo que sugiere una dirección de flujo de agua subterránea predominantemente hacia el río (SHI SAS, 2026).

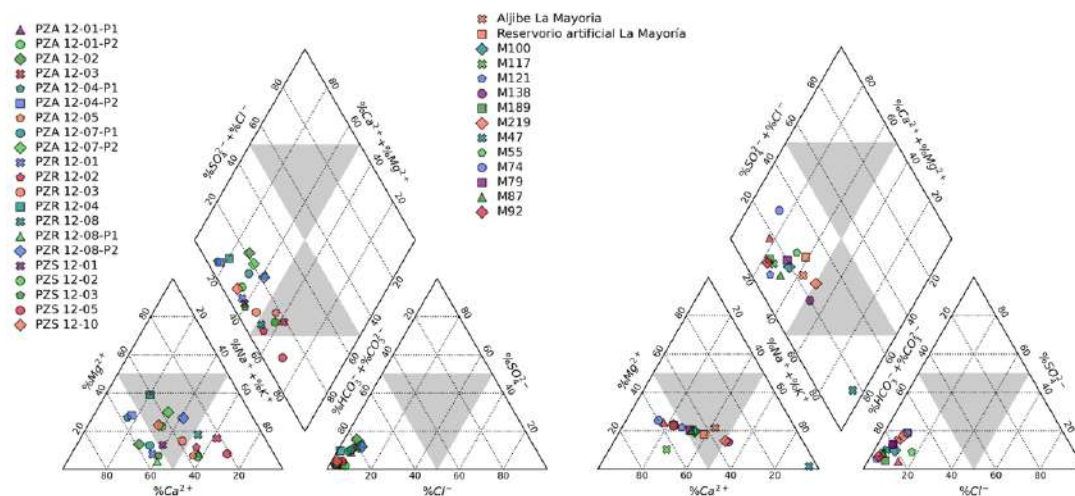


Figura 5.1.6.84 Diagrama de Piper. Campaña 1 (marzo 2012)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

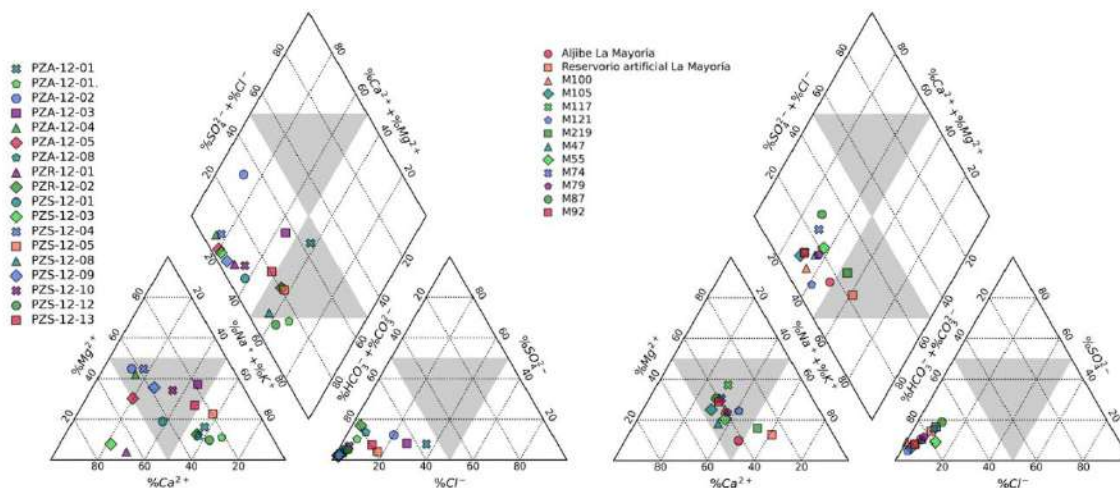


Figura 5.1.6.85. Diagrama de Piper. Campaña 2 (octubre 2012)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

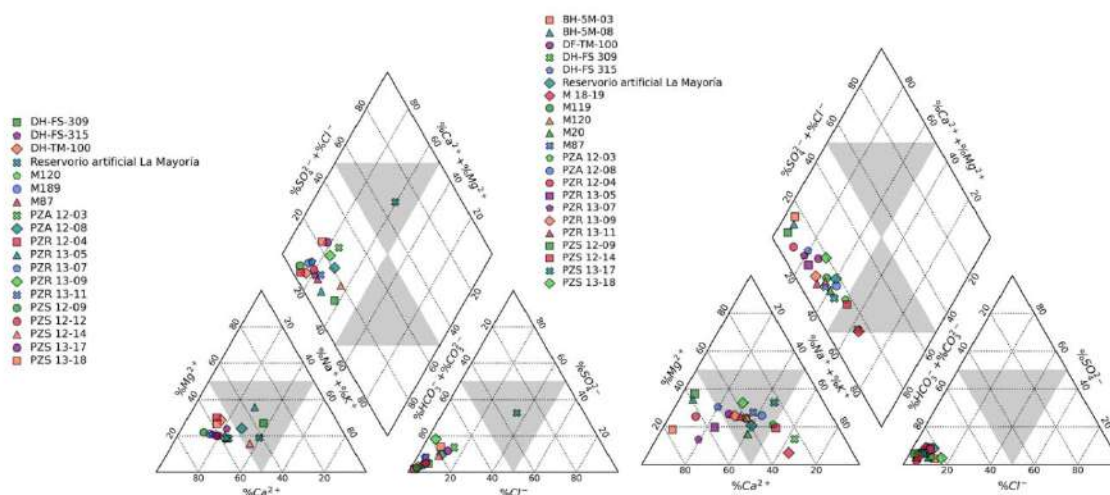


Figura 5.1.6.86 Diagrama de Piper. Campaña 4 (marzo 2016) y campaña 5 (noviembre 2016)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Es importante resaltar que los resultados de las campañas de monitoreo indican que la composición fisicoquímica del agua en manantiales y piezómetros se mantiene relativamente estable entre períodos seco y húmedo, lo que sugiere que las condiciones hidrogeoquímicas de las unidades hidrogeológicas permanecen constantes en el tiempo.

A lo largo de las distintas campañas de monitoreo, se ha evidenciado la presencia de contaminación microbiológica, especialmente en los manantiales, donde se han registrado concentraciones elevadas de coliformes totales, generalmente más de 5000 NMP/100ml, y *Escherichia coli*. Estos resultados sugieren una posible influencia de fuentes de contaminación de origen antrópico, como infiltración de aguas residuales domésticas o prácticas agrícolas inadecuadas. En el caso de los piezómetros, aunque también se detectan coliformes totales y *E. coli*, las concentraciones suelen ser menores.

En contraste, los análisis muestran concentraciones bajas de metales pesados y otros parámetros como nitratos, fenoles totales, grasas y aceites, berilio, estaño, aluminio, antimonio, cianuro, fluoruros, litio, molibdeno, plata, selenio, cadmio, cromo, cobalto, cobre y mercurio. Esto sugiere que, hasta el momento, no hay una afectación significativa por metales pesados (SHI SAS, 2026).

B. Monitoreo hidrogeoquímico – campaña 1, febrero 2025

Entre los días 4 y 20 de febrero de 2025 se llevó a cabo la primera campaña de monitoreo hidroquímico. Este proceso incluyó la medición de parámetros fisicoquímicos in situ tales como temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. Además, se recolectaron muestras de agua para su análisis en laboratorio, con el objetivo de determinar las concentraciones de los principales iones, así como parámetros microbiológicos, grasas y aceites e hidrocarburos. Es importante señalar que el manantial M195 no presentaba flujo de agua al momento del muestreo y, por lo tanto, no es posible realizar el monitoreo

hidroquímico. En la Tabla 5.1.6. y en la Tabla 5.1.6.48 se presentan los resultados del muestreo hidroquímico y microbiológico.

En términos generales, se observa que en la mayoría los puntos de muestreo no registran concentraciones de grasas y aceites; sin embargo, en el manantial M20, en los piezómetros DH-TM-100, DH-FS-309, PZR 13-07 y PZA 12-03 y en la quebrada Palestina se registran concentraciones de este parámetro, lo que sugiere una posible contaminación puntual de origen antrópico en estos puntos. De manera particular, la quebrada Palestina registra la concentración más elevada de grasas y aceites y es el único punto en donde se registran hidrocarburos, lo cual indica un posible grado de contaminación de origen antrópico más elevado.

Los niveles de nitratos en los puntos de monitoreo varían desde concentraciones bajas, incluso por debajo del límite de detección como en el punto PZA 12-08 y la quebrada Palestina, hasta valores elevados en ciertos piezómetros, como DH-FS-309 y PZS 12-05. Estas concentraciones más altas podrían estar relacionadas con fuentes antrópicas como el uso de fertilizantes agrícolas o infiltración de aguas residuales domésticas. En el resto de los puntos de monitoreo se evidencian valores bajos a moderados.

Al considerar los resultados de los parámetros microbiológicos se puede evidenciar que la mayoría de los puntos presenta algún tipo de microorganismo, exceptuando el piezómetro PZ4.

En los puntos de muestreo de agua superficial, los valores más elevados de coliformes totales se presentan en las quebradas El Balsal, El Banco y el Topacio, lo que indica una alta contaminación microbiológica. Asimismo, los valores de *Escherichia coli* son elevados en estos puntos, especialmente en El Balsal, sugiriendo contaminación de origen fecal.

Por su parte, los manantiales presentan una amplia variación en los niveles de contaminación microbiológica. Destaca el manantial M121, con valores extremadamente altos de coliformes totales y coliformes termotolerantes, seguido de los puntos M233 y M18, que también presentan altas concentraciones, indicando un elevado grado de contaminación. En contraste, algunos manantiales como M100 muestran valores indetectables de *Escherichia coli* y coliformes termotolerantes, evidenciando mejores condiciones en la calidad del agua.

En la mayoría de los piezómetros se registran niveles más bajos de contaminación microbiológica en comparación con los manantiales y aguas superficiales. Sin embargo, algunos presentan valores elevados, como DH-FS-309 y PZS12-12, lo que sugiere posibles influencias de fuentes contaminantes cercanas. En general, los piezómetros se caracterizan por presentar niveles bajos o indetectables de *Escherichia coli* y coliformes termotolerantes, lo que indica que la fuente de contaminación microbiológica no es de origen fecal. De igual forma, el aljibe presenta valores relativamente bajos de estos parámetros. De forma similar, el reservorio artificial La Mayoría muestra niveles moderados de coliformes totales, pero con ausencia de *Escherichia coli* y coliformes termotolerantes, lo que sugiere una fuente de contaminación no fecal.

Tabla 5.1.6.47 Resultados de laboratorio de los puntos de monitoreo. Campaña 1. (2025)

Nombre del punto	Alcalinidad a la finalftaleina (mg CaCO ₃ /l)	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Carbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Grasas y aceites (mg GyA/l)	Hidrocarburos totales (mg Hidrocarburos/l)	Solidos Disueltos Totales (mg SDT/l)	Cloruros (mg Cl/l)	Nitratos (mg N-NO ₃ /l)	Nitratos (mg NO ₃ /l)	Sulfatos (SO ₄ /l)	Calcio Disuelto (mg/l)	Hierro Disuelto (mg/l)	Magnesio Disuelto (mg/l)	Potasio Disuelto (mg/l)	Sodio Disuelto (mg/l)	Error de balance iónico (%)
Reservorio artificial La Mayoría	<1.89	32,73	32,73	<4.0	<0.20	<0.20	40,00	0,7600	0,0589	0,26	2,39	4,21	4,3	1,3	1	6,51	3,58
Aljibe La Mayoría	<1.89	36,63	36,63	<4.0	<0.20	<0.20	44,00	0,8300	0,0903	0,4	1,66	6,523	2,835	1,434	0,983	6,361	3,44
M18	<1.89	27,96	27,97	<4.0	<0.20	<0.20	42,00	0,4800	0,0709	0,31	1,91	5,53	<0.090	1,46	2,46	9,34	17,09
M20	<1.89	26,01	26,01	<4.0	1,08	<0.20	43,00	0,6000	0,0551	0,24	2,77	4,86	<0.090	1,09	0,907	9,02	11,39
M87	<1.89	92,63	92,63	<4.0	<0.20	<0.20	100,00	1,0800	0,0468	0,21	3,2	12,8	<0.090	5,42	1,9	14,2	-5,37
M118	<1.89	79,12	79,12	<4.0	<0.20	<0.20	103,00	0,9800	0,0199	0,09	2,02	13,6	1,59	6,55	3,57	9,78	4,04
M121	<1.89	74,78	74,78	0,0	<0.20	<0.20	85,00	0,8200	0,77	0,34	2,47	15	<0.090	4,59	1,98	11,1	2,77
M189	<1.89	92,63	92,63	<4.0	<0.20	<0.20	98,00	2,1600	0,0272	0,12	2,76	16,3	0,522	6,62	2,56	10,1	-2,32
M242	<1.89	26,45	26,45	<4.0	<0.20	<0.20	33,00	1,9000	0,1032	0,46	1,58	4,4	<0.090	1,42	1,87	6,89	5,27
M233	<1.89	28,18	28,18	<4.0	<0.20	<0.20	37,00	1,8300	0,0737	0,33	2,23	4,07	0,164	1	2,06	7,52	0,70
M100	<1.89	46,17	46,17	<4.0	<0.20	<0.20	59,00	0,8600	0,3569	1,58	3,14	8,82	<0.090	3,82	1,21	6,82	3,29
M195	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M215	<1.89	29,26	29,26	<4.0	<0.20	<0.20	49,00	1,3000	0,1385	0,61	5,16	7,49	<0.090	1,37	0,24	8,08	7,29
M222	<1.89	63,98	63,98	<4.0	<0.20	<0.20	76,00	0,9700	0,0742	0,33	1,89	11,3	0,861	6,2	2,08	6,85	3,92
PZA12-03	<1.89	25,36	25,36	<4.0	1,00	<0.20	34,00	1,8500	0,0568	0,25	1,84	3,74	1,72	1,17	1,28	8,85	7,92
PZA12-08	<1.89	49,64	49,64	<4.0	<0.20	<0.20	67,00	1,2500	<0.0113	<0.05	<0.20	7,47	2,683	2,21	2,61	6,99	-0,43
PZS12-12	<1.89	101,88	101,88	<4.0	<0.20	<0.20	130,00	7,1800	0,5285	2,34	2,89	31	<0.090	3,22	1,61	12,8	2,33
PZS12-14	<1.89	60,13	60,13	<4.0	<0.20	<0.20	72,00	3,0300	0,0327	0,14	3,37	5,15	<0.090	4,57	1,74	13	-4,43

Nombre del punto	Alcalinidad a la finalftaleina (mg CaCO ₃ /l)	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Carbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Grasas y aceites (mg GyA/l)	Hidrocarburos totales (mg Hidrocarburos/l)	Solidos Disueltos Totales (mg SDT/l)	Cloruros (mg Cl/l)	Nitratos (mg N-NO ₃ /l)	Nitratos (mg NO ₃ /l)	Sulfatos (SO ₄ /l)	Calcio Disuelto (mg/l)	Hierro Disuelto (mg/l)	Magnesio Disuelto (mg/l)	Potasio Disuelto (mg/l)	Sodio Disuelto (mg/l)	Error de balance iónico (%)
PZR 13-05	<1.89	113,03	113,03	<4.0	<0.20	<0.20	126,00	2,3100	0,0513	0,23	7,15	26,6	<0.090	2,7	2,55	11,5	-7,84
PZR 13-07	<1.89	133,22	133,22	<4.0	0,41	<0.20	178,00	2,5900	0,037	0,16	12,8	21,355	2,783	5,345	6,524	15,356	-10,36
PZR 13-09	<1.89	70,45	70,45	<4.0	<0.20	<0.20	114,00	1,8500	0,0359	0,16	22,59	15,3	8,18	2,77	3,81	17,8	5,49
PZS 13-17	<1.89	22,76	22,76	<4.0	<0.20	<0.20	41,00	1,3000	0,4572	2,02	7,96	6,37	0,156	1,61	1,52	7,39	10,76
DH-FS-309	<1.89	92,42	92,42	<4.0	0,83	<0.20	124,00	4,4200	2,0423	9,04	4,85	11,65	0,34	6,611	3,6406	23,0224	3,67
DH-FS-315	<1.89	87,11	87,11	<4.0	<0.20	<0.20	99,00	2,4900	0,0735	0,33	5,12	15,3	0,102	7,28	3,14	7,34	-4,16
DH-TM-100	<1.89	76,91	76,91	<4.0	0,23	<0.20	97,00	3,0900	0,3994	1,77	3,89	9,631	1,823	5,663	7,291	16,455	5,74
BH-5M-03	<1.89	125,57	125,57	<4.0	<0.20	<0.20	154,00	1,6300	0,4626	2,05	2,13	16,763	2,782	6,456	4,873	13,764	-8,58
BH-5M-08	<1.89	137,89	137,89	<4.0	<0.20	<0.20	166,00	4,7000	0,2676	1,18	2,63	15,245	3,434	7,756	5,885	17,434	-9,57
PZS 12-05	<1.89	71,18	71,18	<4.0	<0.20	<0.20	86,00	4,1100	1,0019	4,43	3,63	12,9	<0.090	6,2	1,16	7,78	-2,97
PZ4	<1.89	92,63	92,63	<4.0	<0.20	<0.20	107,00	1,8100	0,2497	1,1	2,97	15,9	0,16	9,8	3,84	1,1	-5,75
Quebrada Palestina	<1.89	65,46	65,46	<4.0	1,41	0,52	80,00	1,2800	<0.0113	<0.05	0,39	13,7	0,24	5,64	2,11	8,3	7,45
Quebrada Topacio	<1.89	39,02	39,02	<4.0	<0.20	<0.20	46,00	1,1400	0,0596	0,26	1,78	5,63	0,289	1,54	1,79	8,51	-0,93
Quebrada San Antonio	<1.89	36,85	36,85	<4.0	<0.20	<0.20	45,00	0,4800	0,0469	0,21	1,69	5,64	0,767	1,7	1,56	8,96	5,57
Quebrada El Balsal	<1.89	84,54	84,54	<4.0	<0.20	<0.20	135,00	1,3100	0,4884	2,16	27,11	27,2	0,177	4,48	2,69	8,76	-2,47
Quebrada El Banco	<1.89	39,45	39,45	<4.0	<0.20	<0.20	48,00	0,3200	0,0491	0,22	1,73	6,25	0,215	1,65	2,1	8,19	1,84

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Tabla 5.1.6.48 Resultados de parámetros microbiológicos de los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Coliformes totales	Escherichia Coli	Coliformes Termotolerantes
		[dd/mm/aa]	NPM/100 ml	NPM/100 ml	NPM/100 ml
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	10/02/2025	8164	<1	<1
Aljibe La Mayoría	Aljibe	10/02/2025	980,4	41	41
M18	Manantial	04/02/2025	24196	4884	4884
M20	Manantial	04/02/2025	8930	96	163
M87	Manantial	13/02/2025	538	10	20
M118	Manantial	12/02/2025	7000	325	6131
M121	Manantial	11/02/2025	547500	3180	54750
M189	Manantial	13/02/2025	5630	189	189
M242	Manantial	10/02/2025	4550	52	63
M233	Manantial	09/02/2025	64200	6230	6230
M100	Manantial	09/02/2025	7270	<1	<1
M195	Manantial	05/02/2025	---	---	---
M215	Manantial	05/02/2025	6110	74	85
M222	Manantial	11/02/2025	2495	20,9	28,1
PZA12-03	Piezómetro	11/02/2025	110	<1	<1
PZA12-08	Piezómetro	07/02/2025	20	<1	10
PZS12-12	Piezómetro	07/02/2025	27550	200	200
PZS12-14	Piezómetro	14/02/2025	288	11	11
PZR 13-05	Piezómetro	14/02/2025	52	<1	<1
PZR 13-07	Piezómetro	18/02/2025	106	2	3
PZR 13-09	Piezómetro	12/02/2025	108	<1	<1
PZS 13-17	Piezómetro	10/02/2025	70,5	<1	<1
DH-FS-309	Piezómetro	20/02/2025	365400	200	200
DH-FS-315	Piezómetro	13/02/2025	72000	<1	<1

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Coliformes totales	Escherichia Coli	Coliformes Termotolerantes
		[dd/mm/aa]	NPM/100 ml	NPM/100 ml	NPM/100 ml
DH-TM-100	Piezómetro	18/02/2025	52000	2	110
BH-5M-03	Piezómetro	19/02/2025	41060	75	75
BH-5M-08	Piezómetro	19/02/2025	49600	100	100
PZS 12-05	Piezómetro	14/02/2025	1924	<1	<1
PZ4	Piezómetro	20/02/2025	<1	<1	<1
Quebrada Palestina	Agua Superficial	11/02/2025	24196	143,9	770,1
Quebrada Topacio	Agua Superficial	06/02/2025	54700	2075	3968
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	07/02/2025	24810	31	31
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	09/02/2025	155310	17329	17329
Quebrada El Banco	Agua Superficial	06/02/2025	120330	269	368

Fuente: SHI S.A.S, 2025

a. Parámetros fisicoquímicos

La medición de parámetros in situ, como el oxígeno disuelto, el pH y la conductividad eléctrica, es esencial en el estudio hidroquímico de las aguas subterráneas. Estos valores pueden proporcionar información sobre las condiciones fisicoquímicas del sistema hidrogeológico, reflejando procesos de interacción agua-roca, posibles influencias antrópicas y la dinámica del flujo subterráneo. Asimismo, contribuyen a la identificación de fuentes potenciales de contaminación y permiten inferir el origen y evolución del agua dentro del sistema hidrogeológico.

A pesar de que los totalizadores no forman parte de la red de monitoreo hidroquímico, en este capítulo se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en estos puntos, debido a que aportan información adicional para comprender las interacciones entre la precipitación y las fuentes de agua superficiales y subterránea. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo se presentan en la Tabla 5.1.6.49.

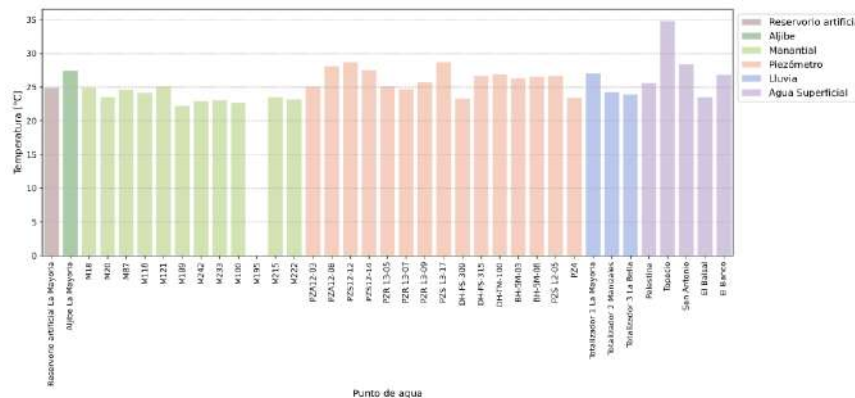
Tabla 5.1.6.49 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temp.	pH	Oxígeno disuelto	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	°C	U. de pH	mg/l	µS/cm
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	10/02/2025	24,9	6,43	0,74	72,2
Aljibe La Mayoría	Aljibe	10/02/2025	27,4	6,57	6,56	85,8
M18	Manantial	4/02/2025	24,9	7,28	6,82	75,7
M20	Manantial	4/02/2025	23,5	7,27	6,82	75,2
M87	Manantial	13/02/2025	24,6	7,06	7,04	177,3
M118	Manantial	12/02/2025	24,2	6,60	0,55	154,8
M121	Manantial	11/02/2025	25,1	7,61	6,73	151,8
M189	Manantial	13/02/2025	22,2	7,02	5,56	176,7
M242	Manantial	10/02/2025	22,9	6,58	5,13	58,9
M233	Manantial	9/02/2025	23,1	6,57	0,41	62,5
M100	Manantial	9/02/2025	22,7	6,03	4,66	104
M195	Manantial	5/02/2025	-	-	-	-
M215	Manantial	5/02/2025	23,5	6,88	6,45	91,5
M222	Manantial	11/02/2025	23,2	6,59	2,25	133,8
PZA12-03	Piezómetro	11/02/2025	25,1	6,31	6,12	57,9
PZA12-08	Piezómetro	7/02/2025	28,1	6,36	0,58	214,2
PZS12-12	Piezómetro	7/02/2025	28,7	6,40	4,46	242
PZS12-14	Piezómetro	14/02/2025	27,5	5,97	4,07	128,3
PZR 13-05	Piezómetro	14/02/2025	25,1	7,51	6,09	229
PZR 13-07	Piezómetro	18/02/2025	24,7	7,81	7,85	283
PZR 13-09	Piezómetro	12/02/2025	25,7	6,77	1,88	221
PZS 13-17	Piezómetro	10/02/2025	28,7	6,28	3,88	72,3
DH-FS-309	Piezómetro	20/02/2025	23,3	6,40	6,42	197,4
DH-FS-315	Piezómetro	13/02/2025	26,7	6,47	1,64	170,7
DH-TM-100	Piezómetro	18/02/2025	26,9	6,51	4,72	160,1
BH-5M-03	Piezómetro	19/02/2025	26,3	7,06	6,00	254

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temp.	pH	Oxígeno disuelto	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	°C	U. de pH	mg/l	μS/cm
BH-5M-08	Piezómetro	19/02/2025	26,6	6,96	4,73	256
PZS 12-05	Piezómetro	14/02/2025	26,7	6,77	4,80	150,1
PZ4	Piezómetro	20/02/2025	23,4	6,36	2,70	176
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/02/2025	27,1	6,47	7,00	23,6
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/02/2025	24,3	6,58	6,78	27,9
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/02/2025	23,9	6,45	6,90	37,8
Quebrada Palestina	Agua Superficial	11/02/2025	25,6	7,96	6,42	128,5
Quebrada Topacio	Agua Superficial	6/02/2025	34,8	7,16	7,04	91,3
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	7/02/2025	28,4	7,20	6,31	89,4
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	9/02/2025	23,5	7,74	2,95	226
Quebrada El Banco	Agua Superficial	6/02/2025	26,8	7,21	4,50	93,5

Fuente: SHI S.A.S, 2025

La temperatura del agua en los puntos de muestreo varía entre 22,2 y 34,8°C, con valores que reflejan la influencia de las condiciones meteorológicas al momento del muestreo (Figura 5.1.6.87 y Figura 5.1.6.88). En el caso de los puntos de agua subterránea estos valores se pueden asociar con sistemas hidrogeológicos superficiales y poco profundos, donde la temperatura del agua puede verse afectada por la interacción con la radiación solar.



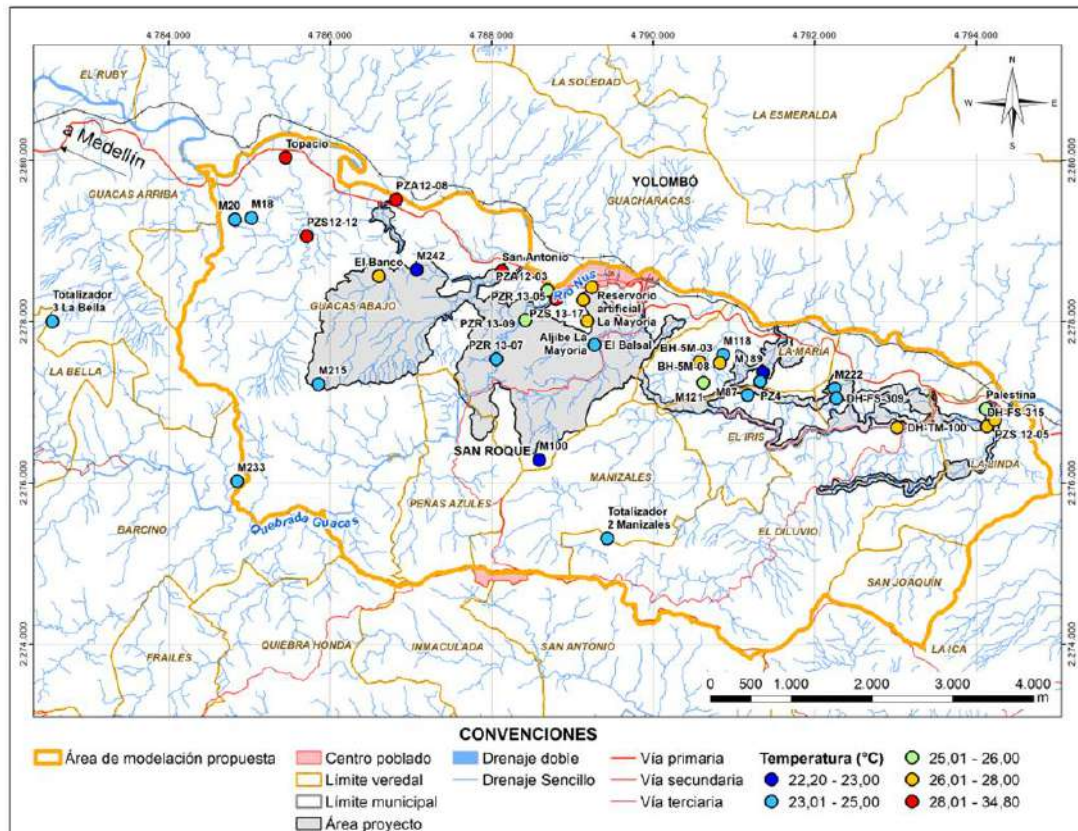
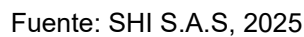
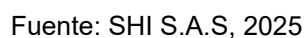


Figura 5.1.6.88 Distribución espacial de la temperatura en los puntos de monitoreo.
Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El pH registrado oscila entre 5,97 y 7,96 unidades de pH, lo que indica un carácter ligeramente ácido a ligeramente alcalino (Figura 5.1.6.89 y Figura 5.1.6.90). Estos valores son característicos de sistemas hidrogeológicos donde el agua mantiene una interacción moderada con materiales orgánicos y minerales, sin evidencias claras de procesos intensos de acidificación.



185

este parámetro, con un rango entre 23,6 y 37,8 $\mu\text{S/cm}$, lo que es característico de este tipo de aguas. Por su parte, los puntos de aguas superficiales exhiben una mayor variabilidad, con valores entre 89,4 y 226 $\mu\text{S/cm}$, siendo la quebrada El Balsal el punto con la conductividad eléctrica más. El reservorio artificial La Mayoría presenta una conductividad eléctrica de 72,2 $\mu\text{S/cm}$, lo que sugiere una mineralización baja y una posible influencia de aguas de recarga reciente.

Los manantiales presentan valores de conductividad eléctrica bajo, los cuales varían entre 58,9 y 177,3 $\mu\text{S/cm}$, los cuales indican un grado de mineralización muy bajo a bajo, asociado a poco tiempo de residencia en el medio subterráneo.

En los piezómetros y aljibe la conductividad eléctrica registrada es ligeramente más alta respecto a los manantiales, variando entre 57,9 – 283 $\mu\text{S/cm}$. Sin embargo, la mayoría de estos puntos se caracterizan por valores entre 100 – 300 $\mu\text{S/cm}$, asociados a un grado de mineralización bajo a medio. Los valores más elevados se registran en los piezómetros PZR 13-07 (283 $\mu\text{S/cm}$) y PZS12-12 (242 $\mu\text{S/cm}$), los cuales podrían estar captando aguas con mayor tiempo de residencia o con interacción con materiales más solubles. Por otro lado, valores bajos, como en PZS 13-17 (72,3 $\mu\text{S/cm}$) y en el aljibe La Mayoría (85,8 $\mu\text{S/cm}$), indican aguas menos mineralizadas, posiblemente de recarga reciente.

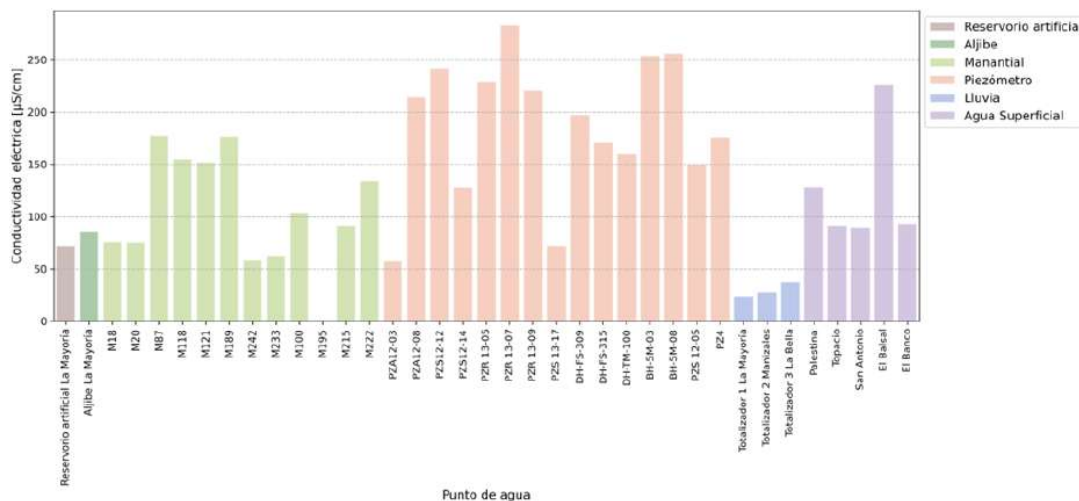
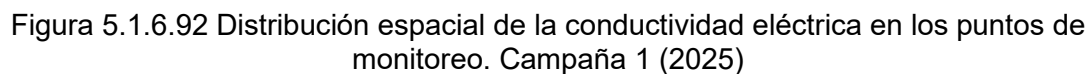


Figura 5.1.6.91 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025



En el caso del oxígeno disuelto (Figura 5.1.6.93 y Figura), se puede observar que los manantiales presentan una variabilidad importante, con un rango de 0,41 mg/l a 7,04 mg/l. La mayoría de los puntos muestran valores entre 4 y 7 mg/l, lo que indica condiciones de oxigenación moderada a alta, posiblemente asociadas con la infiltración reciente de aguas meteóricas con poco tiempo de tránsito en el medio subterráneo. Sin embargo, se destacan valores anómalamente bajos en M233 (0,41 mg/l) y M118 (0,55 mg/l), lo que puede sugerir aguas en contacto con materiales orgánicos.

Por su parte, los piezómetros y aljibe también exhiben un comportamiento variable en el oxígeno disuelto, con valores que oscilan entre 0,58 mg/l y 7,85 mg/l. En general, los valores más bajos de oxígeno disuelto se presentan en piezómetros PZA 12-08 y DH-FS 315 los cuales son de poca profundidad y captan unidades aluviales y suelos residuales. Esta baja concentración de oxígeno sugiere condiciones reductoras, posiblemente asociadas a procesos de degradación de materia orgánica y consumo de oxígeno; en el caso del punto PZR 13-09 también se registra un valor de oxígeno disuelto bajo, no obstante, en este caso, al ser un piezómetro profundo, es posible que este valor indique aguas con mayor tiempo de residencia en el medio subterráneo. En contraste, los valores más elevados de oxígeno disuelto, como en los piezómetros BH-5M-03, PZR 13-05, PZA 12-03, DH-FS-309 y PZR 13-07, podrían estar asociados a mayor recarga reciente y poco

tiempo de tránsito en el subsuelo. Los puntos restantes presentan condiciones que pueden considerarse intermedias entre aguas superficiales y subterráneas, lo que sugiere que el agua en estos puntos ha tenido un tiempo de residencia moderado, permitiendo cierto grado de intercambio con la atmósfera, pero sin alcanzar completamente las condiciones reductoras típicas de los sistemas subterráneos.

El reservorio artificial La Mayoría presenta un valor extremadamente bajo de oxígeno disuelto (0,74 mg/l), lo que indica condiciones reductoras, posiblemente relacionadas con acumulación de materia orgánica y descomposición anaerobia. En contraste, los cuerpos de agua superficiales (Topacio, San Antonio, Palestina) presentan valores entre 6 y 7 mg/l, lo que refleja una mayor aireación y mezcla con la atmósfera. Sin embargo, el punto El Balsal y el Banco presentan una oxigenación más baja de lo esperado, con valores de 2,95 mg/l y 4,5 mg/l respectivamente, lo que podría estar asociado a procesos biológicos o a procesos puntuales de contaminación, especialmente en el punto El Balsal, donde se ha evidenciado que el agua del cauce es turbia, de color gris y desarrollo de actividad minera artesanal.

Los totalizadores de agua lluvia presentan valores de oxígeno disuelto entre 6,78 mg/l y 7 mg/l, valores elevados coherentes con lo esperado en la saturación del agua en contacto con la atmósfera antes de su infiltración.

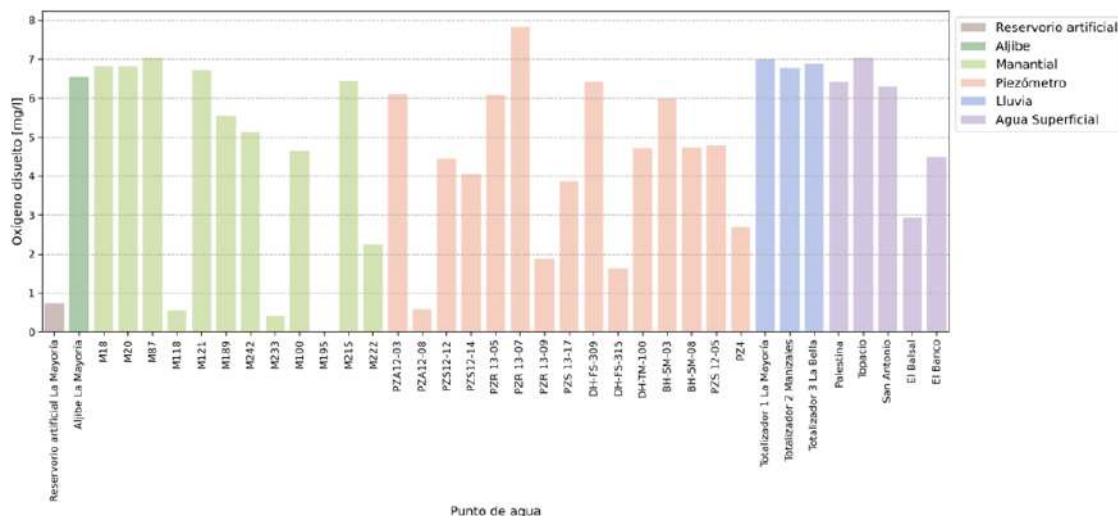


Figura 5.1.6.93 Oxígeno disuelto registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

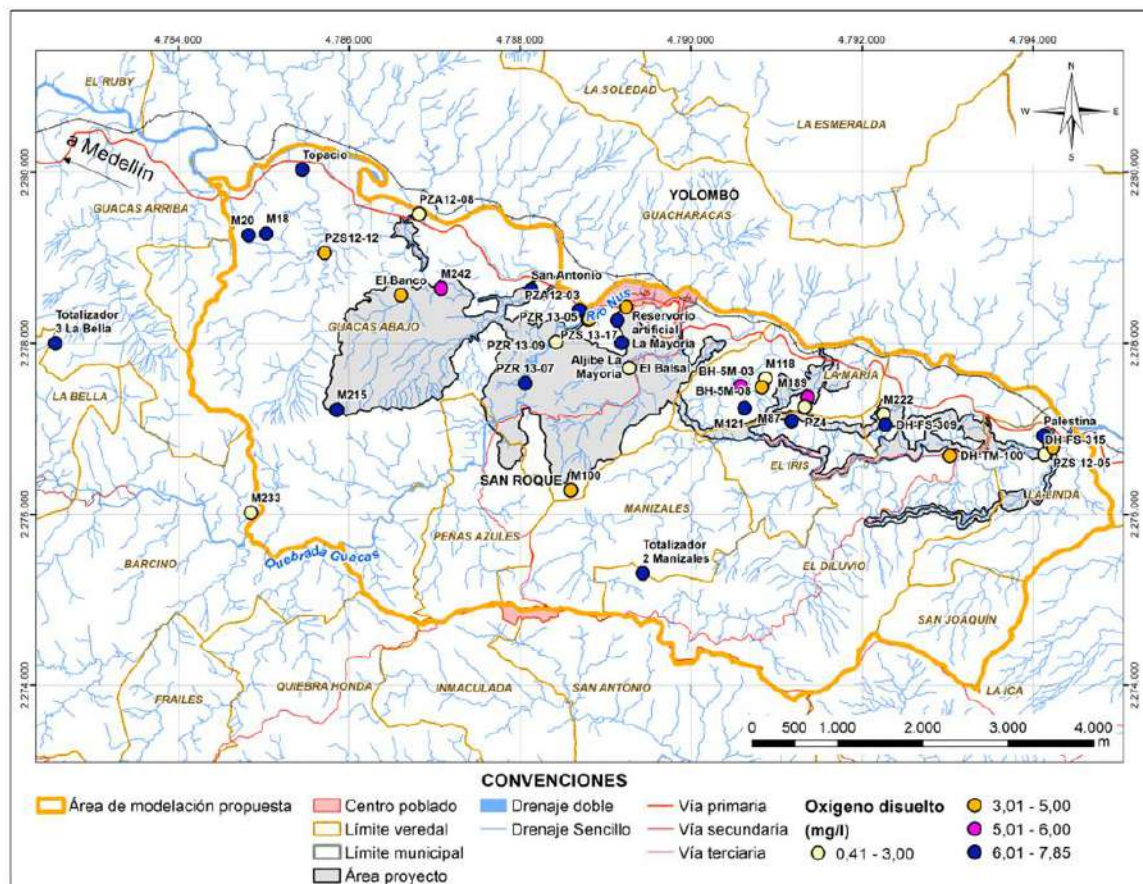


Figura 5.1.6.94 Distribución espacial del oxígeno disuelto los puntos de monitoreo.
Campaña 1. (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

b. Balance de electroneutralidad

El balance de electroneutralidad o iónico mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en miliequivalentes por litro [meq/l], determinados analíticamente y hace parte de un requerimiento mínimo que debe realizarse dentro de la evaluación del análisis químico para establecer que tan representativo es el muestreo en cuanto a las especies iónicas presentes en el agua. El error del balance iónico se calcula a partir de la Ecuación 5.1.6.8:

$$Error (\%) = \left(\frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} \right) * 100$$

Ecuación 5.1.6.8 Error del balance iónico

El balance se hace empleando los iones mayoritarios o más abundantes en el agua, que son bicarbonatos (que el laboratorio reporta en unidades de CaCO_3 y es llevado a unidades de HCO_3^-), cloruros, sulfatos, sodio, calcio, magnesio y potasio, dado que las mayores concentraciones iónicas en el agua son las de estos elementos. Adicionalmente, se

incluyen la concentración de hierro y nitratos debido a que se registran concentraciones importantes de estos parámetros.

Aunque la Guía Técnica Colombiana GTC 30 (ICONTEC, 2014) indica que se deben emplear únicamente aquellas muestras con un error analítico menor o igual al 10%, los rangos de error aceptable del balance iónico dependen del valor de conductividad eléctrica. Esto se debe a que, a menor conductividad eléctrica, el error aceptable en el balance iónico es mayor (Custodio & Llamas, 1975; MADS, 2014), tal como se presenta en la Tabla 5.1.6.50.

En este caso, los puntos M18, M20, PZR 13-07 y PZS 13-17 presentan un error de balance iónico superior al umbral del 10% establecido por la GTC 30. En particular, los puntos M18, M20 y PZS 13-17 registran errores del 17,09%, 11,39% y 10,76%, respectivamente, con valores de conductividad eléctrica de 75,7 $\mu\text{S/cm}$, 75,2 $\mu\text{S/cm}$ y 72,3 $\mu\text{S/cm}$. Al evaluar estos resultados en función del criterio de error aceptable basado en la conductividad eléctrica, se evidencia que en todos los casos el error es bajo y se encuentra dentro del rango permitido. En el caso específico del punto PZR 13-07 el cual presenta una conductividad eléctrica de 283 $\mu\text{S/cm}$, aunque el error de balance iónico es ligeramente superior al 10% (10,4%), este valor se considera aceptable y no representa una desviación significativa en la calidad de los datos debido a que no se evidencia la omisión de especies químicas relevantes que pudieran comprometer la interpretación de los resultados hidroquímicos. El error de balance de iónico aceptable se presenta en la Tabla 5.1.6.50 y en la Figura 5.1.6.95.

Tabla 5.1.6.50 Error aceptable de balance iónico según la conductividad eléctrica

Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	50	200	500	2000	>2000
Error aceptable (%)	± 30	± 10	± 8	± 4	± 4

Fuente: Custodio & Llamas, (1975)

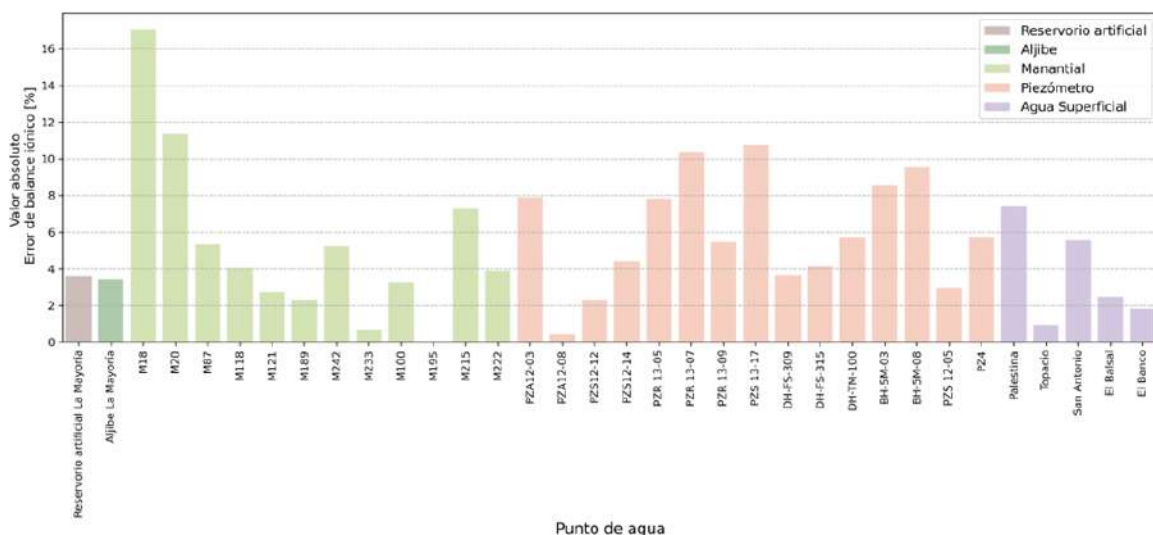


Figura 5.1.6.95 Valor absoluto del error de balance iónico en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Fuente: (SHI S.A.S., 2025)

c. Análisis hidrogeoquímico

A partir de los resultados del muestreo, se realizó una clasificación hidrogeoquímica de las muestras con base en sus principales componentes iónicos. Los cationes predominantes son sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), mientras que los aniones principales incluyen cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-). Para representar gráficamente la relación entre estos iones y facilitar su clasificación hidrogeoquímica, se emplean los diagramas de Stiff (Figura 5.1.6.96 a Figura 5.1.6.98) y Piper (Figura 5.1.6.99 a Figura 5.1.6.101).

En términos generales, se observa que el reservorio artificial La Mayoría y los puntos de agua superficial presentan un grado de mineralización bajo, donde los iones predominantes son sodio + potasio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) y bicarbonato (HCO_3^-). Al comparar con las aguas superficiales en el caso de las quebradas Palestina y El Balsal se evidencia que el grado de mineralización es ligeramente más elevado y, aunque el anión bicarbonato sigue siendo el predominante, en este caso el catión principal es el calcio (Ca^{2+}). Adicionalmente, la quebrada El Balsal presenta una mayor concentración de sulfatos respecto al resto de puntos analizados, lo que puede estar asociado a contaminación antrópica proveniente de minería artesanal.

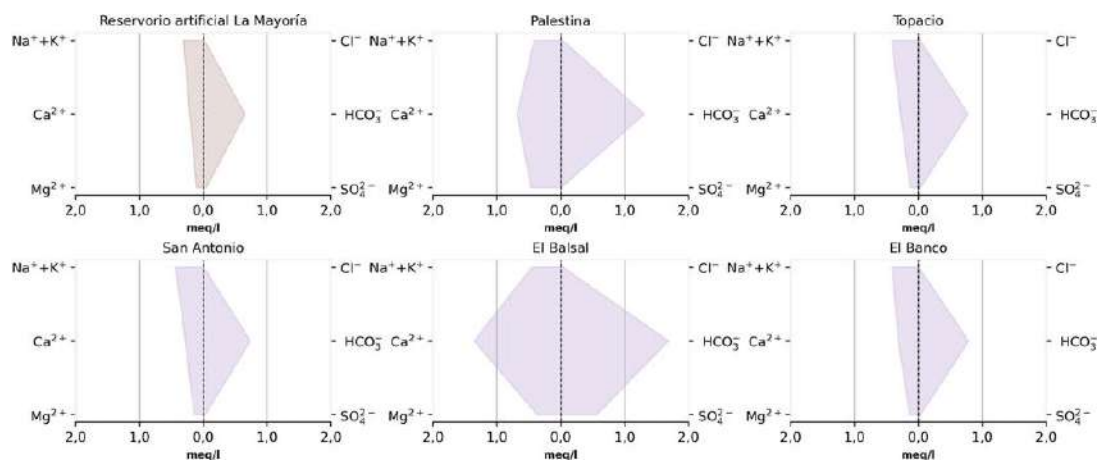


Figura 5.1.6.96 Diagramas de Stiff para el reservorio artificial y los puntos de agua superficial Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Al considerar los manantiales, se pueden observar dos grandes grupos. El primer grupo incluye los puntos M18, M20, M242 y M233, los cuales presentan un grado de mineralización muy baja y donde los iones principales corresponden a $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ y HCO_3^- , similar a lo evidenciado en el caso de la mayoría de los puntos de agua superficial. Esto sugiere que tienen un tiempo limitado de residencia en el medio subterráneo, posiblemente provenientes de infiltración de recarga reciente. El segundo grupo está integrado por los puntos M87, M118, M121, M189 y M222, caracterizados por un grado de mineralización más elevado y donde se observa una mayor concentración de los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} . El aljibe y los puntos M100 y M215 evidencian un grado de mineralización intermedia entre los dos grupos.

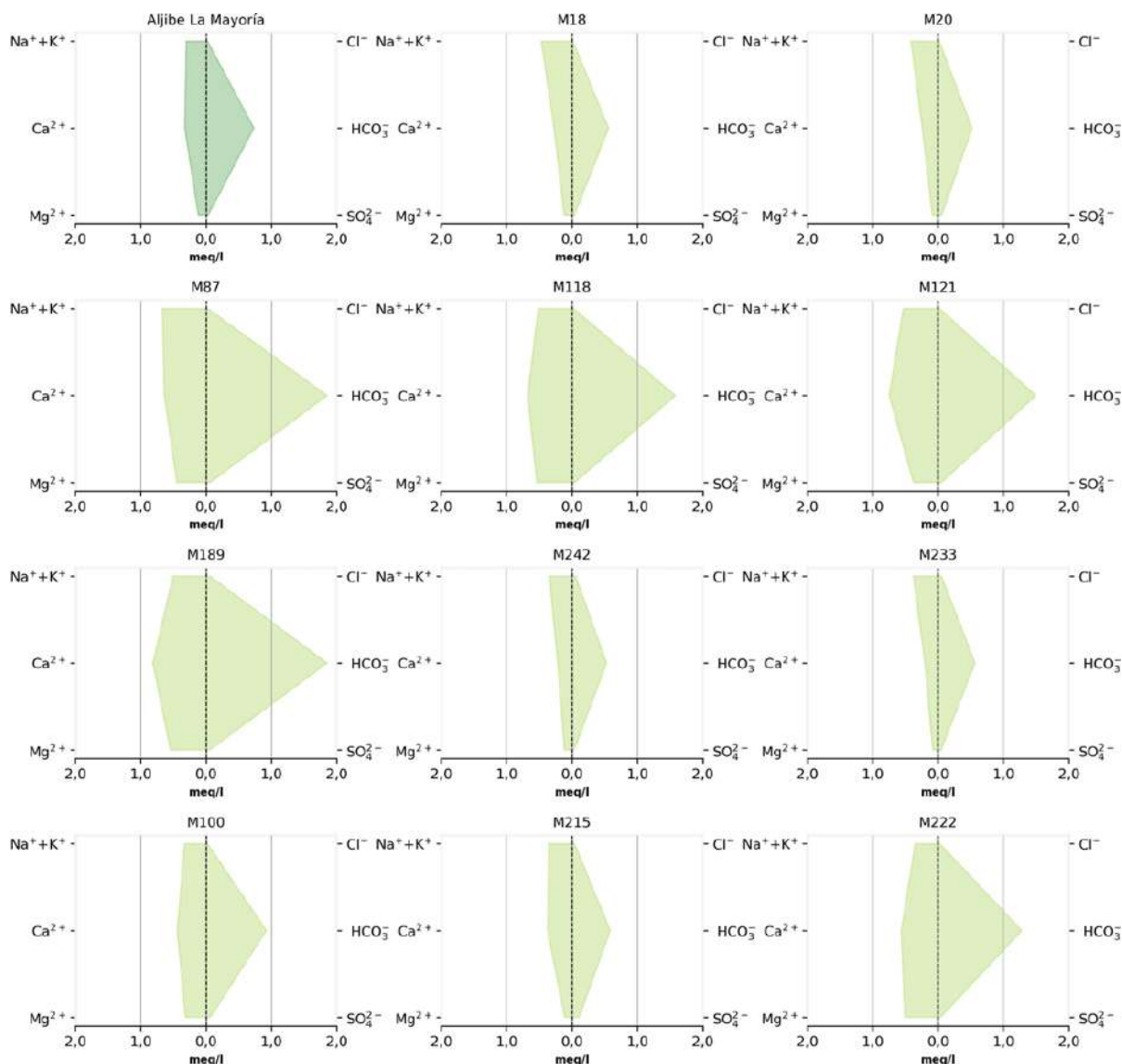


Figura 5.1.6.97 Diagramas de Stiff para el aljibe y manantiales. Campaña 1. Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Finalmente, en los piezómetros se observa una notable variabilidad en los diagramas de Stiff, a pesar de que en todos los casos el anión predominante es el bicarbonato (HCO_3^-). Los puntos PZS 12-12, PZR 13-05, PZR 13-07 y BH-5M-03 presentan un grado de mineralización moderado, con una mayor concentración de Ca^{2+} . Por su parte, los piezómetros BH-5M-08 y PZR 13-09, aunque exhiben una mineralización similar, muestran concentraciones más elevadas de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$.

En los puntos PZS 12-14, DH-FS-309 y DH-TM-100 se evidencia una menor mineralización, acompañada de una reducción en las concentraciones de Ca^{2+} respecto a $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. Los piezómetros DH-FS-315, PZS 12-05 y PZ4 se caracterizan por una disminución en las

concentraciones de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, mientras que los puntos restantes presentan los niveles de mineralización más bajos del conjunto analizado.

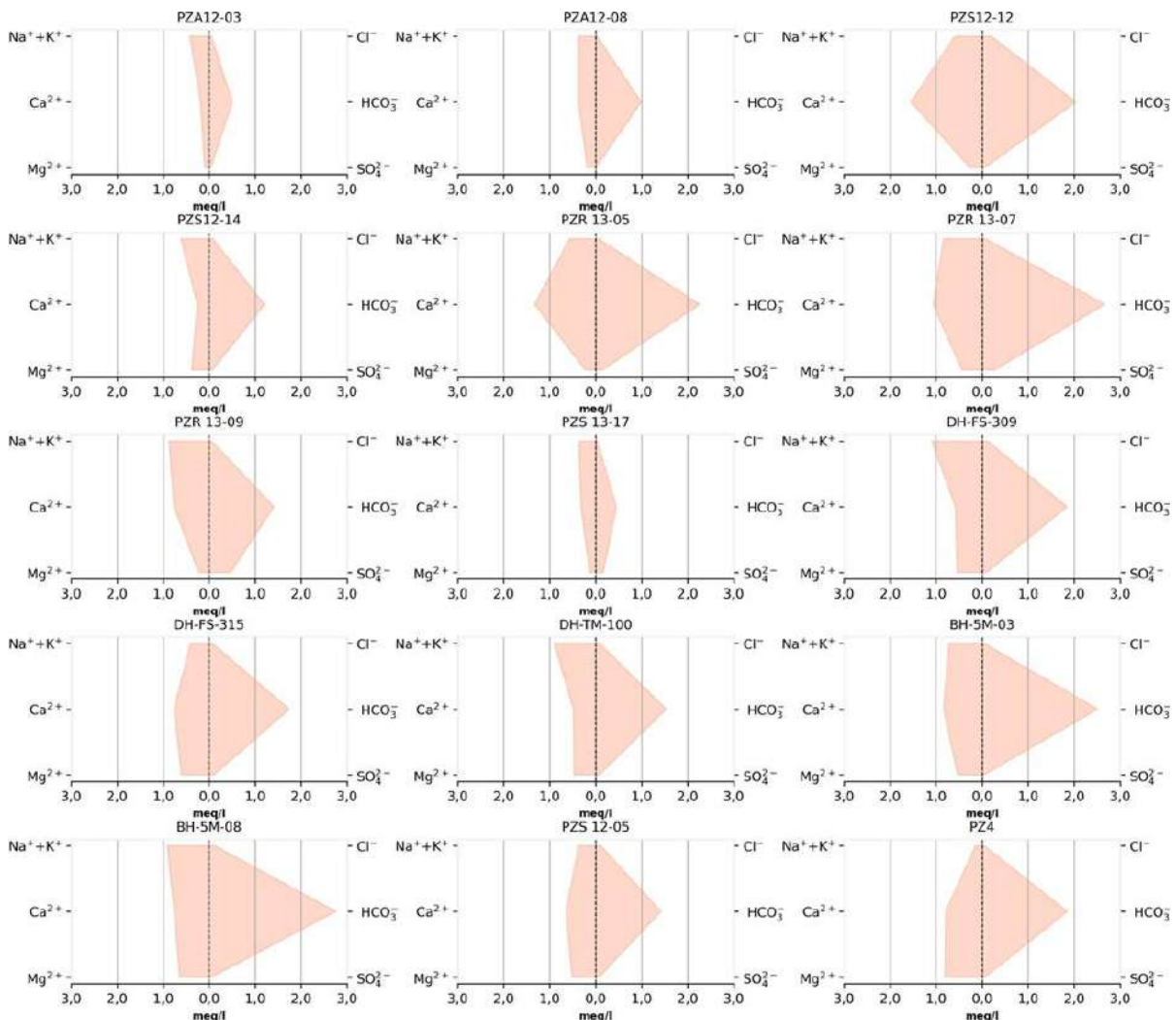


Figura 5.1.6.98 Diagramas de Stiff para los piezómetros. Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El análisis de la composición química de los distintos puntos de monitoreo evidencia un comportamiento relativamente homogéneo en cuanto a la predominancia de bicarbonato (HCO_3^-) como anión principal en todas las muestras (Tabla 5.1.6.51). Esta característica sugiere una influencia significativa de recarga reciente, como se ha mencionado previamente, debido a que las aguas infiltradas a partir de la precipitación suelen presentar este anión como componente mayoritario.

En relación con los cationes, se identifican tres grupos principales: la mayoría de las aguas no presentan un catión dominante, mientras que una proporción menor muestra una composición sódica y otra, en menor cantidad, cálcica. Las aguas bicarbonatadas sódicas, identificadas en algunos manantiales y piezómetros, presentan valores de conductividad eléctrica relativamente bajos, lo que indica una menor mineralización. Esto sugiere un

tiempo de residencia corto y una menor interacción con la matriz geológica, reforzando la hipótesis de recarga reciente.

Por otro lado, las muestras en las que predomina calcio no evidencian catión dominante, exhiben valores de conductividad eléctrica ligeramente más elevados, lo que indica un mayor grado de mineralización. Esto puede atribuirse a un tiempo de residencia más prolongado en el subsuelo, lo que favorece procesos de disolución de minerales y mayor evolución hidrogeoquímica antes de la descarga en manantiales o su captación en piezómetros.

Tabla 5.1.6.51 Clasificación hidrogeoquímica de los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Punto	Tipo	Catión	Anión	Clasificación
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Aljibe La Mayoría	Aljibe	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M18	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M20	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M87	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M118	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M121	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M189	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M242	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M233	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M100	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M215	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M222	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZA12-03	Piezómetro	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
PZA12-08	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS12-12	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS12-14	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZR 13-05	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZR 13-07	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZR 13-09	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica

Punto	Tipo	Catión	Anión	Clasificación
PZS 13-17	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
DH-FS-309	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
DH-FS-315	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
DH-TM-100	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
BH-5M-03	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
BH-5M-08	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS 12-05	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ4	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada Palestina	Agua Superficial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada Topacio	Agua Superficial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada El Banco	Agua Superficial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica

Fuente: SHI S.A.S, 2025

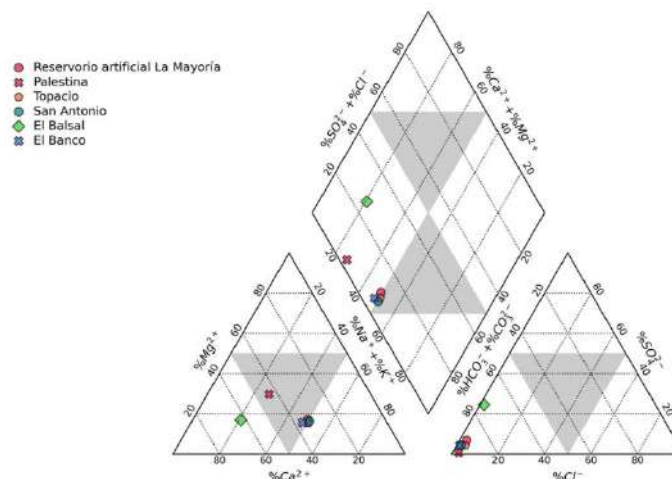


Figura 5.1.6.99 Diagrama de Piper para el reservorio artificial y puntos de agua superficial. Campaña 1. (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

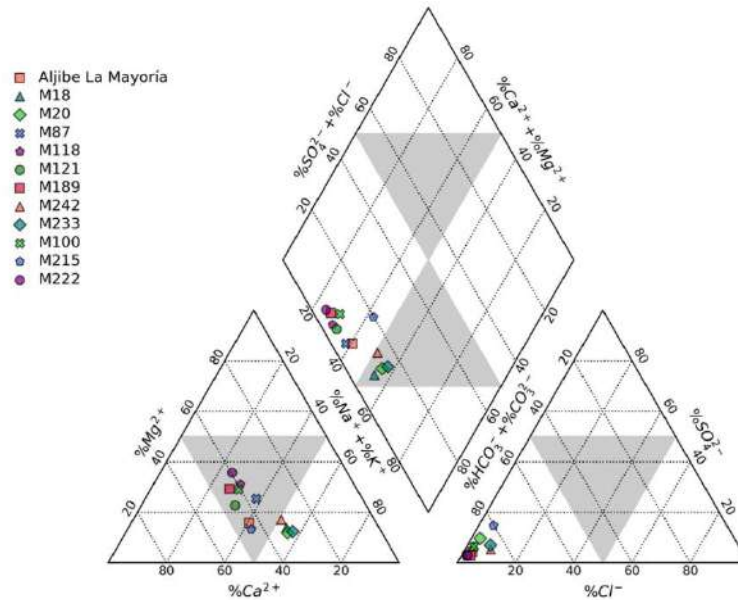


Figura 5.1.6.100 Diagrama de Piper para el aljibe y manantiales. Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

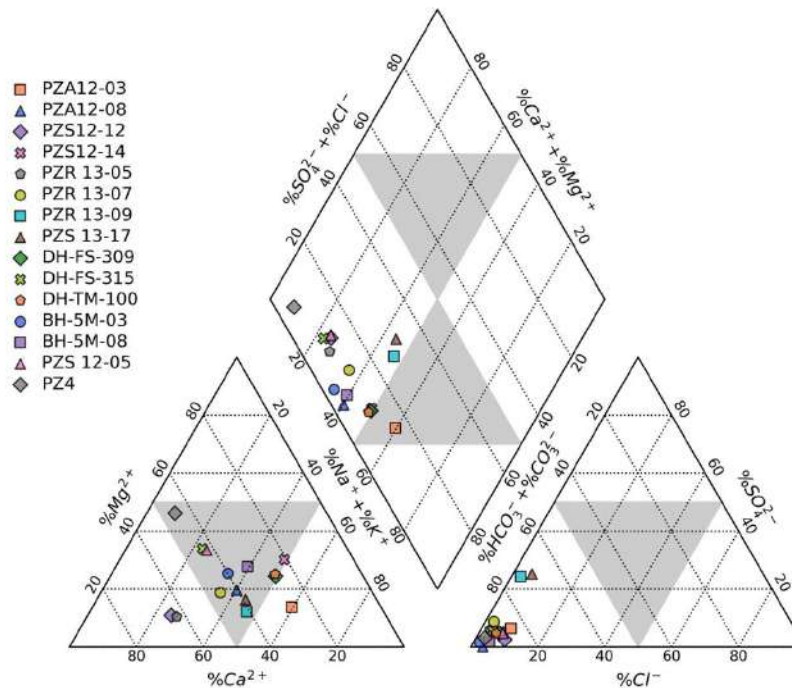


Figura 5.1.6.101 Diagrama de Piper para los piezómetros. Campaña 1. (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Aunque el área de estudio presenta una marcada homogeneidad litológica asociada al Batolito Antioqueño, las características hidrogeoquímicas evidenciadas pueden estar asociadas a la presencia del perfil de meteorización, al tránsito del agua a través del macizo rocoso fracturado y la presencia de depósitos aluviales y de vertiente, desde donde también afloran algunos de los puntos monitoreados, tal como se presenta a continuación.

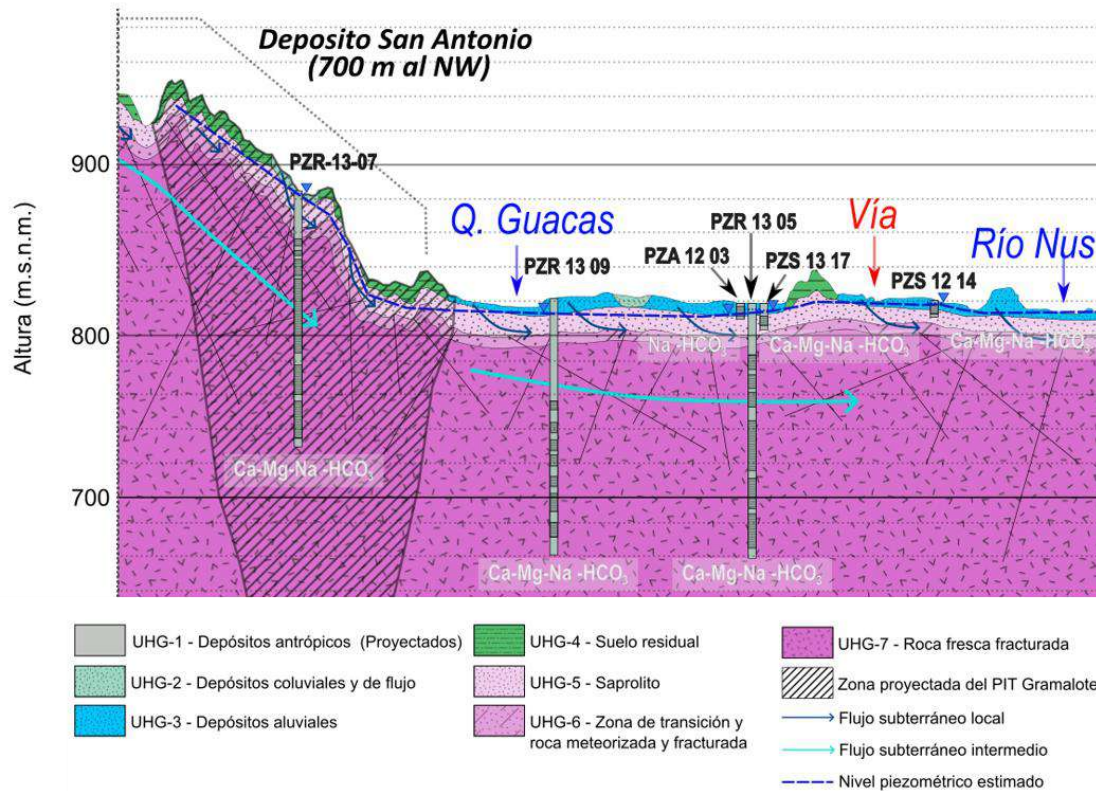


Figura 5.1.6.102 Perfil esquemático con las facies hidroquímicas de algunos puntos de monitoreo.

Fuente: SHI S.A.S, 2025.

En todo el sistema predominan aguas bicarbonatadas con baja mineralización, reflejado en valores de conductividad eléctrica inferiores a los 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, incluso en los piezómetros más profundos. Esto es el resultado de la interacción del agua de recarga reciente, cargada de dióxido de carbono atmosférico y del suelo, con los silicatos presentes en estos horizontes del Batolito Antioqueño. El agua de la recarga, al interactuar con los minerales del suelo y los depósitos, experimenta procesos de intercambio catiónico e hidrólisis inicial. Esto ocasiona que el sodio y el potasio aumenten su proporción respecto a los demás cationes.

La aparición de facies bicarbonatadas cálcicas o de aguas sin catión dominante, asociadas a conductividades ligeramente mayores, marca la transición hacia zonas de flujo de mayor recorrido o a través de la red de fracturas del basamento rocoso fracturado. Al profundizar el agua en el macizo rocoso, la hidrólisis de las plagioclasas ricas en calcio y de los anfíboles o biotitas incrementa progresivamente las concentraciones de calcio y magnesio.

Este enriquecimiento catiónico refleja una evolución hidrogeoquímica más avanzada dentro de la matriz fracturada del batolito.

La mayoría de las muestras analizadas se ubican en el cuadrante de aguas de recarga reciente (Ca-Mg-HCO₃), con algunos puntos que se desplazan ligeramente hacia el límite del eje de intercambio iónico (Na-HCO₃), la como se presenta en la siguiente figura. La ausencia total de puntos en los campos de aguas salinas (Na-Cl) o de intercambio iónico inverso (Ca-Mg-Cl) se alinea con lo concluido previamente, de forma que el agua subterránea de la zona de estudio corresponde a un flujo somero y local, donde las variaciones catiónicas responden al tránsito entre el perfil de meteorización (suelo residual y saprolito), depósitos aluviales y de vertiente y la red de fracturas del basamento rocoso.

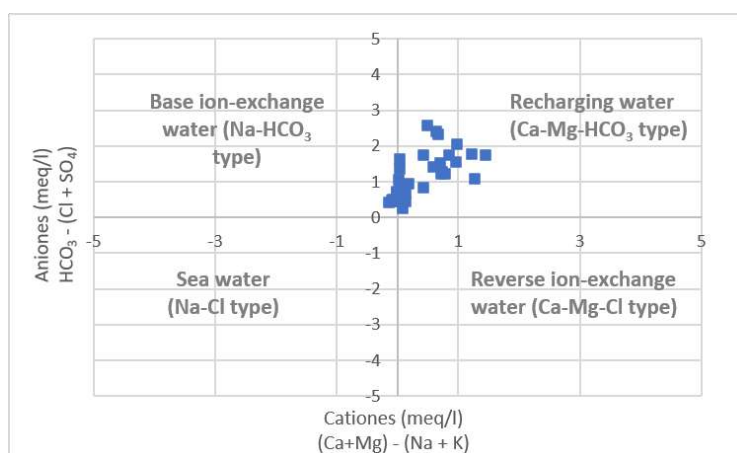


Figura 5.1.6.103 Diagrama de Chadha. Campaña 1. (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025.

A continuación, en la Figura 5.1.6.104 hasta la Figura 5.1.6.110 se presentan las isoconcentraciones de los iones mayoritarios para la campaña 1:

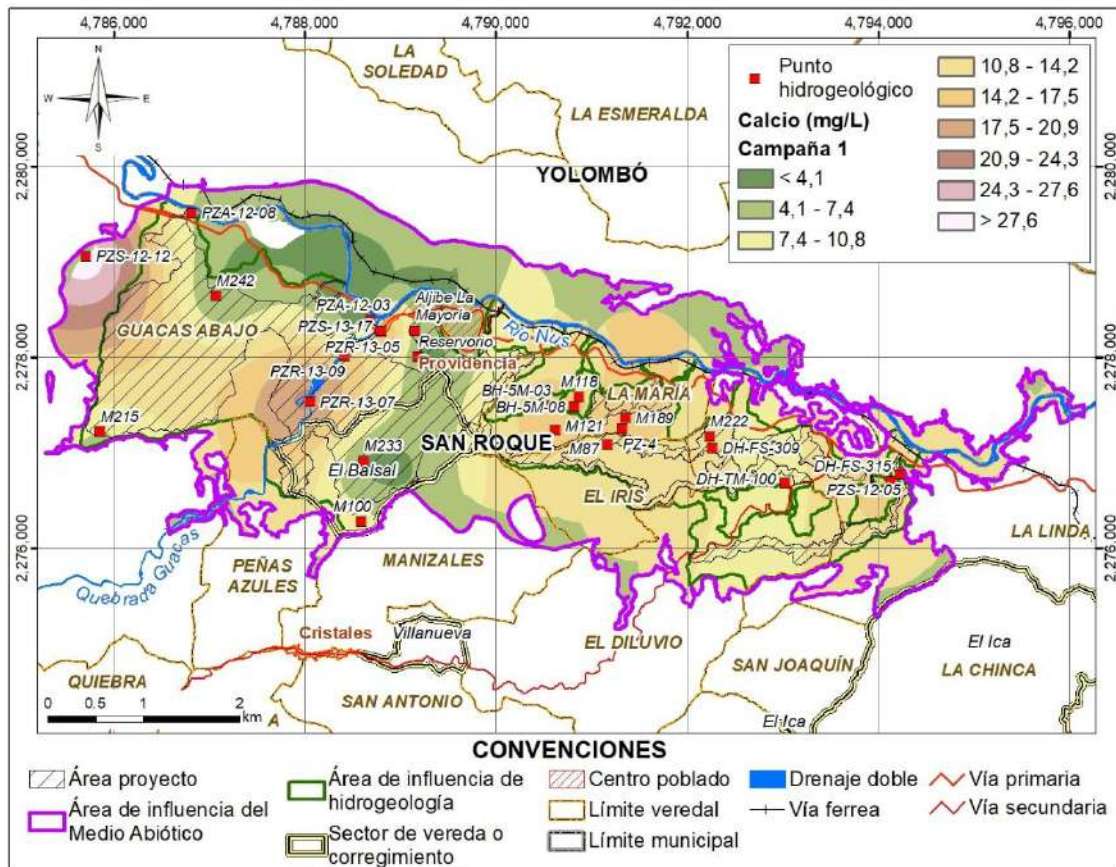


Figura 5.1.6.104 Isoconcentraciones de Calcio - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

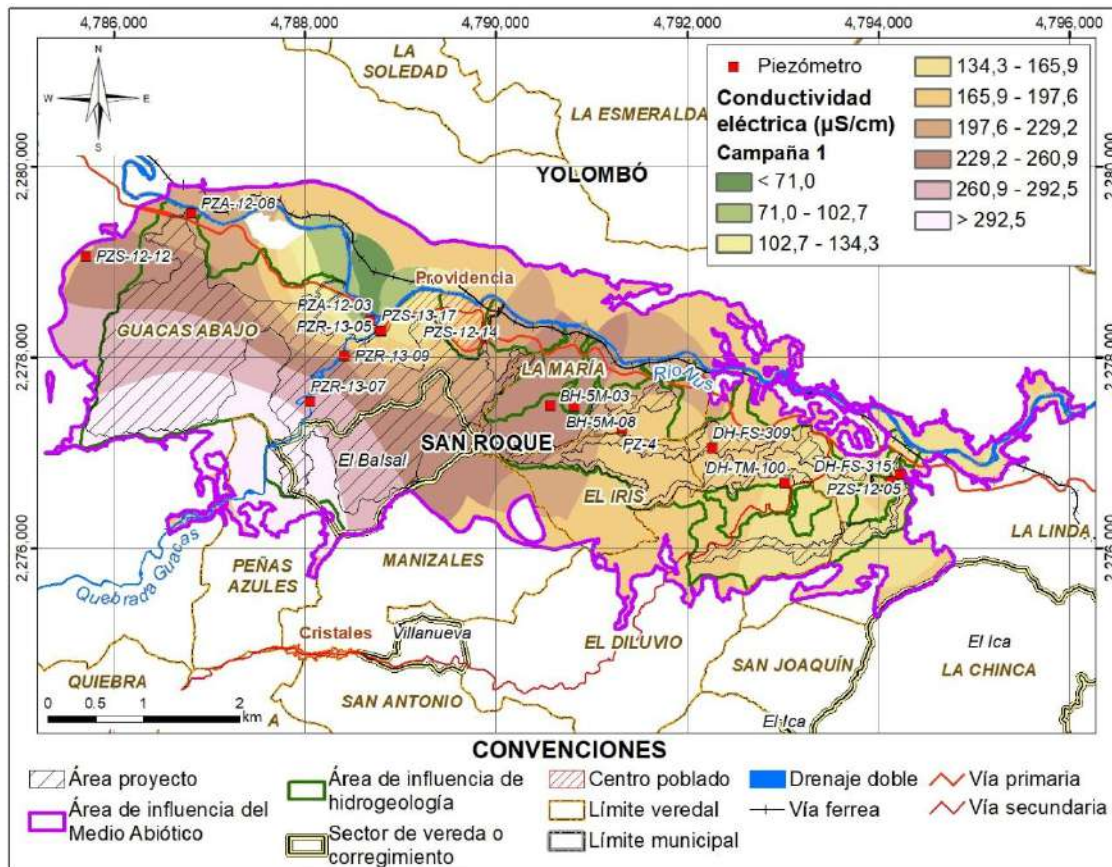


Figura 5.1.6.105 Isoconcentraciones de Conductividad eléctrica - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

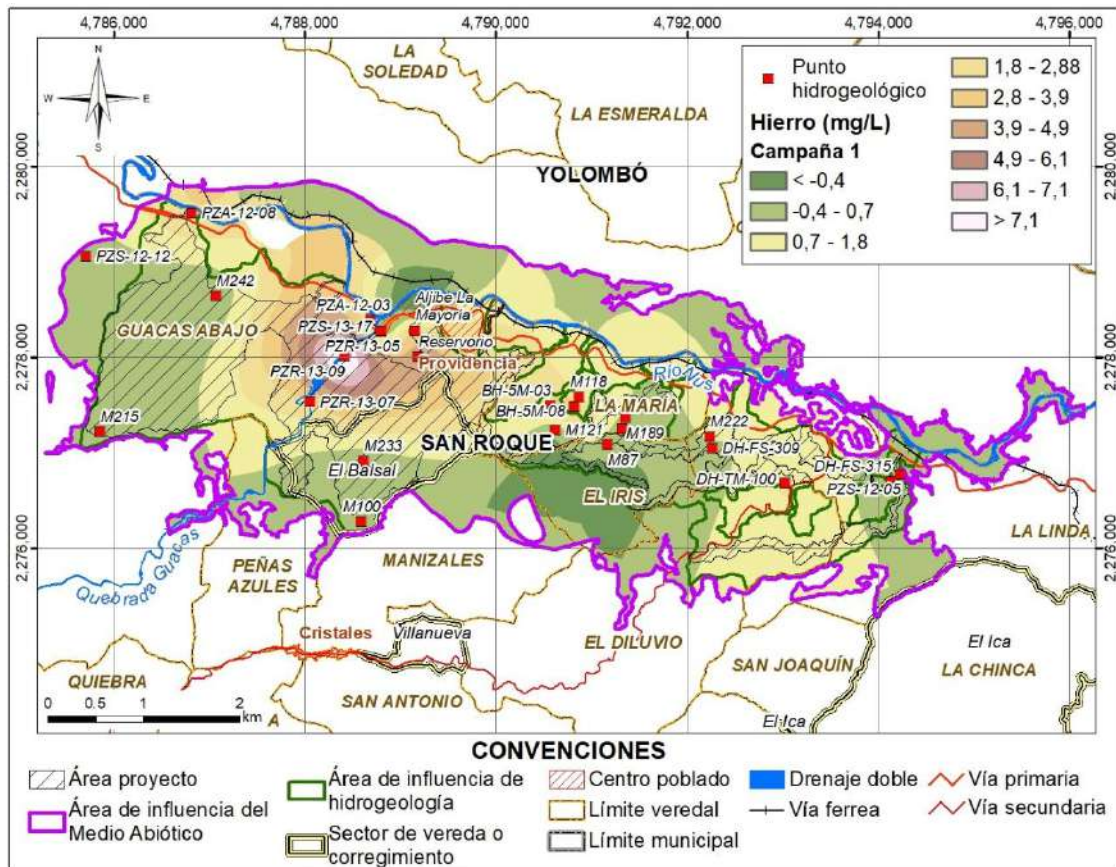


Figura 5.1.6.106 Isoconcentraciones de hierro - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

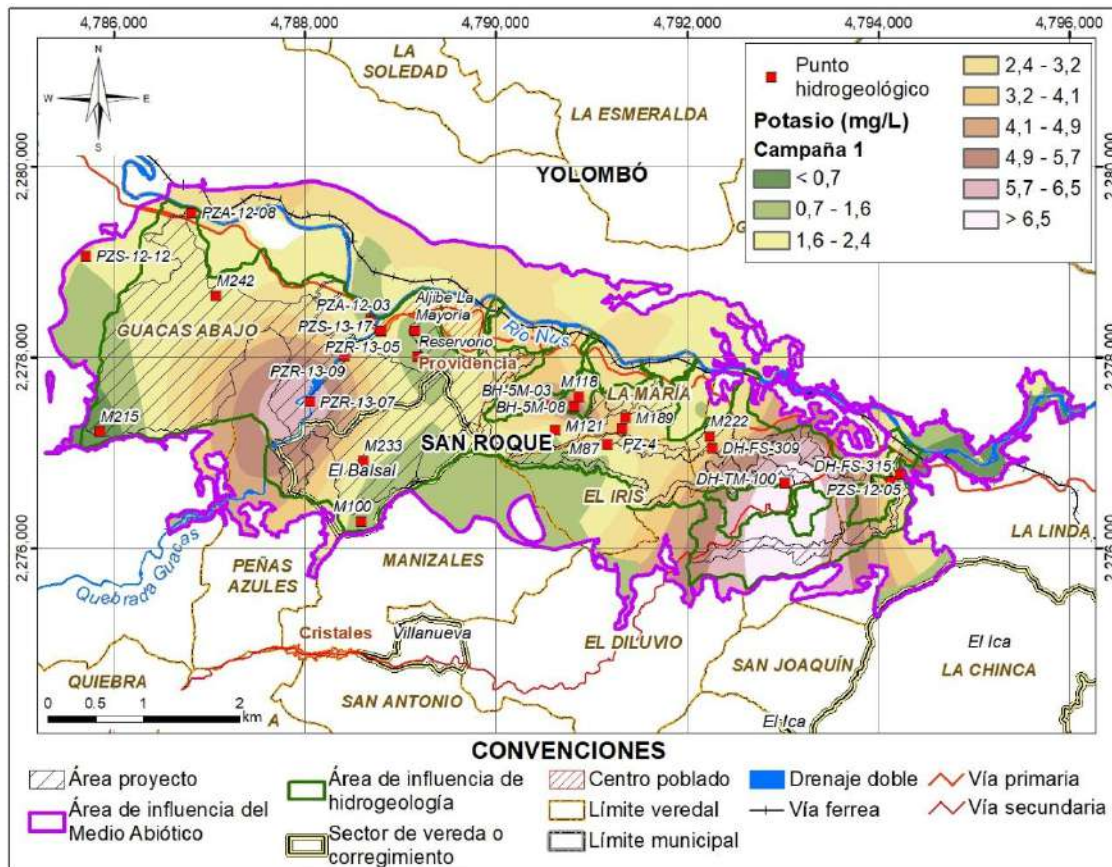


Figura 5.1.6.107 Isoconcentraciones de potasio - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

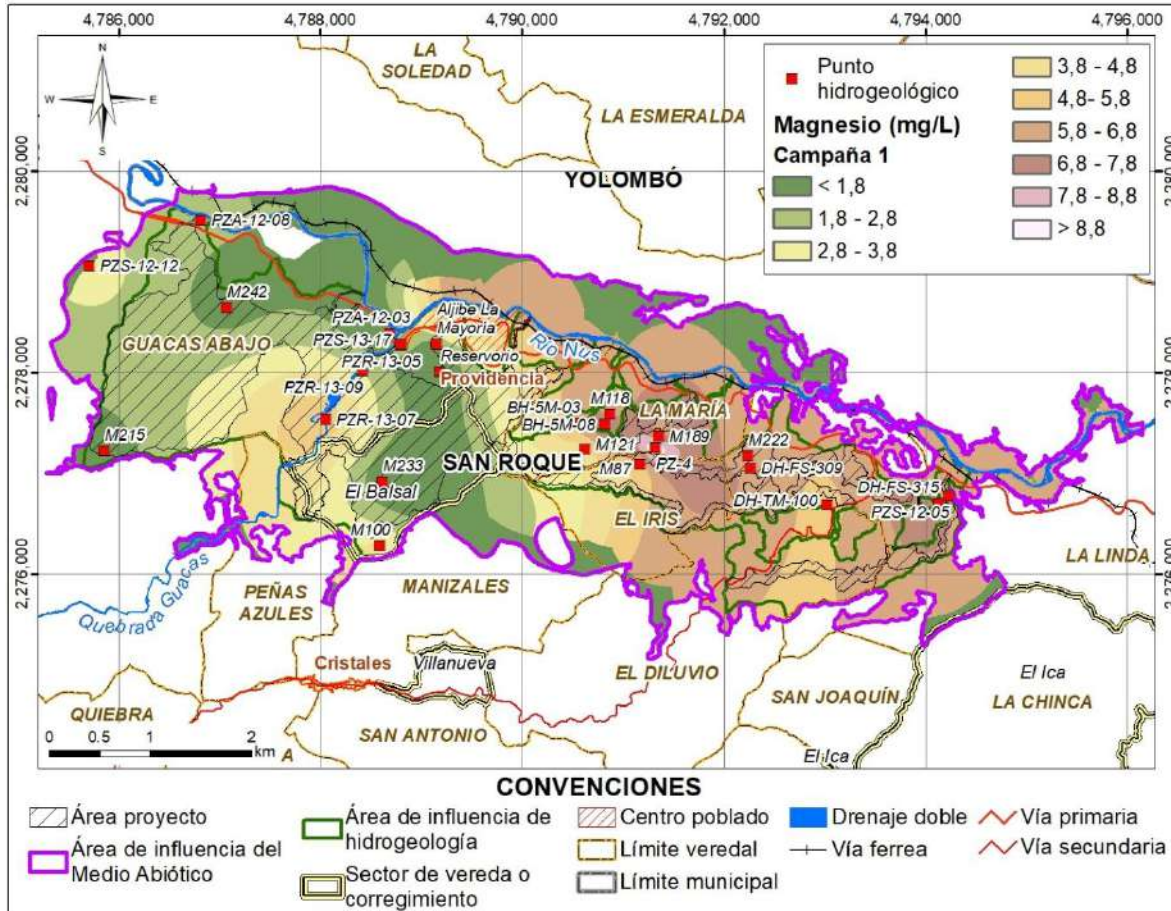


Figura 5.1.6.108 Isoconcentraciones de magnesio - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

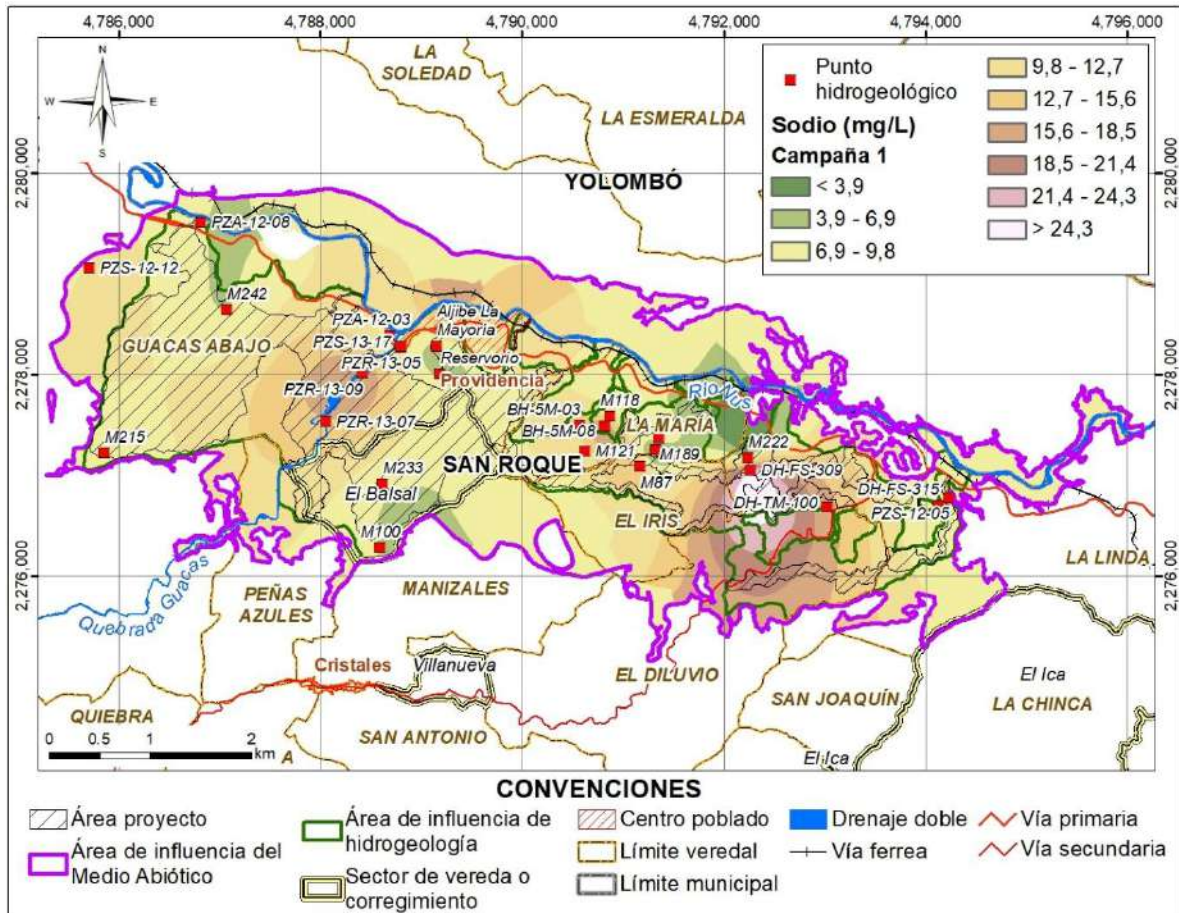


Figura 5.1.6.109 Isoconcentraciones de sodio - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

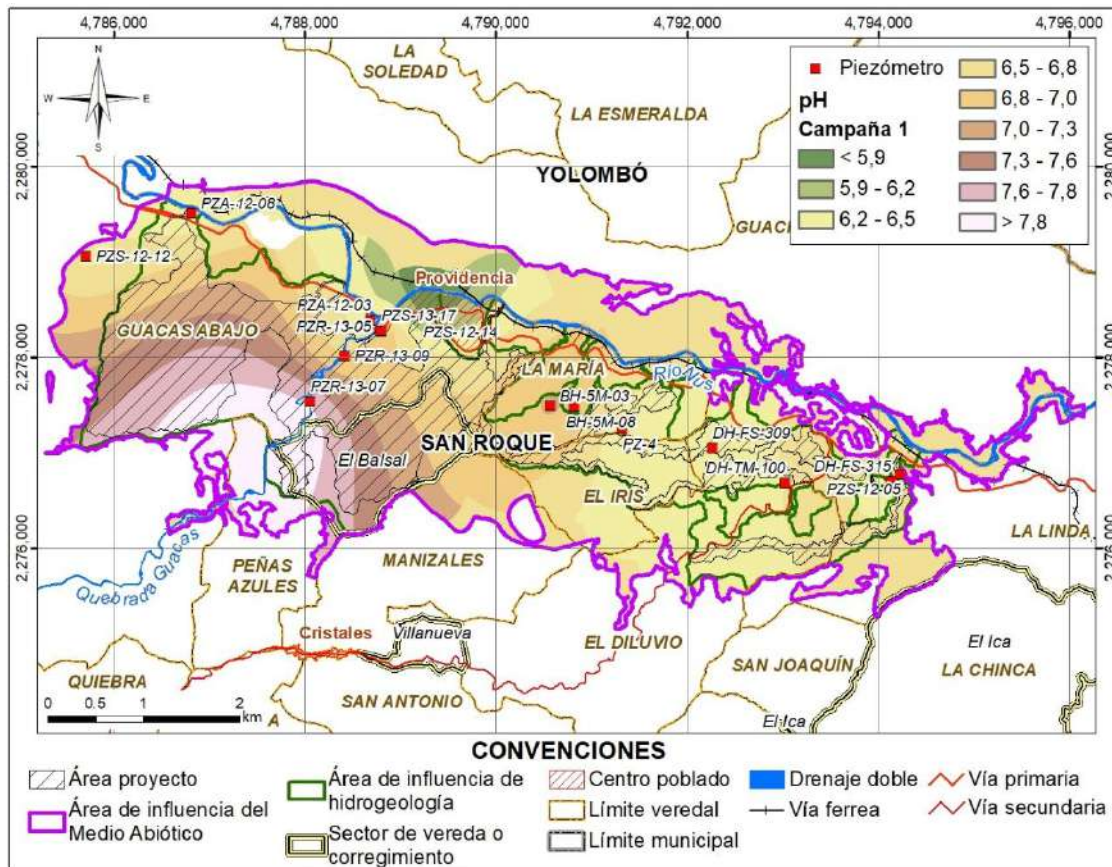


Figura 5.1.6.110 Isoconcentraciones de pH - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

C. Monitoreo hidrogeoquímico – campaña 2, mayo 2025

Entre el 4 y el 20 de mayo de 2025 se llevó a cabo la segunda campaña de monitoreo hidroquímico. Durante esta jornada también se realizó la medición in situ de parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. Asimismo, se recolectaron muestras de agua para análisis en laboratorio, con el objetivo de determinar las concentraciones de iones mayoritarios, así como parámetros microbiológicos, grasas, aceites e hidrocarburos. Es importante mencionar que el manantial M195 no presentaba flujo al momento del muestreo. En la Tabla 5.1.6.52 y Tabla 5.1.6.53 se presentan los resultados del muestreo hidroquímico y microbiológico respectivamente.

Al igual que en la campaña de febrero de 2025, la mayoría de los puntos de muestreo no presentan concentraciones detectables de grasas y aceites ni de hidrocarburos totales, lo cual indica una baja presencia de este tipo de compuestos en el sistema hidrogeológico. No obstante, se identificaron valores en el manantial M18, el piezómetro DH-FS-315 y la quebrada Palestina, lo que sugiere fuentes puntuales de contaminación de origen antrópico.

En cuanto a los nitratos, las concentraciones en la mayoría de los puntos se encuentran por debajo del límite de detección. Sin embargo, se destacan los puntos PZS 12-12 y DH-FS-

309, donde se registran las concentraciones más elevadas. Al igual que en la campaña previa, esto podría estar relacionado con infiltración de aguas residuales domésticas, uso de fertilizantes o procesos de lixiviación desde suelos agrícolas, lo que indica una posible influencia antrópica local.

El análisis de los parámetros microbiológicos evidencia que todos los puntos de muestreo registran presencia de algún tipo de microorganismo indicador de contaminación, aunque en magnitudes variables dependiendo del tipo de punto analizado.

En los puntos de agua superficial, se observaron las concentraciones más altas de coliformes totales en las quebradas Topacio y El Balsal, lo cual concuerda con lo observado en la primera campaña e indica altos niveles de contaminación microbiológica. Asimismo, los valores de *Escherichia coli* son significativamente elevados en estos puntos, así como en la quebrada Palestina, sugiriendo una fuerte influencia de descargas de aguas residuales o escorrentía contaminada.

En el caso de los manantiales, se observa una amplia variabilidad en la calidad microbiológica del agua. Los puntos M189, M118 y M87 presentan concentraciones extremadamente altas de coliformes totales (> 100.000 NMP/100 ml) y niveles elevados de *E. coli* y coliformes termotolerantes, lo que evidencia una contaminación fecal considerable y posiblemente reciente. En contraste, manantiales como M20 y M242 muestran niveles no detectables o muy bajos de estos parámetros, lo cual sugiere una menor exposición a fuentes de contaminación. No obstante, la variabilidad entre campañas indica que las condiciones de calidad del agua en estos manantiales no son estables en el tiempo, y pueden verse afectadas por la dinámica de recarga o actividades externas (domésticas y ganadería).

En los piezómetros, al igual que en la campaña previa, se registra en general una contaminación microbiológica menor en comparación con aguas superficiales y manantiales. No obstante, algunos puntos como PZR 13-05, BH-5M-08 y PZ4 muestran valores elevados de coliformes totales (> 100.000 NMP/100 ml), lo que sugiere una posible conexión con fuentes superficiales contaminadas. En contraste, piezómetros como PZS12-12, PZS12-14, PZR 13-07 y PZA12-08 exhiben valores bajos o no detectables de *E. coli* y coliformes termotolerantes.

En el caso del aljibe La Mayoría, es posible observar niveles intermedios de los parámetros microbiológicos, reflejando una cierta vulnerabilidad, pero sin alcanzar los niveles observados en aguas superficiales. Finalmente, a diferencia de la campaña anterior, el reservorio artificial La Mayoría mostró un incremento en los coliformes totales, aunque sin evidencia de contaminación fecal significativa.

Tabla 5.1.6.52 Resultados de laboratorio de los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)

Nombre del punto	Alcalinidad a la finafteína (mg CaCO ₃ /l)	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Carbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Grasas y aceites (mg GyA/l)	Hidrocarburos totales (mg Hidrocarburos/l)	Sólidos Disueltos Totales (mg SDT/l)	Cloruros (mg Cl/l)	Nitratos (mg N/l)	Sulfatos (SO ₄ /l)	Calcio Disuelto (mg/l)	Hierro Disuelto (mg/l)	Magnesio Disuelto (mg/l)	Potasio Disuelto (mg/l)	Sodio Disuelto (mg/l)	Error de balance iónico (%)
Reservorio artificial La Mayoría	<1,89	36,75	36,75	<4,00	<0,20	<0,20	38	0,79	<1.129	0,96	6,68	1,81	1,84	1,12	7,21	6,86
Aljibe La Mayoría	<1,89	34,69	34,69	<4,00	<0,20	<0,20	37	2,54	<1.129	1,26	5,76	0,212	1,11	1,27	8,25	-0,89
M18	<1,89	36,17	37,17	<4,00	0,64	<0,20	19	16,17	<1.129	5,05	6,73	0,096	1,89	2,87	11,3	-10,36
M20	<1,89	37,39	37,39	<4,00	<0,20	<0,20	19	3,19	<1.129	3,38	6,43	0,105	1,56	1,14	12,8	6,71
M87	<1,89	91,82	91,82	<4,00	<0,20	<0,20	83	0,42	<1.129	2,1	15,031	<0,090	5,753	2,298	15,068	1,19
M118	<1,89	76,13	76,13	<4,00	<0,20	<0,20	50	1,71	<1.129	1,5	10,574	0,435	6,208	1,466	7,906	-5,49
M121	<1,89	82,13	82,13	<4,00	<0,20	<0,20	57	0,88	<1.129	3,26	12,359	<0,090	4,118	1,992	12,018	-6,31
M189	<1,89	80,72	80,44	<4,00	<0,20	<0,20	56	0,54	<1.129	1,86	15,1	<0,090	6,21	2,41	8,17	0,56
M242	<1,89	25,13	25,13	<4,00	<0,20	<0,20	22	6,55	<1.129	0,91	3,746	0,22	1,306	1,489	5,908	-8,36
M233	<1,89	23,33	23,25	<4,00	<0,20	<0,20	94	0,32	<1.129	1,24	4,191	<0,090	0,925	1,532	5,842	7,30
M100	<1,89	53,25	53,06	<4,00	<0,20	<0,20	38	1,61	<1.129	4,47	8,994	<0,090	3,987	1,113	7,838	-2,28
M195	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M215	<1,89	35	35	<4,00	<0,20	<0,20	19	1,42	<1.129	5,2	8,52	0,266	1,5	0,346	9,4	6,99
M222	<1,89	70,75	70,75	<4,00	<0,20	<0,20	48	2,45	<1.129	4,32	10,612	0,188	6,226	1,973	6,925	-5,84
PZA12-03	<1,89	67,39	67,39	<4,00	<0,20	<0,20	47	2,66	<1.129	1,75	15,823	<0,090	2,34	3,126	16,889	10,36
PZA12-08	<1,89	46,12	46,12	<4,00	<0,20	<0,20	24	6,05	<1.129	4,03	6,523	13,668	1,837	2,835	3,593	0,76
PZS12-12	<1,89	93,91	93,91	<4,00	<0,20	<0,20	50	1,54	1,2	3,98	26,6	0,964	3,16	1,71	15,6	7,81
PZS12-14	<1,89	54,94	54,94	<4,00	<0,20	<0,20	60	3,78	<1.129	2	3,36	<0,090	3,78	1,51	15,8	-1,73

Nombre del punto	Alcalinidad a la finalftaleina (mg CaCO ₃ /l)	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Carbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Grasas y aceites (mg GyAl)	Hidrocarburos totales (mg Hidrocarburos/l)	Solidos Disueltos Totales (mg SD T/l)	Cloruros (mg Cl/l)	Nitratos (mg N/l)	Sulfatos (SO ₄ /l)	Calcio Disuelto (mg/l)	Hierro Disuelto (mg/l)	Magnesio Disuelto (mg/l)	Potasio Disuelto (mg/l)	Sodio Disuelto (mg/l)	Error de balance iónico (%)
PZR 13-05	<1,89	117,56	117,56	<4,00	<0,20	<0,20	127	2,87	<1.129	6,83	35,7	<0,090	3,49	3,72	15,5	4,87
PZR 13-07	<1,89	140,06	140,06	<4,00	<0,20	<0,20	169	1,33	<1.129	18,37	45,2	<0,090	3,61	3,27	14,3	0,57
PZR 13-09	<1,89	31,04	31,04	<4,00	<0,20	<0,20	15	3,72	<1.129	1,57	2,785	6,025	0,945	1,169	7,874	2,97
PZS 13-17	<1,89	35,63	35,63	<4,00	<0,20	<0,20	48	3,97	<1.129	6,94	8,47	<0,090	2,1	2,16	9,83	5,33
DH-FS-309	<1,89	96,34	96,34	<4,00	<0,20	<0,20	76	2,27	1,3	4,32	12,58	0,109	5,82	3,389	21,791	1,52
DH-FS-315	<1,89	101,98	101,63	<4,00	0,26	<0,20	83,333	0,31	<1.129	2,04	16,811	2,164	9,081	3,17	7,366	-0,45
DH-TM-100	<1,89	80	80	<4,00	<0,20	<0,20	38	5,48	<1.129	2,67	14,8	0,094	7,99	3,19	11,1	4,07
BH-5M-03	<1,89	132,75	132,75	<4,00	<0,20	<0,20	109	1,49	<1.129	1,65	47,5	<0,090	4,99	1,68	5,87	5,99
BH-5M-08	<1,89	117,38	117,38	<4,00	<0,20	<0,20	96	1,41	<1.129	1,33	32,2	<0,090	4,8	2,4	6,14	-1,79
PZS 12-05	<1,89	69,99	69,75	<4,00	<0,20	<0,20	53	2,16	<1.129	3,46	15,785	<0,090	6,719	1,654	11,304	10,19
PZ4	<1,89	96,9	96,56	<4,00	<0,20	<0,20	71	0,21	<1.129	1,59	15,1	0,139	8,14	3,79	9,45	-0,87
Quebrada Palestina	<1,89	65,57	64,57	<4,00	0,42	<0,20	33	4,96	<1,129	1,09	14,7	0,266	6,77	3,04	9,44	10,32
Quebrada Topacio	<1,89	38,04	38,04	<4,00	<0,20	<0,20	18	3,36	<1,129	2,43	5,98	0,523	1,87	1,91	11,3	5,49
Quebrada San Antonio	<1,89	40,88	40,88	<4,00	<0,20	<0,20	24	4,17	<1,129	1,31	6,9	0,507	2,75	2,3	10,4	6,66
Quebrada El Balsal	<1,89	52,68	52,5	<4,00	<0,20	<0,20	22	0,61	<1,129	37,46	21,88	0,308	3,772	2,898	5,659	-3,19
Quebrada El Banco	<1,89	40,69	40,69	<4,00	<0,20	<0,20	21	4,88	<1,129	1,38	6,77	0,305	1,9	1,75	8,54	-3,10

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Tabla 5.1.6.53 Resultados de parámetros microbiológicos de los puntos de monitoreo. Campaña 2

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Coliformes totales	Escherichia Coli	Coliformes Termotolerantes
		[dd/mm/aa]	NPM/100 ml	NPM/100 ml	NPM/100 ml
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	12/5/2025	38100	1	1
Aljibe La Mayoría	Aljibe	12/5/2025	1850	63	63
M18	Manantial	5/5/2025	1830	388	459
M20	Manantial	5/5/2025	3010	<1	<1
M87	Manantial	19/5/2025	110600	520	520
M118	Manantial	14/5/2025	197000	2000	2000
M121	Manantial	13/5/2025	93500	840	1200
M189	Manantial	15/5/2025	770100	4960	6870
M242	Manantial	9/5/2025	3873	1	1
M233	Manantial	19/5/2025	16100	100	100
M100	Manantial	18/5/2025	1723	20	20
M195	Manantial	Seco	--	--	--
M215	Manantial	8/5/2025	17850	31	63
M222	Manantial	6/5/2025	198630	2950	3310
PZA12-03	Piezómetro	16/5/2025	3230	100	310
PZA12-08	Piezómetro	7/5/2025	100	<1	<1
PZS12-12	Piezómetro	4/5/2025	265	<1	<1
PZS12-14	Piezómetro	4/5/2025	51	1	1
PZR 13-05	Piezómetro	12/5/2025	241960	1	2
PZR 13-07	Piezómetro	11/5/2025	1190	<1	<1
PZR 13-09	Piezómetro	11/5/2025	216	100	200
PZS 13-17	Piezómetro	7/5/2025	6131	10	10
DH-FS-309	Piezómetro	11/5/2025	3680	100	100
DH-FS-315	Piezómetro	16/5/2025	6750	20	20

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Coliformes totales	Escherichia Coli	Coliformes Termotolerantes
		[dd/mm/aa]	NPM/100 ml	NPM/100 ml	NPM/100 ml
DH-TM-100	Piezómetro	18/5/2025	21430	122	148
BH-5M-03	Piezómetro	4/5/2025	7400	200	750
BH-5M-08	Piezómetro	13/5/2025	107600	41	359
PZS 12-05	Piezómetro	14/5/2025	61310	100	1000
PZ4	Piezómetro	18/5/2025	116000	30	30
Quebrada Palestina	Agua Superficial	20/5/2025	41060	1019	2909
Quebrada Topacio	Agua Superficial	5/5/2025	1119900	1460	92080
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	6/5/2025	22820	41	63
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	8/5/2025	120330	4352	5172
Quebrada El Banco	Agua Superficial	19/5/2025	16790	52	63

Fuente: SHI S.A.S, 2025

a. Parámetros fisicoquímicos

Como ya se mencionó, la medición de parámetros in situ, como el oxígeno disuelto, el pH y la conductividad eléctrica, es fundamental para caracterizar las condiciones fisicoquímicas del sistema hidrogeológico y entender procesos como la interacción agua-roca, posibles aportes antrópicos y la dinámica del flujo subterráneo. Aunque los totalizadores no hacen parte de la red de monitoreo, sus datos se incluyen por su valor complementario en el análisis de las interacciones entre la precipitación y las aguas superficiales y subterráneas. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo se presentan en la Tabla 5.1.6.54.

Tabla 5.1.6.54 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 2

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temp .	pH	Oxígeno disuelto	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	°C	U. de pH	mg/l	µS/cm
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	12/5/2025	27,1	6,78	2,87	64,1
Aljibe La Mayoría	Aljibe	12/5/2025	25,4	6,52	1,24	61,4
M18	Manantial	5/5/2025	22,8	7,43	6,99	73,4
M20	Manantial	5/5/2025	23,1	7,5	7,18	73,5
M87	Manantial	19/5/2025	24,3	7,01	6,44	162,1
M118	Manantial	14/5/2025	24,1	6,97	3,76	134,8
M121	Manantial	13/5/2025	26,0	7,75	6,53	174,6
M189	Manantial	15/5/2025	24,2	7,81	7,35	140,3
M242	Manantial	9/5/2025	24,0	7,11	5,93	43,7
M233	Manantial	19/5/2025	24,2	7,42	7,36	45,5
M100	Manantial	18/5/2025	22,8	6,26	4,57	99,5
M195	Manantial	Seco	-	-	-	-
M215	Manantial	8/5/2025	22,7	6,93	6,89	70,7
M222	Manantial	6/5/2025	23,5	6,46	2,8	125,7
PZA12-03	Piezómetro	16/5/2025	24,6	6,58	1,08	74,1
PZA12-08	Piezómetro	7/5/2025	27,5	6,01	1,59	106,1
PZS12-12	Piezómetro	4/5/2025	24,6	6,48	3,64	175,9
PZS12-14	Piezómetro	4/5/2025	26,9	6,06	2,61	98,6
PZR 13-05	Piezómetro	12/5/2025	29,7	7,61	1,99	223
PZR 13-07	Piezómetro	11/5/2025	24,4	7,63	4,11	274

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temp .	pH	Oxígeno disuelto	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	°C	U. de pH	mg/l	µS/cm
PZR 13-09	Piezómetro	11/5/2025	24,0	6,66	1,51	235
PZS 13-17	Piezómetro	7/5/2025	28,8	6,33	3,85	84,2
DH-FS-309	Piezómetro	11/5/2025	23,8	6,51	5,01	188,4
DH-FS-315	Piezómetro	16/5/2025	25,4	6,49	2,12	198
DH-TM-100	Piezómetro	18/5/2025	25,1	6,31	2,07	147,9
BH-5M-03	Piezómetro	4/5/2025	24,4	6,88	4,83	164,5
BH-5M-08	Piezómetro	13/5/2025	24,4	7,22	4,2	225
PZS 12-05	Piezómetro	14/5/2025	26,7	6,6	4,75	133
PZ4	Piezómetro	18/5/2025	24,3	6,57	2,52	153
Totalizado r 1 La Mayoría	Lluvia	15/5/2025	27,5	5,66	6,81	14,69
Totalizado r 2 Manizales	Lluvia	20/5/2025	25,2	5,07	7,04	10,09
Totalizado r 3 La Bella	Lluvia	20/5/2025	23,5	5,98	6,84	8,47
Quebrada Palestina	Agua Superficial	20/5/2025	25,9	7,82	7,19	126,6
Quebrada Topacio	Agua Superficial	5/5/2025	27,8	7,33	7,67	69,6
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	6/5/2025	26,3	7,44	7,06	73,1
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	8/5/2025	22,8	7,46	7,51	151,8
Quebrada El Banco	Agua Superficial	19/5/2025	26,4	7,47	6,8	74,4

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Las temperaturas registradas en los puntos de muestreo (Figura 5.1.6.111 y Figura 5.1.6.112) se encuentran en un rango de 22,7 a 29,7 °C. Estos valores están fuertemente influenciados por las condiciones atmosféricas al momento del muestreo, especialmente dado que la mayoría de los puntos representan sistemas hidrogeológicos someros.

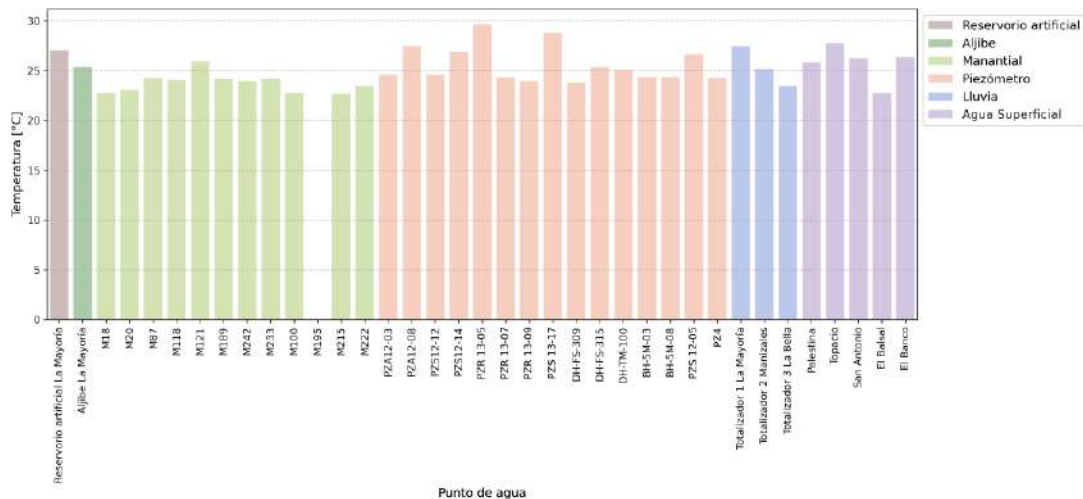


Figura 5.1.6.111 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

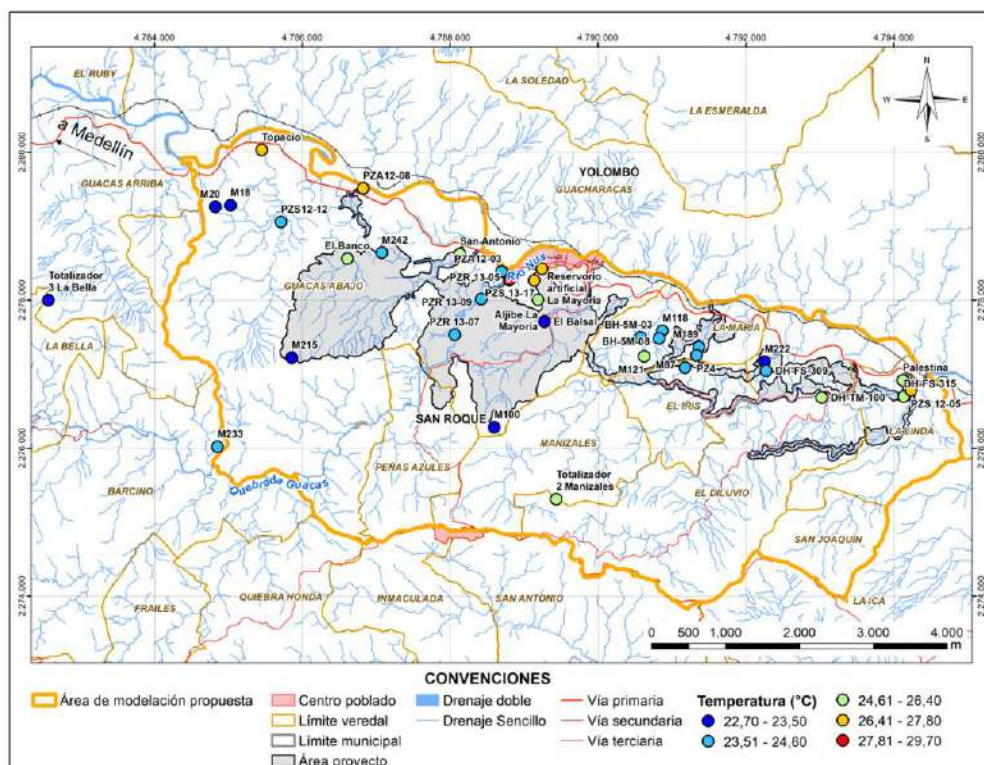


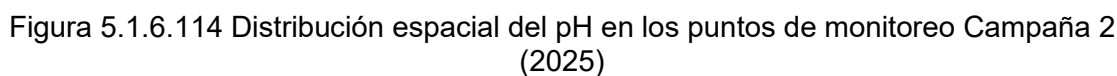
Figura 5.1.6.112 Distribución espacial de la temperatura en los puntos de monitoreo Campaña 2

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Bar chart showing pH values for 35 water points in the Toluca region. The y-axis represents pH (0 to 8) and the x-axis lists the water points. The bars are color-coded by source: Reservoir artificial (brown), Aljibe (green), Manantial (light green), Piezometro (orange), Lluvia (blue), and Agua Superficial (purple).

Punto de agua	pH	Categoría
Reservorio artificial La Magdalena	6.8	Reservorio artificial
Aljibe La Magdalena	6.5	Aljibe
M15	7.5	Manantial
M40	7.6	Manantial
M67	7.4	Manantial
M18	7.0	Manantial
M171	7.8	Manantial
M189	7.9	Manantial
M42	7.5	Manantial
M33	7.4	Manantial
M100	6.3	Manantial
M155	6.5	Manantial
M215	6.9	Manantial
M222	6.6	Manantial
PCAL2-03	6.4	Piezometro
PCAL2-08	6.0	Piezometro
PC237-12	6.5	Piezometro
PC251-14	6.0	Piezometro
PBR 13-05	7.8	Piezometro
PBR 13-07	7.8	Piezometro
PBR 13-09	6.7	Piezometro
P25 13-17	6.3	Piezometro
DM-FS-269	6.5	Piezometro
DM-FS-315	6.3	Piezometro
DM-FM-100	6.7	Piezometro
BH-SM-03	7.2	Piezometro
BH-SM-08	7.3	Piezometro
P25 13-03	6.6	Piezometro
P24	6.6	Piezometro
Tolizalozar 1 La Magdalena	5.7	Lluvia
Tolizalozar 2 Maricopa	5.1	Lluvia
Tolizalozar 3 La Magdalena	6.0	Lluvia
Reiscino	7.9	Agua Superficial
Tapisco	7.3	Agua Superficial
San Antonio	7.5	Agua Superficial
El Balanc	7.4	Agua Superficial
El Blanco	7.4	Agua Superficial

Fuente: SHI S.A.S, 2025



214

Los valores de conductividad eléctrica obtenidos (Figura 5.1.6.115 y Figura 5.1.6.116) reflejan una tendencia comparable a la observada en la campaña anterior. Las muestras recolectadas en los totalizadores presentan las conductividades más bajas del conjunto, con un rango que va de 8,47 a 14,69 $\mu\text{S/cm}$, lo cual es característico de aguas de precipitación reciente. En contraste, los puntos de agua superficial muestran una mayor dispersión en los valores, que oscilan entre 69,6 y 151,8 $\mu\text{S/cm}$, siendo la quebrada El Balsal la que registra el valor más elevado, mientras que el reservorio artificial La Mayoría presenta la menor conductividad eléctrica entre estos puntos, con 61,4 $\mu\text{S/cm}$.

En cuanto a los manantiales, los valores registrados se sitúan en un rango de 43,7 a 174,6 $\mu\text{S/cm}$, lo que indica un nivel de mineralización bajo. Sin embargo, en los puntos M121 y M87 se observa una ligera elevación de este parámetro, lo que podría estar relacionado con un mayor tiempo de permanencia del agua en el subsuelo.

Finalmente, los piezómetros y el aljibe presentan conductividades eléctricas ligeramente superiores a las de los manantiales, con valores que oscilan entre 61,4 y 274 $\mu\text{S/cm}$. La mayoría de las muestras se ubican entre 100 y 200 $\mu\text{S/cm}$, lo que corresponde a aguas de baja a moderada mineralización. Los valores más altos se registran en los piezómetros PZR 13-07 (274 $\mu\text{S/cm}$), PZR 13-09 (235 $\mu\text{S/cm}$), BH-5M-08 (225 $\mu\text{S/cm}$) y PZR 13-05 (223 $\mu\text{S/cm}$), lo cual sugiere una mayor interacción agua-roca y un tiempo de residencia más prolongado. Por el contrario, puntos como PZA 12-03 (74,1 $\mu\text{S/cm}$) y el aljibe La Mayoría (61,4 $\mu\text{S/cm}$) muestran una mineralización más baja, posiblemente asociada a una recarga reciente.

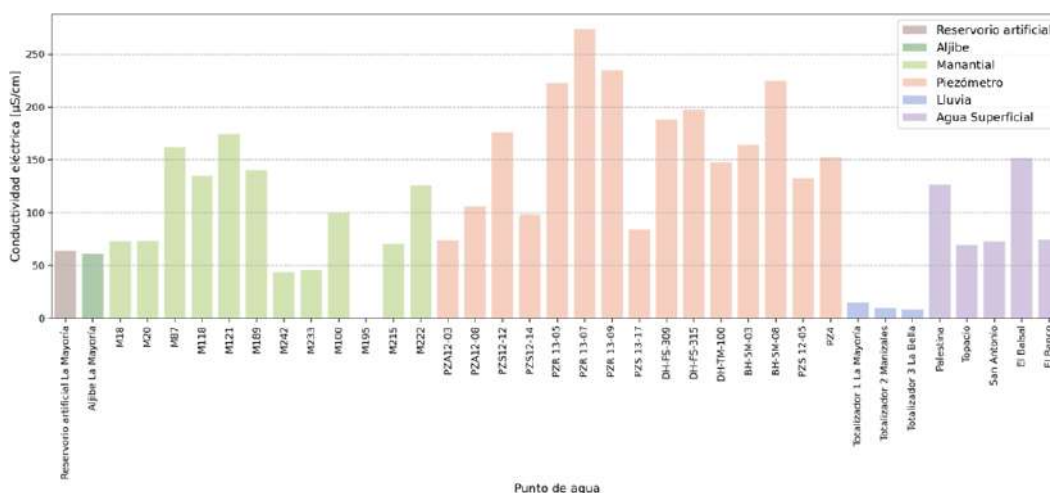


Figura 5.1.6.115 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

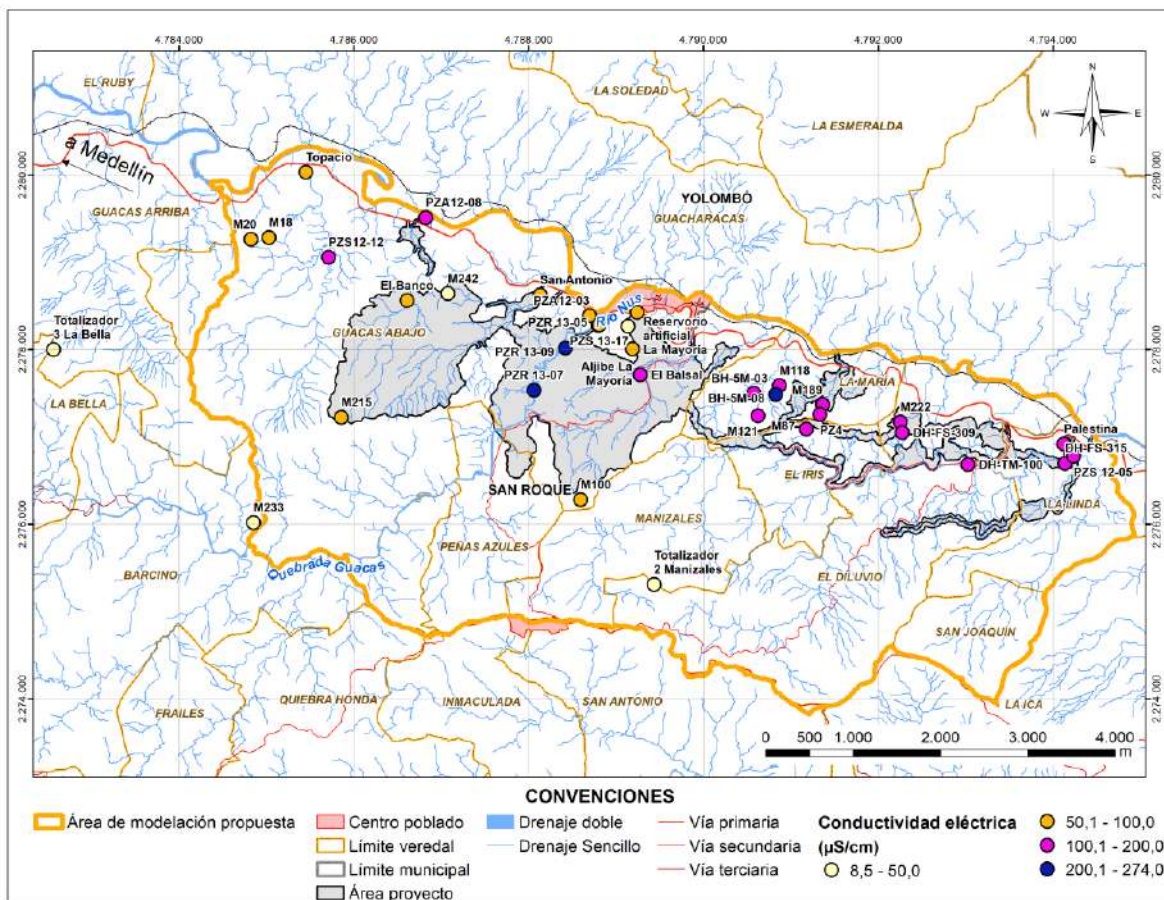


Figura 5.1.6.116 Distribución espacial de la conductividad eléctrica en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2015)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

En el caso del oxígeno disuelto (Figura 5.1.6.117 y Figura 5.1.6.118), los valores medidos en los manantiales varían entre 2,80 mg/l y 7,36 mg/l. Aunque el rango es amplio, la mayoría de las muestras presentan concentraciones superiores a 5 mg/l, lo que indica condiciones de oxigenación moderada a alta, probablemente asociadas a la infiltración de precipitación reciente con un corto tiempo de tránsito subterráneo. Los valores más bajos se registran en los puntos M222 (2,80 mg/l) y M118 (3,76 mg/l), posiblemente como resultado de procesos de consumo de oxígeno, ya sea por actividad microbiológica o por interacción con materiales ricos en materia orgánica. A diferencia de la campaña anterior, no se identificaron valores extremadamente bajos, lo que podría reflejar una mayor tasa de recarga reciente.

En contraste, los piezómetros y el aljibe muestran concentraciones más bajas de oxígeno disuelto, con valores entre 1,08 mg/l y 5,01 mg/l. Los niveles más reducidos se observan en los piezómetros PZA 12-03, PZA 12-08, PZR 13-09 y en el aljibe La Mayoría. La mayoría

de estos puntos son someros y captan unidades aluviales o suelos residuales, lo cual puede favorecer la degradación de materia orgánica y el consumo de oxígeno disuelto, un comportamiento similar al evidenciado en la primera campaña. En el caso del piezómetro PZR 13-09, a pesar de su mayor profundidad, la baja concentración de oxígeno podría reflejar un mayor tiempo de residencia o una limitada recarga reciente, como se ha indicado anteriormente.

Por otro lado, los valores más altos en piezómetros, como en DH-FS-309, BH-5M-03, PZS 12-05 y BH-5M-08, podrían asociarse a una recarga reciente y a un tránsito subterráneo más corto. Los restantes puntos muestran condiciones intermedias entre aguas superficiales y subterráneas, lo que concuerda con los resultados obtenidos en la campaña anterior.

En cuerpos de agua superficial, las concentraciones de oxígeno disuelto fluctúan entre 6,80 mg/l y 7,67 mg/l, reflejando una alta aireación y el contacto constante con la atmósfera. A diferencia de la primera campaña, no se detectaron valores bajos que indiquen eventos puntuales de contaminación o procesos biológicos intensos. Finalmente, los totalizadores de lluvia reportan valores entre 6,81 mg/l y 7,04 mg/l, coherentes con aguas que han estado en contacto con la atmósfera.

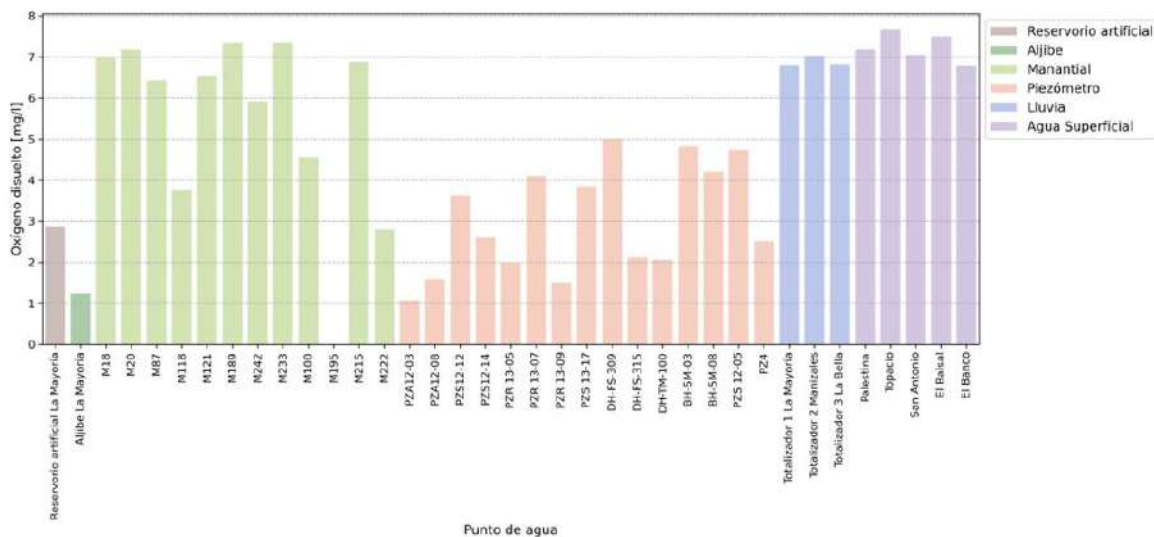


Figura 5.1.6.117 Oxígeno disuelto registrado en los puntos de monitoreo Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

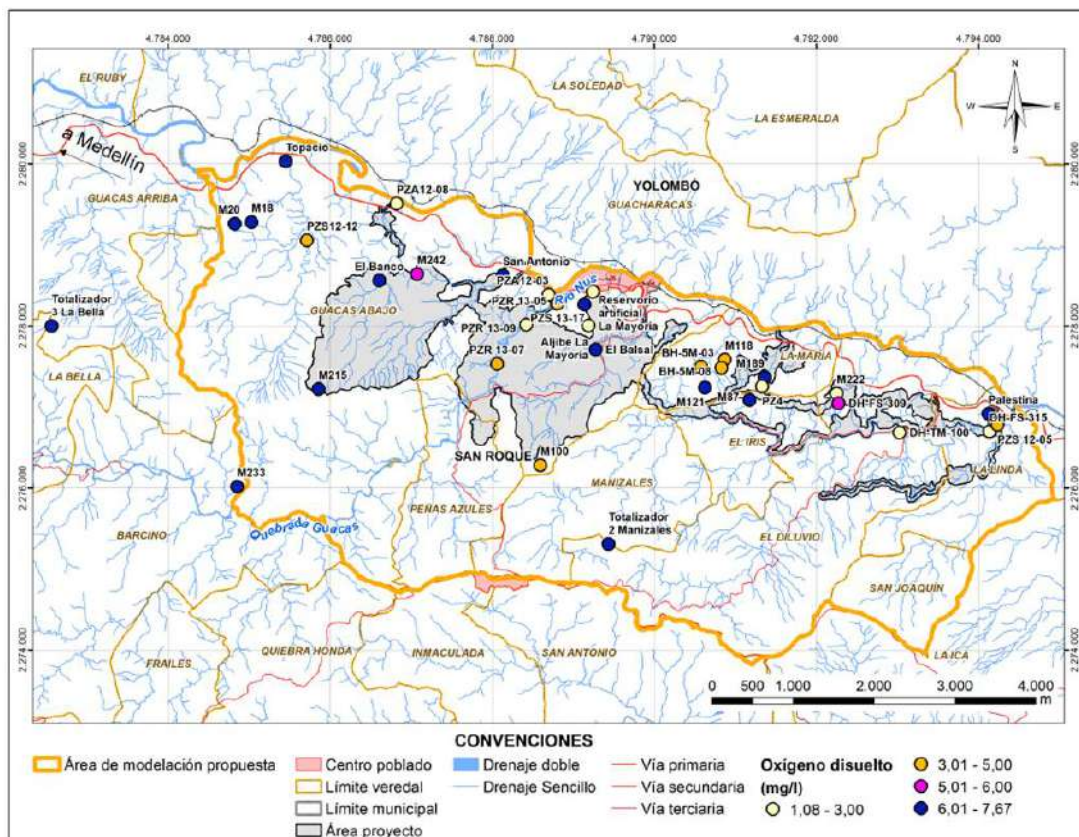


Figura 5.1.6.118 Distribución espacial del oxígeno disuelto los puntos de monitoreo.
Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

b. Balance de electroneutralidad

Como se indicó anteriormente, el balance de electroneutralidad o iónico mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en miliequivalentes por litro [meq/l], el cual se calcula a partir de la Ecuación 5.1.6.8.

El balance se hace empleando los iones mayoritarios o más abundantes en el agua, que son bicarbonatos (que el laboratorio reporta en unidades de CaCO_3 y es llevado a unidades de HCO_3), cloruros, sulfatos, sodio, calcio, magnesio y potasio, dado que las mayores concentraciones iónicas en el agua son las de estos elementos.

Adicionalmente, se incluye la concentración de hierro disuelto debido a que se registran concentraciones significativas en algunas muestras.

De acuerdo con la Guía Técnica Colombiana GTC 30 (ICONTEC, 2014), solo deben considerarse aquellas muestras cuya desviación del balance iónico sea igual o inferior al 10%. En esta campaña, la mayoría de las muestras cumplen con este criterio, registrando

errores de balance inferiores al umbral establecido. No obstante, se identifican algunas excepciones puntuales (M18, PZA 12-03, PZS 12-05 y la quebrada Palestina), las cuales presentan errores de balance iónico ligeramente superiores al 10%.

Para estos casos, se realizó una evaluación complementaria considerando el error aceptable en función de la conductividad eléctrica medida (Custodio & Llamas, 1975; MADS, 2014) como se muestra en la Tabla 5.1.6.55. Esta verificación permitió confirmar que, aunque los errores superan el límite sugerido por la GTC 30, se mantienen dentro de un rango permisible, sin indicar omisiones relevantes de especies químicas.

El error de balance de iónico aceptable se presenta en la Tabla 5.1.6.55 y en la Figura 5.1.6.119

Tabla 5.1.6.55 Error de balance iónico según la conductividad eléctrica

Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50	200	500	2000	>2000
Error aceptable (%)	± 30	± 10	± 8	± 4	± 4

Fuente: Custodio & Llamas, (1975)

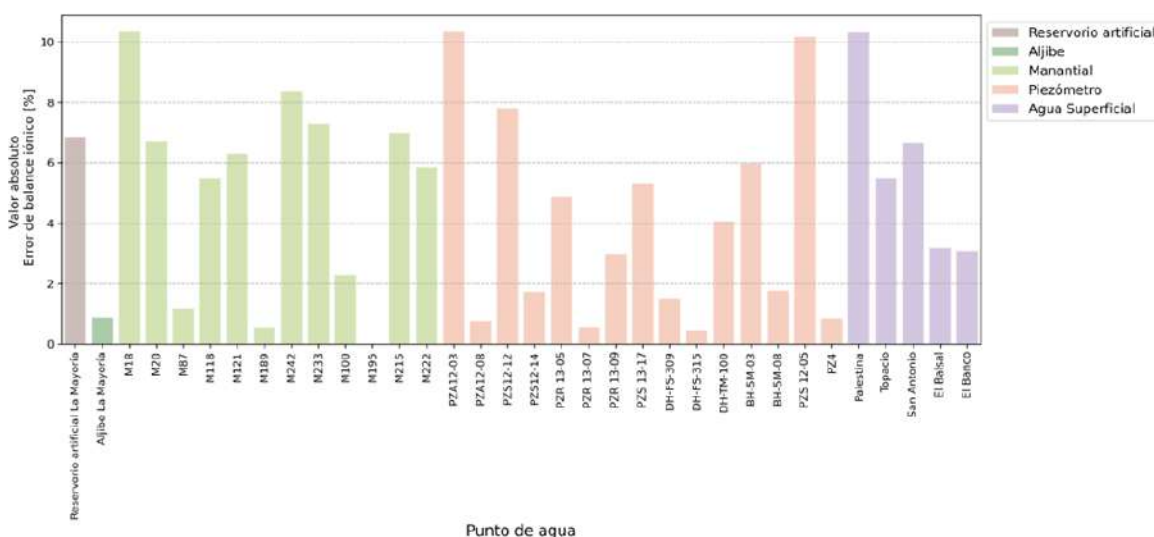


Figura 5.1.6.119 Valor absoluto del error de balance iónico en los puntos de monitoreo Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

c. Análisis hidrogeoquímico

A partir de los resultados del muestreo, se realizó una clasificación hidrogeoquímica de las muestras con base en sus principales componentes iónicos. Los cationes predominantes son sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), mientras que los aniones principales incluyen cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-). Para representar gráficamente la relación entre estos iones y facilitar su clasificación

hidrogeoquímica, se emplean los diagramas de Stiff (Figura 5.1.6.120 a Figura 5.1.6.122) y Piper (Figura 5.1.6.123 a Figura 5.1.6.125).

Los diagramas de Stiff obtenidos para el reservorio artificial y los puntos de agua superficial (Figura 5.1.6.120) muestran una composición química similar a la observada en la primera campaña de muestreo. En la mayoría de los casos se puede evidenciar un bajo grado de mineralización, con el bicarbonato (HCO_3^-) como anión dominante y una mayor proporción de sodio + potasio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), particularmente en el reservorio artificial y en las quebradas Topacio, San Antonio y El Banco.

En contraste, las quebradas Palestina y El Balsal presentan un leve incremento en el grado de mineralización. Aunque el bicarbonato continúa siendo el anión mayoritario, se observa un aumento en la concentración de calcio (Ca^{2+}), siendo más notable en la quebrada El Balsal.

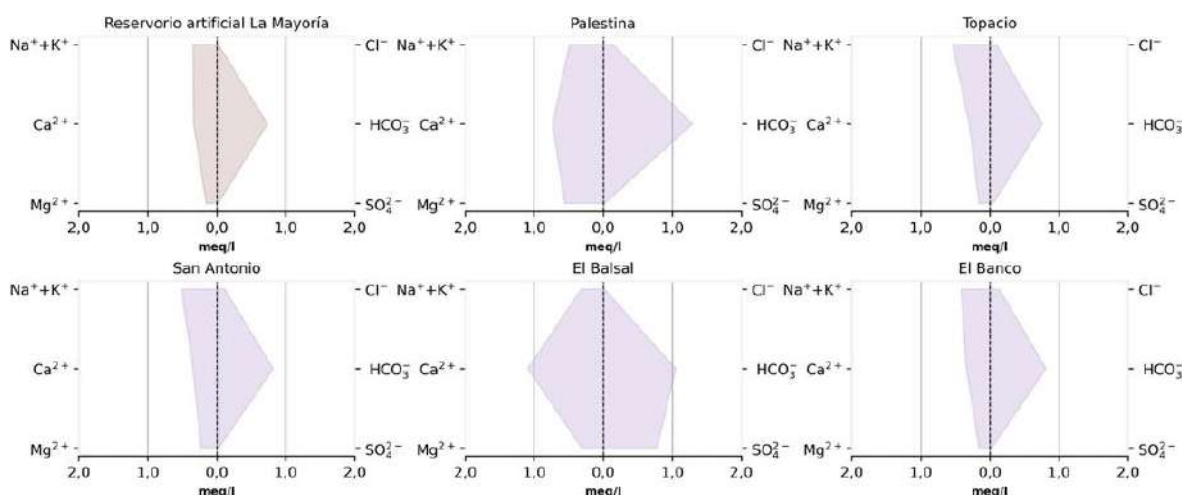


Figura 5.1.6.120 Diagramas de Stiff para el reservorio artificial y los puntos de agua superficial. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Los manantiales también conservan las características hidrogeoquímicas reportadas en la campaña 1 de febrero (2025), lo que permite conservar la misma agrupación realizada previamente en función del grado de mineralización y la composición iónica:

El primer grupo, conformado por los puntos M18, M20, M242 y M233, se caracteriza por un bajo contenido total de sólidos disueltos y una composición dominada por HCO_3^- y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, lo cual indica tiempos de residencia cortos y una posible influencia directa de recarga reciente por infiltración.

El segundo grupo, que incluye los puntos M87, M118, M121, M189 y M222, presenta una mayor mineralización relativa, con concentraciones elevadas de Ca^{2+} y Mg^{2+} , lo cual es consistente con una mayor interacción agua-roca y posiblemente tiempos de residencia más prolongados en el acuífero.

Los puntos M100, M215 y el aljibe presentan características intermedias entre ambos grupos, tanto en términos de mineralización como en la proporción relativa de cationes, lo que puede sugerir una mezcla de aguas o condiciones hidrogeoquímicas transicionales.

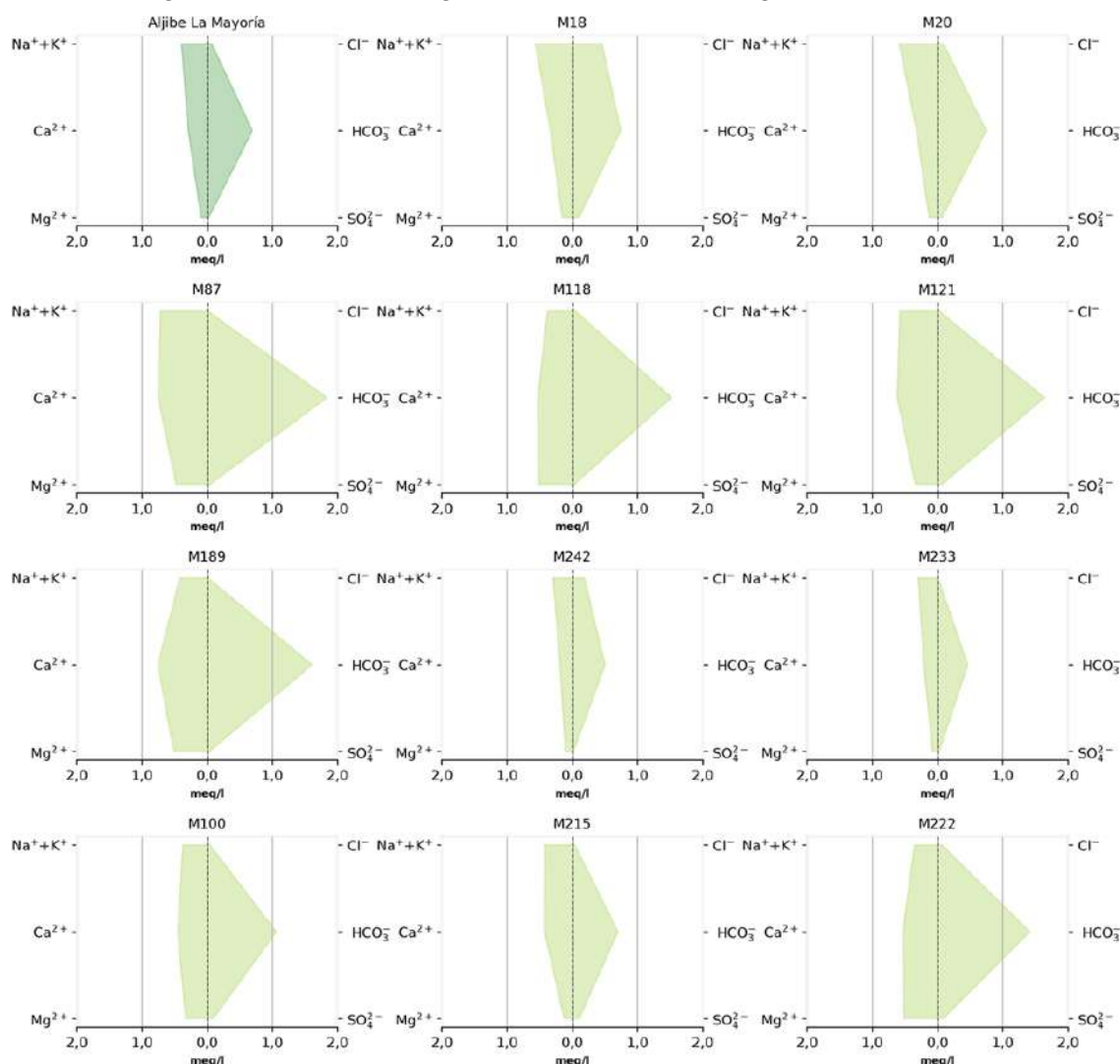


Figura 5.1.6.121 Diagramas de Stiff para el aljibe y manantiales. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

En el caso de los piezómetros, al igual que en los puntos de agua superficial y manantiales, se observa una consistencia general en los patrones hidroquímicos entre la primera y segunda campañas. Sin embargo, se identifican ciertas variaciones:

El punto PZA 12-03 muestra un incremento en el grado de mineralización, con predominancia de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. En contraste, el punto PZR 13-09 evidencia una disminución

en la concentración de HCO_3^- y Ca^{2+} , lo que puede reflejar interacción con recarga más reciente o una menor interacción con el medio subterráneo.

Finalmente, en los puntos DH-TM-100, BH-5M-03 y BH-5M-08, se observa un incremento en las concentraciones de Ca^{2+} .

En términos generales, el bicarbonato (HCO_3^-) constituye el anión predominante en todos los piezómetros analizados, lo que es característico de aguas subterráneas con baja a moderada evolución hidrogeoquímica, típicamente asociadas a condiciones de recarga meteórica o interacciones iniciales con el medio subterráneo.

Los puntos PZS 12-12, PZR 13-05, PZR 13-07, BH-5M-03 y BH-5M-08 presentan un grado de mineralización moderado, con concentraciones elevadas de calcio (Ca^{2+}) respecto al resto de cationes, lo que podría reflejar un mayor grado de interacción con las formaciones geológicas. En el caso específico de los piezómetros PZR 13-05 y PZR 13-07, se ha observado que, a lo largo de las distintas campañas de monitoreo isotópico, estas aguas presentan una firma isotópica más empobrecida que el resto de los puntos de agua subterránea analizados, lo cual refuerza la hipótesis de que el agua captada en estos puntos presenta una menor influencia de la recarga reciente.

En contraste, los piezómetros DH-FS-315, DH-TM-100, PZS-12-05 y PZ4 muestran una mineralización ligeramente más baja, con una mayor proporción relativa de sodio + potasio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) frente al calcio, lo que podría indicar un menor tiempo de residencia en el sistema subterráneo.

Los puntos PZA-12-03, PZS 12-14, PZR- 13-09 y DH-FS-309, aunque exhiben grados de mineralización variables, se caracterizan por un predominio de los cationes $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. Finalmente, los piezómetros PZA 12-08 y PZS 13-17 presentan bajas concentraciones de sólidos disueltos, sin que se observe un predominio claro de ningún catión, lo que es consistente con aguas de infiltración reciente.

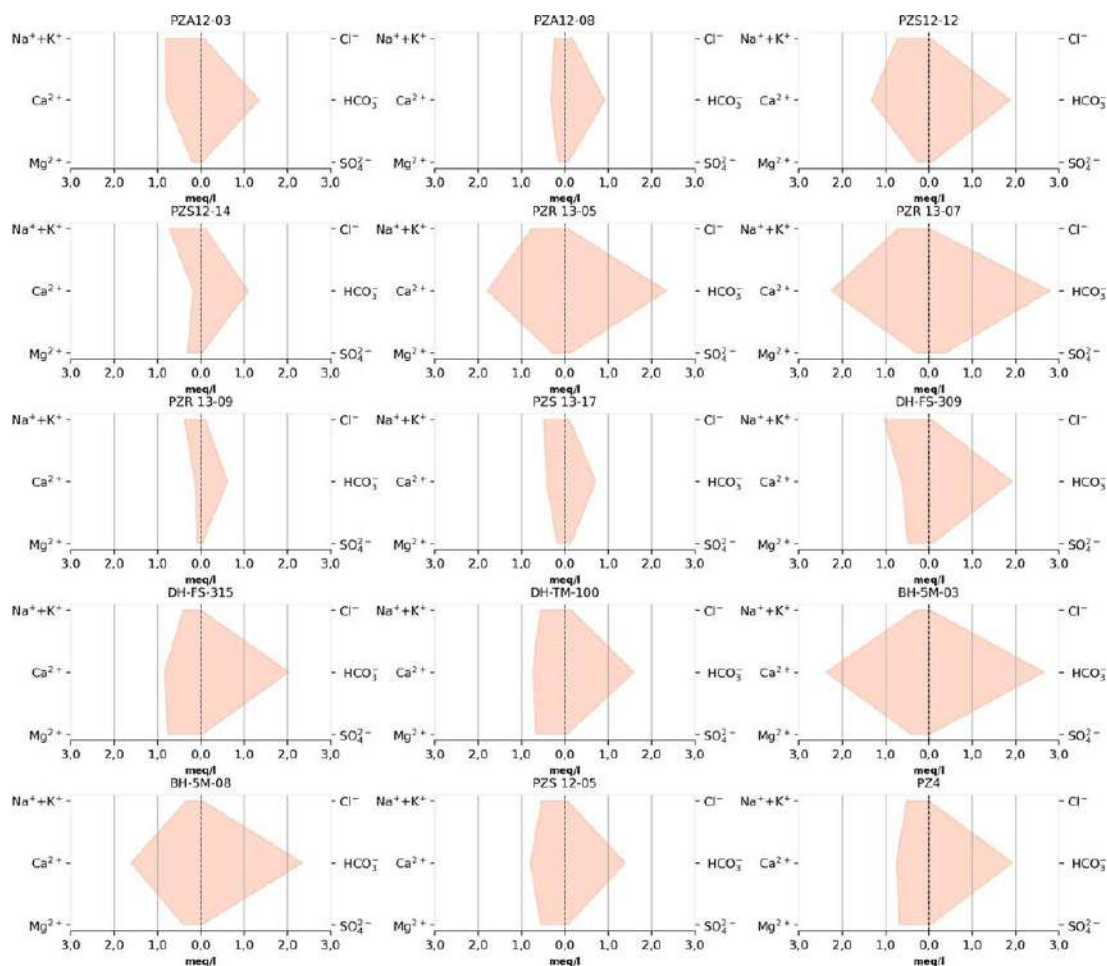


Figura 5.1.6.122 Diagramas de Stiff para los piezómetros Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El análisis hidroquímico de las muestras provenientes de los diferentes puntos de monitoreo revela una composición homogénea, caracterizada por el predominio del bicarbonato (HCO_3^-) como anión mayoritario en todas las aguas evaluadas (Tabla 5.1.6.56). Esta condición es típica de sistemas hidrogeológicos influenciados por recarga reciente, lo que es coherente con los bajos niveles de sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica previamente reportados, que indican una baja mineralización generalizada.

En cuanto a los cationes, es posible identificar tres grupos principales: un grupo mayoritario de aguas que no presenta un catión dominante; un subconjunto de muestras con predominio de sodio + potasio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), asociado a facies bicarbonatadas sódicas; y un grupo más reducido, identificado en algunos piezómetros y puntos de agua superficial, en los cuales se evidencia un dominio de calcio (Ca^{2+}), clasificados como aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.

Las aguas bicarbonatadas sódicas se asocian a valores de conductividad eléctrica bajos, lo que indica una mineralización reducida. Esto sugiere un tiempo de residencia corto y un limitado intercambio iónico con el medio geológico.

En contraste, las aguas con predominio de Ca^{2+} o sin un catión dominante suelen presentar valores de conductividad eléctrica ligeramente superiores, lo que sugiere una mayor interacción agua-roca. Aunque los niveles de mineralización continúan siendo relativamente bajos, estas diferencias en la composición catiónica permiten identificar algunos puntos con una evolución hidrogeoquímica más avanzada, posiblemente asociada a un mayor tiempo de residencia en el subsuelo, que favorece la disolución progresiva de minerales y el consecuente enriquecimiento iónico de la solución.

Para la segunda campaña de monitoreo, los resultados observados mantienen consistencia con los hallazgos iniciales. La persistencia del predominio de las facies bicarbonatadas cálcica y/o magnésicas indica la estabilidad de los procesos hidrogeoquímicos que operan en el sistema a lo largo del tiempo.

Este comportamiento reitera que la química del agua subterránea en la zona está gobernada por la interacción del agua de recarga reciente con el perfil de meteorización y la matriz rocosa del Batolito Antioqueño. El aporte continuo de agua infiltrada, cargada de dióxido de carbono, promueve la hidrólisis de los silicatos del batolito, controlando la mineralización inicial en las trayectorias de flujo.

Al profundizar el flujo en el macizo rocoso y aumentar el tiempo de residencia, la disolución de plagioclasas ricas en calcio, junto con la alteración de anfíboles y biotitas, permite el enriquecimiento progresivo de calcio y magnesio.

Tabla 5.1.6.56 Clasificación hidrogeoquímica de los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)

Punto	Tipo	Catión	Anión	Clasificación
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Aljibe La Mayoría	Aljibe	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M18	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Suelo residual sódica
M20	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M87	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M118	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M121	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M189	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M242	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M233	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica

Punto	Tipo	Catión	Anión	Clasificación
M100	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M215	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M222	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZA12-03	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZA12-08	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS12-12	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS12-14	Piezómetro	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
PZR 13-05	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZR 13-07	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZR 13-09	Piezómetro	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
PZS 13-17	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
DH-FS-309	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
DH-FS-315	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
DH-TM-100	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
BH-5M-03	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
BH-5M-08	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS 12-05	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ4	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada Palestina	Agua Superficial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada Topacio	Agua Superficial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada El Banco	Agua Superficial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica

Fuente: SHI S.A.S, 2025

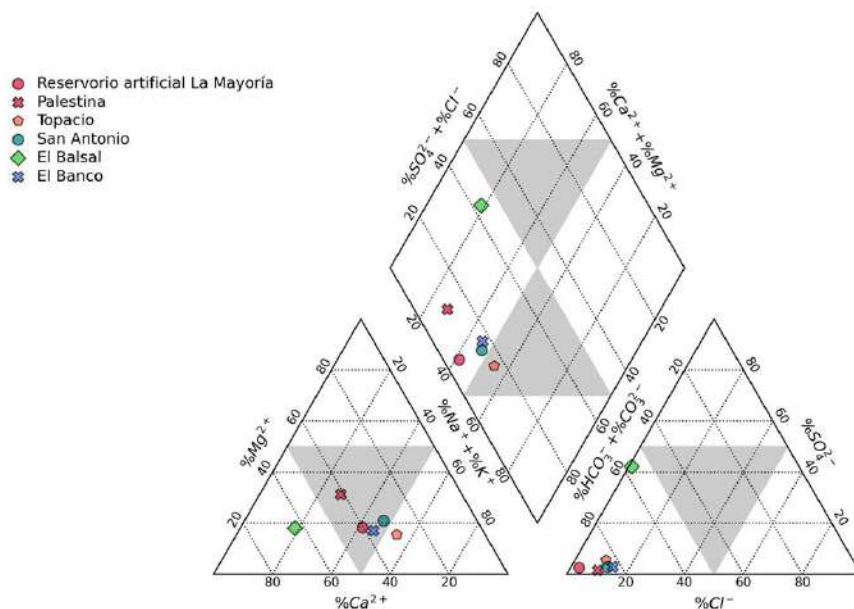


Figura 5.1.6.123 Diagrama de Piper para el reservorio artificial y puntos de agua superficial. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

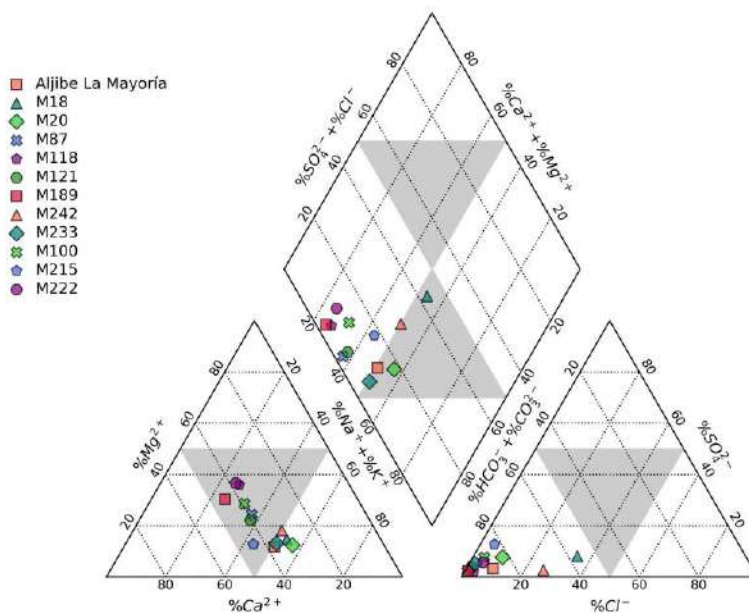


Figura 5.1.6.124 Diagrama de Piper para el aljibe y manantiales. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

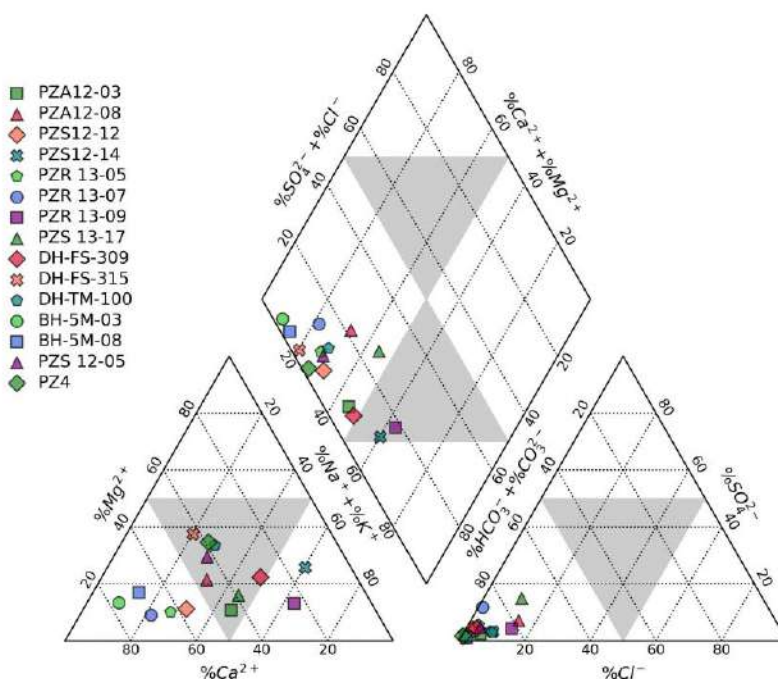


Figura 5.1.6.125 Diagrama de Piper para los piezómetros. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

A continuación, en la Figura 5.1.6.126 hasta la Figura 5.1.6.132 se presentan las isoconcentraciones de los iones mayoritarios para la campaña 2:

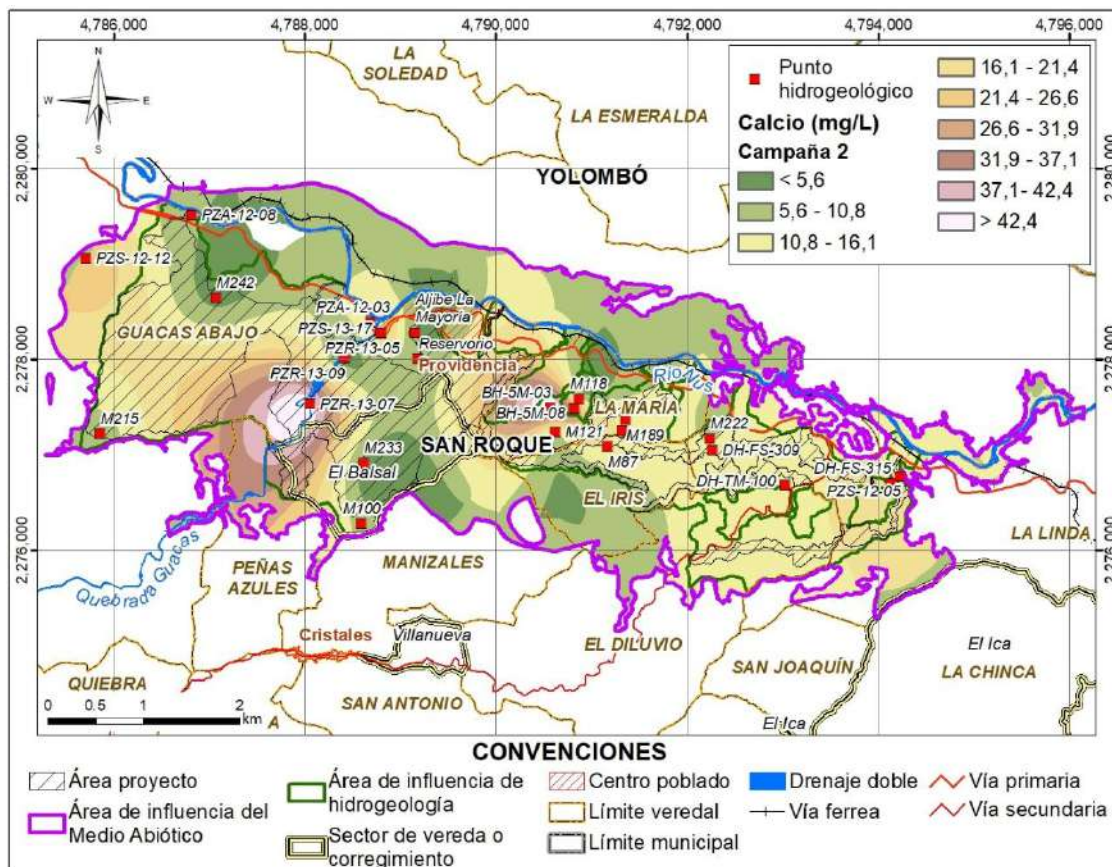


Figura 5.1.6.126 Isoconcentraciones de Calcio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-CA)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

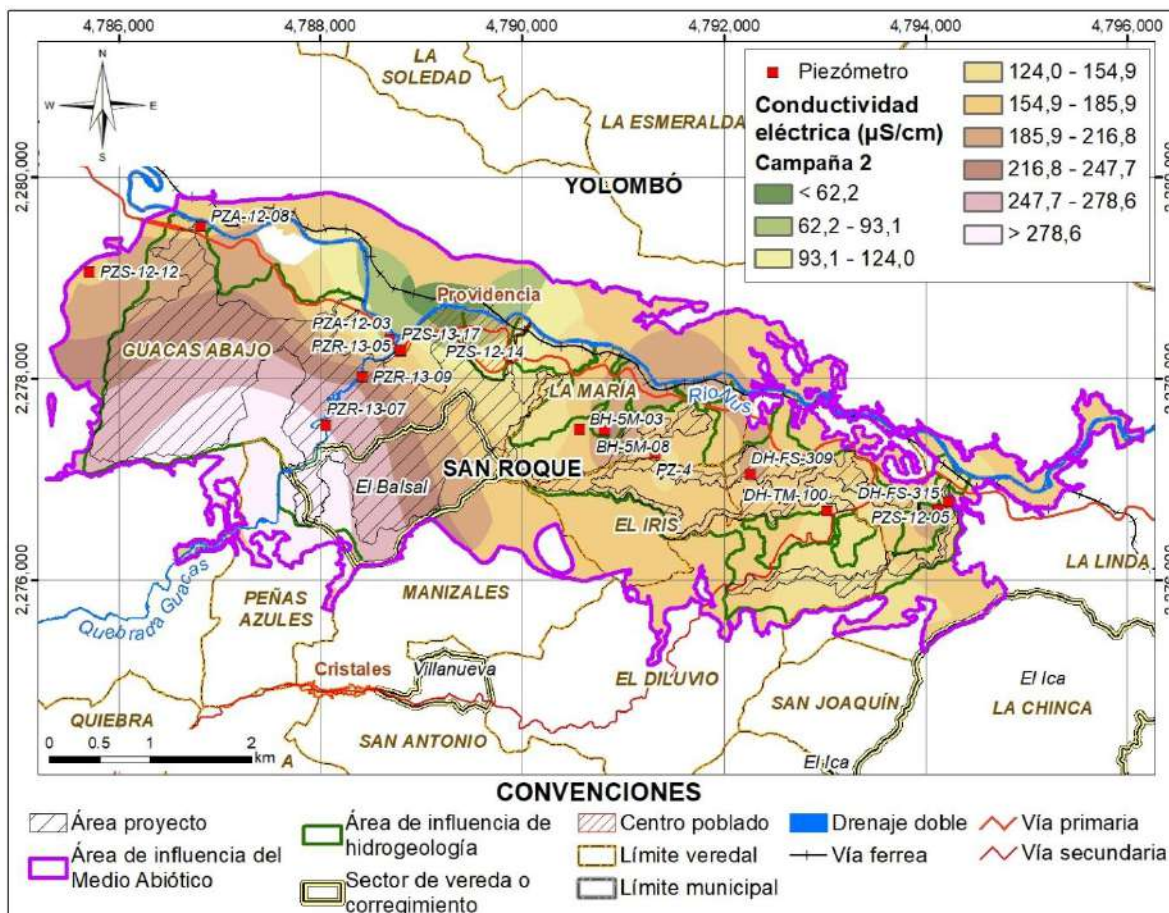


Figura 5.1.6.127 Isoconcentraciones de Conductividad eléctrica - Campaña 2 mayo 2025
(Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-CH)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

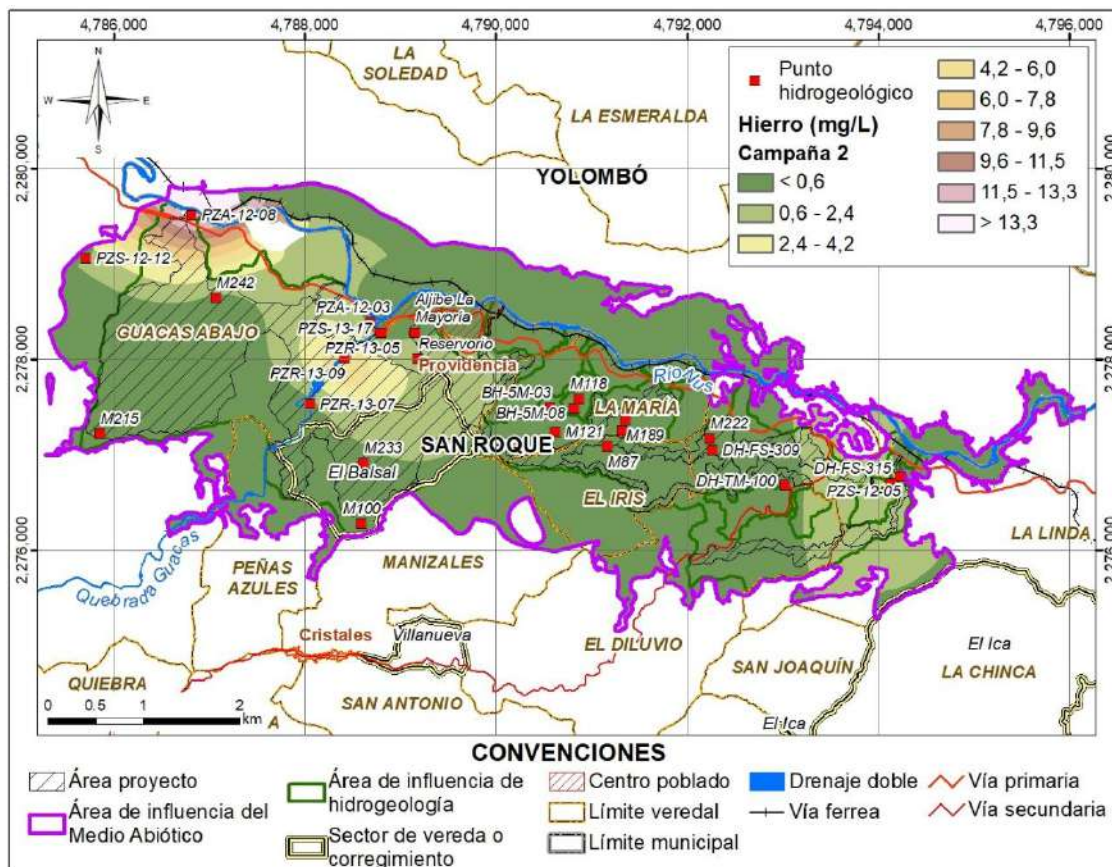


Figura 5.1.6.128 Isoconcentraciones de hierro - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-FE)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

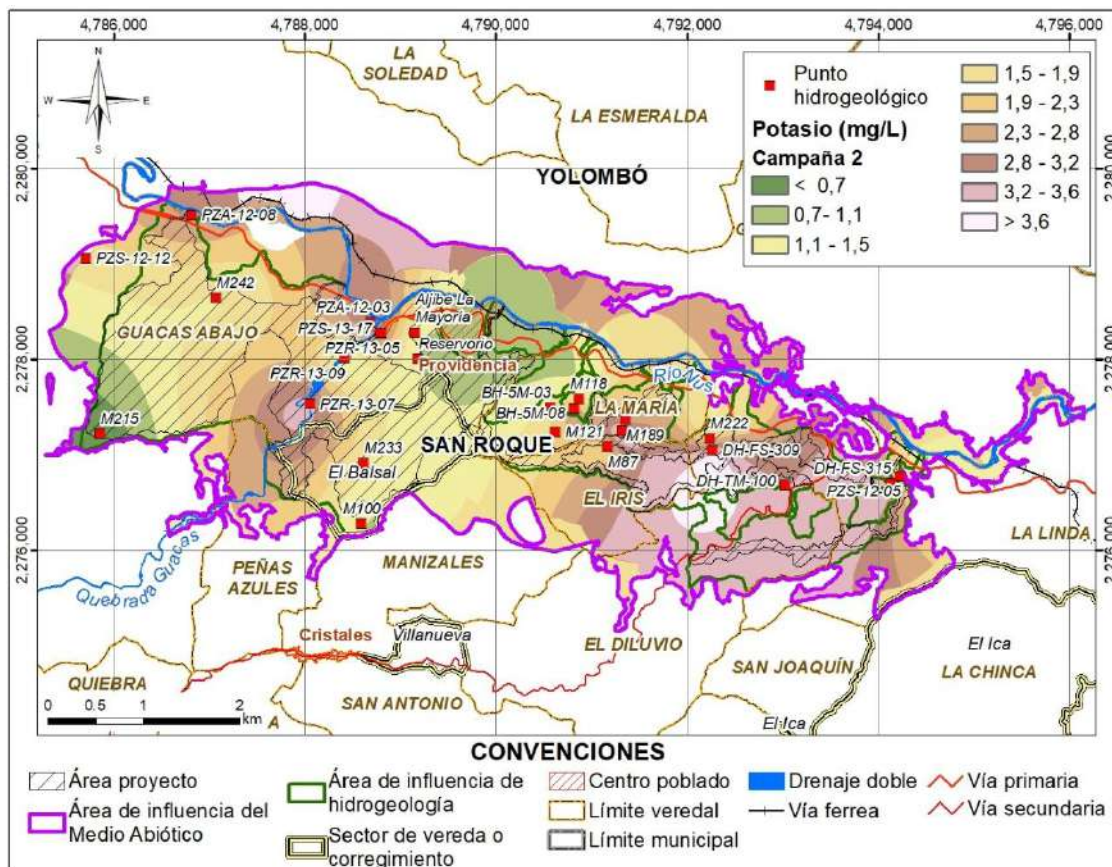


Figura 5.1.6.129 Isoconcentraciones de potasio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-K)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

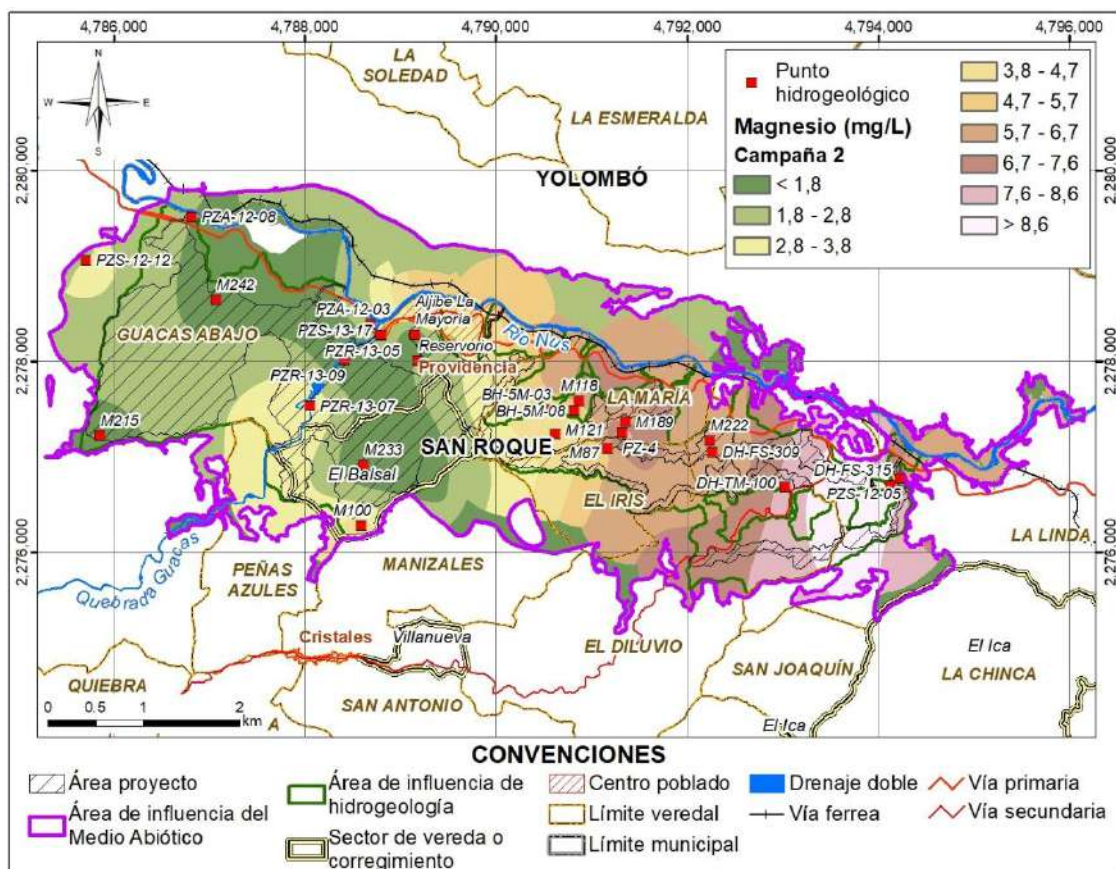


Figura 5.1.6.130 Isoconcentraciones de magnesio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-MG)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

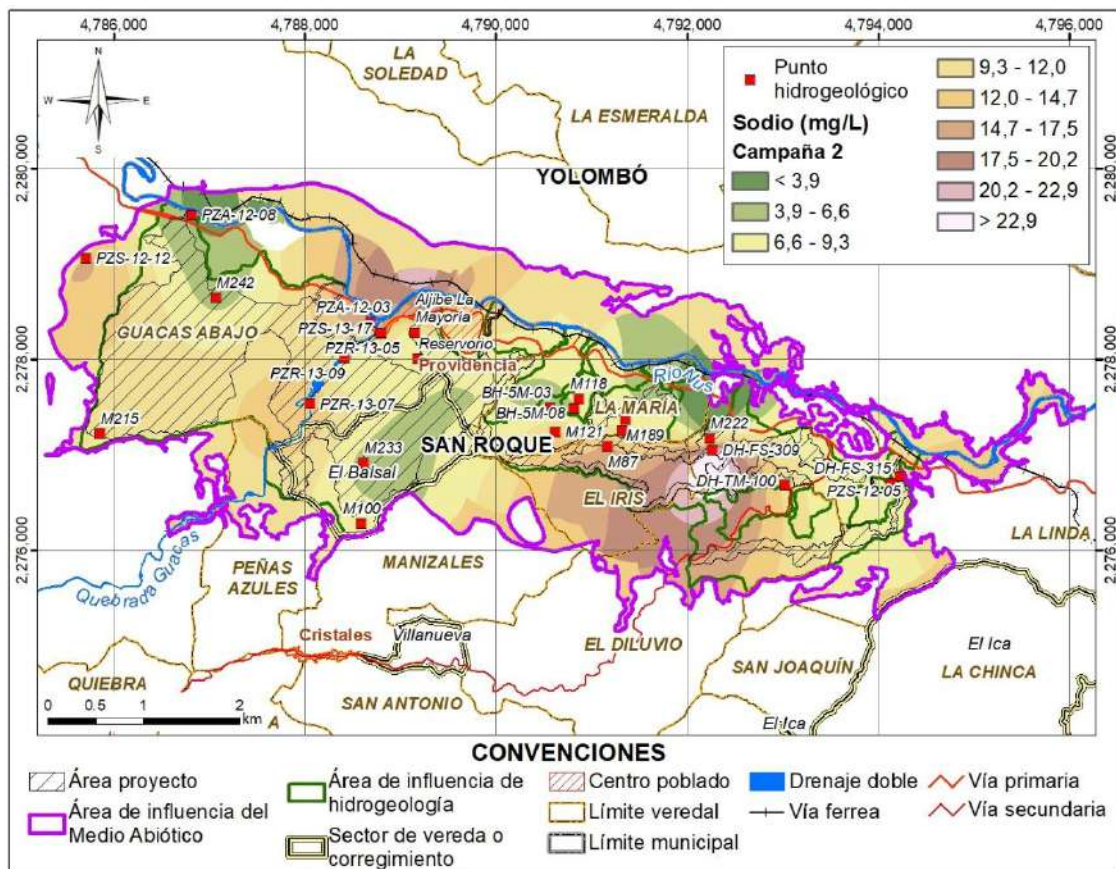


Figura 5.1.6.131 Isoconcentraciones de sodio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-NA)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

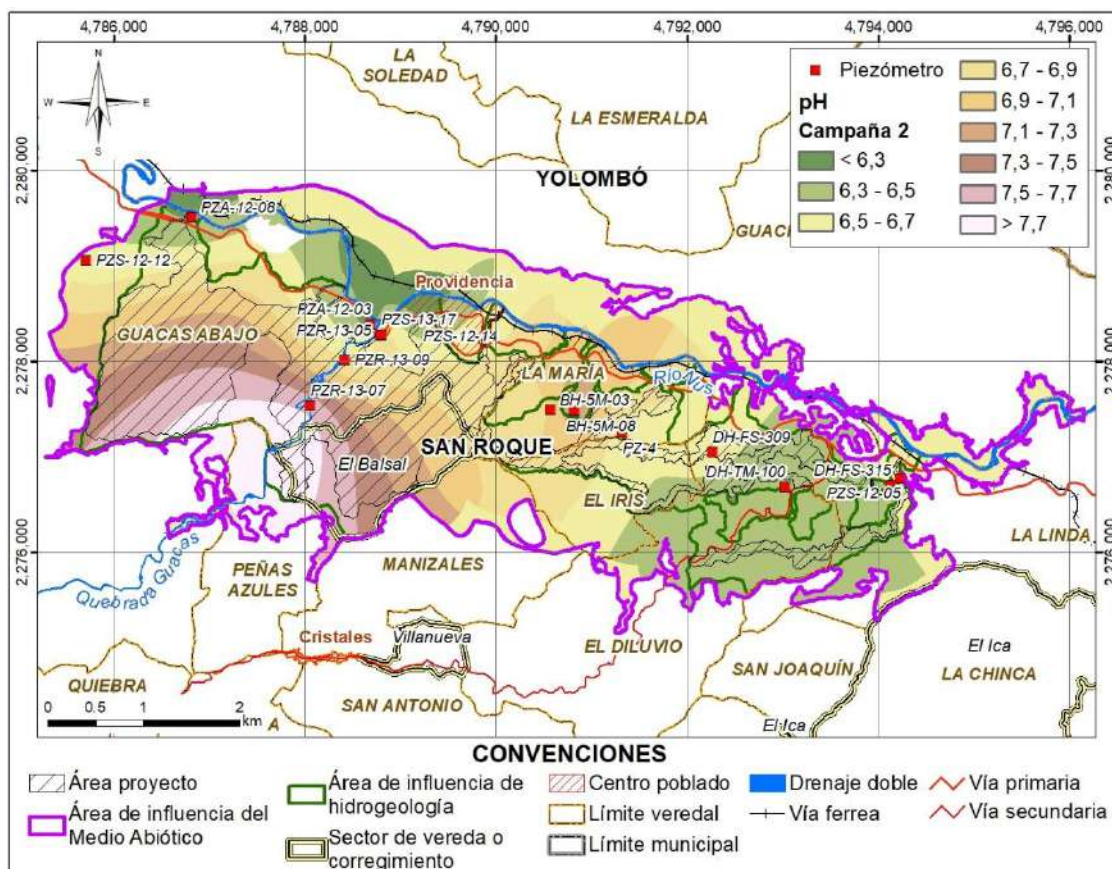


Figura 5.1.6.132 Isoconcentraciones de pH - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-PH)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

D. Conclusiones de la evaluación hidrogeoquímica para las campañas de 2025

Los resultados de los parámetros microbiológicos indican contaminación en la mayoría de los puntos monitoreados, excepto en el piezómetro PZ4 en la primera campaña de monitoreo. Las aguas superficiales presentan contaminación, con niveles elevados de coliformes totales y *Escherichia coli* en algunas quebradas, sugiriendo origen fecal. Los manantiales muestran variabilidad, con algunos altamente contaminados y otros con mejores condiciones. En los piezómetros, la contaminación es generalmente menor, aunque ciertos puntos presentan valores elevados, como es el caso del punto DH-FS-309 en la primera campaña y los puntos PZR 13-05 y BH-5M-08 en la segunda. El reservorio artificial La Mayoría exhiben niveles bajos a moderados de coliformes totales sin indicios de contaminación de aguas negras. (SHI S.A.S, 2025).

Los resultados de las campañas de monitoreo hidrogeoquímica indica que la presencia de grasas y aceites es puntual y se restringe a algunos manantiales, piezómetros y a la quebrada Palestina, lo que sugiere fuentes de contaminación antrópica localizadas. En particular, la quebrada Palestina en la primera campaña de monitoreo presentó la mayor concentración de grasas y aceites y es el único punto con detección de hidrocarburos, lo que evidencia una mayor afectación por actividades humanas. En cuanto a los nitratos, se observa una variabilidad en las concentraciones, con valores bajos o no detectables en algunos puntos, mientras que en ciertos piezómetros se registran niveles elevados, posiblemente asociados a fuentes de contaminación como el uso de fertilizantes o la infiltración de aguas residuales. (SHI S.A.S, 2025).

Los valores de temperatura y pH se mantienen dentro de los rangos típicos para aguas subterráneas y superficiales en el área de influencia. Particularmente, el pH indica aguas que varían entre ligeramente ácidas a ligeramente alcalinas, sin evidencias claras de procesos intensos de acidificación. (SHI S.A.S, 2025).

Los valores de conductividad eléctrica registrados indican un grado de mineralización que varía entre bajo y moderado en la mayoría de los puntos monitoreados. Como es esperado, los totalizadores presentan las conductividades eléctricas más bajas ($< 40 \mu\text{S/cm}$), reflejando la baja concentración de solutos disueltos típica de la precipitación. (SHI S.A.S, 2025).

En manantiales y piezómetros, los valores se sitúan en rangos similares; no obstante, en términos generales, los piezómetros tienden a mostrar valores ligeramente más altos. Esta diferencia sutil sugiere una mayor interacción agua-roca y tiempos de residencia algo más prolongados en el sistema subterráneo. Sin embargo, algunos piezómetros ubicados generalmente en depósitos aluviales o saprolito, se caracterizan por presentar conductividades eléctricas bajas ($< 150 \mu\text{S/cm}$), semejantes a las observadas en manantiales, lo que sugiere recarga reciente y tiempos de tránsito reducidos. (SHI S.A.S, 2025).

Las aguas lluvia y superficiales presentan valores elevados de oxígeno disuelto, asociados a su contacto con la atmósfera. En el caso de las aguas subterráneas, los valores de oxígeno disuelto evidencian un patrón coherente con el origen y grado de evolución esperado: los manantiales presentan, en general, concentraciones elevadas ($> 4 \text{ mg/l}$), indicativas de recarga reciente y tiempos de tránsito cortos, mientras que los piezómetros y el aljibe generalmente exhiben niveles más bajos ($< 5 \text{ mg/l}$), compatibles con una mayor interacción con materia orgánica o mayores tiempos de residencia en el subsuelo. (SHI S.A.S, 2025).

La mayoría de los puntos de monitoreo, incluyendo aguas superficiales, manantiales y piezómetros, muestran una composición química dominada por bicarbonato (HCO_3^-) como anión principal, lo cual indica una influencia predominante de recarga y una baja evolución hidrogeoquímica. (SHI S.A.S, 2025).

La variación en la composición catiónica y los valores de conductividad eléctrica permite inferir distintos grados de evolución hidrogeoquímica en las aguas subterráneas monitoreadas. Las facies bicarbonatadas sódicas, asociadas a bajas conductividades, reflejan condiciones de recarga reciente y escasa interacción con el medio geológico. En

cambio, las aguas con predominio de calcio o sin un catión dominante, identificadas especialmente en piezómetros, muestran una mineralización levemente mayor, indicando procesos de disolución mineral y posiblemente tiempos de residencia ligeramente más prolongados en el medio subterráneo. (SHI S.A.S, 2025).

5.1.6.4.4 Caracterización isotópica

A. Isotopos Estables

Las técnicas isotópicas se han aplicado en hidrología e hidrogeología en todo el mundo durante más de 50 años, convirtiéndose en una herramienta muy valiosa para la investigación y la solución de problemas relacionados con el medio ambiente y la ingeniería (Velez O. & Rhenals G., 2008). Los isótopos son átomos del mismo elemento que difieren en sus masas atómicas; esta diferencia en masa es suficiente para que muchos procesos físicos, químicos y biológicos cambien las proporciones de dichos isótopos en diferentes compuestos (Domenico & Schwartz, 1997).

Los isótopos del hidrógeno y del oxígeno constituyen trazadores geoquímicos ideales de las aguas, dado que sus concentraciones no suelen alterarse con la interacción de los materiales de los acuíferos (International Atomic Energy Agency, 2001).

Con un espectrómetro de masas se determinan las relaciones de isótopos en una muestra de agua $O^{18}/O^{16} - H^2/H^1$. Estas relaciones se miden en unidades delta (δ), tal como se expresa en la Ecuación 5.1.6.9, en la que SMOW (Standar Mean Ocean Water), es la muestra patrón que se encuentra en el Instituto de Energía Atómica en Viena (Barrera de Calderón , 2010).

Las muestras recolectadas para la medición de deuterio y oxígeno-18 deben ser tomadas de tal forma que se eviten los procesos de evaporación y oxidación; es decir, los recipientes deben estar totalmente llenos y herméticamente cerrados sin más precauciones. En caso de que las muestras no sean almacenadas por largos periodos de tiempo, el envase puede ser de plástico, de lo contrario, el envase debe ser de vidrio, de color ámbar y de cierre hermético (Instituto Geológico y Minero de España, 1997).

Para expresar la composición isotópica del agua (Ecuación 5.1.6.9), se utiliza la notación δ expresada en permil (‰), la cual denota la desviación de la tasa isotópica de la muestra con respecto al estándar (VSMOW) (Barrera de Calderón , 2010).

$$\delta\text{‰} = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}}$$

Ecuación 5.1.6.9 Composición isotópica

La química a nivel macroscópico establece que dos moléculas formadas por distintos isótopos, como por ejemplo el agua y el agua pesada, tiene las mismas características químicas, sin embargo, a nivel microscópico existen diferencia en las características químicas del mismo compuesto formado con isótopos distintos, generadas principalmente por las diferencias de masas (Velez O. & Rhenals G., 2008).

El fraccionamiento isotópico es una medida del cambio en la composición isotópica relativa, los procesos naturales más importantes que hacen variar la composición isotópica estable de las aguas naturales son la evaporación y la condensación. Las moléculas ligeras del agua, H¹ y Oxígeno – 16, son más volátiles que los isótopos más pesados, por lo que, al enfriarse, las moléculas pesadas se condensan más fácilmente y el vapor residual contiene cada vez menos isótopos pesados (International Atomic Energy Agency, 2001).

Finalmente, cuando el medio subterráneo (roca y suelo) entra en contacto con el agua lluvia que se infiltró, existe un fenómeno denominado intercambio isotópico, el cual se da cuando una fase (agua) entra en contacto con otra (roca) y sus composiciones isotópicas son distintas, en ese momento se iniciará un intercambio de isótopos hasta alcanzar el equilibrio. Este fenómeno afecta en mayor proporción al oxígeno-18, ya que, el hidrógeno no se encuentra en grandes concentraciones en las rocas, por esto, el deuterio es mejor trazador que el oxígeno-18 y, por ende, es más confiable para la determinación de las zonas de recarga (Velez O. & Rhenals G., 2008).

a. Procesos que afectan a los isotopos estables

Para la interpretación de las diferentes relaciones que puedan darse en la naturaleza, se tienen en cuenta las variaciones producidas en ellas, por parámetros como la latitud, continentalidad, altitud, estacionalidad y cantidad de lluvia.

- **Efecto de la latitud:** a medida que se aleja del Ecuador, a latitudes altas, la lluvia está menos “enriquecida” o sea que tiene menor contenido de isótopos pesados que el agua del mar; este es llamado el efecto de latitud, pues los valores de $\delta^{18}\text{O}$ and δD decrecen con la latitud (UNESCO - IAEA, 2001).
- **Efecto de la altitud:** los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de la precipitación decrecen con la altura y son típicos gradientes de $-0,15$ [‰] por cada 100 m para el $\delta^{18}\text{O}$ y de $-1,5$ [‰] a -4 [‰] por cada 100 m para el deuterio. Estos patrones pueden diferir en los valles al interior de montañas. En general, hay una relación lineal inversa entre los valores del contenido isotópico del agua lluvia y la cota del lugar donde ocurre la precipitación, de forma que el agua lluvia presenta un contenido menor de isótopos pesados a medida que la precipitación ocurre a alturas mayores (UNESCO - IAEA, 2001).
- **Efecto continental:** los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de la precipitación decrecen a medida que se aleja de las líneas de costa (UNESCO - IAEA, 2001).
- **Efecto de cantidad:** mientras mayor es la cantidad de lluvia, menores serán los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD . En zonas tropicales es el principal factor donde las lluvias más intensas son las más empobrecidas (UNESCO - IAEA, 2001).
- **Efecto de estacionalidad:** las lluvias de la época lluviosa son las más empobrecidas (UNESCO - IAEA, 2001).

Las variaciones de la composición isotópica con la altitud, permite diferenciar las aguas subterráneas procedentes de áreas de recarga situadas a alturas distintas (International Atomic Energy Agency, 2001).

Al infiltrarse la precipitación y pasar a ser parte de las reservas de agua subterránea, la mezcla que se produce en la zona saturada compensa las variaciones estacionales isotópicas, por lo cual, la composición isotópica de las aguas subterráneas está relacionada

con la composición isotópica de la precipitación caída en el área de recarga del acuífero, lo que puede ser útil para determinar el área de recarga en cuanto a altura o en cuanto a distancia a al mar (International Atomic Energy Agency, 2001).

b. Agua de precipitación y la línea meteórica mundial (LMM)

Las cantidades de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de cualquier muestra de agua de lluvia se relacionan por una línea llamada línea meteórica mundial (LMM) que obedece a la siguiente Ecuación 5.1.6.10.

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$$

Ecuación 5.1.6.10 Línea meteórica mundial

El valor de d , conocido como exceso de deuterio (d -excess), se calcula con la siguiente fórmula (Ecuación 5.1.6.11):

$$d = \delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O}$$

Ecuación 5.1.6.11 Ecuación para el cálculo del exceso de deuterio

Este valor representa la desviación de una muestra con respecto a la LMM, y su valor típico es de 10‰. Sin embargo, en distintas regiones del mundo, y bajo ciertas condiciones climáticas como baja humedad o altas temperaturas en la zona de evaporación, el exceso de deuterio puede variar significativamente. También puede cambiar durante ciertas estaciones del año o incluso durante eventos específicos como tormentas.

El agua que cae en la LMM se asume que ha sido originada en la atmósfera (UNESCO - IAEA, 2001).

La LMM se muestra en la Figura 5.1.6.133, en la que se puede observar que las precipitaciones que caen en áreas con baja temperatura o altas latitudes tienen valores más bajos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$.

La pendiente de la LMM puede cambiar debido a los siguientes procesos:

- i. Interacciones agua-roca (sólo para O)
- ii. Reacciones H_2S (sólo para H)
- iii. Evaporación de cuerpos de agua
- iv. Condensación

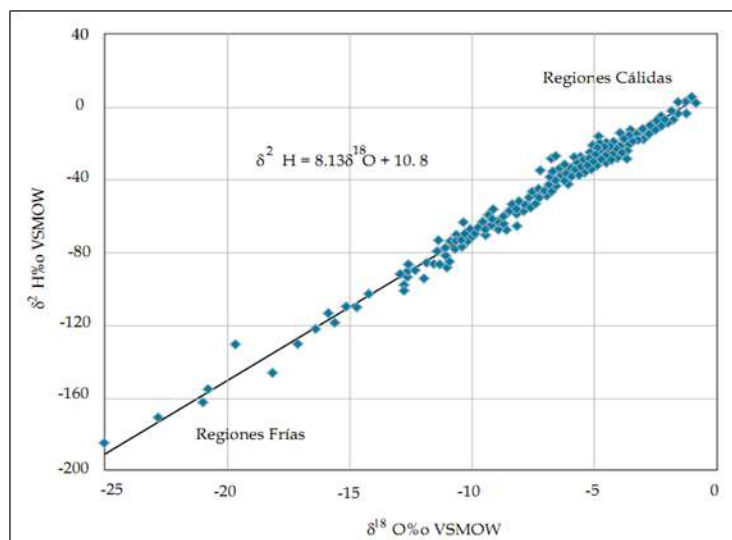


Figura 5.1.6.133 Línea Meteorica Mundial

Fuente: (UNESCO - IAEA, 2001)

Cada uno de estos procesos exhiben desviaciones típicas en los isótopos ambientales. En la Figura 5.1.6.134 se pueden observar dichas desviaciones.

Durante las fases de evaporación y condensación del agua, cambia la concentración de los isótopos (diferentes nucleídos de un mismo elemento), del oxígeno y del hidrógeno. El vapor de agua originado en los océanos tiene una concentración más baja en isótopos pesados que el agua del mar. Cuando se produce una precipitación, las gotas que descienden de la nube tienen una concentración en isótopos pesados más alta. Las masas nubosas, en su recorrido a través de los continentes se empobrecen en isótopos pesados y poco a poco el agua adquiere unas características propias a su medio ambiente (UNESCO - IAEA, 2001).

Durante las fases de evaporación y condensación del agua, cambia la concentración de los isótopos (diferentes nucleídos de un mismo elemento), del oxígeno y del hidrógeno. El vapor de agua originado en los océanos tiene una concentración más baja en isótopos pesados que el agua del mar. Cuando se produce una precipitación, las gotas que descienden de la nube tienen una concentración en isótopos pesados más alta. Las masas nubosas, en su recorrido a través de los continentes se empobrecen en isótopos pesados y poco a poco el agua adquiere unas características propias a su medio ambiente (UNESCO - IAEA, 2001).

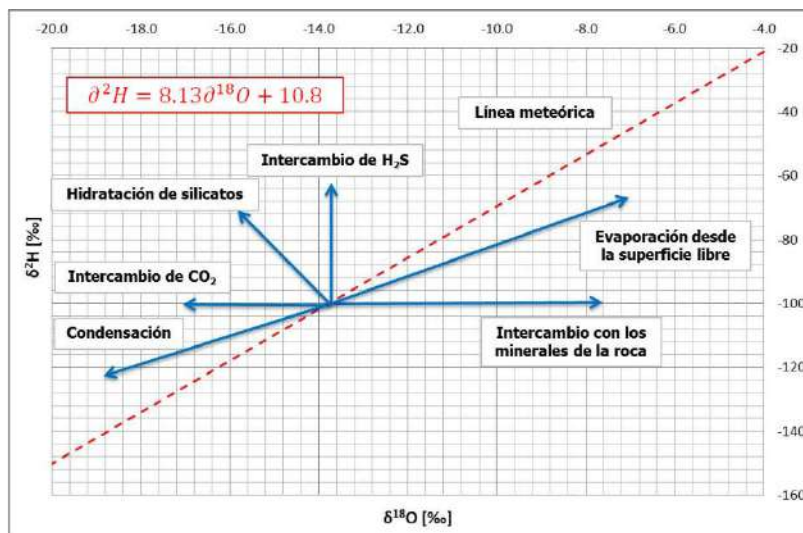


Figura 5.1.6.134 Desviaciones de la línea meteórica

Fuente: Modificado de (Domenico & Schwartz, 1997)

Las moléculas más livianas tienen una mayor probabilidad de salir de la masa de agua en procesos de evaporación o mantenerse en la masa de vapor en los procesos de condensación. Los cuerpos de agua superficiales sometidos a evaporación pueden presentar un contenido particularmente elevado de isótopos pesados (UNESCO - IAEA, 2001).

A medida que aumenta la altitud y se producen las precipitaciones, los valores de la abundancia isotópica δ , de ^2H y ^{18}O van disminuyendo. Esta relación es muy útil en hidrogeología, pues permite identificar la elevación a la que se produce la recarga (UNESCO - IAEA, 2001).

B. Isotopos radioactivos

El tritio es el isótopo radiactivo del hidrógeno, el cual tiene una vida media de 12,32 años. El tritio de la atmósfera se forma naturalmente por la acción de los rayos cósmicos, además de manera antrópica existen aportes gracias a los ensayos termonucleares. La mayor parte del tritio se oxida rápidamente en HTO (agua pesada) incorporándose al ciclo hidrológico (Agencia Internacional de Energía Atómica, 1981). El contenido en tritio de las aguas naturales se expresa en unidades de tritio (UT) la cual corresponde a una concentración de 1 átomo de tritio por 10^{18} átomos de hidrógeno (International Atomic Energy Agency, 2001).

Naturalmente, los rayos cósmicos producen una concentración alrededor de 10 UT en las precipitaciones en las zonas templadas continentales. A partir del año 1953 existieron aportes de grandes cantidades de tritio a la atmósfera producidos por los ensayos termonucleares, alcanzando concentraciones de 10.000 UT para precipitaciones del hemisferio boreal (International Atomic Energy Agency, 2001).

El periodo en la que la mayor parte de tritio fue producido a la atmosfera corresponde a 1953 – 1962, después de este año los países nucleares de la época firmaron un acuerdo para cesar sus ensayos atmosféricos, sin embargo, se produjeron ensayos posteriores, a los que se le sumaron países como China y Francia, pero estos fueron de potencia limitada y no afectaron la composición de tritio en la atmosfera (Gonfiantini & Araguas, 1988).

El rango natural de tritio en las aguas lluvias del hemisferio norte, en el que se encuentran gran cantidad de estaciones de medición del OIEA oscila entre 10 y 30 U.T; para el hemisferio sur las magnitudes de tritio en el agua lluvia son menores y se encuentran alrededor de 5 U.T (Gonfiantini & Araguas, 1988).

En Colombia existen dos estaciones de monitoreo del IAEA ubicadas en Barraquilla y Bogotá, las cuales presentan datos en los periodos 1971 – 1990 y 1971 – 2019 respectivamente. La serie de datos de tritio en el agua lluvia en la estación ubicada en Bogotá se puede observar en la Figura 5.1.6.135, la cual muestra una concentración pico de 25 UT (unidades de tritio) registrada en el año 1971, época para la cual ya se había descargado o desintegrado parte importante del tritio presente en la atmósfera, lo que lleva a suponer que para el año 1961 la concentración pico de tritio, en el peor de los casos, estuvo entre 60 y 80 UT, lo que se puede corroborar observando el comportamiento de estaciones de países fronterizos con Colombia que cuentan con datos de concentración de tritio en la lluvia anteriores a 1971, como se puede observar en la Figura 5.1.6.136.

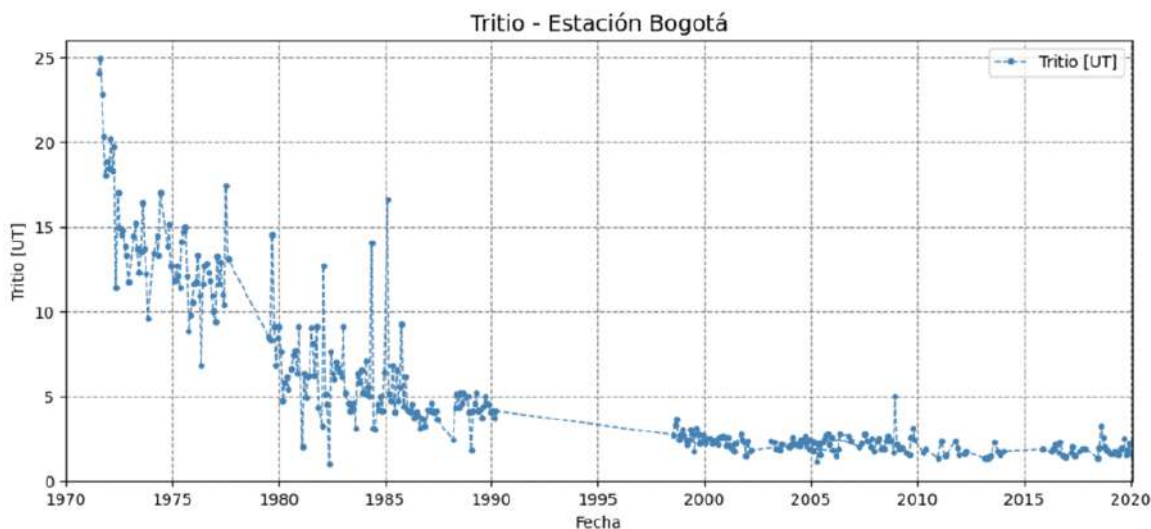


Figura 5.1.6.135 Estación de medición de tritio Bogotá - Colombia

Fuente: de los datos (IAEA/WWO, 2024)

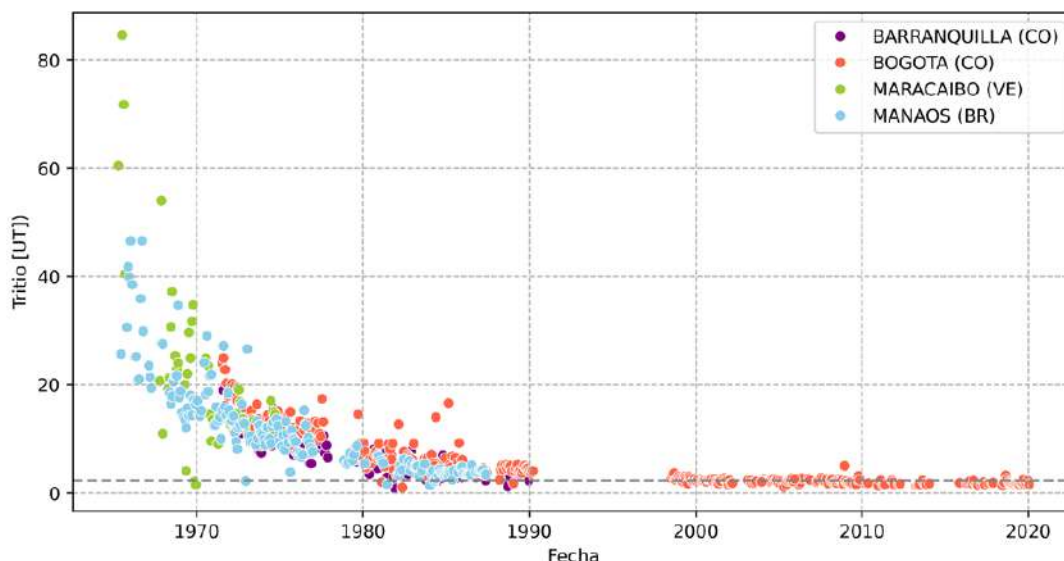


Figura 5.1.6.136 Estaciones de tritio en Colombia y algunos países fronterizos

Fuente de los datos: (IAEA/WWO, 2024)

Específicamente, para Colombia, las variaciones de tritio en la lluvia se encuentran alrededor de 2.3 U.T., lo que hace necesario contar con un buen límite de detección para los análisis de este isótopo.

Los análisis realizados y presentados en este informe se llevaron a cabo en Budapest – Hungría, con un límite de detección de 0,4 U.T. Los límites de detección del tritio empleados en los laboratorios internacionales se observan en la Tabla 5.1.6.57.

Tabla 5.1.6.57 Límites de detección de tritio

Análisis	Precisión
Tritio directo	$2\sigma = 6 \text{ TU}$
Tritio enriquecido	$2\sigma = 0,4 - 0,8 \text{ TU}$
Tritio (enriquecido de ultra bajo nivel -ULL)	$2\sigma = 0,1 \text{ TU}$

Fuente: SHI S.A.S (2025)

C. Toma de muestra

La toma de muestra se realizó siguiendo el procedimiento Protocolo de Muestreo con código DPT-P01 basado en (Ideam, Invemar, 2021). A continuación, se presentan los tipos de muestreo ejecutados por SHI, empresa acreditada para la toma de muestras por IDEAM, mediante la resolución 1630 de noviembre de 2023

a. Toma de muestra simple

Esta muestra consiste en la toma de una porción de agua en un punto o lugar determinado, y representa las condiciones y características de la composición original del agua en el

lugar, tiempo y circunstancias particulares en el instante el que se realizó su recolección. Cuando la composición de una fuente de agua es relativamente constante a través de un tiempo prolongado o a lo largo de áreas sustanciales, se puede decir que la muestra simple es representativa de la fuente objeto de muestreo.

Para el muestreo en piezómetros se requiere de técnicas y precauciones especiales, dado que, al no realizarse un bombeo regular, puede existir una flora bacteriana y un ambiente fisicoquímico muy diferentes a los existentes en la unidad hidrogeológica. Por esta razón, es necesario realizar un proceso de purga que permita desalojar el agua almacenada y asegurar que se está recolectando la muestra de aguas con las condiciones de la unidad hidrogeológica.

La operación de la purga se realiza después de la medición del nivel piezométrico y se desaloja, por lo menos, el volumen ocupado por la columna de agua. Adicionalmente, se realizan mediciones de pH, conductividad eléctrica y temperatura en el agua de la purga para determinar la estabilidad de estos en el tiempo.

Para la toma de muestra se emplea un bailer, el cual consta de un cilindro, una válvula Check, la cual se cierra con el peso del agua, y una cuerda testigo para recuperar el instrumento. El bailer se baja lentamente hasta alcanzar el nivel del agua deseado y luego se procede a subir el bailer para recolectar el agua en un balde o en el recipiente de muestreo en el caso de los parámetros de grasas y aceites y microbiológicos.

En general, para la recolección de las muestras, se emplea un balde graduado y purgado tres veces con agua del punto antes de albergar la muestra.

D. Red de monitoreo de 2020 y 2021

La red de monitoreo empleada en los años 2020 y 2021 constó estuvo constituida por 27 puntos de los cuales 11 corresponden a piezómetros, 8 a manantiales, 4 son drenajes superficiales, 1 Reservorio Artificial y 3 totalizadores de agua lluvia. (Tabla 5.1.6.58).

Para el agua lluvia se instalaron 3 totalizadores a pesar de que la diferencia de altura entre la parte alta y media de la zona no es muy significativa, esto con el fin de identificar el gradiente altitudinal de los isótopos, así como evidencia cambios en la variabilidad de la precipitación, ya que según la media multianual hacia la zona de San Roque llueve más que hacia la zona de San José del Nus.

Para el análisis de Oxígeno 18 y Deuterio se tomaron 30 ml de muestra (27 muestras) y para el tritio se toma un volumen de 1 litro (16 muestras). El símbolo de (✓) significa disponibilidad de datos. El valor del parámetro medido se presenta en cada campaña.

Tabla 5.1.6.58 Puntos de la red de monitoreo isotópico de los años 2020 y 2021

Número	Nombre del punto	Tipo punto	18 O y 2H	Tritio UT 0,4
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	✓	✓
2	M-29	Manantial	✓	✓
3	M-233	Manantial	✓	✓

Número	Nombre del punto	Tipo punto	18 O y 2H	Tritio UT 0,4
4	M191	Manantial	✓	
5	M-18	Manantial	✓	
6	M-237	Manantial	✓	
7	M242	Manantial	✓	
8	M73	Manantial	✓	✓
9	M-79	Manantial	✓	✓
10	BH-2-4	Piezómetro	✓	✓
11	BH-5M-03	Piezómetro	✓	✓
12	DH-FS-309	Piezómetro	✓	
13	DH-TM-100	Piezómetro	✓	✓
14	PZS-12-09	Pozo	✓	✓
15	PZR-12-02	Piezómetro	✓	✓
16	PZR-12-04	Piezómetro	✓	
17	PZS-12-03	Piezómetro	✓	
18	PZS-13-17	Pozo	✓	✓
19	PZR-19-12	Piezómetro	✓	
20	PZR-19-13	Piezómetro	✓	✓
21	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	✓	✓
22	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	✓	
23	Quebrada La Bella	Drenaje superficial	✓	
24	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	✓	
25	TOT-1 La Mayoría (Oficinas de Gramalote)	Totalizador de agua lluvia	✓	✓
26	TOT-2 Manizales (Cerca de Cristales)	Totalizador de agua lluvia	✓	✓
27	TOT-3 La Bella (lado oeste de la zona subiendo hacia San Roque)	Totalizador de agua lluvia	✓	✓

Fuente: SHI S.A.S (2021).

a. Campaña 1 enero (2020)

La semana del 27 al 31 de enero de 2020, se llevó a cabo la campaña 1 de enero de 2020. Para el muestreo de los piezómetros, se realizó la toma del nivel freático y una purga previa para garantizar la representatividad de la muestra. Para el muestreo de los piezómetros se le asignó un bailer a cada uno, dicho bailer está codificado con el nombre de cada punto lo cual evita la contaminación de la muestra.

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo se presentan en la Tabla 5.1.6.59.

Tabla 5.1.6.59 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros de campo. Enero de 2020

Punto Red	Tipo punto	Fecha	pH	CE	¹⁸ O y ² H	Tritio UT 0,4
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	27/01/2019	6,21	61,6	✓	✓
M-29	Manantial	29/01/2019	7,08	42,4	✓	✓
M-233	Manantial	28/01/2019	7,65	157,1	✓	✓
M191	Manantial	30/01/2019	8,07	102,5	✓	
M-18	Manantial	31/01/2019	7,37	130	✓	
M-237	Manantial	28/01/2019	6,92	132	✓	
M242	Manantial	28/01/2019	7,11	67,5	✓	
M73	Manantial	31/01/2019	6,91	90,3	✓	✓
M-79	Manantial	28/01/2019	6,6	387	✓	✓
BH-2-4	Piezómetro	31/01/2019	7,41	659	✓	✓
BH-5M-03	Piezómetro	29/01/2019	6,79	180,6	✓	✓
DH-FS-309	Piezómetro	31/01/2019	6,53	365	✓	
DH-TM-100	Piezómetro	31/01/2019	6,59	292	✓	✓
PZS-12-09	Pozo	30/01/2019	6,79	406	✓	✓
PZR-12-02	Piezómetro	30/01/2019	6,67	68	✓	✓
PZR-12-04	Piezómetro	29/01/2019	7,04	495	✓	
PZS-12-03	Piezómetro	30/01/2019	7,15	279	✓	
PZS-13-17	Pozo	29/01/2019	6,97	55,1	✓	✓
PZR-19-12	Piezómetro	31/01/2019	6,78	81,3	✓	
PZR-19-13	Piezómetro	31/01/2019	6,64	68,7	✓	✓
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	30/01/2019	8,2	127,3	✓	✓
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	28/01/2019	7,45	134,4	✓	
Quebrada La Bella	Drenaje superficial	27/01/2019	7,97	115,1	✓	
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	30/01/2019	7,4	71,7	✓	
T1 Mayoría	Totalizador de agua lluvia	27/01/2019	6,86	13,87	✓	✓
T2 Manizales	Totalizador de agua lluvia	28/01/2019	7	268	✓	✓
T3 La Bella	Totalizador de agua lluvia	27/01/2019	6,99	134,3	✓	✓

Fuente: SHI S.A.S (2021).

Durante la ejecución de la campaña de muestreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica en todos los puntos de muestreo. Los resultados obtenidos durante la campaña de muestreo 1 se muestran en la Figura 5.1.6.137 para pH y en la Figura 5.1.6.138 para conductividad eléctrica.

Los drenajes superficiales, que fueron objeto de muestreo, presentan valores de pH cercanos a 8 unidades para la quebrada La Bella y La Palestina, y cercanos a 7 unidades para la quebrada San Antonio y El Topacio, por otra parte, el Reservorio Artificial ubicado en La Mayoría tiene un pH ligeramente ácido muy cercano a 6 unidades de pH.

El rango de variación de pH en los manantiales fue de 6,6 – 8,7 unidades de pH, indicando agua de ligeramente ácida a neutra y ligeramente básica. En su gran mayoría las aguas de los manantiales presentaron características de aguas neutras dado su valor de pH cercano a las 7 unidades.

De forma similar que los manantiales se comportaron los valores de pH obtenidos en piezómetros, pozos y recolectores de agua lluvia; mostrando un rango de variación de 6,53 – 7,41 unidades de pH para pozos y piezómetros y de 6,86 – 7,00 unidades de pH en aguas lluvias.

La conductividad eléctrica de las fuentes de agua caracterizadas presenta contrastes importantes entre tipo de fuentes, situación típica, debido a que el agua subterránea sufre procesos fisicoquímicos distintos al agua superficial o al agua lluvia.

Las aguas superficiales y gran parte de los manantiales caracterizados presentan valores cercanos a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, considerado bajo si se tiene en cuenta que un valor cercano a 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ corresponde a agua desmineralizada, es decir sin ningún sólido disuelto. El manantial M79 presentó un valor de conductividad eléctrica cercano a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor considerablemente mayor al resto de manantiales que conforman la red de monitoreo, lo que indica potencial por contaminación, o que el agua sufrió algún proceso de disolución de minerales en su recorrido por el medio subterráneo.

De forma general, las aguas de circulación de los manantiales de la zona corresponden a agua con valores bajos de conductividad eléctrica y por lo tanto poco mineralizadas y de corto tiempo de residencia en el medio subterráneo.

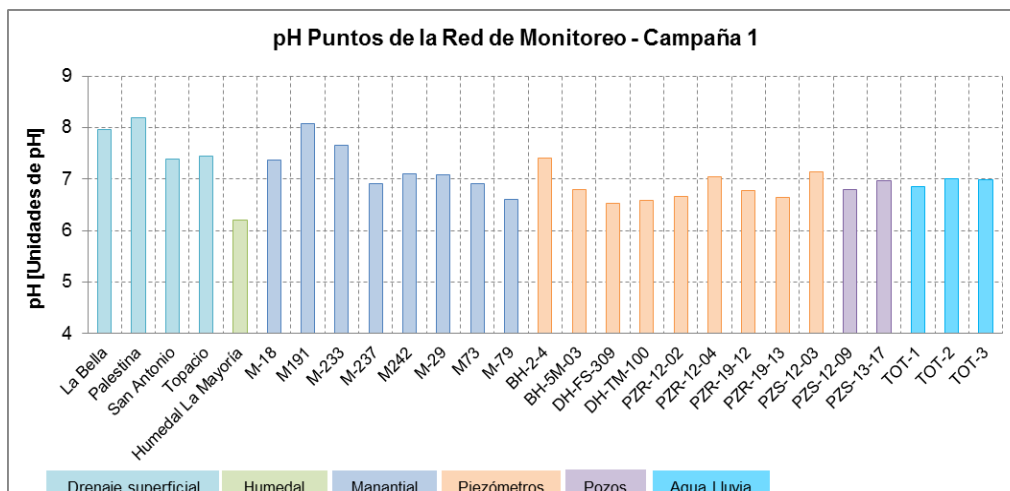


Figura 5.1.6.137 pH de los puntos que conforman la red de monitoreo de isótopos. Enero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

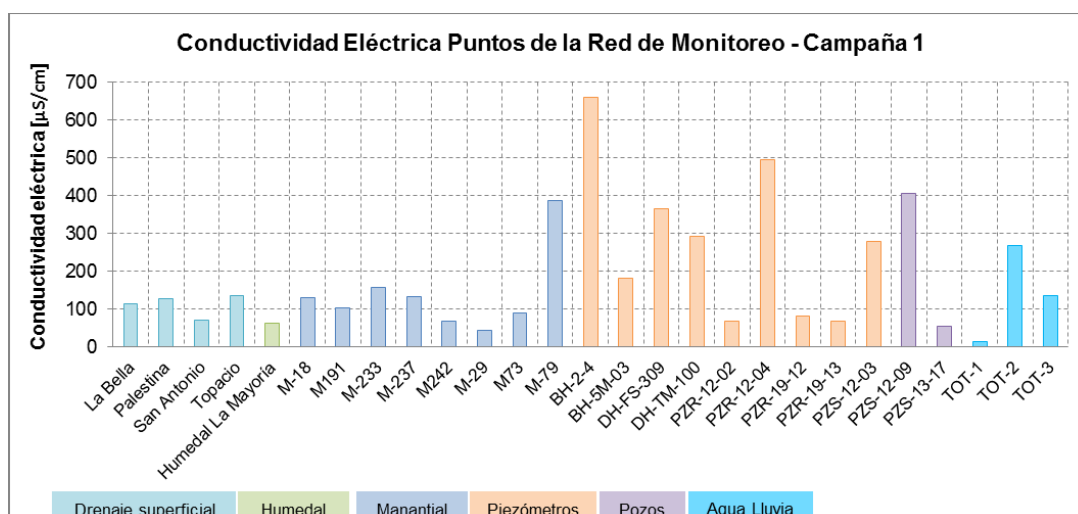


Figura 5.1.6.138 Conductividad eléctrica de los puntos que conforman la red de monitoreo de isótopos. Enero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

El agua lluvia recolectada en los totalizadores presentan un comportamiento atípico en cuanto a su conductividad eléctrica en los puntos T2 y T3, ya que para zonas poco industrializadas se esperan valores por debajo de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El punto identificado con el código T1 si presenta una conductividad eléctrica típica para el agua lluvia de 13,87 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Es importante mencionar que los totalizadores T2 y T3 se encontraron deteriorados en la campaña de muestreo, esto puede explicar las anomalías encontradas en sus valores de

conductividad eléctrica, ya que aún no se contaba con sistema de cerramiento de los puntos, y ganado vacuno pudo tener contacto con el embudo superficial por donde entra el agua lluvia.

La conductividad eléctrica de los piezómetros y pozos muestran una fuerte variación con valores menores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta valores cercano a 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en la Figura 5.1.6.139 se presentan los datos de conductividad eléctrica registrados en los piezómetros y pozos de la red de monitoreo contra la profundidad de cada uno de estos instrumentos.

En la Figura 5.1.6.139 es posible identificar dos tendencias, hacia la izquierda de la figura se encuentra un conjunto de puntos cuya conductividad oscila alrededor de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (circulo punteado de color rojo), en estos puntos la conductividad eléctrica no depende de la profundidad del piezómetro, esto puede indicar que existen flujos de agua que no modifican mucho su química durante su recorrido por el medio subterráneo, lo cual puede ocurrir porque el flujo es muy rápido o el medio es poco reactivo, o una combinación de ambas.

Por otro lado, hacia la derecha del gráfico se observa un conjunto de puntos cuya conductividad eléctrica aumenta con la profundidad, y presentan valores de conductividad eléctrica considerablemente mayor al grupo mencionado previamente, esto puede ser ocasionado por circulación lenta en el medio subterráneo (al tratarse de una roca ígnea con diferentes horizontes de meteorización) o el contacto con una zona mineralizada que está aportando iones al agua.

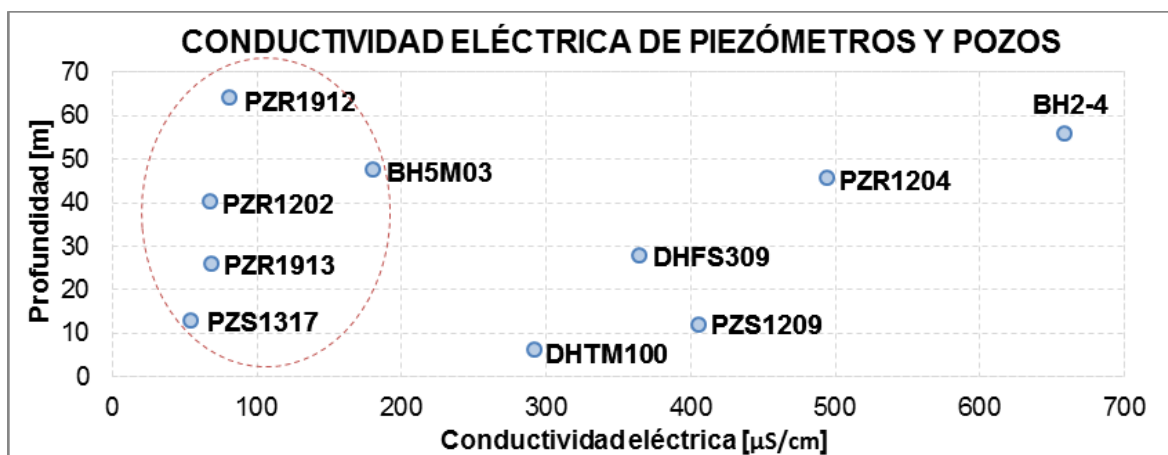


Figura 5.1.6.139 Conductividad eléctrica vs profundidad en pozos y piezómetros

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de deuterio y oxígeno 18 se muestran en la Tabla 5.1.6.60 y de forma gráfica en la Figura 5.1.6.140, allí se puede observar que drenajes superficiales, manantiales y piezómetros forman un grupo con similar marca isotópica, con concentración relativa de oxígeno 18 entre -7,69‰ y -9,53‰ y concentración relativa de deuterio entre -52,59‰, -

64,04, lo que puede sugerir que estas fuentes de agua tienen el mismo origen, el cual corresponde a la precipitación en el área de influencia.

Por otro lado, el agua lluvia que se almacenó en los recolectores (totalizadores) durante el mes de enero presenta mayor enriquecimiento en deuterio y oxígeno 18 en comparación con el resto de los puntos que conforman la red de monitoreo, situación típica para época seca, en la cual, por el efecto de cantidad, los isótopos deuterio y oxígeno 18 suelen enriquecerse en el agua lluvia.

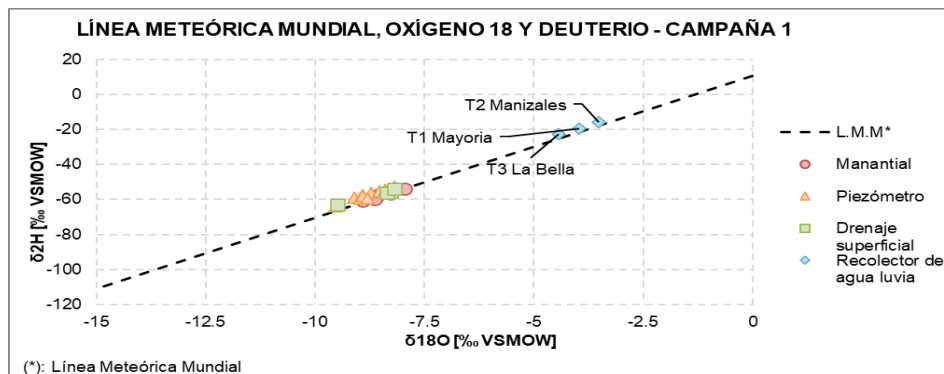


Figura 5.1.6.140 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno 18 y deuterio campaña 1. Enero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.60 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 1. Enero 2020

Puntos	Tipo	δ18O	δ2H
		VSMOW ± 0.2‰	VSMOW ± 0.8‰
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio	-8,28	-56,29
M-29	Manantial	-8,52	-57,01
M-233	Manantial	-8,64	-57,85
M-191	Manantial	-8,64	-59,11
M-18	Manantial	-8,91	-60,60
M-237	Manantial	-8,21	-54,85
M-242	Manantial	-8,28	-56,44
M-73	Manantial	-7,96	-53,81
M-79	Manantial	-8,64	-59,71
BH-2-4	Piezómetro	-8,18	-52,59
BH-5M-03	Piezómetro	-8,92	-57,58
DH-FS-309	Piezómetro	-9,11	-58,70
DH-TM-100	Piezómetro	-8,72	-56,16
PZS-12-09	Pozo	-8,53	-55,28
PZR-12-02	Piezómetro	-8,97	-59,27
PZR-12-04	Piezómetro	-8,39	-54,46
PZS-12-03	Piezómetro	-8,92	-58,06
PZS-13-17	Pozo	-8,81	-59,53

Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	δ^2H
		VSMOW $\pm 0.2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0.8\text{‰}$
PZR-19-12	Piezómetro	-9,53	-64,02
PZR-19-13	Piezómetro	-9,49	-63,15
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,27	-55,67
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,35	-56,34
Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,18	-53,89
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,40	-57,48
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-3,97	-19,61
T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-3,52	-15,78
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-4,44	-22,65

* $\delta^{18}O$: oxígeno - δ^2H : Deuterio.

Fuente: SHI S.A.S (2021)

III. Resultados de Tritio (época de verano)

En Colombia existen dos estaciones de monitoreo del IAEA ubicadas en Barraquilla y Bogotá, las cuales presentan datos en los periodos 1971 – 1990 y 1971 – 2016 respectivamente, la serie de datos de tritio en el agua lluvia en la estación ubicada en Bogotá se puede observar en la Figura 5.1.6.141, la cual muestra una concentración pico de 25 UT (unidades de tritio) registrada en el año 1971, época para la cual ya se había descargado o desintegrado parte importante del tritio presente en la atmósfera, lo que lleva a suponer que para el año 1961 la concentración pico de tritio, en el peor de los casos, estuvo entre 60 y 80 UT, lo que se puede corroborar observando el comportamiento de estaciones de países fronterizos con Colombia que cuentan con datos de concentración de tritio en la lluvia anteriores a 1971, como se puede observar en la Figura 5.1.6.141

La disminución en las concentraciones pico de tritio en la atmósfera en Suramérica, es una limitante para la datación de las aguas subterráneas en estas latitudes; ya que, con concentraciones pico de tritio tan bajas y teniendo en cuenta que la vida media del tritio equivale a 12,45 años (Agencia Internacional de Energía Atómica, 1981), el periodo de datación es limitado y la incertidumbre es bastante alta. Una muestra de esto es que el agua subterránea recargada en los años 60 (suponiendo una concentración pico de a lo sumo 120 UT y un sistema totalmente cerrado) tendría a fecha de hoy una concentración de tritio de 5 UT, lo que comprende la variación natural para Colombia según la Figura 5.1.6.142.

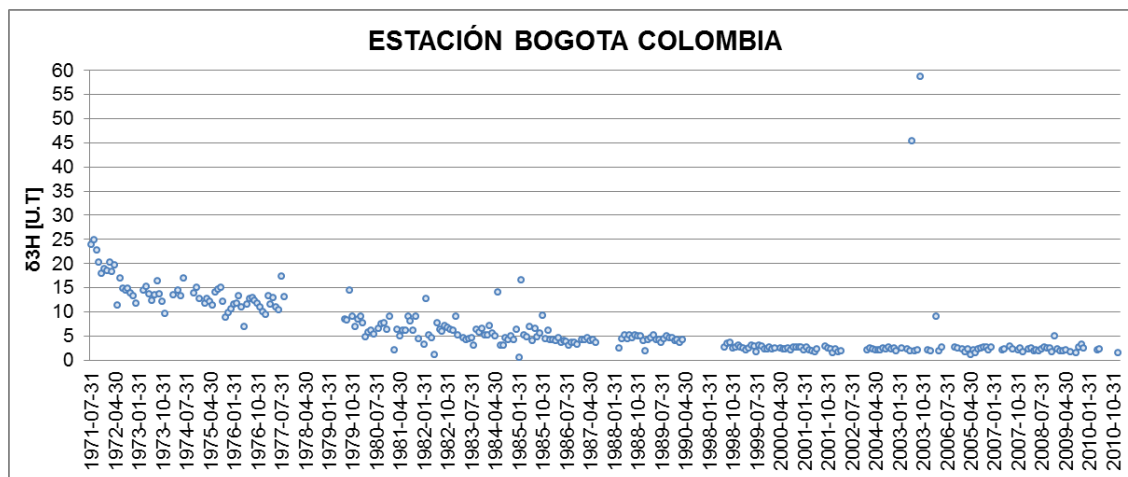


Figura 5.1.6.141 Estación de medición de tritio Bogotá - Colombia

Fuente: IAEA, (2020)

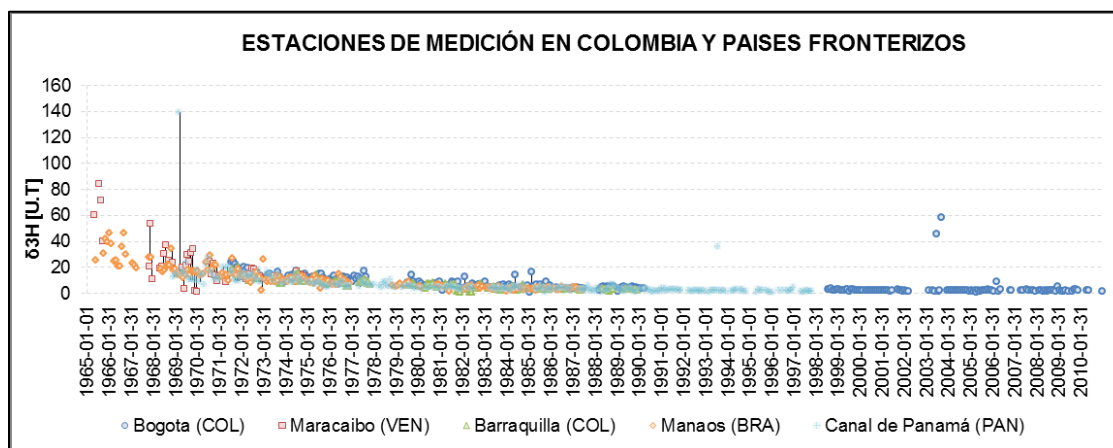


Figura 5.1.6.142 Estaciones de tritio en Colombia y algunos países fronterizos

Fuente: IAEA, (2020)

Los resultados de tritio son presentados en la Tabla 5.1.6.61. El agua del punto de monitoreo identificado como PZS-13-17 presentó una concentración relativa de tritio apreciablemente mayor al resto de puntos que se analizaron en esta campaña, con un valor de 11,86 U.T. Los análisis restantes de tritio en el agua proveniente de los puntos de monitoreo dan como resultado un valor por debajo al de la lluvia para Colombia, el cual es aproximadamente 2,3 UT, como quedó en evidencia en la Figura 5.1.6.142.

Tabla 5.1.6.61 Resultados de tritio campaña 1 – época seca. Laboratorio Wessling. Enero 2020

Punto	Tritio [Bq/dm3]	Tritio [TU]
Reservorio Artificial La Mayoría	0,14	1,19
Quebrada Palestina	0,20	1,69
BH-2-4	0,16	1,36
BH-5M-03	0,08	0,68
DH-TM-100	0,11	0,93
M -29	0,14	1,19
M-73	0,13	1,10
M-79	0,11	0,93
M-233	0,11	0,93
PZR-12-02	0,12	1,02
PZS-12-09	0,07	0,59
PZS-13-17	1,4	11,86
PZR-19-13	0,12	1,02
T1 Mayoría	0,10	0,85
T2 Manizales	0,17	1,44
T3 La Bella	0,16	1,36

TU: Unidades de tritio [Bq/dm3]: becquerel por decímetro cúbico.

Fuente: SHI S.A.S (2021)

b. Campaña 2 febrero (2020)

La semana del 24 al 29 de febrero de 2020, se llevó a cabo la segunda campaña de muestreo, en la Tabla 5.1.6.62 se presentan los parámetros de campo pH y conductividad eléctrica, necesarios para los análisis del laboratorio. En esta campaña no se realizó medición de Tritio 0,4UT, ya que el próximo muestreo de este isótopo se hará en época húmeda.

El totalizador 2 evidenció afectación antrópica; ya que, en el agua muestreada se hallaron pelos de ganado, tierra y hojas, lo que alteró la conductividad eléctrica de dicho punto. Para evitar dicha situación en los próximos muestreos, se cercaron los 3 totalizadores.

Tabla 5.1.6.62 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros de campo. Febrero 2020

Punto Red	Tipo punto	Fecha	pH	CE
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	28/02/2020	6,21	61,3
M-29	Manantial	25/02/2020	7,11	52,5
M-233	Manantial	29/02/2020	7,38	83,3
M191	Manantial	26/02/2020	7,66	125,3
M-18	Manantial	26/02/2020	7,1	72,6
M-237	Manantial	27/02/2020	7,15	82,1
M242	Manantial	24/02/2020	5,9	60,3
M73	Manantial	24/02/2020	6,78	135,6
M-79	Manantial	28/02/2020	6,65	90,3
BH-2-4	Piezómetro	25/02/2020	6,91	282

Punto Red	Tipo punto	Fecha	pH	CE
BH-5M-03	Piezómetro	28/02/2020	6,72	152,8
DH-FS-309	Piezómetro	28/02/2020	6,65	201,4
DH-TM-100	Piezómetro	25/02/2020	6,6	144,6
PZS-12-09	Pozo	26/02/2020	6,59	379
PZR-12-02	Piezómetro	25/02/2020	6,49	79,4
PZR-12-04	Piezómetro	27/02/2020	7,02	439
PZS-12-03	Piezómetro	25/02/2020	7,07	361
PZS-13-17	Pozo	26/02/2020	6,56	124,2
PZR-19-12	Piezómetro	26/02/2020	6,75	96,1
PZR-19-13	Piezómetro	25/02/2020	6,65	80,3
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	26/02/2020	7,4	145,3
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	24/02/2020	7,18	88,2
Quebrada La Bella	Drenaje superficial	26/02/2020	7,53	117,1
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	29/02/2020	7,19	95,4
TOT-1	Totalizador de agua lluvia	24/02/2020	6,93	39,5
TOT-2	Totalizador de agua lluvia	27/02/2020	6,89	128,1
TOT-3	Totalizador de agua lluvia	28/02/2020	7,42	45,4

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo pH y conductividad eléctrica que se midieron en cada uno de los puntos de muestreo se puede observar en la Figura 5.1.6.143 y Figura 5.1.6.144 respectivamente. El pH de las aguas superficiales se encontró muy cerca a las 7 unidades de pH, mientras que el Reservorio Artificial se ubicó por debajo de este valor, presentando características ligeramente ácidas, con un pH de 6,21.

Los manantiales que conforman la red de monitoreo presentan un valor de pH cercano a la neutralidad (7 unidades de pH) y valores de conductividades bajos (menores a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo que sugiere que los manantiales surgen aguas con poco tiempo de residencia en el medio subterráneo.

En total se visitaron 11 piezómetros los cuales se encuentran distribuidos en el área de influencia, y cuentan con profundidades y litología variables, algunos de estos tienen las rejillas en el aluvial, otros en el saprolito y otro en la roca, lo que proporciona tipos de agua un poco diferentes. Esto queda en evidencia en la Figura 5.1.6.143, donde se nota gran variabilidad de los valores de conductividad eléctrica en el piezómetro monitoreado, en cuanto al pH de este tipo de punto es ligeramente ácido, probablemente por la interacción del agua con la materia orgánica de las primeras capas del suelo.

Como se mencionó previamente el punto denominado totalizador 2 se encontró con algunas alteraciones, la cuales se ven reflejadas en los parámetros de campo obtenidos, principalmente en la conductividad eléctrica. En la Figura 5.1.6.144 es evidente que es precisamente el totalizador 2 el que presenta un valor de conductividad eléctrica mucho mayor los otros dos totalizadores instalados.

En cuanto al totalizador 1 y 3 presentan parámetros que concuerdan con las características del agua lluvia, las cuales presentan generalmente pH entre 6 y 8 en zonas no contaminadas y conductividades eléctricas menores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e incluso mucho menores a medida que el punto de recolección se aleja de la zona costera. Finalmente, las aguas superficiales presentan comportamientos similares en conductividad eléctrica y pH a los manantiales, sugiriendo cierta conexión entre estos dos tipos de fuentes, conexión que puede tener origen en el agua lluvia del área de influencia.

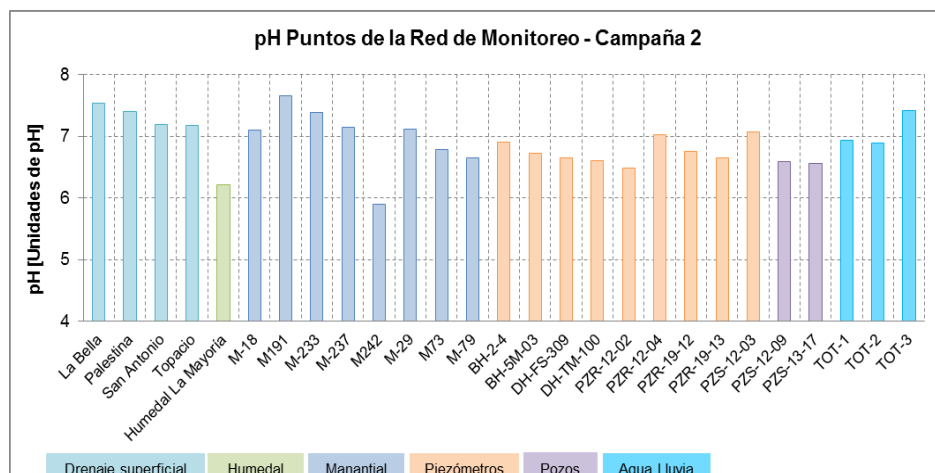


Figura 5.1.6.143 pH de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Febrero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

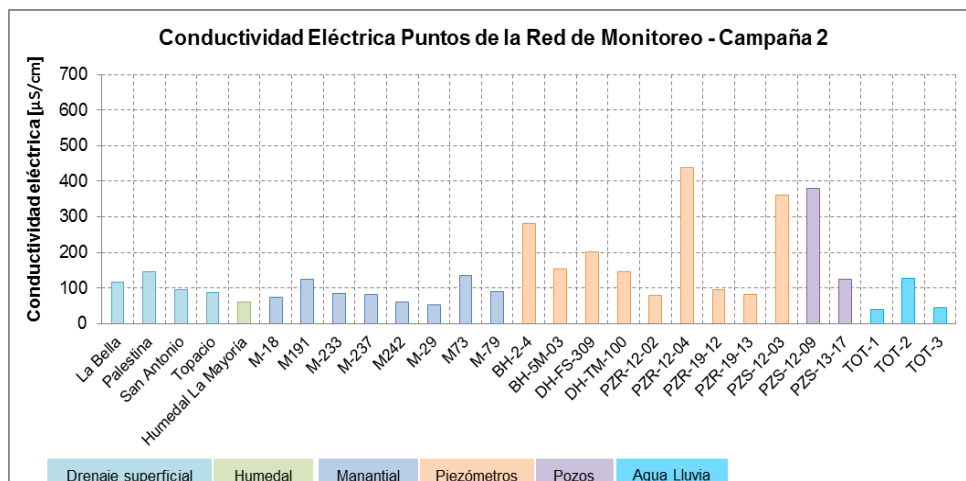


Figura 5.1.6.144 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Febrero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

En la Figura 5.1.6.145 se observa que el agua lluvia se encuentra muy enriquecida con respecto al resto de puntos que conforman la red de monitoreo, esto es producto del efecto de cantidad, el cual expresa la relación existente entre la cantidad de lluvia y la composición isotópica de la misma, y dado que febrero es regularmente un mes seco el enriquecimiento isotópico de la lluvia es una condición normal. en la Tabla 5.1.6.63 se pueden ver los resultados para esta campaña.

Por otro lado, el agua subterránea y superficial no se ve afectada por las variaciones isotópicas que presenta el agua lluvia por los efectos de condensación y evaporación, ya que, una vez infiltrada en el subsuelo estos procesos no tienen lugar.

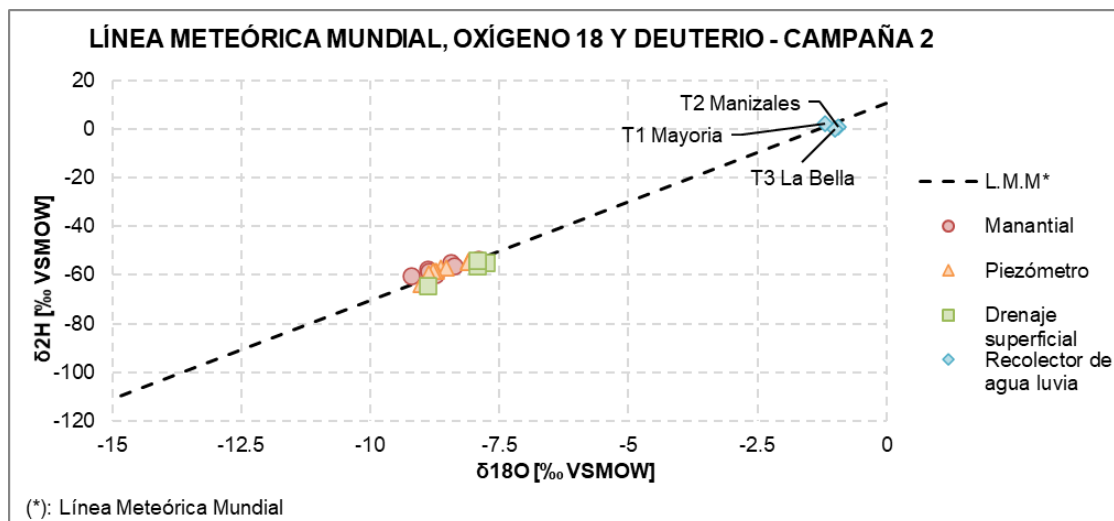


Figura 5.1.6.145 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno 18 y deuterio campaña 2. Febrero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.63 Resultados de deuterio y oxígeno 18 de campaña 2. Febrero 2020

Puntos	Tipo	δ18O	δ2H
		VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,38	-55,97
M-29	Manantial	-8,43	-55,83
M-233	Manantial	-8,9	-57,48
M-191	Manantial	-8,87	-58,61
M-18	Manantial	-9,22	-60,47
M-237	Manantial	-8,44	-54,65
M-242	Manantial	-8,37	-56,09
M-73	Manantial	-7,92	-53,52
M-79	Manantial	-8,75	-59,73
BH-2-4	Piezómetro	-8,08	-53,78
BH-5M-03	Piezómetro	-8,63	-57,3
DH-FS-309	Piezómetro	-8,72	-58,23
DH-TM-100	Piezómetro	-8,53	-57,2
PZS-12-09	Piezómetro	-8,1	-54,36
PZR-12-02	Piezómetro	-8,74	-58,6
PZR-12-04	Piezómetro	-8,11	-54,64
PZS-12-03	Piezómetro	-8,79	-58,4

Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	δ^2H
		VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
PZS-13-17	Piezómetro	-8,86	-59,36
PZR-19-12	Piezómetro	-9,02	-63,66
PZR-19-13	Piezómetro	-8,89	-64,24

Fuente: SHI S.A.S (2021)

c. Campaña 3 mayo (2020)

La campaña de toma de muestras para análisis de isótopos ambientales deuterio y oxígeno 18 se ejecutó en el mes de mayo de 2020, pues durante el mes de marzo y abril no fue posible recolectar muestras de agua, debido a la cuarentena nacional que decretó el gobierno por motivo de la pandemia del virus denominado COVID-19.

La recolección de las muestras se realizó entre el 27/05/2020 y el 03/06/2020, en cada uno de los puntos visitados se tomaron mediciones en campo de los parámetros pH y conductividad eléctrica, cuyos resultados son presentados en la Tabla 5.1.6.64.

El piezómetro identificado con el código BH-2-4 se encontró deteriorado, lo que hizo imposible la recolección de las muestras, este punto queda deshabilitado para futuras campañas de muestreo. Por otro lado, se visitaron los tres totalizadores instalados en el área de influencia del proyecto Gramalote, sin embargo, se tomó la decisión de no recolectar muestras; ya que; el muestreo de agua lluvia corresponde a una integración mensual y por motivo de la cuarentena la muestra recolectada en los totalizadores cumplía más de dos meses de integración.

En la visita a los totalizadores se realizó mantenimiento general a la zona en la que están ubicados y se procedió a desocupar el volumen, para iniciar nuevamente la integración mensual para la siguiente campaña, por lo tanto, en esta campaña no se tomó registro del agua lluvia.

Tabla 5.1.6.64 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de mayo 2020

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [$\mu S/cm$]
Quebrada San Antonio	Quebrada	2/06/2020	6,88	100,4
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	27/05/2020	6,47	30,9
Quebrada La Bella	Quebrada	1/06/2020	7,52	69,4
Quebrada Palestina	Quebrada	30/05/2020	7,06	48,7

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μS/cm]
Quebrada Topacio	Quebrada	28/05/2020	7,01	79,9
M-29	Manantial	2/06/2020	6,96	87,9
M-242	Manantial	3/06/2020	6,99	35,2
M-18	Manantial	3/06/2020	7,26	100,6
M-233	Manantial	3/06/2020	7,58	79
M-73	Manantial	1/06/2020	6,92	79,2
M-79	Manantial	1/06/2020	6,91	131,6
M-191	Manantial	1/06/2020	7,81	98,5
M-237	Manantial	1/06/2020	6,99	62,2
M-73	Manantial	1/06/2020	6,92	79,2
PZS-12-09	Piezómetro	30/05/2020	6,65	429
PZS-13-17	Piezómetro	29/05/2020	6,42	78,6
DH-FS-309	Piezómetro	29/05/2020	6,58	389
PZR-12-02	Piezómetro	29/05/2020	6,43	87,3
PZR-12-03	Piezómetro	29/05/2020	7,04	575,0
DH-TM-100	Piezómetro	28/05/2020	6,48	169,5
PZR-19-13	Piezómetro	28/05/2020	6,61	93,6
BH-5M-03	Piezómetro	28/05/2020	6,86	190
PZR-12-04	Piezómetro	28/05/2020	7,07	467
PZR-19-13	Piezómetro	28/05/2020	6,42	83,2

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Los valores de pH y conductividad eléctrica medidos durante la tercera campaña de 2020 son presentados en la Figura 5.1.6.146 y Figura 5.1.6.147. Es importante recordar que el punto identificado con el código BH-2-4 fue averiado por personas ajenas al proyecto, y en los puntos de recolección de agua lluvia T1, T2 y T3 no se tomaron muestras debido a la

acumulación de agua lluvia de dos meses debido a que se cancelaron las campañas de muestreo por la pandemia del COVID – 19.

De forma general el pH de los puntos que conforman la red de monitoreo presenta una variación entre 6 y 8 unidades de pH, los drenajes superficiales presentan un pH neutro, mientras que el Reservorio Artificial presentó un pH ligeramente ácido con un valor de 6,47.

El comportamiento evidenciado en las dos campañas de muestreo anteriores se mantiene, la conductividad eléctrica de manantiales y drenajes superficiales se encuentra en su mayoría por debajo de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y el pH muy cercano a 7 unidades de pH. Por otro lado, los piezómetros y pozos presentan una mayor variación en cuanto a la conductividad eléctrica, y teniendo en cuenta que tanto la profundidad de los piezómetros/pozos como unidad geológica en la que se encuentran las rejillas, cambia entre piezómetros, es normal encontrar dicha variabilidad.

De lo anterior, se puede hacer una diferenciación entre dos tipos de aguas, las aguas con bajas conductividades eléctricas (menores a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) las cuales fluyen rápidamente por el medio subterráneo luego de su infiltración y emergen a la superficie, y aquellas agua que tienen un recorrido más lento y quizás más largo, desde la parte alta de la cuenca hacia la parte más baja, cuya conductividad alcanza a ser modificada de forma apreciable por la interacción agua – medio subterráneo, es importante aclarar, que estos dos tipo de agua tiene como origen común la precipitación de la zona de estudio.

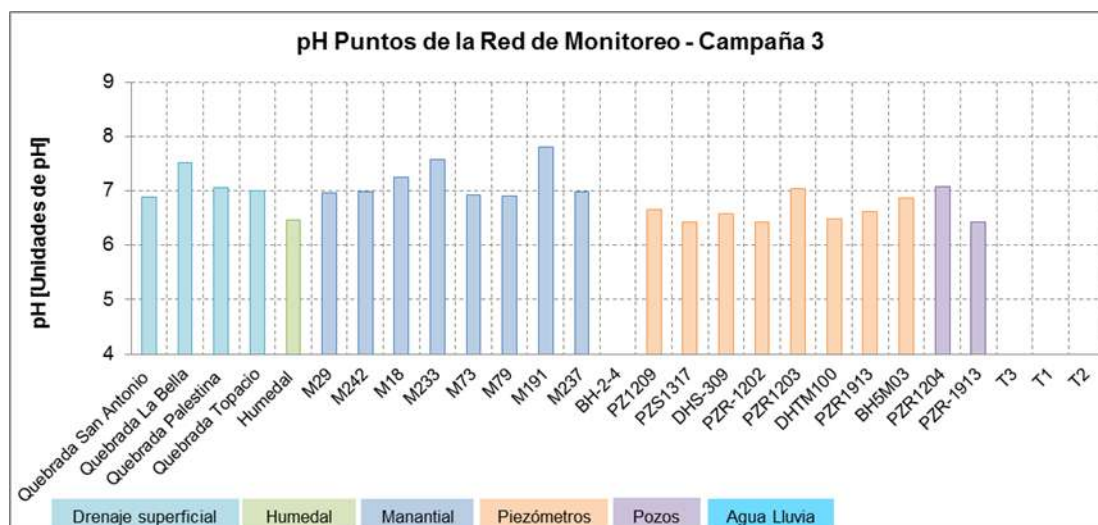


Figura 5.1.6.146 pH de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Mayo 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

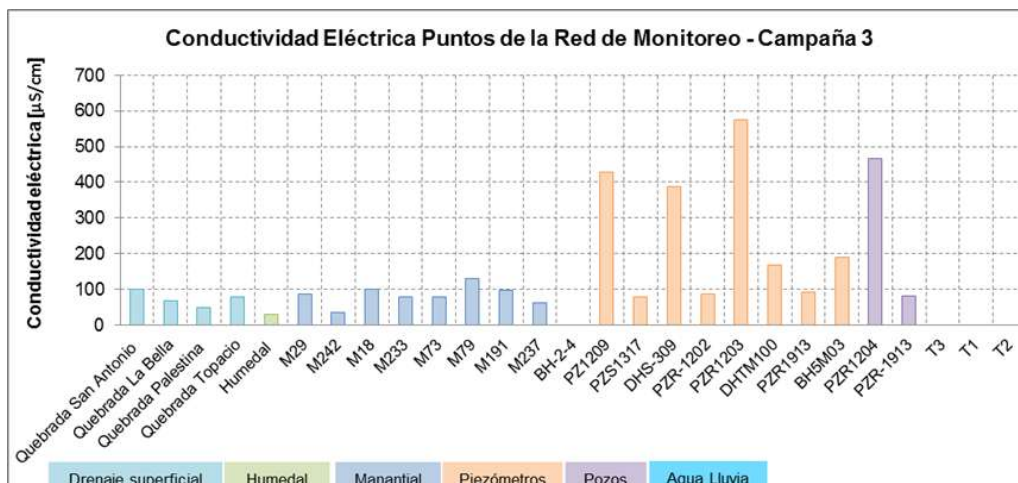


Figura 5.1.6.147 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo isotópico.
Mayo 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de los isótopos ambientales deuterio y oxígeno 18 se encuentra en la Tabla 5.1.6.65 y en la Figura 5.1.6.148 es posible visualizar las composiciones isotópicas sobre la recta meteórica mundial.

Allí se observa que los datos se ubican sobre la región de la línea meteórica mundial que comprende $[-7,86 \text{ } ^\circ, -10,19 \text{ } ^\circ]$ para oxígeno 18 y $[-51,18 \text{ } ^\circ, -70,23 \text{ } ^\circ]$ para deuterio. Los manantiales, algunos puntos superficiales y los piezómetros y pozos están agrupados todos dentro del rango mencionado y se encuentran cercanos entre sí, únicamente un punto de agua superficial está más empobrecido que el resto de las muestras.

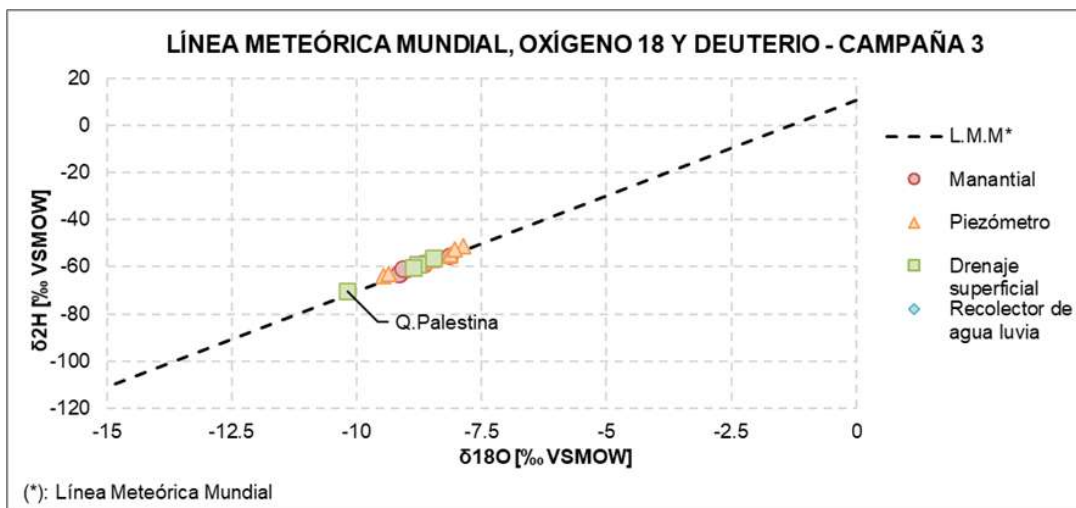


Figura 5.1.6.148 Línea Meteórica Mundial y composición isotópica de los puntos de muestreo campaña 3. Mayo 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.65 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 3. Mayo 2020

Puntos	Tipo	δ18O	δ2H
		VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-9,96	-69,65
M-29	Manantial	-8,69	-58,53
M-233	Manantial	-8,98	-60,65
M-191	Manantial	-8,65	-58,82
M-18	Manantial	-9,15	-62,78
M-237	Manantial	-8,89	-60,25
M-242	Manantial	-8,15	-55,08
M-73	Manantial	-9,16	-62,97
M-79	Manantial	-9,08	-60,89
BH-5M-03	Piezómetro	-7,86	-51,18
DH-FS-309	Piezómetro	-8,66	-57,97
DH-TM-100	Piezómetro	-8,48	-57,13
PZS-12-09	Piezómetro	-8,14	-55,09
PZR-12-02	Piezómetro	-8,79	-59,3

Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	δ^2H
		VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
PZR-12-04	Piezómetro	-8,12	-54,67
PZS-12-03	Piezómetro	-8,03	-52,73
PZS-13-17	Piezómetro	-8,72	-58,96
PZR-19-12	Piezómetro	-9,46	-63,98
PZR-19-13	Piezómetro	-9,36	-62,91
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-10,19	-70,23
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,46	-56,13
Quebrada La Bella	Drenaje superficial	-8,78	-58,79
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,87	-60,05

Fuente: SHI S.A.S (2021)

d. Campaña 4 junio (2020)

La campaña 4 de recolección de muestras de agua fue ejecutada entre los días 22 y 27 de junio del 2020, en cada uno de los puntos de monitoreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, los cuales se presentan en la Tabla 5.1.6.66.

Es importante reiterar que el piezómetro denominado BH-2-4 se encuentra deshabilitado para el muestreo debido a daños que sufrió en el mes anterior.

Tabla 5.1.6.66 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de junio 2020

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [$\mu S/cm$]
PZS1203	Piezómetro	26/06/2020	6,86	425
PZR-12-02	Piezómetro	26/06/2020	6,36	98
M191	Manantial	27/06/2020	7,45	144,3
M242	Manantial	27/06/2020	6,82	63,3
M18	Manantial	26/06/2020	7,05	71,5
PZS-12-09	Piezómetro	26/06/2020	6,46	409
DH-TM-100	Piezómetro	25/06/2020	6,36	188,5
DH-TM-309	Piezómetro	25/06/2020	6,27	211,3
BH-5M-03	Piezómetro	25/06/2020	6,64	209,1
PZR-19-13	Piezómetro	24/06/2020	6,29	90,4
M-29	Manantial	22/06/2020	7,15	56

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μS/cm]
PZR-12-04	Piezómetro	24/06/2020	6,84	492
PZS-13-17	Piezómetro	24/06/2020	6,17	72,9
M-73	Manantial	22/06/2020	6,92	140,3
M-233	Manantial	24/06/2020	7,14	92,5
M-236	Manantial	23/06/2020	7,34	86
PZR 19-12	Piezómetro	24/06/2020	6,45	115,9
M-79	Manantial	23/06/2020	6,35	82,9
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	27/06/2020	6,2	8,07
T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	23/06/2020	5,83	8,19
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	22/06/2020	7,26	17,23
Quebrada Topacio	Quebrada	22/06/2020	7,02	92,3
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	27/06/2020	6,71	107,4
Quebrada San Antonio	Quebrada	25/06/2020	6,99	98,4
Quebrada Palestina	Quebrada	23/06/2020	7,09	188,2
Quebrada La Bella	Quebrada	23/06/2020	7,12	93,2

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

En la Figura 5.1.6.149 y Figura 5.1.6.151 se presentan los parámetros de campo (pH y conductividad eléctrica) de los puntos que conforman la red de monitoreo de isótopos, el rango de variación de pH para la campaña del mes de junio fue de [5,83-7,45] siendo el menor valor el que presentó el totalizador 2, ubicado en la vereda Manizales y el punto con mayor valor de pH fue el manantial identificado con el código M-191, ubicado en la vereda La María, sector El Torito.

Los valores obtenidos para conductividad eléctrica son presentados en la Figura 5.1.6.150, al igual que las anteriores campañas, los valores de conductividad eléctrica presentan amplia variación, esto es debido a los diferentes tipos de puntos que conforman la red de monitoreo. Las aguas lluvias normalmente presentan conductividades eléctricas bajas,

debido al ciclo hidrológico, el cual genera procesos de evaporación y condensación que limitan la cantidad de iones disueltos que pueden estar presentes en este tipo de agua; por tal motivo, los totalizadores T1, T2 y T3 son los puntos con menores valores de conductividad eléctrica de la red de monitoreo.

Los drenajes superficiales están relacionados directamente con el agua lluvia de la zona de estudio y con la escorrentía; sin embargo, estas aguas sufren algunas modificaciones en cuanto a su composición química al fluir por el terreno, donde van lavando minerales que puedan estar presentes en las capas más superficiales del suelo o por contaminación antrópica; por tal motivo, los drenajes superficiales suelen presentar mayor conductividad eléctrica que el agua lluvia.

Las aguas de los manantiales comúnmente presentan procesos similares a los descritos para los drenajes superficiales; sin embargo, su conductividad depende generalmente del tiempo de residencia del agua luego de la infiltración y de la litología con la que tiene contacto el agua, para este caso en concreto, se observan en los manantiales valores de conductividad eléctrica muy similares a los drenajes superficiales, lo que sugiere conexión de estos puntos con el agua lluvia reciente y un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo.

Finalmente, como ha sido una constante, la variación de la conductividad eléctrica en los piezómetros es mucho más amplia que en el resto de puntos, estas fluctuaciones se deben a la variedad del tipo de aguas que son objeto de muestreo.

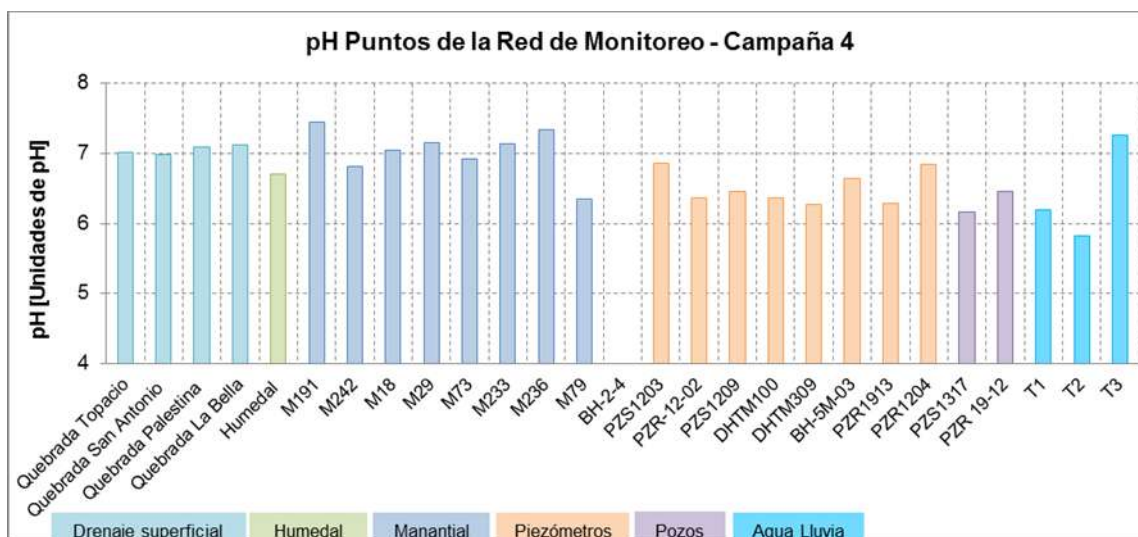


Figura 5.1.6.149 pH de los puntos que conforman la red de monitoreo. Junio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

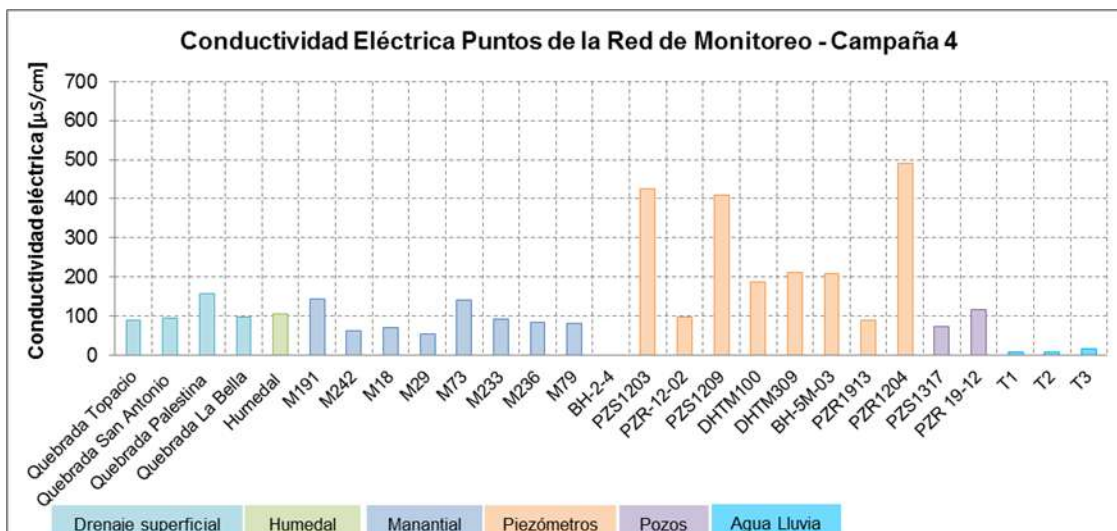


Figura 5.1.6.150 Conductividad eléctrica de los puntos que conforman la red de monitoreo. Junio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 4 junio de 2020 se presentan en la Tabla 5.1.6.67 y en la Figura 5.1.6.151 es posible visualizar de forma gráfico dichos resultados con la recta meteórica mundial.

En la Figura 5.1.6.151 se observan dos grupos de puntos, de color azul se encuentra el agua lluvia de la zona de estudio, recolectada en tres puntos con alturas distintas, los cuales presentan una variación isotópica de [-13,99‰, -13,01‰] para el oxígeno 18 y de [-104,02‰, -97,19‰] para el deuterio. Esta composición isotópica del agua lluvia se encuentra más empobrecida que el resto de los puntos de agua objeto de monitoreo, lo cual es una situación normal para este mes lluvioso, pues el agua lluvia responde a la cantidad de precipitación de forma que a mayor precipitación mayor es el empobrecimiento del agua, lo cual es conocido como efecto cantidad.

Por otro lado, los puntos asociados a manantiales, piezómetros y drenajes superficiales conforman el segundo grupo que se logra observar en Figura 5.1.6.151, cuya variación corresponde a [-9,72‰, -7,94‰] para oxígeno 18 y de [-67,08‰, -54,51‰] para el deuterio. Esta distribución de los puntos sugiere que el origen de aguas subterráneas y superficiales es el mismo, el cual parece ser la precipitación reciente de la zona de estudio.

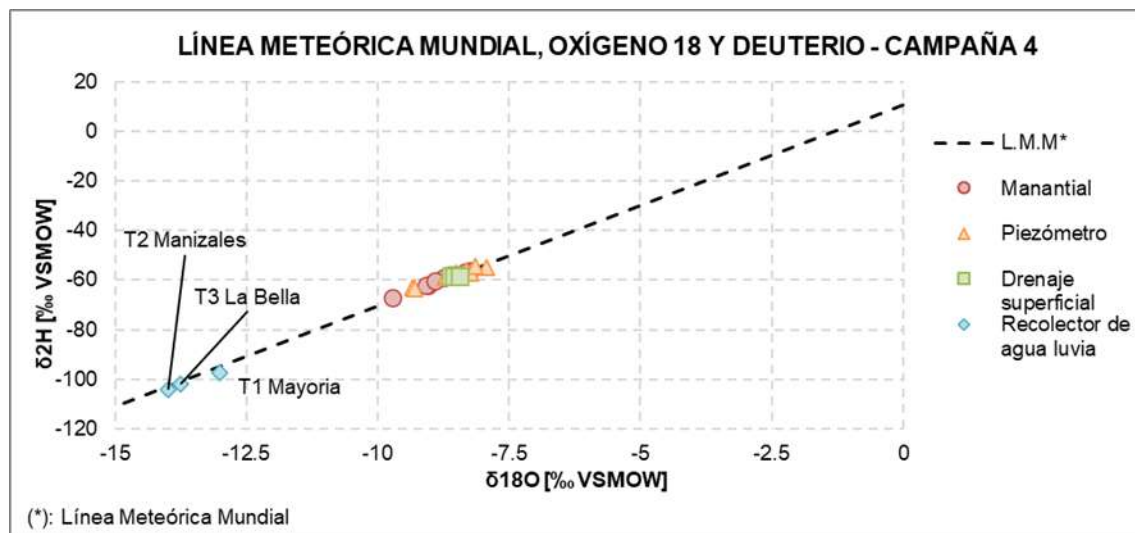


Figura 5.1.6.151 Composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo y línea meteórica mundial campaña 4. Junio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.67 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 4. Junio 2020

Puntos	Tipo	δ18O	δ2H
		VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,74	-59,39
M-29	Manantial	-8,59	-58,15
M-233	Manantial	-8,75	-58,68
M-191	Manantial	-9,03	-61,97
M-18	Manantial	-9,08	-62,06
M-237	Manantial	-8,26	-56,29
M-242	Manantial	-8,34	-56,46
M-73	Manantial	-9,72	-67,08
M-79	Manantial	-8,92	-60,16
BH-5M-03	Piezómetro	-8,31	-56,13
DH-FS-309	Piezómetro	-8,45	-58,03
DH-TM-100	Piezómetro	-8,22	-57,20
PZS-12-09	Piezómetro	-7,94	-54,68
PZR-12-02	Pozo	-8,73	-58,78
PZR-12-04	Piezómetro	-8,14	-54,51
PZS-12-03	Piezómetro	-8,69	-57,76
PZS-13-17	Piezómetro	-8,50	-57,06
PZR-19-12	Pozo	-9,34	-63,15
PZR-19-13	Piezómetro	-9,29	-63,53

Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	δ^2H
		VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,62	-58,27
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,53	-57,99
Quebrada La Bella	Drenaje superficial	-8,54	-58,40
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,44	-58,65
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-13,01	-97,19
T2 Manzales	Recolector de agua lluvia	-13,99	-104,02
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-13,75	-102,14

Fuente: SHI S.A.S (2021)

e. Campaña 5 julio (2020)

La campaña 5 de recolección de muestras de agua fue ejecutada entre los días 28 de julio al 1 de agosto del 2020, en cada uno de los puntos de monitoreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, los cuales se presentan en la Tabla 5.1.6.68.

Tabla 5.1.6.68 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de julio 2020

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [$\mu S/cm$]
PZS-12-03	Piezómetro	29/07/2020	6,88	507
PZR-12-02	Piezómetro	29/07/2020	6,5	144
M-191	Manantial	01/08/2020	8,02	144,2
M-242	Manantial	31/07/2020	6,68	124,9
M-18	Manantial	01/08/2020	7,5	58
PZS-12-09	Piezómetro	29/07/2020	7,16	672
DH-TM-100	Piezómetro	29/07/2020	6,58	236
DH-TM-309	Piezómetro	29/07/2020	6,45	822
BH-5M-03	Piezómetro	28/07/2020	7,10	362
PZR-19-13	Piezómetro	28/07/2020	6,49	105,1
M-29	Manantial	31/07/2020	7,18	67,1
PZR-12-04	Piezómetro	28/07/2020	7,13	522
PZS-13-17	Piezómetro	28/07/2020	6,42	182,8
M-73	Manantial	30/07/2020	7,14	197,1
M-233	Manantial	01/08/2020	7,80	73,7
M-237	Manantial	31/07/2020	7,26	77,1
PZR 19-12	Piezómetro	28/07/2020	6,57	145,5

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
M-79	Manantial	30/07/2020	6,5	272
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	01/08/2020	5,71	7,8
T2 Manzales	Recolector de agua lluvia	30/07/2020	6,74	130,4
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	31/07/2020	6,07	8
Quebrada Topacio	Quebrada	30/07/2020	7,29	90,7
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	01/08/2020	6,55	44,2
Quebrada San Antonio	Quebrada	31/07/2020	7,03	78
Quebrada Palestina	Quebrada	01/08/2020	7,84	223
Quebrada La Bella	Quebrada	31/07/2020	7,7	74,1

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

En la Figura 5.1.6.152 y Figura 5.1.6.153 se presentan los valores de pH y conductividad eléctrica respectivamente, la variación del pH entre los puntos que conforman la red de monitoreo es de [5,73, 8,00 U.pH], el punto con menor valor de pH se identifica como T1, el cual es el totalizador ubicado en la cota más baja; mientras que el valor de pH más alto corresponde al manantial M-191 ubicado en el sector el torito de la vereda La María.

Al igual que en las campañas anteriores se observa una gran variación en los valores de conductividad eléctrica, la principal causa de esta variabilidad son los distintos tipos de puntos, por los cuales fluyen aguas con diferentes características en cuanto a su transporte desde que son originadas por el agua lluvia en el área de influencia.

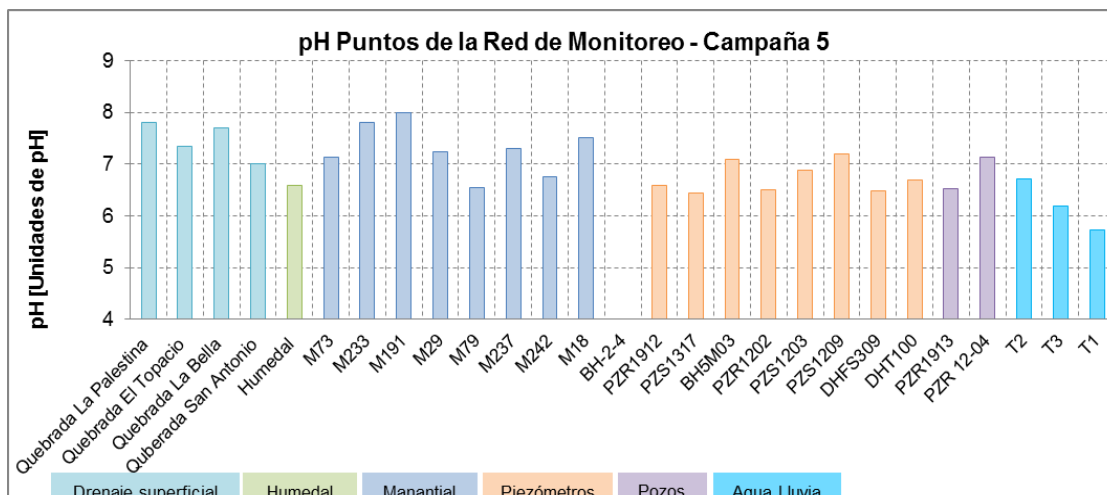


Figura 5.1.6.152 pH de los puntos de la red de monitoreo. Julio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

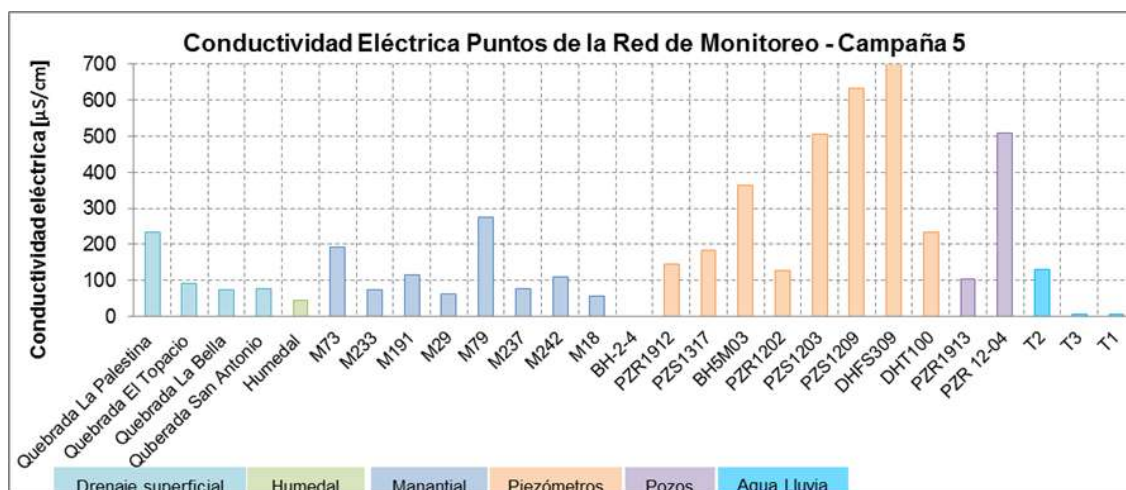


Figura 5.1.6.153 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 5. Julio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de isótopos ambientales se presentan en la Tabla 5.1.6.69 y se representan gráficamente en la Figura 5.1.6.154, allí se observa nuevamente dos grupos de puntos, uno de ellos corresponde a los puntos de agua lluvia, los cuales para esta campaña se encuentran levemente empobrecidos comparado con el resto de punto que conforman la red de monitoreo.

Además, existen dos piezómetros desplazados levemente hacia zona más empobrecidas, estos se pueden diferenciar por el círculo de color rojo, los cuales corresponden a los piezómetros BH-5M-03 y PZS-12-09, que se encuentran registrando niveles del saprolito del batolito y evidencian que el agua registrada en esa capa está relacionada con el agua lluvia, que como ya se mencionó también está empobrecida.

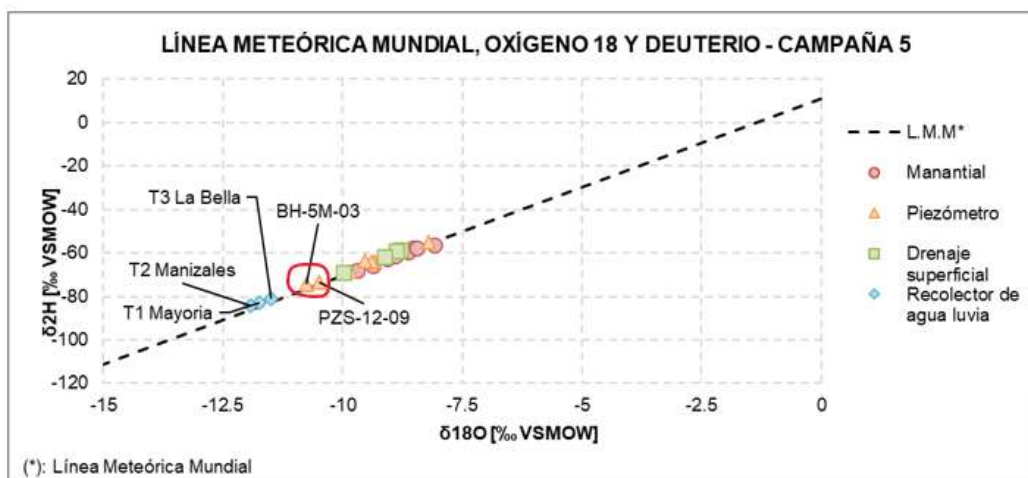


Figura 5.1.6.154 Línea meteórica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 5. Julio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.69 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 5. Julio 2020

Puntos	Tipo	δ18O	δ2H
		VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-9,63	-67,84
M-29	Manantial	-8,09	-56,29
M-233	Manantial	-8,54	-57,90
M-191	Manantial	-8,64	-59,72
M-18	Manantial	-9,07	-62,66
M-237	Manantial	-8,45	-57,48
M-242	Manantial	-8,90	-61,33
M-73	Manantial	-9,38	-65,67
M-79	Manantial	-9,69	-67,93
BH-5M-03	Piezómetro	-10,76	-74,14
DH-FS-309	Piezómetro	-8,76	-58,28
DH-TM-100	Piezómetro	-9,83	-68,69
PZS-12-09	Piezómetro	-10,50	-73,56
PZR-12-02	Pozo	-8,81	-59,04

Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
		VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
PZR-12-04	Piezómetro	-8,21	-54,99
PZS-12-03	Piezómetro	-9,33	-63,81
PZS-13-17	Piezómetro	-9,17	-62,02
PZR-19-12	Pozo	-9,40	-63,86
PZR-19-13	Piezómetro	-9,53	-63,61
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,79	-58,78
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-9,99	-68,84
Quebrada La Bella	Drenaje superficial	-8,88	-59,11
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-9,13	-61,97
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-11,73	-82,72
T2 Manzanas	Recolector de agua lluvia	-11,92	-84,45
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-11,50	-81,23

Fuente: SHI S.A.S (2021)

f. Campaña 6 agosto (2020)

La campaña 6 de recolección de muestras de agua fue ejecutada entre los días 5 de septiembre al 10 de septiembre del 2020. Aunque se realizó los primeros días de septiembre por temas logísticos, esta campaña representa el agua lluvia totalizada del mes de agosto de 2020. En cada uno de los puntos de monitoreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, los cuales se presentan en la Tabla 5.1.6.70.

Tabla 5.1.6.70 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de agosto 2020

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [$\mu S/cm$]
PZS-12-03	Piezómetro	09/09/2020	6,7	375
PZR-12-02	Piezómetro	09/09/2020	6,14	92,5
M-191	Manantial	07/09/2020	7,05	141,5
M-242	Manantial	07/09/2020	6,64	51,3
M-18	Manantial	09/09/2020	7,41	96,2
PZS-12-09	Piezómetro	08/09/2020	6,87	395
DH-TM-100	Piezómetro	10/09/2020	6,23	202,7
DH-TM-309	Piezómetro	10/09/2020	6,11	259
BH-5M-03	Piezómetro	08/09/2020	6,77	228
PZR-19-13	Piezómetro	09/09/2020	5,87	82,9
M-29	Manantial	07/09/2020	6,96	57
PZR-12-04	Piezómetro	08/09/2020	6,72	551

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
PZS-13-17	Piezómetro	08/09/2020	6,65	74,9
M-73	Manantial	06/09/2020	6,75	93,5
M-233	Manantial	06/09/2020	7,43	87,1
M-237	Manantial	05/09/2020	7	59,1
PZR 19-12	Piezómetro	09/09/2020	6,68	109,7
M-79	Manantial	06/09/2020	6,6	85,6
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	10/09/2020	6,61	24,2
T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	06/09/2020	8,5	80
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	07/09/2020	7,02	71,9
Quebrada Topacio	Quebrada	05/09/2020	6,91	62,8
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	10/09/2020	6,39	84,3
Quebrada San Antonio	Quebrada	05/09/2020	6,46	73,8
Quebrada Palestina	Quebrada	06/09/2020	6,86	136,4
Quebrada La Bella	Quebrada	05/09/2020	7,54	65,2

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

En la Figura 5.1.6.155 y Figura 5.1.6.156 se presentan los valores de pH y conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo. La variación del pH entre los puntos que conforman la red de monitoreo es de [5,86 a 7,89 U. pH], el cual ha sido un rango de variación típico en las campañas ejecutadas.

Al igual que en las campañas anteriores se observa una gran variación en los valores de conductividad eléctrica. Las aguas subterráneas comprenden piezómetros y manantiales, en estos puntos se encuentran algunos puntos con agua de corto tiempo de residencia en el medio subterráneo, las cuales tienen una conductividad eléctrica baja y agua con conductividades eléctricas más elevadas ($>300 \mu\text{S}/\text{cm}$) las cuales fluyen por el medio subterráneo de forma más lenta o prolongada, lo que posibilita que ganen iones gracias a la disolución de minerales. Las aguas lluvias y superficiales cuentan con conductividades eléctricas bajas, lo cual es un comportamiento normal en este tipo de aguas.

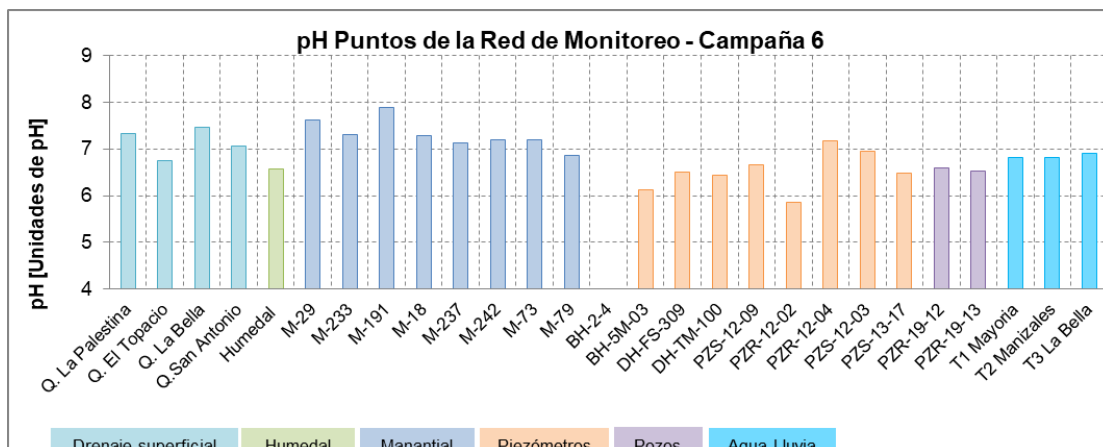


Figura 5.1.6.155 pH de los puntos de la red de monitoreo Campaña 6

Fuente: SHI S.A.S (2021)

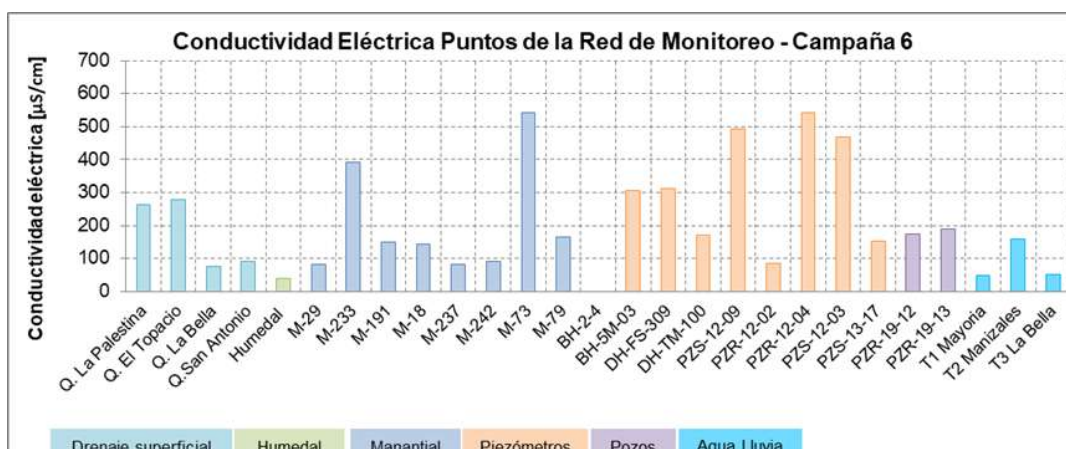


Figura 5.1.6.156 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 6

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de la concentración relativa de los isótopos deuterio y oxígeno 18 se pueden observar de forma gráfica en la Figura 5.1.6.157, también es posible visualizar los diversos valores en la Tabla 5.1.6.71. Luego de visualizar los resultados en la Figura 5.1.6.157 es posible llegar a las siguientes conclusiones:

Para el mes de agosto del año 2020 el agua lluvia se encuentra levemente más enriquecida comparado con el resto de los puntos de la red de monitoreo, esto indica que ha sido un mes de menos lluvias en la zona respecto a los dos meses anteriores, pues la marca isotópica de lluvia se venía empobreciendo mes a mes.

Para el mes de agosto, piezómetros, manantiales y drenajes superficiales comparten la misma marca isotópica, lo que valida la hipótesis de que todas las fuentes de agua que se encuentran en la zona de estudio tienen el mismo origen en la precipitación.

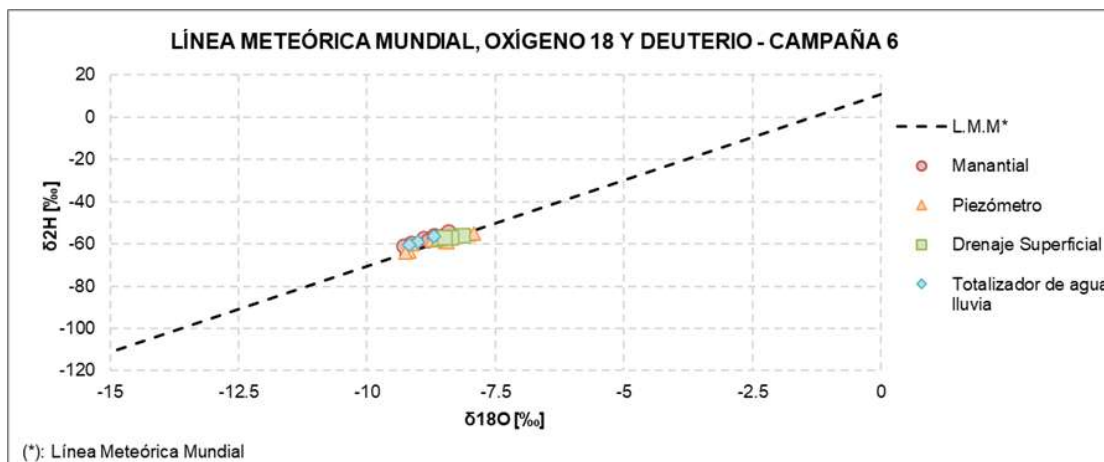


Figura 5.1.6.157 Línea meteórica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 6. Agosto 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.71 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 6. Agosto 2020

#	Puntos	Tipo	δ18O	δ2H
			VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,49	-56,74
2	M-29	Manantial	-8,52	-56,02
3	M-233	Manantial	-8,91	-57,12
4	M-191	Manantial	-8,81	-58,34
5	M-18	Manantial	-9,29	-60,92
6	M-237	Manantial	-8,69	-55,98
7	M-242	Manantial	-8,66	-56,4
8	M-73	Manantial	-8,41	-54,23
9	M-79	Manantial	-9,13	-59,33
10	BH-5M-03	Piezómetro	-9,11	-59,76
11	DH-FS-309	Piezómetro	-8,73	-58,3
12	DH-TM-100	Piezómetro	-8,14	-55,9
13	PZS-12-09	Piezómetro	-8,01	-55,38
14	PZR-12-02	Pozo	-8,47	-58,85
15	PZR-12-04	Piezómetro	-7,92	-54,83
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,44	-58,95
17	PZS-13-17	Piezómetro	-8,45	-59,06
18	PZR-19-12	Pozo	-9,17	-63,53

#	Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	δ^2H
			VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,25	-64,02
21	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,15	-56,01
22	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,39	-56,98
23	Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,37	-56,74
24	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,6	-57,17
25	T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-9,02	-59,01
26	T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-8,7	-56,15
27	T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-9,17	-60,49

Fuente: SHI S.A.S (2021)

g. Campaña 7 septiembre (2020)

La campaña 7 de recolección de muestras de agua fue ejecutada entre los días 28 de septiembre al 3 de octubre del 2020, representando el agua lluvia totalizada durante septiembre. En cada uno de los puntos de monitoreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, los cuales se presentan en la Tabla 5.1.6.72.

Tabla 5.1.6.72 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de septiembre-octubre de 2020

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μcm]
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	03/10/2020	0	39,4
M-29	Manantial	02/10/2020	7,62	82,1
M-233	Manantial	29/09/2020	7,32	392
M-191	Manantial	03/10/2020	7,89	150,8
M-18	Manantial	30/09/2020	7,28	144,1
M-237	Manantial	29/09/2020	7,13	82,4
M-242	Manantial	29/09/2020	7,19	91,6
M-73	Manantial	29/09/2020	7,19	544
M-79	Manantial	01/10/2020	6,86	164,6
BH-5M-03	Piezómetro	01/10/2020	6,12	307
DH-FS-309	Piezómetro	02/10/2020	6,51	311
DH-TM-100	Piezómetro	02/10/2020	6,43	172,6
PZS-12-09	Piezómetro	01/10/2020	6,66	494
PZR-12-02	Piezómetro	30/09/2020	5,86	84,4
PZR-12-04	Piezómetro	01/10/2020	7,17	543
PZS-12-03	Piezómetro	30/09/2020	6,96	469
PZS-13-17	Piezómetro	01/10/2020	6,49	153,5

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
PZR-19-12	Piezómetro	30/09/2020	6,6	173,9
PZR-19-13	Piezómetro	30/09/2020	6,54	190,4
Quebrada Palestina	Quebrada	28/09/2020	7,33	263
Quebrada El Topacio	Quebrada	28/09/2020	6,76	279
Quebrada La Bella	Quebrada	29/09/2020	7,46	77,4
Quebrada San Antonio	Quebrada	28/09/2020	7,07	905
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	03/10/2020	6,82	47,8
T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	01/10/2020	6,83	159,3
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	02/10/2020	6,9	52,4
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	03/10/2020	6,82	47,8

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

En la Figura 5.1.6.158 y Figura 5.1.6.159 se presentan los valores de pH y conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo. La variación del pH entre los puntos que conforman la red de monitoreo es de [5,86, 7,89 U.pH], el cual ha sido un rango de variación típico en las campañas ejecutadas hasta la fecha.

La conductividad eléctrica se distribuye de forma similar a las campañas anteriores, con puntos de agua subterránea con valores altos y bajos de este parámetro y el agua lluvia y superficial con conductividades eléctricas bajas, lo cual es un comportamiento normal en este tipo de aguas.

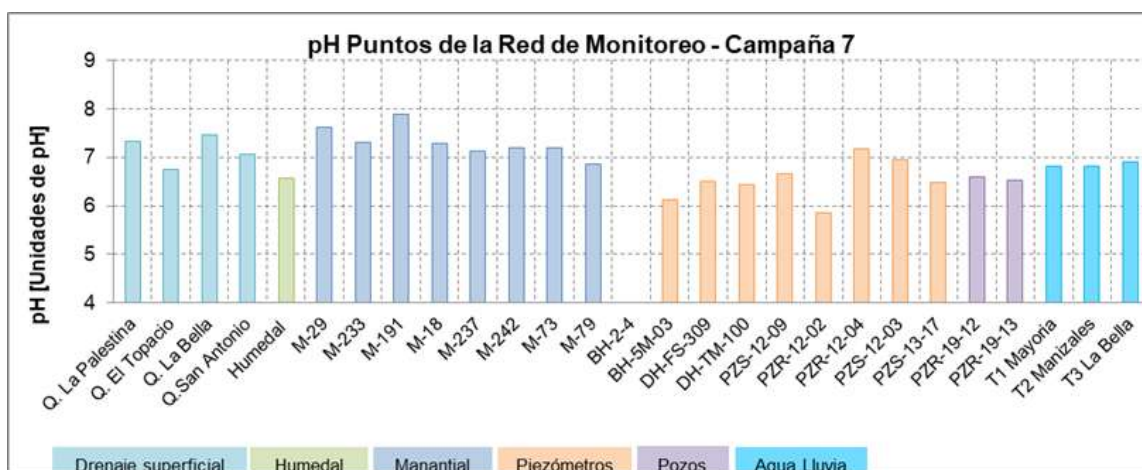


Figura 5.1.6.158 pH de los puntos de la red de monitoreo. Septiembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

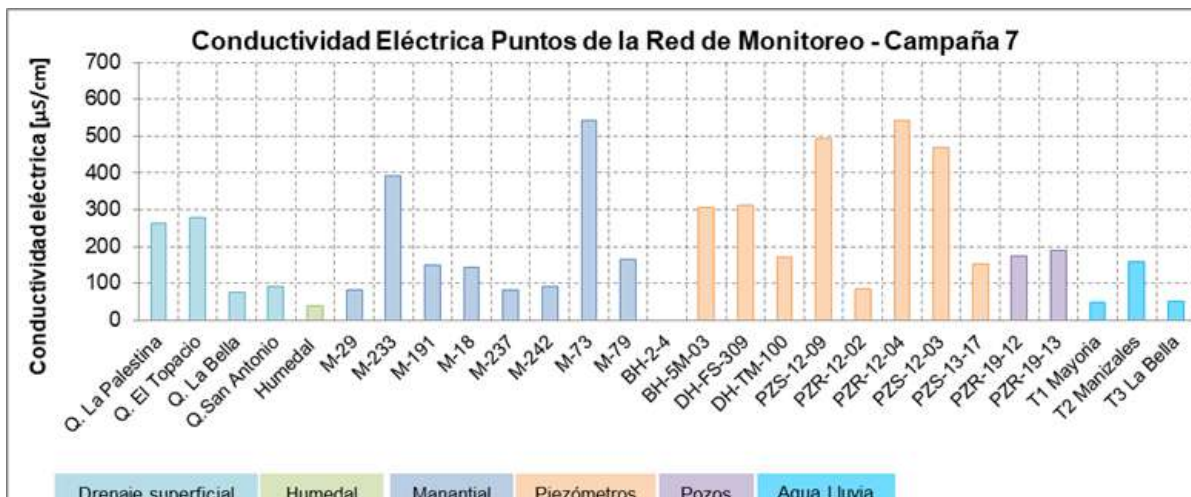


Figura 5.1.6.159 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 7 Septiembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de la concentración relativa de los isótopos deuterio y oxígeno 18 se pueden observar de forma gráfica en la Figura 5.1.6.160, también es posible visualizar los diversos valores en la Tabla 5.1.6.73. Luego de visualizar los resultados es posible llegar a las siguientes conclusiones:

Para el mes de septiembre del año 2020 las aguas lluvias se encuentran levemente más enriquecidas comparadas con el resto de los puntos de la red de monitoreo.

Nuevamente se identifican dos piezómetros (PZR-19-13/ PZR-19-12) desplazados hacia la izquierda, lo que indica un leve empobrecimiento en isótopos para estos puntos.

Para el mes de septiembre, piezómetros, manantiales y drenajes superficiales comparten la misma marca isotópica, lo que concuerda con la hipótesis de que todas las fuentes de agua que se encuentran en la zona de estudio tienen el mismo origen.

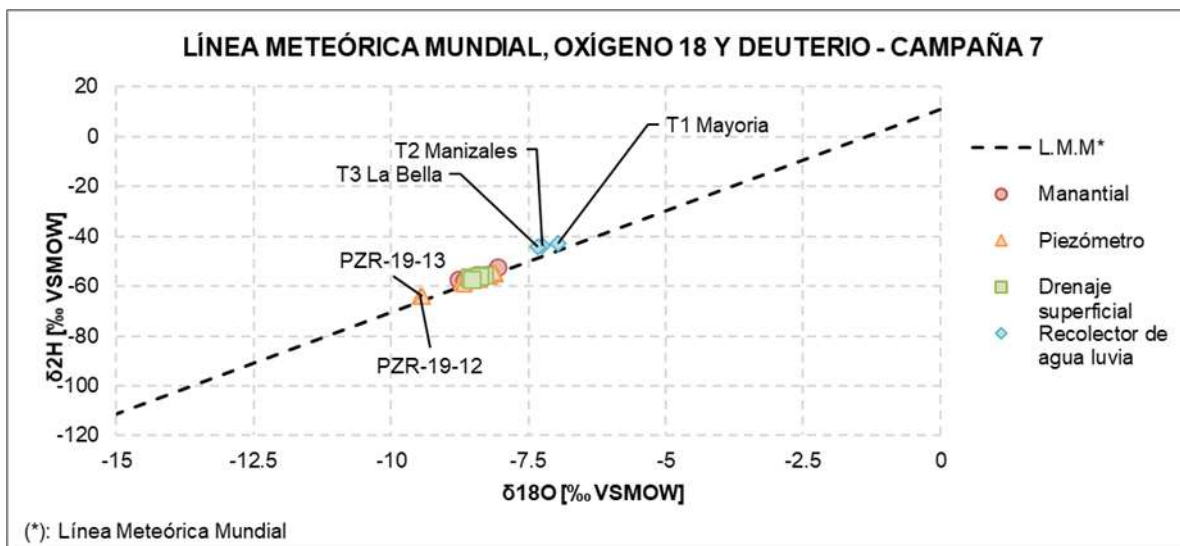


Figura 5.1.6.160 Línea meteórica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 7. Septiembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.73 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 7. Septiembre 2020

#	Puntos	Tipo	δ18O	δ2H
			VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,20	-54,17
2	M-29	Manantial	-8,07	-52,29
3	M-233	Manantial	-8,78	-57,13
4	M-191	Manantial	-8,66	-57,59
5	M-18	Manantial	-8,46	-55,54
6	M-237	Manantial	-8,35	-55,87
7	M-242	Manantial	-8,26	-55,45
8	M-73	Manantial	-8,21	-55,14
9	M-79	Manantial	-8,67	-57,81
10	BH-5M-03	Piezómetro	-8,34	-55,84
11	DH-FS-309	Piezómetro	-8,40	-57,22
12	DH-TM-100	Piezómetro	-8,20	-56,02
13	PZS-12-09	Piezómetro	-8,10	-54,92
14	PZR-12-02	Pozo	-8,72	-58,35
15	PZR-12-04	Piezómetro	-8,12	-54,70
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,67	-58,41
17	PZS-13-17	Piezómetro	-8,67	-58,90
18	PZR-19-12	Pozo	-9,48	-63,80
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,44	-64,14

#	Puntos	Tipo	$\delta 18O$	$\delta 2H$
			VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
20	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,31	-55,52
21	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,58	-56,26
22	Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,40	-55,88
23	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,53	-57,16
24	T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-6,97	-42,79
25	T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-7,24	-43,64
26	T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-7,33	-44,09

Fuente: SHI S.A.S (2021)

III. Resultados de tritio (época de invierno)

Los resultados de tritio obtenidos en la campaña 7 son presentados en la Tabla 5.1.6.74, allí es posible observar que todos los resultados de tritio se encuentran por debajo o cercanos a 2 U.T, es decir valores menores los registros de tritio de la lluvia en Colombia (5 U.T) como quedo en evidencia en la Tabla 5.1.6.74.

Con los resultados de tritio obtenidos no es posible determinar tiempos de residencia en el medio subterráneo, ya que, no existe un enriquecimiento de tritio con respecto a la lluvia; por lo tanto, la concentración actual en aguas subterránea puede ser producto del decaimiento radioactivo o de aportes de la lluvia reciente.

Tabla 5.1.6.74 Resultados de tritio campaña 7 – época húmeda. Laboratorio Wessling

Punto	Tritio [Bq/dm ³]	Tritio [TU]
Reservorio Artificial La Mayoría	0,17	1,5
Quebrada Palestina	0,16	1,4
BH-5M-03	0,16	1,4
DH-TM-100	0,15	1,3
M -29	0,15	1,3
M-73	0,12	1
M-79	0,06	0,5
M-233	0,06	0,5
PZR-12-02	0,11	0,9
PZS-12-09	0,1	0,8
PZS-13-17	0,14	1,2
PZR-19-13	0,14	1,2
T1 Mayoría	0,15	1,3
T2 Manizales	0,24	2
T3 La Bella	0,26	2,2

TU: Unidades de tritio [Bq/dm³]: becquerel por decímetro cúbico

Fuente: SHI S.A.S (2021)

h. Campaña 8 octubre (2020)

La campaña 8 fue ejecutada entre el 30 de octubre y el 3 de noviembre del año 2020, representando el agua lluvia totalizada en octubre. En cada uno de los puntos de monitoreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica y se recolectaron muestras para análisis de deuterio y oxígeno 18. Los puntos de monitoreo y los valores de los parámetros de campo son presentados en la Tabla 5.1.6.75.

Tabla 5.1.6.75 Puntos de monitoreo y parámetros en sitio medidos durante la campaña 8 –octubre 2020

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
Reservorio Artificial	Reservorio Artificial	3/11/2020	7,12	45,3
M-29	Manantial	3/11/2020	7,13	272
M-233	Manantial	2/11/2020	7,16	79,8
M-191	Manantial	2/11/2020	6,87	57,1
M-18	Manantial	30/10/2020	7,35	211,2
M-237	Manantial	2/11/2020	7,18	117,7
M-242	Manantial	2/11/2020	7,2	87,7
M-73	Manantial	30/10/2020	6,67	122,3
M-79	Manantial	31/10/2020	6,76	63,7
BH-5M-03	Piezómetro	29/10/2020	6,75	228
DH-FS-309	Piezómetro	29/10/2020	6,84	209,5
DH-TM-100	Piezómetro	30/10/2020	6,45	370
PZS-12-09	Piezómetro	29/10/2020	6,6	469
PZR-12-02	Piezómetro	31/10/2020	6,64	88,4
PZR-12-04	Piezómetro	29/10/2020	6,92	515
PZS-12-03	Piezómetro	31/10/2020	6,99	365
PZS-13-17	Piezómetro	30/10/2020	6,53	69
PZR-19-12	Piezómetro	30/10/2020	6,81	181,5
PZR-19-13	Piezómetro	30/10/2020	6,63	243
Quebrada La Palestina	Quebrada	31/10/2020	6,94	109,7
Quebrada El Topacio	Quebrada	2/11/2020	7	54,7
Quebrada La Bella	Quebrada	2/11/2020	6,97	57

Quebrada San Antonio	Quebrada	31/10/2020	6,98	207,4
T1 Mayoría	Lluvia	3/11/2020	6,47	5,1
T2 Manizales	Lluvia	31/10/2020	5,4	6,88
T3 La Bella	Lluvia	1/11/2020	6,81	93,5

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros pH y conductividad eléctrica que fueron medidos en campo son presentados en la Figura 5.1.6.161 y Figura 5.1.6.162. Los valores de pH de los puntos que conforman la red de monitoreo presentan poca variabilidad, siendo Totalizador T2 Manizales el que presenta un pH más bajo, con un valor de 5,4 unidades de pH.

En cuanto a la conductividad las aguas lluvias presentan valores muy bajos de conductividad, con un punto anómalo el cual está identificado como el T3 La Bella, el cual presenta una conductividad eléctrica de 93,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la cual es una magnitud relativamente alta para el agua lluvia.

Los valores de conductividad eléctrica en agua superficiales presentaron un comportamiento normal, según lo observado en campañas anteriores, con la excepción del punto identificado como quebrada San Antonio el cual presentó el valor más alto entre las aguas superficiales.

Finalmente, la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas durante la campaña 8 presentó el contraste esperado, ya que, se monitorearon piezómetros y manantiales los cuales pueden captan aguas con diferentes líneas de flujo y tiempo de residencia en el medio subterráneo.

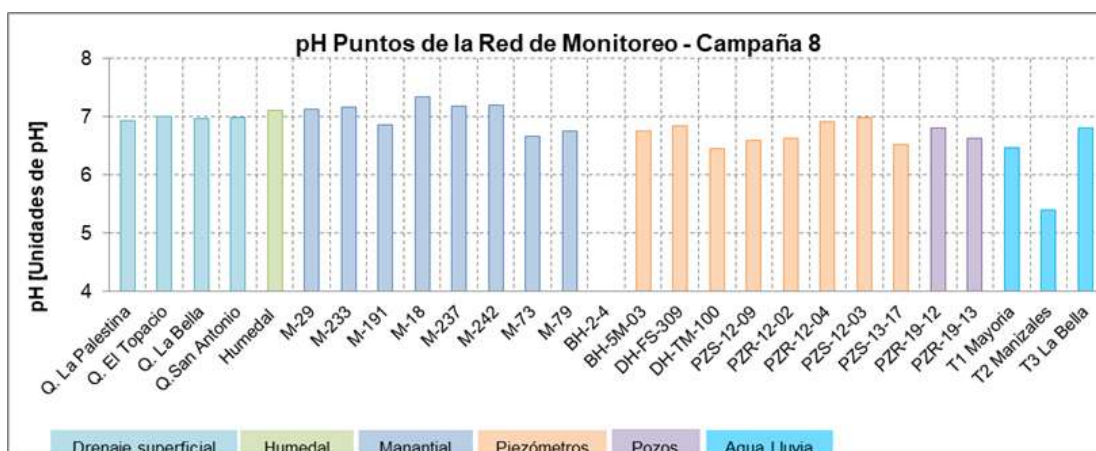


Figura 5.1.6.161 pH de los puntos de la red de monitoreo. Octubre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

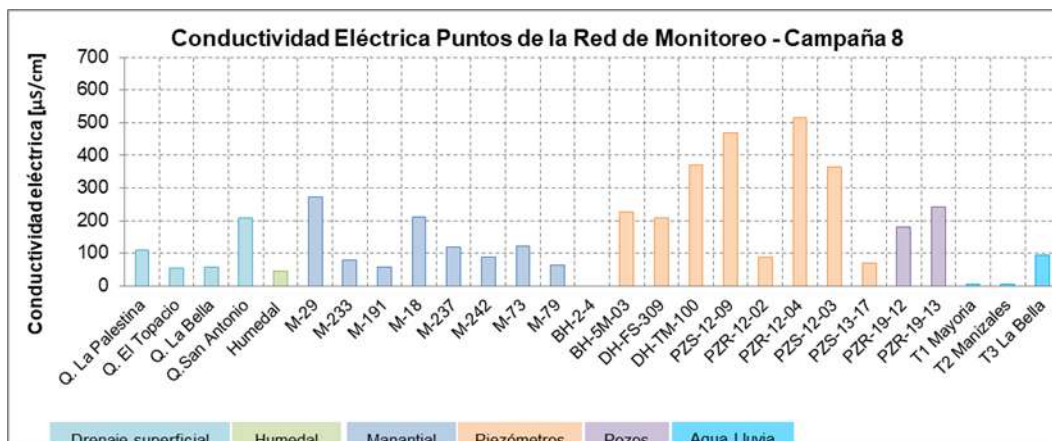


Figura 5.1.6.162 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo. Octubre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 8 son presentados en la Tabla 5.1.6.76 y de forma gráfica son presentados en la Figura 5.1.6.163 con los siguientes comentarios:

Para el mes de octubre del año 2020 las aguas lluvias se encuentran levemente más empobrecidas que la campaña anterior, ya que se presentan más lluvias, y respecto al resto de los puntos de la red de monitoreo, las muestras de lluvia tienen una marca isotópica similar a la de algunos piezómetros y manantiales.

Nuevamente se identifican los piezómetros PZR19-12 y PZR19-13 desplazados hacia la izquierda, lo que indica un leve empobrecimiento en isótopos para estos puntos.

Para el mes de octubre al igual que la campaña 7 de septiembre, los piezómetros, manantiales y drenajes superficiales comparten la misma marca isotópica, lo que concuerda con la hipótesis de que todas las fuentes de agua que se encuentran en el área de influencia tienen el mismo origen. SHI S.A.S (2021).

Tabla 5.1.6.76 Resultados de deuterio y oxígeno 18

#	Puntos	Tipo	δ18O	δ2H
			VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,05	-54,03
2	M-29	Manantial	-7,89	-53,34
3	M-233	Manantial	-8,27	-56,34
4	M-191	Manantial	-7,86	-53,63
5	M-18	Manantial	-8,72	-59,58
6	M-237	Manantial	-8,12	-53,58

#	Puntos	Tipo	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
			VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
7	M-242	Manantial	-8,01	-52,39
8	M-73	Manantial	-7,96	-51,92
9	M-79	Manantial	-8,25	-53,54
10	BH-5M-03	Piezómetro	-8,42	-54,39
11	DH-FS-309	Piezómetro	-8,29	-57,11
12	DH-TM-100	Piezómetro	-7,26	-51,84
13	PZS-12-09	Piezómetro	-7,58	-53,91
14	PZR-12-02	Pozo	-8,35	-58,79
15	PZR-12-04	Piezómetro	-7,72	-54,02
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,46	-58,17
17	PZS-13-17	Piezómetro	-8,50	-58,17
18	PZR-19-12	Pozo	-9,34	-63,98
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,43	-64,23
20	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,25	-55,37
21	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,34	-55,28
22	Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,38	-55,41
23	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,06	-53,52
24	T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-7,62	-47,62
25	T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-7,49	-46,18
26	T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-8,03	-52,01

Fuente: SHI S.A.S (2021)

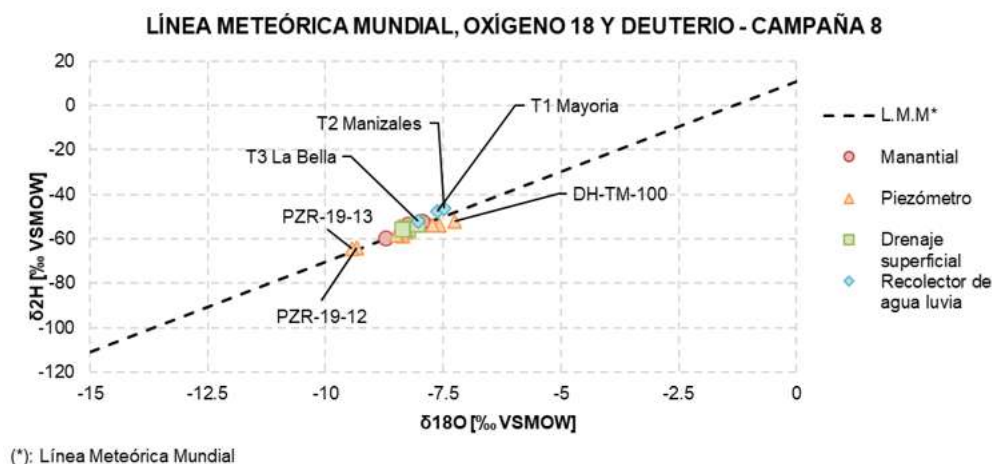


Figura 5.1.6.163 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 8. Octubre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

i. Campaña 9 noviembre (2020)

La campaña de muestreo número 9 fue ejecutada entre el 30 de noviembre y el 4 de diciembre del año 2020, representando el agua lluvia totalizada en noviembre. Los resultados de las mediciones realizadas en campo y los puntos que se visitaron se pueden observar en la Tabla 5.1.6.77.

Tabla 5.1.6.77 Puntos de monitoreo y parámetros en sitio medidos durante la campaña 9 – noviembre 2020

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
Reservorio Artificial	Reservorio Artificial	4/12/2020	5,69	48
M-29	Manantial	4/12/2020	6,67	60
M-233	Manantial	4/12/2020	7,07	78
M-191	Manantial	3/12/2020	7,68	105
M-18	Manantial	1/12/2020	6,82	63
M-237	Manantial	30/11/2020	6,34	44
M-242	Manantial	4/12/2020	6,44	41
M-73	Manantial	3/12/2020	6,43	63
M-79	Manantial	2/12/2020	6,29	79
BH-5M-03	Piezómetro	2/12/2020	6,68	274
DH-FS-309	Piezómetro	3/12/2020	6,18	215
DH-TM-100	Piezómetro	2/12/2020	6,11	235
PZS-12-09	Piezómetro	2/12/2020	6,65	361
PZR-12-02	Piezómetro	1/12/2020	6,01	93
PZR-12-04	Piezómetro	2/12/2020	7,04	448
PZS-12-03	Piezómetro	1/12/2020	6,85	350
PZS-13-17	Piezómetro	3/12/2020	6,27	61
PZR-19-12	Piezómetro	1/12/2020	6,08	102
PZR-19-13	Piezómetro	1/12/2020	6,09	79
Quebrada La Palestina	Quebrada	2/12/2020	7,49	127
Quebrada El Topacio	Quebrada	1/12/2020	6,89	67
Quebrada La Bella	Quebrada	30/11/2020	6,45	96
Quebrada San Antonio	Quebrada	1/12/2020	6,60	56
T1 Mayoría	Agua lluvia	4/12/2020	5,19	8
T2 Manzales	Agua lluvia	2/12/2020	5,01	7

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μcm]
T3 La Bella	Agua lluvia	4/12/2020	6,28	19

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Durante las labores de campo se llevaron a cabo mediciones de pH y conductividad eléctrica, como se presentó previamente en la Tabla 5.1.6.77. En la Figura 5.1.6.164 y Figura 5.1.6.165 se observan por medio de un diagrama de barras los valores medidos en campo de pH y conductividad eléctrica. Los valores de pH obtenidos en los diferentes puntos de monitoreo presentan un rango de variación de 5,01 a 7,68 U de pH, es decir que en el área de influencia se encuentran aguas ligeramente ácidas a aguas neutras.

Los valores de conductividad eléctrica presentados en la Figura 5.1.6.165 tienen un fuerte rango de variación, 7 – 448 μcm , esto debido a los diferentes tipos de aguas que conforman la red de monitoreo.

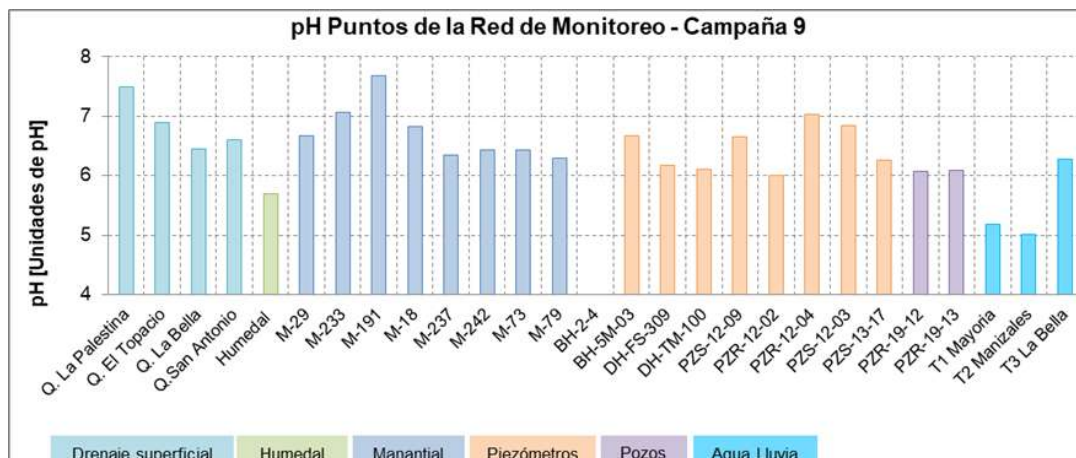


Figura 5.1.6.164 pH de los puntos de la red de monitoreo campaña 9. Noviembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

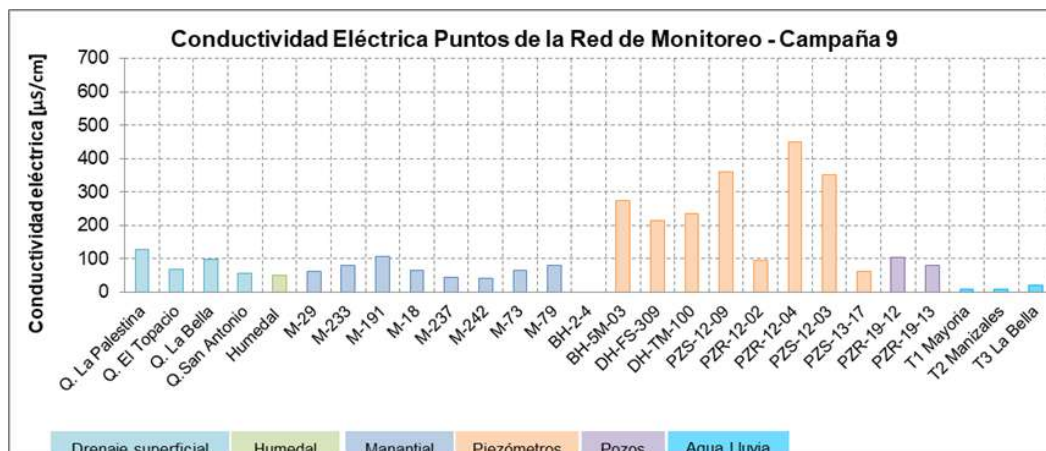


Figura 5.1.6.165 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 9
Noviembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

En la Tabla 5.1.6.78 se presentan los resultados de deuterio y oxígeno 18, y de forma gráfica se presentan estos mismos resultados en la Figura 5.1.6.166, de la cual se pueden realizar los siguientes comentarios:

Las aguas lluvias en el mes de noviembre se encuentran empobrecidas en deuterio y oxígeno 18 con respecto al resto de los puntos que conforman la red de monitoreo y los dos meses anteriores, debido a que noviembre corresponde a un mes húmedo, por lo tanto, el empobrecimiento responde al efecto de cantidad.

La marca isotópica de fuentes de agua superficial y subterráneas son similares, por lo que se puede suponer que tienen el mismo origen, el cuales la precipitación en el área de influencia.

Tabla 5.1.6.78 Resultados de análisis de los isótopos deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo. Noviembre 2020

#	Punto	Tipo de punto	δ18O	δ2H
			VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-9,48	-67,91
2	M-29	Manantial	-8,41	-56,04
3	M-233	Manantial	-8,8	-58,32
4	M-191	Manantial	-9,07	-62,17
5	M-18	Manantial	-9,18	-62,95

#	Punto	Tipo de punto	$\delta 18O$	$\delta 2H$
			VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
6	M-237	Manantial	-8,37	-55,95
7	M-242	Manantial	-8,64	-58,18
8	M-73	Manantial	-10,81	-76,15
9	M-79	Manantial	-9,07	-60,13
10	BH-5M-03	Piezómetro	-9,31	-62,47
11	DH-FS-309	Piezómetro	-8,7	-57,11
12	DH-TM-100	Piezómetro	-7,69	-53,23
13	PZS-12-09	Piezómetro	-8,1	-55,02
14	PZR-12-02	Pozo	-8,74	-58,47
15	PZR-12-04	Piezómetro	-8,36	-54,64
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,82	-58,34
17	PZS-13-17	Piezómetro	-10,61	-72,52
18	PZR-19-12	Pozo	-9,66	-63,68
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,71	-64,23
20	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-9,27	-61,05
21	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-9,36	-62,67
22	Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,75	-57,01
23	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-9,83	-69,1
24	T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-11,62	-82,89
25	T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-11,07	-75,46
26	T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-11,63	-80,08

Fuente: SHI S.A.S (2021)

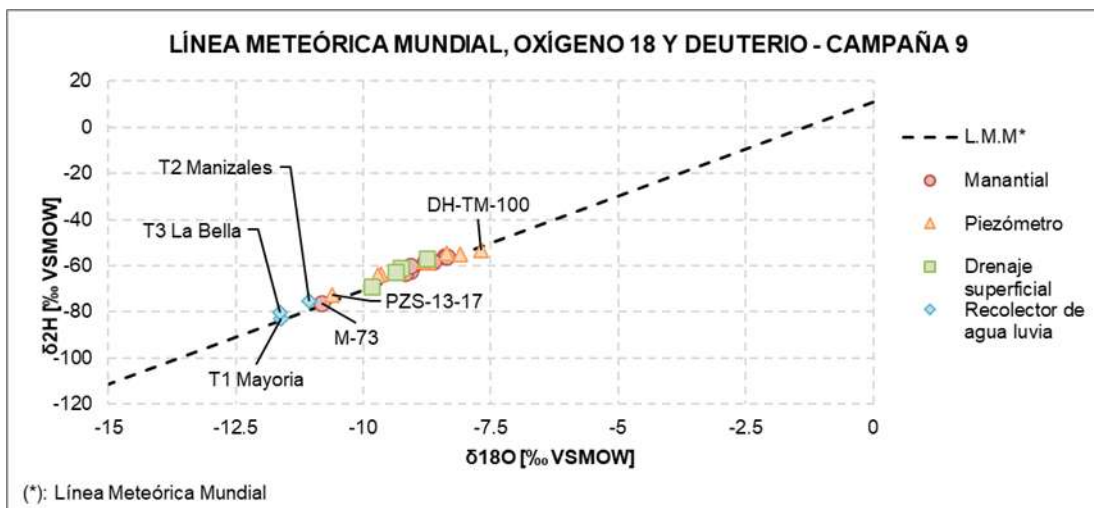


Figura 5.1.6.166 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 9. Noviembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

j. Campaña 10 enero (2021)

La campaña de muestreo número 10 fue ejecutada entre el 12 y el 17 de enero del año 2021. Por asuntos de vacaciones de fin de año por parte del personal del proyecto, no fue posible realizarla los últimos días de diciembre de 2020. Se considera que el agua lluvia totalizada al momento de su recolección en la segunda semana de enero de 2021, es representativa de diciembre de 2020 para efectos de análisis. En cada uno de los puntos visitados se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.1.6.79. A continuación, se presenta el análisis de los resultados de las mediciones en campo y de los análisis de deuterio y oxígeno 18.

Tabla 5.1.6.79 Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 10 enero del 2021

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
Quebrada La Palestina	Quebrada	16/01/2021	7,27	146,6
Quebrada El Topacio	Quebrada	15/01/2021	6,99	89,6
Quebrada La Bella	Quebrada	13/01/2021	7,68	70,2
Quebrada San Antonio	Reservorio Artificial	15/01/2021	6,80	81,6
Reservorio Artificial	Quebrada	16/01/2021	6,43	84,8
M-29	Manantial	16/01/2021	6,88	49,5

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
M-233	Manantial	16/01/2021	7,21	78,7
M-191	Manantial	17/01/2021	7,40	121,2
M-18	Manantial	15/01/2021	7,00	68,9
M-237	Manantial	13/01/2021	7,65	81,0
M-242	Manantial	16/01/2021	7,21	53,0
M-73	Manantial	13/01/2021	6,66	112,8
M-79	Manantial	14/01/2021	6,36	87,1
BH-5M-03	Piezómetro	14/01/2021	6,83	157,4
DH-FS-309	Piezómetro	17/01/2021	6,44	194,3
DH-TM-100	Piezómetro	16/01/2021	6,57	206,0
PZS-12-09	Piezómetro	14/01/2021	6,84	401,0
PZR-12-02	Piezómetro	15/01/2021	7,22	85,4
PZR-12-04	Piezómetro	14/01/2021	6,80	438,0
PZS-12-03	Piezómetro	15/01/2021	6,72	360,0
PZS-13-17	Piezómetro	14/01/2021	6,83	78,1
PZR-19-12	Piezómetro	15/01/2021	7,01	101,0
PZR-19-13	Piezómetro	15/01/2021	6,59	82,5
T1 Mayoría	Agua lluvia	16/01/2021	6,50	16,2
T2 Manzales	Agua lluvia	14/01/2021	6,06	7,1
T3 La Bella	Agua lluvia	16/01/2021	8,71	4,5

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Los valores de pH y conductividad eléctrica son presentados en la Figura 5.1.6.167 y la Figura 5.1.6.168 respectivamente. Los valores de pH registrados durante la campaña 10 siguen la tendencia presentada durante el año de monitoreo, presentando aguas ligeramente ácidas a neutras.

Sin embargo, durante la campaña 10 el valor de pH del recolector de agua lluvia identificado como T3 totalizador La Bella fue bastante alto, alcanzando un valor de 8,71 Unidades de pH, lo cual no es normal en este tipo de agua. Esto se puede deber al contacto del agua con insectos. Los valores retornaron a valores normales en la siguiente campaña.

Los valores de conductividad eléctrica medidos en las distintas fuentes que conforman la red de monitoreo mostraron el contraste habitual, ya que, según el tipo de fuente, se registran valores más altos o bajos de conductividad eléctrica.

Las aguas lluvias, debido al ciclo hidrológico, presentan sólidos disueltos bajos, lo que concuerda con los valores presentados en la Figura 5.1.6.168. Los manantiales y agua superficiales presentan magnitudes de conductividad eléctrica similares, y su principal fuente para ganar iones en solución y por ende aumentar su valor de conductividad eléctrica con respecto a las aguas lluvias, son las primeras capas del suelo.

Finalmente, los registros encontrados en piezómetros son los más altos de toda la red de monitoreo, y se debe al contacto existente entre la roca y el agua, el cual genera procesos de disolución de minerales, los cuales se disocian en el agua y terminan aumentando la capacidad del agua para transportar cargas eléctricas.

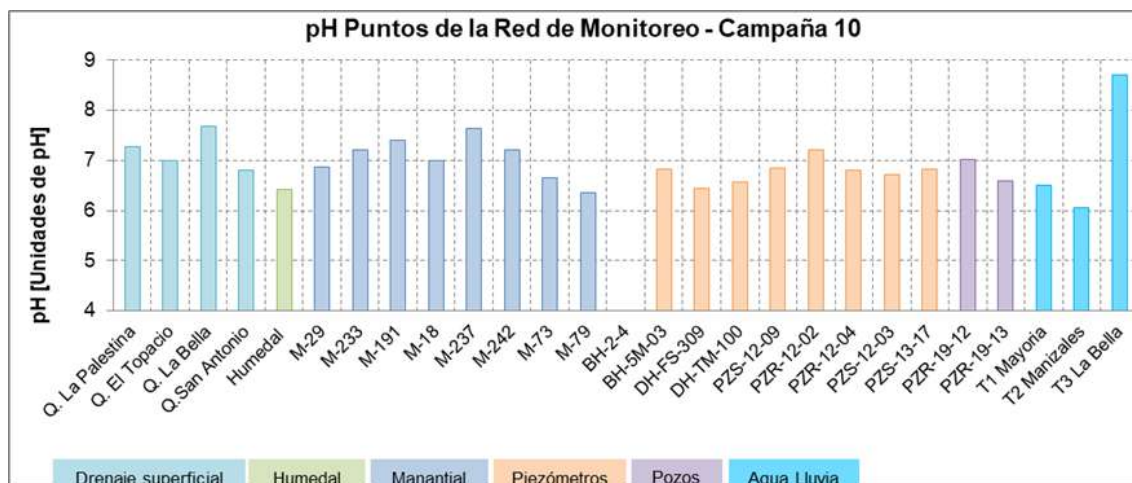


Figura 5.1.6.167 pH de los puntos de monitoreo campaña 10. Enero 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

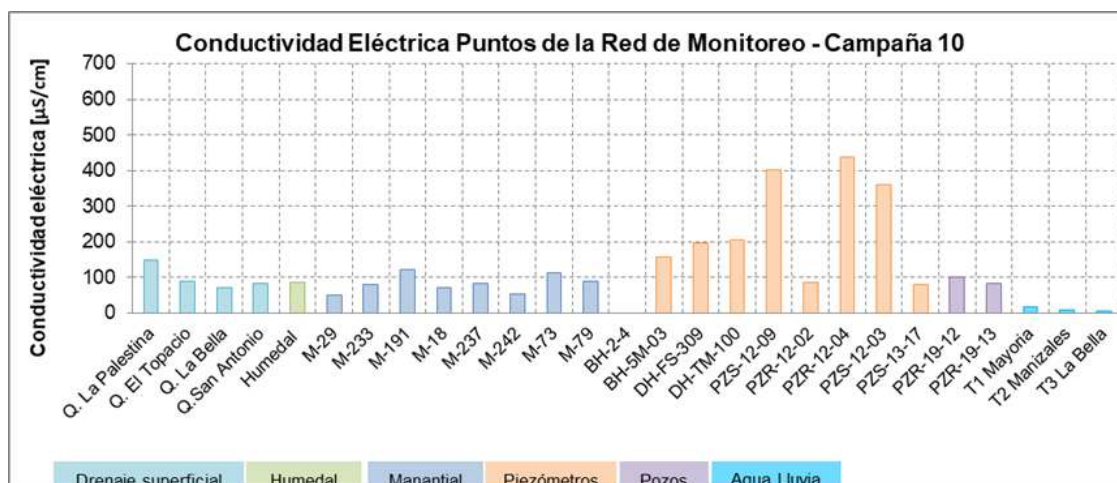


Figura 5.1.6.168 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 10. Enero 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

En la Tabla 5.1.6.80 y en la Figura 5.1.6.169 es posible visualizar las concentraciones relativas de los isótopos ambientales deuterio y oxígeno 18. En la Figura 5.1.6.169 se pueden observar dos conjuntos de puntos sobre la línea meteórica, el primero de los conjuntos está conformado por piezómetros, manantiales y quebradas. En este grupo existen dos piezómetros PZR-19-13 y PZR-19-12, que son los puntos más empobrecidos de la red.

El segundo conjunto de puntos se encuentra conformado por las aguas lluvias y se encuentra más a la derecha de línea meteórica, esto indica un enriquecimiento de las aguas lluvias en isótopos con respecto al resto de punto que conforman la red de monitoreo. Este es un comportamiento normal, ya que, debido al efecto de cantidad, las aguas lluvias sufren un enriquecimiento en los isótopos más pesados en épocas de verano, como lo son los meses de diciembre y enero. Es importante destacar que todos los puntos que fueron objeto de análisis de isótopos coinciden con la línea meteórica mundial, lo que puede ser indicativo de que el origen de estas fuentes se encuentra en la precipitación reciente.

Tabla 5.1.6.80 Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo –campaña 10. Enero 2021

#	Punto	Tipo de punto	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$
			VSMOW $\pm$ 0,2‰	VSMOW $\pm$ 0,8‰
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,22	-54,51
2	M-29	Manantial	-8,27	-54,14
3	M-233	Manantial	-8,85	-56,92
4	M-191	Manantial	-8,75	-57,62
5	M-18	Manantial	-8,9	-58,87
6	M-237	Manantial	-8,3	-54,85
7	M-242	Manantial	-8,23	-54,58
8	M-73	Manantial	-7,44	-48,87
9	M-79	Manantial	-8,74	-58,75
10	BH-5M-03	Piezómetro	-8,59	-57,55
11	DH-FS-309	Piezómetro	-8,5	-56,27
12	DH-TM-100	Piezómetro	-7,51	-50,98
13	PZS-12-09	Piezómetro	-8,24	-54,7
14	PZR-12-02	Pozo	-8,71	-58,4
15	PZR-12-04	Piezómetro	-8,14	-54,6
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,62	-58,69
17	PZS-13-17	Piezómetro	-8,58	-58,87

#	Punto	Tipo de punto	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$
			VSMOW $\pm$ 0,2‰	VSMOW $\pm$ 0,8‰
18	PZR-19-12	Pozo	-9,49	-63,19
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,62	-63,84
20	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,59	-55,49
21	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,8	-56,06
22	Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,69	-54,87
23	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,69	-57,55
24	T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-4,27	-20,64
25	T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-5,15	-26,71
26	T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-4,38	-19,03

Fuente: SHI S.A.S (2021)

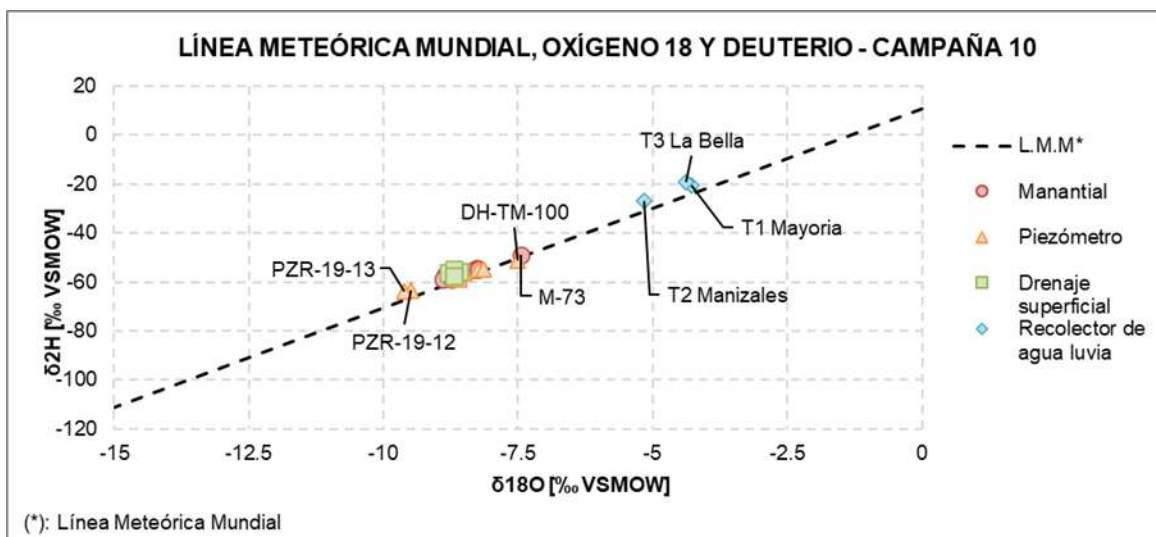


Figura 5.1.6.169 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 10. Enero 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

k. Campaña 11 febrero (2021)

La campaña de muestreo número 11 fue ejecutada entre el 13 al 16 de enero del año 2021. Como se mencionó en la campaña 10, por efecto del cese de actividades en diciembre de 2020 en el proyecto, el muestreo se corrió dos semanas a partir de enero. Por tal motivo se considera para el análisis que el agua lluvia totalizada de esta campaña es representativa

de enero de 2021. En cada uno de los puntos visitados se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.1.6.81.

A continuación, se presenta el análisis de los resultados de las mediciones en campo y de los análisis de deuterio y oxígeno 18. En este mes, los valores de pH de todas las muestras son cercanos al promedio (6,66 U de pH) y el valor de pH del recolector de agua lluvia identificado como T3 totalizador, que en la campaña anterior fue básico, en esta disminuyó, presentando un valor similar más normal para agua lluvia.

Tabla 5.1.6.81 Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 11 febrero del 2021

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	11/2/2021	6,12	71,1
M-29	Manantial	12/2/2021	6,86	52,7
M-233	Manantial	11/2/2021	6,82	81,5
M-191	Manantial	12/2/2021	7,48	137,5
M-18	Manantial	9/2/2021	6,69	65,3
M-237	Manantial	11/2/2021	6,63	80,9
M-242	Manantial	10/2/2021	6,72	55,5
M-73	Manantial	10/2/2021	6,58	136,8
M-79	Manantial	11/2/2021	6,63	78,3
BH-5M-03	Manantial	11/2/2021	6,26	135,4
DH-FS-309	Manantial	12/2/2021	6,54	210,1
DH-TM-100	Manantial	9/2/2021	6,35	173,3
PZS-12-09	Manantial	9/2/2021	6,27	383,0
PZR-12-02	Piezómetro	10/2/2021	6,2	91,9
PZR-12-04	Piezómetro	11/2/2021	6,66	453,0
PZS-12-03	Piezómetro	10/2/2021	6,82	384,0
PZS-13-17	Piezómetro	12/2/2021	6,57	75,5
PZR-19-12	Piezómetro	9/2/2021	6,49	91,5
PZR-19-13	Piezómetro	9/2/2021	6,47	79,2
Quebrada Palestina	Piezómetro	9/2/2021	7,41	137,7
Quebrada Topacio	Piezómetro	9/2/2021	6,73	73,5
Quebrada Bella	Piezómetro	11/2/2021	7,06	81,4

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μcm]
Quebrada San Antonio	Piezómetro	10/2/2021	6,44	95.0
T1 Mayoría	Agua lluvia	11/2/2021	6,67	126.0
T2 Manizales	Agua lluvia	12/2/2021	6,86	34,8
T3 La Bella	Agua lluvia	11/2/2021	6,83	21,26

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Los valores de pH y conductividad eléctrica son presentados en la Figura 5.1.6.170 y en la Figura 5.1.6.171 respectivamente. Los valores de pH registrados durante la campaña 11 muestran aguas ligeramente ácidas a neutras. Los valores de conductividad eléctrica más altos se registran en los piezómetros, comportamiento ya observado en anteriores campañas de campo.

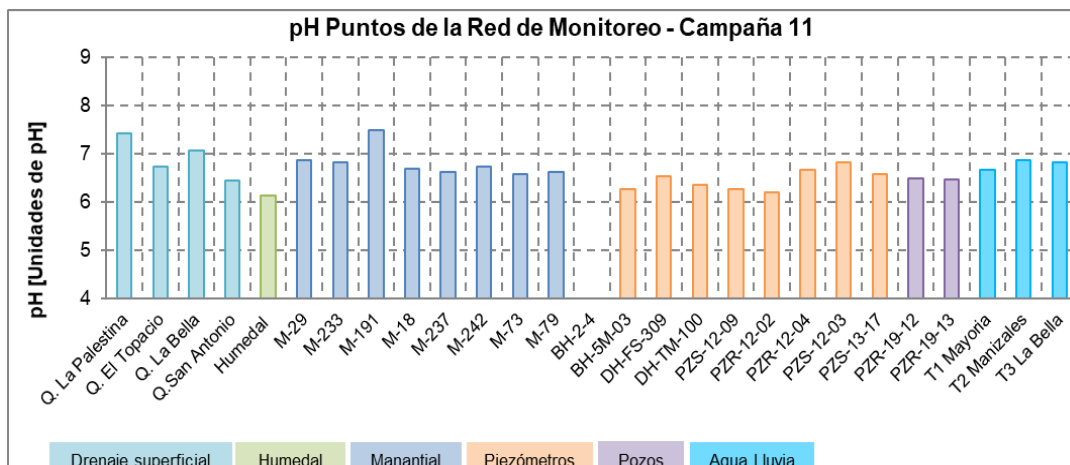


Figura 5.1.6.170 pH de los puntos de monitoreo campaña 11. Febrero 2021.

Fuente: SHI S.A.S (2021)

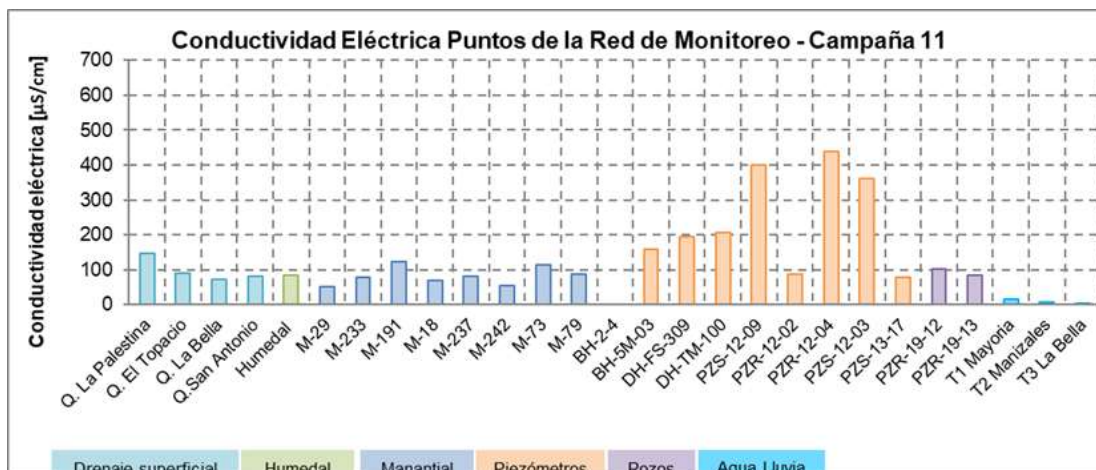


Figura 5.1.6.171 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 11. Febrero 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

En la Tabla 5.1.6.82 y en la Figura 5.1.6.172 es posible visualizar las concentraciones relativas de los isótopos ambientales deuterio y oxígeno 18. En la Figura 5.1.6.172 se pueden observar dos conjuntos de puntos sobre la línea meteórica, el primero de los conjuntos está conformado por piezómetros, manantiales y quebradas, los cuales se encuentran empobrecidos con respecto a la marca isotópica de los tres recolectores de agua lluvia, la cual para este mes se encuentra más enriquecida respecto a los dos últimos meses, esto tiene que ver porque en el mes de enero y febrero las precipitaciones fueron menores, incluso se evidenció en el volumen de recolección de muestras de lluvia de este mes.

Tabla 5.1.6.82 Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo – campaña 11. febrero 2021

#	Punto	Tipo de punto	$\delta 180$	$\delta 180$
			VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,54	-57,95
2	M-29	Manantial	-8,16	-54,70
3	M-233	Manantial	-8,78	-57,05
4	M-191	Manantial	-8,48	-57,42
5	M-18	Manantial	-8,69	-59,22
6	M-237	Manantial	-8,27	-55,08
7	M-242	Manantial	-8,20	-55,50
8	M-73	Manantial	-7,85	-53,48
9	M-79	Manantial	-8,62	-59,31
10	BH-5M-03	Manantial	-8,64	-58,51
11	DH-FS-309	Manantial	-8,4	-56,00
12	DH-TM-100	Manantial	-8,21	-55,22
13	PZS-12-09	Manantial	-8,2	-55,44
14	PZR-12-02	Piezómetro	-8,76	-58,26
15	PZR-12-04	Piezómetro	-8,26	-54,57
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,57	-57,8
17	PZS-13-17	Piezómetro	-9,01	-60,34
18	PZR-19-12	Piezómetro	-9,46	-63,59
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,46	-64,29
20	Quebrada Palestina	Piezómetro	-8,35	-56,02
21	Quebrada Topacio	Piezómetro	-8,43	-56,84
22	Quebrada Bella	Piezómetro	-8,16	-55,73
23	Quebrada San Antonio	Piezómetro	-8,36	-57,63
24	T1 Mayoría	Agua lluvia	-1,05	0,34
25	T2 Manizales	Agua lluvia	-1,39	1,13
26	T3 La Bella	Agua lluvia	-1	1,59

Fuente: SHI S.A.S (2021)

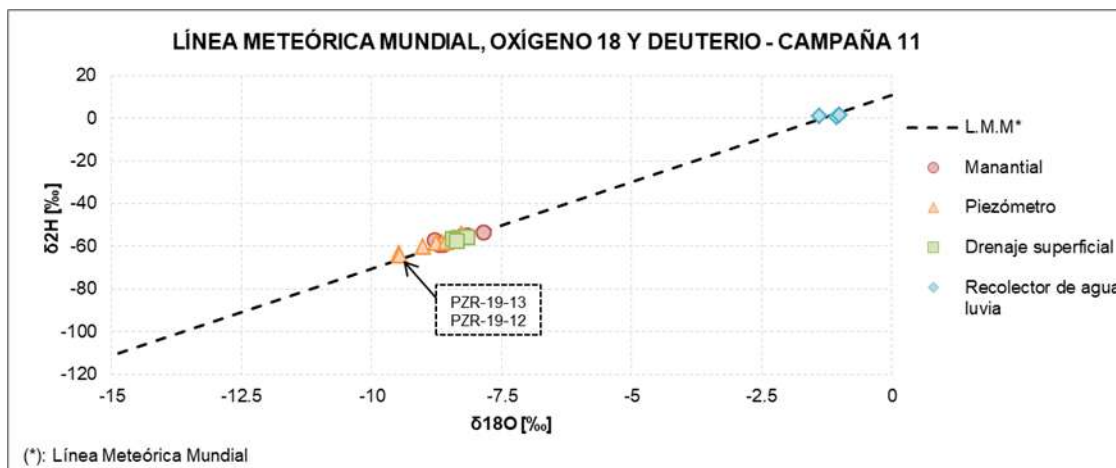


Figura 5.1.6.172 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 11. Febrero 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Campaña 12 marzo (2021)

La campaña de muestreo número 12 fue ejecutada entre el 08 y 13 de marzo del año 2021. Por el mismo motivo mencionado en las dos campañas anteriores, el agua lluvia totalizada de esta campaña es representativa de febrero de 2021. En cada uno de los puntos visitados se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.1.6.83. A continuación, se presenta el análisis de los resultados de las mediciones en campo y de los análisis de deuterio y oxígeno 18.

Tabla 5.1.6.83 Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 12 marzo del 2021

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	8/3/2021	6,59	42,8
M-29	Manantial	10/3/2021	7,26	48,6
M-233	Manantial	12/3/2021	7,67	96,9
M-191	Manantial	12/3/2021	7,73	110,1
M-18	Manantial	9/3/2021	7,07	54,7
M-237	Manantial	12/3/2021	7,45	68,9
M-242	Manantial	12/3/2021	6,92	43,2
M-73	Manantial	9/3/2021	6,97	77,7
M-79	Manantial	11/3/2021	6,86	77,0
BH-5M-03	Piezómetro	11/3/2021	6,81	177,4

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [$\mu\text{S/cm}$]
DH-FS-309	Piezómetro	9/3/2021	6,27	195,2
DH-TM-100	Piezómetro	9/3/2021	6,31	190,9
PZS-12-09	Piezómetro	10/3/2021	6,71	393,0
PZR-12-02	Piezómetro	11/3/2021	6,51	81,6
PZR-12-04	Piezómetro	10/3/2021	7,07	461,0
PZS-12-03	Piezómetro	11/3/2021	6,96	339,0
PZS-13-17	Piezómetro	10/3/2021	6,43	69,9
PZR-19-12	Piezómetro	9/3/2021	6,73	92,2
PZR-19-13	Piezómetro	9/3/2021	6,38	80,2
Quebrada Palestina	Quebrada	9/3/2021	7,59	121,9
Quebrada Topacio	Quebrada	9/3/2021	6,8	50,7
Quebrada Bella	Quebrada	12/3/2021	7,43	66,0
Quebrada San Antonio	Quebrada	11/3/2021	7,09	78,3
T1 Mayoría	Agua lluvia	8/3/2021	5,37	11,99
T2 Manizales	Agua lluvia	11/3/2021	7,07	8,28
T3 La Bella	Agua lluvia	10/3/2021	5,69	6,35

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

En la Figura 5.1.6.173 y Figura 5.1.6.174 se presentan los resultados de parámetros de campo de la campaña de muestreo número 12, allí es posible observar comportamientos de pH y conductividad eléctrica similares a los observados en las campañas anteriores.

El pH presentó un rango de variación de [5,37, 7,73 U.pH], es decir que se encontraron características del agua de ligeramente ácidas a neutras. Por otro lado, en toda la red de monitoreo se encontró un valor máximo de conductividad eléctrica de 461 $\mu\text{S/cm}$, el cual corresponde a un piezómetro, y el valor mínimo medido fue de 6,35 $\mu\text{S/cm}$, cuyo valor es asociado a un punto de agua lluvia.

En la Figura es posible notar que los mayores valores de conductividad eléctrica se encuentran relacionados a puntos de monitoreo de agua subterránea, específicamente a piezómetros, es importante mencionar que los piezómetros son instrumentos de monitoreo de agua subterráneas a profundidad, por lo que logran captar aguas que tienen contacto directo con la roca lo que aumenta su conductividad eléctrica.

Por otro lado, los manantiales, que también son puntos de agua subterránea, generalmente corresponden a puntos de salida de agua del sistema subterráneo cuyo tiempo de residencia es corto y las profundidades de estos flujos son someros, por tal razón presentan menores valores de conductividad eléctrica, como es posible notar en la Figura 5.1.6.174.

Finalmente, las conductividades eléctricas que presentan los puntos de agua lluvia son normales para este tipo de puntos y proporcionan confiabilidad a las muestras recolectadas, ya que indica que no fueron alteradas por algún tipo sólidos o por personas ajenas al proyecto.

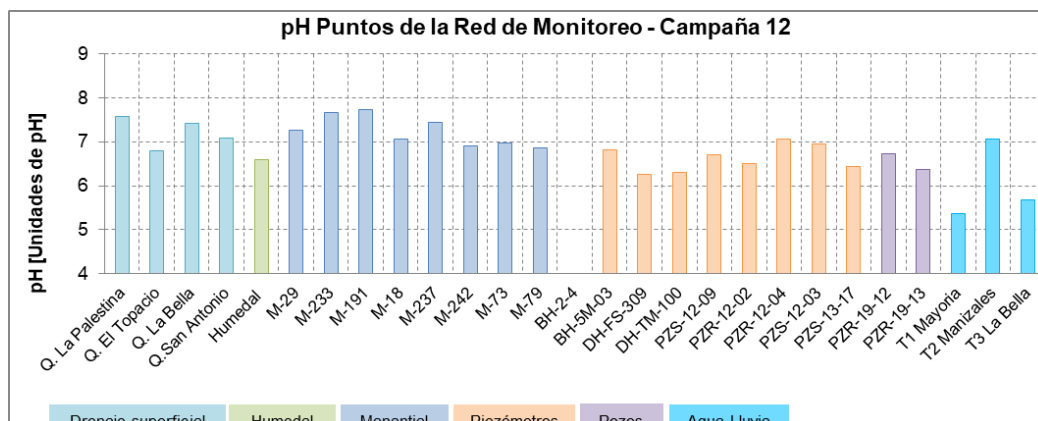


Figura 5.1.6.173 pH de los puntos de monitoreo campaña 12. Marzo 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

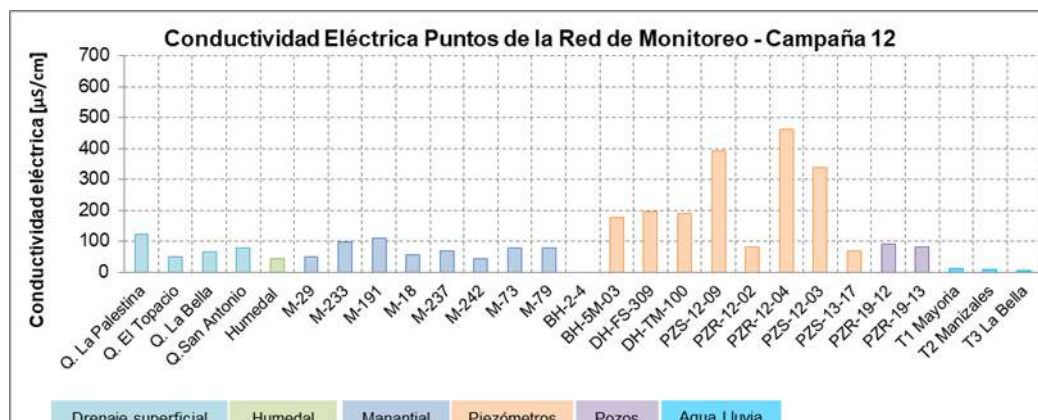


Figura 5.1.6.174 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 12. Marzo 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

En la Tabla 5.1.6.84 es posible visualizar las concentraciones relativas de los isótopos ambientales deuterio y oxígeno 18. En la Figura 5.1.6.175 se pueden observar dos conjuntos de puntos sobre la línea meteórica, el primero de los conjuntos está conformado por piezómetros, manantiales y quebradas, y el segundo conjunto de puntos está conformado por los puntos de aguas lluvias, los cuales se encuentran más enriquecidos

que el resto de los puntos que conforman la red de monitoreo. De los resultados obtenidos es importante destacar que:

Los puntos de agua lluvia en el mes de marzo se encuentran más enriquecidos que el resto de los puntos de la red de monitoreo, aunque fue un mes lluvioso. Este incremento podría asociarse a un comportamiento similar al de continentalidad, propiciado por un mayor transporte de humedad proveniente del mar, que genera una mayor concentración de isótopos estables, esto es posible dadas las condiciones macro climáticas favorables para que estos flujos de advección de aire húmedo provenientes del mar incrementen, dado que el año 2020-2021 es oficialmente un año La Niña moderada (NOAA, 2021), lo cual fortalece los vientos alisios del este, que transportan humedad desde el océano Atlántico hasta la parte continental de Suramérica.

Es importante recordar que la concentración relativa de isótopos ambientales responde inmediatamente a la cantidad de precipitación en una zona determinada. Por otro lado, la concentración de isótopos en las aguas superficiales y principalmente la concentración en las aguas subterráneas corresponde a una ponderación de las lluvias anuales, debido al tiempo de tránsito y almacenamiento en el medio natural, luego de que el agua lluvia cae en la superficie.

Tabla 5.1.6.84 Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo – campaña 12. marzo 2021

#	Punto	Tipo de punto	Fecha	$\delta^{18}O [‰]$	$\delta^2H [‰]$
				VSMOW $\pm 0,2‰$	VSMOW $\pm 0,8‰$
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	8/3/2021	-5,83	-36,98
2	M-29	Manantial	10/3/2021	-7,58	-46,23
3	M-233	Manantial	12/3/2021	-8,56	-55,12
4	M-191	Manantial	12/3/2021	-7,86	-52,11
5	M-18	Manantial	9/3/2021	-7,44	-46,58
6	M-237	Manantial	12/3/2021	-7,93	-49,40
7	M-242	Manantial	12/3/2021	-7,90	-49,17
8	M-73	Manantial	9/3/2021	-6,26	-36,35
9	M-79	Manantial	11/3/2021	-8,94	-58,04
10	BH-5M-03	Piezómetro	11/3/2021	-7,94	-50,78
11	DH-FS-309	Piezómetro	9/3/2021	-8,39	-53,14
12	DH-TM-100	Piezómetro	9/3/2021	-5,73	-32,46
13	PZS-12-09	Piezómetro	10/3/2021	-7,90	-52,94
14	PZR-12-02	Piezómetro	11/3/2021	-8,62	-58,44
15	PZR-12-04	Piezómetro	10/3/2021	-7,83	-54,29
16	PZS-12-03	Piezómetro	11/3/2021	-7,05	-46,41
17	PZS-13-17	Piezómetro	10/3/2021	-8,41	-58,13
18	PZR-19-12	Piezómetro	9/3/2021	-9,16	-62,78
19	PZR-19-13	Piezómetro	9/3/2021	-9,13	-63,40

#	Punto	Tipo de punto	Fecha	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^2\text{H}$ [‰]
				VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
20	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	9/3/2021	-7,05	-46,61
21	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	9/3/2021	-6,14	-37,15
22	Quebrada Bella	Drenaje superficial	12/3/2021	-7,35	-46,44
23	Q Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	11/3/2021	-8,00	-51,72
24	T1 Mayoría	Agua lluvia	8/3/2021	-3,33	-10,89
25	T2 Manizales	Agua lluvia	11/3/2021	-3,29	-9,88
26	T3 La Bella	Agua lluvia	10/3/2021	-3,15	-9,04

Fuente: SHI S.A.S (2021)

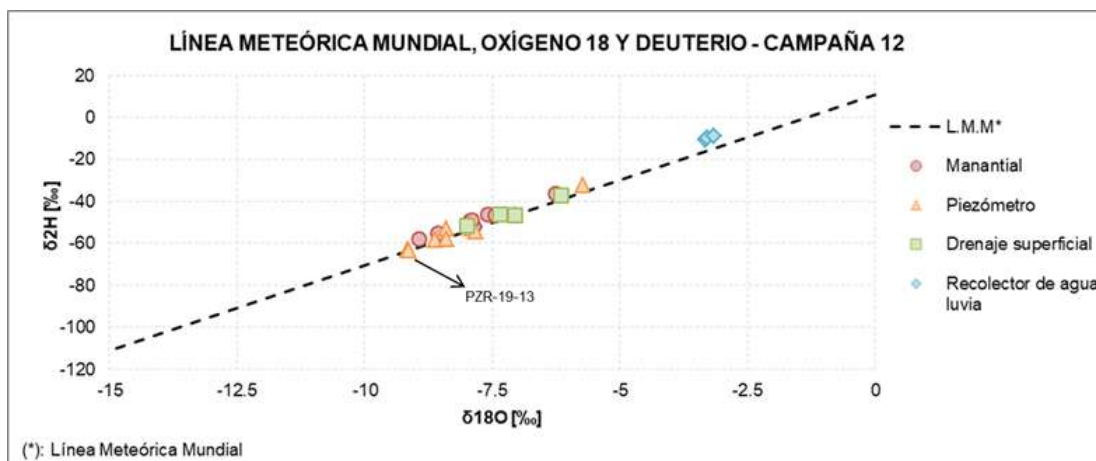


Figura 5.1.6.175 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 12. Marzo 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

III. Resultados de Tritio (época de verano)

Los resultados de tritio obtenidos en la campaña 12 son presentados en la Tabla 5.1.6.85, allí es posible observar que todos los resultados de tritio se encuentran por debajo o cercanos a 2 U.T, es decir valores menores a los registros de tritio de la lluvia en Colombia (2,3 U.T) como quedo en evidencia en la Figura 5.1.6.141.

Tabla 5.1.6.85 Resultados de tritio campaña 7 – época transición seca-húmeda. Laboratorio Wessling

Punto	Tritio [Bq/dm3]	Tritio [TU]
Reservorio Artificial La Mayoría	0,19	1,6
Quebrada Palestina	0,18	1,5
BH-5M-03	0,17	1,4

Punto	Tritio [Bq/dm ³]	Tritio [TU]
DH-TM-100	0,15	1,3
M -29	0,17	1,4
M-73	0,22	1,8
M-79	0,14	1,2
M-233	0,13	1,1
PZR-12-02	0,19	1,6
PZS-12-09	0,12	1,0
PZS-13-17	0,17	1,4
PZR-19-13	0,08	0,7
T1 Mayoría	0,18	1,5
T2 Manizales	0,18	1,5
T3 La Bella	0,19	1,8

TU: Unidades de tritio [Bq/dm³]: becquerel por decímetro cúbico.

Fuente: SHI S.A.S (2021)

E. Análisis global de los resultados de deuterio y oxígeno de las campañas 2020 y 2021

a. Variación temporal de los isótopos de agua lluvia

En cada una de las campañas de muestreo de isótopos ambientales, se tomaron muestras de agua lluvia en 3 recolectores (totalizadores), los cuales realizan una integración de todos los eventos de precipitación durante un mes. Estos tres recolectores se ubicaron en tres alturas distintas, como se puede observar en la Tabla 5.1.6.86, con el propósito de caracterizar la composición isotópica el agua lluvia en el gradiente altitudinal del área de influencia.

Tabla 5.1.6.86 Ubicación y cota de los recolectores de agua lluvia

Totalizador	Sitio	Este	Norte	Cota
1	La Mayoría (Oficinas de Gramalote)	4.789.134,00	2.278.266,00	836,00
2	Manizales (Cerca de Cristales)	4.789.432,00	2.275.309,00	1.260,00
3	La Bella (lado oeste de la zona subiendo hacia San Roque)	4.782.560,00	2.277.999,00	1.301,00

Fuente: SHI S.A.S (2021)

En cada una de las campañas de muestreo de isótopos ambientales, se realizó la medición del volumen de agua recolectado en el recipiente. Este volumen es un indicador de la intensidad de la precipitación durante el mes de integración de la muestra, la variación de estos volúmenes durante el periodo de caracterización se presenta en la Figura 5.1.6.176.

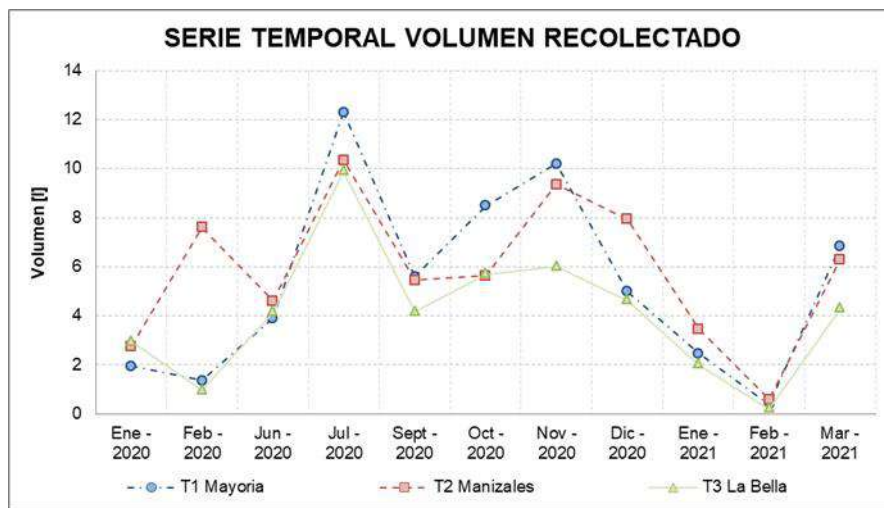


Figura 5.1.6.176 Variación temporal del volumen registrado en los recolectores de agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

La Figura 5.1.6.177 muestra, en cierta medida, el comportamiento de la precipitación en el área de influencia del proyecto Gramalote, allí se puede observar un fuerte periodo seco, el cual comprende el periodo enero – febrero.

Las gráficas de la Precipitación media multianual para las estaciones de precipitación del IDEAM, San Roque y Granja Experimental San José del Nus, muestran un ciclo bimodal con un efecto de veranillo en junio-agosto el cual se asemeja ligeramente al comportamiento de los volúmenes de agua recolectada en los totalizadores y es consecuente con la variación estacional de la concentración de oxígeno 18 y deuterio en cuanto al efecto de cantidad, donde en enero, febrero y marzo, que son meses secos se presenta un enriquecimiento del deuterio y oxígeno 18 de la lluvia, mientras que en el resto de meses donde hay mayores precipitaciones, hay empobrecimiento de los isótopos ambientales en los tres totalizadores (Figura 5.1.6.178).

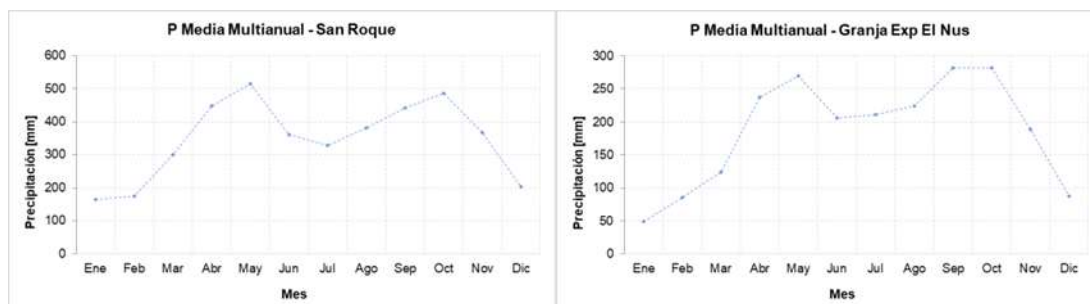


Figura 5.1.6.177 Precipitación media multianual para la zona de estudio

Fuente: SHI S.A.S (2021)

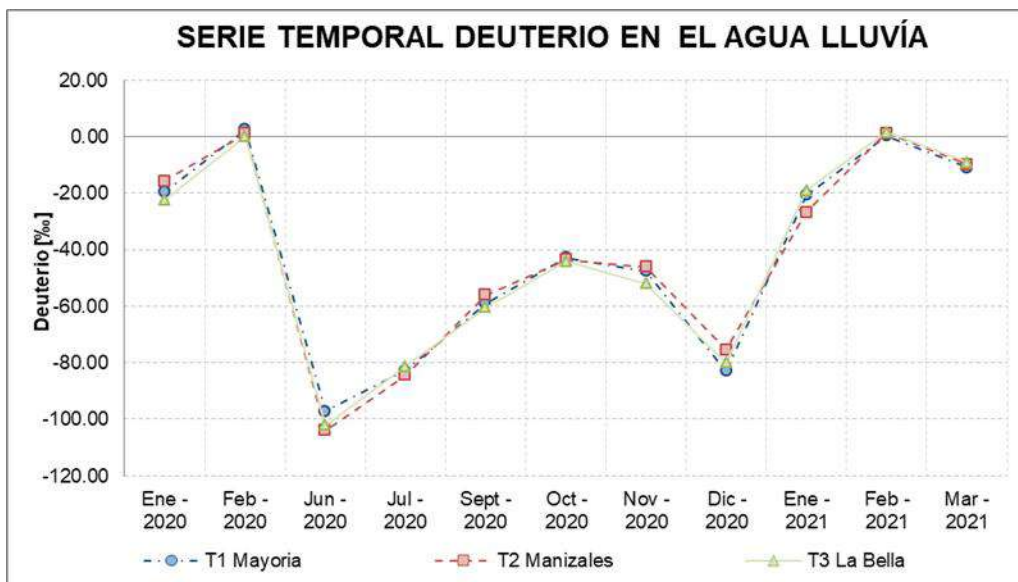


Figura 5.1.6.178 Variación temporal de la concentración de deuterio en el agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Con los resultados de deuterio y oxígeno 18 de cada uno de los muestreos de agua lluvia realizada en los totalizadores, se calculó el exceso de deuterio. La evolución temporal del exceso de deuterio en el agua lluvia se puede observar en la Figura 5.1.6.179, quedando como conclusión que existe poca variación entre totalizadores y poca variación temporal.

El exceso de deuterio es un indicador de la calidad analítica de los datos y de los procesos meteóricos y de reciclaje en el agua lluvia. En los 12 registros para los 3 totalizadores no se evidencian excesos por debajo del 7%, lo que indica que las muestras no sufrieron evaporación durante la toma, así mismo se evidencia para las campañas 10 y 12 (enero - marzo 2021) y 6- 7 (octubre-noviembre de 2020) un exceso por encima del 13%, que indica procesos de reciclaje en la lluvia. El resto de las campañas evidencian procesos meteóricos normales.

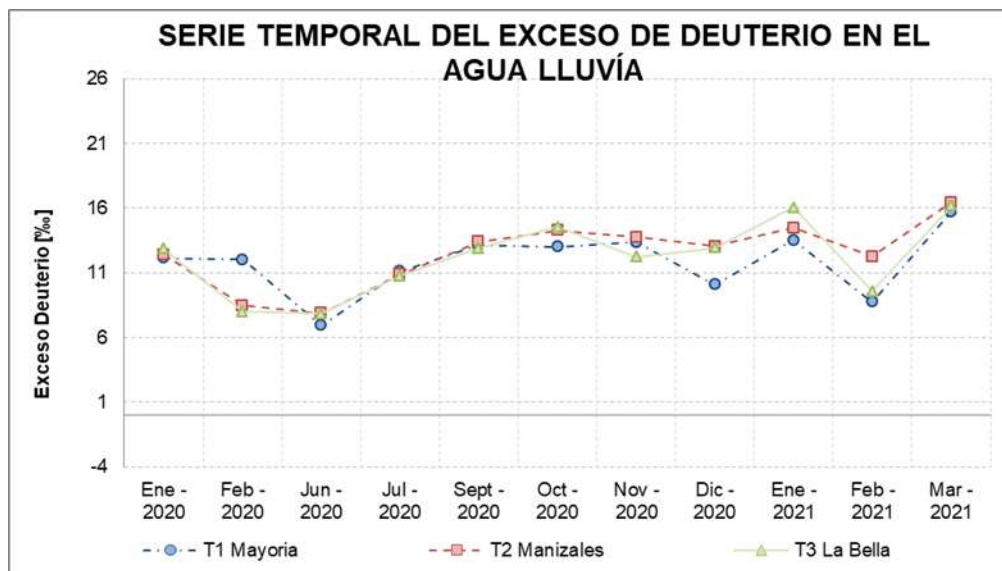


Figura 5.1.6.179 Evolución temporal del exceso de deuterio en el agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

b. Isotopos ambientales en el agua lluvia en comparación con la línea meteórica mundial y línea meteórica local

La Agencia Internacional de Energía Atómica de Viena (IAEA) empezó a operar una red de monitoreo mundial en el agua lluvia en el año 1961, para la medición de los isótopos ambientales, deuterio y oxígeno 18, y del isótopo radioactivo tritio, con una periodicidad mensual en 122 estaciones, la red de monitoreo de IAEA, la cual en 1980 se redujo a 80 estaciones oficiales (Agencia Internacional de Energía Atómica, 1981).

Las cantidades de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de cualquier muestra de agua de lluvia se relacionan por una línea llamada línea meteórica mundial, la cual fue construida con datos de las 80 estaciones de precipitación para medición de isótopos ambientales de la IAEA.

A continuación en la Figura 5.1.6.180 se presentan los resultados obtenidos en la caracterización anual que se realizó en las agua lluvias de la zona de estudio de isótopos ambientales, allí se observa concordancia de los resultados con la línea meteórica mundial, por lo que se descarta alteración de las muestras recolectadas por evaporación, además las relaciones isotópicas relativas presentan un amplio rango de variación, debido a los cambios en la magnitud de la precipitación entre los meses de monitoreo. SHI S.A.S (2021).

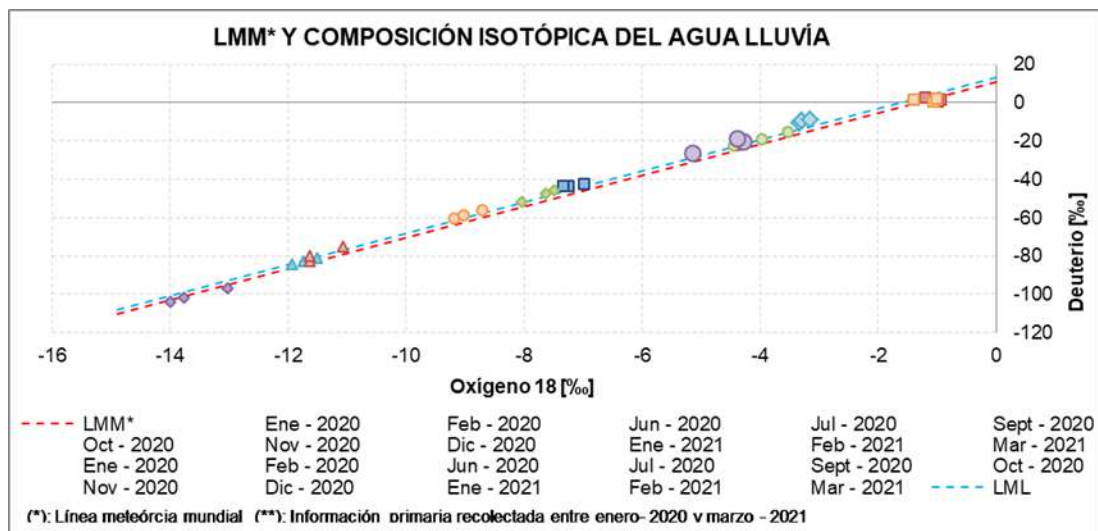


Figura 5.1.6.180 Línea meteórica mundial, local y resultados de isótopos ambientales en el agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

La línea meteórica local establece la relación entre el deuterio y el oxígeno 18 en la precipitación de una estación o un conjunto de estaciones, ubicadas en una zona específica. La línea meteórica local establece el comportamiento de los isótopos en la precipitación de la zona en particular (Agencia Internacional de Energía Atómica, 1981).

Es importante mencionar que la línea meteórica local, en muchas ocasiones, diferirá de la LMM, ya que existen procesos propios de cada zona que influyen en el comportamiento de la precipitación, lo que se ve reflejado en enriquecimientos o empobrecimientos relativos, producto de veranos o lluvias locales (Velez O. & Rhenals G., 2008).

Para realizar la correlación de los datos y así obtener la ecuación de la línea meteórica local se realizó un ajuste lineal a los resultados de composición isotópica relativa de deuterio y oxígeno 18 en las aguas lluvias de la zona de estudio, utilizando el método de mínimos cuadrados, en la Tabla 5.1.6.87 se presenta la pendiente y el intercepto de la línea meteórica local, obtenidos, en la Figura 5.1.6.181 se puede observar la línea meteórica local.

La pendiente obtenida de la línea meteórica local es muy similar a la pendiente de la línea meteórica mundial, sin embargo, el intercepto difiere, situación que representa procesos locales que afectan la precipitación en la zona de estudio.

Tabla 5.1.6.87 Parámetros del ajuste lineal de la línea meteórica local

Parámetro	Valor
a (pendiente)	8,14
b (intercepto)	13,15
R^2	0,994

Fuente: SHI S.A.S (2021)

c. Isotopos ambientales en agua superficiales

La red de monitoreo de isótopos ambientales cuenta con cinco puntos de agua superficial, Quebrada La Bella, Quebrada El Topacio, Quebrada San Antonio, Quebrada Palestina y El Reservorio Artificial La Mayoría. Durante un año, al igual que en el resto de los puntos, se realizó una campaña de muestreo mensual para determinar la composición de deuterio y oxígeno 18 en estos puntos (Figura 5.1.6.181).

Los resultados obtenidos durante todo el año se pueden observar en la Figura 5.1.6.181, donde es posible notar que todos los puntos de agua superficial coinciden con la línea meteórica mundial, por lo que se descarta la existencia de procesos de evaporación en las aguas superficiales de la zona de estudio, incluyendo las aguas del Reservorio Artificial.

Existen cuatro puntos, que corresponden a cuatro muestras, que se ubican más hacia la derecha de la línea meteórica con respecto al resto de los puntos, estas muestras corresponden a cuatro de los cinco puntos de agua superficial de la última campaña de muestreo.

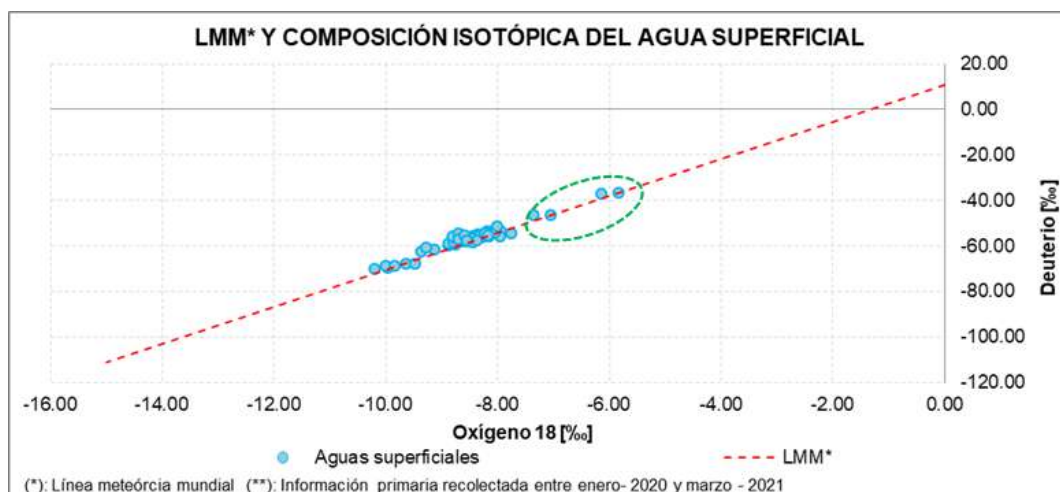


Figura 5.1.6.181 Línea meteórica mundial y composición isotópica del agua superficial

Fuente: SHI S.A.S (2021)

El comportamiento temporal del deuterio y del oxígeno 18 en las aguas superficiales y aguas lluvias se presenta en la Figura 5.1.6.182, en general se observa poca variación en la composición de isótopos ambientales, a excepción de algunas campañas en las que existen variaciones de deuterio, lo que es normal debido a la baja masa molecular de este isótopo.

Como se había mencionado previamente, existe un enriquecimiento general de isótopos en las muestras de agua lluvia en la última campaña de monitoreo, que corresponde al mes de febrero del año 2021, esto podría estar relacionado con la fuerte temporada de lluvias que ha afectado a Colombia porque este año se presenta el fenómeno ENSO fase fría La Niña (moderada), lo que provoca que lleguen aguas enriquecidas desde el atlántico que pueden enriquecer las agua lluvias y a la vez las aguas superficiales.

Al comparar las series temporales de isótopos, deuterio y oxígeno 18, en agua lluvias y aguas superficiales, se observa una relación directa, ya que en los meses donde existen mayores empobrecimientos en el agua lluvia, se observa pequeños empobrecimientos en los isótopos del agua superficial, los cuales son más evidentes en el deuterio debido a su baja masa molecular, como se mencionó antes. Lo anterior deja manifiesto una relación directa entre el agua lluvia y el agua superficial.

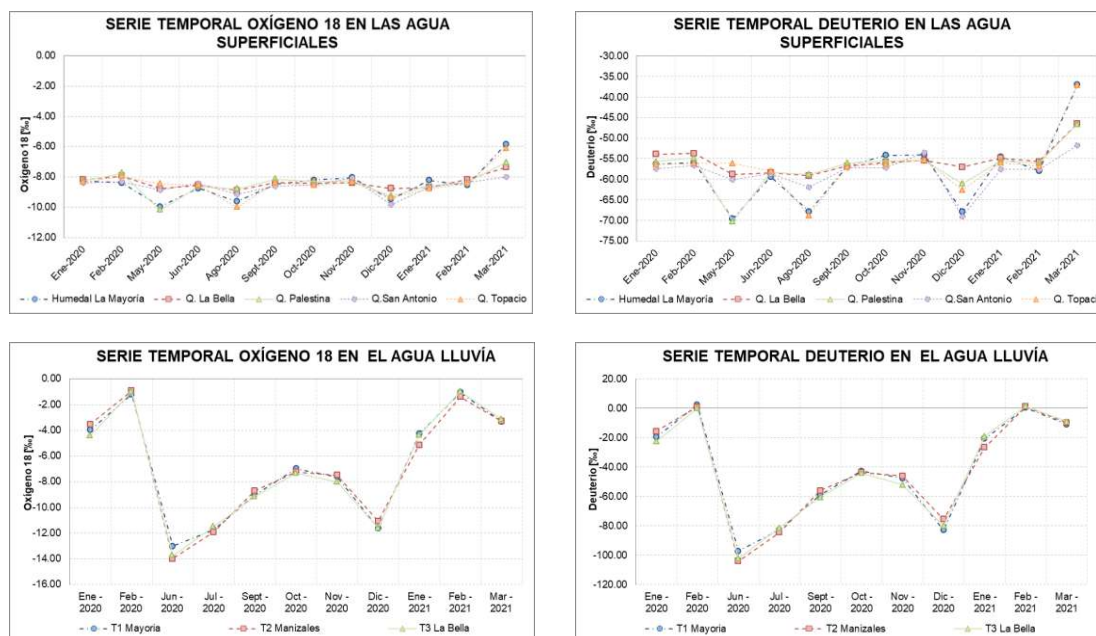


Figura 5.1.6.182 Evolución temporal del oxígeno 18 en las aguas superficiales y lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

d. Isótopos ambientales en las aguas subterráneas

En la Figura 5.1.6.183 se presenta la línea meteórica mundial y los resultados de deuterio y oxígeno 18 obtenidos en los puntos de agua subterránea. Según se observa en la figura,

las aguas subterráneas no presentan fuertes variaciones temporales, lo que es de esperar, primero porque en el medio subterráneo se limitan los procesos de evaporación y condensación. Por otro lado, el agua subterránea es una mezcla de agua lluvia y agua superficial, la cual se almacena y transita en un medio que atenúa las variaciones isotópicas, las cuales son normales en agua lluvia y superficiales, llegando a una concentración promedio. Además, todos los puntos de agua subterráneas se ubican sobre la LMM, lo que permite descartar el efecto de evaporación en las muestras.

Tiene sentido representar la marca isotópica del agua lluvia como la composición isotópica relativa isotópica ponderada, usando como factor de ponderación la cantidad de agua lluvia que en efecto se presentó en cada totalizador.

Dado que no se cuentan con estaciones de precipitación en cada totalizador, se utilizó como factor de ponderación el volumen recolectado en los totalizadores cada mes, el cual es un indicador de la cantidad de lluvia que se presentó en esa zona, además anteriormente se corroboró que el volumen recolectado en el totalizador es coherente con el comportamiento del ciclo anual la precipitación para la zona.

En la Figura 5.1.6.184 es posible observar la marca isotópica ponderada del agua lluvia, la cual coincide bastante bien con la marca isotópica del agua subterránea, por lo que es correcto afirmar que los flujos de agua subterráneos que fueron objeto de muestreo tienen origen en la precipitación de la zona de estudio.

Finalmente, en la Figura se puede observar la marca ponderada del agua lluvia y la marca isotópica promedio del agua subterránea, con la marca isotópica mes a mes del agua recolectada en los totalizadores, allí se evidencia que la mayor parte de la recarga se produce en los meses octubre, septiembre y noviembre, es importante resaltar que para disminuir la incertidumbre de este análisis es importante contar con la caracterización isotópica del agua lluvia en otro año hidrológico.

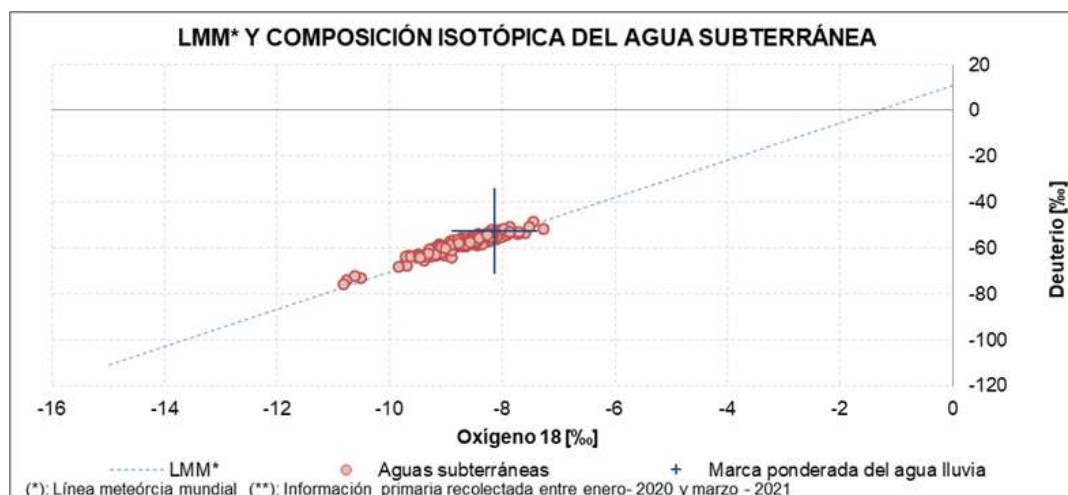


Figura 5.1.6.183 Composición isotópica del agua subterránea, LMM y marca ponderada del agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

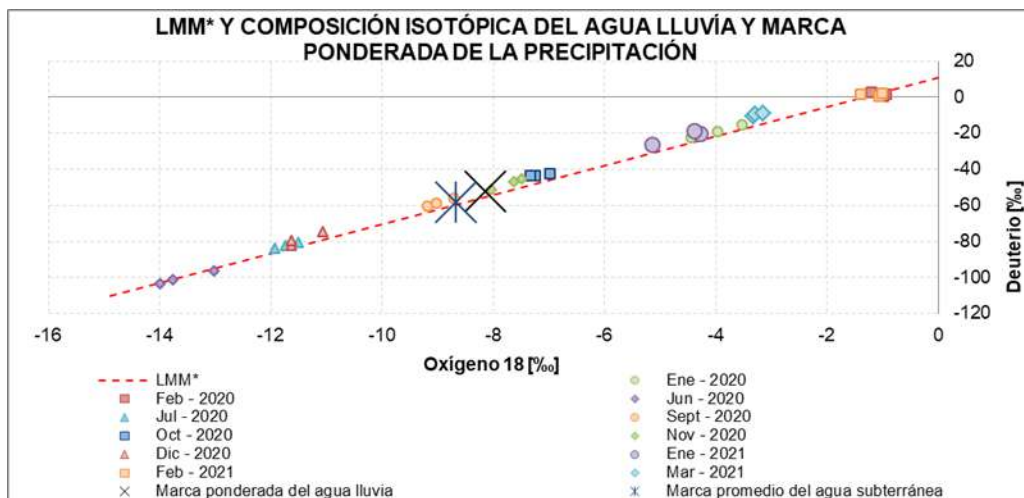


Figura 5.1.6.184 Marca ponderada del agua lluvia, marca promedio del agua subterránea y ciclo isotópica del agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

e. Estimación de alturas de recarga utilizando la relación de altura e isótopos estables

La correlación lineal entre las desviaciones de $2H$, $16O$ vs elevación, permite estimar zonas de recarga, identificando la altura a la cual se infiltra el agua, ya que las aguas luego de infiltradas presentan bajas variaciones isotópicas en el medio subterráneo.

La pendiente de la gráfica $2H$, $18O$ vs altura, es conocida como el gradiente orográfico el cual se expresa en $\delta\text{‰}/100\text{m}$, y puede variar entre cada zona.

Las gráficas de isótopos ambientales vs altura se presentan desde la Figura 5.1.6.185 y Figura 5.1.6.186 para deuterio y oxígeno 18 respectivamente. En estas dos figuras es posible notar que el comportamiento no es lineal, esto es debido a que el recolector de agua lluvia T2, a pesar de encontrarse a una altura similar al totalizador T3, presenta una composición isotópica distinta.

La diferencia de composición isotópica entre los totalizadores T2 y T3 puede ser causa por un efecto de lluvia orográfica local en el punto T2, el cual se encuentra ubicado en una cuenca con vertientes altas en ambos lados, lo que puede ocasionar precipitaciones mayores muy localizadas, alterando la concentración de isótopos ambientales según el efecto de cantidad, sin embargo, ahondar en esta hipótesis se sale del alcance de este estudio.

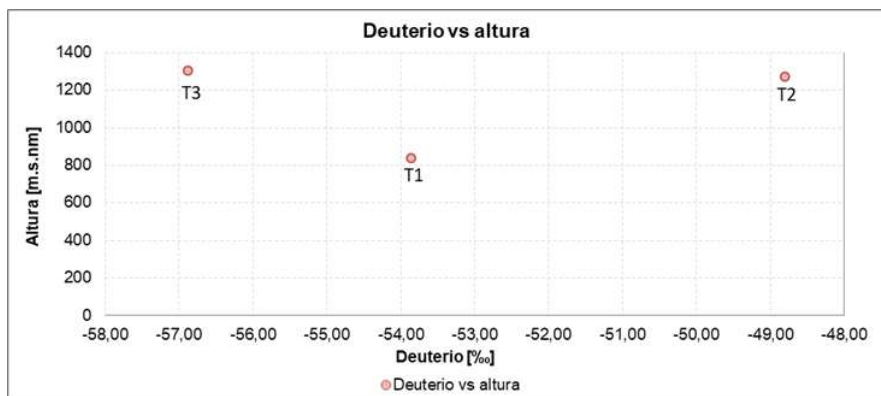


Figura 5.1.6.185 Deuterio vs altura en el agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

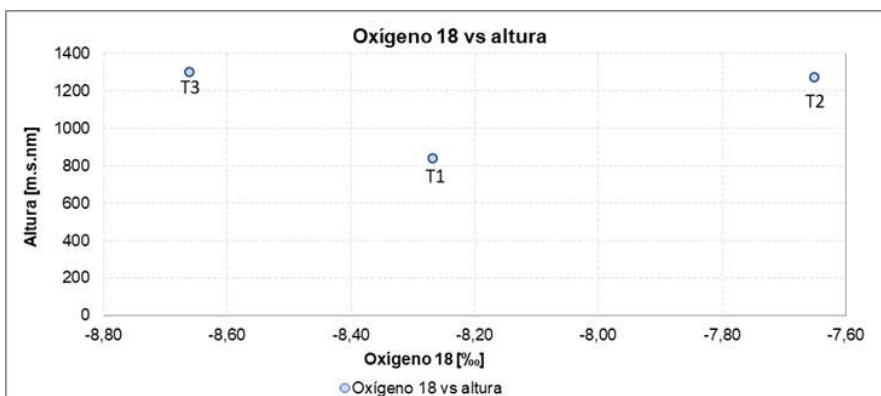


Figura 5.1.6.186 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

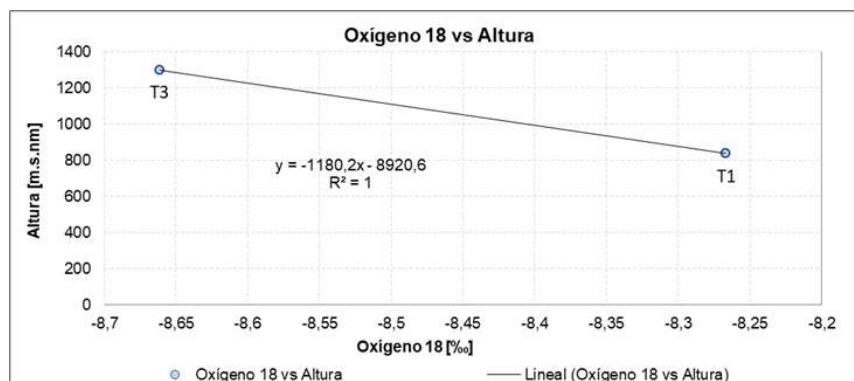


Figura 5.1.6.187 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia totalizadores T1 y T3

Fuente: SHI S.A.S (2021)

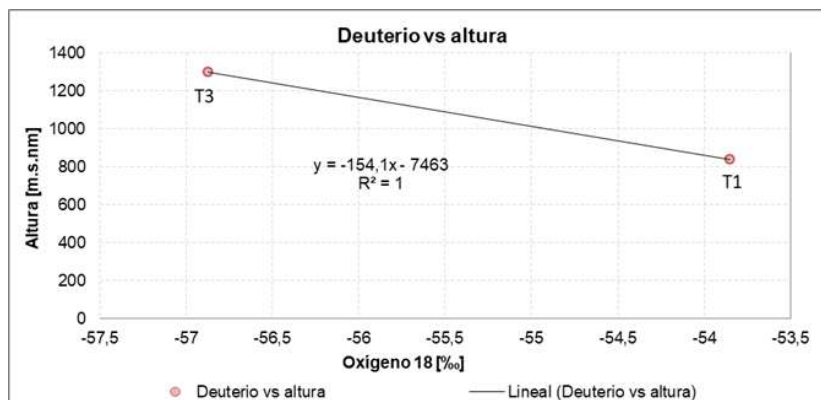


Figura 5.1.6.188 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia totalizadores T1 y T3

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Según lo anterior, es correcto asumir que la lluvia en el área de influencia se encuentra bien representada por los totalizadores T1 y T3, los cuales presentan concordancia con el efecto de altitud, y por ende es posible estimar el gradiente altitudinal de empobrecimiento de los isótopos ambientales, el cual es presentado en la Figura 5.1.6.187 y Figura 5.1.6.188 .

La línea recta obtenida con los totalizadores T1 y T3 establecen el gradiente isotópico de la zona de estudio, y es un insumo para realizar una estimación de las alturas de las zonas de recarga del agua subterránea que cuentan con caracterización isotópica. En la Figura 5.1.6.189 y Figura 5.1.6.190 es presentado el gradiente altitudinal de deuterio y oxígeno 18 en la lluvia junto con la composición isotópica promedio de los puntos de agua subterránea que conforman la red de monitoreo.

En las figuras presentadas se pueden observar tres grupos de agua subterránea, aquellos demarcados por las líneas de color verde y naranja, permiten estimar una zona de recarga entre 900 y 1600 metros sobre el nivel del mar, es decir la recarga se da en la misma zona. Esto concuerda con los valores de conductividad eléctrica bajos encontrados en las aguas subterráneas y con la buena correlación que existe entre la marca ponderada del agua lluvia y la concentración isotópica del agua subterránea.

Una de las características de un flujo regional de agua subterránea son los altos tiempos de residencia, lo cual le proporciona al agua el tiempo necesario para disolver iones provenientes de la roca con la que está en contacto y los piezómetros PZR-19-12 y PZR-19-13 presentan una conductividad eléctrica menor a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que permite descartar la altura estimada de recarga para estos dos puntos. SHI S.A.S (2021).

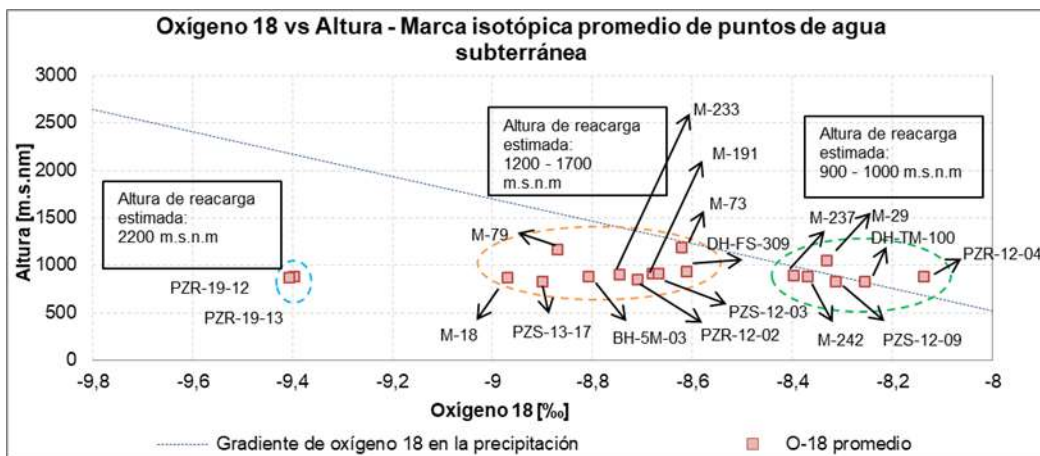


Figura 5.1.6.189 Marca isotópica promedio del agua subterránea y gradiente de oxígeno 18 en la precipitación

Fuente: SHI S.A.S (2021)

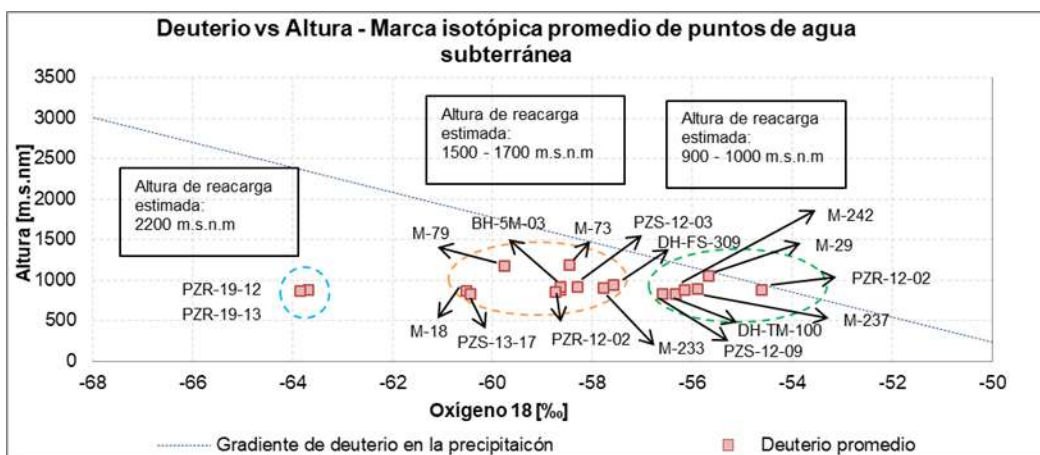


Figura 5.1.6.190 Marca isotópica promedio del agua subterránea y gradiente de deuterio en la precipitación

Fuente: SHI S.A.S (2021)

F. Análisis global de los resultados de tritio de las campañas 2020 y 2021

En Colombia existen dos estaciones de monitoreo del IAEA ubicadas en Barraquilla y Bogotá, las cuales presentan datos en los periodos 1971 – 1990 y 1971 – 2016 respectivamente, la serie de datos de tritio en el agua lluvia en la estación ubicada en Bogotá se puede observar en la Figura 5.1.6.191, la cual muestra una concentración pico de 25 UT (unidades de tritio) registrada en el año 1971, época para la cual ya se había descargado o desintegrado parte importante del tritio presente en la atmósfera, lo que lleva

a suponer que para el año 1961 la concentración pico de tritio, en el peor de los casos, estuvo entre 60 y 80 UT, lo que se puede corroborar observando el comportamiento de estaciones de países fronterizos con Colombia que cuentan con datos de concentración de tritio en la lluvia anteriores a 1971.

La disminución en las concentraciones pico de tritio en la atmósfera en Suramérica, es una limitante para la datación de las aguas subterráneas en estas latitudes; ya que, con concentraciones pico de tritio tan bajas y teniendo en cuenta que la vida media del tritio equivale a 12,45 años (Agencia Internacional de Energía Atómica, 1981), el periodo de datación es limitado y la incertidumbre es bastante alta. Una muestra de esto es que el agua subterránea recargada en los años 60 (suponiendo una concentración pico de a lo sumo 120 UT y un sistema totalmente cerrado) tendría a fecha de hoy una concentración de tritio de 5 UT, lo que comprende la variación natural para Colombia.

A partir del año 2000 el decaimiento no es notable, y el contenido de tritio en el agua lluvia empieza a mostrar un comportamiento semi-estable entre 1,14 UT y 4,98 UT, el valor promedio es de 2,3 UT, muy similar a lo observado en las lluvias de los recolectores en la zona, como se muestra en la Figura 5.1.6.191.

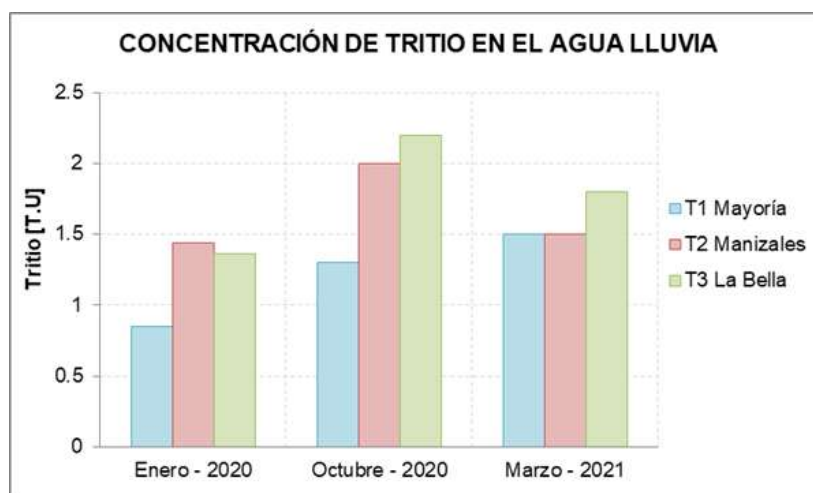


Figura 5.1.6.191 Resultados de tritio

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Para datar el agua con los resultados de tritio es necesario asumir un modelo de flujo tipo pistón, donde el agua que se infiltra no se mezcla con el agua almacenada, sino que sigue su camino sin que se produzcan mezclas importantes. Se resalta que la configuración hidrogeológica de las unidades litológicas en la zona, no se comportan de esta manera, por lo cual el resultado de este modelo deber ser analizado con precaución.

Además de esta suposición, se requiere una función de entrada de tritio en la precipitación, la cual se puede suponer una función constante en 1,55 T.U, debido a la poca variación que presentaron los resultados de tritio en la lluvia de la zona de estudio.

En la Tabla 5.1.6.88 se muestra el tiempo transcurrido desde las infiltraciones del agua, utilizando la función de decaimiento potencial, con una vida media para el tritio de 12,31 años, bajo un modelo de flujo pistón y una función de entrada de tritio constante de 1,55 UT que corresponde al promedio en la zona.

Los resultados de datación muestran que las aguas subterráneas y superficiales en el área de influencia son aguas jóvenes, mostrando edades variables entre 0,2 y 12 años. Sin embargo, se resalta que la estimación es altamente sensible a la función de entrada del tritio; así, por ejemplo, al considerar la función de entrada del tritio promedio de la estación Bogotá, las aguas infiltradas entre los años 1972 (≈ 20 UT) y 1976 (≈ 10 UT) tendrían concentraciones de tritio actuales entre 0,84 y 1,34 UT, similares también a las encontradas en las aguas subterráneas en la zona.

Tabla 5.1.6.88 Estimación del tiempo de decaimiento suponiendo un modelo de flujo pistón y función de entrada de tritio constante

Código	Años
Reservorio Artificial La Mayoría	1,4
Quebrada Palestina	0,2
BH-5M-03	5,2
DH-TM-100	4,9
M -29	3,2
M-73	3,2
M-79	10,2
M-233	10,9
PZR-12-02	5,0
PZS-12-09	11,9
PZS-13-17	3,2
PZR-19-13	8,3

Fuente: SHI S.A.S (2021)

De la tabla anterior se puede evidenciar algunas edades coherentes y aceptables para los puntos superficiales y los piezómetros, sin embargo los cuatro manantiales no reflejan la realidad de los flujos en la zona, ya que son puntos que se ubican en la partes más altas de las respectivas cuencas donde afloran y se ha evidenciado que el agua que recarga el terreno se infiltra y aflora rápidamente en dichos puntos, estas edades son el efecto de una modelación con condiciones de entrada y suposiciones que no se ajustan completamente a la realidad hidrogeológicas del área de influencia.

G. Conclusiones de la evaluación isotópica para las campañas de 2020 y 2021

Del inventario de puntos de agua realizado entre 2019-2020 se registraron 291 puntos de agua entre manantiales, pozos y piezómetros. El 73,8% de los puntos están sin uso, el 7,2 % tiene uso doméstico, industrial o agrícola y el restante 18,9% es para monitoreo del proyecto minero.

La mayoría de los manantiales afloran en el suelo residual y en el saprolito del batolito, el 63% son perennes y el 37% intermitentes y 67 manantiales se evidenciaron secos.

En cuanto a los parámetros fisicoquímico In situ medidos en la campaña de campo se observa de manera general que la conductividad eléctrica ha aumentado progresivamente en las cuatro campañas, siendo la campaña cuatro la que presenta mayores valores, mientras que la temperatura y el pH se mantienen muy constantes, aunque este último parámetro evidencia un ascenso, indicando aguas más cercanas al pH neutro a básico.

Fue posible comprobar que el agua lluvia en el área de influencia sigue el principio de cantidad en cuanto a su concentración relativa de isótopos ambientales, ya que, se identificaron empobrecimientos en deuterio y oxígeno 18 durante las épocas de lluvia y enriquecimiento del agua lluvia en estos dos isótopos durante las temporadas más secas.

No existen en el área de influencia fuentes de agua en las que se evidencien procesos de evaporación, ya que, todos los resultados de concentraciones relativas de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de monitoreo coinciden con la línea meteórica mundial.

Con los resultados obtenidos, es posible determinar que existe una relación directa del agua lluvia con las aguas superficiales en el área de influencia, ya que, la composición isotópica de las aguas superficiales responde inmediatamente a cambios en la composición isotópica del agua lluvia.

Los flujos de aguas subterráneas en el área de influencia son originados por la precipitación reciente, y tienen un tiempo de residencia en el medio subterráneo muy bajo, prueba de ello es la coincidencia de la marca ponderada de la precipitación con la marca isotópica del agua subterránea y los bajos tiempos estimados según la datación con el tritio.

Luego de analizar los valores promedio de la composición isotópica del agua subterránea y del agua lluvia (deuterio y oxígeno 18), y realizar una comparación con el ciclo anual de isótopos recolectados en los totalizadores, fue posible determinar, que la mayor recarga de agua lluvia hacia el medio subterráneo se da en el periodo septiembre – noviembre.

Las zonas de recarga de agua subterránea presentan una altura estimada entre 900 y 1500 msnm, es decir la recarga sucede principalmente en la misma zona, lo que es concordante con las conductividades eléctricas encontradas en las aguas subterráneas, relativamente bajas, y por ende con la hipótesis de flujos de agua subterránea con cortos tiempos de residencia en el medio subterráneo.

Los resultados de tritio permitieron estimar una datación cuantitativa de las aguas subterráneas y superficiales en el área de influencia, las cuales en general son aguas jóvenes entre 0,2 y 12 años; no obstante, el decaimiento radioactivo de este isótopo, las concentraciones bajas en países tropicales y la suposiciones de entrada del modelo que no se ajustan completamente a la realidad hidrogeológica de la zona, limitan la certeza de los resultados, por lo cual deben ser solo un valor de referencia general para este estudio. SHI S.A.S (2021).

H. Red de monitoreo de 2025

La red de monitoreo isotópica se detalla en el subcapítulo 5.1.6.4.1 . Los puntos monitoreados se presentan en la Figura 5.1.6.192

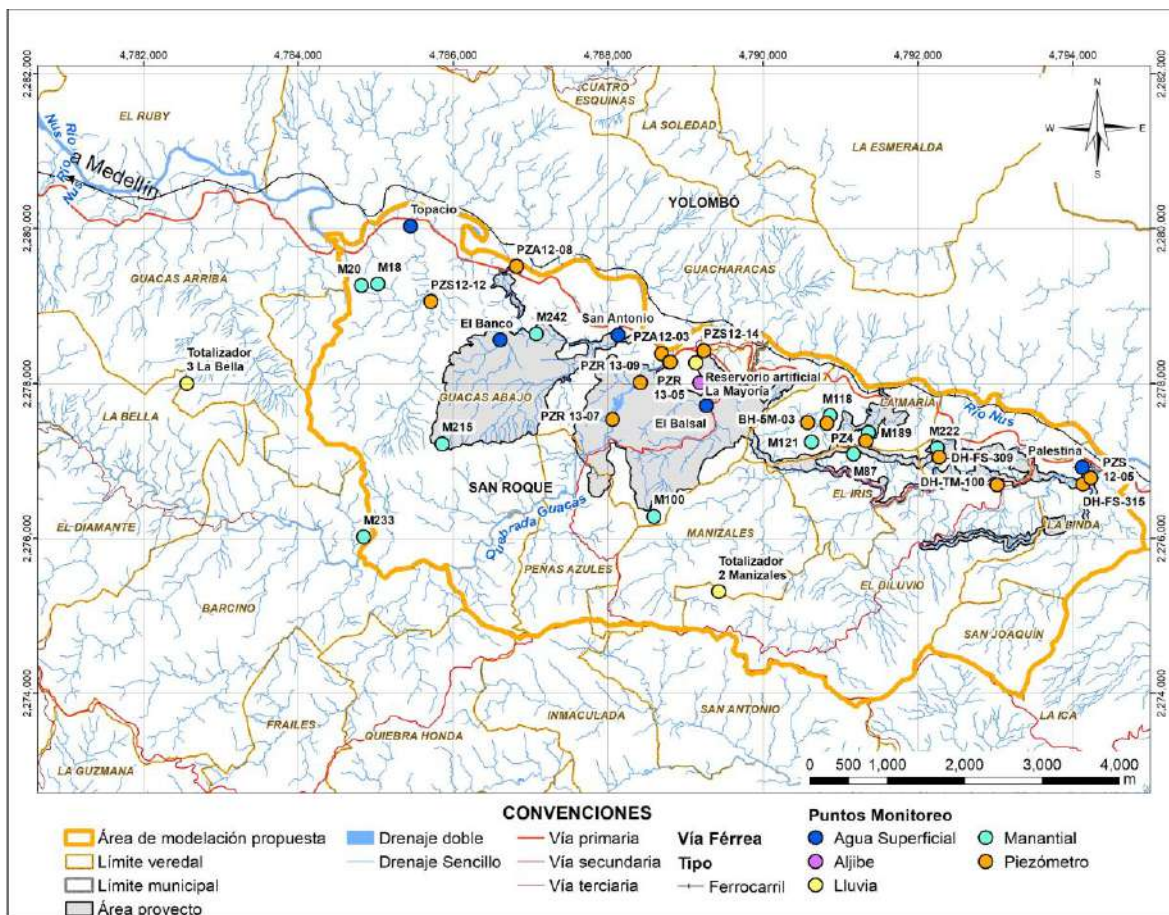


Figura 5.1.6.192 Ubicación espacial de los puntos que conforman la red de monitoreo

Fuente: Integral S.A. 2025

a. Campaña 1 febrero (2025)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo para esta campaña se reportan en el subcapítulo 5.1.6.4.2, ya que son los mismos utilizados en los análisis de las campañas de hidroquímica de 2025.

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

La campaña de febrero de 2025 se llevó a cabo desde el 4 de febrero de 2025 al 20 de febrero del 2025, en la cual se monitorearon 36 puntos (M195 se encontraba seco) en los cuales se encuentran agua superficial, agua subterránea y agua lluvia. Los resultados de deuterio y oxígeno -18 se presentan en la Tabla 5.1.6.89 y de manera gráfica en la Figura 5.1.6.193.

En términos generales, se observa que, con excepción del agua de lluvia, las diferentes fuentes de agua subterránea monitoreadas (piezómetros, manantiales y aljibes), así como las aguas superficiales (reservorio artificial y corriente superficial), presentan una composición isotópica relativamente homogénea, con variaciones mínimas entre los distintos puntos de muestreo. Las concentraciones de oxígeno-18 oscilan entre -10,17‰ y -7,67‰, mientras que las de deuterio varían entre -66,37‰ y -52,15‰.

No obstante, se evidencia que algunos piezómetros presentan una firma isotópica ligeramente más empobrecida (BH-5M-08, PZR 13-09, PZR 13-05 y PZR 13-07), la mayoría de los cuales se encuentran captando unidades rocosas, lo que podría sugerir un origen distinto o una historia de flujo diferenciada con respecto al resto de los puntos analizados.

Por otro lado, las muestras de agua de lluvia presentan un enriquecimiento isotópico relativo en comparación con las aguas subterráneas y superficiales, con concentraciones de oxígeno-18 que varían entre -5,60‰ y -5,06‰, y de deuterio entre -23,46‰ y -18,91‰. Sin embargo, es relevante señalar que el totalizador 1 muestra una firma más empobrecida en comparación con los otros dos totalizadores, a pesar de ubicarse a una elevación inferior, lo que sugiere que este comportamiento no puede atribuirse al efecto altitudinal (dado que existe una relación lineal inversa entre el contenido isotópico del agua de lluvia y la altitud del sitio de precipitación).

Además, el exceso de deuterio en todas las muestras de los totalizadores es elevado, superando los 20‰, lo que podría indicar la contribución de masas de aire con distinta historia isotópica o la presencia de una fuente de vapor con características isotópicas específicas.

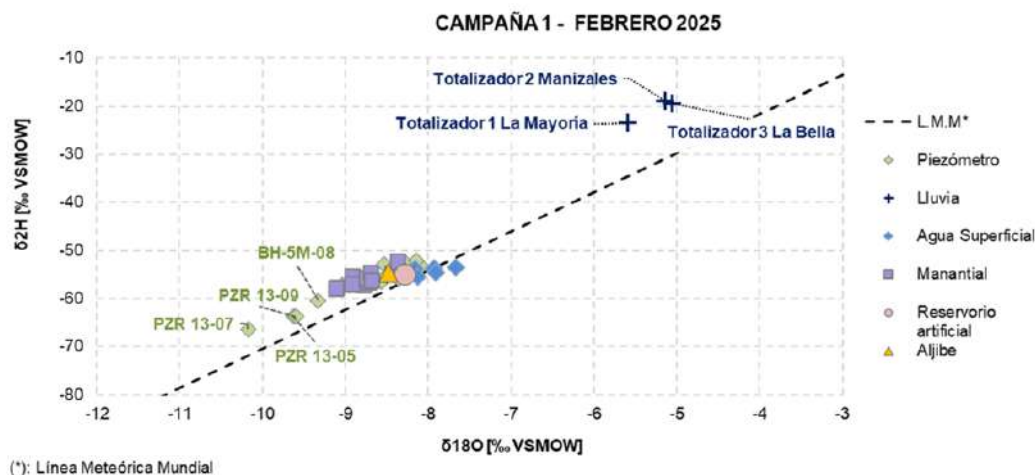


Figura 5.1.6.193 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio.
Campaña 1 - febrero de 2025

Fuente: SHI S.A.S (2025)

Tabla 5.1.6.89 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 1 febrero 2025

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado o en totalizadores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm 0.2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0.8\text{‰}$	
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	10/2/2025		-8,27	-55,19	10,98
Aljibe La Mayoría	Aljibe	10/2/2025		-8,48	-54,61	13,23
M18	Manantial	4/2/2025		-8,78	-57,07	13,19
M20	Manantial	4/2/2025		-8,91	-55,33	15,97
M87	Manantial	13/02/2025		-8,92	-56,97	14,36
M118	Manantial	12/2/2025		-8,72	-56,62	13,13
M121	Manantial	12/2/2025		-8,74	-55,66	14,29
M189	Manantial	13/02/2025		-8,70	-54,61	14,96
M242	Manantial	10/2/2025		-8,45	-54,77	12,80
M233	Manantial	9/2/2025		-8,37	-52,15	14,80
M100	Manantial	9/2/2025		-9,10	-57,66	15,17
M195	Manantial	Seco				
M215	Manantial	5/2/2025		-8,69	-56,26	13,25
M222	Manantial	11/2/2025		-9,11	-57,83	15,08
PZA12-03	Piezómetro	11/2/2025		-8,57	-56,56	11,97
PZA12-08	Piezómetro	7/2/2025		-8,08	-53,22	11,44
PZS12-12	Piezómetro	7/2/2025		-8,36	-55,88	10,96
PZS12-14	Piezómetro	14/02/2025		-8,29	-52,41	13,94
PZR 13-05	Piezómetro	14/02/2025		-9,62	-63,75	13,25
PZR 13-07	Piezómetro	18/02/2025		-10,17	-66,37	15,02
PZR 13-09	Piezómetro	12/2/2025		-9,60	-63,76	13,01
PZS 13-17	Piezómetro	10/2/2025		-8,50	-55,17	12,81
DH-FS-309	Piezómetro	20/02/2025		-9,04	-57,18	15,12
DH-FS-315	Piezómetro	13/02/2025		-8,14	-52,20	12,93
DH-TM-100	Piezómetro	18/02/2025		-8,69	-56,44	13,04
BH-5M-03	Piezómetro	19/02/2025		-8,95	-57,19	14,44
BH-5M-08	Piezómetro	19/02/2025		-9,33	-60,42	14,21
PZS 12-05	Piezómetro	14/02/2025		-8,80	-56,39	14,03
PZ4	Piezómetro	20/02/2025		-8,53	-52,94	15,30
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/02/2025	4,03	-5,60	-23,46	21,32
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/02/2025	3,75	-5,15	-18,91	22,27
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/02/2025	3,38	-5,06	-19,44	21,05
Quebrada Palestina	Agua Superficial	11/2/2025		-8,16	-53,81	11,50

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado en totalizadores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm 0.2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0.8\text{‰}$	
Quebrada Topacio	Agua Superficial	6/2/2025		-7,67	-53,54	7,83
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	7/2/2025		-8,12	-55,57	9,42
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	9/2/2025		-7,93	-53,69	9,77
Quebrada El Banco	Agua Superficial	6/2/2025		-7,91	-54,56	8,73

Fuente: SHI S.A.S (2025)

III. Resultados de Tritio

Los resultados de tritio de la primera campaña de monitoreo de 2025 son presentados en la Tabla 5.1.6.90. El agua recolectada en los totalizadores se encuentra en un rango de 1,4 UT a 1,9 U.T., que pueden considerarse dentro de los niveles normales típicos para el agua lluvia en la zona, atribuido a fuentes naturales y consistentes con las variaciones naturales que este parámetro puede experimentar en la atmósfera.

Por su parte, los resultados de tritio en el agua procedente de los puntos de agua subterránea indican un valor inferior al registrado en las precipitaciones en Colombia, el cual es aproximadamente 2,0 – 2,1 U.T. y, por consiguiente, no se observa un aumento en la concentración de tritio en comparación con la lluvia.

Tabla 5.1.6.90 Resultados de tritio campaña 1 febrero de 2025

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	10/2/2025	1,3 $\pm$ 0,2	0,15
Aljibe La Mayoría	Aljibe	10/2/2025	<0,4	<0,05
M18	Manantial	4/2/2025	1,4 $\pm$ 0,2	0,17
M20	Manantial	4/2/2025	1,8 $\pm$ 0,3	0,21
M87	Manantial	13/2/2025	0,9 $\pm$ 0,2	0,11
M118	Manantial	12/2/2025	1,0 $\pm$ 0,2	0,12
M121	Manantial	12/2/2025	0,9 $\pm$ 0,2	0,11
M189	Manantial	13/2/2025	1,5 $\pm$ 0,2	0,18
M242	Manantial	10/2/2025	1,9 $\pm$ 0,3	0,22
M233	Manantial	9/2/2025	2,2 $\pm$ 0,3	0,26
M100	Manantial	9/2/2025	0,7 $\pm$ 0,2	0,08
M195	Manantial	Seco		
M215	Manantial	5/2/2025	1,5 $\pm$ 0,2	0,18
M222	Manantial	11/2/2025	1,0 $\pm$ 0,2	0,12
PZA12-03	Piezómetro	11/2/2025	1,0 $\pm$ 0,2	0,12
PZA12-08	Piezómetro	7/2/2025	1,6 $\pm$ 0,2	0,19

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
PZS12-12	Piezómetro	7/2/2025	<0,4	<0,05
PZS12-14	Piezómetro	14/2/2025	1,2 ± 0,2	0,14
PZR 13-05	Piezómetro	14/2/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-07	Piezómetro	18/2/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-09	Piezómetro	12/2/2025	0,6 ± 0,2	0,07
PZS 13-17	Piezómetro	10/2/2025	1,1 ± 0,2	0,13
DH-FS-309	Piezómetro	20/2/2025	2,1 ± 0,2	0,25
DH-FS-315	Piezómetro	13/2/2025	2,1 ± 0,2	0,25
DH-TM-100	Piezómetro	18/2/2025	1,3 ± 0,2	0,15
BH-5M-03	Piezómetro	19/2/2025	<0,4	<0,05
BH-5M-08	Piezómetro	19/2/2025	<0,4	<0,05
PZS 12-05	Piezómetro	14/2/2025	1,3 ± 0,2	0,15
PZ4	Piezómetro	20/2/2025	0,9 ± 0,2	0,11
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/2/2025	1,4 ± 0,2	0,17
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/2/2025	1,4 ± 0,2	0,17
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/2/2025	1,9 ± 0,3	0,22
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	11/2/2025	1,1 ± 0,2	0,13
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	6/2/2025	1,6 ± 0,2	0,19
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	7/2/2025	0,6 ± 0,2	0,07
Quebrada El Balsal	Drenaje superficial	9/2/2025	0,8 ± 0,2	0,09
Quebrada El Banco	Drenaje superficial	6/2/2025	1,1 ± 0,2	0,13

U.T.: Unidades de tritio [Bq/dm³]: becquerel por decímetro cúbico.

Fuente: SHI S.A.S (2025)

b. Campaña 2 marzo (2025)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo para esta campaña se reportan en el subcapítulo 5.1.6.4.1, ya que son los mismos utilizados en los análisis de las campañas de hidroquímica de 2025.

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Durante la segunda campaña del muestreo isotópico que se realizó entre el 10 de marzo de 2025 a el 16 de marzo de 2025, en esta campaña se monitorearon 36 puntos (M195 estaba seco) en los que se encuentran agua superficial, agua subterránea y agua lluvia. Los resultados de la segunda campaña de monitoreo de deuterio y oxígeno -18 se presentan en la Tabla 5.1.6.91 y en la Figura 5.1.6.194.

Al igual que en la primera campaña, se observa que las distintas fuentes de agua subterránea monitoreadas (piezómetros, manantiales y aljibes), así como las aguas superficiales (reservorio artificial y drenaje superficial), presentan una composición isotópica similar. En esta campaña, la concentración de oxígeno-18 varía entre -9,92‰ y -7,81‰, mientras que la de deuterio oscila entre -66,48‰ y -50,83‰.

Se mantiene la tendencia en la que algunos piezómetros, principalmente aquellos que captan unidades rocosas, presentan una firma isotópica ligeramente más empobrecida. Esto sugiere posibles diferencias en el origen del flujo con respecto al resto de los puntos analizados. Dicho comportamiento se ha identificado en los piezómetros PZR 13-09, PZR 13-05 y PZR 13-07, los cuales en la campaña anterior también mostraron esta característica. Adicionalmente, en esta campaña, el piezómetro BH-5M-03 también registra una ligera tendencia hacia valores más empobrecidos.

En cuanto a las aguas superficiales, se evidencia que la firma isotópica de los drenajes superficiales y del reservorio artificial es muy semejante entre sí, lo que indica que ambos tipos de agua responden de manera homogénea a los procesos hidrológicos en la zona y puede sugerir que el reservorio artificial mantiene una estrecha conexión con los drenajes superficiales.

Por otro lado, las aguas lluvias recolectadas en los totalizadores evidencian un enriquecimiento isotópico relativo en comparación con las aguas subterráneas y superficiales, así como con la firma isotópica observada en la primera campaña. Las concentraciones de oxígeno-18 en la precipitación oscilan entre -2,48‰ y -2,26‰, mientras que las de deuterio varían entre -5,55‰ y -4,13‰. Esta diferencia entre campañas puede estar asociada al efecto de cantidad, dado que se espera un mayor enriquecimiento isotópico en eventos de menor volumen de precipitación.

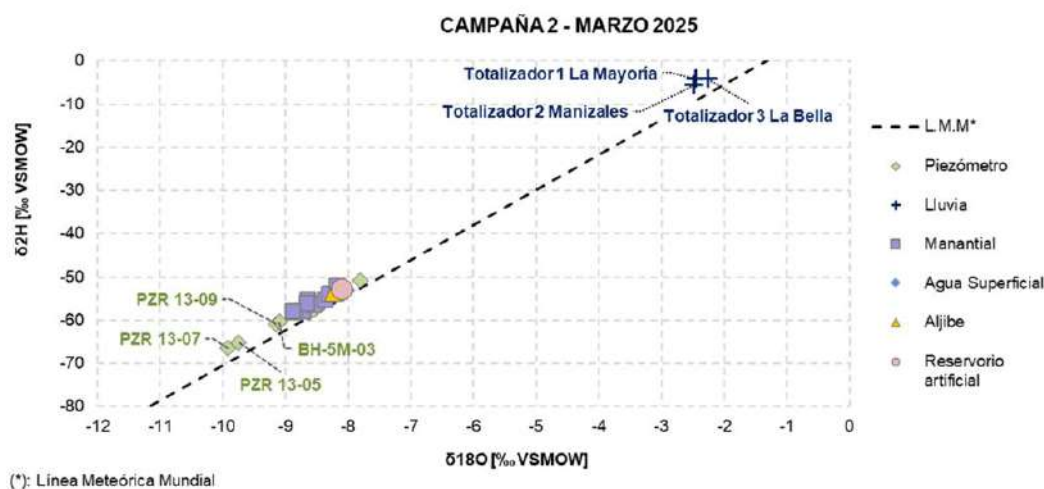


Figura 5.1.6.194 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio.
Campaña 2 - marzo de 2025

Fuente: SHI S.A.S (2025)

Tabla 5.1.6.91 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 2 marzo 2025

Punto	Tipo	Fecha	recolecta do en totalizad ores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm 0.2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0.8\text{‰}$	
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	11/03/2025		-8,08	-53,03	11,61
Aljibe La Mayoría	Aljibe	11/03/2025		-8,22	-53,44	12,32
M18	Manantial	11/03/2025		-8,72	-57,74	12,02
M20	Manantial	11/03/2025		-8,65	-55,11	14,09
M87	Manantial	16/03/2025		-8,63	-56,04	13,00
M118	Manantial	14/03/2025		-8,55	-56,42	11,98
M121	Manantial	14/03/2025		-8,37	-55,18	11,78
M189	Manantial	15/03/2025		-8,29	-53,74	12,58
M242	Manantial	13/03/2025		-8,32	-54,03	12,53
M233	Manantial	13/03/2025		-8,19	-51,87	13,65
M100	Manantial	14/03/2025		-8,88	-58,05	12,99
M195	Manantial	15/03/2025		-8,85	-58,07	12,73
M215	Manantial	11/03/2025		-8,67	-55,97	13,39
M222	Manantial	15/03/2025		-8,89	-57,74	13,38
PZA12-03	Piezómetro	10/03/2025		-8,42	-56,37	10,99
PZA12-08	Piezómetro	10/03/2025		-8,11	-52,70	12,18
PZS12-12	Piezómetro	10/03/2025		-8,63	-58,32	10,72
PZS12-14	Piezómetro	23/03/2025		-8,11	-53,39	11,49
PZR 13-05	Piezómetro	10/03/2025		-9,75	-65,15	12,85
PZR 13-07	Piezómetro	13/03/2025		-9,92	-66,48	12,88
PZR 13-09	Piezómetro	13/03/2025		-9,15	-60,89	12,31
PZS 13-17	Piezómetro	15/03/2025		-8,47	-55,59	12,17
DH-FS-309	Piezómetro	15/03/2025		-8,57	-55,42	13,14
DH-FS-315	Piezómetro	13/03/2025		-7,81	-50,83	11,65
DH-TM-100	Piezómetro	13/03/2025		-8,50	-57,01	10,99
BH-5M-03	Piezómetro	14/03/2025		-9,10	-60,43	12,37
BH-5M-08	Piezómetro	14/03/2025		-8,55	-57,54	10,86
PZS 12-05	Piezómetro	15/03/2025		-8,34	-54,65	12,07
PZ4	Piezómetro	15/03/2025		-8,05	-52,78	11,62
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/03/2025	3,30	-2,46	-4,15	15,53
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/03/2025	3,70	-2,48	-5,55	14,29
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/03/2025	2,70	-2,26	-4,13	13,95
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	15/03/2025		-8,10	-52,91	11,89

Punto	Tipo	Fecha	recolecta do en totalizad ores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm 0.2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0.8\text{‰}$	
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	10/03/2025		-8,06	-52,79	11,69
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	10/03/2025		-8,16	-53,03	12,25
Quebrada El Balsal	Drenaje superficial	13/03/2025		-8,03	-53,14	11,10
Quebrada El Banco	Drenaje superficial	11/03/2025		-8,14	-52,31	12,81

Fuente: SHI S.A.S (2025)

III. Resultados de Tritio

Los resultados de tritio de la segunda campaña de monitoreo, realizada en marzo de 2025, son presentados en la Tabla 5.1.6.92.

Los resultados de tritio obtenidos sugieren que la mayoría de las aguas subterráneas analizadas corresponden a aguas jóvenes, es decir, recargadas en las últimas décadas. Las concentraciones oscilan mayoritariamente entre 1,0 y 2,3 unidades de tritio (U.T.), lo cual es coherente con valores típicos de la precipitación reciente en Colombia. Sin embargo, algunos puntos como los piezómetros PZR 13-05, PZR 13-07, PZR 13-09 y PZS12-12, muestran concentraciones por debajo del límite de detección, lo que podría reflejar tiempos de residencia más prolongados o una desconexión con la recarga reciente.

En cuanto a las muestras de agua lluvia, los valores de tritio registrados en los totalizadores 1 (2,4 U.T.) y 3 (1,3 U.T.) se consideran consistentes con los niveles esperados para la precipitación en Colombia y en el área de influencia. Sin embargo, en el totalizador 2 se registra un valor por debajo del límite de detección ($<0,4$ UT), lo que resulta inusual. A manera de hipótesis se tiene que, en algunas ocasiones, eventos de lluvia intensa pueden dar lugar a concentraciones de tritio muy bajas debido a un lavado atmosférico eficiente, especialmente si la lluvia ha sido prolongada o muy local.

Tabla 5.1.6.92 Resultados de tritio campaña 2 Marzo de 2025

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	11/03/2025	$1,5 \pm 0,2$	0,18
Aljibe La Mayoría	Aljibe	11/03/2025	$2,1 \pm 0,2$	0,25
M18	Manantial	11/03/2025	$1,4 \pm 0,2$	0,17
M20	Manantial	11/03/2025	$1,7 \pm 0,2$	0,2
M87	Manantial	16/03/2025	$1,1 \pm 0,2$	0,13
M118	Manantial	14/03/2025	$<0,4$	$<0,05$
M121	Manantial	14/03/2025	$1,0 \pm 0,2$	0,12

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
M189	Manantial	15/03/2025	1,8 ± 0,2	0,21
M242	Manantial	13/03/2025	1,1 ± 0,2	0,13
M233	Manantial	13/03/2025	0,5 ± 0,2	0,06
M100	Manantial	14/03/2025	2,3 ± 0,3	0,27
M195	Manantial	12/03/2025	1,4 ± 0,2	0,17
M215	Manantial	11/03/2025	2,1 ± 0,2	0,25
M222	Manantial	15/03/2025	0,8 ± 0,2	0,09
PZA12-03	Piezómetro	10/03/2025	1,3 ± 0,2	0,15
PZA12-08	Piezómetro	10/03/2025	1,5 ± 0,2	0,18
PZS12-12	Piezómetro	10/03/2025	<0,4	<0,05
PZS12-14	Piezómetro	12/03/2025	1,1 ± 0,2	0,13
PZR 13-05	Piezómetro	12/03/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-07	Piezómetro	13/03/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-09	Piezómetro	13/03/2025	<0,4	<0,05
PZS 13-17	Piezómetro	12/03/2025	2,0 ± 0,2	0,24
DH-FS-309	Piezómetro	15/03/2025	1,2 ± 0,2	0,14
DH-FS-315	Piezómetro	15/03/2025	1,5 ± 0,3	0,18
DH-TM-100	Piezómetro	13/03/2025	1,2 ± 0,2	0,14
BH-5M-03	Piezómetro	14/03/2025	0,6 ± 0,2	0,07
BH-5M-08	Piezómetro	14/03/2025	1,2 ± 0,2	0,14
PZS 12-05	Piezómetro	15/03/2025	2,7 ± 0,2	0,32
PZ4	Piezómetro	15/03/2025	0,9 ± 0,2	0,11
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/03/2025	2,4 ± 0,2	0,28
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/03/2025	<0,4	<0,05
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/03/2025	1,3 ± 0,2	0,15
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	15/03/2025	0,7± 0,2	0,08
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	10/03/2025	1,9 ± 0,2	0,22
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	10/03/2025	<0,4	<0,05
Quebrada El Balsal	Drenaje superficial	13/03/2025	0,7± 0,2	0,08
Quebrada El Banco	Drenaje superficial	12/03/2025	1,6 ± 0,2	0,19

U.T.: Unidades de tritio [Bq/dm³]: becquerel por decímetro cúbico.

Fuente: SHI S.A.S (2025)

c. Campaña 3 abril (2025)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo para esta campaña se reportan en el subcapítulo 5.1.6.4.1, ya que son los mismos utilizados en los análisis de las campañas de hidroquímica de 2025.

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Entre el 23 y el 29 de abril de 2025 se llevó a cabo la tercera campaña de muestreo isotópico, durante la cual se evaluaron 35 puntos, que abarcan fuentes de agua superficial, subterránea y precipitación; como se mencionó anteriormente el totalizador 2 se encontraba fuera de su posición y sin agua, lo que indica posible manipulación o saqueo y en el punto M195 no se detectó flujo de agua. Los datos obtenidos en esta etapa, relacionados con las concentraciones de deuterio y oxígeno-18, se resumen en la Tabla 5.1.6.93 y se ilustran en la Figura 5.1.6.195.

De forma semejante a las campañas previas, se observa que las distintas fuentes de agua subterránea monitoreadas (piezómetros, manantiales y aljibes), así como las aguas superficiales (reservorio artificial y drenaje superficial), presentan una composición isotópica similar. En esta campaña, la concentración de oxígeno-18 varía entre -9,95‰ y -7,55‰, mientras que la de deuterio oscila entre -67,08‰ y -50,04‰.

Los piezómetros PZR 13-09, PZR 13-05 y PZR 13-07 continúan mostrando una tendencia hacia una firma isotópica ligeramente más empobrecida, lo que, como se ha señalado previamente, podría indicar diferencias en el origen del flujo en comparación con los demás puntos evaluados.

Por otro lado, las muestras de agua lluvia recolectadas en los totalizadores revelan un empobrecimiento isotópico relativo respecto a las precipitaciones registradas en campañas anteriores. Las concentraciones de oxígeno-18 en estas muestras se sitúan entre -7,59‰ y -7,23‰, mientras que las de deuterio varían entre -47,62‰ y -45,65‰. Esta variación entre campañas podría estar relacionada con el efecto cantidad, dado que eventos de mayor volumen tienden a presentar una menor concentración de isótopos pesados.

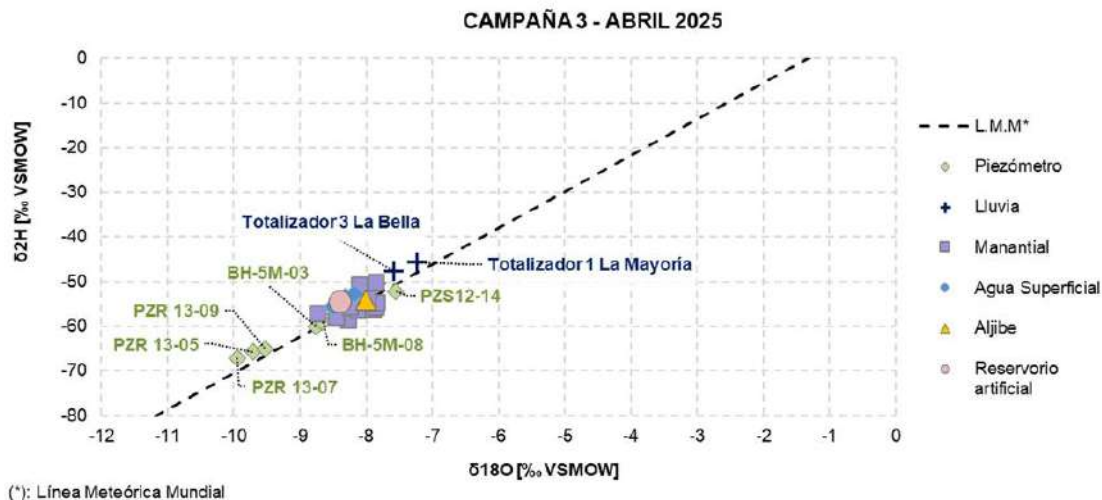


Figura 5.1.6.195 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio.
Campaña 3 - abril de 2025

Fuente: SHI S.A.S (2025)

Tabla 5.1.6.93 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 3 abril (2025)

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado en totalizadores (l)	δ ¹⁸ O	δ ² H	Exceso de deuterio
				VSMOW ± 0.2‰	VSMOW ± 0.8‰	
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	23/4/2025		-8,37	-54,78	12,19
Aljibe La Mayoría	Aljibe	23/4/2025		-8,00	-54,18	9,81
M18	Manantial	23/4/2025		-8,27	-58,64	7,50
M20	Manantial	23/4/2025		-8,13	-56,28	8,73
M87	Manantial	24/4/2025		-8,74	-57,19	12,74
M118	Manantial	27/4/2025		-7,89	-56,02	7,13
M121	Manantial	27/4/2025		-7,85	-55,59	7,21
M189	Manantial	27/4/2025		-7,85	-54,65	8,13
M242	Manantial	26/4/2025		-7,85	-50,04	12,79
M233	Manantial	27/4/2025		-8,11	-50,75	14,14

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado en totalizadores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm 0.2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0.8\text{‰}$	
M100	Manantial	26/4/2025		-8,45	-57,95	9,68
M195	Manantial	Seco				
M215	Manantial	25/4/2025		-7,98	-53,74	10,11
M222	Manantial	29/4/2025		-8,25	-55,72	10,30
PZA12-03	Piezómetro	28/4/2025		-8,34	-56,78	9,97
PZA12-08	Piezómetro	28/4/2025		-7,90	-51,14	12,08
PZS12-12	Piezómetro	28/4/2025		-8,64	-58,14	10,99
PZS12-14	Piezómetro	28/4/2025		-7,55	-52,20	8,19
PZR 13-05	Piezómetro	28/4/2025		-9,71	-65,71	11,99
PZR 13-07	Piezómetro	28/4/2025		-9,95	-67,08	12,52
PZR 13-09	Piezómetro	28/4/2025		-9,53	-65,06	11,18
PZS 13-17	Piezómetro	28/4/2025		-8,23	-56,25	9,63
DH-FS-309	Piezómetro	29/4/2025		-8,44	-56,50	11,00
DH-FS-315	Piezómetro	28/4/2025		-7,83	-50,43	12,18
DH-TM-100	Piezómetro	28/4/2025		-8,07	-52,96	11,58
BH-5M-03	Piezómetro	29/4/2025		-8,76	-60,09	9,98
BH-5M-08	Piezómetro	29/4/2025		-8,66	-59,00	10,25
PZS 12-05	Piezómetro	28/4/2025		-8,37	-55,44	11,55
PZ4	Piezómetro	29/4/2025		-8,27	-53,58	12,54
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	24/4/2025	12,0	-7,23	-45,65	12,18
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	Manipulado				
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	24/4/2025	12,15	-7,59	-47,62	13,09

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado en totalizadores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm 0.2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0.8\text{‰}$	
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	25/4/2025		-8,31	-53,48	13,02
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	23/4/2025		-8,49	-55,68	12,25
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	25/4/2025		-8,42	-54,07	13,27
Quebrada El Balsal	Drenaje superficial	27/4/2025		-8,15	-52,80	12,41
Quebrada El Banco	Drenaje superficial	26/4/2025		-8,18	-52,66	12,76

Fuente: SHI S.A.S (2025)

III. Resultados de Tritio

Los resultados de tritio de la tercera campaña de monitoreo de 2025 son presentados en la Tabla 5.1.6.94. El agua recolectada en los totalizadores muestra concentraciones de 1,1 U.T. en el totalizador 1 La Mayoría y 2,1 U.T. en el totalizador 3 La Bella, los cuales se encuentran dentro del rango esperado para la precipitación reciente en Colombia.

En contraste, la mayoría de los puntos de agua subterránea presentan concentraciones de tritio iguales o inferiores a las de la lluvia actual, lo cual es coherente con aguas de recarga reciente, como se ha mencionado anteriormente. En esta campaña también se observa que algunos piezómetros (PZR 13-05 y PZR 13-07) siguen presentando valores por debajo del límite de detección, lo que refuerza la idea de que las aguas provienen de un sistema de flujo más profundo o aislado de la recarga reciente. Sin embargo, esta afirmación es preliminar y debe ser tomada con precaución debido a que la interpretación basada en concentraciones de tritio puede estar sujeta a altas incertidumbres y esta hipótesis debe ser complementado y contrastada con otros análisis.

Adicionalmente, el manantial M233 presenta un valor de $5,2 \pm 0,3$ U.T., significativamente más alto que el tritio atmosférico actual y que el registrado en febrero ($2,2$ U.T.) y en marzo ($0,5$ U.T.) del mismo año. Este valor no puede explicarse por recarga directa de lluvia actual y sugiere un error analítico. Actualmente, este dato está siendo verificado por el laboratorio.

Tabla 5.1.6.94 Resultados de tritio campaña 3 abril de 2025

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	23/4/2025	<0,4	<0,05
Aljibe La Mayoría	Aljibe	23/4/2025	$1,9 \pm 0,2$	0,22
M18	Manantial	23/4/2025	$1,1 \pm 0,2$	0,13
M20	Manantial	23/4/2025	$0,8 \pm 0,2$	0,09
M87	Manantial	24/4/2025	$1,4 \pm 0,2$	0,17
M118	Manantial	27/4/2025	<0,4	<0,05

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
M121	Manantial	27/4/2025	1,7± 0,2	0,2
M189	Manantial	27/4/2025	2,3± 0,2	0,27
M242	Manantial	26/4/2025	1,2± 0,2	0,14
M233	Manantial	27/4/2025	5,2± 0,3	0,61
M100	Manantial	26/4/2025	2,0± 0,2	0,24
M195	Manantial	Seco		
M215	Manantial	25/4/2025	1,8± 0,2	0,33
M222	Manantial	29/4/2025	2,8± 0,2	0,27
PZA12-03	Piezómetro	28/4/2025	0,8± 0,2	0,09
PZA12-08	Piezómetro	28/4/2025	1,5± 0,2	0,18
PZS12-12	Piezómetro	28/4/2025	0,4± 0,2	0,05
PZS12-14	Piezómetro	28/4/2025	1,6± 0,2	0,19
PZR 13-05	Piezómetro	28/4/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-07	Piezómetro	28/4/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-09	Piezómetro	28/4/2025	0,7± 0,2	0,08
PZS 13-17	Piezómetro	28/4/2025	1,5± 0,2	0,18
DH-FS-309	Piezómetro	29/4/2025	1,2± 0,2	0,14
DH-FS-315	Piezómetro	28/4/2025	1,5± 0,2	0,18
DH-TM-100	Piezómetro	28/4/2025	1,4± 0,2	0,17
BH-5M-03	Piezómetro	29/4/2025	1,3± 0,2	0,15
BH-5M-08	Piezómetro	29/4/2025	0,8± 0,2	0,09
PZS 12-05	Piezómetro	28/4/2025	<0,4	<0,05
PZ4	Piezómetro	29/4/2025	1,0± 0,2	0,12
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	24/4/2025	1,1± 0,2	0,13
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	Manipulado		
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	24/4/2025	2,1± 0,3	0,25
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	25/4/2025	1,2± 0,2	0,14
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	23/4/2025	1,1± 0,2	0,13
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	25/4/2025	0,9± 0,2	0,11
Quebrada El Balsal	Drenaje superficial	27/4/2025	1,4± 0,2	0,17
Quebrada El Banco	Drenaje superficial	26/4/2025	0,9± 0,2	0,11

U.T.: Unidades de tritio [Bq/dm³]: becquerel por decímetro cúbico

Fuente: SHI S.A.S (2025)

d. Campaña 4 mayo (2025)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo para esta campaña se reportan en el subcapítulo 5.1.6.4.1 ya que son los mismos utilizados en los análisis de las campañas de hidroquímica de 2025.

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Entre el 04 y el 20 de mayo de 2025 se llevó a cabo la cuarta campaña de muestreo isotópico, durante la cual se monitorearon 36 puntos, debido a que el manantial M195 no presentaba flujo de agua al momento de la visita. Los datos obtenidos en esta campaña para las concentraciones de deuterio y oxígeno-18 se resumen en la Tabla 5.1.6.95 y se ilustran en la Figura 5.1.6.196.

De forma semejante a las campañas previas, se observa que las distintas fuentes de agua subterránea monitoreadas (piezómetros, manantiales y aljibes), así como las aguas superficiales (reservorio artificial y drenaje superficial), presentan una composición isotópica similar. En esta campaña, la concentración de oxígeno-18 varía entre $-11,14\text{‰}$ y $-6,95\text{‰}$, mientras que la de deuterio oscila entre $-79,58\text{‰}$ y $-45,67\text{‰}$, lo que evidencia una señal isotópica relativamente homogénea en el sistema, con ligeras variaciones que pueden estar asociadas a diferencias en la altitud de recarga, trayectoria del flujo subterráneo o grado de interacción con agua superficial.

Por su parte, las muestras de agua lluvia recolectadas en los totalizadores revelan un empobrecimiento isotópico relativo respecto a las precipitaciones analizadas en campañas anteriores. Las concentraciones de oxígeno-18 en esta campaña registran valores entre $-14,84\text{‰}$ y $-13,81\text{‰}$, mientras que las de deuterio varían entre $-109,22\text{‰}$ y $-101,65\text{‰}$. Esta variación entre campañas no es lo esperado al considerar únicamente el efecto de cantidad, dado que en la campaña previa se recolectó un mayor volumen de precipitación, y los eventos de mayor magnitud suelen presentar una señal isotópica más empobrecida. Sin embargo, este empobrecimiento puede tener diversas causas, entre ellas, que la precipitación registrada provenga de una masa de aire más empobrecida en isótopos pesados, que esté asociada a condiciones atmosféricas más frías, o que exista un mayor componente de humedad reciclada a nivel local, lo que puede alterar la señal isotópica de la lluvia.

Cabe destacar que el totalizador 1 es el que presenta la firma isotópica menos empobrecida entre los tres totalizadores analizados. Este comportamiento puede atribuirse al efecto de altitud, ya que las precipitaciones a menores elevaciones suelen mostrar concentraciones más altas de isótopos pesados. Además, se observa que el manantial M233 y la quebrada El Balsal presentan una firma isotópica ligeramente más empobrecida que el resto de los puntos de agua subterránea o superficial, lo que podría indicar una mayor conexión con agua de recarga reciente.

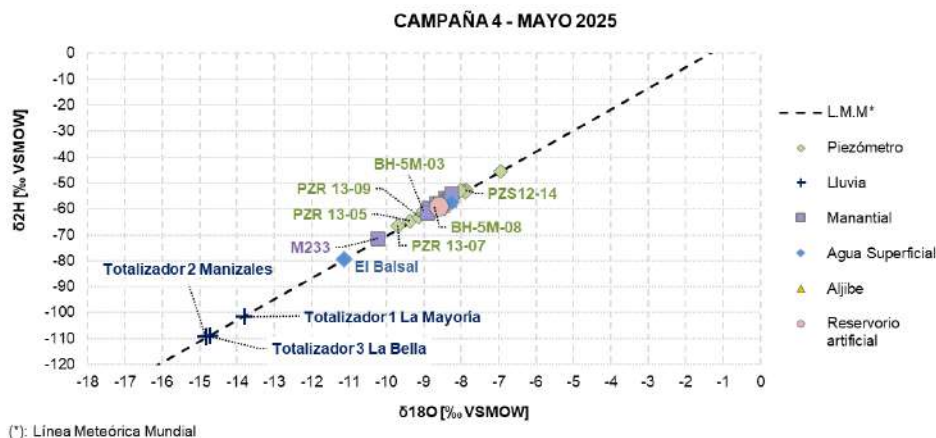


Figura 5.1.6.196 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio.
Campaña 4 - abril de 2025

Fuente: SHI S.A.S (2025)

Tabla 5.1.6.95 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 4 abril (2025)

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado o en totalizadores (l)	δ ¹⁸ O	δ ² H	Exceso de deuterio
				VSMOW ± 0.2‰	VSMOW ± 0.8‰	
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	12/5/2025		-8,58	-59,45	9,16
Aljibe La Mayoría	Aljibe	12/5/2025		-8,54	-57,88	10,44
M18	Manantial	5/5/2025		-8,86	-59,53	11,36
M20	Manantial	5/5/2025		-8,45	-55,93	11,64
M87	Manantial	19/5/2025		-8,90	-61,54	9,67
M118	Manantial	14/5/2025		-8,32	-56,55	10,04
M121	Manantial	13/5/2025		-8,31	-55,92	10,56
M189	Manantial	15/5/2025		-8,62	-58,73	10,25
M242	Manantial	9/5/2025		-8,26	-54,28	11,76
M233	Manantial	19/5/2025		-10,23	-71,45	10,35
M100	Manantial	18/5/2025		-8,67	-57,62	11,70
M195	Manantial	Seco				
M215	Manantial	6/5/2025		-8,26	-54,14	11,98
M222	Manantial	16/5/2025		-8,59	-58,31	10,45
PZA12-03	Piezómetro	7/5/2025		-8,35	-56,91	9,88
PZA12-08	Piezómetro	4/5/2025		-6,95	-45,67	9,92
PZS12-12	Piezómetro	4/5/2025		-8,32	-57,47	9,09
PZS12-14	Piezómetro	12/5/2025		-7,87	-52,77	10,21

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado en totalizadores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm 0.2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0.8\text{‰}$	
PZR 13-05	Piezómetro	11/5/2025		-9,38	-64,59	10,41
PZR 13-07	Piezómetro	11/5/2025		-9,70	-66,43	11,17
PZR 13-09	Piezómetro	7/5/2025		-9,13	-63,12	9,89
PZS 13-17	Piezómetro	11/5/2025		-8,16	-55,11	10,19
DH-FS-309	Piezómetro	16/5/2025		-8,48	-56,56	11,25
DH-FS-315	Piezómetro	18/5/2025		-7,94	-53,01	10,53
DH-TM-100	Piezómetro	4/5/2025		-7,90	-53,65	9,52
BH-5M-03	Piezómetro	13/5/2025		-9,00	-60,74	11,30
BH-5M-08	Piezómetro	14/5/2025		-8,72	-59,27	10,52
PZS 12-05	Piezómetro	13/5/2025		-8,19	-55,26	10,28
PZ4	Piezómetro	15/5/2025		-8,01	-53,07	11,00
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	20/5/2025	7,7	-13,81	-101,65	8,81
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	20/5/2025	7,0	-14,84	-109,22	9,50
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	20/5/2025	7,7	-14,73	-109,13	8,69
Quebrada Palestina	Agua Superficial	5/5/2025		-8,43	-58,39	9,08
Quebrada Topacio	Agua Superficial	6/5/2025		-8,45	-59,49	8,09
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	8/5/2025		-8,47	-58,63	9,13
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	19/5/2025		-11,14	-79,58	9,53
Quebrada El Banco	Agua Superficial	9/5/2025		-8,26	-57,52	8,57

Fuente: SHI S.A.S (2025)

III. Resultados de Tritio

Los resultados de tritio de la cuarta campaña de monitoreo de 2025 son presentados en la Tabla 5.1.6.96. El agua recolectada en los totalizadores muestra concentraciones de 0,6 U.T. en el totalizador 1 La Mayoría y 1,2 U.T. en el totalizador 2 Manizales, los cuales se encuentran dentro del rango esperado para la precipitación reciente en Colombia.

Respecto al agua subterránea, los valores de tritio presentan un rango de variación amplio, desde niveles por debajo del límite de detección ($<0,4$ UT en puntos como el aljibe La Mayoría, PZR 13-05, PZR 13-07 y PZS 12-05), hasta concentraciones relativamente altas como en DH-TM-100 (1,8 U.T.).

Como se ha observado en campañas previas, la concentración registrada en los piezómetros PZR 13-05 y PZR 13-07 podría indicar aguas con mayor tiempo de residencia,

con un flujo aislado de la recarga reciente. En contraste, los valores más altos pueden ser asociados a recarga relativamente reciente, lo que indica una conexión más activa con la zona de infiltración.

Tabla 5.1.6.96 Resultados de tritio campaña 4. mayo de 2025

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	12/5/2025	0,9 ± 0,2	0,11
Aljibe La Mayoría	Aljibe	12/5/2025	<0,4	<0,05
M18	Manantial	5/5/2025	0,6 ± 0,2	0,07
M20	Manantial	5/5/2025	0,7 ± 0,1	0,08
M87	Manantial	19/5/2025	1,1 ± 0,2	0,13
M118	Manantial	14/5/2025	0,6 ± 0,2	0,07
M121	Manantial	13/5/2025	0,9 ± 0,2	0,11
M189	Manantial	15/5/2025	1,2 ± 0,2	0,14
M242	Manantial	9/5/2025	0,8 ± 0,2	0,09
M233	Manantial	19/5/2025	1,5 ± 0,2	0,18
M100	Manantial	18/5/2025	1,2 ± 0,2	0,14
M195	Manantial	Seco		
M215	Manantial	6/5/2025	1,2 ± 0,2	0,14
M222	Manantial	16/5/2025	1,0 ± 0,2	0,12
PZA12-03	Piezómetro	7/5/2025	0,8 ± 0,2	0,09
PZA12-08	Piezómetro	4/5/2025	1,6 ± 0,2	0,19
PZS12-12	Piezómetro	4/5/2025	0,6 ± 0,2	0,07
PZS12-14	Piezómetro	12/5/2025	1,1 ± 0,2	0,13
PZR 13-05	Piezómetro	11/5/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-07	Piezómetro	11/5/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-09	Piezómetro	7/5/2025	1,2 ± 0,2	0,14
PZS 13-17	Piezómetro	11/5/2025	1,6 ± 0,2	0,19
DH-FS-309	Piezómetro	16/5/2025	1,6 ± 0,2	0,19
DH-FS-315	Piezómetro	18/5/2025	1,1 ± 0,2	0,13
DH-TM-100	Piezómetro	4/5/2025	1,8 ± 0,2	0,21
BH-5M-03	Piezómetro	13/5/2025	1,1 ± 0,2	0,13
BH-5M-08	Piezómetro	14/5/2025	0,7 ± 0,1	0,08
PZS 12-05	Piezómetro	13/5/2025	<0,4	<0,05
PZ4	Piezómetro	15/05/2025	1,3 ± 0,2	0,15
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	20/5/2025	0,6 ± 0,2	0,07
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	20/5/2025	1,2 ± 0,2	0,14
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	20/5/2025	1,0 ± 0,2	0,12
Palestina	Drenaje superficial	5/5/2025	0,5 ± 0,1	0,06
Topacio	Drenaje superficial	6/5/2025	1,3 ± 0,2	0,15
San Antonio	Drenaje superficial	8/5/2025	0,6 ± 0,2	0,07
El Balsal	Drenaje superficial	19/5/2025	1,8 ± 0,2	0,21
El Banco	Drenaje superficial	9/5/2025	1,5 ± 0,2	0,18

[U.T.: Unidades de tritio [Bq/dm³]: becquerel por decímetro cúbico.
Fuente: SHI S.A.S (2025)

En la Figura 5.1.6.197 se presenta la concentración de tritio registrada en el agua lluvia en las campañas de monitoreo ejecutadas en el año 2025. Como se ha mencionado previamente, los valores de tritio registrados en los totalizadores se mantienen dentro del rango esperado para precipitaciones recientes en Colombia, el cual generalmente no supera las 2,3 U.T. Estos resultados reflejan las condiciones atmosféricas actuales y no evidencian influencia de fuentes externas o no naturales de tritio.

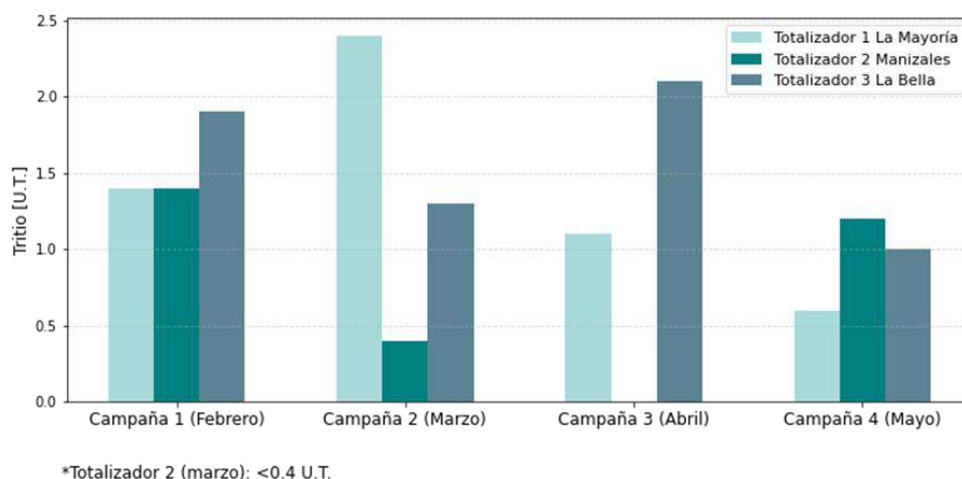


Figura 5.1.6.197 Concentración de tritio en el agua lluvia en campañas de 2025

Fuente: SHI S.A.S (2025)

I. Conclusiones de la evaluación isotópica para las campañas de 2025

Los valores de temperatura y pH se mantienen dentro de los rangos típicos para aguas subterráneas y superficiales en el área de influencia. Particularmente, el pH indica aguas que varían entre ligeramente ácidas a ligeramente alcalinas, sin evidencias claras de procesos intensos de acidificación.

Los valores de conductividad eléctrica registrados indican un grado de mineralización que varía entre bajo y moderado en la mayoría de los puntos monitoreados. Como es esperado, los totalizadores presentan las conductividades eléctricas más bajas (< 40 μ S/cm), reflejando la baja concentración de solutos disueltos típica de la precipitación.

En manantiales y piezómetros, los valores se sitúan en rangos similares; no obstante, en términos generales, los piezómetros tienden a mostrar valores ligeramente más altos. Esta diferencia sutil sugiere una mayor interacción agua-roca y tiempos de residencia algo más prolongados en el sistema subterráneo. Sin embargo, algunos piezómetros ubicados generalmente en depósitos aluviales o saprolito, se caracterizan por presentar

conductividades eléctricas bajas ($<150 \mu\text{S/cm}$), semejantes a las observadas en manantiales, lo que sugiere recarga reciente y tiempos de tránsito reducidos.

La composición isotópica del agua en los distintos puntos monitoreados evidenciada en las cuatro primeras campañas de monitoreo es relativamente homogénea, con ligeras variaciones entre fuentes subterráneas y superficiales. Las aguas subterráneas presentan valores similares de oxígeno-18 y deuterio, aunque algunos piezómetros (PZR 13-09, PZR 13-05 y PZR 13-07) muestran una firma isotópica más empobrecida, lo que puede sugerir que estas aguas provienen de un sistema de flujo más profundo o aislado de la recarga reciente.

Por su parte, a lo largo de las distintas campañas de muestreo isotópico, el agua lluvia ha mostrado un comportamiento generalmente coherente con el efecto de cantidad, es decir, una relación inversa entre el volumen de precipitación y la concentración de isótopos pesados (oxígeno-18 y deuterio).

En general, el comportamiento del tritio en las diferentes campañas de monitoreo puede indicar que la mayoría de las aguas subterráneas monitoreadas en el área de influencia corresponden a aguas jóvenes, con influencia de recarga reciente. Sin embargo, valores más bajos, por debajo del límite de detección, observados principalmente en algunos piezómetros, sugieren la posible existencia de flujos más antiguos, más profundos o con menor conexión a las zonas de recarga.

Por su parte, las aguas lluvia recolectadas en los totalizadores generalmente responden a la variabilidad natural del tritio atmosférico.

5.1.6.4.5 Análisis de parámetros de campo

En el marco de las actividades de monitoreo hidroquímico e isotópico se ha llevado a cabo la medición in situ de parámetros fisicoquímicos en los puntos de agua de interés. Adicionalmente, estos parámetros también fueron medidos en seis campañas de monitoreo de niveles piezométricos realizadas por SHI S.A.S.

Durante cada visita se registraron parámetros como temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, entre otros, utilizando equipos multiparamétricos debidamente calibrados. El desarrollo sistemático de estas campañas ha permitido construir una línea base robusta y detectar posibles variaciones espaciotemporales asociadas a factores naturales y/o antrópicos (SHI SAS, 2026).

A continuación, se presenta el análisis integrado de los resultados obtenidos para los puntos de agua subterránea (manantiales y piezómetros), con el fin de identificar tendencias, establecer comparaciones entre campañas y zonas, y generar conclusiones técnicas que aporten a la toma de decisiones en materia de gestión ambiental (SHI SAS, 2026).

A. Análisis de parámetros en piezómetros

El monitoreo de los parámetros fisicoquímicos en los piezómetros se llevó a cabo entre los meses de febrero y mayo de 2025, mediante la ejecución de seis campañas de campo. En total, se evaluaron 15 piezómetros distribuidos espacialmente en el área de influencia del proyecto. A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante diagramas de

caja y bigotes, los cuales permiten identificar la distribución, tendencia central y posibles valores atípicos de los parámetros evaluados: pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, facilitando así el análisis de su comportamiento y variabilidad espacial y temporal (SHI SAS, 2026).

El análisis del diagrama de caja y bigotes correspondiente al parámetro de pH (Figura 5.1.6.198) evidencia que los valores registrados oscilan entre 5,9 y 7,9, lo cual indica condiciones que varían desde ligeramente ácidas hasta levemente alcalinas. El punto de monitoreo PZR 13-07 presenta los valores más elevados, lo que sugiere la posible influencia de materiales geológicos o procesos de intercambio iónico que elevan la alcalinidad. En contraste, PZS12-14 muestra los valores más bajos, con registros incluso por debajo de 6, lo cual puede estar asociado a procesos de oxidación de materia orgánica o a la infiltración de aguas ácidas. Se destaca también la alta variabilidad en puntos como BH-5M-03 y PZS12-12, donde se evidencian rangos amplios y posibles valores atípicos, reflejando cambios espaciales o temporales en las condiciones hidroquímicas. Por el contrario, puntos como PZA12-03, PZR 13-09 y PZ4 presentan distribuciones estrechas, lo que sugiere mayor estabilidad del pH en dichos sectores (SHI SAS, 2026).

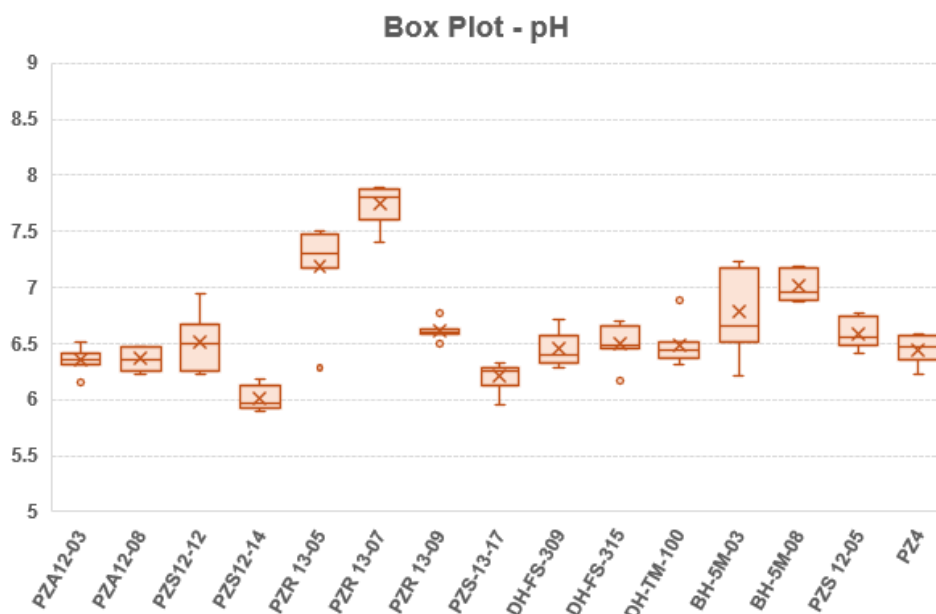


Figura 5.1.6.198 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de pH en piezómetros

Fuente: (SHI SAS, 2026)

Con base en el análisis visual del diagrama de caja y bigotes correspondiente a las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) registradas en los piezómetros monitoreados (Figura 5.1.6.199), se evidencian variaciones significativas tanto en los valores promedio como en la dispersión de los datos entre los diferentes puntos de muestreo. Se destacan valores máximos superiores a 6 mg/l en piezómetros como PZR 13-05, PZR 13-07, DH-FS-309 y PZS 12-05, lo cual sugiere una buena oxigenación del agua subterránea en estos

sectores, posiblemente asociada a una mayor recarga o interacción con el agua superficial. Por el contrario, piezómetros como DH-FS-315, PZR 13-09, y PZA12-08 presentan rangos bajos de OD, incluso con valores por debajo de 2 mg/l, lo que podría indicar condiciones reductoras o limitaciones en la renovación del agua. Asimismo, se observaron casos con presencia de posibles valores atípicos (outliers), como en PZA12-03 y PZS 12-05, lo que sugiere eventos puntuales o variaciones temporales en la calidad del agua subterránea (SHI SAS, 2026).

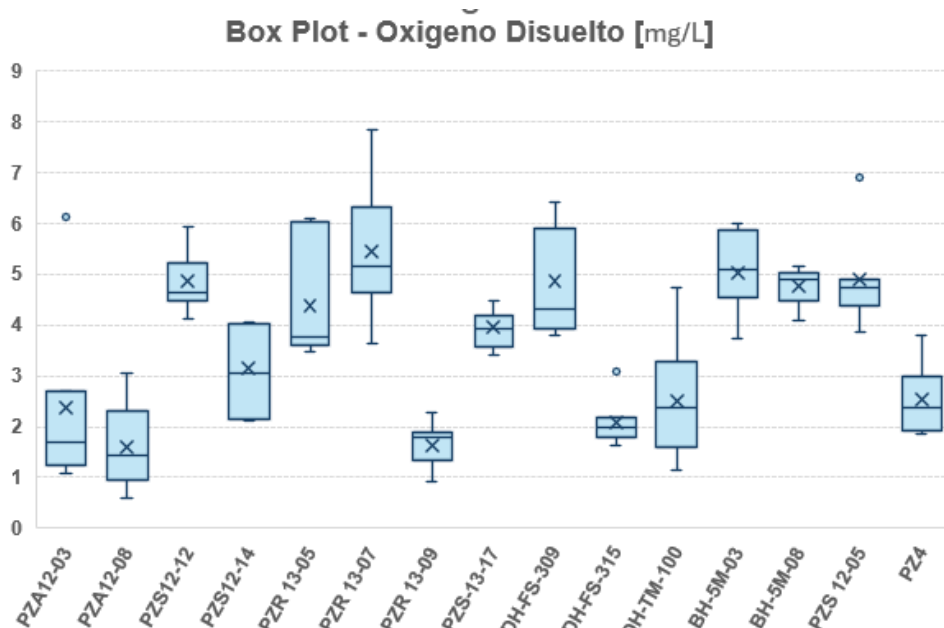


Figura 5.1.6.199 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de oxígeno disuelto en piezómetros

Fuente: (SHI SAS, 2026)

En cuanto a la conductividad eléctrica (Figura 5.1.6.200), los valores registrados muestran una notable variabilidad entre los diferentes piezómetros, con rangos que van desde aproximadamente 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta más de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los mayores valores se presentan en PZR 13-07, lo cual podría relacionarse con zonas de mayor mineralización del agua subterránea, sin embargo, los valores de oxígeno disuelto en este punto fueron predominantemente mayores a 5 mg/l, lo que se asocia a aguas de recarga reciente, por lo que estos niveles de conductividad pueden indicar condiciones de contaminación en el punto (SHI SAS, 2026).

En contraste, puntos como PZS-13-17 y PZA12-03 muestran niveles más bajos de conductividad, lo que puede estar asociado a aguas de menor tiempo de residencia o zonas con materiales menos solubles. El piezómetro BH-5M-03 destaca por presentar una dispersión significativamente alta, con un rango intercuartílico amplio y la posibilidad de presencia de múltiples valores atípicos, indicando una posible mezcla de aguas con diferente composición o variabilidad en las condiciones de muestreo (SHI SAS, 2026).

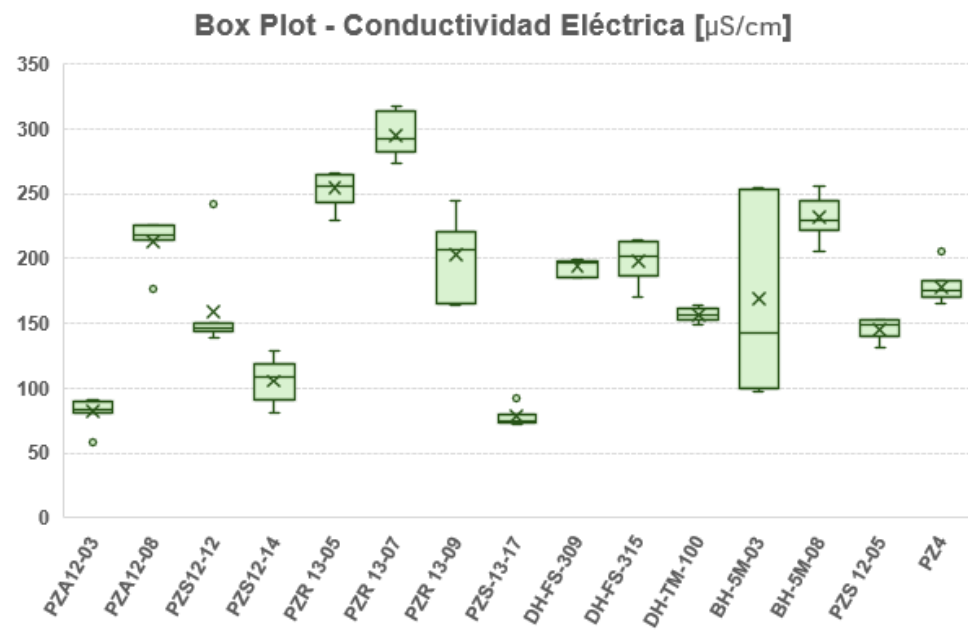


Figura 5.1.6.200 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de conductividad eléctrica en piezómetros

Fuente: (SHI SAS, 2026)

B. Análisis de parámetros en manantiales

El monitoreo de los parámetros fisicoquímicos en los manantiales se llevó a cabo entre los meses de febrero y mayo de 2025, mediante la ejecución de tres campañas de campo. En total, se evaluaron 14 manantiales distribuidos espacialmente en el área de influencia del proyecto. A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante diagramas de caja y bigotes, los cuales permiten identificar la distribución, tendencia central y posibles valores atípicos de los parámetros evaluados: pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, facilitando así el análisis de su comportamiento y variabilidad espacial y temporal (SHI SAS, 2026).

Los resultados de las mediciones de pH en fuentes naturales (manantiales, aljibes y reservorios) durante las campañas de monitoreo, evidencian una ligera variabilidad espacial entre los puntos de muestreo, con valores que oscilan entre 5,63 y 7,84 unidades de pH, lo cual indica en general condiciones entre ligeramente ácidas a neutras (Figura 5.1.6.201).

Los puntos que presentaron valores más bajos de pH fueron M222 (5,63) y M100 (6,03), los cuales podrían estar influenciados por procesos de oxidación de materia orgánica, presencia de suelos ácidos o bajo contenido de carbonatos en la zona. Por el contrario, los valores más altos se observaron en M121 (hasta 7,84), sugiriendo condiciones más alcalinas que podrían estar asociadas a la presencia de materiales con mayor capacidad de amortiguamiento (como rocas calcáreas o procesos de disolución de s). En cuanto a los rangos intercuartílicos y la distribución general de los datos, la mayoría de los manantiales

presentan una variación relativamente baja, lo cual indica cierta estabilidad química del agua en estas fuentes durante el periodo analizado. Sin embargo, puntos como M233, M121 y M222 mostraron variaciones más marcadas, lo cual podría ser indicativo de mezclas hídricas o influencia de factores ambientales puntuales (SHI SAS, 2026).

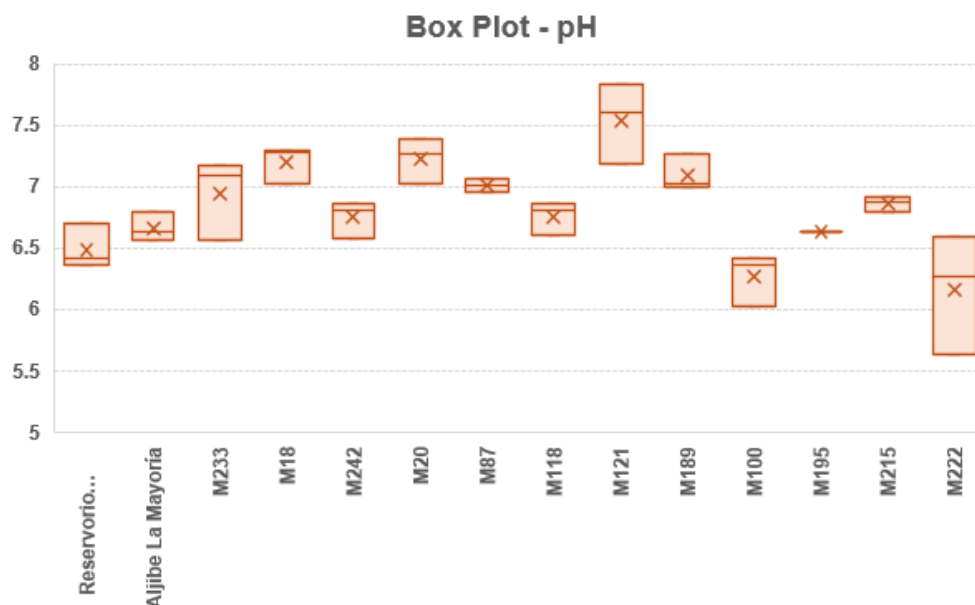


Figura 5.1.6.201 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de pH en manantiales

Fuente: SHI SAS (2025)

En cuanto el oxígeno disuelto (OD), se evaluaron en diversas fuentes hídricas superficiales y subterráneas poco profundas, incluyendo manantiales, aljibes y un reservorio artificial (Figura 5.1.6.202). Los valores registrados oscilaron entre 0,41 mg/l y 7,04 mg/l, evidenciando una amplia variabilidad espacial y posiblemente temporal, atribuible a factores fisicoquímicos y biológicos del entorno.

Los niveles más bajos de OD se presentaron en el Reservorio Artificial La Mayoría (mínimo de 0.74 mg/l), M233 (0.41 mg/l) y M118 (0,55 mg/l), lo que sugiere condiciones de baja oxigenación, posiblemente asociadas a procesos de estancamiento, presencia de materia orgánica en descomposición, consumo de oxígeno por microorganismos, o escasa fotosíntesis debido a poca penetración de luz (SHI SAS, 2026).

Por otro lado, los niveles más altos se registraron en M87 (7,04 mg/l), M20 (6,86 mg/l) y M18 (6,82 mg/l), indicando condiciones de buena oxigenación, favorecidas probablemente por una mayor renovación del agua.

Cabe resaltar que el Reservorio Artificial La Mayoría presentó los valores más bajos de OD en promedio, lo cual lo distingue del comportamiento observado en manantiales naturales. El Aljibe La Mayoría mostró una mayor variabilidad, con valores que van desde 1,49 hasta

6,56 mg/l. La mayoría de los manantiales (M20, M87, M215, M121) mantuvieron valores de OD por encima de 6 mg/l (SHI SAS, 2026).

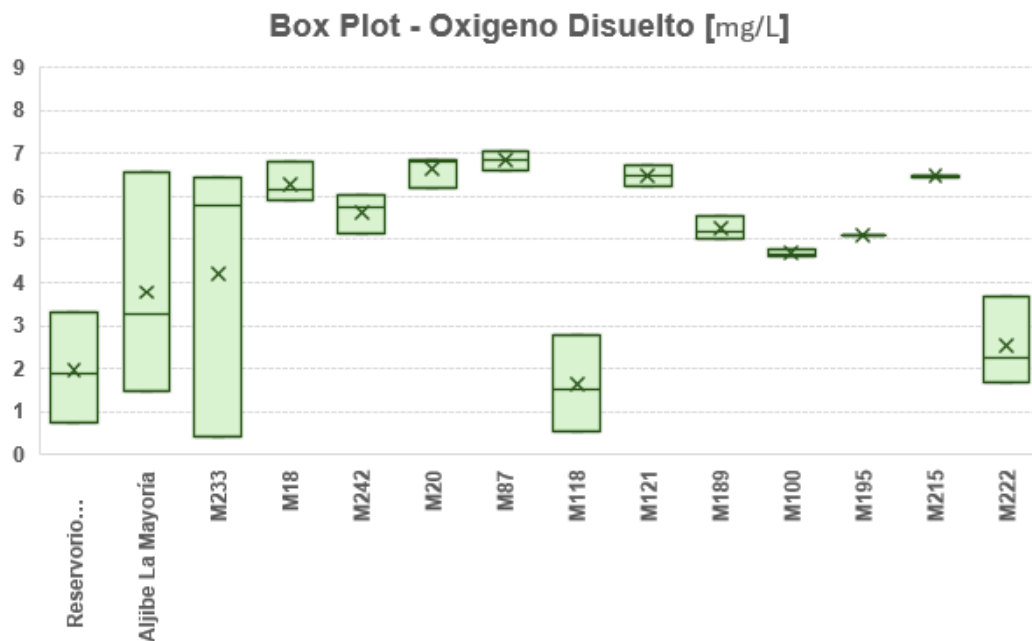


Figura 5.1.6.202 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de oxígeno disuelto en manantiales

Fuente: (SHI SAS, 2026)

En los puntos de muestreo analizados, se observaron valores de CE que oscilaron entre 32,5 y 209,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 5.1.6.203). Los valores más bajos de conductividad se registraron en el Reservorio artificial La Mayoría, con un rango entre 32,5 y 75,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y en el Aljibe La Mayoría, con lecturas entre 34,7 y 85,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En contraste, el valor más alto de CE se presenta en el punto M87, presentando una conductividad de 209,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos resultados sugieren una baja mineralización del agua en estas fuentes, probablemente asociada a una recarga superficial reciente, escasa interacción con materiales geológicos solubles (SHI SAS, 2026).

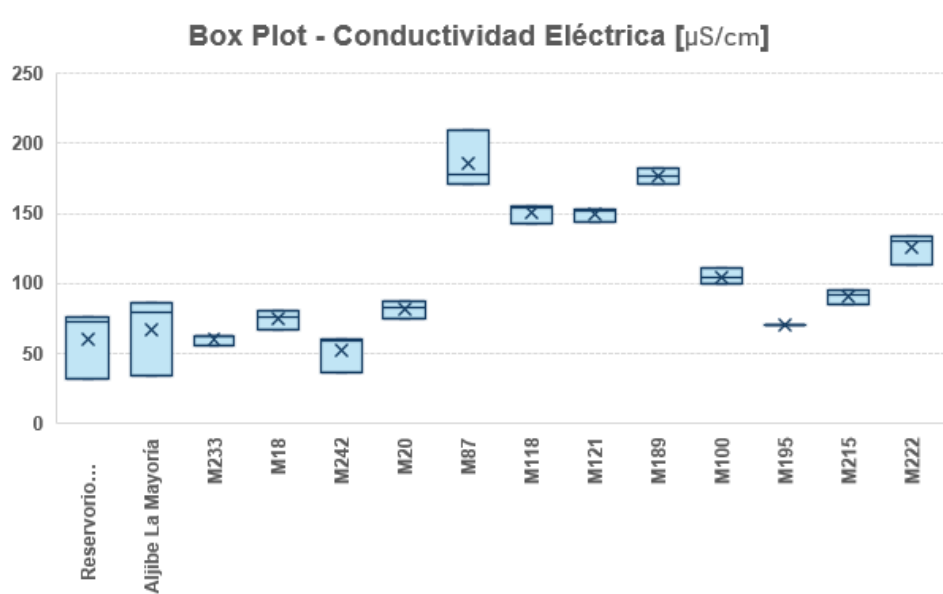


Figura 5.1.6.203 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de conductividad eléctrica en manantiales

Fuente: (SHI SAS, 2026)

5.1.6.4.6 Drenajes mineros ácidos (DMA)

En concordancia con los lineamientos establecidos por la ANLA en los “Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para Proyectos de Explotación Minera” (ANLA, Terminos de referencia para la elaboración de estudio de impacto Ambiental. Proyectos de explotación Minera, 2016) y la Guía para evaluar EIAs de Proyectos Mineros (Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW), 2010), que para la caracterización del mineral establece como aspectos fundamentales la mineralogía de roca total, el potencial de generación de ácido mediante pruebas estáticas y cinéticas, el potencial de generación de contaminantes lixiviados a corto y largo plazo, y la identificación de contaminantes de interés.

El contenido de este capítulo se soporta en una base de información técnicamente consolidada, construida a partir de campañas de muestreo superficial, análisis geoquímicos de perforación, caracterización mineralógica y programas específicos de ensayos geoquímicos para roca de desmonte, mineral de baja ley, paredes del tajo y relaves con criterios de representatividad espacial y composicional del depósito mineral.

Los resultados obtenidos confirman que el depósito mineral corresponde a un sistema mineralizado homogéneo, alojando predominantemente una tonalita intrusiva con asociaciones geoquímicas bien definidas y consistentes en las que Au, Ag, Bi, Te, S y Cu se relacionan directamente con la mineralización, manteniendo un comportamiento coherente entre la superficie, la profundidad y los distintos dominios evaluados.

De igual forma, los análisis efectuados hasta la fecha han permitido establecer conclusiones sobre el comportamiento geoquímico de los materiales del yacimiento, incluyendo el bajo contenido general de azufre en roca, la ocurrencia localizada de materiales con potencial de generación de ácido asociada al bajo potencial de neutralización, y tasas bajas de lixiviación para los parámetros de interés, lo que proporciona un marco de interpretación estable y suficiente para la evaluación ambiental del proyecto. En este sentido, dadas las condiciones geológicas y geoquímicas intrínsecas del depósito, no hay variaciones en su composición.

A. Potencial de generación de ácido – pruebas estáticas y cinéticas

A continuación, se presenta en este subcapítulo, los resultados de las pruebas geoquímicas realizadas hasta la fecha, en el marco de la aplicación de los nuevos criterios establecidos por la ANLA para la clasificación del drenaje ácido de roca (DAR) en materiales de mina, según lo estipulado en los “Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para Proyectos de Explotación Minera” (ANLA, Terminos de referencia para la elaboración de estudio de impacto Ambiental. Proyectos de explotación Minera, 2016) para el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote. Asimismo, se incluye una comparación entre los criterios específicos del sitio (pHase Geochemistry, 2013) y los lineamientos definidos por la ANLA en 2016 (Golder, Memorando tecnico de caracterizacion geoquimicay potencial generacion de drenaje acido. Proyecto Gramalote, 2020).

La selección de las muestras se realizó buscando contar con un conjunto de muestras representativas tanto espacial como de composición de todo el depósito Gramalote. (Golder, Memorando tecnico de caracterizacion geoquimicay potencial generacion de drenaje acido. Proyecto Gramalote, 2020).

La mayoría de la roca presente en el depósito Gramalote es tonalita / granodiorita, con presencia minoritaria de otras litologías. Dado que, el 90% de los testigos de perforación disponibles correspondieron a la litología tonalita/granodiorita, entre 5% y 6% de saprolito y saproroca, entre 1% y 2% corresponden a diorita, cuarzodiorita, aplita y dacita. Por consiguiente, la mayoría de las muestras de roca de desmonte corresponden a la litología tonalita / granodiorita, este material fue evaluado también por pruebas cinéticas. (Golder, Memorando tecnico de caracterizacion geoquimicay potencial generacion de drenaje acido. Proyecto Gramalote, 2020).

Esta caracterización se realiza para evaluar de una manera conservadora la proporción de generación de material potencial generador de ácido (PAG) con la finalidad de reducir riesgos ambientales mediante el diseño de un plan de manejo de residuos con un enfoque conservador. (Golder, Memorando tecnico de caracterizacion geoquimicay potencial generacion de drenaje acido. Proyecto Gramalote, 2020).

a. Protocolo de muestreo

El protocolo de selección de muestras para caracterización y análisis de potencial de generación de drenaje ácido vincula cuatro elementos principales: tipo de material (litotipos,

alteraciones, zonas meteorizadas), representatividad asociada a la selección de número de las muestras, tipo de muestreo y control de calidad. En la Figura 5.1.6.204 se presenta diagrama metodológico.

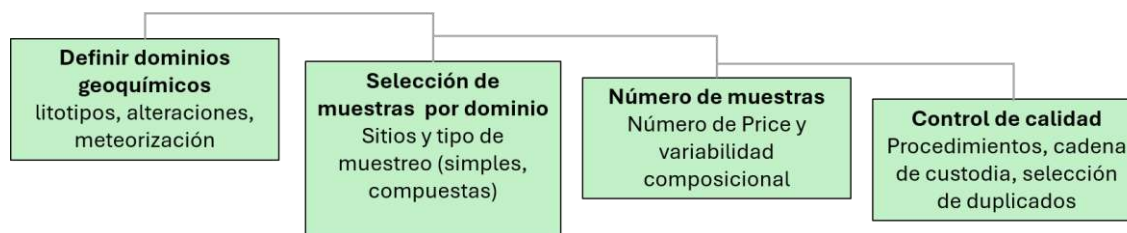


Figura 5.1.6.204 Esquema de protocolo de muestreo para análisis de Drenaje ácido
Fuente: Adaptado de Phase, 2013, Golder, 2020.

El análisis se realiza en detalle para todos los materiales involucrados en el proceso minero. En esta sección se especifica las muestras provenientes de la zona de explotación y paredes del tajo. A continuación, se detalla cada uno.

I. Dominios geoquímicos

Se tomaron como base para este análisis los datos disponibles de la caracterización geológica del yacimiento (mapa y secciones), geoquímica (ensayos), mineralogía y diseño de la excavación. A partir de la integración de la información, se identificaron las variaciones litológicas menores y alteraciones sobreimpuestas a las rocas. Un mismo tipo de roca, como es la tonalita/granodiorita, solo presenta variaciones por las mineralizaciones y alteraciones, lo que en este caso representa los dominios geoquímicos que se tuvieron en cuenta.

El yacimiento se caracteriza por su gran homogeneidad geológica, en la cual la mayoría de la mineralización se aloja en la roca tipo tonalita/granodiorita, aunque también se presentan en proporciones menores a diorita, dacita y aplita. En la Figura 5.1.6.205 se presenta la distribución de los tipos de rocas para la zona del tajo Gramalote.

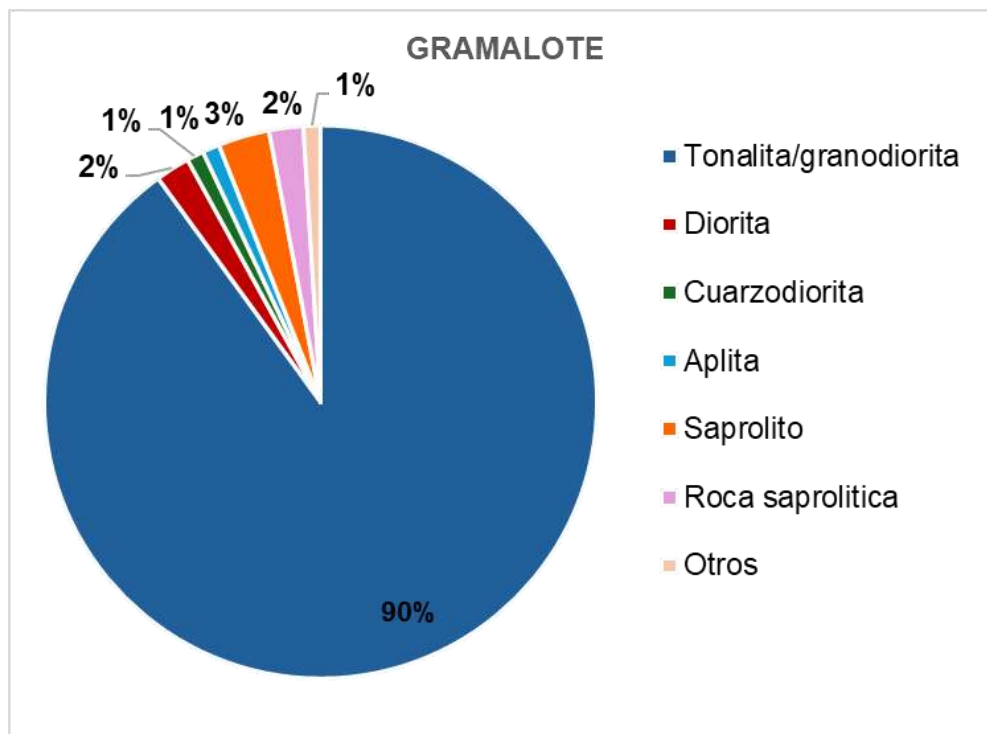


Figura 5.1.6.205 Distribución litológica a partir de testigos de exploración tajo Gramalote

Fuente: Phase, 2013, Golder, 2020.

Desde la óptica de las alteraciones se reportan cuarzo-sericita, carbonato-sericita, potásica y supergena. Estas alteraciones están relacionadas con la mineralización y se limitan a tramos estrechos desarrollados a lo largo de los sistemas de vetas. En la Figura 5.1.6.206 se presenta la distribución en planta de las alteraciones y en la Figura 5.1.6.207 se muestra una sección con la distribución.

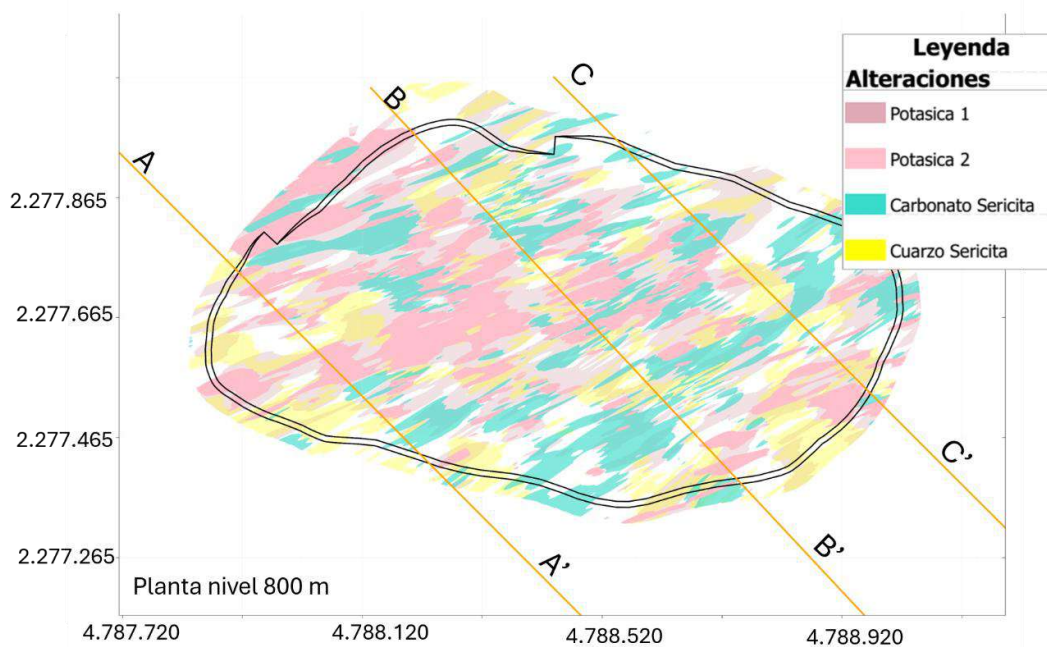


Figura 5.1.6.206 Modelo de alteración del yacimiento - distribución en planta

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

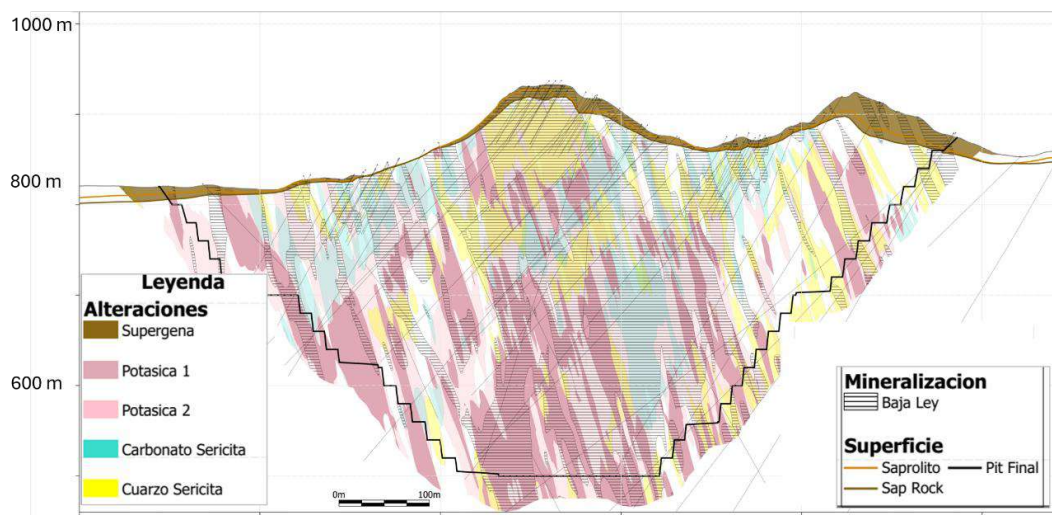


Figura 5.1.6.207 Modelo de alteración del yacimiento – Distribución sección B-B'

Fuente: Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

Por último, se encuentra en la zona una sobrecapa de meteorización, con desarrollo de zona de saprolito (óxidos) y zona de transición saprolito-roca (saprock), con espesor

conjunto que varía entre 5 y 30 metros, con un promedio de 15 metros. En la Figura 5.1.6.208 se presenta los contornos que delimitan estos niveles asociados a suelo.

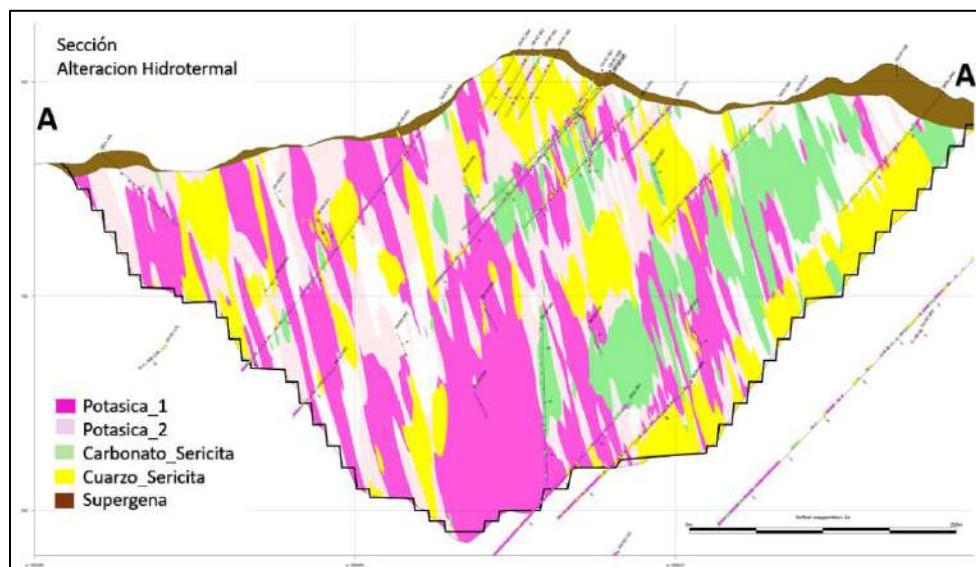


Figura 5.1.6.208 Modelo de alteración del depósito – Sección del núcleo del depósito

Fuente: Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

II. Selección de muestras

El número de muestras seleccionado para ensayos estáticos y cinéticos debe ser suficiente para representar adecuadamente la variabilidad de los litotipos y las alteraciones identificadas. La selección de muestras se realizó con el apoyo del grupo de geólogos, profesionales idóneos por su conocimiento del yacimiento.

La fuente de información disponible corresponde a los núcleos recuperados en la exploración directa que fue descrita detalladamente en el numeral (exploración directa).

A partir del cruce de la información de modelo geológico del yacimiento, se seleccionaron las muestras de las zonas mineralizadas y roca huésped, considerando los siguientes aspectos para garantizar representatividad.

- **Representación espacial (x, y, z)**

Las muestras están restringidas a líneas unidimensionales definidas por la localización de cada uno de los sondeos, puesto que no hay representación completa de los materiales a excavar y exponer con el futuro tajo en superficie. El gran número de sondeos con que cuenta el proyecto permitió tener una adecuada representación espacial, tanto vertical como horizontal, cubriendo el área de explotación.

- **Tipo de material**

Las muestras seleccionadas cubrieron los dominios geoquímicos representativos de los diversos tipos de material, por ejemplo, litología o tipo de alteración, vinculando los

resultados de la caracterización geoquímica del yacimiento para garantizar la caracterización de cada uno de los materiales.

- **Representación composicional**

La selección de muestras incluyó los principales tipos de materiales, en función del tipo de roca, mineralización, alteraciones vetas y otros rasgos estructurales relevantes. Por lo general se seleccionaron intervalos entre 1,0 a 2,0 m de núcleo para alcanzar el tamaño de la muestra.

- **Procedimientos**

Se realizó el adecuado almacenamiento, registro fotográfico, llevando siempre el protocolo de control de calidad y garantizando el tamaño de la muestra requerida para los ensayos (entre 3 a 5 kg).

Una vez se realizó la toma de cada muestra, se empacó en doble bolsa de polietileno de alto calibre y resistentes a los rayos UV. La etiqueta de la muestra resistente a la intemperie y se ubicó dentro de la bolsa, rotulando el número de muestra correspondiente en el exterior del empaque con un marcador permanente. Las bolsas se sellaron con precintos de seguridad de un solo uso, registrando en el formato correspondiente coordenadas, profundidad, litología, estimaciones del porcentaje de vetas y tipo de alteración para el posterior envío al laboratorio correspondiente.

Otras muestras fueron seleccionadas mediante cono y cuarteo, usando el método para las muestras compuestas que integran material estéril y de baja ley. El procedimiento consiste en:

- **Formación del cono:** Disponer el material de los sondeos sobre una superficie limpia y lisa, formando un cono simétrico al dejar caer los fragmentos en el centro.
- **Aplanado:** Se aplasta el cono con cuidado para transformarlo en una capa circular plana de grosor uniforme.
- **División:** Trazo de dos líneas en cruz sobre la torta para dividirla en cuatro partes iguales o cuadrantes.
- **Selección:** Se descartan dos cuartos opuestos en diagonal y se retienen los otros dos para formar la muestra reducida o repetir el ciclo si el volumen sigue siendo alto.

III. Número de muestras (Justificación)

Para la definición del número de muestras se revisaron los siguientes criterios de representatividad: i) el área total de las paredes de la zona de explotación ii) la variabilidad del tipo de materiales, litología, alteraciones y por último iii) el grado de incertidumbre de la evaluación.

El número de muestras incrementa con la heterogeneidad de los materiales (litotipos, tamaño de grano, alteraciones), por lo que la homogeneidad de los materiales del tajo es una ventaja para los análisis hechos. Es importante anotar que la representatividad de las muestras debe validarse durante la operación, pues los modelos geológicos se ajustan a

partir de los cambios en las características del yacimiento, conllevando a cambios en la geoquímica del material de relaves. El monitoreo debe incluir un seguimiento sistemático de los relaves para identificar cambios e implementar medidas de manejo en caso de requerirse.

i. Número de Price

A partir de los lineamientos presentando en la Guía The Global Acid Rock Drainage (GARD), el número de muestras para ensayos de drenaje ácido puede ser estimada mediante la ecuación de Price, la cual, a partir del volumen de material involucrado en los procesos de explotación, plantea el número de Price (Price, 2009), en este caso en particular, para las paredes expuestas de la zona de explotación.

$$N.M. = 0.0347 \times \alpha^{0.479}$$

Ecuación 5.1.6.12 Ecuación de Price para calcular en número de muestras

Donde:

N.M.= Número de muestras

α = Masa del material involucrado en la operación, susceptible a ser removido o intervenido en el proceso de generación de drenaje ácido

- **Estimación de volumen de material expuesto en las paredes del tajo**

Para la determinación de este parámetro hay que tener claro el principio de que, para la formación del drenaje ácido, se requiere de la existencia e interacción de tres componentes: mineral con contenido de sulfuro + agua + oxígeno. En la Figura 5.1.6.209 se representan los componentes para la generación en las paredes del tajo.

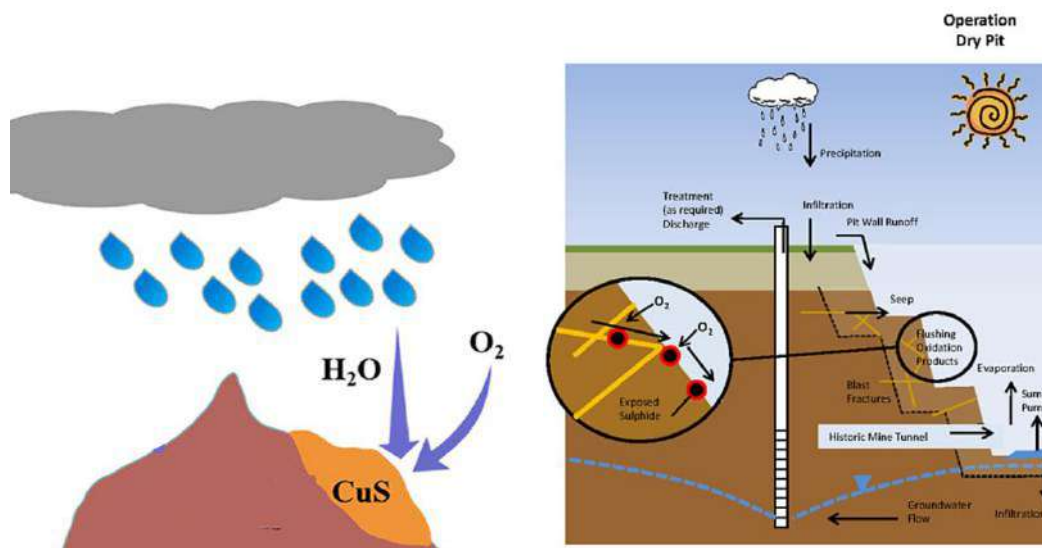


Figura 5.1.6.209 Representación de mecanismo de formación de drenaje ácido.

Fuente: Der. Adaptado de Zhang et al., 2023. Izq. <https://www.gardguide.com>.

Para el cálculo de la masa de material involucrado (α) en el área total del tajo planeado durante la fase de operación, se trabajó con el área total del tajo y una profundidad de 1 m para la zona de interacción de las tres variables: mineral con contenido de sulfuro, agua y aire. El área total de las paredes y fondo del tajo es de 145 Ha. En la Figura 5.1.6.210 se presenta geometría final de la zona de explotación.

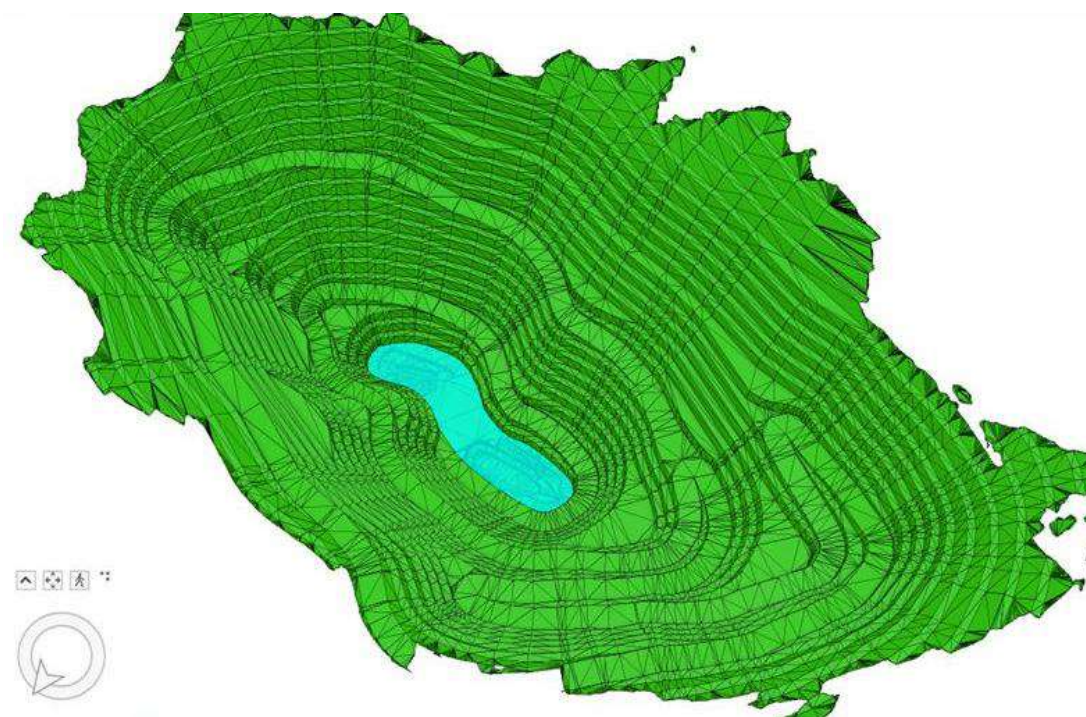


Figura 5.1.6.210 Paredes y fondo de tajo

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

En la Tabla 5.1.6.97 se presentan los valores de las masas estimadas de paredes de tajo y se calcula mediante la ecuación de Price el número de muestras requeridas.

Tabla 5.1.6.97 Número de muestras aplicando la ecuación de Price

Zona tajo	Área (m ²)	Profundidad (m)	Volumen (m ³)	Densidad	Masa (toneladas)	N°muestras (E. Price)
Paredes	1.409.500	1	2.819.000	2,8	3.946.600	51
Fondo	40.000	1	80.000	2,8	112.000	10
TOTAL						61

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

ii. Variabilidad composicional y materiales

A partir de la caracterización geológica y geoquímica del yacimiento, se identificaron los materiales: litología, alteraciones y meteorización, definiendo los dominios geoquímicos. En la Figura 5.1.6.211 se presenta la distribución de las muestras seleccionadas para ensayos Acid Base Accounting (ABA) según los tipos de roca y los materiales de suelo (Saprolito y roca saprolítica).

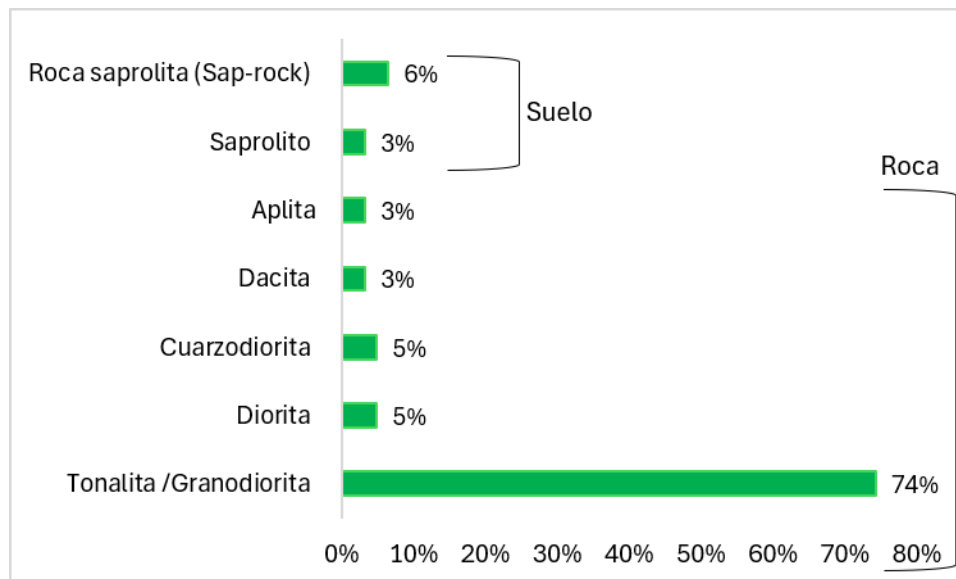


Figura 5.1.6.211 Distribución del porcentaje de muestras ensayos ABA según tipo de roca y suelo.

Fuente: Phase, 2013.

La caracterización geoquímica para evaluación de drenaje ácido del tajo Gramalote se realizó en dos fases.

En la fase inicial (fase 1) se seleccionaron 57 muestras, las cuales fueron representativas del rango de composición según parámetros clave, tales como el azufre y molibdeno, y consistieron en material registrado entre "ninguna alteración" y "alteración fuerte generalizada", primordialmente en forma de alteración potásica con menor grado de alteración sericita/cuarzo-sericita y arcillosa. Diez de las muestras de esta fase inicial representan muestras obtenidas con métodos de cono y cuarteo.

Otras 523 muestras (fase 2), fueron analizadas para incrementar el conjunto de datos existente sobre las unidades de roca estéril y de la pared del tajo. Se tomó desde el inicio hasta la profundidad total de cada sondeo. Aproximadamente cada diez muestras de los sondeos que se cruzan con las paredes del tajo fueron muestreadas y analizadas para determinar el contenido total de azufre y el carbono inorgánico total (TIC) como indicadores de potencial ácido y potencial de neutralización, respectivamente.

En comparación con el número estimado mediante la ecuación de Price, ambas fases aportan una cifra significativa de numérico de muestras, que da cuenta de la adecuada caracterización de la zona del yacimiento para evaluación de potencial de generación de drenaje ácido.

IV. Control de la calidad

La ejecución de pruebas estáticas incluyó un programa de aseguramiento de la calidad/control de la calidad (QA/QC), el cual consistió en aproximadamente 25% de análisis duplicados y análisis de materiales de referencia. Se identifica las diferencias porcentuales relativas (RPD) calculadas usando la Ecuación 5.1.6.13 para cada medición duplicada.

$$RPD = \frac{(X1 - X2) \times 100}{(X1 + X2) / 2}$$

Ecuación 5.1.6.13 Ecuación diferencia porcentual relativa

Fuente: Phase, 2013, Golder, 2020.

El criterio general es que los valores de RPD deben estar en un rango de +/- 20%. En la Tabla 5.1.6.98 se presenta ejemplo de la estimación del RPD.

Tabla 5.1.6.98 Ejemplo de aseguramiento de la calidad/control de la calidad (QA/QC)

Sample ID	Lithology	Total S (%S)	Total C (%C)	TIC (%C)
103471	Tonalita/Granodiorita	0.65	0.72	0.71
DUP 103471	Tonalita/Granodiorita	0.68	0.73	0.71
% RPC		-4.5	-1.4	0.0

Fuente: Phase, 2013.

b. Análisis sobre la representatividad

En esta sección se presenta una descripción del plan de muestreo que se realizó para clasificar los materiales como potencialmente generador de ácido (PAG) y no potencialmente generador de ácido (No PAG). También se describe el método de selección de muestras representativas para ser sometidas a pruebas cinéticas de materiales para evaluar su reactividad

A partir de la aplicación del protocolo para la selección de muestras a continuación se describen los aspectos analizados.

I. Dominios geoquímicos

Inicialmente se analizó la distribución de los materiales involucrados en la zona de explotación, mostrando los resultados de la Figura 5.1.6.212. El 90% del material a explotar y que constituye las paredes del tajo están representados por roca tipo tonalita/granodiorita y proporciones menores a 2% de diorita, cuarzodiorita, dacita, aplita. Para los niveles de suelo (Saprolito + roca saprolítica) se registra un 5%.

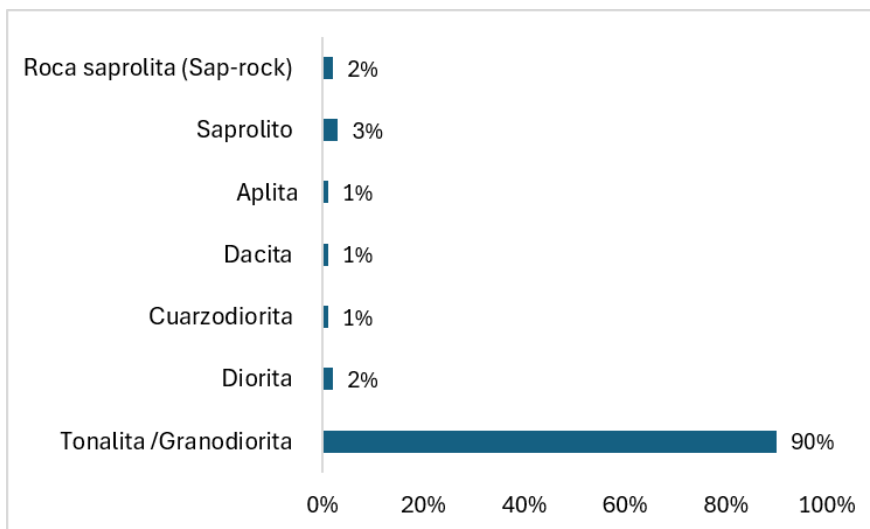


Figura 5.1.6.212 Distribución porcentual de materiales en la zona de explotación

Fuente: Phase, 2013.

Para el planteamiento de los dominios geoquímicos se vincula el tipo de roca más las diferentes alteraciones que se registran: cuarzo sericita, carbonato sericita, potásica y supergena (está última representado saprolito y roca saprolítica).

En la Figura 5.1.6.213 se presenta la distribución en planta de las alteraciones y en las Figura 5.1.6.214, Figura 5.1.6.215 y Figura 5.1.6.216 se presentan las secciones. Se observa predominio de la alteración cuarzo sericita seguida de carbonato sericita y por último potásica.

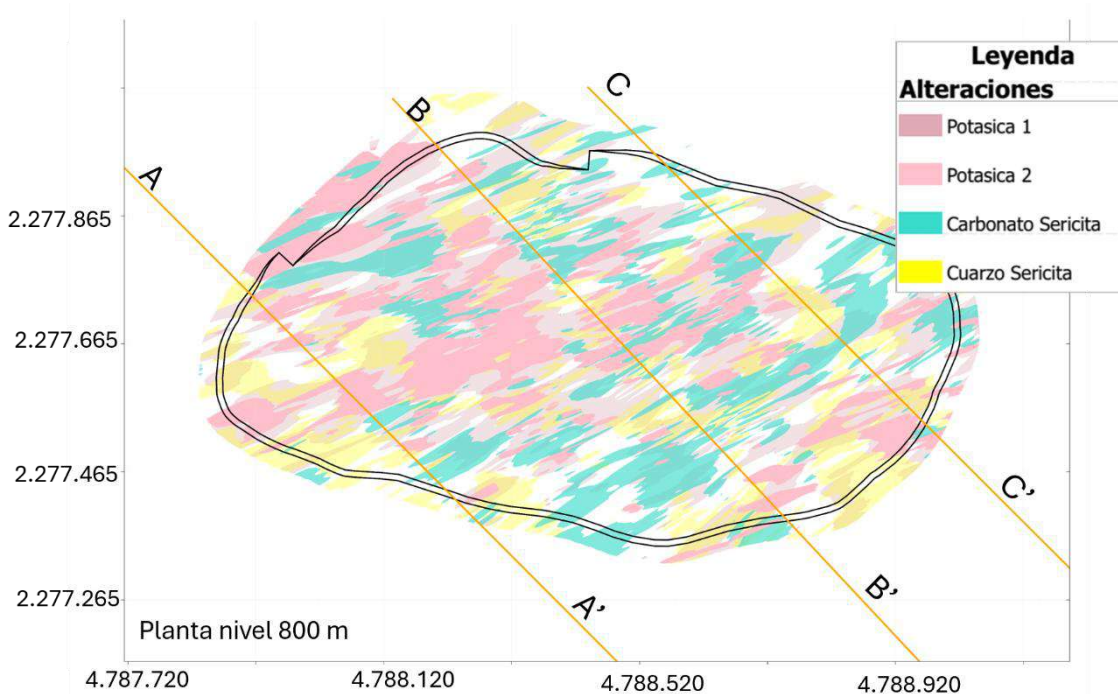


Figura 5.1.6.213 Distribución en planta de tipos de alteraciones

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

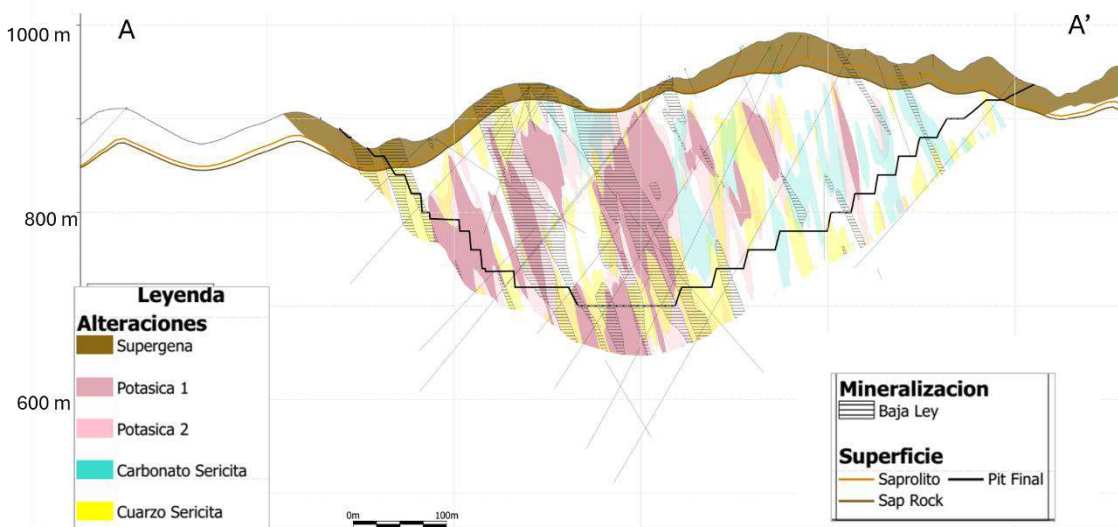


Figura 5.1.6.214 Distribución del tipo de alteraciones sección A-A'

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

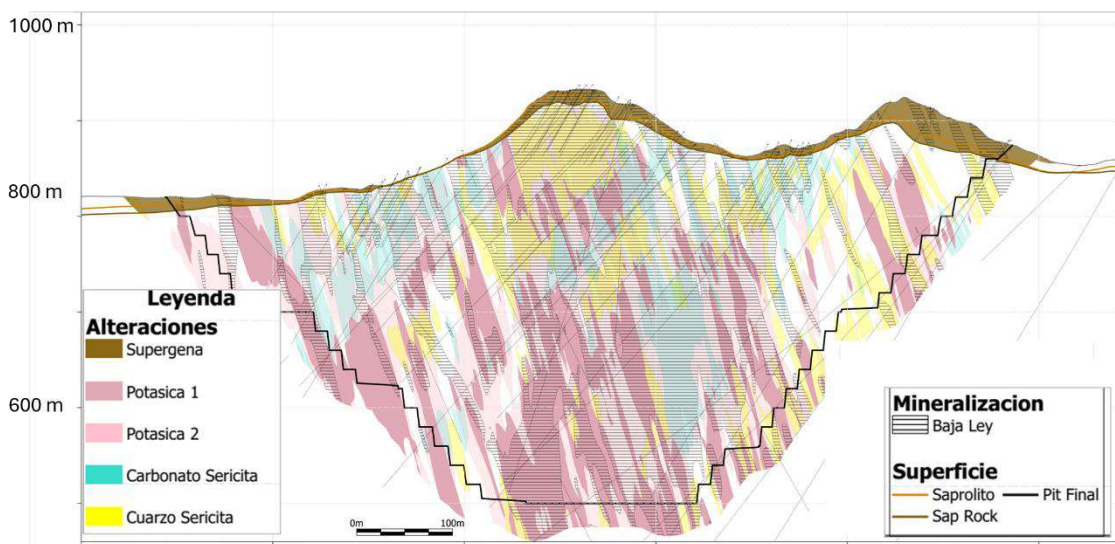


Figura 5.1.6.215 Distribución del tipo de alteraciones sección B-B'

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

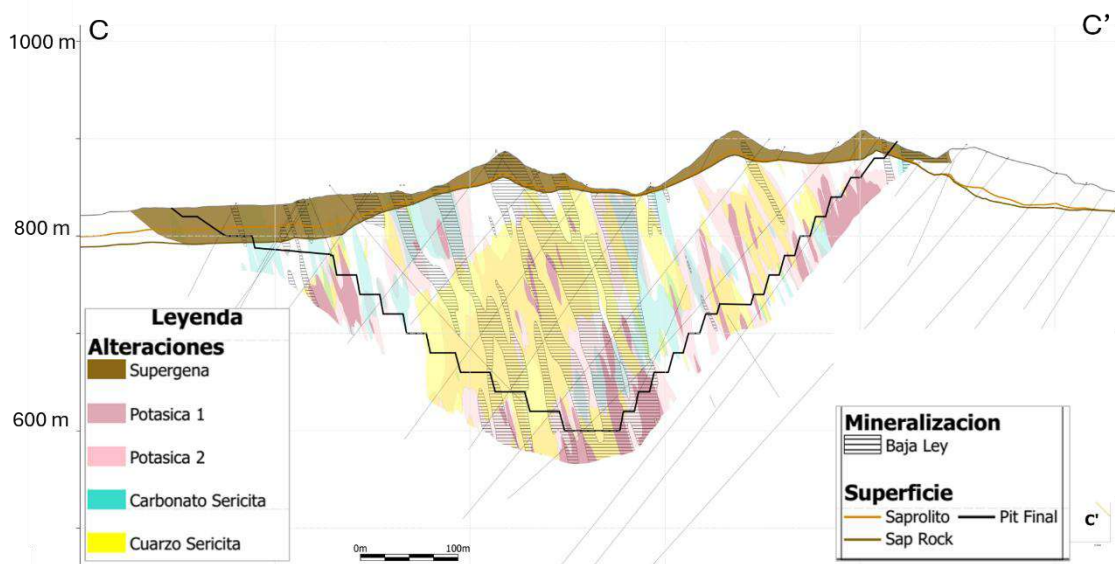


Figura 5.1.6.216 Distribución del tipo de alteraciones sección C-C'

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

II. Selección de muestras

En la Figura 5.1.6.217 se presenta la distribución del porcentaje de muestras por litología. El predominio del muestreo se realizó sobre la roca tonalita/granodiorita con el 74% de las muestras seguido de material tipo suelo (roca saprolítica y Saprolito) que suman el 9%.

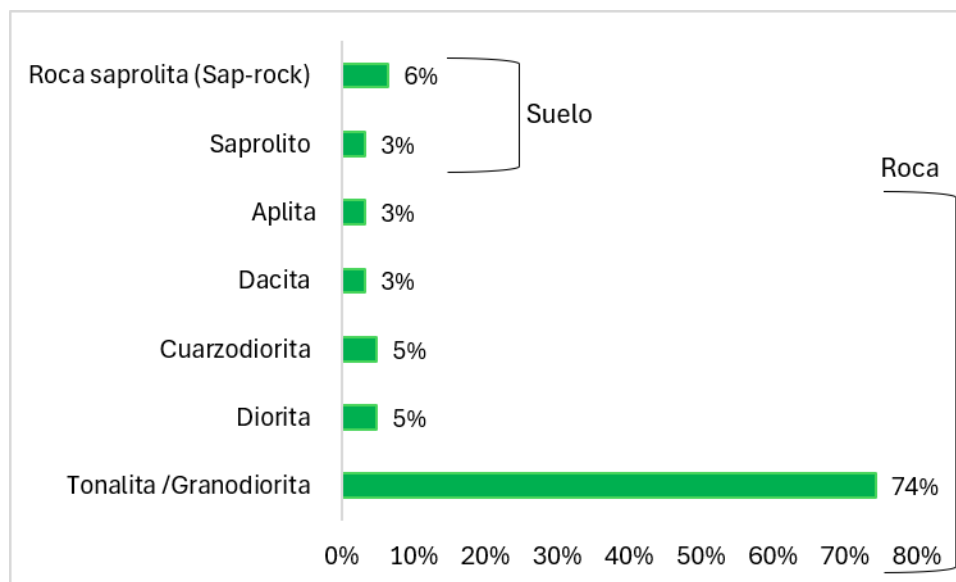


Figura 5.1.6.217 Distribución del porcentaje de muestras por litología

Fuente: Phase, 2013.

Para el planteamiento de los dominios geoquímicos que incluyen las alteraciones, se identificó que son controladas estructuralmente y ocurren tanto en zonas amplias como en bordes delgados alrededor de las vetas.

Las zonas de alteración avanzan desde una zona exterior cuarzo-sericita (que representa el 42% de las muestras) a zonas interiores de carbonato sericita (que representan el 26% de las muestras) y potásicas (que representan el 13% de las muestras). La alteración supergena representa el 6% de las muestras y roca tonalita/granodiorita sin alteración definida representa el 14%, cubriendo así los dominios geoquímicos presentes en la zona de explotación (Figura 5.1.6.218).

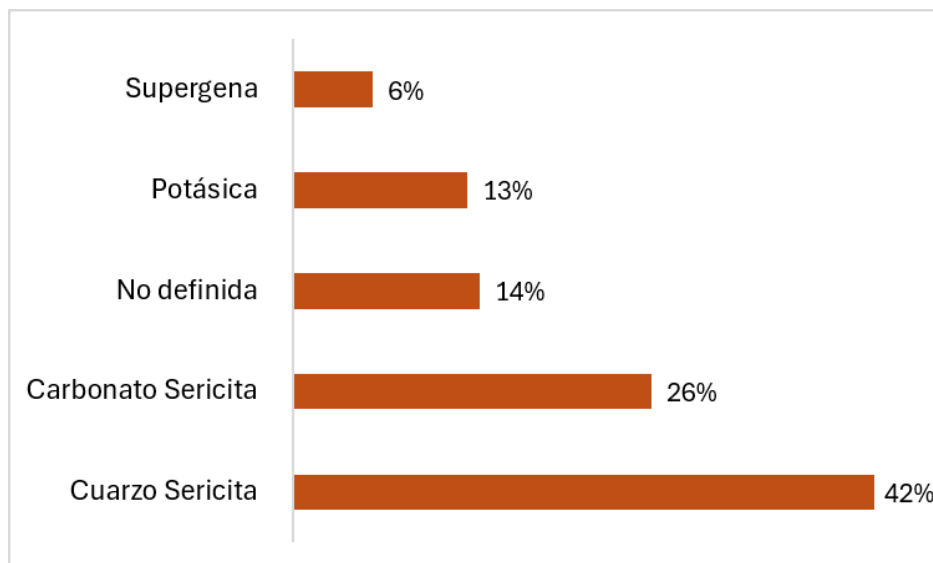


Figura 5.1.6.218 Distribución del porcentaje de muestras por alteración (dominios geoquímicos)

Fuente: Phase, 2013.

En la Figura 5.1.6.219 se presenta la distribución de los porcentajes de muestras por alteración para cada litología. Así, del total de muestras de roca tipo tonalita/granodiorita, que representa el 74% de las muestras, se tiene la siguiente distribución según las alteraciones (44% Cuarzo sericita, 28% Carbonato sericita, 14% potásica y 14% no definida).

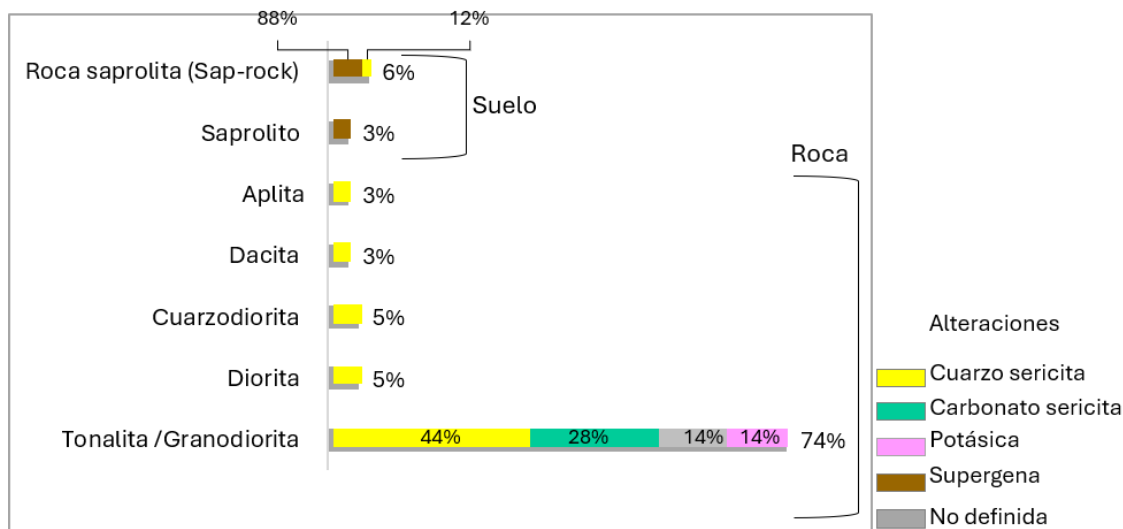


Figura 5.1.6.219 Distribución del porcentaje de muestras por litología y alteración (dominios geoquímicos)

Fuente: Phase, 2013.

III. Localización de muestras

En la Figura 5.1.6.220 se presenta la localización en planta de las muestras analizadas para la caracterización de DAR. En total se cuentan con un total de 571 muestras. Se observa distribución en la zona de explotación desde superficie y alcanzando cota de muestreo de 615 m.s.n.m, aprovechando los sondeos de exploración. Las muestras de las Fase 2 corresponden a muestras de diferentes profundidades a lo largo de sondeos exploratorios, por lo que se visualizan como líneas continuas de color azul. En la Figura 5.1.6.221 se presenta detalle de los sitios de sondeos discretizando la posición de la muestra en el sondeo, registrando la cota (m.s.n.m).

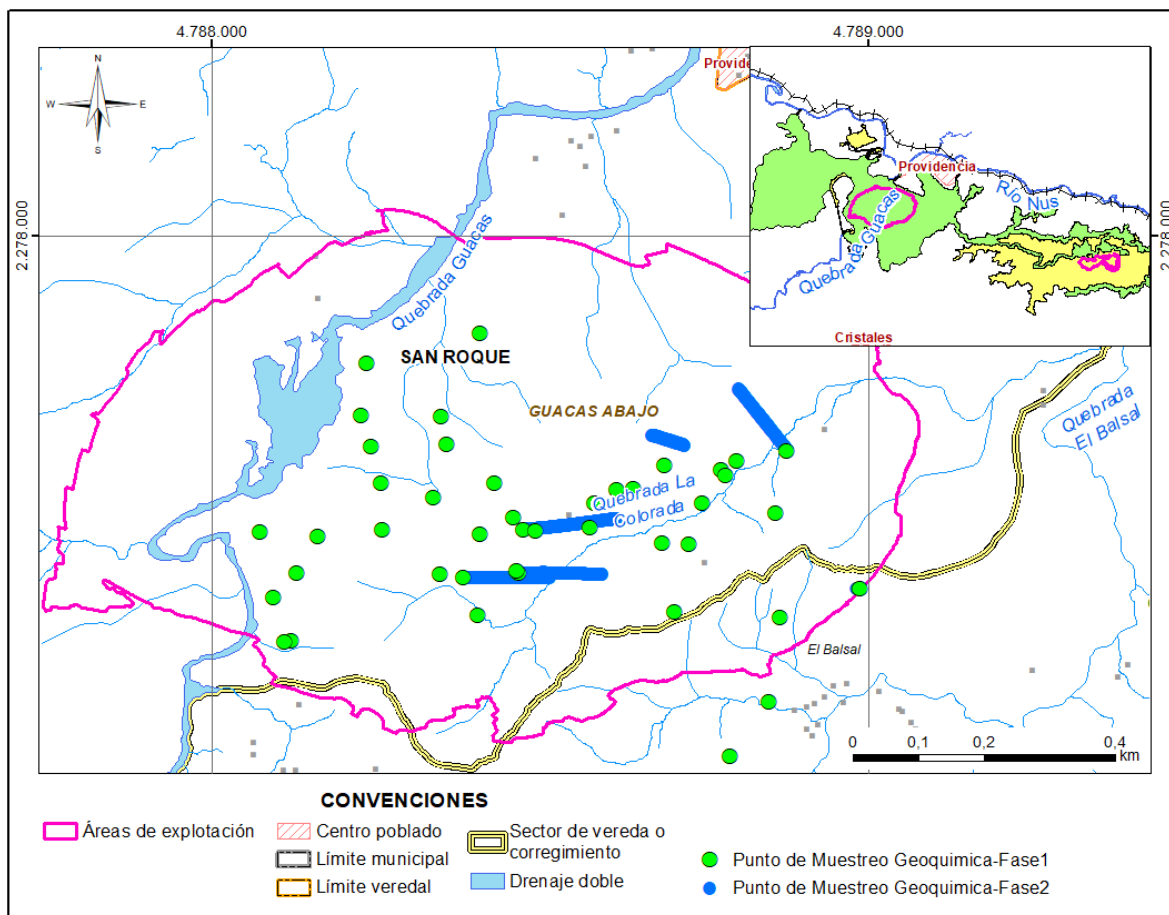


Figura 5.1.6.220 Distribución de las muestras para caracterización de DAR en zona de explotación.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

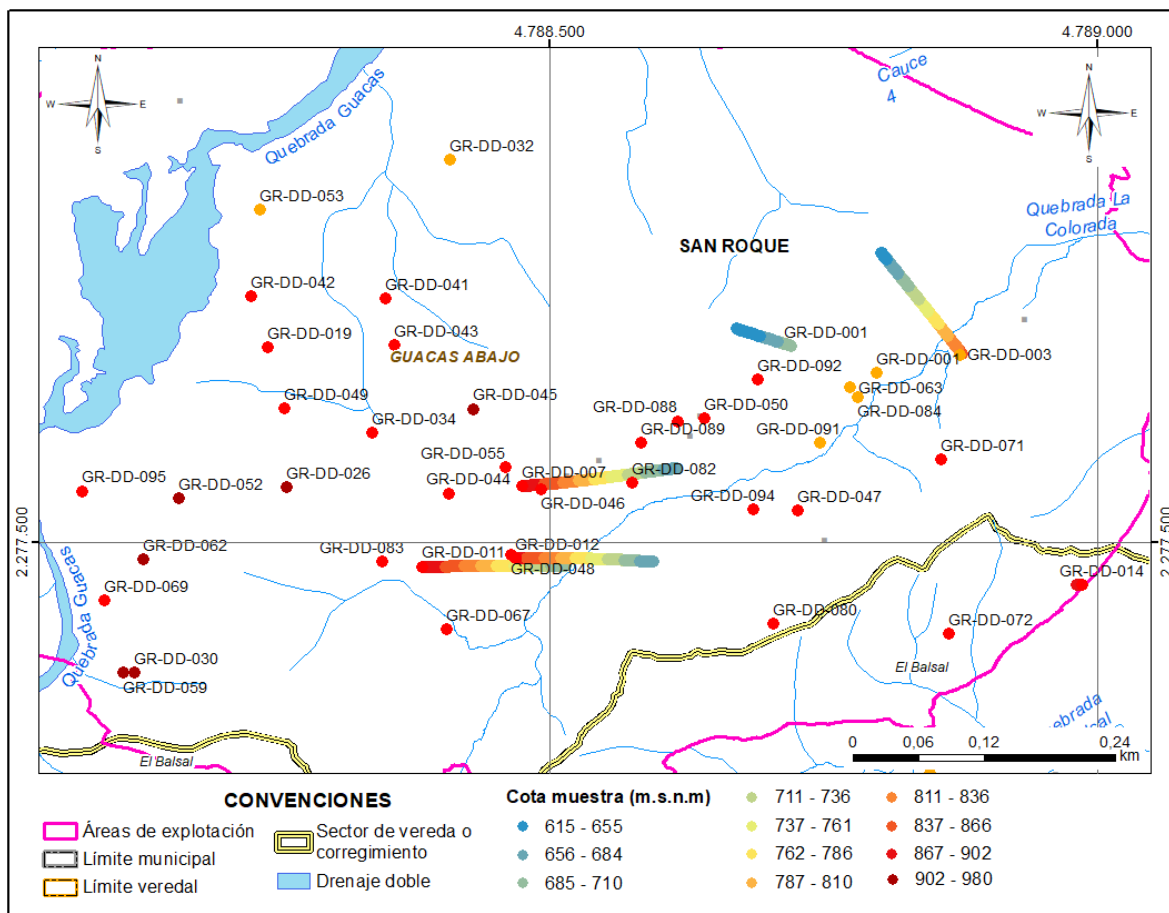


Figura 5.1.6.221 Discretización de la posición de las muestras (cota en m.s.n.m.).

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

Las muestras de roca de desmonte analizadas se consideran representativas de cada litología y alteración, así como del rango de concentraciones de azufre total. El número de muestras fue proporcional a cada litología, donde las tonalitas representan el 90% de los testigos de perforación. (Golder, Memorando tecnico de caracterizacion geoquimica potencial generacion de drenaje acido. Proyecto Gramalote, 2020). El detalle del número de muestras y análisis por cada litología se presenta en la Tabla 5.1.6.99.

Tabla 5.1.6.99 Resumen de Pruebas Geoquímicas – Roca de Desmante y Paredes del Tajo

Litología	Pruebas Estáticas							Pruebas Cinéticas	
	Balance Acido Base (ABA)	Azufre Total y Carbono Inorgánico Total (TIC)	Generación de acidez neta (NAG)	Análisis Elemental (ácidos fuertes)	Análisis Elemental (agua regia)	Lixiviación de metales por SFE	Mineralogía QXRDa & Petrografía y Granulometría	Celdas de Humedad (1 kg HCT)	Barriles de campo (400 kg)
Tonalita/Granodiorita	46	471	15	512	15	5	15	4	10
Diorita	3	2		5					
Cuarzo diorita	3			3					
Dacita	2			2					
Aplita	2	1		3					
Saprolito	2	33		35					
Roca Saprolita	4	8		12				1	
Vetas		4		4					
Gouge		3		3					
Suelo/ Coluvial		1		1					
Total	62	523	15	580	15	5	15	5	10

Fuente: (Golder, Memorando tecnico de caracterizacion geoquimicay potencial generacion de drenaje acido. Proyecto Gramalote, 2020)

Las pruebas cinéticas fueron desarrolladas en diferentes escalas para mejorar la capacidad de entendimiento de las condiciones del sitio y como se relaciona con el potencial de generación de acidez de la roca. (Golder, Memorando técnico de caracterización geoquímica y potencial generación de drenaje ácido. Proyecto Gramalote, 2020).

Las colas producto del procesamiento del mineral de Gramalote serán de dos tipos: colas de flotación (rougher flotation tailings) y colas de lixiviación de cianuros (Cyanide Leach). Las colas de flotación serán cicladas para crear dos fracciones, los finos que se depositarán en playa y los gruesos que serán usados para la construcción del dique de arena. En la Tabla 5.1.6.100 se presentan las muestras que fueron sometidas a pruebas geoquímicas (Golder, Memorando técnico de caracterización geoquímica y potencial generación de drenaje ácido. Proyecto Gramalote, 2020). Algunas de las muestras fueron obtenidas de procesar material de rechazo durante la vida temprana de la mina y una muestra de material rechazado durante la vida restante de la mina (Golder, Memorando técnico de caracterización geoquímica y potencial generación de drenaje ácido. Proyecto Gramalote, 2020).

Tabla 5.1.6.100 Resumen de Pruebas Geoquímicas – Relaves

Tipo de Relave	Muestra	Pruebas Estáticas						Pruebas Cinéticas	
		ABA y NAG	Mineralogía (QXRD)	Análisis Elemental y Roca Total	Análisis del Sobrenadante	Lixiviación de metales por TCLP	Lixiviación por SFE	Celdas de Humedad (HCT)	Columna Sumergida
Mineral sin procesar (Whole Ore)	EMLR CND	x		x	x			x	
Relaves o colas de Flotación	EMLR-F10KG-3 Tls	x	x	x	x	x	x	x	
Lixiviación de cianuro	EMLR-FCC-CND	x	x	x	x	x	x	x	
Mineral sin procesar (Whole Ore)	RMLR CND	x		x	x			x	
Relaves o colas de Flotación	RMLR-F10KG-4 Tls	x	x	x	x	x	x	x	
Lixiviación de cianuro	RMLR_FCC_CND	x	x	x	x	x	x	x	
Relaves o colas de flotación – gruesos	Flot Tls Coarse	x	x	x		x	x	x	
Relaves o colas de flotación – finos	Flot Tls Fines	x	x	x		x	x	x	

Tipo de Relave	Muestra	Pruebas Estáticas						Pruebas Cinéticas	
		ABA y NAG	Mineralogía (QXRD)	Análisis Elemental y Roca Total	Análisis del Sobrenadante	Lixiviación de metales por TCLP	Lixiviación por SFE	Celdas de Humedad (HCT)	Columna Sumergida
Relaves o colas de flotación					x				
Lixiviación de cianuro	cyanide leach	x		x	x	x	x		x
GER Comp, PP GER Flot Tls	Head sample & flotation tailings	x		x	x	x			
GIR Comp, PP GIR Relaves o colas de flotación	PP GIR Flot Tls	x		x	x	x		x	x
MWR Comp, MWR Comb Relaves o colas de flotación	Head sample & flotation tailings	x		x		x			
TNR Comb, TNR Comb Relaves o colas de flotación	Head sample & flotation tailings	x		x		x			

Tipo de Relave	Muestra	Pruebas Estáticas						Pruebas Cinéticas	
		ABA y NAG	Mineralogía (QXRD)	Análisis Elemental y Roca Total	Análisis del Sobrenadante	Lixiviación de metales por TCLP	Lixiviación por SFE	Celdas de Humedad (HCT)	Columna Sumergida
SPR10% Comp, SPR10% Comb									
Relaves o colas de flotación	SPR10% Comb Tls	x		x	x	x		x	x

Fuente: (Golder Associates Perú S.A., 2020)

c. Pruebas geoquímicas desarrolladas

De acuerdo con lo indicado en los Términos de Referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA Proyectos de Explotación Minera 2016 (ANLA 2016) se realizaron pruebas estáticas en todas las muestras colectadas. De acuerdo con los resultados de las pruebas estáticas, un subgrupo de muestras que incluyen las muestras con RPN (Razón de Potencial de Neutralización) < 3 (menor a tres) fueron sometidas a pruebas cinéticas (Golder, 2020).

La descripción detallada de las metodologías usadas para cada prueba geoquímica se describe en pHase 2013. A continuación, se listan las pruebas desarrolladas en las muestras de roca de desmonte y colas:

I. Pruebas Estáticas

- Prueba balance ácido base (ABA) según el método Sobek modificado.
- Azufre total y carbono inorgánico total (TIC) mediante horno LECO.
- Análisis elemental tras digestión con ácidos fuertes y agua regia.
- Pruebas de generación neta de ácido (NAG) sobre réplicas de muestras de barriles.
- Prueba de extracción por agitación en frasco (SFE), a una tasa de 3:1 de relación líquido a sólido.
- Análisis granulométrico (réplicas de muestras de barriles).
- Procedimiento de lixiviación para caracterización de toxicidad (TCLP), el cual usa una tasa de 20:1 de relación líquido a sólido y pH de reactivo 5.
- Mineralogía mediante Difractometría cuantitativa de rayos X (QXRD) y evaluación petrográfica (réplicas de muestras de barriles) (Golder, Memorando técnico de caracterización geoquímica y potencial generación de drenaje ácido. Proyecto Gramalote, 2020).

II. Pruebas Cinéticas

Celdas de Humedad de muestras de 1 kg: las muestras de roca de desmonte se analizaron mediante el método (Price, 1997). Las colas se analizaron mediante el método estándar ASTM D5744-07e1 (Método de prueba estándar para la meteorización de materiales sólidos en el laboratorio utilizando una celda de humedad). Ambos métodos son similares y utilizan celdas de iguales dimensiones. Se analizaron un total de cinco muestras: dos muestras PAG, dos inciertas y una muestra No PAG. El rango de azufre de las muestras de HCT estuvo entre 0,1% y 1,2%. En 2011, diez muestras correspondientes a intervalos de aproximadamente 60 m de tonalita/granodiorita, material de desmonte y mineral de baja ley fueron usadas para los primeros cinco barriles. El programa de pruebas en barriles se amplió en 2012 para incluir cinco muestras de tonalita/granodiorita, que representan los materiales de las paredes del Tajo Gramalote. Estas muestras compuestas consistían en aproximadamente 120 m de testigo, situado cerca de la parte inferior de cinco sondajes seleccionados, que cruzan las paredes del Tajo Gramalote.



Prueba en columna sumergida (relaves o colas) de 5 kg: evalúan el comportamiento lixiviación de cianuro de los relaves o colas (Cyanide Leach) bajo condiciones de disposición saturadas.

Barriles de campo de 400 kg: para evaluar los materiales en condiciones ambientales de campo. Los lixiviados fueron colectados aleatoriamente dependiendo de la precipitación natural (Golder Associates Perú S.A., 2020).

d. Resultados roca estéril, mineral de baja ley y paredes del tajo Gramalote

La información presentada en los siguientes numerales hace parte del documento Caracterización geoquímica para el proyecto Gramalote, Colombia elaborado por Phase, 2013.

I. Mineralogía

Se realizaron análisis mineralógicos en réplicas de muestras de barriles con el propósito de identificar las fases minerales primarias, haciendo énfasis en las fases de sulfuro y carbonato, así como en los minerales traza. Los resultados de la difracción cuantitativa de rayos X se presenta de manera detallada en Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_DrenMinAci_phase2013 y se resume en la Tabla 5.1.6.101.

En el Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_DrenMinAci_phase2013_Anexo F también contiene los informes petrográficos detallados y el análisis de las principales observaciones se presenta a continuación.

Las muestras de tonalita que fueron examinadas estaban compuestas fundamentalmente por cuarzo y plagioclasa (entre ~55% y ~85% por peso), con cantidades menores de K-feldespato, moscovita, biotita, actinolita, clinocloro y carbonato, y sulfuro en niveles entre insignificantes y menores. Los minerales raros identificados mediante QXRD incluyen laumontita, magnetita y hidroxilapatita. La tonalita exhibe diversos grados de alteración, que variaron entre una alteración selectiva illita/arcilla-clorita a una alteración generalizada K-feldespato sobreimpresa por una alteración sericita-carbonato $\pm$ cuarzo/clorita.

El carbonato proveniente del análisis QXRD consistió en calcita variable (traza al 5%) y cantidades traza de ankerita/dolomita. Las observaciones petrográficas muestran que el carbonato se presenta de la siguiente manera: 1) sustitución desigual, de grano fino a muy fino, de plagioclasa, biotita o hornblenda, 2) vetillas con orillos sericíticos, 3) vetillas de cuarzo-carbonato, 4) relleno de fracturas y/o 5) granos liberados.

Las observaciones petrográficas muestran que los minerales de sulfuro no se encuentran con mucha frecuencia, o se encuentran en cantidades entre residuales y menores. Normalmente se encuentran como piritita inalterada, que aparece entre finamente y muy finamente diseminada en granos euhedrales a anhedrales, en fragmentos alterados de tonalita y sericita-carbonato o clorita, así como granos liberados. También se identificó molibdenita en una muestra.

Tabla 5.1.6.101 Resultados del análisis de difracción cuantitativa de rayos X (%) para réplicas de muestras de barriles

	ID del barril	ID de la muestra	Tipo de roca	Cuarzo	Plagioclasa	K-feldespatos	Clinocloro	Moscovita	Biotita	Actinolita	Calcita	Ankerita/Dolomita	Pirita	Laumontita	Magnetita	Hidroxiapatita	Total
Fase I	FB #1	GR011 90-154_top	Tonalita/granodiorita	25.4	60.6	4.8	1.0		4.9	3.3							100
		GR035 68-128_bottom	Tonalita/granodiorita	28.4	58.2	6.0	1.9		3.0	1.7	0.5	0.3					100
	FB #2	GR015 96-156_top	Tonalita/granodiorita	27.6	48.1	5.9	2.6	6.6	4.4	1.8	3.1						100
		GR028 90-150_bottom	Tonalita/granodiorita	28.7	54.0	7.6	2.1		3.5	1.7	1.2	0.3			0.7	0.3	100
	FB #3	GR114 56-116_top	Tonalita/granodiorita	26.2	42.1	8.7	2.5	12.5	2.1		4.9		0.9				100
		GR025 40-100_bottom	Tonalita/granodiorita	27.9	38.6	11.7	3.5	7.3	2.2	1.9	3.2		0.9	2.7			100
	FB #4	GR008 174-234_top	Tonalita/granodiorita	24.5	44.9	10.9	3.6	10.7			3.7		1.7				100
		GR034 112-172_bottom	Tonalita/granodiorita	28.4	37.9	9.8	3.2	13.8			5.5	0.4	1.0				100
	FB #5	GR007 178-238_top	Tonalita/granodiorita	29.1	27.4	19.1	2.1	14.3			5.1	0.6	2.3				100
		GR118 188-248_bottom	Tonalita/granodiorita	32.7	40.3	12.1	2.3	6.6	1.2		2.1		2.8				100
Fase II	FB #6	GR045 280.6-411	Tonalita/granodiorita	29.6	35.6	14.2	2.5	12.5			3.9		1.7				100
	FB #7	GR069 100-226	Tonalita/granodiorita	28.8	50.9	8.9	2.7	4.6	1.7		1.9		0.5				100
	FB #8	GR091 199.1-326.3	Tonalita/granodiorita	25.7	53.3	5.5	2.8	5.7	3.1	1	2.6		0.3				100
	FB #9	GR101 80.77-209.4	Tonalita/granodiorita	27.3	50.8	7.5	3	4.4	3.4	1.4	1.9		0.3				100
	FB #10	GR102 88.5-208,5	Tonalita/granodiorita	25.6	59.4	6.4	0.9		5	2	0.7						100

Fuente: pHase, 2013.

II. Potencial de drenaje ácido de roca

El potencial de drenaje ácido de roca (DAR) se ha evaluado con base en los resultados de las pruebas estáticas, principalmente en los resultados de las pruebas de balance ácido base (ABA), verificados posteriormente mediante pruebas cinéticas.

La prueba ABA mide el pH en pasta, el azufre total y el azufre sulfato, y calcula el sulfuro de azufre (por diferencia) y el potencial de ácido (AP) en unidades equivalentes de kg CaCO₃/t.

El procedimiento también mide el potencial de neutralización (NP) por titulación en unidades de kg CaCO₃/t y el carbono inorgánico total (TIC) como una indicación del contenido de carbonato potencialmente disponible para la neutralización. Los resultados de la prueba ABA se proporcionan en Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_DrenMinAci_phase2013_Anexo G.

La especiación de azufre en los datos de la prueba ABA indica que el sulfuro de azufre, que es normalmente la especie activa de azufre en la generación de ácido, es la forma dominante de azufre en el conjunto de datos y una buena aproximación al contenido total de azufre, como se ilustra en la Figura 5.1.6.222 por tipo de roca y en la Figura 5.1.6.223 por tipo de alteración.

El contenido total de azufre también se muestra en el diagrama de caja estándar y bigotes en la Figura 5.1.6.224 se indica generalmente cierta variabilidad en el contenido de azufre con respecto al tipo de roca y con el tipo de alteración la tendencia no es marcada (Figura 5.1.6.225).

Una amplia gama de azufre se detectó dentro de la tonalita, entre 0,01 a 3,2%, con un promedio de 0,3%. Promedios similares de ~0,3 a 0,4% se registraron también en unidades de diorita y aplita. Valores bajos de azufre total se observan en unidades de saprolito, roca saprolítica, cuarzodiorita y dacita, con promedios menores a 0,1%. Un mayor contenido de azufre promedio se observó en las muestras registradas como salbanda (gouge) y veta, en niveles de 0,5% y 1,6%, respectivamente.

Los esquemas usados típicamente para ilustrar los resultados de la prueba ABA se proporcionan en las Figura 5.1.6.226, Figura 5.1.6.227, junto con la serie de datos ilustrativos de los tipos de rocas. Las clasificaciones DAR por tipo de roca y los resultados completos se tabulan en Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_DrenMinAci_phase2013_Anexo G.

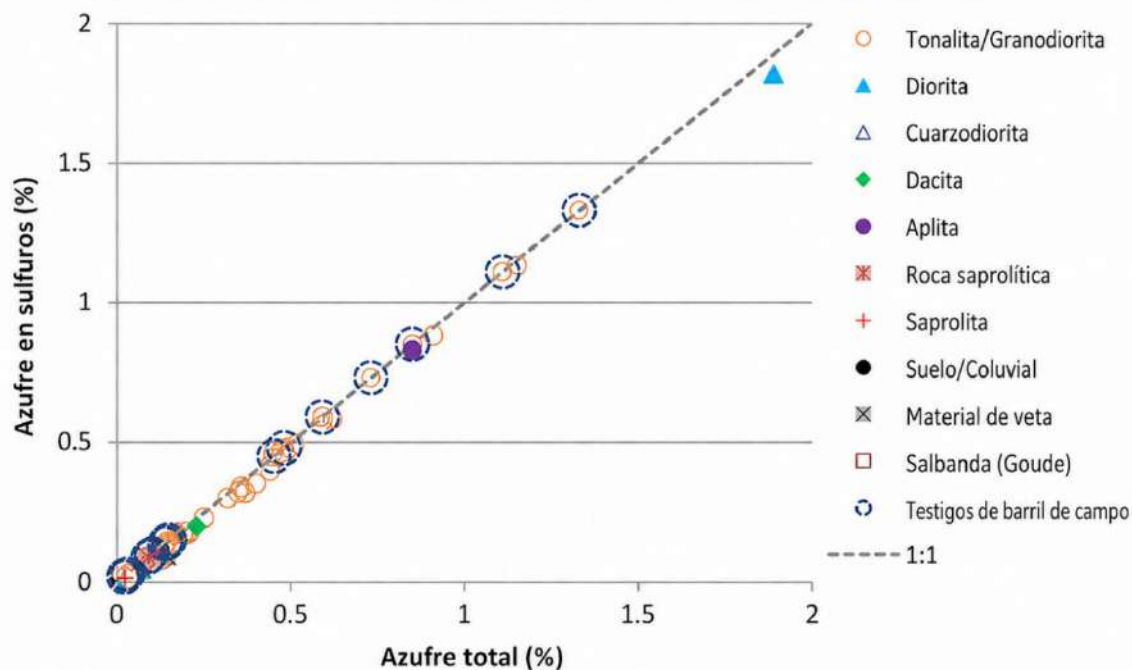


Figura 5.1.6.222 Sulfuro de azufre versus azufre total por tipo de roca (n= 70)
Fuente: pHase, 2013.

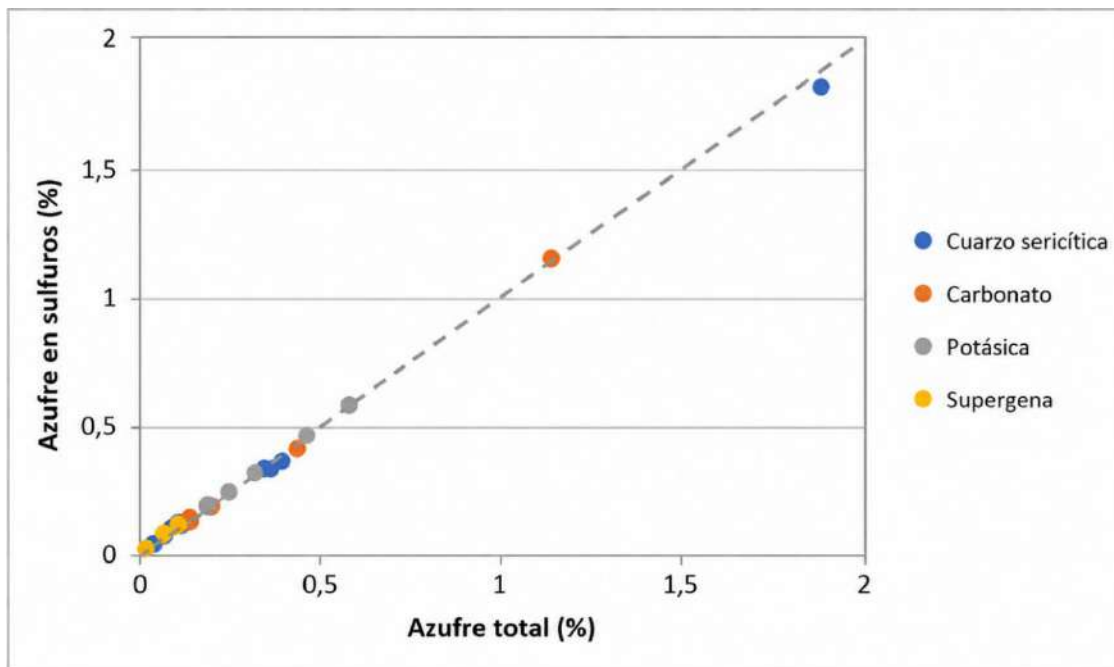


Figura 5.1.6.223 Sulfuro de azufre versus azufre total por tipo de alteración (n= 26)
Fuente: pHase, 2013.

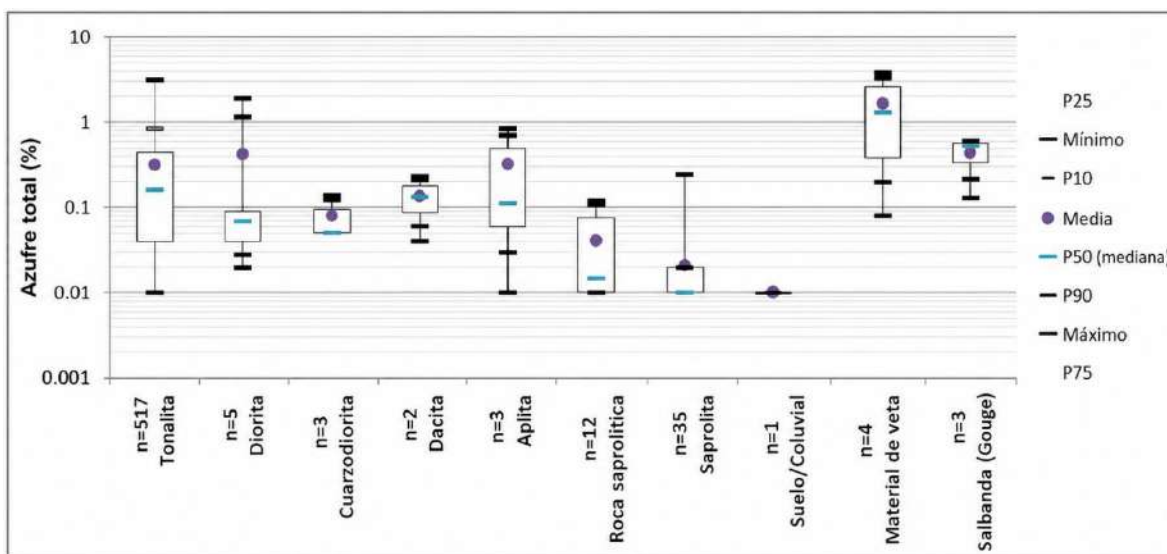


Diagrama de caja y bigotes de azufre total por tipo de roca

(Este gráfico es un diagrama convencional de caja y bigotes. Los extremos superior e inferior muestran los valores mínimos y máximos, las graduación fuera de la caja muestran los percentiles 10 y 90, los márgenes exteriores de la caja muestran los percentiles 25 y 75, la línea central en el cuadro muestra el valor de la mediana y el punto muestra la media aritmética).

Figura 5.1.6.224 Diagrama de cajas y bigotes de azufre total por tipo de roca
Fuente: pHase, 2013.

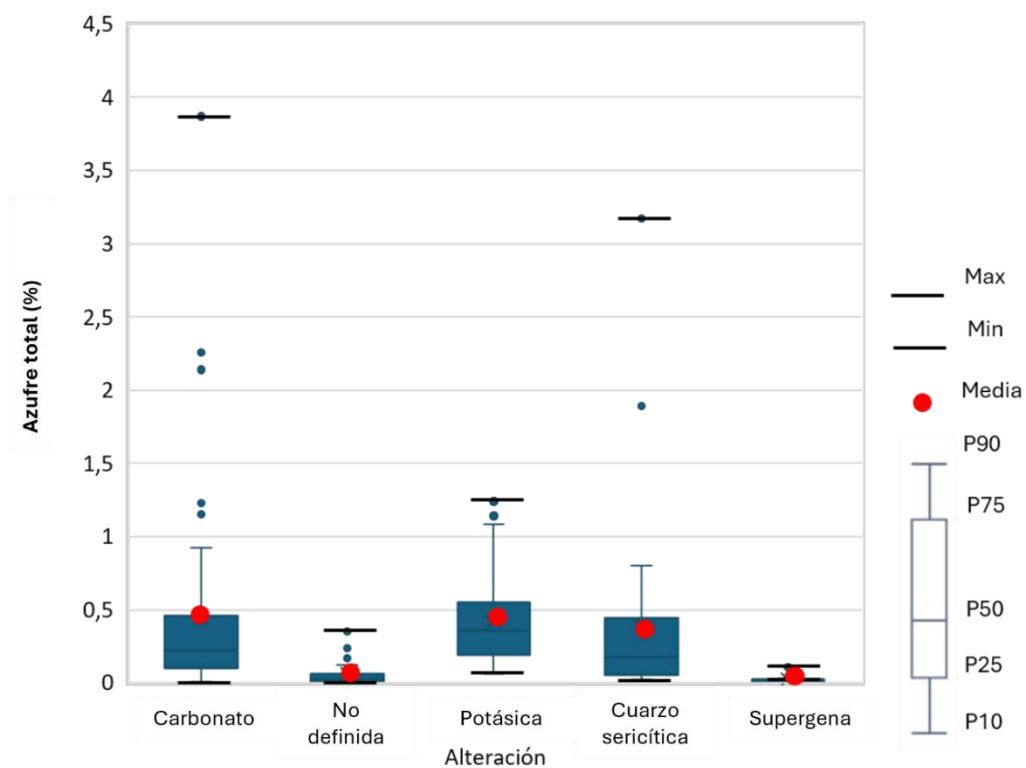


Figura 5.1.6.225 Diagrama de cajas y bigotes de azufre total por tipo de alteración
Fuente: pHase, 2013.

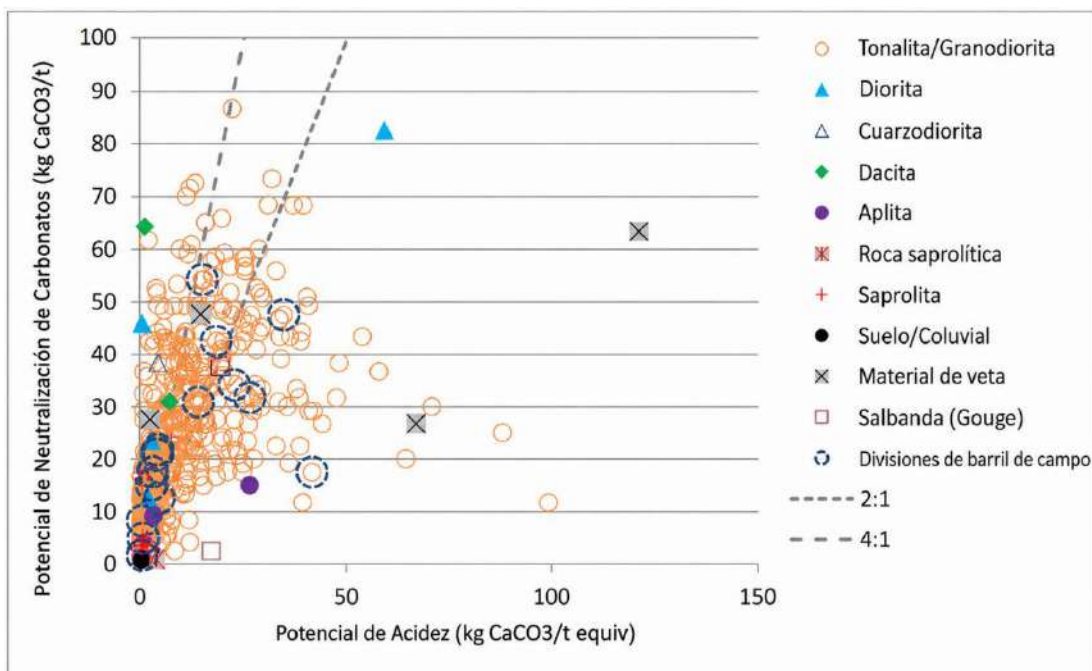


Figura 5.1.6.226 NP de carbonato versus potencial ácido por tipo de roca (n=585)
Fuente: pHase, 2013.

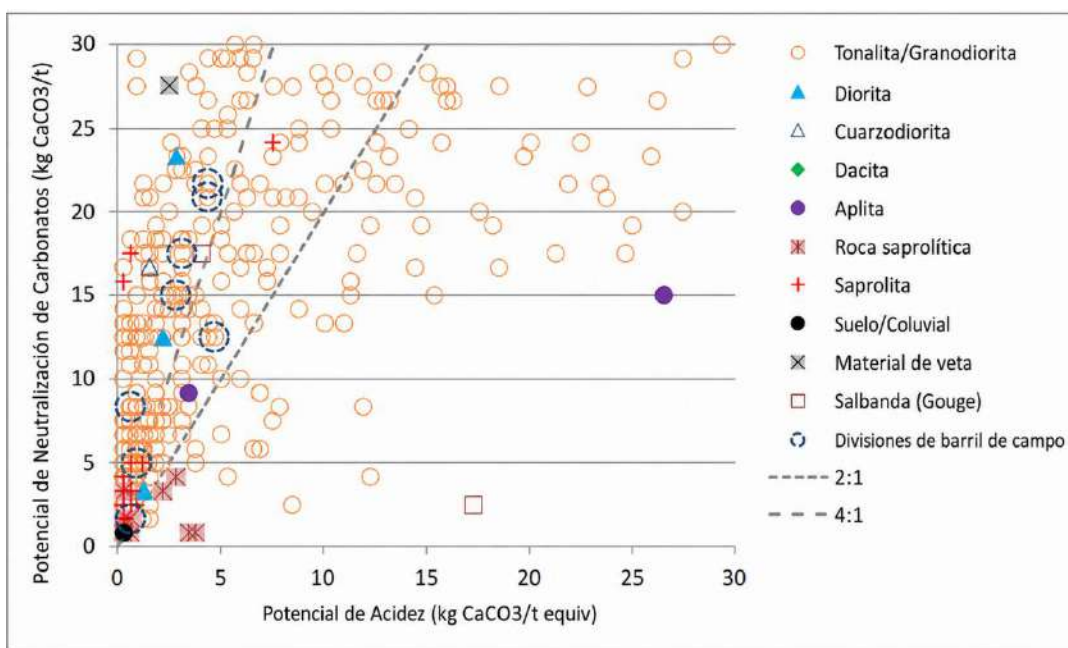


Figura 5.1.6.227 Detalle a escala amplia de NP de carbonato versus potencial ácido por tipo de roca (n=585)
Fuente: pHase, 2013.

Las Figura 5.1.6.228 y Figura 5.1.6.229 muestran la relación entre el azufre total y el potencial de neutralización (NPR) para la tonalita con base en los ensayos ABA y la base de datos de exploración, respectivamente. Aproximadamente el 0,15% de azufre total representa el valor por debajo del cual la gran mayoría de las muestras presentan un NPR superior a 2.

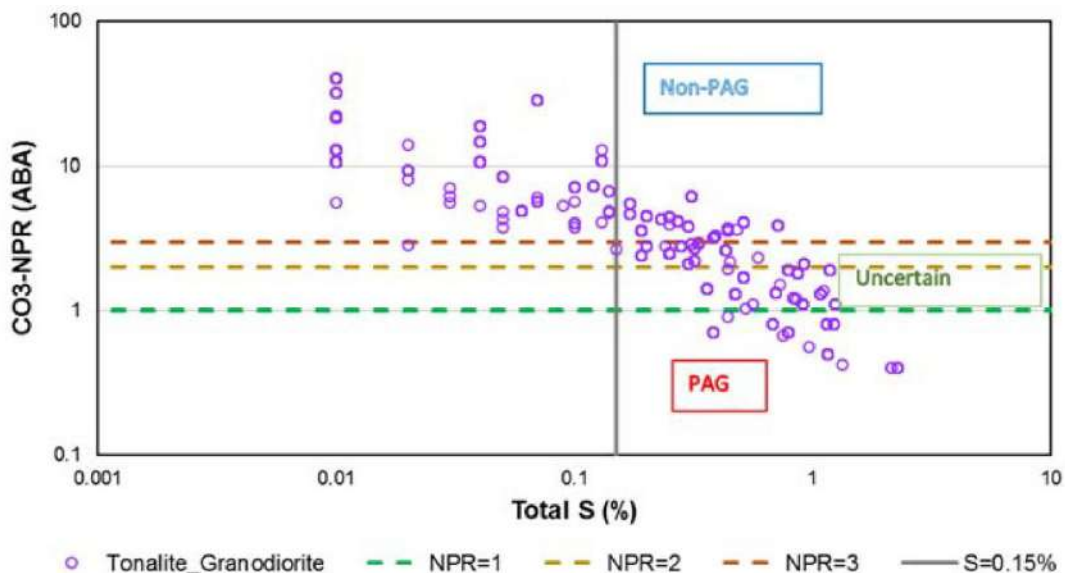


Figura 5.1.6.228 Azufre total vs CO3-NPR (ABA) Tonalita
Fuente: Golder, 2020.

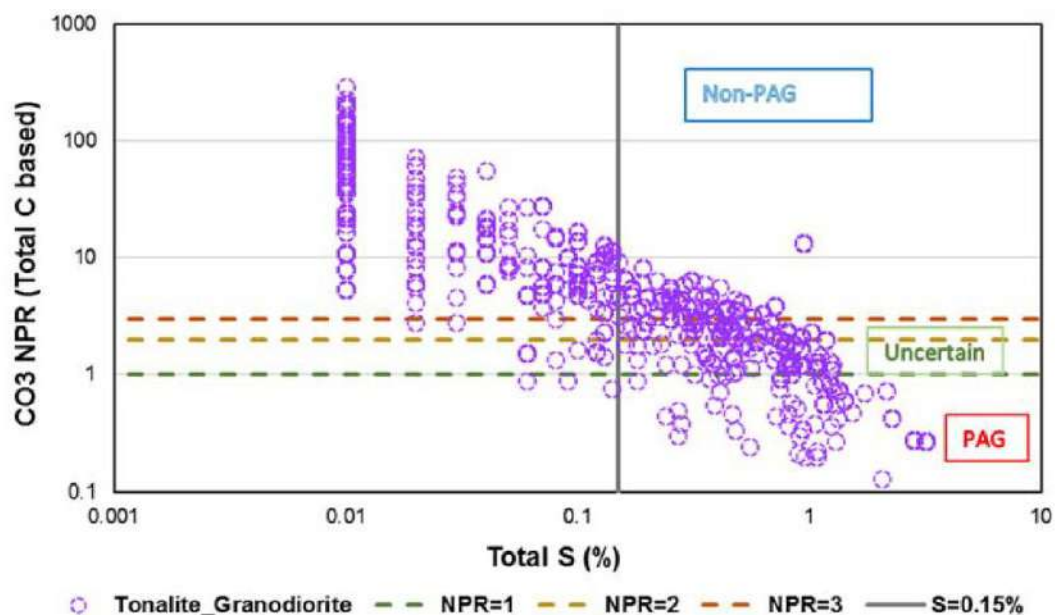


Figura 5.1.6.229 Azufre total vs CO3-NPR (Total Carbono) – Tonalita
Fuente: Golder, 2020.

Las Figura 5.1.6.230 y Figura 5.1.6.231 muestran las mismas relaciones para el saprolito. Según los resultados de ABA, casi todas las muestras con un contenido de azufre total inferior al 0,15 % presentan una NPR superior a 2. Si se considera la base de datos de exploración con la NPR calculada a partir del carbono total, todas las muestras con $S < 0,15\%$ tienen valores de NPR superiores a 2.

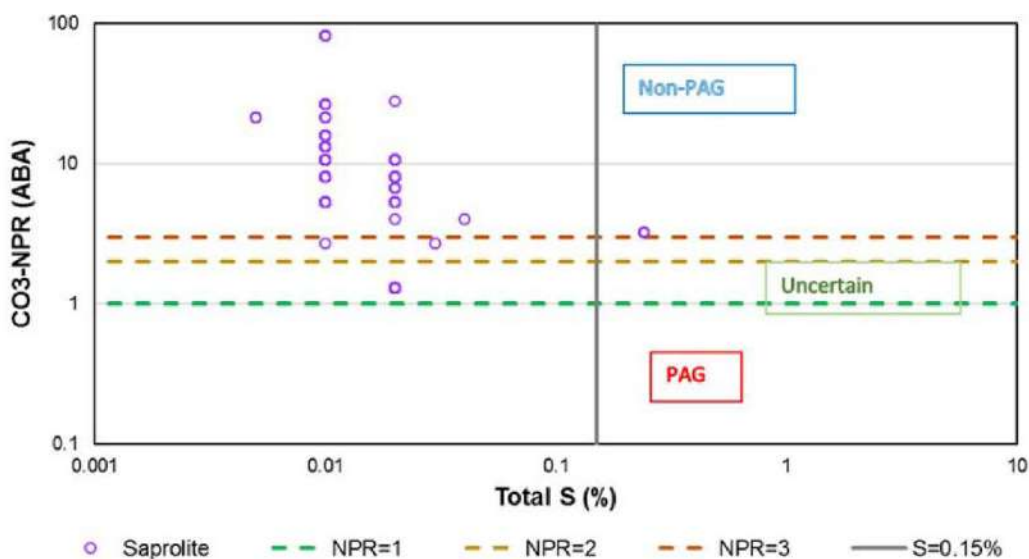


Figura 5.1.6.230 Azufre total vs CO₃-NPR – Saprolito
Fuente: Golder, 2020.

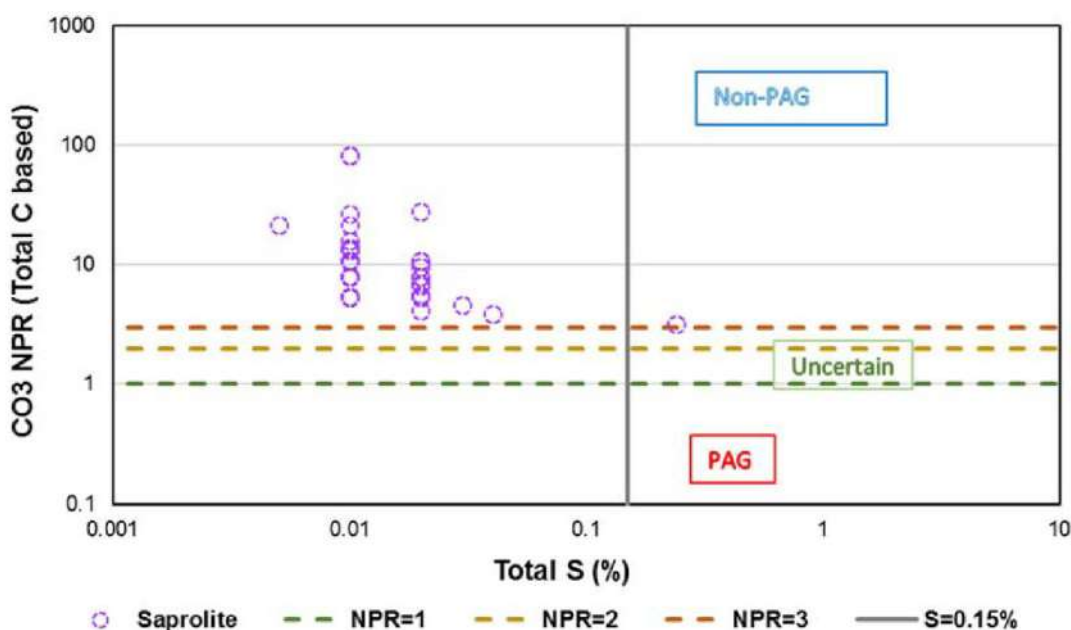


Figura 5.1.6.231 Azufre total vs CO₃-NPR (Total Carbono) – Saprolito
Fuente: Golder, 2020.

Por último, las Figura 5.1.6.232 y Figura 5.1.6.233 presentan las relaciones entre el NPR y el contenido de azufre para la roca saprolítica. Algunas muestras con $S < 0,15\%$ presentan valores de NPR inferiores a 2, pero la cantidad total de roca saprolítica es reducida. Dado que la roca saprolítica es un material que ha sufrido meteorización, es probable que una mayor proporción del azufre total se encuentre en forma de sulfato en lugar de sulfuro. Por consiguiente, el valor umbral de azufre del $0,15\%$ también puede aplicarse a la roca saprolítica.

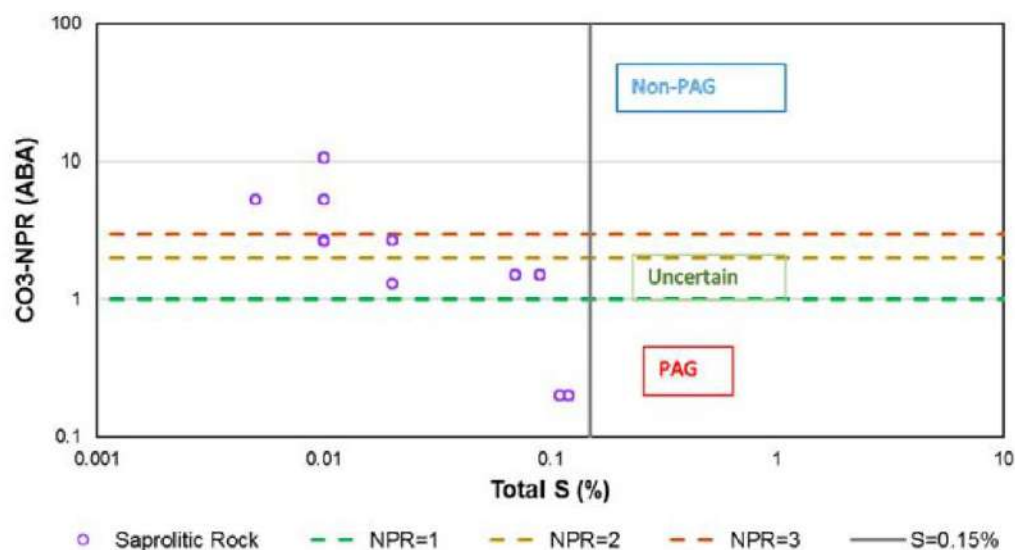


Figura 5.1.6.232 Azufre total vs CO3-NPR – roca saprolítica
Fuente: Golder, 2020.

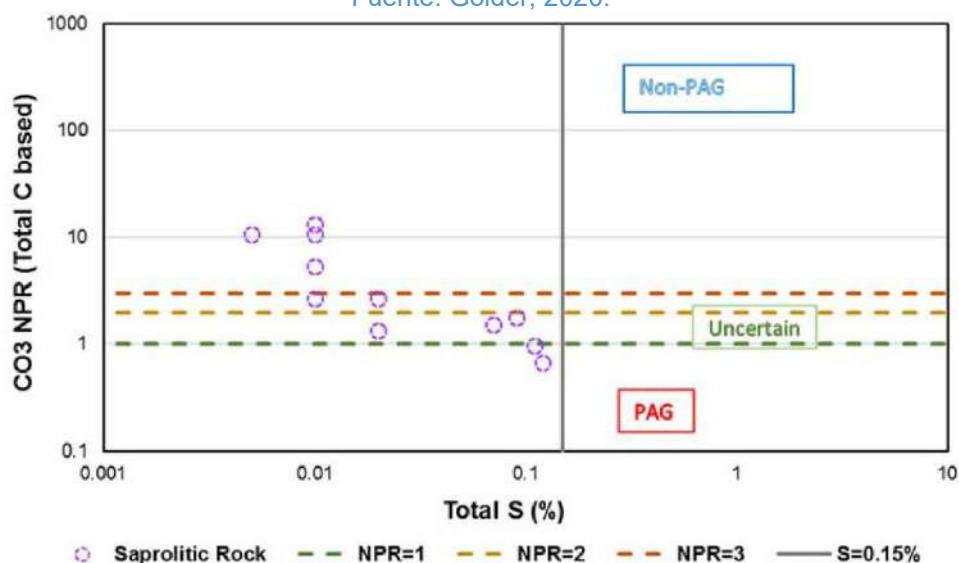


Figura 5.1.6.233 Azufre total vs CO3-NPR (Total Carbono) – roca saprolítica
Fuente: Golder, 2020.

No hay ninguna relación litológica con el potencial de DAR, y se observa una dispersión típica independientemente del tipo de roca. Si existe una fuerte tendencia a que una mayor proporción de muestras clasifiquen como PAG en el material registrado como zonas de salbanda o vetas debido al mayor contenido de sulfuro asociado a estas estructuras.

Los valores de pH medido en pasta que también se miden en la prueba ABA proporcionan una indicación de la acidez actual. En todos los casos, los valores de pH medido en pasta fueron ligeramente alcalinos, s excepción de las muestras de saprolito, que son débilmente ácidas (pH medido en pasta de ~ 5,5), aunque sin sulfuro residual para potencial de ácido adicional. Los resultados ligeramente alcalinos son normales en cuanto a lo que cabría esperar en muestras de testigo que se han sometido a muy poca oxidación.

Las muestras que representan las pruebas en barriles se sometieron también a un método de prueba llamado generación neta de ácido o prueba NAG, en la que se aplica un oxidante fuerte (H_2O_2) a la muestra con el propósito de oxidar completamente el contenido de sulfuro y posteriormente neutralizar la acidez durante la prueba. El equilibrio entre el oxidante añadido y la reacción de neutralización indica si la condición neta es ácida o básica.

La interpretación de los resultados se basa en si el pH resultante, denominado pH de NAG, está por encima o por debajo del pH del reactivo H_2O_2 (típicamente 4,5).

Las muestras seleccionadas para las pruebas en barriles y, por lo tanto, para la prueba NAG, representan un material con un amplio rango de contenido de sulfuro. Los resultados del pH NAG se muestran con referencia al contenido de sulfuro de azufre, e indican que incluso las muestras con un contenido de azufre de hasta 1,0% pueden ser no PAG (Figura 5.1.6.234). Una de las muestras, con un contenido de sulfuro de 1,3%, se confirmó como PAG.

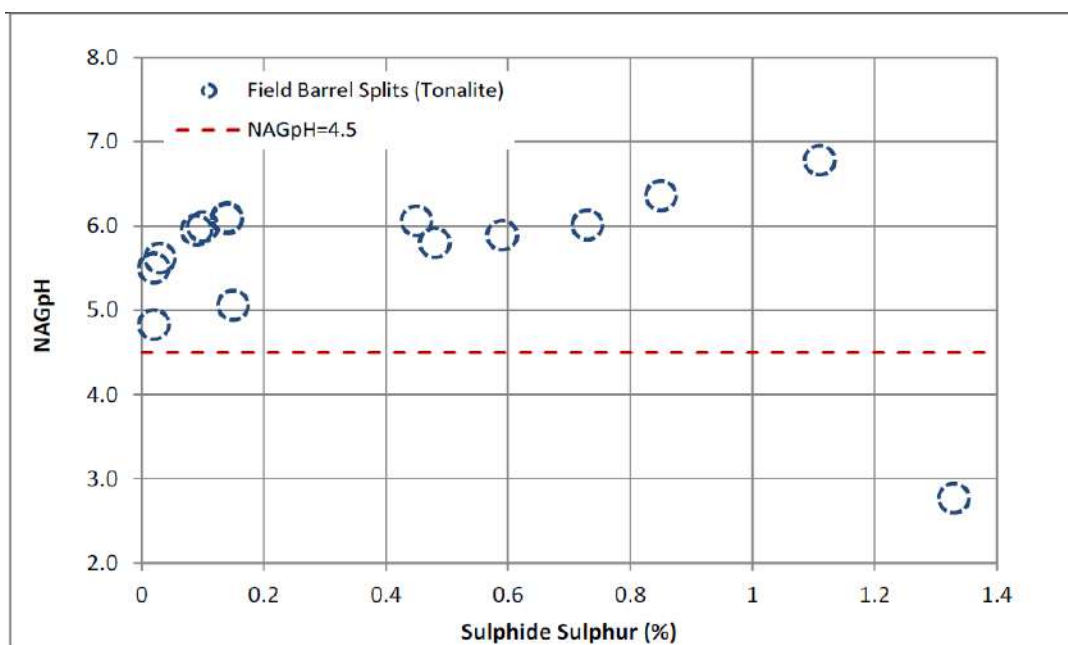


Figura 5.1.6.234 Sulfuro de azufre versus pH NAG en réplicas de muestras de barril
Fuente: pHase, 2013.

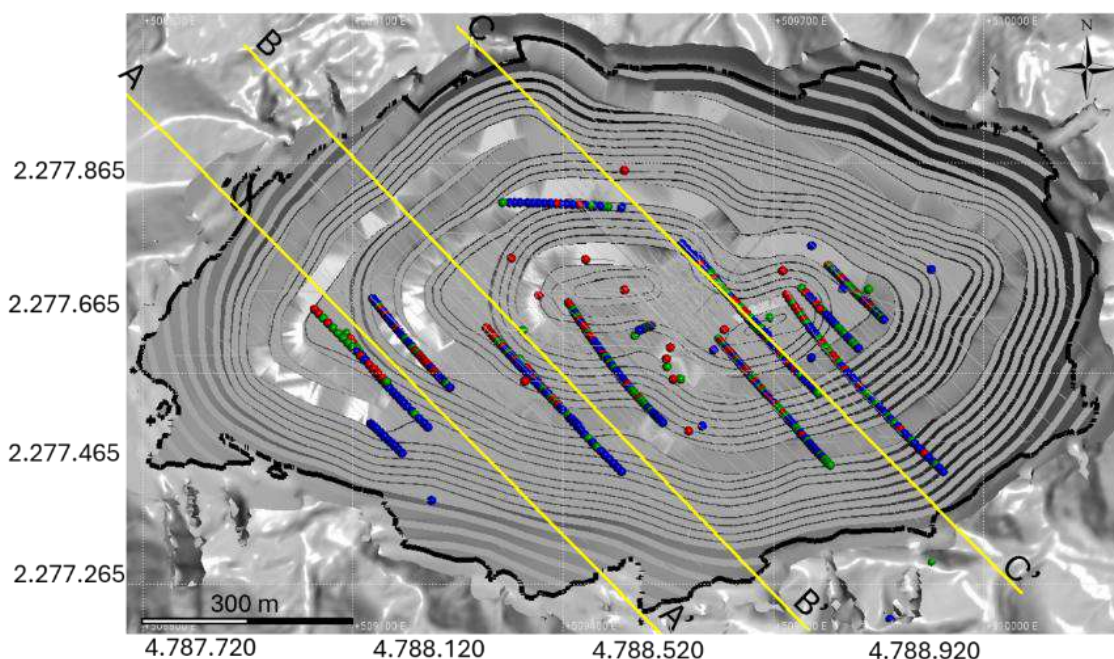
III. Distribución de potencial de generación de ácido

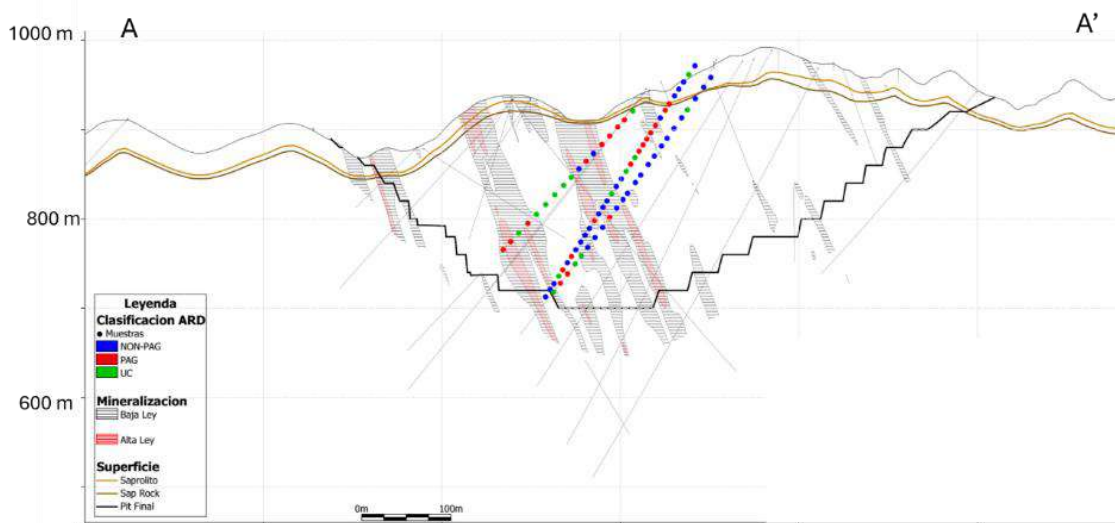
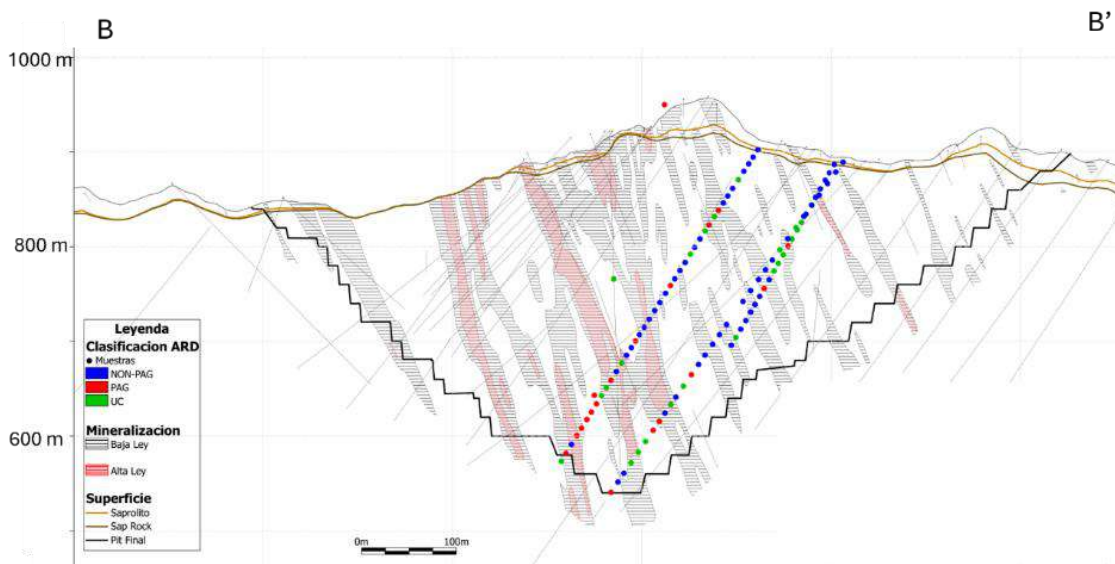
A continuación, se presenta la distribución de la clasificación de muestras según el potencial de drenaje ácido en planta y secciones (Figura 5.1.6.235), teniendo en cuenta los muestreos los resultados de laboratorio analizados en la respuesta anterior.

Acorde a los resultados obtenidos, el contenido de sulfuro está asociado en gran medida a la presencia de vetas. Se observa un mínimo de pirita diseminada, cuya abundancia es generalmente baja (el promedio de todas las muestras en la base de datos de exploración es ~ 0,3%, incluyendo intervalos de mineral).

Para plantear zona de potencial de generación de ácido, acorde a los hallazgos de la caracterización geoquímica, el contenido de azufre se correlaciona con el oro y la plata. Por lo tanto, se prevé que las zonas con contenido más alto de azufre, con un mayor potencial de generación de ácido estarían asociadas en su mayoría a las zonas de mineralización (alta ley, baja ley).

A partir del planteamiento anterior, se observa un aumento de la mineralización hacia el noreste. La sección C-C' exhibe mayor porcentaje de franjas de mineralización en comparación con la sección B-B' y A-A' localizadas hacia el suroeste del tajío.





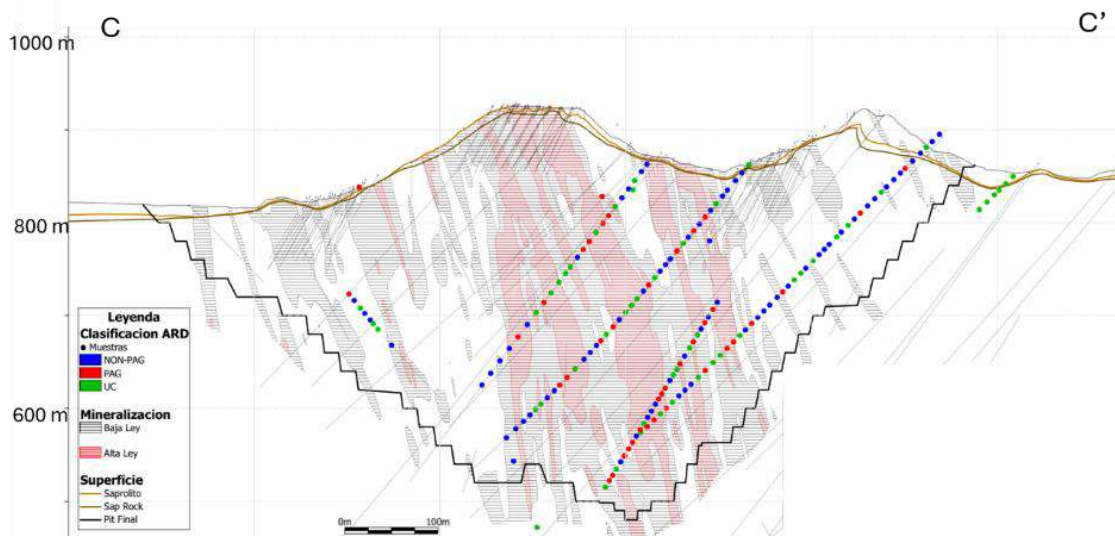


Figura 5.1.6.235 Distribución en planta y sección de muestras clasificada como no-PAG, PAG y UC.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

IV. Conclusiones

El contenido de sulfuro está asociado en gran medida a la presencia de vetas y vetillas. Se observa un mínimo de pirita diseminada, cuya abundancia es generalmente baja (el promedio de todas las muestras en la base de datos de exploración es ~ 0,3%, incluyendo intervalos de mineral). La distribución de las vetas controla las zonas con potencial DAR. Dado que la mineralización es de tipo “stockwork”, cabría esperar que las zonas con mayores leyes de oro coincidieran también con las áreas de mayor contenido de azufre.

La mineralización de oro está fuertemente asociada a las muestras registradas como material de veta. Los valores promedio de bismuto, cobre, molibdeno, plomo, tungsteno y azufre también son más elevados en el material de veta, lo que refleja la presencia de sulfuros (y sulfosales) en las vetillas del yacimiento. Los contenidos promedio de molibdeno y plata son más altos en las unidades de aplita y dacita.

Los resultados ABA verifican el bajo contenido de azufre y en consecuencia el bajo AP. Los resultados ABA también indican un NP generalmente bajo. Con base en la clasificación ANLA (2016) aproximadamente el 52% de las muestras clasifican como no- PAG, 40% de las muestras clasifican con potencial no definido y el 8% restante de las muestras clasifican como PAG.

En términos generales las pruebas NAG verifican la clasificación obtenida con base en las pruebas ABA para las muestras clasificadas como PAG y no-PAG, pero sugieren que las muestras clasificadas con potencial no definido según las pruebas ABA pueden ser no-PAG.

A partir de los análisis realizados se presenta en la distribución en porcentaje de los materiales PAG, potencial incierto y no-PAG por litología. La litología de veta representa el

valor más alto clasificado como PAG con un 55%, seguido por roca tipo Aplita con el 30%. Para la roca tipo tonalita-granodiorita el material PAG es menos del 10%.

En la Figura 5.1.6.237 se presenta la distribución por alteraciones. El material clasificado como PAG se asocia en su mayoría (57%) a la alteración Carbonato (CARB), seguido de la alteración QTZSER y POT con un 14% cada una.

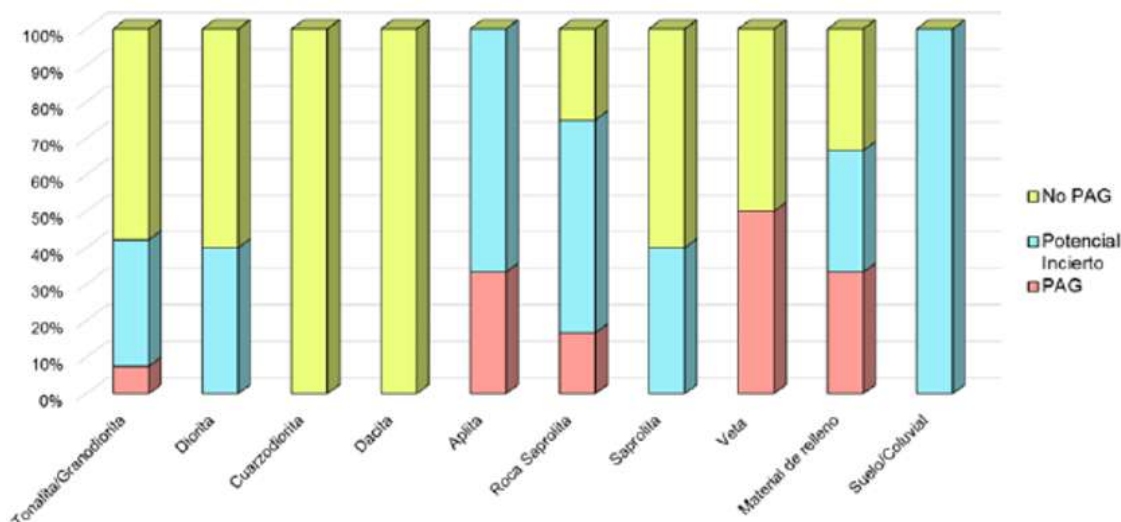


Figura 5.1.6.236 Clasificación DAR por litologías.

Fuente: Golder, 2020.

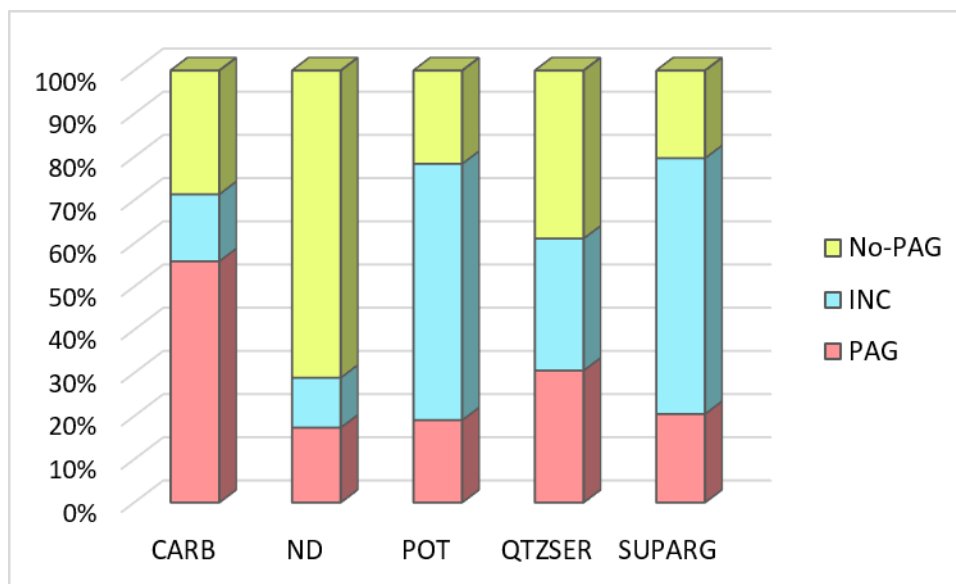


Figura 5.1.6.237 Clasificación DAR por alteraciones.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

De la geoquímica del yacimiento se concluye que:

- El depósito se encuentra alojado casi predominantemente dentro de una tonalita compuesta por biotita y hornblenda y una granodiorita intrusiva (pHase Geochemistry, 2013).
- La mineralización está controlada estructuralmente dentro de un conjunto de vetas agrupadas de cuarzo. Las vetas incluyen vetillas de cuarzo con pirita de grano fino (Tipo 1), vetillas de cuarzo-carbonato (Tipo 2) y vetillas de cuarzo con pirita granular (Tipo 5) (pHase Geochemistry, 2013).
- El contenido de sulfuro está asociado en gran medida a la presencia de estas vetillas. Solo se observa un mínimo de pirita diseminada, cuya abundancia es generalmente baja (el promedio de todas las muestras en la base de datos de exploración es ~ 0,3%, incluyendo intervalos de mineral) (pHase Geochemistry, 2013)
- El contenido de azufre se correlaciona con el oro y la plata. Por lo tanto, se prevé que las zonas con contenido más alto de azufre clasifiquen como mineral (pHase Geochemistry, 2013)
- El estudio de testigos de perforación muestra correlaciones entre ciertos parámetros tal como se espera teniendo en cuenta el tipo de mineralización, así como la mineralogía de sulfuro y sulfosales (pHase Geochemistry, 2013).

Los resultados de las pruebas cinéticas fueron usados para confirmar la clasificación PAG y No PAG, así como brindar más información acerca de las muestras clasificadas con potencial incierto (Golder, Memorando tecnico de caracterizacion geoquimicay potencial generacion de drenaje acido. Proyecto Gramalote, 2020). Estos resultados se presentan y se discuten en el capítulo de hidrogeología de acuerdo con el orden que plantean los Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental Proyectos de Explotación Minera” (ANLA, Términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA Proyectos de Explotación Minera , 2016).

B. Potencial de generación de contaminantes lixiviados – pruebas de lixiviación a corto y largo plazo

Esta información es descrita por (pHase Geochemistry, 2013) y determina la liberación de sustancias tóxicas, donde se emplearon pruebas por agitación en frasco (SFE), TCLP y el seguimiento de lixiviados en pruebas cinéticas.

Para las pruebas a corto plazo (SFE/TCLP) los resultados de extracción SFE en roca estéril indican una buena calidad de agua con pH neutro a alcalino y niveles bajos de metales solubles.

Para las pruebas cinéticas, en las celdas de humedad y barriles de campo, las tasas de lixiviación de parámetros de interés (SO₄, Cu, Mo, As y Se) han sido generalmente bajas.

Para el material que será dispuesto en el depósito de relaves, los relaves de flotación se clasifican como No PAG y muestran una lixiviación insignificante, por el contrario, los relaves de lixiviación de cianuro son claramente PAG y tienen potencial de lixiviar Cd, Cu, Ni, Pb y Zn si se desarrollan en condiciones ácidas. El potencial de generación de contaminantes lixiviados se puede identificar en el Anexos_Caracterización_Hidrogeologia_AXO_DrenMinAci, esta información no presenta

variación o modificación debido a que las características geológicas y geoquímicas conservan su homogeneidad en el tiempo.

a. Identificación de contaminantes de interés

De acuerdo con los resultados geoquímicos obtenidos en los estudios de pHase Geochemistry, (2013) y Golder, (2020), es posible identificar como contaminantes de interés aquellos elementos que presentan mayor movilidad potencial bajo escenarios de meteorización y lixiviación, particularmente en materiales asociados a zonas mineralizadas y en los relaves del proceso. Los ensayos estáticos y cinéticos realizados que incluyen los análisis elementales por digestión ácida, pruebas SFE y TCLP, así como celdas de humedad y barriles de campo; evidencian que la liberación más significativa se asocia a metales vinculados a la mineralización sulfurada, principalmente aquellos correlacionados con el contenido de azufre, tales como hierro, y en menor medida elementos traza presentes en sulfuros y sulfosales.

Si bien la roca huésped presenta baja reactividad y reducida liberación de metales, los materiales mineralizados y los relaves bajo condiciones de oxidación o saturación pueden movilizar metales típicamente relevantes en sistemas auríferos, tales como arsénico, plomo y otros elementos traza evaluados en las pruebas de lixiviación. De esta manera, los resultados existentes permiten conocer que el riesgo de liberación se concentra en materiales con mayor contenido de pirita. Los análisis de contaminantes se pueden identificar en Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_DrenMinAci, esta información no presenta variación o modificación debido a que las características geológicas y geoquímicas conservan su homogeneidad en el tiempo.

El análisis de los lixiviados NAG también se llevó a cabo para proporcionar una indicación de los metales traza liberados durante la oxidación. La composición química de los lixiviados NAG se proporciona en el Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_DrenMinAci_phase2013_Anexo H. Las concentraciones fueron generalmente bajas, incluso en la muestra (field barrel # 5_bottom) que tenía una condición ácida neta después de la oxidación, a excepción del parámetro ocasional (Cu, Fe, Zn, etc.) típicamente móvil en un pH ácido.

I. Análisis elementales

Los análisis de metales en testigos de exploración se pueden usar también como una herramienta de detección para cuantificar la composición básica de la roca estéril y proporcionar una indicación de qué parámetros pueden estar por encima de lo que se considera normal.

Esta comparación se basa generalmente en la abundancia cortical promedio. Según lo recomendado por Price (1997), si un metal está presente en cantidades diez veces mayores a lo que es típico, el parámetro se considera elevado o anómalo (es decir, un orden de magnitud superior a la media). Esto no significa necesariamente que el elemento sea motivo de preocupación con respecto a la lixiviación de metales. El elemento puede estar presente en una fase mineral que no es susceptible a la lixiviación.

El Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_DrenMinAci_phase2013_AnexoJ contiene los resultados completos de los análisis de metales, con los valores que superan el umbral diez veces resaltado en color rosa. En la Tabla 5.1.6.102 se presenta un resumen

de los valores que exceden la abundancia cortical. Este conjunto de elementos es consistente con la presencia de minerales de sulfuro en la roca estéril.

Tabla 5.1.6.102 Resumen de parámetros que exceden diez veces las abundancias corticales

Depósito	Valores en exceso consistentes (>75% de las muestras)	Valores en exceso ocasionales	Valores en exceso poco comunes (<10% de las muestras)
Tonalita/granodiorita	Au, Bi	Ag, Cu, S, Sb	Cr, Mo, Se, W
Diorita	Au, Bi	Ag, Co, Cu, Mg, Sr, W	
Cuarzodiorita	Bi, Co, Cr, Mg		
Dacita	Bi, Se	Au	
Aplita	Bi	Au, Ag, S	
Roca saprolítica	Bi	Au, Ag, Cu, Sb	Mg, Mo, Se, W
Saprolito	Bi	Au, Ag, Co, Cu, Sb	Cr, Mg, Mo, Ni, Se, W
Material de vetas	Au, Bi, Cu, S	Ag	
Salbanda	Bi	Au, Ag, Cu, Mo, S	
Suelo/coluvial	Au, Ag, Bi, W		

Fuente: pHase, 2013.

II. Pruebas de extracción de lixiviados

Las muestras que representan los barriles (materiales del fondo) de los cinco primeros barriles (FB#1 a FB#5) fueron sometidas a pruebas a corto plazo (24 horas) de extracción de lixiviados con matraz de agitación (SFE), usando una relación de agua a sólido de 3:1 con el fin de evaluar la proporción de una muestra que pueda ser extraída con facilidad actualmente o que sea soluble cuando se expone a agua destilada y desionizada de pH neutro. Los resultados de la SFE para parámetros se presentan en el Anexos_Caracterización_Hidrogeología_AXO_DrenMinAci_Phase2013_Anexo K.

Los resultados de la SFE en réplicas de muestras de barriles indican muy buena calidad de agua, con un pH de lixiviados entre neutral y alcalino, bajo sulfato y generalmente bajos niveles de metales solubles. Una excepción fue el molibdeno, que reportó concentraciones solubles de hasta ~0,1 mg/L en uno de los lixiviados. Todos los parámetros se encuentran dentro de valores normales y muchos metales traza de posible interés se encuentran cerca o por debajo del nivel de detección (As, Bi, Cd, Zn, Sb y Se).

III. Pruebas cinéticas de celdas de humedad

Para evaluar de manera más cuantitativa el comportamiento cinético de los lixiviados, se ejecutaron pruebas de celdas de humedad en cinco muestras de materiales de roca estéril del depósito Gramalote. Tres de las celdas (1G, 2G, 3G) representan intervalos de 2 metros de testigo, y dos de las muestras (4G y 5G) son las réplicas del programa de pruebas en barriles (FB#2 y FB#3, respectivamente), que representan intervalos de testigo significativamente mayores (aproximadamente 60 metros de longitud).

Una de las celdas (1G) representa roca saprolítica mientras que las cuatro restantes comprenden tonalita/granodiorita con diferentes contenidos de azufre (rango de 0,15 a



1,15%). Las pruebas en celdas de humedad se llevaron a cabo en SGS Canadá en Burnaby, Columbia Británica, usando el procedimiento MEND (1991) (Anexos_Caracterización_Hidrogeologia_AXO_DrenMinAci_Phase2013_AnexoD).

La Tabla 5.1.6.103 resume los resultados de lixiviados de las pruebas de celdas de humedad realizadas hasta la fecha como concentraciones en condiciones estables y la Tabla 5.1.6.104 los presenta como tasas de liberación para parámetros clave.

Las condiciones estables representan las concentraciones promedio para el período de tiempo siguiente al flujo inicial para cada muestra individual. El flujo inicial se determinó inspeccionando las tendencias de sulfato con base en muestras específicas y se llevó a cabo, en general, durante las primeras semanas de pruebas. Las velocidades de liberación se determinaron a partir de las concentraciones estables convertidas a unidades de mg/kg/semana.

Tabla 5.1.6.103 Resumen de concentraciones estables para parámetros seleccionados pruebas de celdas de humedad en roca estéril (en mg/L).

ID de la celda de h.	ID de la muestra	Litología	Alk	SO4	Al	As	Ca	Cd	Cr	Co	Cu	Mo	Ni	Sb	Se	Zn
HC 1G	10014118 (GR032 2 a 4)	Roca saprolítica	1	4	0.05	2.3e-5	1.6	4.1e-5	5e-4	1.7e-5	2.4e-3	1.7e-4	2e-4	2e-4	5.3e-5	2.3e-3
HC 2G	10009348 (GR014 100 a 102)	Tonalita/Granodiorita	20	6	0.13	2.7e-4	7.9	3e-6	5e-4	5e-5	1.5e-3	5.8e-3	1.2e-4	2e-4	5e-5	1.7e-3
HC 3G	10021382 (GR043 104 a 106)	Tonalita/Granodiorita	16	9	0.09	2.1e-4	8.3	4.1e-5	5e-4	5e-5	4.4e-3	6.3e-4	1.3e-4	2e-4	6.4e-5	2.7e-3
HC 4G	FB #2 (GR028 90 a 150)	Tonalita/granodiorita	19	20	0.11	2.6e-4	14.4	6e-6	5e-4	1.1e-4	1.8e-3	1.7e-3	2e-4	2e-4	5.4e-5	1.5e-3
HC 5G	FR #3 (GR025 40 a 100)	Tonalita/granodiorita	11	4	0.08	2.3e-4	4.3	9e-6	5e-4	2e-5	6e-4	3.2e-4	1e-4	2e-4	7.7e-5	1.6e-3

Fuente: pHase, 2013.

Tabla 5.1.6.104 Resumen de concentraciones estables para parámetros seleccionados pruebas de celdas de humedad en roca estéril (en mg/L).

ID de la celda de h.	ID de la muestra	Litología	Alk	SO4	Al	As	Ca	Cd	Cr	Co	Cu	Mo	Ni	Sb	Se	Zn
HC 1G	10014118 (GR032 2 a 4)	Roca saprolítica	0.6	1.6	2.5e-2	1.1e-4	0.8	1.9e-5	2.3e-4	7.8e-5	1.1e-3	1e-4	9e-5	9e-5	2.5e-5	1.1e-3
HC 2G	10009348 (GR014 100 a 102)	Tonalita/Granodiorita	9.2	2.9	6.4e-2	1.2e-4	3.6	1e-6	2.3e-4	1.9e-5	8e-4	2.4e-3	6e-5	9e-5	1.8e-5	8.3e-4

ID de la celda de h.	ID de la muestra	Litología	Alk	SO ₄	Al	As	Ca	Cd	Cr	Co	Cu	Mo	Ni	Sb	Se	Zn
HC 3G	10021382 (GR043 104 a 106)	Tonalita/ Granodiorita	7.4	4.2	4.1e-2	1e-4	3.8	2e-5	2.3e-4	2.3e-5	2.2e-3	3e-4	6e-5	9e-5	3e-5	1.4e-3
HC 4G	FB #2 (GR028 90 a 150)	Tonalita/ granodiorita	8.4	6.6	6.1e-2	1.2e-4	5.6	4e-6	2.5e-4	2.2e-5	6e-4	9e-4	7e-5	1e-4	2.8e-5	7.4e-4
HC 5G	FR #3 (GR025 40 a 100)	Tonalita/ granodiorita	5.1	1.7	3.6e-2	1e-4	1.9	5e-6	2.2e-4	1.1e-5	3e-4	1e-4	4e-5	9e-5	3.7e-5	7.5e-4

Fuente: pHase, 2013.

La Figura 5.1.6.238 proporciona los diagramas de tendencias temporales para los parámetros clave. El

Anexos Caracterización Hidrogeología AXO DrenMinAci Phase2013 AnexoM contiene un resumen de los resultados clave y los datos de las pruebas de celdas de humedad en roca estéril.

El pH de los lixiviados para las cuatro muestras de tonalita/granodiorita se mantuvo compensado en todas las pruebas, con valores de pH comprendidos entre 7,2 y 7,7. La muestra de roca saprolítica presentó un pH débilmente ácido con valores típicos entre 5,5 y ~7.

La máxima concentración de sulfato registrada en el flujo inicial (aproximadamente las diez primeras semanas de pruebas) fue de ~100 mg/L de HC 3G y tuvo el más alto contenido de azufre (1,15%). La producción de sulfatos fue generalmente baja en todas las celdas después del flujo, presentando concentraciones estables, generalmente <20 mg/L.

Las concentraciones de elementos trazas fueron en general bajas después del flujo inicial. Las tendencias incluyeron Mo ligeramente más soluble de HC 2G y HC 4G (las muestras con mayor contenido de Mo sólido) y Cu de mayor solubilidad de HC 1G (roca saprolítica), aunque también en concentraciones relativamente bajas.

El cálculo de la neutralización de carbonato y de los tiempos de agotamiento del azufre, según lo definido en Price, 1997, emplea la clasificación de celdas de humedad 1G (roca saprolítica) y 3G (tonalita con 1,15% S) como PAG (es decir, el agotamiento del sulfuro durará más que el agotamiento de la neutralización de carbonato). Los resultados de las celdas de humedad 2G, 4G y 5G, que según ABA clasificaban como no definidas, indican que las celdas 2G (0,35% S) y 4G (0,15% S) clasifican como no PAG, mientras que se espera que la celda 5G (0,45% S) sea PAG.

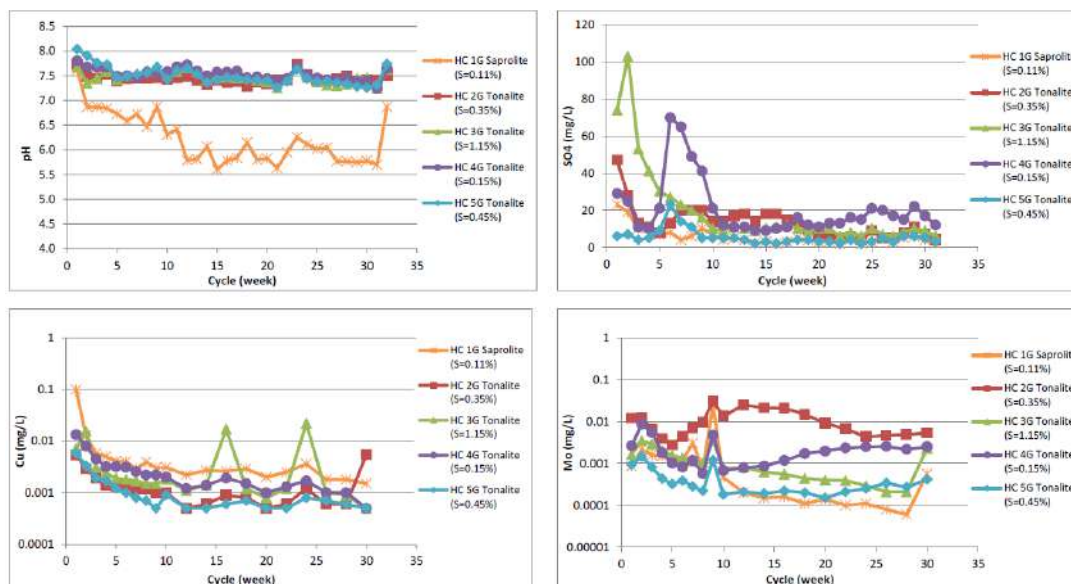


Figura 5.1.6.238 Tendencias temporales de concentraciones de lixiviados en celdas de humedad a) pH campo, b) sulfato, c) cobre y d) molibdeno.

Fuente: pHase, 2013

IV. Pruebas cinéticas en barriles

El programa de pruebas cinéticas en campo se realizó en testigos de perforación de los sondajes que intersectan las paredes previstas del tajo, está compuesto por un programa de pruebas en barriles que incluye diez barriles de tonalita/granodiorita con contenido de azufre variable (entre 0,02 y 1,22%).

La caracterización de las pruebas estáticas en las muestras de barriles fue presentada en las secciones anteriores. El Anexos_Caracterización_Hidrogeologia_AXO_DrenMinAci Phase2013_AnexoL contiene los resultados a la fecha del monitoreo de los barriles y la

Tabla 5.1.6.105 presenta un resumen de la concentración media para parámetros seleccionados. La Figura 5.1.6.239 presenta diagramas de tendencias temporales para parámetros clave de interés.

Tabla 5.1.6.105 Resumen de promedios de pruebas en barril. Concentraciones de lixiviados para parámetros seleccionados

ID del barril	Total S (ABA)	pH en campo	SO ₄	Al	As	Cd	Ca	Co	Cu	Mn	Mo	Ni	Sb	Se	Zn
	%	unidad	mg/L												
FB #1 (GR011 90-154_top)	0.02	6.9	6	2.9e-2	2.1e-4	1.7e-5	8	3e-4	5.6e-3	3.4e-3	1e-3	1.3e-3	5.4e-4	1e-3	1.6e-2
FB #2 (GR015 96-156_top)	0.15	7.1	9	4.3e-2	2.9e-4	2e-5	12	6e-4	6.8e-3	2.2e-3	1.3e-3	1.1e-3	4.9e-4	1e-3	1.2e-2
FB #3 (GR114 56-116_top)	0.52	7.1	12	4e-2	3.9e-4	1.7e-5	16	2e-3	5.5e-3	2e-3	3.6e-3	1e-3	4.4e-4	1e-3	1.3e-2
FB #4 (GR008 174-234_top)	0.61	7.2	23	5e-2	2.9e-4	2.5e-5	22	8e-4	5.1e-3	2.8e-3	1.4e-2	1e-3	5.6e-4	1e-3	1.2e-2
FB #5 (GR007 178-238_top)	1.22	7.2	19	3.4e-2	2.3e-4	2.4e-5	19	6e-4	5.2e-3	7.3e-3	1.3e-2	1e-3	5.9e-4	1e-3	1.2e-2
FB #6 (GR045 280.6-411)	0.85	7.1	35	0.03	2.7e-4	4e-5	28	2e-4	5.1e-3	0.01	1.1e-2	1.2e-3	2.3e-4	1e-3	1.2e-2
FB #7 (GR069 100-226)	0.10	8.1	19	5.7e-2	3e-4	2.7e-5	19	5e-4	5.1e-3	1.8e-2	1e-3	1.2e-3	3e-4	1e-3	1.1e-2
FB #8 (GR091 199.1-326.3)	0.14	7.9	48	6.3e-2	3.3e-4	3.4e-5	30	7e-4	6.8e-3	5.2e-3	6.8e-3	1.6e-3	3.7e-4	1e-3	1.4e-2
FB #9 (GR101 80.77-209.4)	0.09	8.0	32	4.3e-2	4e-4	1.2e-4	25	1.1e-3	6.3e-3	2.3e-2	3.5e-2	2.3e-3	2.3e-4	1e-3	1.3e-2
FB #10 (GR102 88.5-208.5)	0.03	7.4	14	2.7e-2	2.3e-4	6.2e-5	17	6e-4	4.6e-3	1.2e-2	5.1e-3	1.3e-3	3e-4	1e-3	1.1e-2

Fuente: pHase, 2013

Los lixiviados de todos los barriles presentaron un pH cercano a neutral. Las concentraciones de sulfatos lixiviados fueron ligeramente variables, aunque en general bajas, con promedios entre 6 y 48 mg/L. Las concentraciones promedio de sulfato en los barriles de las paredes del tajo (FB#6 a FB#10) son ligeramente superiores a las de los barriles de roca estéril (FB#1 a FB#5); sin embargo, las tendencias sugieren que los barriles de las paredes del tajo pueden seguir estando dentro del flujo inicial de materiales solubles.

Las concentraciones de metales lixiviados también fueron en general bajas y, aunque no se considera una comparación adecuada, se encuentran dentro de los valores típicos de calidad de aguas receptoras.

Se reportó Mo soluble con concentraciones promedio de ~0,01 mg/L en tres de los lixiviados de los barriles. Además, se encontró un contenido ligeramente superior de azufre (0,6 a 1,2%) en estos materiales. Adicionalmente, se reportó una concentración promedio de Mo de ~0,04 mg/L en una muestra de pared del tajo (FB#9) con contenido de azufre muy bajo (0,09%). Otros metales típicamente móviles a pH neutro, tales como Se, Cd y As, se encontraron en bajas concentraciones en los lixiviados de los barriles.

Las concentraciones del programa de pruebas en barriles son por lo general, aunque no de manera consistente, más altas que aquellas del programa de celdas de humedad. Esto se debe a los volúmenes mucho menores de flujo para los barriles (precipitaciones) que para el HCS (lavado semanal).

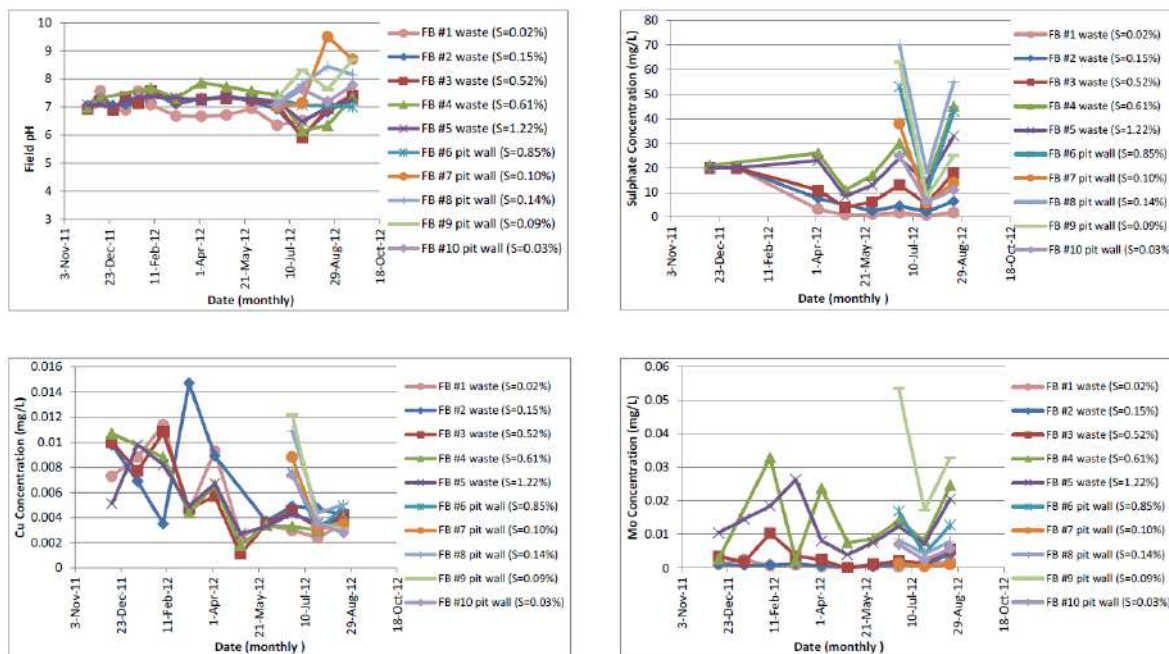


Figura 5.1.6.239 Tendencias temporales de concentraciones de lixiviados en barriles a) pH campo, b) sulfato, c) cobre y d) molibdeno.

Fuente: pHase, 2013

Se realizaron pruebas de las tasas de oxidación de sulfuro y de liberación de metales a largo plazo mediante pruebas en laboratorio de celdas de humedad y pruebas en tubos de exploración en campo. Los lixiviados de todas estas pruebas cinéticas han presentado condiciones de pH casi neutro. Las concentraciones de SO_4 y metales de interés son generalmente bajas.

Los niveles meteorizados (Saprolito y roca saprolítica) exhiben los valores más bajos de sulfuros y minerales carbonatados en comparación con las otras unidades. Los lixiviados de cobre y molibdeno no son significativos del lixiviado de estos dos materiales.

V. Distribución de elementos potencialmente tóxicos

Referente al comportamiento entre mineralización y elementos potencialmente tóxicos se presenta a continuación la distribución acorde a los resultados de geoquímica de la base de datos de exploración del yacimiento.

En la Figura 5.1.6.240 se presenta la distribución en planta de la mineralización y los elementos potencialmente tóxicos analizados. Se observa un fuerte control estructural con tendencia NE-SW para la mineralización y también para la distribución de los elementos analizados. Tomando de referencia el contorno del tajo, los valores elevados están, para el zinc hacia el sector este, para el plomo en la zona central restringido a un tramo pequeño, para el arsénico se observa un pequeño sector al sur, el mercurio se concentra hacia la zona central y el molibdeno hacia los bordes este y oeste.

A partir de la distribución en secciones se describe a continuación los hallazgos y correlaciones entre elementos (Figura 5.1.6.241, Figura 5.1.6.242 y Figura 5.1.6.243).

El zinc (Zn) y el plomo (Pb), que exhiben tendencias similares, se presenta una fuerte correlación con las zonas de alta ley en la parte central y de mayor profundidad del tajo, con control estructural, estrechamente relacionados con los sistemas de vetas que integran el yacimiento. Para la sección C-C' se observa concentración hacia los flancos superiores de las paredes del tajo, desde la superficie hasta niveles intermedios.

El arsénico (As), no se observa una correlación con otro elemento o zonas de mineralización. En la sección C-C', se concentra en el fondo del tajo final y a lo largo de estructuras sub-verticales profundas.

El mercurio (Hg) muestra concentraciones puntuales especialmente hacia los flancos superiores y el centro del tajo, marcado hacia el norte en la sección C-C'. Por último, el molibdeno (Mo) exhibe una distribución vertical más definida, con valores altos hacia la zona central y de mayor profundidad del tajo.

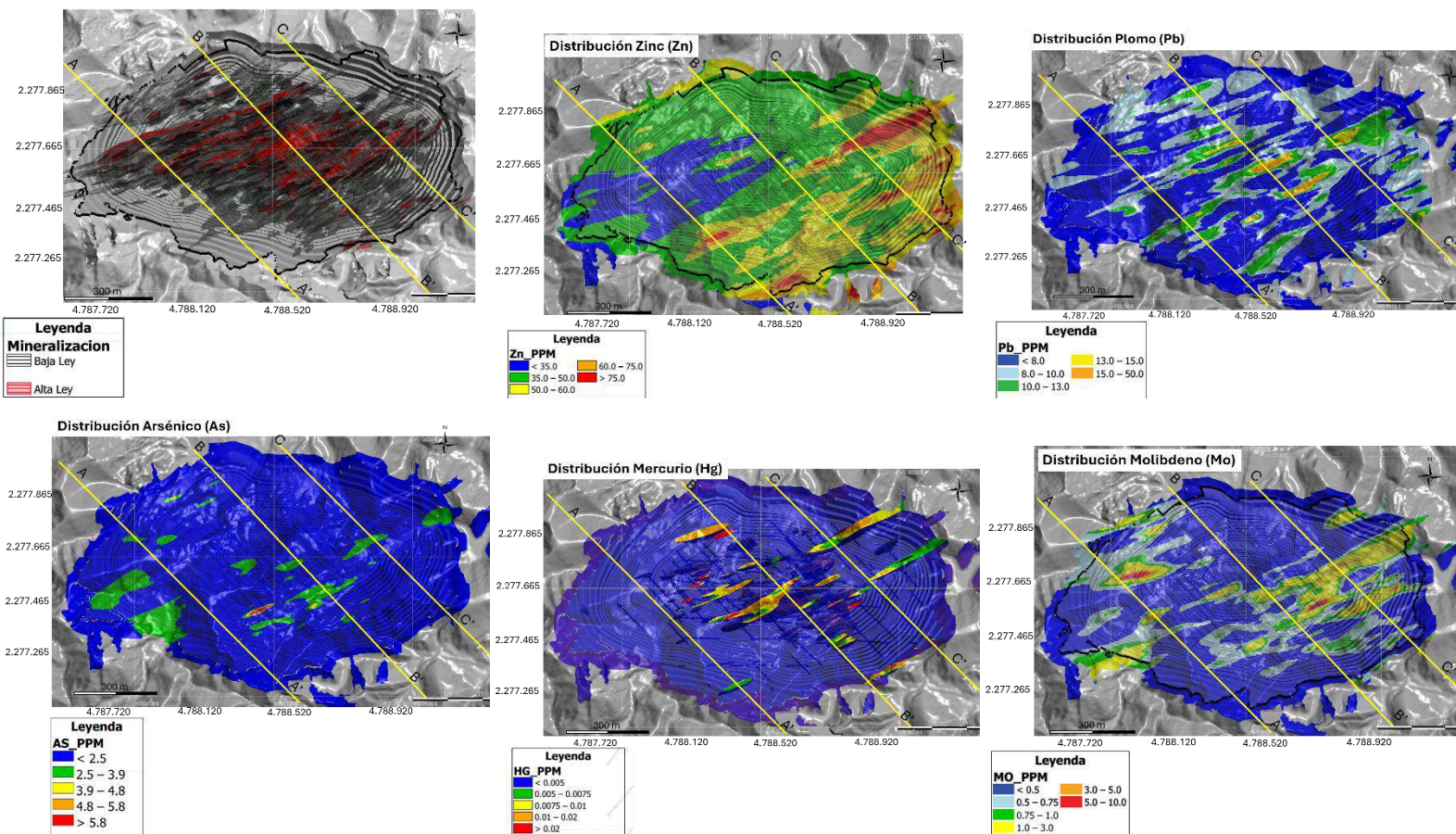


Figura 5.1.6.240 Distribución en planta de mineralización y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.
Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

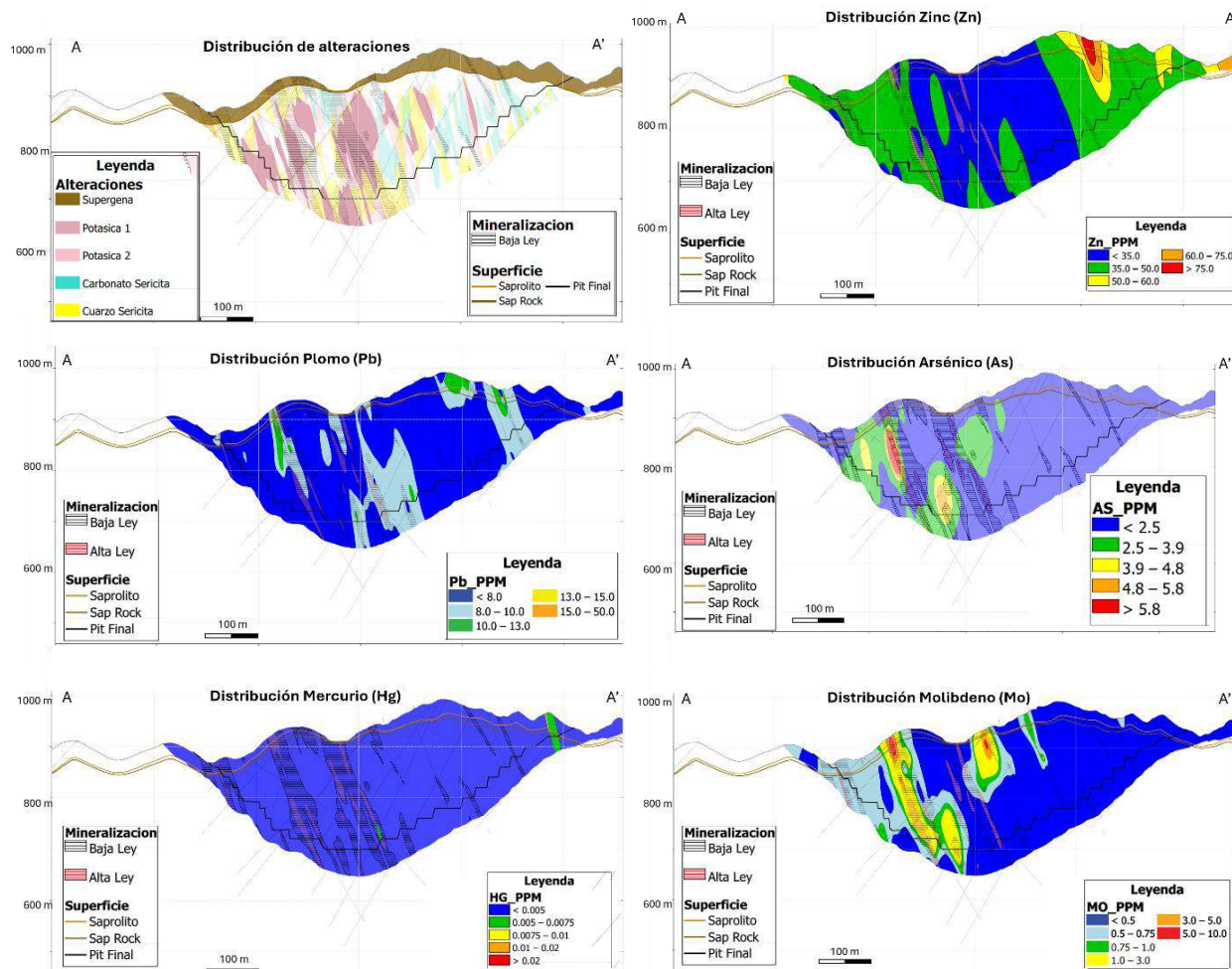


Figura 5.1.6.241 Distribución en sección A-A' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

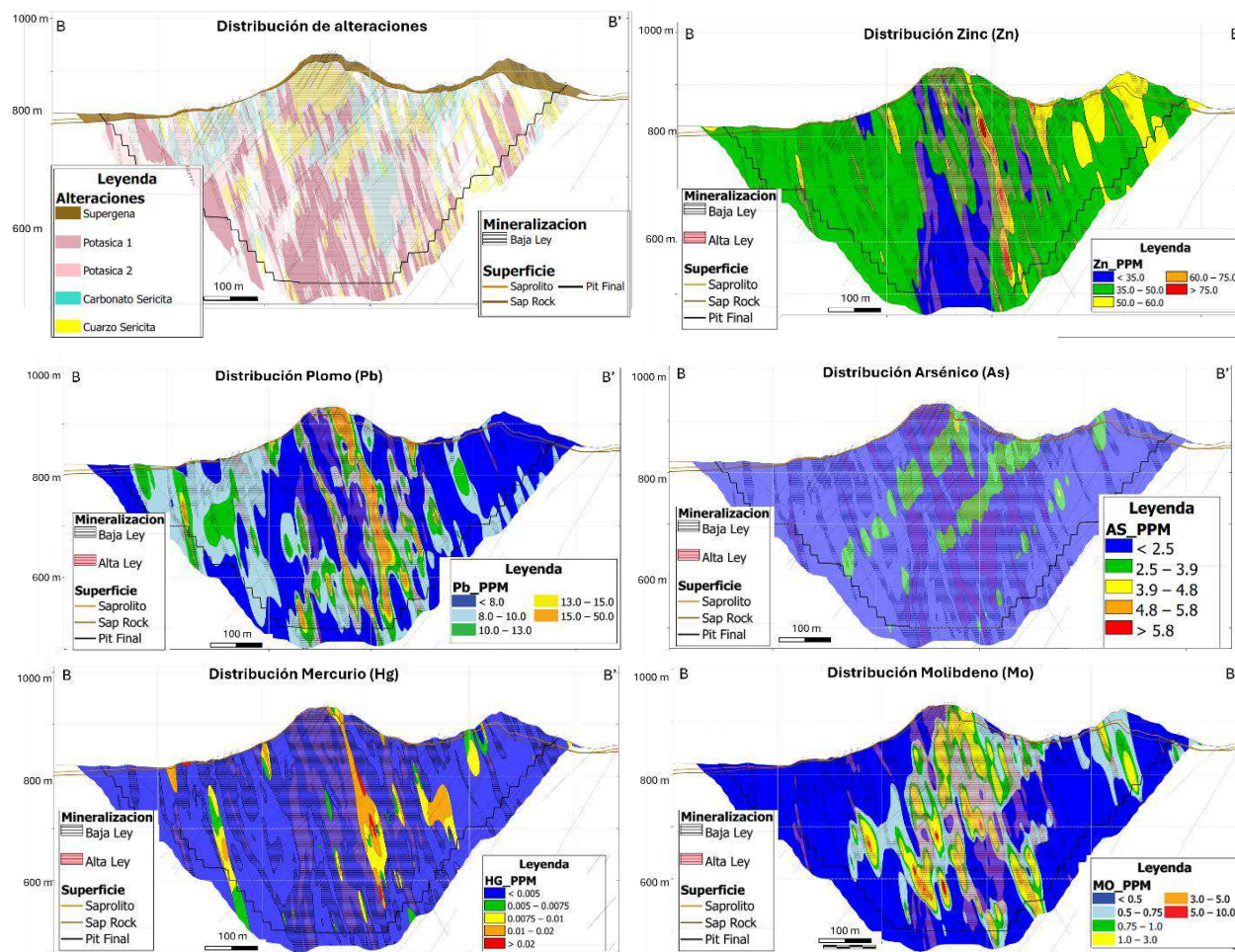


Figura 5.1.6.242 Distribución en sección B-B' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

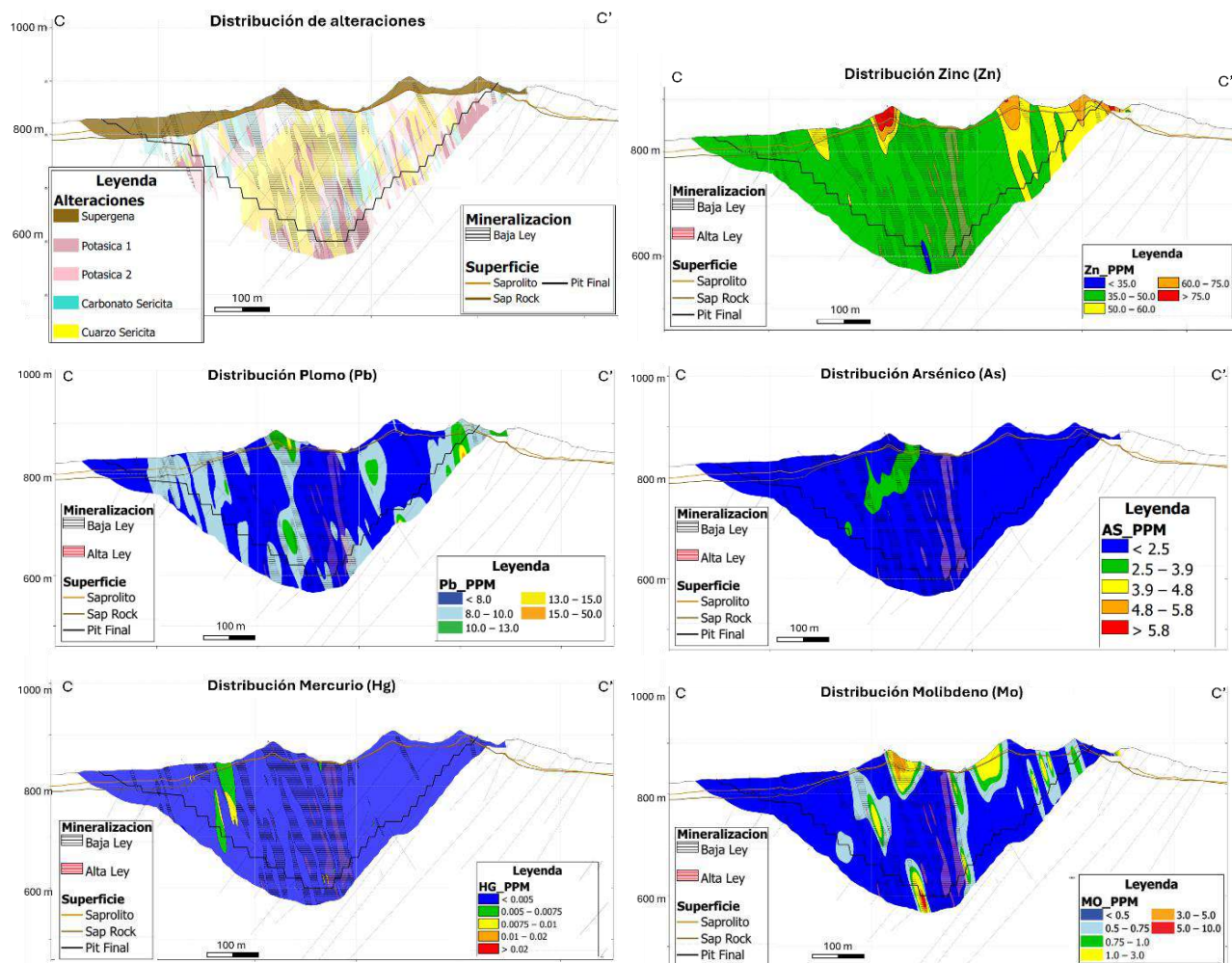


Figura 5.1.6.243. Distribución en sección C-C' de mineralización, alteración y contenido de zinc, plomo, arsénico, mercurio y molibdeno.

Fuente: (Gramalote Colombia Limited)

5.1.6.5 Modelo Hidrogeológico Conceptual

5.1.6.5.1 Caracterización hidrogeológica de las formaciones geológicas

La definición de las unidades hidrogeológicas tuvo en consideración lo propuesto en modelos realizados previamente en el área de influencia elaborados por Hidrogeocol, Knight Piesold y Golder Associates, los cuales se presentan en la Figura 5.1.6.244. Con base en la nueva información disponible, obtenida del inventario de puntos de agua, así como de los datos geológicos, estructurales e hidrogeológicos recopilados en campo, se decide suprimir la unidad HGU3 del último modelo presentado por Golder (2013), correspondiente a saprolito extremadamente meteorizado, debido a que no se identifican variaciones significativas en las características geológicas e hidráulicas en la zona de transición entre el saprolito y el suelo residual, que justifique separarla en una unidad hidrogeológica independientes (SHI SAS, 2026). Además, se tiene en cuenta la definición más detallada de los depósitos cuaternarios y la disposición de los materiales resultantes de las actividades de explotación, de acuerdo con lo contemplado en el plan minero, para la clasificación de nuevas unidades hidrogeológicas.

Hidrogeocol		Knight Piésold		Golder Julio 2013	
	Depósitos aluviales		Depósitos aluviales		Depósitos aluviales
	Suelo residual		Suelo residual		Suelo residual
	Saprolito		Saprolito		Saprolito extremadamente meteorizado
					Saprolito arenoso
	Zona de transición				Saprolito, zona de transición
	Roca fresca		Roca fresca		Roca fracturada
					Roca fresca

Golder Octubre 2013			SHI (2025)	
	Depósitos aluviales	HGU1	Depósitos antrópicos	UHG-1
			Depósitos coluviales y de flujo	UHG-2
			Depósitos aluviales	UHG-3
	Suelo residual	HGU2	Suelo residual	UHG-4
	Saprolito extremadamente meteorizado	HGU3		
	Saprolito arenoso	HGU4	Saprolito arenoso	UHG-5
	Saprolito, zona de transición y roca fracturada	HGU5 / 6	Zona de transición y roca meteorizada y fracturada	UHG-6
	Roca fresca	HGU 7	Roca fresca fracturada	UHG-7

Figura 5.1.6.244 Unidades hidrogeológicas de estudios previos y su correlación con las unidades definidas en este estudio.

Fuente: Modificado de Golder Associates Perú S. A (2020)

El modelo hidrogeológico conceptual se fundamenta en los hallazgos encontrados en el análisis del tipo de unidades, el inventario de puntos de agua, la estimación de la recarga, información piezométrica de la zona, y las pruebas hidráulicas realizadas en el área de influencia (SHI SAS, 2026).

A. Unidad hidrogeológica 1 (UHG-1)

La capa más superficial del modelo conceptual corresponde a la Unidad Hidrogeológica 1 (UHG-1), la cual agrupa los depósitos antrópicos. Esta unidad incluye, por un lado, los llenos actualmente existentes asociados principalmente a obras de infraestructura vial, y, por otro lado, los diferentes depósitos que se proyectan desarrollar según el plan minero, tales como los depósitos de colas, estériles y los ZODMES, los cuales actualmente no han sido construidos. El material que compone estos depósitos es de carácter heterogéneo, con una composición variable de materiales gruesos y finos. En particular, se proyecta que los depósitos de material estéril San Antonio y El Balsal estarán conformados por tonalita y granodiorita extraídas durante las operaciones mineras, en tamaños de cantos, grava, arena y una pequeña fracción de finos.

Por otra parte, se proyecta la construcción de la presa de colas, la cual incluirá inicialmente una presa de arranque conformada por material residual y saprolito compactado y, a medida que se generen las colas de flotación, se construirá la presa de arena, utilizando como material base la fracción gruesa de estas colas, mientras que la fracción fina se depositará en el embalse de colas. En los reportes realizados por Golder (2013) se les asigna una permeabilidad de 0,0009 m/día a la presa de arranque, de 0,58 m/día a la presa de arenas y de 0,086 m/día al depósito de colas (SHI SAS, 2026).

Adicionalmente, los ZODMES estarán conformados por una mezcla de limos, arenas limosas y arcillosas, provenientes principalmente de la remoción de horizontes superficiales del suelo, donde predomina el horizonte de saprolito. De acuerdo con la caracterización realizada por Integral S.A. (2025), se estima que estos depósitos presentarán una permeabilidad entre 8,64 y 0,086 m/día.

En este sentido esta unidad hidrogeológica se puede subdividir en subunidades debido a la diferencia en las características de los elementos que la componen, tal como se muestra en la Tabla 5.1.6.106.

Tabla 5.1.6.106 Subunidades que conforman la Unidad Hidrogeológica 1 (UHG-1)

Subunidad	Nombre	Descripción
UHG-1A	Llenos antrópicos y ZODMES	Mezcla de limos, arenas limosas y arcillosas, provenientes principalmente de la remoción de horizontes superficiales del suelo, donde predomina el horizonte de saprolito. permeabilidad entre 8,64 y 0,086 m/día
UHG-1B	Depósitos de material estéril	Cantos, gravas y arenas de roca provenientes de las operaciones mineras con una pequeña fracción de finos.
UHG-1C	Presa de arranque	Conformada por suelo residual y saprolito compactado. Se estima una permeabilidad de 0,0009 m/día (Golder Associates Perú S.A., 2013)
UHG-1D	Presa de arenas	Constituida por la fracción gruesa de las colas de flotación compactada. Se estima una conductividad hidráulica de 0,58 m/día (Golder Associates Perú S.A., 2013)
UHG-1E	Depósito de colas	Constituido por Los relaves producto del proceso de beneficio. Corresponde a material fino con una conductividad hidráulica estimada

Subunidad	Nombre	Descripción
		de 0,086 m/día (Golder Associates Perú S.A., 2013)

Fuente: (SHI SAS, 2026)

Cabe señalar que en el diseño y desarrollo de estos depósitos se incorporan elementos de control hidráulico, tales como filtros, cunetas y capas compactadas, diseñados para redirigir el flujo superficial y, de este modo, limitar tanto la infiltración como el flujo subterráneo a través de estos materiales.

B. Unidad hidrogeológica 2 (UHG-2)

En la zona superficial se encuentran depósitos coluviales y de flujo, los cuales conforman la Unidad Hidrogeológica 2 (UHG-2). Estos depósitos se originan por procesos donde la gravedad actúa como el agente principal de transporte, y están compuestos por suelo y bloques de roca provenientes de los horizontes más superficiales de meteorización. En los ensayos geoelectricos realizados por Hidrogeocol (2012) se observa que estos depósitos presentan profundidades menores a los 12 m. Adicionalmente, en las perforaciones realizadas para la exploración geotécnica del proyecto Gramalote esta unidad presenta espesores entre 2 y 4 m (SHI SAS, 2026).

Al tratarse de una acumulación reciente de material no consolidado, tienen una mayor capacidad para almacenar agua. Sin embargo, la matriz de estos depósitos es de una textura que varía entre limo arcilloso y limo arenoso, y corresponden a depósitos puntuales, con continuidad lateral limitada, lo que restringe su capacidad para transmitir agua.

Durante las campañas de muestreo isotópico e hidroquímico realizadas por SHI S.A.S. (2025) se han monitoreado manantiales representativos de esta unidad, los cuales presentan valores conductividad eléctrica 50 y 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de oxígeno disuelto predominantemente mayores a 5 mg/l, a excepción del punto M222, en donde se registró un valor de 2,25 mg/l, posiblemente asociado a interacciones con materiales orgánicos (SHI SAS, 2026).

Estos parámetros indican un grado de mineralización débil y un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo, lo cual se ve reforzado con la caracterización hidroquímica del agua, que varía entre tipos bicarbonatado sódico y bicarbonatado cálcico y/o magnésico, lo que es típico de aguas subterráneas con baja evolución geoquímica.

Para esta unidad se cuenta con una prueba Lefranc realizada por Geodrill S.A.S en 2025, la cual arroja un valor de conductividad hidráulica de 0,34 m/día.

C. Unidad hidrogeológica 3 (UHG-3)

La UHG-3 está conformada por los diferentes depósitos aluviales del área de influencia. Estos se caracterizan por ser depósitos angostos, de poca profundidad, (a excepción de los depósitos aluviales del río Nus y de la quebrada Guacas), con una granulometría predominantemente compuesta por arena fina a limos, derivados del arrastre de los suelos del Batolito Antioqueño. Golder (2020) describe que la profundidad de estos depósitos se encuentra entre 1 y 5 m con un valor promedio de 4 m. Por otra parte, esta unidad se encontró en las perforaciones de las campañas de exploración geotécnica con profundidades entre 4,5 y 7 m, con un valor promedio de 5,7 m.

La porosidad primaria de estos depósitos les confiere una buena capacidad de almacenamiento y transmisión de agua, aunque, esto se ve limitado por su espesor reducido y baja continuidad lateral. A pesar de esto, los depósitos aluviales suelen favorecer la acumulación de escorrentía y el desarrollo de un flujo subsuperficial, generalmente asociado a bajos tiempos de residencia (SHI SAS, 2026).

Los parámetros fisicoquímicos medidos durante las campañas de muestreo isotópico e hidroquímico llevadas a cabo por SHI S.A.S. (2025) muestran en el piezómetro PZA12-03 (Ubicado en la quebrada Guacas cerca del río Nus tiene 8,8 m de espesor de depósito aluvial) un valor de oxígeno disuelto de 6,12 mg/l y una conductividad eléctrica de 57,9 $\mu\text{S/cm}$, valores similares a los observados en el agua superficial. Esto indicaría una baja mineralización y un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo.

Por otra parte, el piezómetro PZA12-08 (Ubicado en la quebrada El Banco cerca del río Nus tiene 6.0 m de espesor de depósito aluvial) presenta un valor de oxígeno disuelto de 0,58 mg/l y una conductividad eléctrica de 214,2 $\mu\text{S/cm}$. El bajo nivel de oxígeno sugiere la presencia de condiciones reductoras, posiblemente asociadas a procesos de degradación de materia orgánica y consumo de oxígeno, lo cual podría indicar una condición de contaminación del agua, aunque no necesariamente se asocia a un mayor tiempo de residencia en el subsuelo (SHI SAS, 2026).

Sobre esta unidad Hidrogeocol (2012) realizó seis pruebas de bombeo, las cuales permitieron establecer un valor de conductividad hidráulica promedio de 10,1 m/día.

D. Unidad hidrogeológica 4 (UHG-4)

La UHG-4 corresponde al horizonte de suelo residual del Batolito Antioqueño (horizonte VI). Esta unidad reúne las unidades HGU-2 y HGU-3 definidas por Golder (2020) en su modelo hidrogeológico conceptual, las cuales se describen como suelo residual y saprolito extremadamente meteorizado, respectivamente. Estas unidades presentan espesores promedio de 0,41 m y 9,1 m, por lo que la UHG-4 alcanza un espesor promedio de 9,5 m. En general, el perfil de meteorización es más espeso en las zonas de pendiente baja, mientras que, en las laderas, con pendientes mayores, el espesor disminuye. Por otra parte, en las zonas bajas de los valles, los procesos erosivos remueven las primeras capas de suelo, lo que ocasiona la eliminación de esta unidad, dejando expuesto el saprolito o cubierto por los depósitos aluviales (Gramalote Colombia Limited, 2018).

El suelo residual se caracteriza por presentar una textura limo arcillosa a arcillosa. La presencia significativa de materiales arcillosos limita la permeabilidad del medio, por lo que esta unidad presenta un bajo potencial hidrogeológico.

La empresa Hidrogeocol (2012) realizó sobre esta unidad seis pruebas de tipo Slug, que permiten establecer un valor promedio de conductividad hidráulica de 4,531E-03 m/día, lo que lo define como un acuitardo. Cabe mencionar que esta primera capa de suelo residual puede presentar variaciones laterales y no encontrarse presente en zonas de alta pendiente o en el fondo de los valles debido a los procesos erosivos en estas zonas (SHI SAS, 2026).

En las pruebas lefranc ejecutadas por GEODRILL en el 2025 en los suelos residuales entre (0 y 7) m, se encontraron suelos clasificados como arenas finas con valor promedio de conductividad hidráulica de 6,147E-01 m/día.

Los puntos de agua asociados a esta unidad, monitoreados en las diferentes campañas de muestreo isotópico e hidroquímico, desarrolladas por SHI S.A.S. (2025) presentan valores

de conductividad eléctrica entre 85,8 y 177,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y oxígeno disuelto predominantemente en el rango de 4,66 a 7,04 mg/l, lo cual indica una mineralización débil y un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo. No obstante, en los puntos M118 y DH-FS-315 se registraron valores de oxígeno disuelto de 0,55 y 1,64 mg/l, respectivamente, los cuales podrían estar relacionados con condiciones reductoras o procesos de contaminación local.

Adicionalmente, la caracterización hidrogeoquímica del agua indica que son predominantemente bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, lo que refuerza la interpretación de una baja evolución geoquímica del agua subterránea y un tiempo de residencia relativamente corto (SHI SAS, 2026).

E. Unidad hidrogeológica 5 (UHG-5)

La UHG-5 corresponde al saprolito del Batolito Antioqueño (horizonte de meteorización IC), el cual presenta variaciones granulométricas entre arenoso y limoarenoso, siendo más arenoso a medida que la roca parental presenta una mayor proporción de cuarzo. Este horizonte presenta un espesor promedio de 9,4 m, aunque hay registros de perforación con espesores de hasta 35 m (Golder Associates Perú S.A., 2020).

Debido a su textura y buena continuidad lateral, permite tanto el almacenamiento como la transmisión de agua, por lo que se considera una unidad con alto potencial hidrogeológico. En esta unidad fueron realizadas siete pruebas de bombeo por Hidrogeocol (2012), las cuales arrojaron un valor promedio de conductividad hidráulica de 6,96 m/día.

Esta unidad se considera un acuífero continuo, de extensión regional y de tipo confinado, que se recarga mediante flujos verticales provenientes de las unidades suprayacentes (Gramalote Colombia Limited, 2018), especialmente en las zonas bajas de los valles, donde la capa arcillosa superficial del suelo ha sido removida por procesos erosivos y se encuentra cubierto por depósitos aluviales (SHI SAS, 2026).

Los puntos de agua monitoreados en esta unidad, durante las campañas de muestreo isotópico e hidroquímico, llevadas a cabo por SHI S.A.S. (2025) presentan valores de conductividad eléctrica entre 62,5 y 242 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y oxígeno disuelto predominantemente entre 3,88 y 4,46 mg/l. Estos valores reflejan una mineralización débil y un tiempo de residencia corto a moderado en el medio subterráneo. No obstante, en comparación con las unidades más superficiales, se observa un ligero aumento en la conductividad eléctrica y una leve disminución en los niveles de oxígeno disuelto, lo cual sugiere una mayor interacción roca-agua, aunque todavía limitada en términos de evolución geoquímica (SHI SAS, 2026).

El análisis hidroquímico indica que las aguas en esta unidad son principalmente de tipo bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, lo cual es consistente con un tiempo de residencia relativamente corto y una evolución hidrogeoquímica incipiente.

F. Unidad hidrogeológica 6 (UHG-6)

La Unidad Hidrogeológica 6 (UHG-6) comprende la zona de transición entre la roca fresca y el saprolito (horizonte IC-IIA), así como los horizontes de roca moderadamente meteorizada (horizonte IIA). Esta unidad representa el paso de un medio poroso, caracterizado por la presencia de bloques de roca embebidos en una matriz limosa a arenosa, hacia un medio fracturado de roca meteorizada, cuya capacidad para almacenar y transmitir agua depende de factores como el grado de fracturamiento y la interconexión entre las fracturas. Según Golder (2020) estos dos horizontes presentan características

hidráulicas similares, por lo que se consolidan en una misma unidad hidrogeológica. La UHG-6 presenta un espesor promedio de 7,7 metros (Golder Associates Perú S.A., 2020) y puede presentar un potencial hidrogeológico medio, ya que la granulometría arenosa de la matriz, en la zona más superficial, favorece el flujo de agua. No obstante, este potencial puede disminuir a medida que aumenta la profundidad y a su vez, la proporción de bloques de roca, que reducen la porosidad y la conectividad hidráulica (SHI SAS, 2026).

En esta unidad se registran valores promedio de conductividad eléctrica de 195 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de oxígeno disuelto de 4,7 mg/l, medidos durante las campañas de muestreo isotópico e hidroquímico, llevadas a cabo por SHI S.A.S. (2025). Estos valores indican un grado de mineralización bajo y un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo. Por otra parte, la caracterización hidroquímica del agua muestra que el agua en esta unidad es de carácter bicarbonatado cálcico y/o magnésico, lo cual indica una evolución hidrogeoquímica limitada (SHI SAS, 2026).

El flujo de agua en esta unidad ocurre principalmente en la zona de transición y los primeros metros de roca. En esta zona Geodrill S.A.S. ha realizado dos pruebas hidráulicas que permiten establecer el valor medio de conductividad hidráulica en 0,57 m/día.

G. Unidad hidrogeológica 7 (UHG-7)

La UHG-7 corresponde esencialmente al basamento rocoso, conformado por rocas ígneas intrusivas del tipo tonalita, cuarzodiorita y diorita, con un grado de fracturamiento medio a bajo. El almacenamiento y transporte de agua en esta unidad depende de la densidad y la interconexión de las fracturas, sin embargo, la porosidad secundaria de estas rocas se ve disminuida por el relleno de las fracturas con minerales arcillosos, producto de la saprolitización y la mineralización hidrotermal lo que ocasiona un escaso almacenamiento de agua subterránea en este medio (Gramalote Colombia Limited, 2018).

Los puntos de agua en esta unidad presentan valores de conductividad eléctrica entre 221 a 283 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que indica un grado de mineralización medio. Sin embargo, los valores de oxígeno disuelto presentan valores predominantemente entre 4,73 y 7,89 mg/l, lo que se asocia a un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo, a excepción del piezómetro PZR-13-09, que presenta un valor de oxígeno disuelto de 1,88 mg/l, que podría sugerir un mayor tiempo de residencia en el medio subterráneo. Sin embargo, esta hipótesis se descarta por la caracterización hidroquímica del agua, en donde todas las muestras de agua en esta unidad son de carácter bicarbonatado cálcico y/o magnésico, lo cual indica una evolución hidrogeoquímica limitada (SHI SAS, 2026).

En esta unidad Geodrill S.A.S. ha realizó pruebas hidráulicas de tipo Lugeon en estratos correspondientes a roca sana a levemente meteorizada, los cuales arrojan un valor promedio de conductividad hidráulica de 0,0023 m/día.

A continuación, en la Tabla 5.1.6.107 se muestra el resumen de las unidades hidrogeológicas en asociación con la unidad geológica.

Tabla 5.1.6.107 Resumen Unidades Hidrogeológicas en asociación con las unidades geológicas

Unidad Hidrogeológica	Unidad geológica
Unidad Hidrogeológica 1 (UHG-1)	Depósitos antrópicos

Unidad Hidrogeológica	Unidad geológica
Unidad Hidrogeológica 2 (UHG-2)	Depósitos coluviales y flujo
Unidad Hidrogeológica 3 (UHG-3)	Depósitos aluviales
Unidad Hidrogeológica 4 (UHG-4)	Suelo residual
Unidad Hidrogeológica 5 (UHG-5)*	Saprolito arenoso
Unidad Hidrogeológica 6 (UHG-6)*	Zona de transición suelo – roca y roca meteorizada y fracturada
Unidad Hidrogeológica 7 (UHG-7)	Roca fresca fracturada

Nota: Las unidades hidrogeológicas UHG-5 y UHG-6 no se representan en la [Figura 5.1.6.245](#) ni en el mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-CONHID dado que son unidades que se encuentran en profundidad, fuera del alcance de la representación superficial.

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de (SHI SAS, 2026)

La Figura 5.1.6.245 muestra las Unidades Hidrogeológicas y en el en el mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-CONHID las respectivas conductividades hidráulicas asociadas.

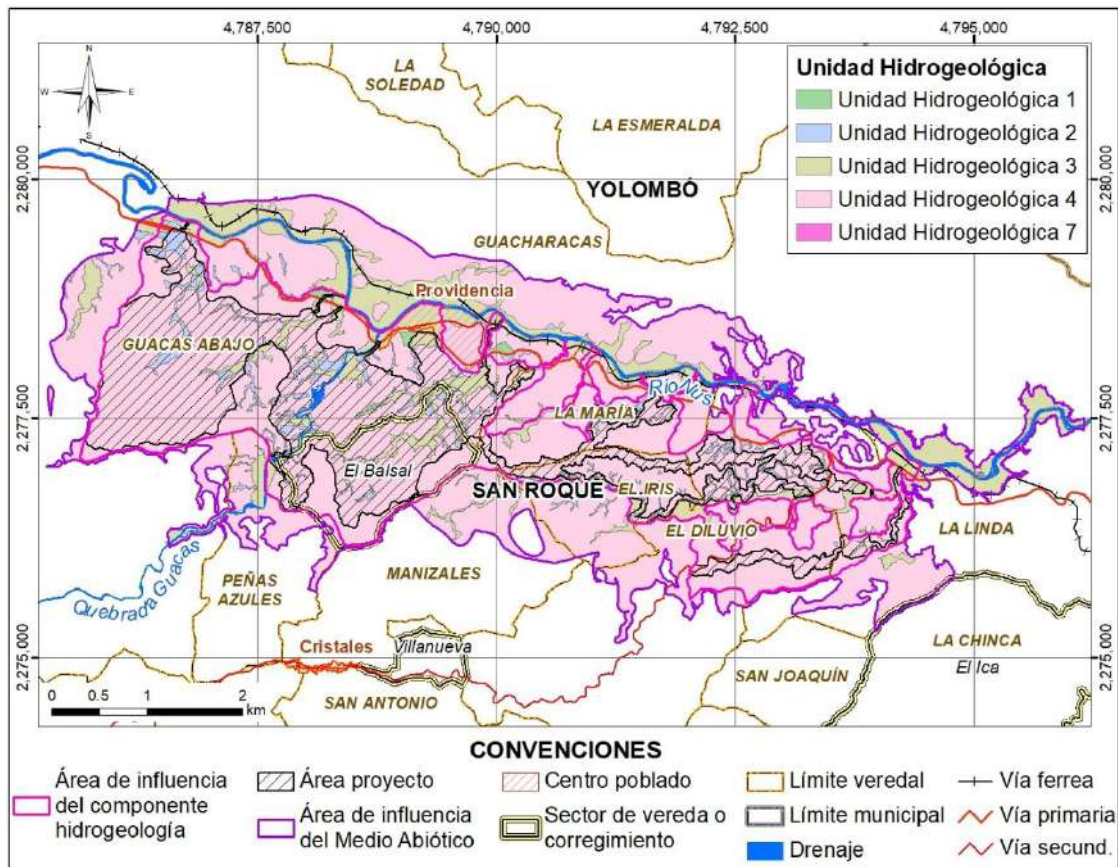


Figura 5.1.6.245 Unidades hidrogeológicas

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.5.2 Zonas de recarga y descarga

La recarga se refiere a la manera como los acuíferos se recargan o llenan de agua de forma natural por infiltración del agua lluvia que cae sobre ellos, de los ríos o lagos que los atraviesan o limitan y también puede ser de manera artificial producto del excedente de agua empleada en regar cultivos asentados, fugas de redes y abastecimientos o por infiltraciones de embalses y depósitos. Las fuentes de recarga, naturales o artificiales pueden ser clasificados como recarga directa (proveniente del agua lluvia), recarga indirecta (productos de cauces permanente, estacional y efímeros), flujos laterales (procedentes de otros acuíferos), retornos de riegos, excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución y recarga urbana (producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado) (IDEAM, 2013).

La circulación de los flujos de agua subterránea puede conformar en una cuenca tres tipos de sistemas de flujos: local, intermedio y regional (Toth, 1963). Un sistema local de flujo de agua subterránea tiene su zona de recarga en un alto topográfico y su zona de descarga en un bajo topográfico, y se encuentran localizados de forma cercana el uno del otro (<5 km). Los sistemas de flujo intermedio son aquellos en donde sus áreas de recarga y descarga no ocupan los lugares topográficos más altos y más bajos respectivamente, es posible encontrar otros puntos más altos y más bajos en medio de ellos. Un sistema de flujo regional es aquel cuya área de recarga se encuentra en la divisoria de aguas y su zona de descarga se encuentra en la parte baja de la cuenca (Figura 5.1.6.246).

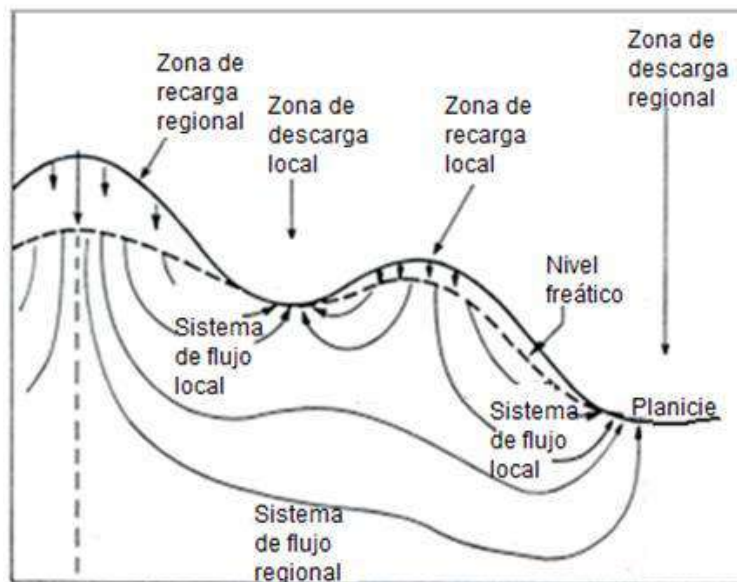


Figura 5.1.6.246 Sistema de flujos de agua subterránea

Fuente: Toth, (1963)

A partir de la configuración de la red de flujo establecida, se estima que los acuíferos se recargan directamente de las lluvias principalmente a través de las zonas planas y de la misma zona de colinas y lomos. Igualmente pueden tener cierta recarga de los cauces mayores como es el caso del Río Nus en relación con la UHG-3 – Depósitos aluviales, cuya recarga es indirecta hacia las aguas subterráneas y viceversa según la época hidrológica.

Las zonas de recarga se presentan hacia las colinas altas, en las rocas pertenecientes a las Unidad del Batolito Antioqueño. Los sistemas de flujos en el sector están conformados por flujos locales para el acuífero aluvial, coluvial y flujos e intermedios y regionales para el acuitardo de los suelos residuales del Batolito Antioqueño.

La descarga de estos acuíferos libres y no confinados (cubiertos) se hace hacia superficie (aquellos que están por encima del nivel más bajo del terreno) originando los cauces menores.

La fluctuación estacional detectada en algunos piezómetros permite inferir que en periodos de verano las unidades hidrogeológicas con capacidad de almacenar y transmitir agua pueden generar un aporte a los cauces, contribuyendo a los caudales que se presentan en los cauces. En veranos fuertes el descenso del nivel freático puede ser mayor, quedando por debajo del nivel de los cauces.

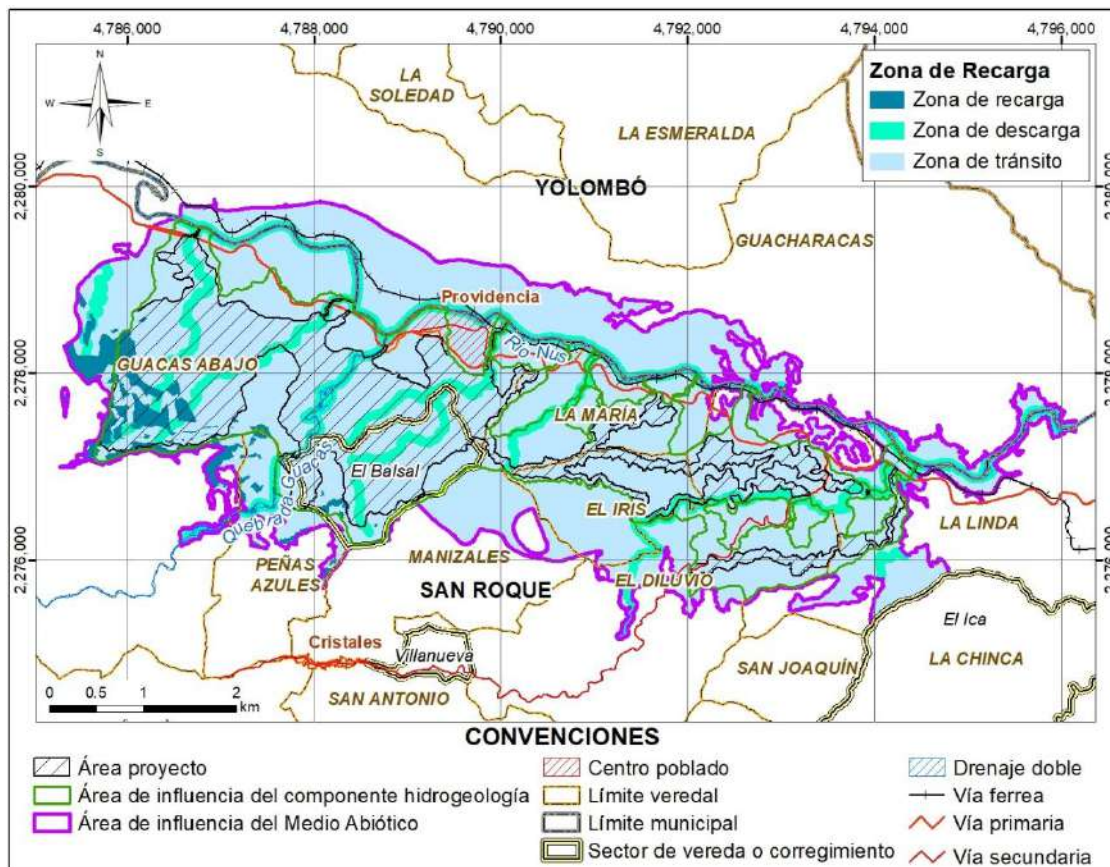


Figura 5.1.6.247 Zonas de recarga y descarga

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.5.3 Movimiento del agua subterránea

Las direcciones del flujo hídrico subterráneo están fuertemente influenciadas por la condición estructural de la zona, para el área de influencia estas direcciones se dirigen hacia terrenos topográficamente más bajos.

Las direcciones de flujo en los acuíferos aluviales, coluviales y flujos presentan una dirección regional en sentido Nororiente en dirección al río Nus. Por otro lado, el depósito aluvial asociado al río Nus, presenta direcciones correspondientes a la dirección del drenaje en mención, es decir, oeste – este.

Las direcciones de flujo asociadas a las unidades hidrogeológicas presentan una tendencia generan sur - norte, hacia el río Nus (en sentido Nororiente) (Figura 5.1.6.248).

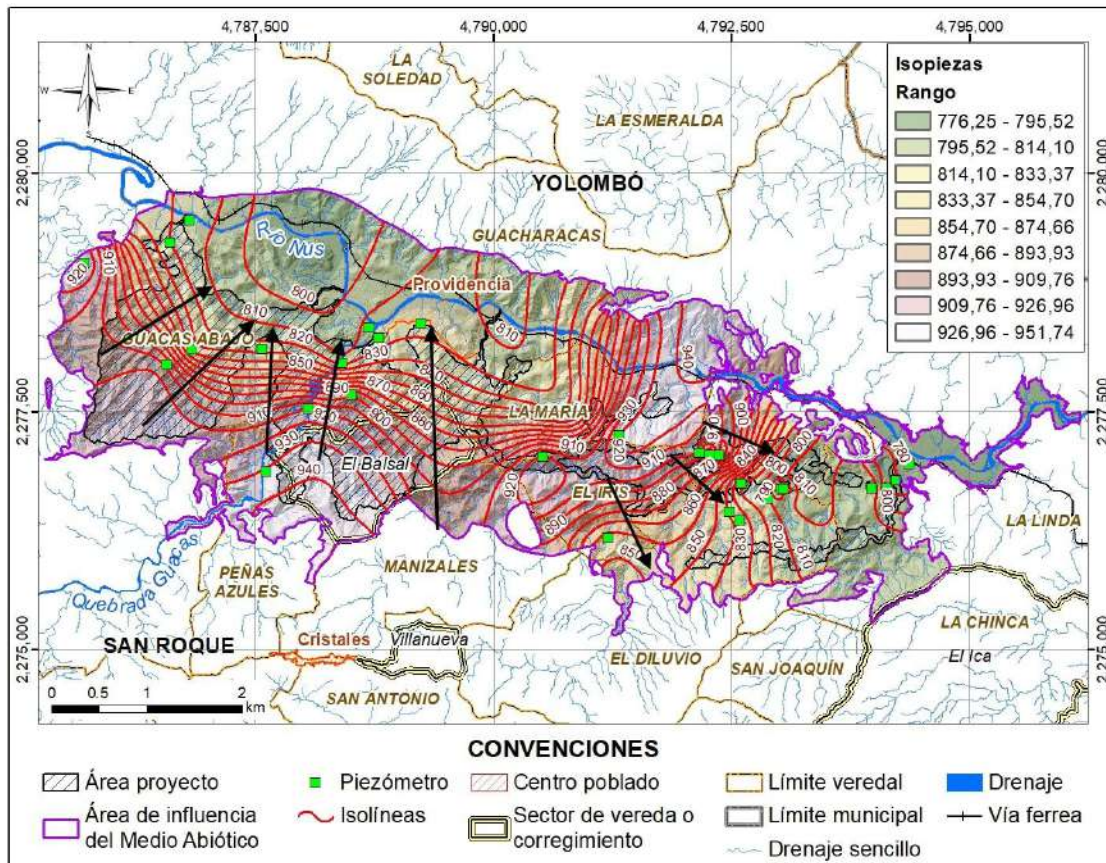


Figura 5.1.6.248 Direcciones de flujo

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.5.4 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

La vulnerabilidad de los acuíferos representa las características intrínsecas que determinan la sensibilidad de varias partes de un acuífero a ser afectado adversamente por un contaminante (Vargas, M., 2010). Para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas existen varias metodologías, la selección y aplicación de cualquiera de ellas dependerá de la información existente y la utilidad de dicha evaluación. En este caso, se emplean dos métodos paramétricos: GOD y DRASTIC; en el primer caso cada parámetro está dividido en clases a las que se atribuye una puntuación y en la metodología DRASTIC, además de asignar una puntuación, cada parámetro es multiplicado por un factor ponderador (Vargas, M., 2010).

A. Método GOD

La metodología GOD, es un método paramétrico propuesto por (Foster, Hirata, Gomes, D'Elia, & Paris, 2002) en donde se toman tres parámetros (Grado de confinamiento hidráulico, caracterización de la zona no saturada y profundidad del nivel freático) y se multiplican los valores asignados para cada parámetro, obteniendo el índice de vulnerabilidad GOD. Dicha metodología se caracteriza por ser sencilla y práctica, que se recomienda cuando se tiene poca información. Los tres parámetros (G, O y D) que comprende la metodología, cuyos valores son asignados de acuerdo con la contribución en la defensa a la contaminación, se describen a continuación (Vargas, M., 2010).

- **G (Groundwater occurrence) – Índice de confinamiento:** corresponde al grado de confinamiento hidráulico con la identificación del tipo de acuífero, su índice puede variar entre 0 y 1. El modo de ocurrencia varía entre la ausencia de acuíferos (evaluado con índice 0) y la presencia de un acuífero libre o freático (evaluado como índice 1), pasando por acuíferos artesianos, confinados y semiconfinados.
- **O (Overall aquifer class) – Sustrato litológico:** corresponde a la caracterización de la zona no saturada del acuífero o de las capas confinantes, en términos de grado de consolidación y litología. Los índices más bajos (0,4) corresponden a los materiales no consolidados, mientras que los más altos (0,9 – 1,0) corresponden a rocas compactas fracturadas o karstificadas.
- **D (Depth) – Profundidad del nivel freático:** se refiere a la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o a la profundidad del techo del acuífero, en los confinados. Los índices más bajos (0,6) corresponden a acuíferos libres con profundidad mayor a 50 m; mientras que los índices altos (1,0) corresponden a acuíferos que independientemente de la profundidad se encuentran en medios fracturados. Para el caso de los acuíferos libres la profundidad del nivel estático está sujeta a la oscilación natural.

La vulnerabilidad se calcula como el producto de estos parámetros Ecuación 5.1.6.14:

$$\text{Índice de vulnerabilidad} = G * O * D$$

Ecuación 5.1.6.14 Índice de vulnerabilidad GOD

Cada uno de los factores posee valores entre cero y uno, entre mayor es el valor, más desfavorable es la condición, la clasificación se hace a partir de la Figura 5.1.6.249. Este método solo asigna un peso indirecto a las variables a través de sus valores.

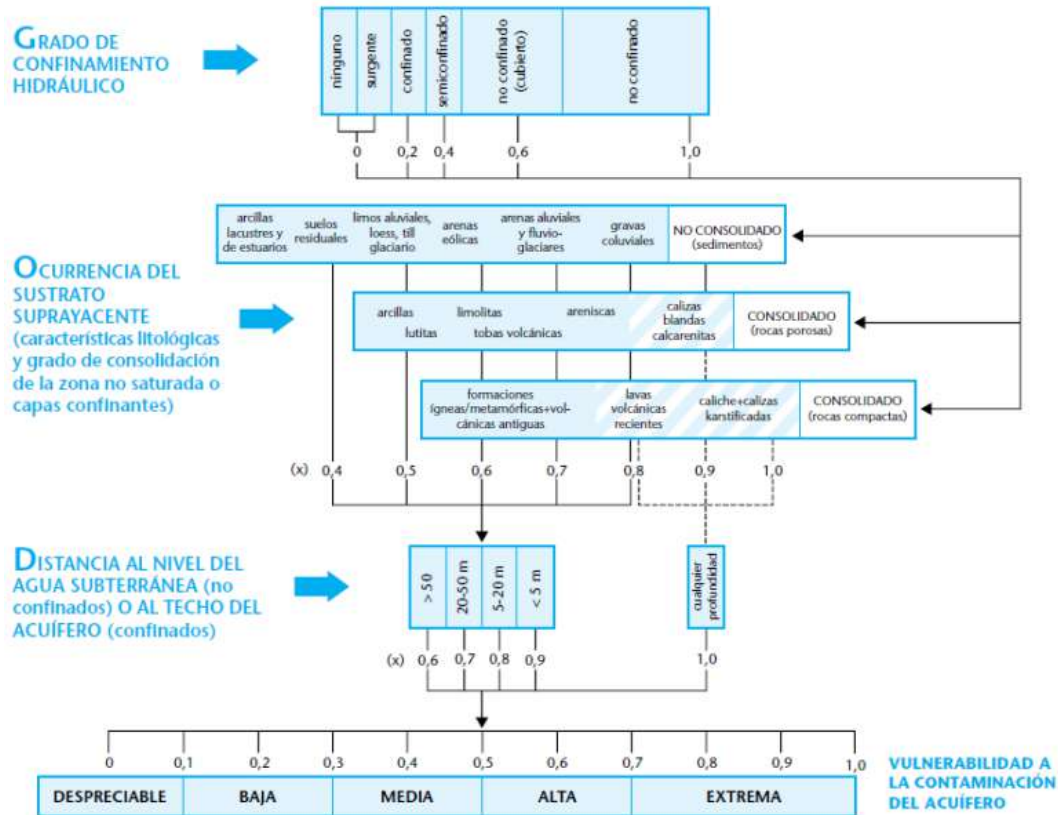


Figura 5.1.6.249 Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca

Fuente: Foster, S; Hirata, R; Gomes, D; D'Elia, M; Paris, M; (2002)

Los resultados del cálculo del índice de vulnerabilidad pueden variar entre 0 y 1, obteniendo las categorías de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, como se observa en la Tabla 5.1.6.108.

Tabla 5.1.6.108 Valoración de la vulnerabilidad con el método GOD

Grado	Vulnerabilidad
Muy bajo	0 – 0,1
Bajo	0,1 – 0,3
Moderado	0,3 – 0,5
Alto	0,5 – 0,7
Muy Alto	0,7 - 1

Fuente: Vargas, M., (2010)

A continuación, se presentan el análisis de los parámetros para hallar el índice GOD:

a. Resultados en la UHG-1 – Llenos Antrópicos

La unidad de llenos antrópicos se define como una unidad con poca importancia hidrogeológica por lo que se le asigna un valor de 0,1 en el parámetro G (grado de confinamiento hidráulico). Esta unidad está compuesta, por llenos actualmente existentes asociados principalmente a obras de infraestructura vial, por lo que suelen estar

conformados de mezcla de limos, arenas limosas y arcillosas, y algunas gravas; para el parámetro O (sustrato litológico) se le otorga un valor de 0,6. Para el parámetro D (profundidad del nivel freático), el valor es de 0,9, ya que los niveles estáticos tomados en los piezómetros circundantes oscilan entre 1,54 y 6,31 m.

b. Resultados en la UHG-2 – Depósitos coluviales y de flujo

El acuífero coluvial y de flujo se define como no confinado, por lo que se le asigna un valor de 1 en el parámetro G (índice de confinamiento). La estratigrafía de esta unidad se caracteriza por presentar suelos de textura limo arenosa a limo arcillosa y bloques, por lo que al parámetro O (sustrato litológico) se le otorga un valor de 0,8. Para el parámetro D (profundidad del nivel freático), el valor es de 0,8, ya que los niveles estáticos tomados en los piezómetros generalmente oscilan entre 5,0 y 20,0 m.

c. Resultados en la UHG-3 – Depósitos aluviales

El acuífero aluvial se define como un acuífero no confinado, por lo que se le asigna un valor de 1 en el parámetro G (índice de confinamiento). La estratigrafía de esta unidad se caracteriza por sedimentos no consolidados, de textura arena fina y limos, por lo que al parámetro O (sustrato litológico) se le asignó un valor de 0,7. Para el parámetro D (profundidad del nivel freático), el valor es de 0,9 ya que los niveles estáticos tomados en los piezómetros generalmente se encuentran cercanos a los 3,00 m.

d. Resultados en la UHG-4 – Suelo residual

Esta unidad hidrogeológica se define como un acuitardo, por lo que al parámetro G (índice de confinamiento), se le asignó un valor de 0,7. La estratigrafía de esta unidad corresponde a suelos de textura limo arcillosa a arcillosa asociados a la meteorización de las rocas pertenecientes al Batolito Antioqueño, por lo que al parámetro O (sustrato litológico) se le asignó un valor de 0,4. Finalmente, al parámetro D (profundidad del nivel freático), el valor asignado es de 0,8 ya que los niveles estáticos tomados en los piezómetros generalmente se encuentren los 5,0 – 20,0 m.

e. Resultados en la UHG-7 – Roca fresca fracturada

Esta unidad hidrogeológica se define con un grado de confinamiento hidráulico confinado, por lo que al parámetro G se le da una calificación de 0,2. La estratigrafía corresponde a las rocas intrusivas de tipo tonalita, cuarzodiorita y diorita pertenecientes a la unidad geológica Batolito Antioqueño, con un grado de fracturamiento medio a bajo, por lo que al parámetro O (sustrato litológico) se le da un valor de 0,6. Finalmente, al parámetro D (profundidad del nivel freático), el valor asignado es de 0,8 ya que aproximadamente la distancia del nivel al techo del acuífero se encuentra entre 5,0 y 20,0 m.

En la Tabla 5.1.6.109 y la Figura 5.1.6.250 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 5.1.6.109 Clasificación parámetros GOD

Unidad hidrogeológica	UHG-1	UHG-2	UHG-3	UHG-4	UHG-7
Parámetro					
G	0,1	1	1	0,7	0,2
O	0,6	0,8	0,7	0,4	0,6
D	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8
Índice vulnerabilidad intrínseca	0,05	0,64	0,63	0,22	0,10
	Muy bajo	Alta	Alta	Bajo	Bajo

Fuente: Integral S.A., 2025

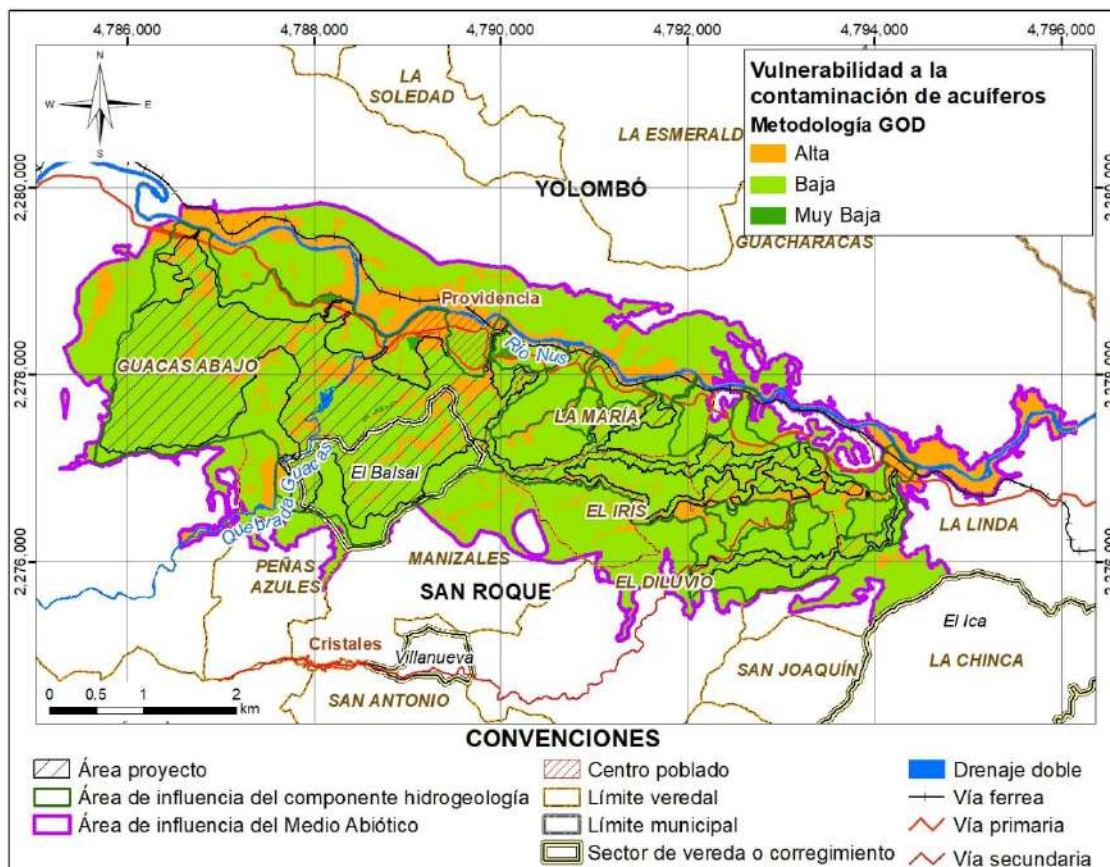


Figura 5.1.6.250 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos. Metodología GOD

Fuente: Integral S.A., 2025

En la Figura 5.1.6.250 se observa que el 78,87% del área presenta vulnerabilidad baja, asociada principalmente a zonas con suelo residual, saprolito y roca fresca fracturada. El 20,41% del área corresponde a vulnerabilidad alta, relacionada con depósitos aluviales, coluviales y de flujo. Finalmente, el 0,72% del área muestra vulnerabilidad muy baja, vinculada a los rellenos antrópicos. La Tabla 5.1.6.110 presenta el resumen de las áreas.

Tabla 5.1.6.110 Resumen de las áreas – Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos – GOD

Categoría Vulnerabilidad	Área (ha)	Área (%)
Muy baja	17,96	0,72
Baja	1968,04	78,87
Alta	509,27	20,41
Total	2495,27	100,00

Fuente: Integral.S.A., 2025

B. Método DRASTIC

El método DRASTIC utiliza siete parámetros para la evaluación de la vulnerabilidad, que dependen del clima, el suelo, el sustrato superficial y el subterráneo (Vargas, M., 2010) así:

- **D** (Depth to ground water) - Profundidad del agua subterránea: indica el espesor de la zona no saturada que es atravesado por las aguas de infiltración y que pueden traer consigo el contaminante, hasta alcanzar el acuífero.
- **R** (Recharge rate) - Recarga neta: es la cantidad de agua anual por unidad de superficie que contribuye a la alimentación del acuífero y resulta de forma primaria de la escorrentía superficial y de la fracción de precipitación después de satisfacer la evapotranspiración. Es el principal vehículo transportador de los contaminantes.
- **A** (Aquifer media) - Litología y estructura del medio acuífero: representa las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir los contaminantes.
- **S** (Soil media) - Tipo de suelo: representa la capacidad de los suelos para oponerse a la movilización de los contaminantes y corresponde a la parte de la zona vadosa o no saturada, que se caracteriza por la actividad biológica. En conjunto, con el parámetro A, determinan la cantidad de agua de percolación que alcanza la superficie freática.
- **T** (Topography) - Topografía: representa la pendiente de la superficie topográfica e influye en la evacuación de aguas con contaminantes por escorrentía superficial y subsuperficial.
- **I** (Impact on vadose zone) - Naturaleza de la zona no saturada: representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical.
- **C** (Conductivity) - Conductividad hidráulica del acuífero: determina la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, es decir la velocidad.

De acuerdo con las características y el comportamiento, a cada parámetro se les asignan índices que van desde 1,0 (mínima vulnerabilidad) hasta 10,0 (máxima vulnerabilidad), presentados en la

Tabla 5.1.6.111:

Tabla 5.1.6.111 Valoración de parámetros para el método DRASTIC

Profundidad del nivel freático, Dr	
D (Profundidad, m)	Rango Dr
0 - 1,5	10
1,5 - 4,6	9
4,6 - 9,1	7
9,1 - 15,2	5
15,2 - 22,9	3
22,9 - 30,5	2
> 30,5	1

Medio acuífero, Ar		
A (Litología del acuífero)	Rango Ar	Típico
Lutita masiva	1 - 3	2
Roca metamórfica / ígnea	2 - 5	3
Roca metamórfica / ígnea meteorizada	3 - 5	4
Arenas y gravas de origen glaciar	4 - 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 - 9	6
Arenisca masiva	4 - 9	6
Caliza Masiva	4 - 9	6
Arena o grava	4 - 9	8
Basaltos	2 - 10	9
Caliza cárstica	9 - 10	10

Topografía, Tr	
T (Pendiente, %)	Rango Tr
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
>18	1

Recarga, Rr	
R (Recarga, mm)	Rango Rr
0 - 50	1
50 - 103	3
103 - 178	6
178 - 254	8
>254	9

Tipo de suelo, Sr	
S (Tipo de suelo)	Rango Sr
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

Naturaleza de la zona no saturada, Ir		
I (Tipo de Acuífero)	Rango Ir	Típico
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	2 - 6	3
Lutita	2 - 5	3
Caliza	2 - 7	6
Arenisca	4 - 8	6
Secuencias de areniscas, caliza y lutita	4 - 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 - 8	6
Rocas ígneas / metamórficas	2 - 8	4

Conductividad hidráulica, Cr	
C (Conductividad hidráulica, m/día)	Rango Cr
0,04 - 4,08	1
4,08 - 12,22	2
12,22 - 28,55	3
28,55 - 40,75	6
40,75 - 81,49	8
>81,49	10

Fuente: Vargas, M., (2010)

Grava y arena	6 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Caliza cárstica	8 - 10	10

Además de la asignación de valores a cada parámetro, este método asigna un factor de ponderación a cada parámetro, que depende si el contaminante en cuestión es un pesticida (DRASTIC-P) o no (dado que los pesticidas son menos volátiles y más persistentes), con valores que están entre 1,0 y 5,0 (Tabla 5.1.6.112).

Tabla 5.1.6.112 Factores de ponderación para el método DRASTIC

Tipo de contaminante	Dw	Rw	Aw	Sw	Tw	Iw	Cw
Pesticida	5	4	3	5	3	4	2
No pesticida	5	4	3	2	1	5	3

Fuente: (Vargas, M., 2010)

El valor índice se obtiene, entonces, de la sumatoria de la multiplicación de cada parámetro por su respectivo factor de ponderación, así:

$$iV_{DRASTIC} = (D_r * D_w) + (R_r * R_w) + (A_r * A_w) + (S_r * S_w) + (T_r * T_w) + (I_r * I_w) + (C_r * C_w)$$

Donde: r: factor de clasificación o valoración

w: factor de ponderación

Ecuación 5.1.6.15 Cálculo de la vulnerabilidad. Método DRASTIC

Fuente: (Vargas, M., 2010)

Los resultados pueden variar entre 23 (mínima) y 230 (máxima), obteniendo los rangos de vulnerabilidad de la Tabla 5.1.6.113. En la práctica este índice varía entre 50 y 200. Si se considera contaminación por pesticidas (DRASTIC-P) podrá tomar valores comprendidos entre 26 y 260.

Tabla 5.1.6.113 Grados de vulnerabilidad general del método DRASTIC

Grados de vulnerabilidad general (no pesticida)	
Grado	Vulnerabilidad
Muy bajo	23 - 64
Bajo	65 - 105
Moderado	106 - 146
Alto	147 - 187
Muy alto	188 - 230

Fuente: (Vargas, M., 2010)

Para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas con este método en la zona de interés, se clasifica la información existente de acuerdo con los rangos propuestos en la Tabla 5.1.6.113.

Los resultados de la valoración (r) de cada parámetro se pueden ver en la Tabla 5.1.6.114 y la Figura 5.1.6.251, Figura 5.1.6.252, Figura 5.1.6.253, Figura 5.1.6.254, Figura 5.1.6.255, Figura 5.1.6.256 y Figura 5.1.6.257.

Tabla 5.1.6.114 Pesos asignados a las diferentes variables evaluadas. Método DRASTIC

Sigla	Parámetro	UHG-1 Llenos antrópicos	UHG-2 Depósitos coluviales y de flujo	UHG-3 Depósitos aluviales	UHG-4 Suelo residual	UHG-7 Roca fresca
Dr	Profundidad nivel freático	Se emplearon las isopiezas				
Ar	Medio acuífero	7	7	7	4	3
Cr	Conductividad hidráulica	1	1	2	1	1
Rr	Recarga	Se empleo el ráster de recarga en condiciones normales				
Sr	Suelo	9	9	9	1	1
Ir	Naturaleza de la zona no saturada	7	6	7	4	2
Tr	Pendiente	Se reclasificaron las pendientes de acuerdo con la ¡Error! El resultado no es válido para una tabla.				

Fuente: Integral S.A., 2025

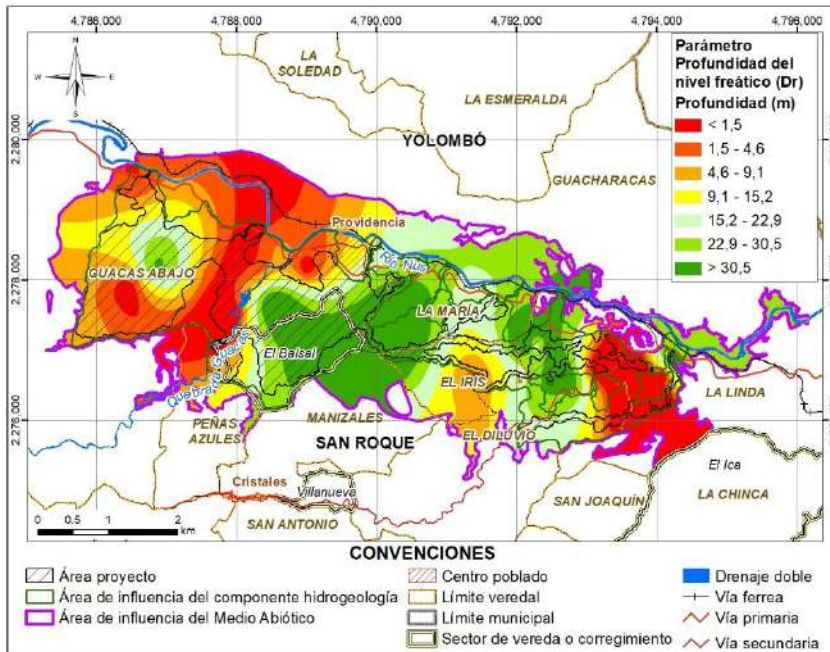


Figura 5.1.6.251 Parámetro nivel freático (Dr). Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

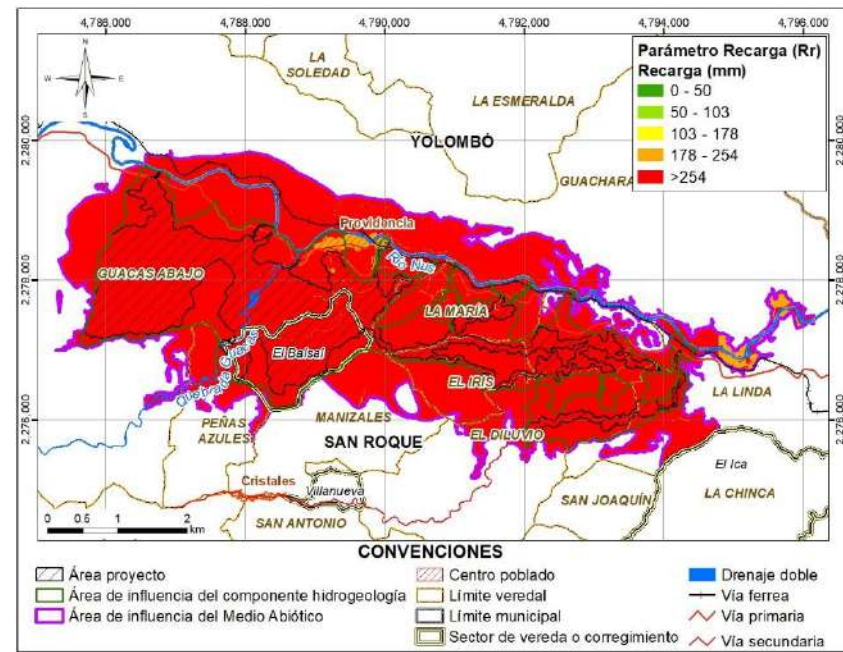


Figura 5.1.6.252 Parámetro Recarga (Rr). Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

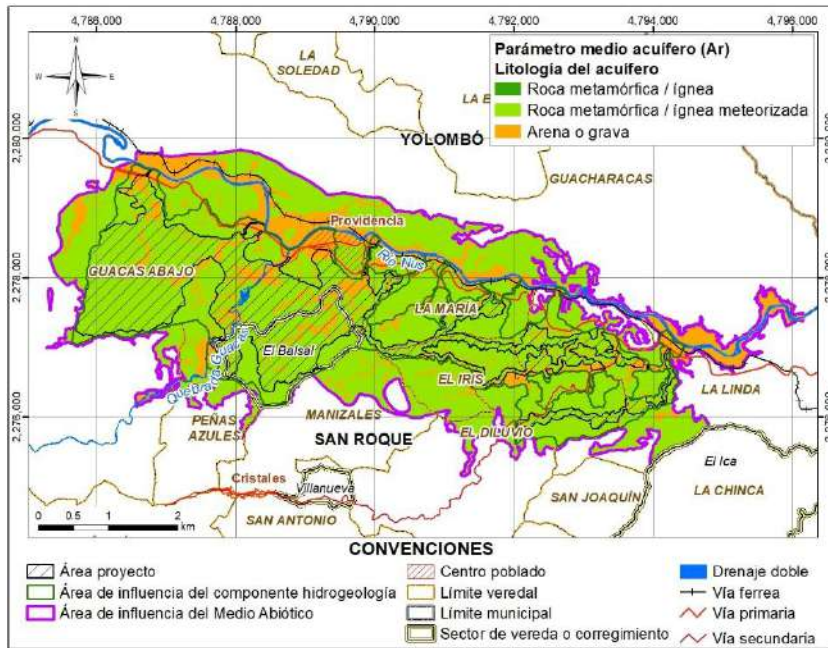


Figura 5.1.6.253 Parámetro medio acuífero (Ar). Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

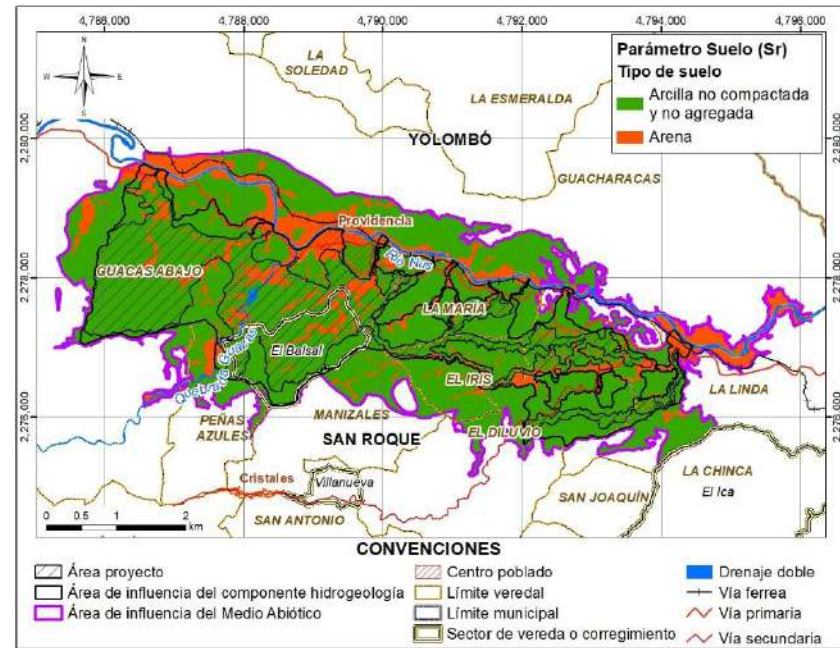


Figura 5.1.6.254 Parámetro tipo de suelo (Sr). Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

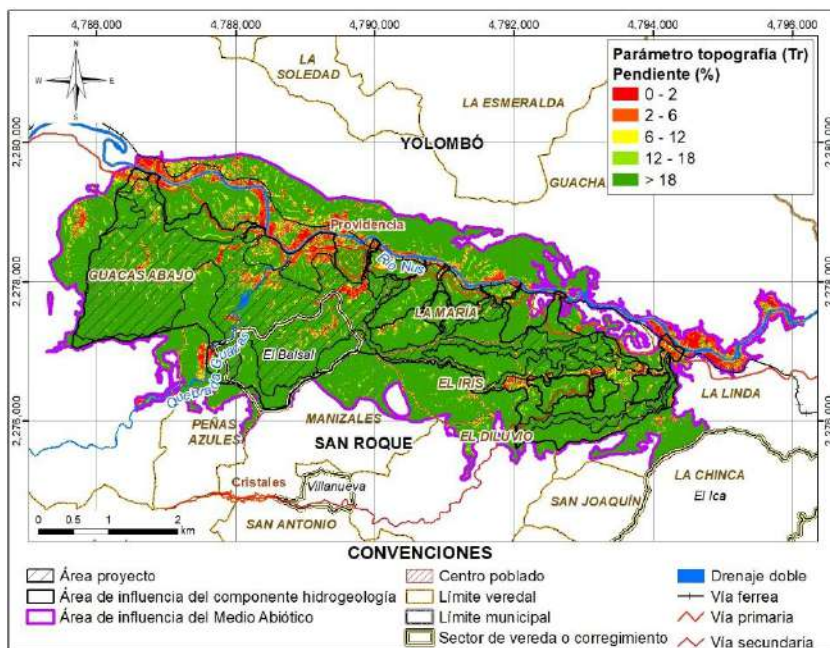


Figura 5.1.6.255 Parámetro Topografía (Tr). Método DRASTIC
Fuente: Integral S.A., 2025

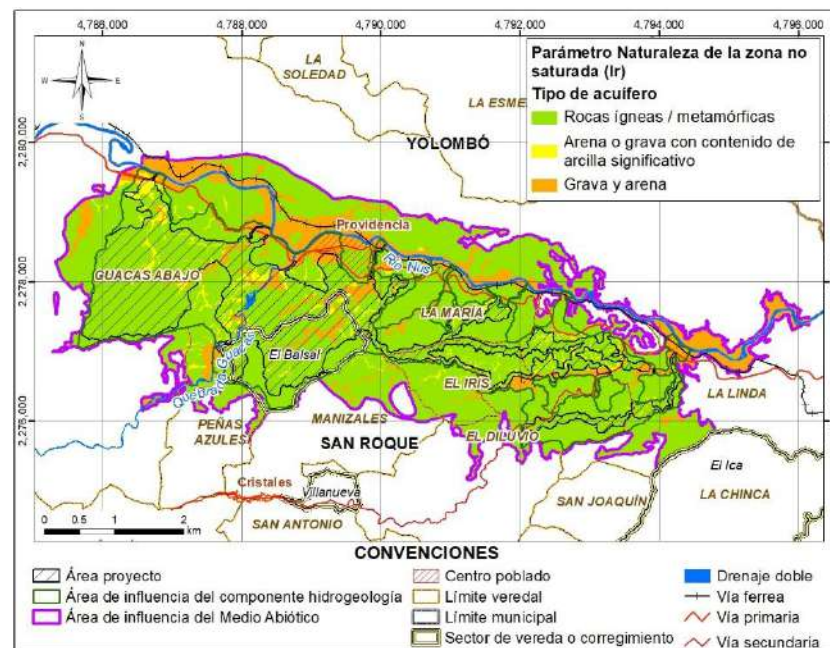


Figura 5.1.6.256 Parámetro naturaleza de la zona no saturada (Ir). Método DRASTIC
Fuente: Integral S.A., 2025

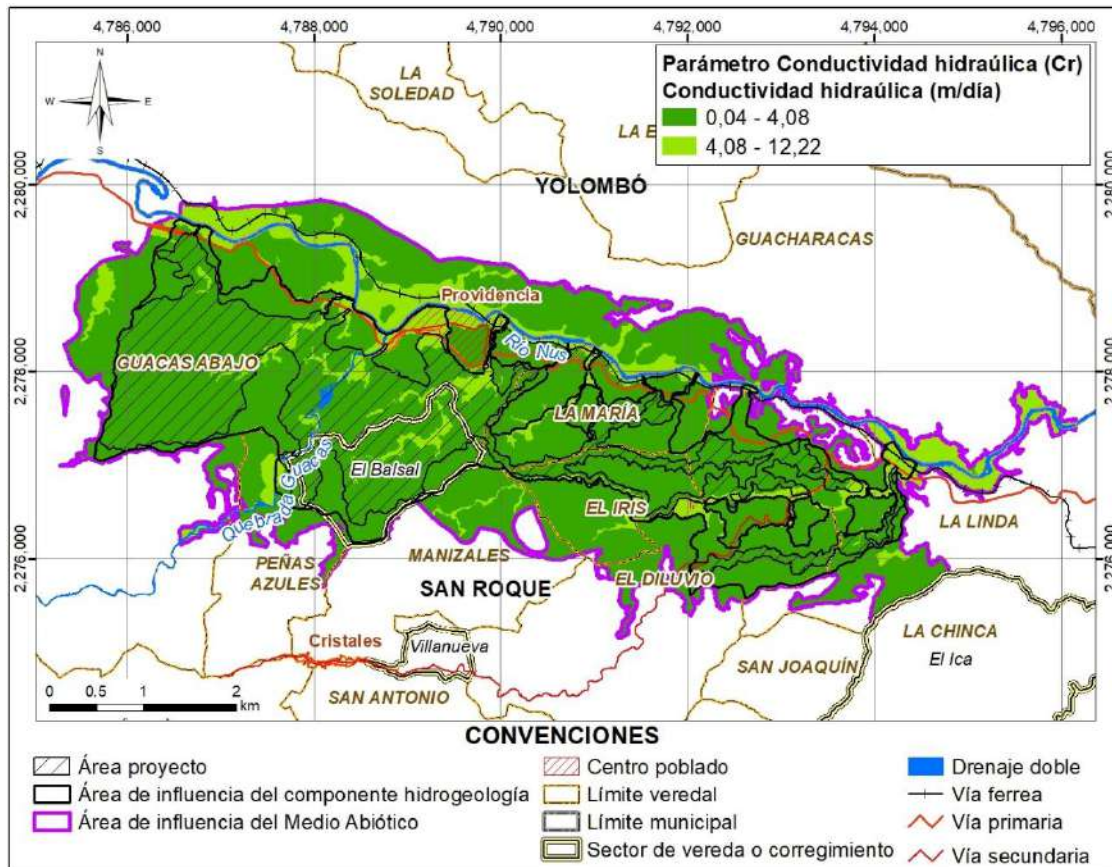


Figura 5.1.6.257 Parámetro conductividad hidráulica (Cr). Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

La Figura 5.1.6.251 muestra la vulnerabilidad según la profundidad del agua subterránea, donde se evidencia que el nivel freático es más superficial hacia los sectores oeste y este del área de influencia abiótica, especialmente en proximidad a los cauces principales (río Nus, quebrada Guacas y quebrada Palestina). Esta condición implica una mayor vulnerabilidad a la contaminación en dichas zonas. Por el contrario, en la parte central del área se presentan niveles freáticos más profundos, lo que se asocia con una menor vulnerabilidad, dado que el agua subterránea se encuentra más protegida frente a posibles contaminantes.

La Figura 5.1.6.252 muestra una recarga alta en gran parte del territorio evaluado, lo que conlleva a una mayor vulnerabilidad debido a al aumento en la probabilidad de arrastre e infiltración de contaminantes.

La Figura 5.1.6.253 muestra la vulnerabilidad a la contaminación según la litología del acuífero; siendo los acuíferos asociados a los depósitos aluviales, coluviales y de flujos los más vulnerables a la contaminación, ya que los materiales que lo conforman corresponden predominantemente a arenas y limos con contenido considerable de gravas.

La Figura 5.1.6.254 muestra la vulnerabilidad según el tipo de suelo, los acuíferos asociados a los depósitos aluviales, coluviales y flujos son los que presentan mayor vulnerabilidad.

La Figura 5.1.6.255 muestra la vulnerabilidad a la contaminación según el porcentaje de inclinación, evidenciando que las zonas circundantes a los drenajes principales presentan mayores índices de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.

La Figura 5.1.6.256 presenta la vulnerabilidad según la naturaleza de la zona no saturada donde se observa que el acuífero aluvial es quien presenta una menor capacidad para obstaculizar el transporte vertical de los contaminantes.

Y la Figura 5.1.6.257, presenta la vulnerabilidad a la contaminación según la conductividad hidráulica, siendo el acuífero aluvial el que presenta el índice más alto.

El resultado del álgebra de mapas, presentado en la

Figura 5.1.6.258,, evidencia que las mayores vulnerabilidades se concentran en los sectores occidental y oriental del área de influencia. Estas zonas corresponden a áreas con niveles freáticos someros y presencia del acuífero aluvial, condiciones que, sumadas a la alta recarga, incrementan el riesgo de contaminación. En contraste, la zona central muestra vulnerabilidad baja a muy baja, asociada a niveles freáticos más profundos, lo que proporciona mayor protección frente a la infiltración de contaminantes.

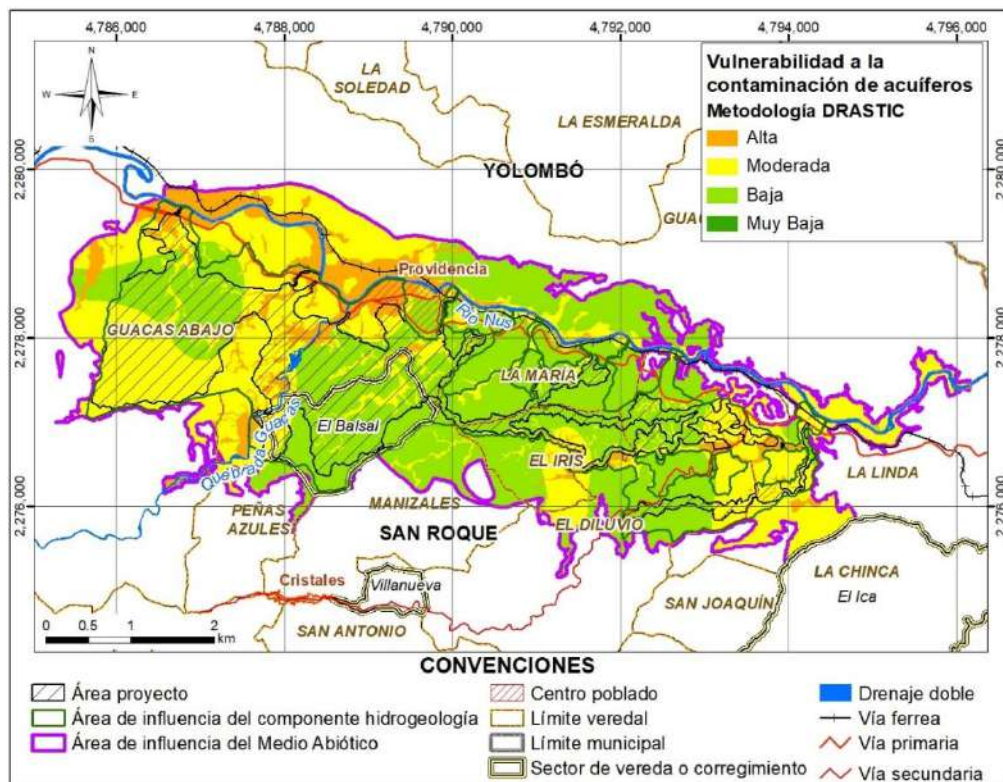


Figura 5.1.6.258 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos. Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

La Tabla 5.1.6.115 muestra las áreas para cada categoría de vulnerabilidad a la contaminación.

Tabla 5.1.6.115 Resumen de las áreas – Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos – DRASTIC

Categoría Vulnerabilidad	Área (ha)	Área (%)
Muy baja	0,20	0,01
Baja	1.191,45	47,75
Moderada	1.011,55	40,54
Alta	2.92,07	11,71
Total	2495,27	100,00

Fuente: Integral.S.A., 2025

5.1.6.5.5 Resultados del Modelo Hidrogeológico Conceptual

Los parámetros fisicoquímicos medidos en los puntos de agua subterránea durante las campañas de muestreo isotópico e hidroquímico realizadas por SHI S.A.S. (2025) muestran valores de conductividad eléctrica bajos para los manantiales (58,9 a 177,3 $\mu\text{S/cm}$) lo que indica un grado de mineralización muy bajo asociado a poco tiempo de residencia en el medio subterráneo. Por su parte los valores de conductividad eléctrica medidos en pozos y aljibes son ligeramente más altos (57,9 a 283 $\mu\text{S/cm}$) encontrándose la mayoría entre los 100 y 300 $\mu\text{S/cm}$ exhibiendo un grado de mineralización bajo a medio. Los piezómetros PZR 13-07 (283 $\mu\text{S/cm}$) y PZS12-12 (242 $\mu\text{S/cm}$), registran los valores más altos de conductividad eléctrica, 283 y 242 $\mu\text{S/cm}$ respectivamente, lo cual puede indicar que están captando aguas con un mayor tiempo de residencia en el medio subterráneo o con interacción con materiales más solubles (SHI SAS, 2026).

Los valores de oxígeno disuelto presentan variaciones entre 0,41 y 7,85 mg/l, tanto en manantiales como en piezómetros y el único aljibe existente, en donde la mayoría de los puntos presentan valores altos, entre 4 y 7 mg/l, lo que se relaciona aguas de infiltración reciente con poco tiempo de tránsito en el medio subterráneo. Los valores más bajos se encuentran en los manantiales M233, M118 y en los piezómetros PZA12-08 y DH-FS-315 los cuales son de poca profundidad y captan unidades aluviales y suelos residuales, Esta baja concentración de oxígeno sugiere condiciones reductoras, posiblemente asociadas a procesos de degradación de materia orgánica (SHI SAS, 2026).

Las aguas subterráneas en la zona de estudio presentan una composición que varía entre bicarbonatada cálcica a bicarbonatada sódica, con un ligero aumento de la mineralización hacia horizontes más profundos, La ausencia de sulfatos y cloruros en los análisis de laboratorio es una característica común en toda el área de estudio, lo que indica poca evolución química del agua subterránea y se asocia a un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo. Además, las mayores concentraciones de iones se identifican en la parte baja de la cuenca, en proximidad al río Nus. En particular, se observa una acumulación significativa de hierro y manganeso en estas zonas, lo que sugiere una dirección de flujo de agua subterránea predominantemente hacia el río (SHI SAS, 2026).

El muestreo isotópico muestra que las diferentes fuentes de agua subterránea presentan una composición isotópica relativamente homogénea con variaciones mínimas entre los distintos puntos de muestreo. Sin embargo, los piezómetros BH-5M-08, PZR 13-09, PZR 13-05 y PZR 13-07, los cuales captan unidades rocosas, presentan una firma isotópica ligeramente más empobrecida, lo que puede sugerir un origen distinto o una historia de flujo diferenciada del resto de puntos.

Lo anterior permite inferir que el flujo subterráneo se da principalmente desde la zona vadosa local, y está regulado por los depósitos cuaternarios y el perfil de meteorización del Batolito Antioqueño. Este flujo puede ser más rápido en las unidades más superficiales, como los depósitos cuaternarios y el suelo residual y ser más lento a medida que aumenta la profundidad, lo que se evidencia en un aumento ligero de la mineralización del agua subterránea en horizontes más profundos.

A pesar de esto, la ausencia de aguas sulfatadas o cloruradas y los valores bajos de conductividad eléctrica que presentan de manera general los puntos de agua, muestran que el tiempo de residencia del agua en el medio subterráneo es corta, y evidencian la ausencia de flujos de agua más profundos. Sin embargo, las diferencias en la firma isotópica en los piezómetros que captan de unidades rocosas podrían sugerir un flujo regional rápido, que ocurre en la zona más superficial de la roca fracturada (SHI SAS, 2026).

El flujo subterráneo en las unidades más superficiales, (depósitos, suelo residual y saprolito) se encuentra controlado por los gradientes topográficos, mostrando un comportamiento similar al flujo superficial, siendo la dirección principal de flujo hacia el NE, teniendo al río Nus como el receptor principal del flujo, y presentando direcciones secundarias que desvían el agua subterránea hacia la quebrada Guacas. Por otra parte, el flujo en las unidades más profundas (zona de transición y roca) también tiene una dirección preferencial hacia el NE, en dirección al río Nus, sin embargo, presenta menos variaciones locales asociadas a la topografía local (SHI SAS, 2026).

En las Figura 5.1.6.259 se observan las unidades hidrogeológicas previas a la construcción del proyecto, la Figura 5.1.6.260 se muestra la distribución de las unidades hidrogeológicas en el área de influencia luego de las obras proyectadas, en la Figura 5.1.6.261 se muestra un perfil esquemático del flujo subterráneo, y la Figura 5.1.6.259 se observa un bloque diagrama esquemático del flujo de aguas superficial y subterráneo de la zona.

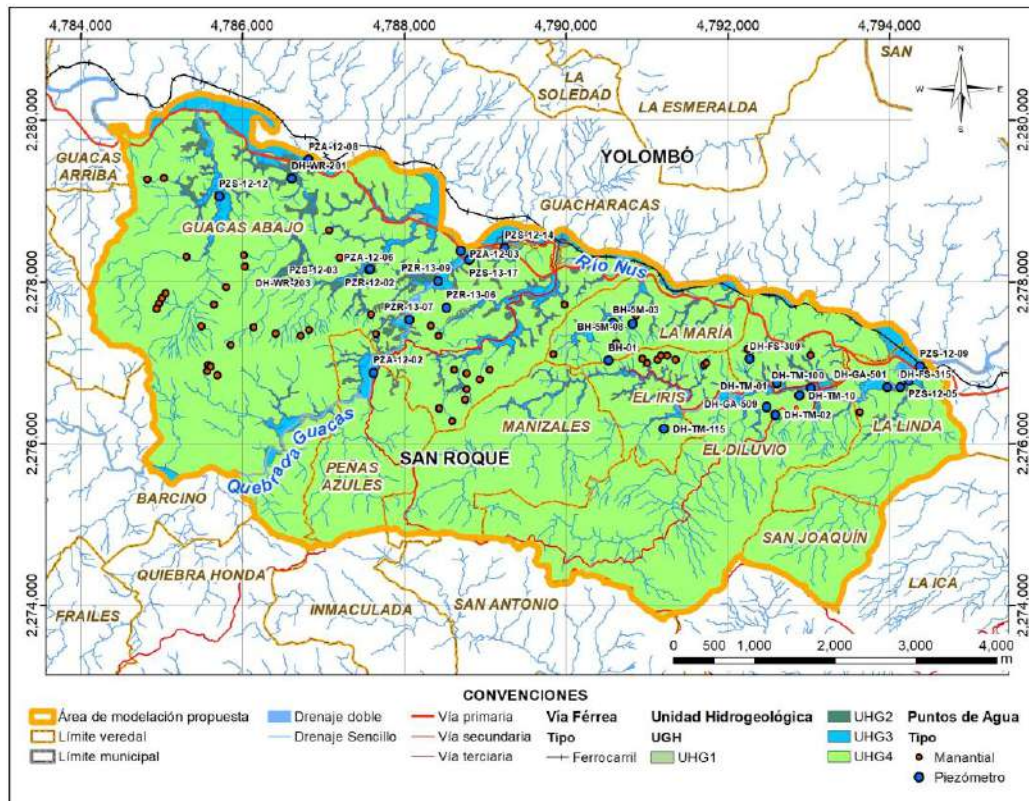


Figura 5.1.6.259 Unidades hidrogeológicas del área de estudio previas a la construcción del proyecto

Fuente: (SHI SAS, 2026)

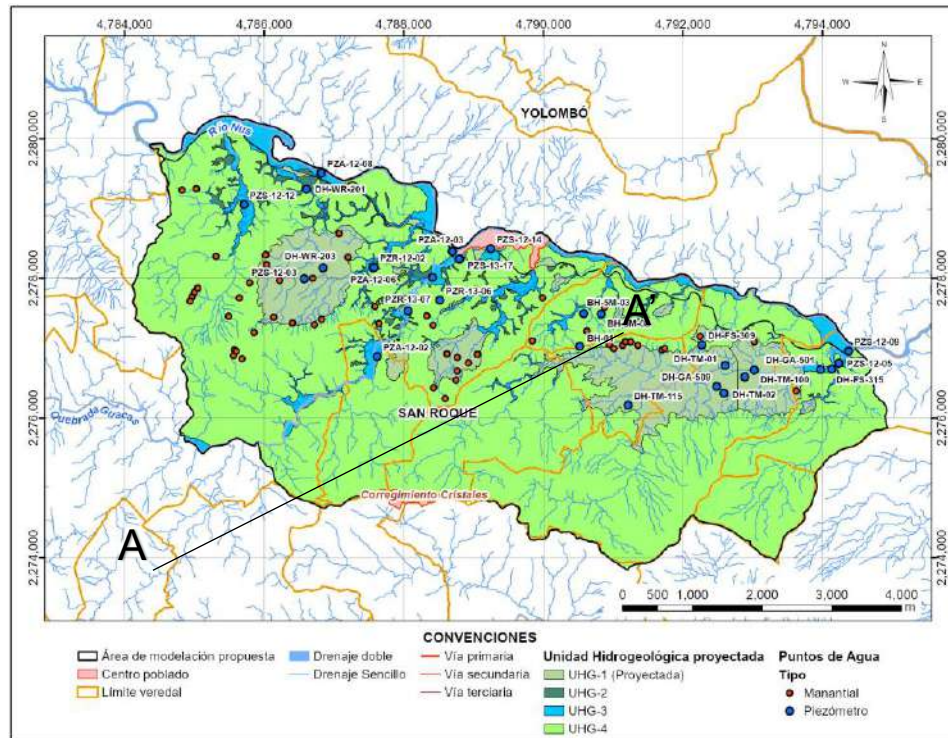


Figura 5.1.6.260 Unidades hidrogeológicas del área de estudio con zonas de depósitos proyectados

Fuente: (SHI SAS, 2026)

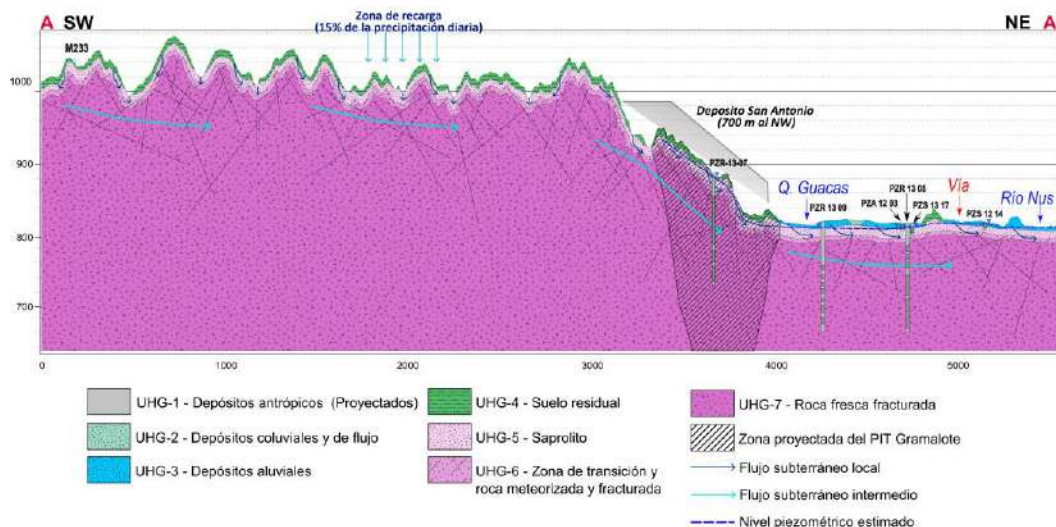


Figura 5.1.6.261 Perfil esquemático del flujo subterráneo en la zona de estudio

Fuente: (SHI SAS, 2026)

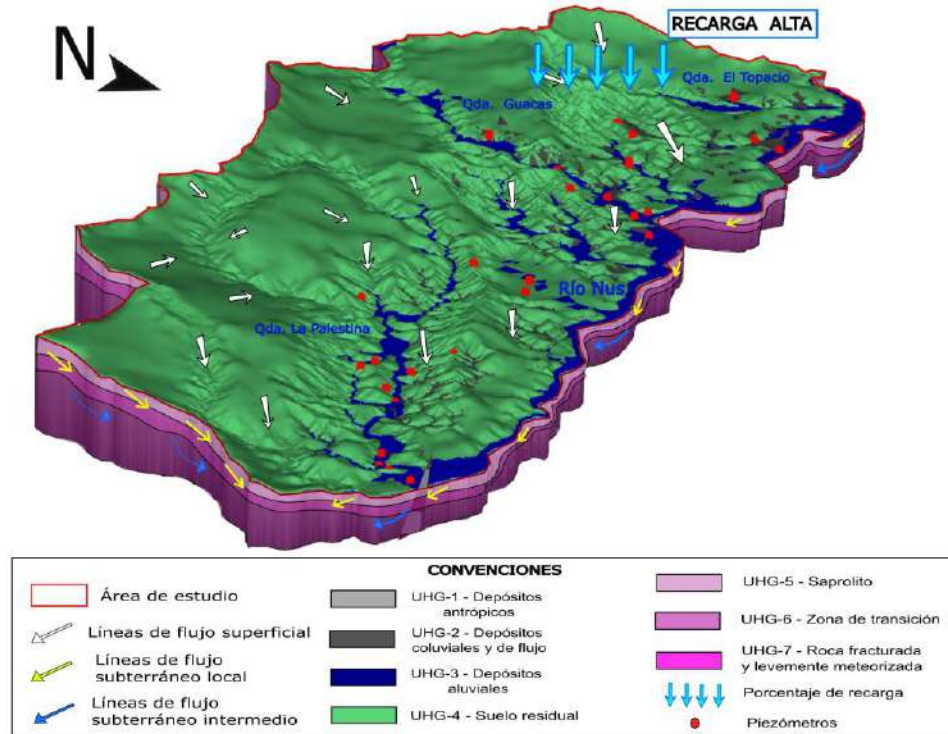


Figura 5.1.6.262 Bloque diagrama esquemático de las unidades hidrogeológicas en la zona de estudio.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

5.1.6.6 Modelo numérico del flujo de las aguas subterráneas

La actualización del modelo numérico se da principalmente para incorporar los cambios proyectados del Plan de Trabajo y Obras (PTO) de la Modificación del Estudio de Impacto Ambiental (MEIA) del proyecto, lo cual implica actividades como: refinamiento de la malla computacional para representar obras mineras, recalibración del modelo en estado estacionario y transitorio, incorporación de obras mineras actualizadas y simulación de potenciales impactos (SHI S.A.S., 2025).

La modelación conceptual y numérica en hidrogeología son herramientas que permiten mejorar la comprensión del sistema toda vez que proporcionan una estructura para sistematizar la información disponible y ayudan a identificar áreas donde se requiere información adicional. Asimismo, permiten interpretar la dinámica de las unidades hidrogeológicas y plantear escenarios para responder preguntas sobre el funcionamiento de estas. Adicionalmente, los modelos conceptuales y numéricos pueden focalizar la atención en relación con la ocurrencia de fenómenos y conflictos con incidencia en la sostenibilidad del recurso, su planeación y su gestión.

El modelo conceptual es un conjunto de hipótesis y asunciones que permiten simplificar el problema de flujo subterráneo y su dominio espacial y temporal real, a partir del análisis conceptual y multidisciplinar de componentes geológicos, geomorfológicos, hidrogeoquímicos, hidráulicos, hidrológicos y climatológicos. Es importante resaltar que estos modelos son de carácter dinámico y a medida que se disponga de información nueva,

se debe reevaluar y ajustar (Vélez, 2004), de acuerdo con la teoría de ciclos crecientes (Figura 5.1.6.263).

El modelo conceptual es el punto de partida de todo modelo numérico, de tal forma que el modelo numérico valide matemáticamente las hipótesis de flujo planteadas en el modelo conceptual y no al contrario. El modelo hidrogeológico numérico es la representación matemática del medio físico simplificado que ha sido representado mediante el modelo conceptual. El modelo numérico representa y resuelve el flujo de agua en medios porosos por medio de la ecuación general de flujo en derivadas parciales, la cual combina los principios de balance de masas y la ley de Darcy. El balance de masas involucra consideraciones de flujos de entrada y salida de agua y cambios en el almacenamiento. La solución de la ecuación general de flujo requiere establecer condiciones de frontera y condiciones iniciales, las cuales se definen a partir del modelo hidrogeológico conceptual (SHI S.A.S., 2025).

La ecuación general de flujo en medios porosos es la siguiente:

$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$	(1).
--	------

Donde K_i representa la conductividad hidráulica del medio en la dirección i ; $\delta h / \delta i$ representa el gradiente hidráulico en la dirección i ; S_s el coeficiente de almacenamiento específico; $\delta h / \delta t$ la variación en la carga piezométrica en el tiempo y W los aportes o salidas de agua ocasionados por acciones externas del medio poroso (término fuente / sumidero). Cuando el problema de flujo no varía en el tiempo, $\delta h / \delta t = 0$, se dice que el sistema está en condiciones estacionarias o permanentes, de otra manera se habla de estado transitorio.

En el Anexos_Caracterización_Hidrogeologia_AXO_MHN se presentan los archivos nativos del modelo.



Figura 5.1.6.263 Teoría de los ciclos crecientes en los sistemas de aguas subterráneas

Fuente: (Vélez, 2004)

5.1.6.6.1 Metodología

Un modelo hidrogeológico numérico se construye con el fin de dar respuesta a preguntas específicas relacionadas con el sistema modelado, ya sea para el entendimiento del sistema en estado natural o en condiciones alteradas bajo acciones externas, como intervenciones antrópicas o cambios ambientales (tales como deforestación y cambio climático). El proceso de modelación hidrogeológica numérica demanda una estructura ordenada de trabajo (*workflow*), para lo cual el protocolo de modelación presentado en la Figura 5.1.6.264 ofrece una serie de pasos sugeridos que permiten alcanzar los *objetivos de este proyecto desde la modelación numérica, que son*: obtener escenarios prospectivos de potenciales caudales de infiltración hacia el tajío del proyecto minero Gramalote, estimar los abatimientos de nivel piezométrico que se podrían esperar producto de la construcción del TAJO, y evaluar las potenciales filtraciones desde las facilidades mineras como los depósitos de estériles y presas de colas en la zona de interés.

Una vez definido el propósito del modelo numérico, su construcción se basa en el modelo conceptual, realizando la formulación numérica requerida para el código de simulación seleccionando, representando la geometría de las unidades hidrogeológicas en sistema de mallas y capas, sus propiedades y sus variables de estado, así como los insumos de entrada y salida, definiendo condiciones iniciales y condiciones de frontera.

Posteriormente, se ejecuta el modelo y los resultados son comparados con observaciones de campo (objetivos de calibración) para evaluar el ajuste del modelo durante el proceso de calibración. La calibración consiste en la variación sistemática de ciertos parámetros del modelo con el objetivo de reproducir las variables observadas, que corresponden

usualmente a los niveles piezométricos asociados a puntos de agua, caudales de infiltración registrados (en caso de existir obras), flujos base en los cuerpos de agua ganadores y a la piezometría general considerada para ajustar el comportamiento general de los flujos del sistema hidrogeológico representado (SHI S.A.S., 2025).

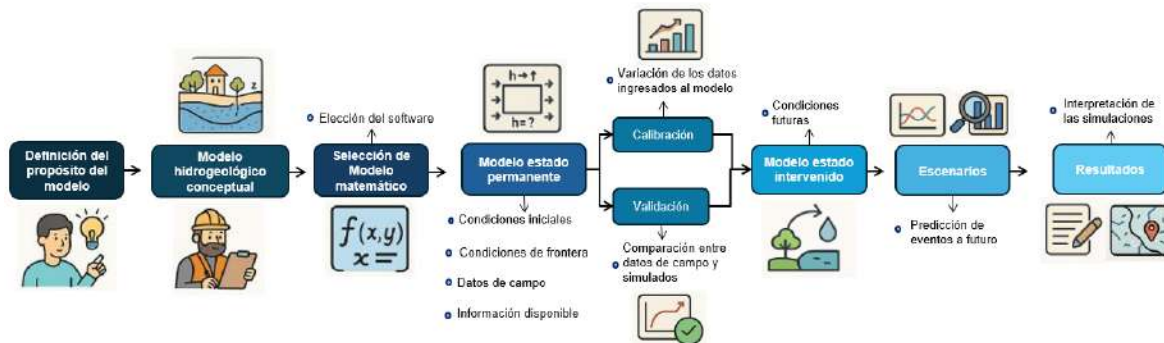


Figura 5.1.6.264 Teoría de los ciclos crecientes en los sistemas de aguas subterráneas

Fuente: (SHI SAS, 2026) a partir de (Anderson & Woessner, 1991)

La validación se realiza mediante la misma metodología y criterios que la calibración, salvo que se utiliza un conjunto de observaciones independiente respecto de aquel utilizado para la calibración. Si se tienen registros de observaciones suficientes, se debería privilegiar un conjunto de datos que represente una condición hidrológica distinta a la de los datos utilizados en la calibración. Una vez el modelo se encuentra calibrado y validado (en caso de ser posible), se puede utilizar en fase prospectiva; es decir, con objetivo de simular escenarios, con cierta capacidad predictiva. Finalmente, se describen e interpretan los resultados a la luz del modelo conceptual (SHI S.A.S., 2025).

Es muy importante resaltar que el modelo numérico es una versión matemática y simplificada del funcionamiento del sistema hidrogeológico, por tanto, está sujeto a limitaciones que implica un grado alto de incertidumbre, los principales factores de incertidumbre son:

- Las simplificaciones principales están relacionadas con la geometría de las unidades hidrogeológicas, la extensión de estas y sus espesores, así como a la variabilidad espacial de sus propiedades, tales como la conductividad hidráulica, también se simplifica notablemente la representación de las acciones exteriores sobre las unidades hidrogeológicas, tales como pozos de bombeo y simulación de obras de infraestructura (p.ej. túneles). Estas simplificaciones se aproximan de mejor manera a la realidad en función de la información disponible en el modelo conceptual y de acuerdo con las condiciones específicas que ofrece el software de modelación para su representación (interpolaciones espaciales, paquetes específicos de condiciones de frontera, etc.).
- La discretización temporal depende en gran medida de la capacidad computacional disponible, por tanto, es complejo representar procesos hidrogeológicos que se dan a bajas escalas temporales y combinarlos con procesos que se dan en escalas de tiempo de mayor duración.

- La capacidad de almacenar y transmitir agua en unidades hidrogeológicas rocosas se da fundamentalmente a través de sus discontinuidades, pues para la mayoría de las rocas ígneas como en este caso, la permeabilidad de su matriz rocosa es despreciable en comparación con la conductividad hidráulica de las fracturas, la cual se conoce tradicionalmente como permeabilidad secundaria y depende de las propiedades de la red de discontinuidades (abertura, relleno, conectividad, densidad, etc.). Por lo anterior, en la modelación numérica se suele aplicar un enfoque de medio poroso equivalente (EPM por sus siglas en inglés), dicho enfoque representa estas masas de rocas como un medio poroso capaz de transmitir agua en dirección del máximo gradiente, dependiendo del grado de fracturamiento e interconexión de la roca, dicha hipótesis toma mayor validez a determinadas escalas (Londoño Aguirre, 2015).

5.1.6.6.2 Código numérico y software

Todo modelo numérico de flujo subterráneo resuelve la ecuación diferencial (1), en conjunto con la ecuación de continuidad de caudal, en un dominio dado y sujeto a unas condiciones iniciales y de frontera conocidas. Tradicionalmente, existen tres aproximaciones generales para la solución de estas ecuaciones: diferencias finitas (DF), elementos finitos (EF) y diferencias finitas de volúmenes de control (DFVC), que se distinguen por la manera en que discretizan el dominio del problema para encontrar la solución numérica de las ecuaciones, pues la solución analítica solo es posible en casos muy específicos (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015), (Lozano Hernández, Marín Celestino, Martínez Cruz, & Ramos Leal, 2024). Se resalta que las tres aproximaciones resuelven las mismas ecuaciones, bajo la premisa de continuidad, pero bajo una aproximación distinta (SHI S.A.S., 2025).

Las soluciones numéricas no son continuas en el espacio y en el tiempo, como ya se ha mencionado son una aproximación discreta de ambas dimensiones, en el espacio a partir de puntos discretos (denominados nodos) y en el tiempo a partir de intervalos (denominados periodos de estrés), la variable de estado (niveles piezométricos) es calculada en dichos elementos discretos a partir de la resolución aproximada de la ecuación general de flujo (ecuación (1)). En el método de Diferencias Finitas (DF) los nodos son localizadas en el espacio tridimensional en el centro de celdas rectangulares (diferencias finitas), ubicadas espacialmente mediante los índices i, j, k en una cuadrícula georeferenciada (*grid*). Mientras que en el método de Elementos Finitos (EF) los nodos son localizados espacialmente en las coordenadas x, y, z , conformando una malla (*mesh*), dichos nodos se conectan mediante segmentos que conforman elementos típicamente triangulares (aunque también pueden ser cuadriláteros) conocidos como elementos finitos, pero la resolución de la ecuación siempre se da en los nodos. En la Figura 5.1.6.265 se muestra un ejemplo de la configuración geométrica de ambos métodos.

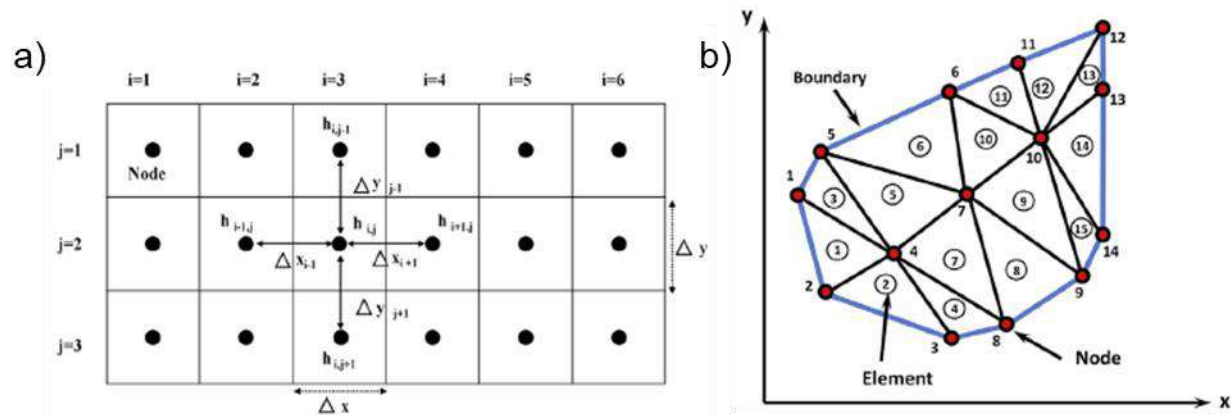


Figura 5.1.6.265 a) Cuadrícula de diferencias finitas en 2D ilustrando la notación de nodos, b) malla de elementos finitos en 2D ilustrando la notación de nodos y elementos

Fuente: (SHI SAS, 2026) a partir de (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)

Para la modelación del flujo subterráneo en el proyecto minero Gramalote, se ha seleccionado el método de aproximación de **elementos finitos (EF)**, por las siguientes razones:

- *Flexibilidad para la representación espacial de elementos antrópicos*, dado el uso de elementos geométricos irregulares (triángulos y cuadriláteros) que permiten ampliar o disminuir la escala de representación en un mismo modelo, permitiendo simular formas de objetos o intervenciones antrópicas detalladas, tales como tajos mineros y otras facilidades mineras como presas de relaves y depósitos de estériles, así como elementos lineales como túneles y canales de desviación.
- *Facilidad y eficiencia para generar refinamientos y anidamiento de modelos*, la discretización de la zona de interés mediante elementos finitos e interconexión a través de los nodos (vértices) facilita realizar refinamientos localizados alrededor de zonas de interés (elementos antrópicos, o elementos físicos de relevancia como cuerpos de agua o discontinuidades) sin extenderse hacia los extremos de la malla (como si sucede en las diferencias finitas), lo cual repercute en una mejor definición de los elementos de interés dentro del modelo sin incurrir en sobredimensionamiento del tamaño de los elementos en áreas donde no se presenta la necesidad.
- *Flexibilidad para representar condiciones hidrogeológicas complejas*, la facilidad de representar tanto horizontal como verticalmente (malla 3D) el medio subterráneo mediante nodos interconectados con formas irregulares, facilita la representación de condiciones hidrogeológicas complejas como zonas de alta heterogeneidad, pinchamientos de capas, discontinuidades como fallas y zonas de fracturas, contactos entre unidades hidrogeológicas, nacimientos, entre otros elementos propios del modelo hidrogeológico conceptual.
- *Eficiencia en tiempos de cómputo y convergencia*, si bien la posibilidad de representar la geometría del medio subterráneo de forma irregular acerca más al modelo a las condiciones hidrogeológicas reales, esto suele implicar una alta definición de elementos y nodos, que en función de su tamaño, interconexión y geometría pueden incurrir en amplios tiempos de cómputo; sin embargo, una definición cuidadosa de la malla de modelamiento, respetando las reglas de los elementos finitos y optimizando las

transiciones puede beneficiar de manera significativa la convergencia de la solución del flujo en cada paso de tiempo.

El enfoque EF resuelve el sistema a través del cálculo de los niveles piezométricos (h) en los nodos que conforman los vértices de los elementos en el que se discretiza el sistema hidrogeológico de interés. Se interpola dentro de cada elemento utilizando una función base asociada a cada nodo para encontrar una solución de prueba (*trial solution*) que relaciona el nivel en los nodos con el nivel en el elemento asociado (Álvarez-Villa, 2017). De tal forma el nivel piezométrico en un punto (x,y) en función del tiempo t puede escribirse así:

$h(x, y, t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) * N_i(x, y)$	(2).
--	------

$N_i(x, y)$ es la función base de interpolación asociada al nodo i . Estas funciones de interpolación tienen distintas expresiones dependiendo del tipo de elemento (triángulos, cuadriláteros) y del tipo de interpolación (siendo la lineal la más tradicional). La función de interpolación es una pirámide (Figura 5.1.6.266) con vértice sobre el nodo y cuya base tiene por lados los elementos que comparten el nodo opuesto al mismo nodo (Álvarez-Villa, 2017). Dado que la solución es de prueba es claro que no va a representar la solución final real del nivel piezométrico, incumpliendo la ecuación gobernante del flujo subterráneo (ecuación (1)), sin embargo, permite calcular un error residual, como la diferencia que existe entre la solución de prueba y la ecuación gobernante, si el residual sobre el dominio espacial del modelo es minimizado (optimización) la suma de los residuales converge a cero. El enfoque EF suele aplicar entonces el método de los residuales ponderados para minimizar el error de cierre en los nodos, aplicando el método de Galerkin (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015) (Álvarez-Villa, 2017).

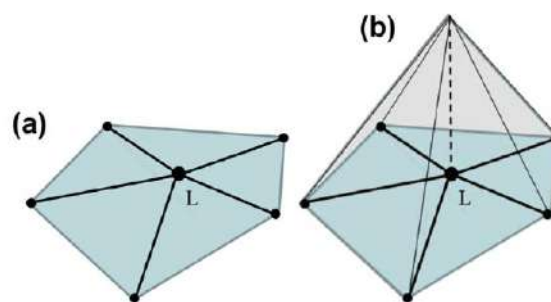


Figura 5.1.6.266 a) Vista en planta de una porción de elementos alrededor del nodo L en una malla de elementos finitos. (b) Vista tridimensional de la función base nodal $N(x,y)$.

Fuente: (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)

De acuerdo con el estado del arte de la modelación de flujo subterráneo (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015), (Lozano Hernández, Marín Celestino, Martínez Cruz, & Ramos Leal, 2024), existe un importante número de software que aplican el enfoque de EF para simular el flujo de aguas subterráneas (saturadas y vadosas), entre ellos se destacan FEFLOW de DHI, Hydrogeosphere de HGS, OpenGeoSys del UFZ (Helmholtz Centre for Environmental Research), SUTRA del USGS, GMS (Groundwater Modeling System) de

AquaVEO, AQUIFEM de CSIRO, HYDRUS, entre otros. Para el proyecto minero Gramalote se ha seleccionado el software FEFLOW (Finite Element Modeling of Flow) por ser un software integrado (código numérico e interfaz gráfica – concepto todo en uno) de amplio uso a nivel mundial, con documentación extensa, soporte técnico, con más de 30 años en el mercado y con aplicaciones específicas para el sector minero (Diersch, 2014) (DHI, 2025). La versión implementada es FEFLOW 10.0 Standard, licenciada por SHI S.A.S.

5.1.6.6.3 Dominio del modelo y su geometría

El dominio del modelo numérico comprende la misma área de influencia que fue delimitada en el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC), la cual parte de la delimitación realizada por Golder Associates (2021), verificando que cubre la totalidad de la infraestructura minera proyectada y definiendo límites físicos para su acotamiento. Para el MHC se modificó el límite occidental, donde no se prevén intervenciones ni modificaciones en el terreno de acuerdo con la MEIA, dicha modificación se realizó siguiendo la divisoria de cuencas. En la [Figura 5.1.6.267](#) se muestra la extensión del dominio espacial del modelo, con un área total de 40,10 km², dicho dominio es limitado de la siguiente manera: al norte con el cauce del río Nus, el cual configura una importante condición de frontera del modelo numérico (*Constant Head*), al occidente con la divisoria de aguas externa de la cuenca de la quebrada La Bella y la de un afluente menor de la quebrada Guacas, al oriente con la divisoria de aguas interna de la cuenca de la quebrada La Linda, al suroccidente con el cauce de la quebrada Guacas, al sur y al sureste con la divisoria de aguas externa de la cuenca del río El Socorro (SHI S.A.S., 2025).

El dominio espacial descrito anteriormente, configura la malla principal del modelo de elementos finitos (*supermesh*), la cual es incorporada en FEFLOW ([Figura 5.1.6.268](#)) y permite configurar la zona activa de modelamiento. [En la supermesh se configuran](#) las zonas de refinamiento, donde los nodos de la malla estarán más cercanos entre sí para representar mayor nivel de detalle espacial de elementos físicos del sistema hidrogeológico, tanto naturales como antrópicos, dichas zonas de modelamiento corresponden a: 1) la huella minera del proyecto, 2) los drenajes dobles dentro del dominio del modelo o en sus fronteras, que corresponden a la quebrada Guacas, [La Palestina](#), [El Topacio](#) y al río Nus respectivamente, 3) [75% de la red de drenaje del dominio del modelo, solo omitiendo los drenajes de orden 1 de menor longitud](#), 4) [los alineamientos de las fallas geológicas principales](#), 5) [los puntos de agua subterránea \(manantiales y piezómetros\) que se registran en la zona](#) (SHI S.A.S., 2025).

La construcción de la malla se realiza directamente en FEFLOW, así como el refinamiento, el suavizado y la optimización geométrica de la misma, el resultado se presenta en la [Figura 5.1.6.270](#), dicha malla es conformada por [1'209.902](#) Nodos, [2'412.575](#) elementos finitos (EF) y [4'832.378](#) bordes. El tamaño de los EF resultantes varía entre [106](#) m en las zonas más distantes a las áreas de refinamiento y [0,25](#) m en las zonas directas de refinamiento, permitiendo representar un modelo multiescalar anidado ([Figura 5.1.6.271](#)). La optimización de la malla busca obtener formas ideales, que suavice los ángulos y que permita una mejor conexión entre los nodos con fines de estabilidad numérica y eficiencia computacional, en la [Figura 5.1.6.271](#) se muestra el ángulo interior máximo de cada EF, denotando que dichos ángulos se alejan de ser demasiado obtusos o agudos, oscilando entre 60 y 80° (SHI S.A.S., 2025).

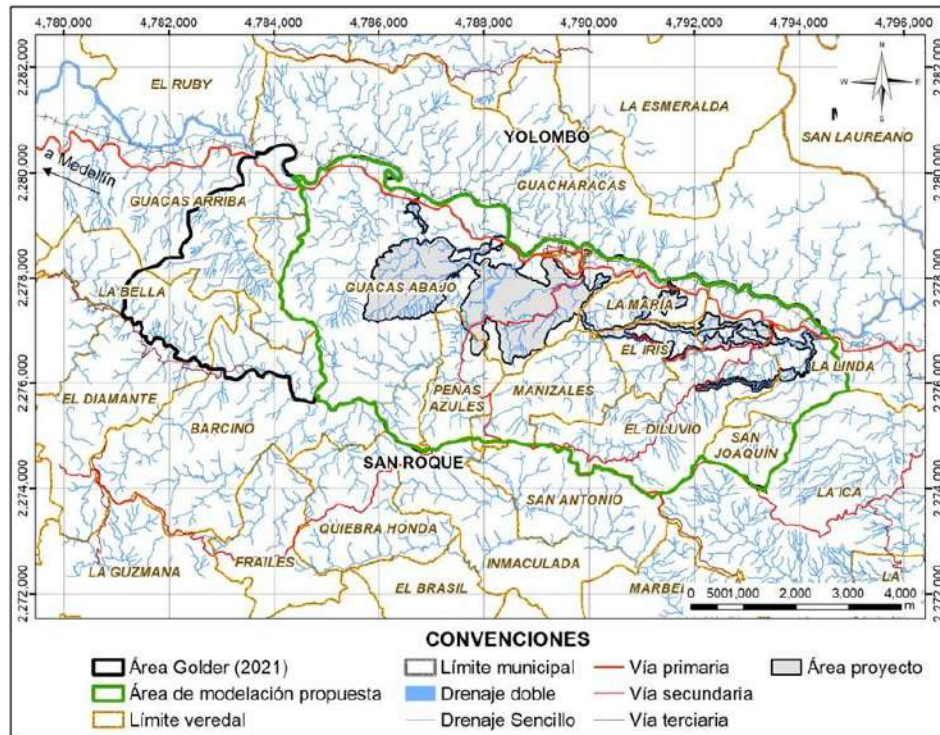


Figura 5.1.6.267 Área de influencia para el modelo hidrogeológico conceptual y numérico propuesto

Fuente: (SHI SAS, 2026) a partir de (Golder Associates Perú S.A., 2021)

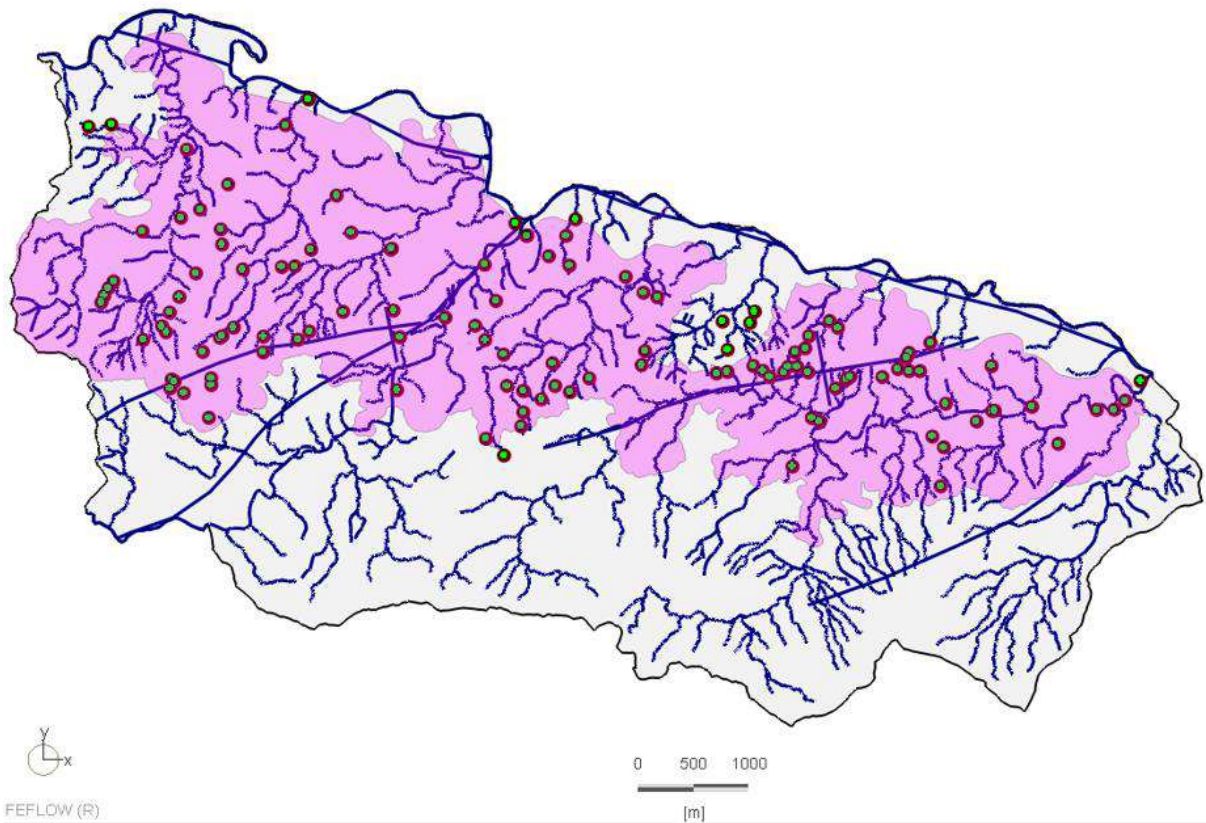


Figura 5.1.6.268 Zona activa de modelamiento incorporada en FEFLOW y elementos que definen la malla principal (supermesh: líneas azules – representan fallas, drenajes dobles y sencillos, puntos verdes – representan puntos de agua subterránea, polígono fucsia – representa el área del proyecto)

Fuente: (SHI SAS, 2026)

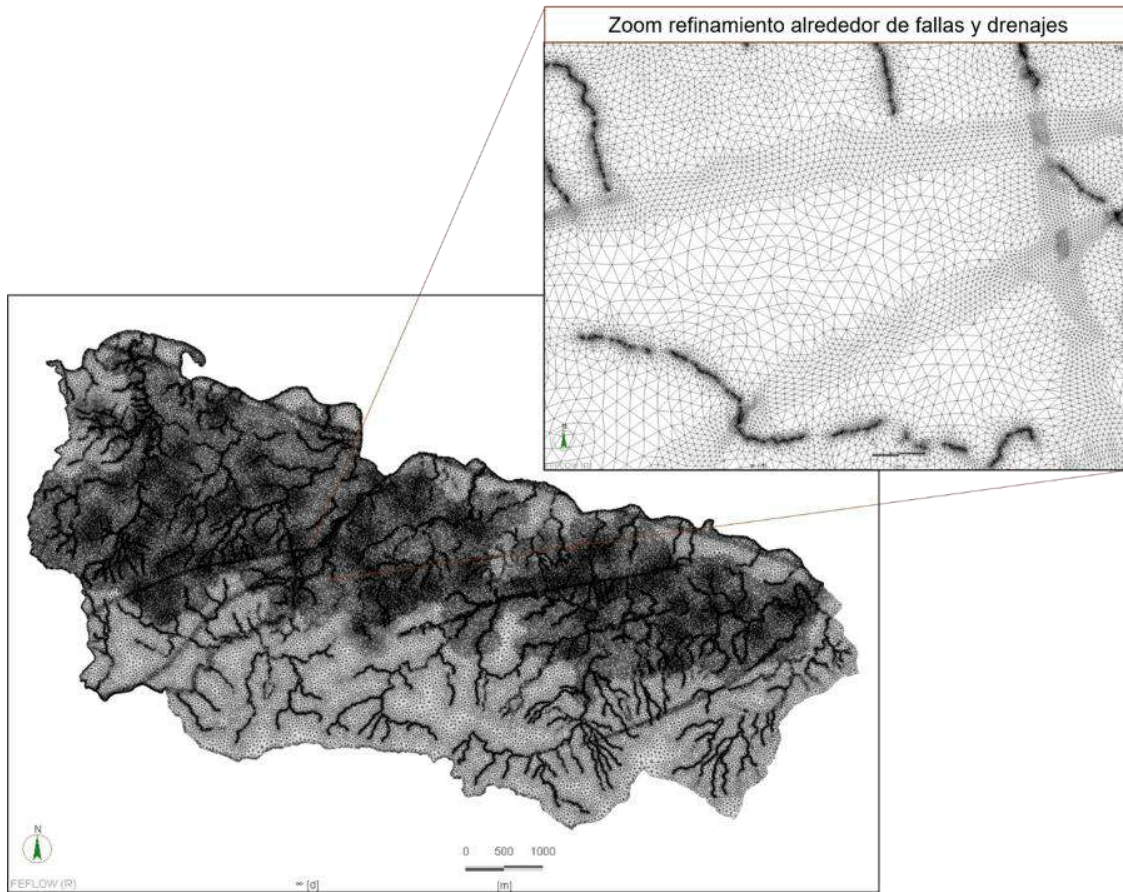


Figura 5.1.6.269 Geometría de la malla de elementos finitos construida para el modelo numérico con sus respectivas zonas de refinamiento

Fuente: (SHI SAS, 2026)

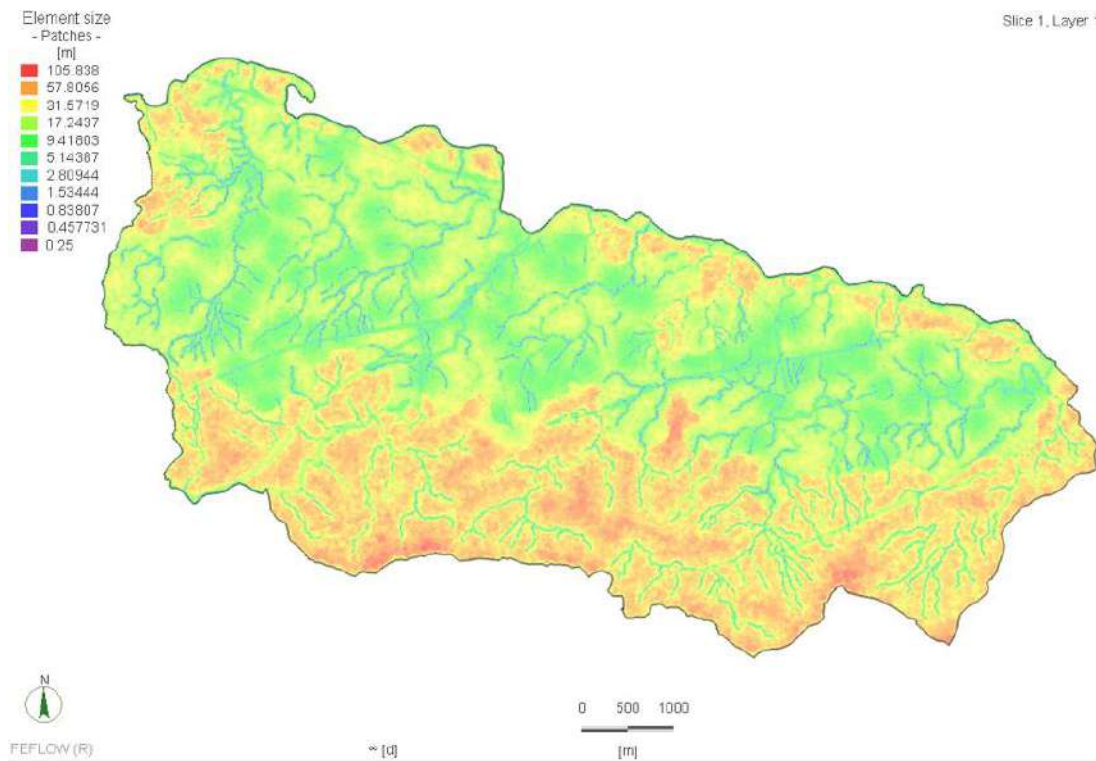


Figura 5.1.6.270 Tamaño de los elementos finitos que componen la malla computacional, denotando la implementación multiescalar, pasando de tamaños regionales (106 m) hasta tamaños locales (0,25 m)

Fuente: (SHI SAS, 2026)

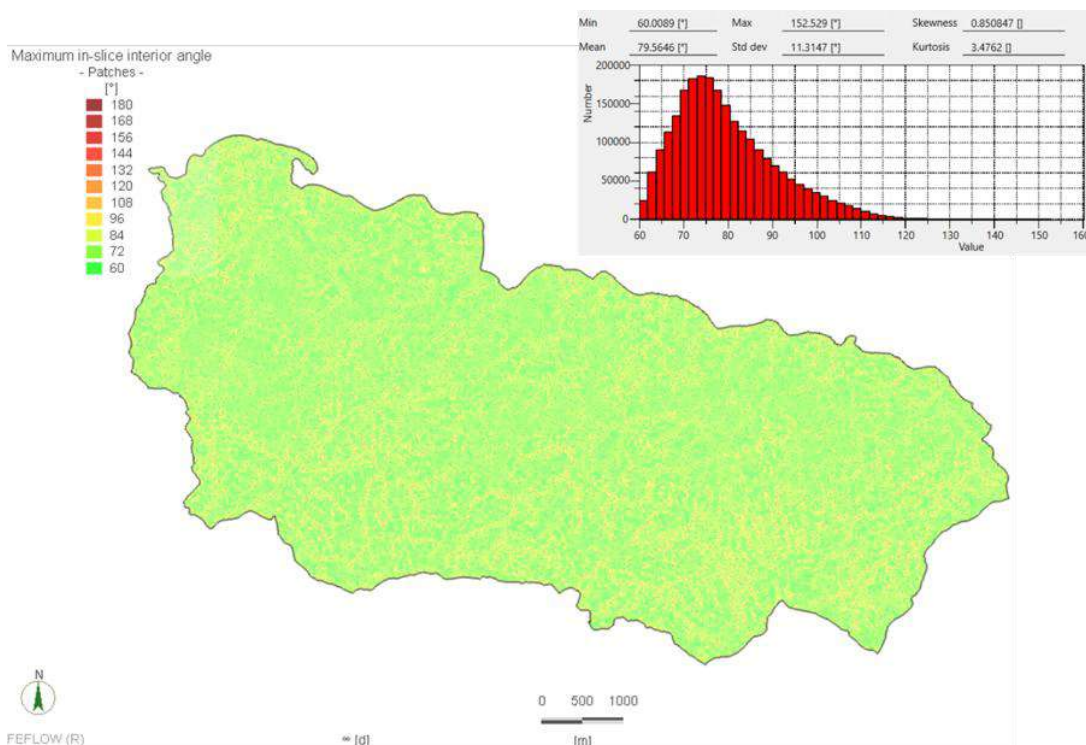


Figura 5.1.6.271 Ángulos interiores máximos de los elementos finitos que componen la malla computacional, denotando optimización de la malla con ángulos alrededor de 60 y 80°

Fuente: (SHI SAS, 2026)

5.1.6.6.4 Representación de las unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas (UHG) han sido definidas en el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC), estas configuran el modelo numérico tanto en geometría como en parámetros. La geometría vertical del modelo numérico es configurada a partir de los espesores de las UHG, los cuales han sido previamente interpolados e incorporados en FEFLOW, para tal incorporación se estima primero el techo de cada UHG en cada uno de los nodos que conforman la malla de EF, al incorporarse en el modelo, las rutinas internas de FEFLOW generan la interpolación aplicando el método determinístico IDW (*Inverse distance weighting*), obteniéndose el techo de cada UHG como se ilustra en la Figura 5.1.6.272. De esta manera el modelo numérico en la vertical se configura de forma general por cinco (5) capas (volumen) y seis (6) cortes (superficies). Los espesores de las capas (UHG) dentro del modelo se muestran en la Figura 5.1.6.273 teniendo en cuenta que el de la UHGVII se extiende hasta la cota de fondo del modelo (SHI S.A.S., 2025).

El modelo en la vertical se cierra con una cota de fondo constante de 50 m.s.n.m, considerada como una cota representativa teniendo en cuenta que el Tajo que se proyecta alcanzará una cota mínima de 490 m.s.n.m, se tendría más de 400 m de macizo rocoso por debajo del fondo del tajo, siendo un espesor significativo para capturar la dinámica vertical del flujo subterráneo. Es importante mencionar que la condición de frontera inferior (bottom total del modelo) es configurada como no flujo (no-flow).

Sin embargo, la configuración vertical no queda totalmente definida por la configuración de los espesores de las UHG, puesto que dicha configuración vertical debe tener el suficiente nivel de detalle para permitir representar los elementos antrópicos que se incorporarán en el modelo prospectivo, es decir los niveles de desarrollo del tajo. Por lo anterior se generan refinamientos en la vertical que consideren dichas variaciones en elevación.

La configuración complementaria de las capas se da de la siguiente manera: entre la superficie del terreno y el fondo de las UHGI, UHGII y UHGVII se dispone una capa de 25 cm de espesor como capa auxiliar para conectar espacialmente los nodos que representan drenajes, y aplicar en los escenarios prospectivos los espesores de los depósitos antrópicos. Después del fondo de la UHGVII – Zona de transición (capa 6), se ubica una capa auxiliar (capa 7) para incluir la geometría vertical de las obras lineales subterráneas, es decir el túnel de decantación y el túnel de desviación de la quebrada Guacas, posteriormente se incluyen 8 capas para representar refinamiento vertical, todas corresponden a subdivisiones geométricas (no hidrogeológicas) de la unidad UHGVII – roca poco alterada. Entre la capa 8 y 10 el espesor definido fue de 80 m, mientras que entre la capa 10 y 15 el espesor fue de 100 m, cerrando en el corte 16 con cota constante de fondo de 50 m. De la capa 13 a la capa 15 se define la UHGVII – roca poco alterada más profunda, para evaluar si variaciones en los parámetros hidráulicos en las capas más profundas podrían tener incidencia en la estabilidad de la simulación.

Definida la malla de EF y la configuración vertical de las capas y cortes, se obtiene el modelo tridimensional de EF para el sistema hidrogeológico del área de influencia, tal como se ilustra en la [Figura 5.1.6.273](#) y en la [Figura 5.1.6.274](#). El sistema en 3D queda representado por 15 capas, 19'358.432 nodos y 36'188.625 elementos.

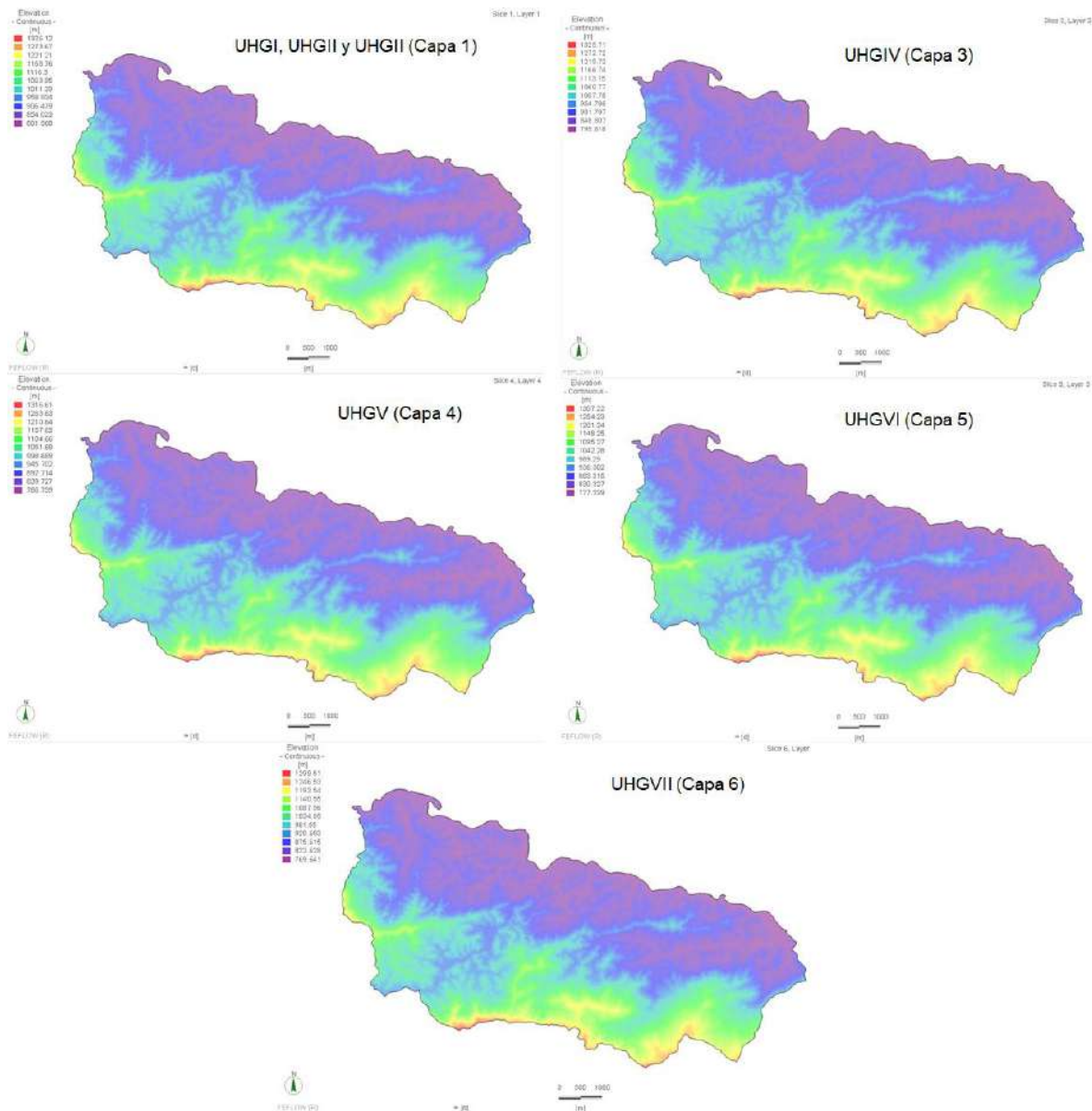


Figura 5.1.6.272 Elevación (top) de cada una de las capas y cortes (slices) que representan las UHG en la geometría vertical del modelo

Fuente: (SHI SAS, 2026)

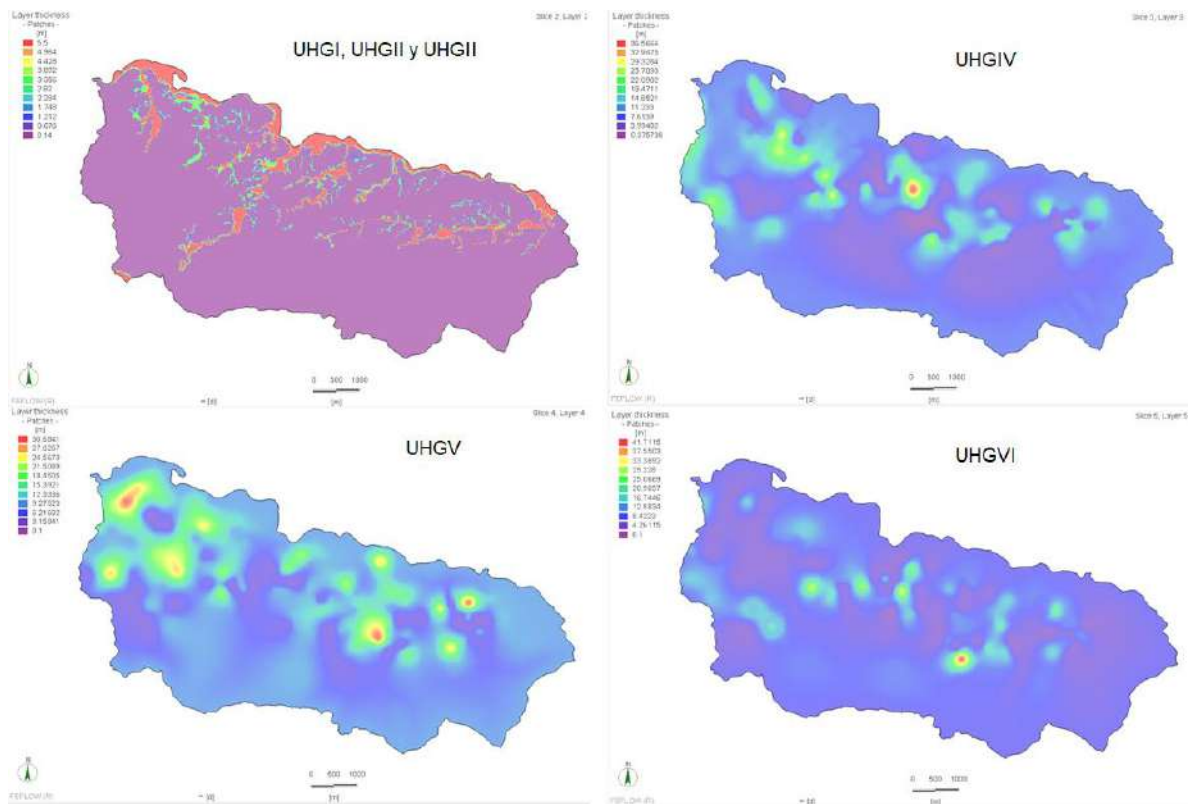


Figura 5.1.6.273 Espesores de las unidades hidrogeológicas incorporados dentro del modelo numérico de flujo y que definen su configuración geométrica vertical

Fuente: (SHI SAS, 2026)

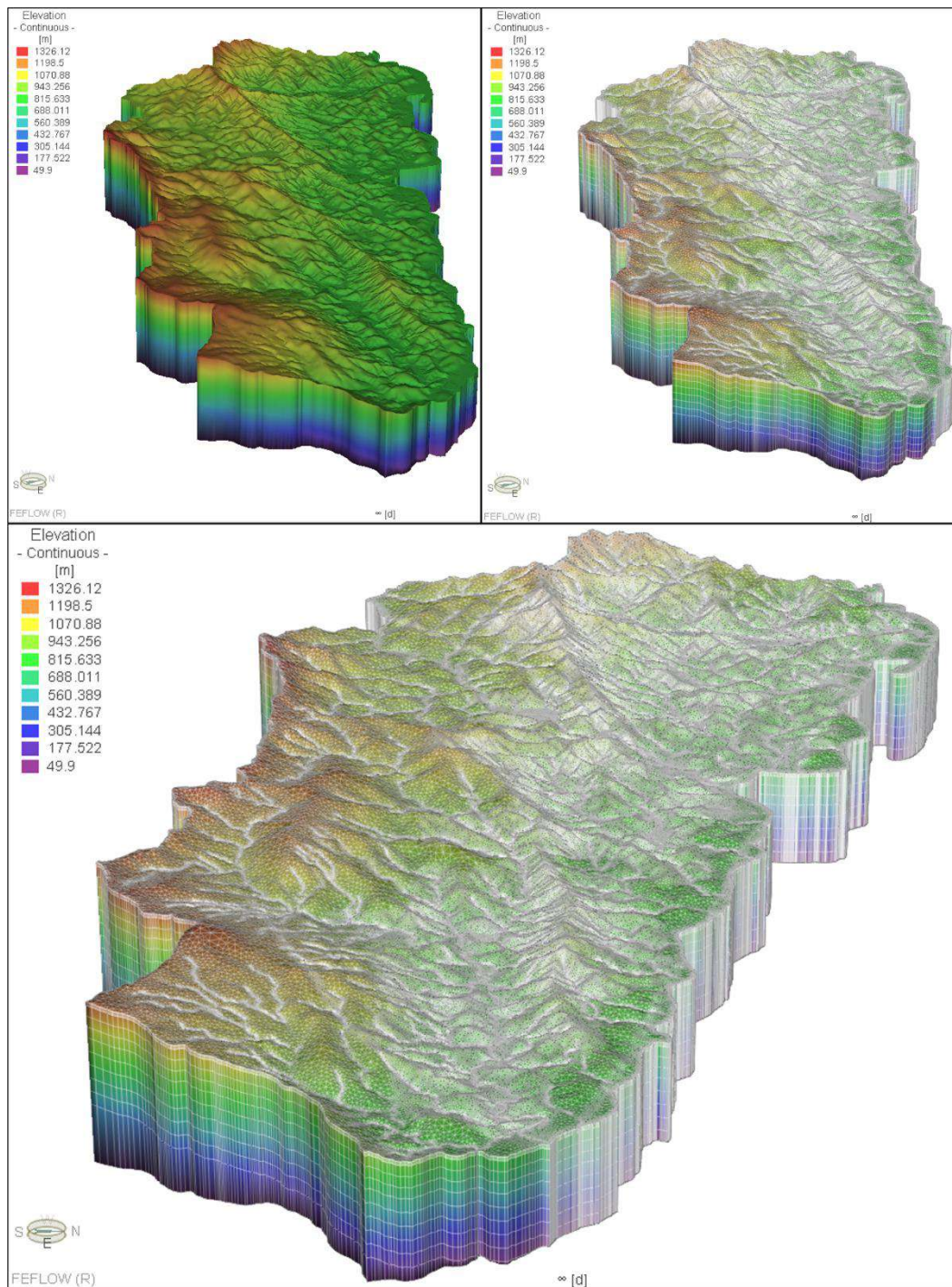


Figura 5.1.6.274 Vistas 3D de la configuración geométrica del modelo numérico, representando las elevaciones (panel superior izquierdo) y las elevaciones con la configuración de la malla 3D de elementos finitos (panel superior derecho y panel inferior)

Fuente: (SHI SAS, 2026)

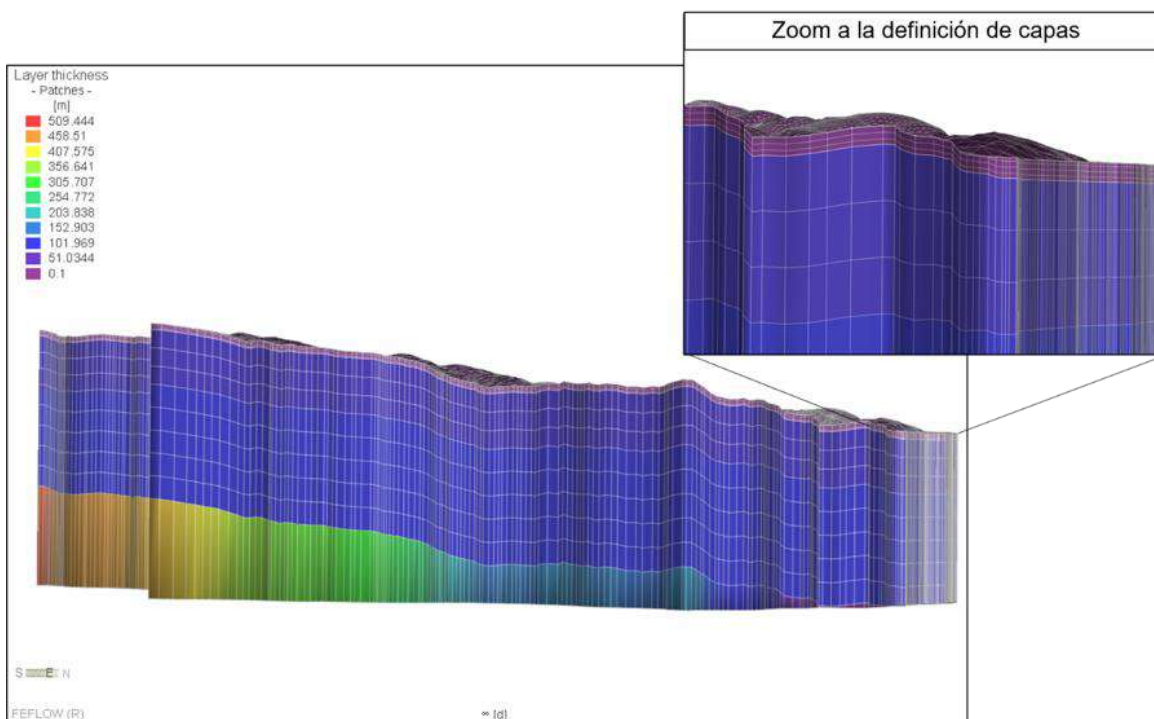


Figura 5.1.6.275 Corte transversal del borde Este del dominio del modelo donde se evidencia la configuración de las capas y espesores de las unidades hidrogeológicas de interés

Fuente: (SHI SAS, 2026)

5.1.6.6.5 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera de un modelo numérico son condiciones matemáticas que especifican la variable dependiente (niveles piezométricos h) o derivaciones de la variable dependiente (flujo) en los límites del dominio del problema. Las fronteras utilizadas para el modelo construido constituyen fronteras físicas del sistema hidrogeológico y son las siguientes.

A. No Flow

En un modelo tradicional de diferencias finitas (DF) representaría las celdas del mallado donde el modelo no opera, donde no hay flujo dentro o fuera de la celda, conformando la zona inactiva de modelamiento, dicha definición es similar para un modelo de elementos finitos (EF) con la diferencia que al tratarse de mallas irregulares, producto de dicha construcción no se obtienen elementos y nodos inoperantes por fuera del dominio de la malla, únicamente nodos y bordes de frontera (que coinciden con el límite de la *supermesh*), los cuales automáticamente son categorizados por FEFLOW como No-Flow, por lo cual es necesario verificar si dicha condición requiere ser cambiada. Para este modelo, se conservan los límites occidentales, orientales, sur y surorientales como No-Flow, dado que fueron definidos utilizando la divisoria de cuencas, por lo que dicha condición de frontera resulta conceptualmente acorde. Los límites Norte y Suroccidente, que coinciden con

cauces de cuerpos de agua son modificados para tratarse con las condiciones de frontera de Constant Head y Flow Transfer, respectivamente (SHI S.A.S., 2025).

B. Constant Head

Esta condición de frontera es de tipo 1 (Dirichlet); es decir, corresponde al nivel piezométrico conocido o impuesto en nodos particulares, se utiliza generalmente para modelar cuerpos de agua superficiales conectados con los flujos de agua subterránea.

Con esta condición se representaron los drenajes de mayor orden, que constituyen las principales fronteras hidráulicas del modelo, y corresponden al río Nus en el borde norte de la zona de modelación, en él se impone el nivel piezométrico igual a la cota del terreno menos un metro, asumiendo esta como el nivel medio de agua en el drenaje. Esta condición de frontera permanece constante en las diferentes simulaciones realizadas. En la Figura 5.1.6.276 se muestra la ubicación de los nodos configurados con Constant Head, los cuales se aplican únicamente en la capa 1. Adicionalmente, esta condición de frontera con restricciones se usa para simular diversas obras mineras, las cuales se explican más adelante en este documento.

C. Flow Transfer

Esta condición de frontera es de tipo 3 (*Cauchy*); es decir, corresponde a la segunda derivada de la ecuación gobernante, representado así la tasa de intercambio de flujo, por lo que resulta adecuada para representar cuerpos de agua donde se espera intercambio de caudales ya sea como efluentes o afluentes, dependiendo del gradiente entre las cargas hidráulicas de los elementos (UHGs y nodos de Flow Transfer), así como de parámetros de conexión como la conductancia hidráulica, parámetros que son objeto de calibración.

Teniendo en cuenta los resultados encontrados en el MHC y el refinamiento propuesto de la malla de EF en este modelo, se ha considerado como Flow Transfer a los nodos de las quebradas Guacas, La Palestina, El Topacio y todos los nodos que coincidan con el alineamiento de los drenajes sencillos, incorporados desde la supermesh (75% de la red de drenaje), tal como se muestra en la Figura 5.1.6.276 (SHI S.A.S., 2025).

En dichos nodos se configura la carga hidráulica igual a la elevación del terreno menos 20 cm y se impone una restricción (constraint) de máxima carga hidráulica igual a la elevación del terreno, para evitar desbordamiento de nivel en los nodos. Los nodos de Flow Transfer son configurados en la capa 1 y 2 para representar el espesor de los cuerpos de agua y garantizar su conexión.

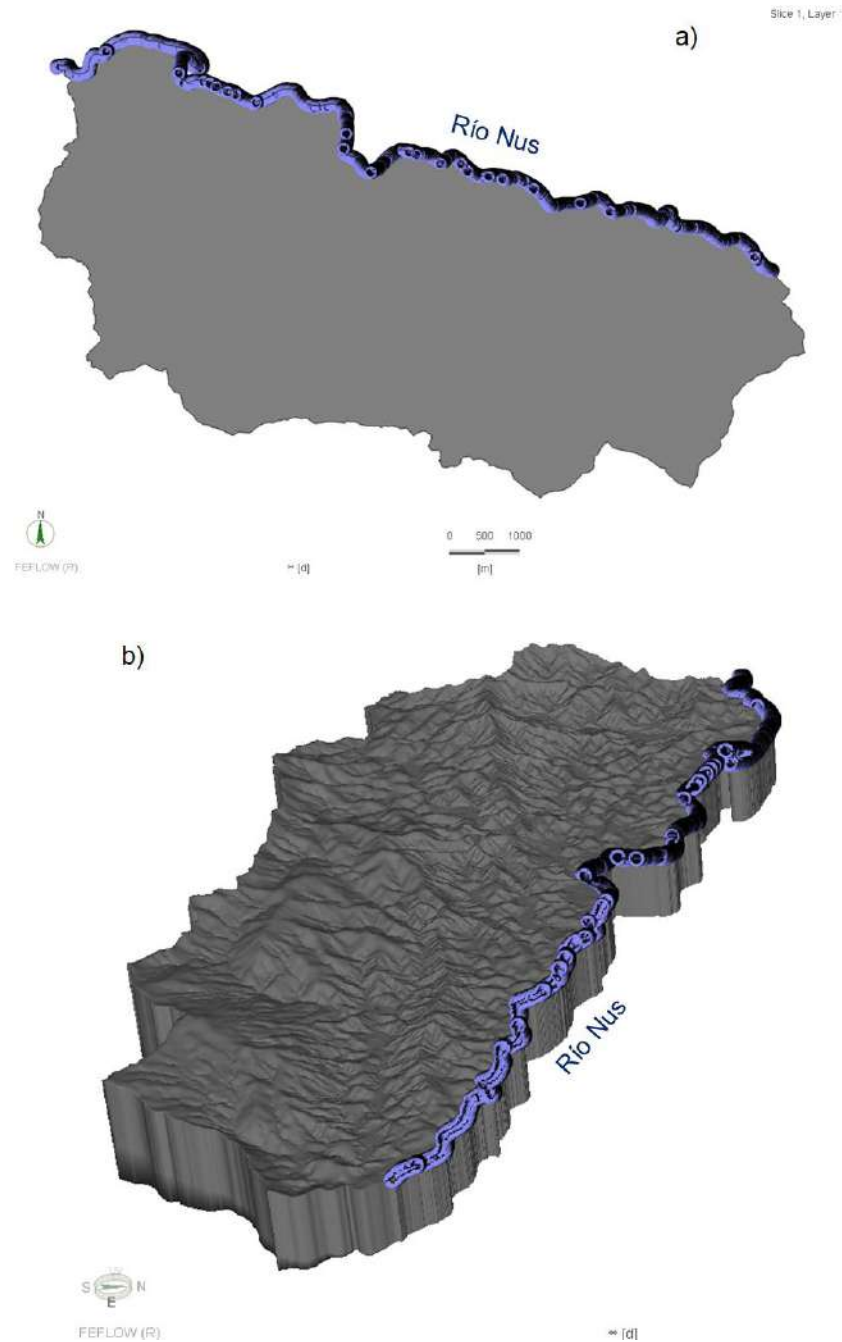


Figura 5.1.6.276 Representación de los nodos configurados con la condición de frontera tipo Constant Head (HH) en el modelo. a) vista en planta capa 1, b) vista 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

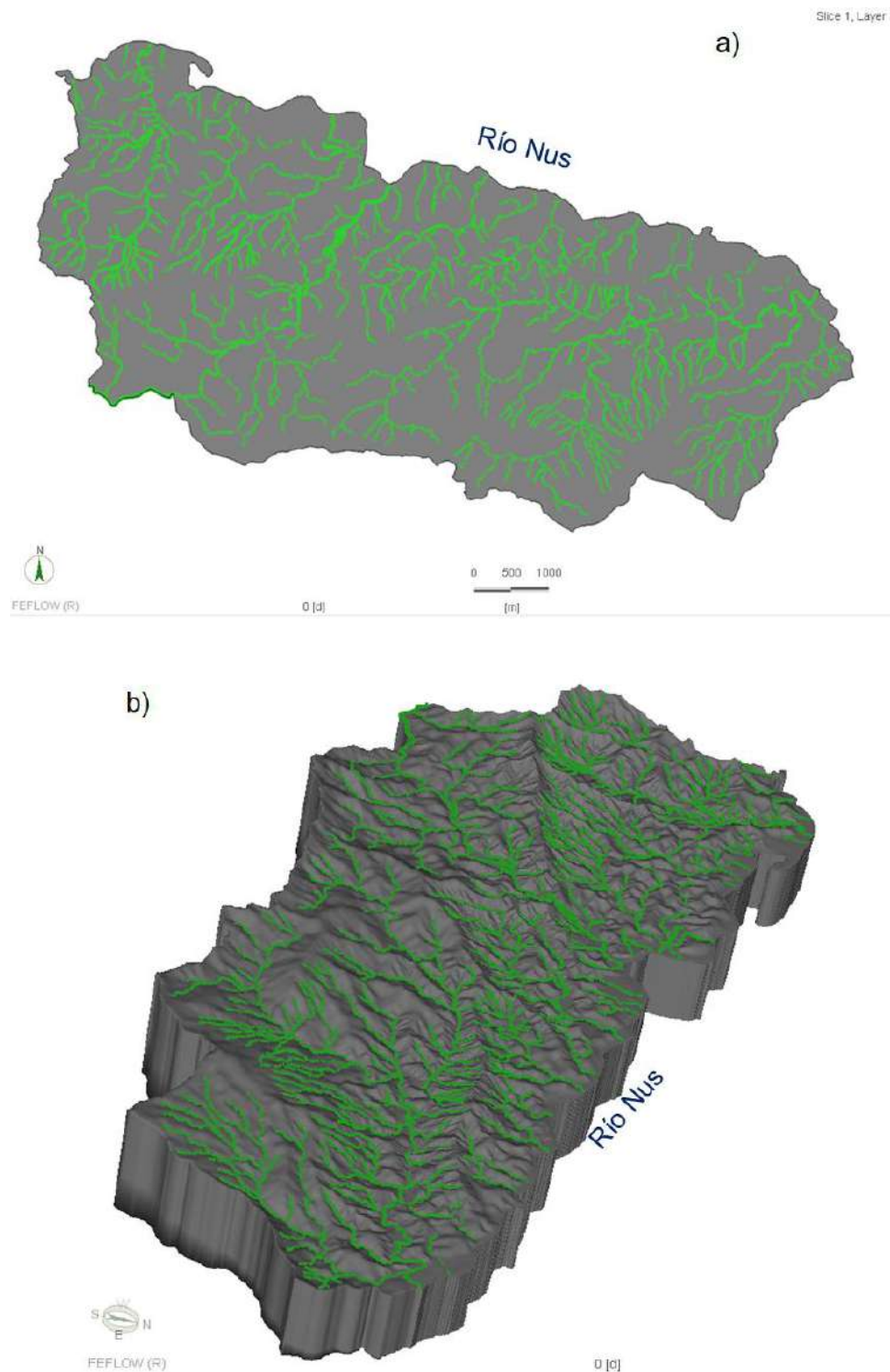


Figura 5.1.6.277 Representación de los nodos configurados con la condición de frontera tipo Transfer Flow (TFBC) en el modelo. a) vista en planta capa 1, b) vista 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

5.1.6.6.6 Parametrización y calibración

En este apartado se detallan los parámetros adicionales que configuran el modelo numérico, para el caso de FEFLOW se denominan propiedades de los materiales (*material properties*), dichos parámetros en su mayoría son objeto de calibración, de acuerdo con el protocolo de modelación de aguas subterráneas, buscando la mejor representación posible de la red hidrogeológica en el área de influencia, por lo cual en este mismo apartado se presentarán los resultados de la calibración.

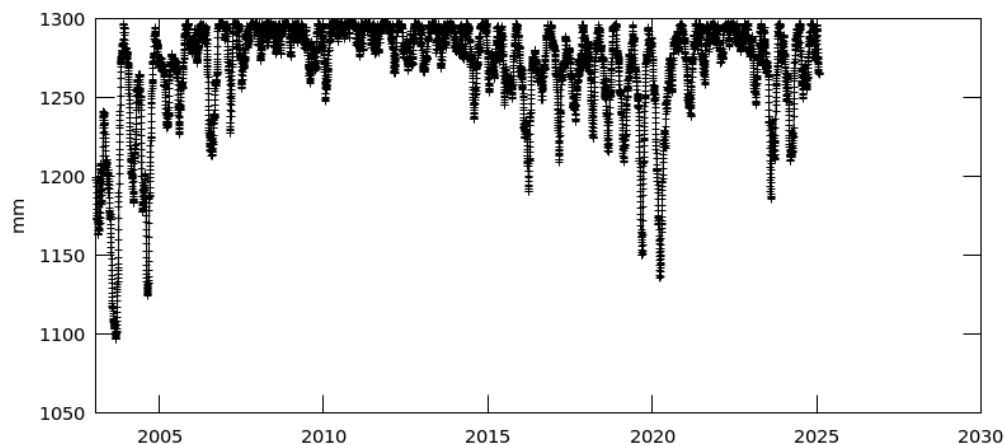
Como se ha mencionado anteriormente, la modelación hidrogeológica es un proceso cíclico, que depende de la información que se recolecta y siempre implica una serie de simplificaciones condicionadas por el nivel de información disponible. La finalidad de la modelación es encontrar un grupo de parámetros óptimos o representativos del medio real que, junto con unas condiciones de frontera apropiadas, brinden aproximaciones razonables al problema de flujo en el medio subterráneo y permitan realizar predicciones adecuadas de la respuesta del sistema hidrogeológico a cambios en el medio superficial y/o subterráneo (SHI S.A.S., 2025).

A. Objetivos de calibración

El proceso de calibración busca ajustar un conjunto de parámetros que condicionan al modelo numérico para que sea capaz de reproducir observaciones de variables hidrogeológicas obtenidas en el modelo conceptual, tales como niveles en piezómetros y caudales base en ríos, quebradas y manantiales. Para este proyecto, se cuenta con información de niveles piezométricos con monitoreo recurrente en los últimos tres meses del 2025 (febrero a abril) en 15 piezómetros distribuidos representativamente en el área de influencia, dichos niveles y su oscilación en el tiempo serán los objetivos de calibración principal tanto en el estado estacionario como transitorio (SHI S.A.S., 2025). Se resalta que todos los piezómetros están nivelados topográficamente con precisión milimétrica. Para la parte alta de la zona donde no hay cobertura de este tipo de puntos se usó como objetivo de calibración 7 manantiales, M23, M84, M101, M124, M193, M197 y M206 que representan descargas de agua subterránea desde el medio rocoso, específicamente la UHGVII, por lo cual se consideran representativos del nivel piezométrico en la zona.

Adicionalmente, como parte de los elementos de la calibración transitoria, se han obtenido estimaciones de variaciones temporales del almacenamiento hídrico subterráneo (Groundwater storage GWS) para el área de influencia a escala regional, las cuales se derivan a partir de la asimilación numérica de los datos de las misiones satelitales GRACE (Gravity recovery and Climate Experiment) y GRACE-FO (follow-one) (Lenderer, 2020), dicha asimilación es realizada por el Global Land Data Assimilation System (GLDAS) de la NASA, que consiste en modelos hidrológicos globales de asimilación de datos, destacándose el modelo CLSM (Catchment Land Surface Model) que permite derivar los datos de GWS a escala diaria. Los datos son descargados de la plataforma GIOVANNI de la NASA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). En la Figura 5.1.6.278 se muestran los datos originales derivados de la plataforma para el área de influencia, para el periodo disponible 2003 – 2024.

Time Series, Area-Averaged of Ground water storage daily 0.25 deg. [GLDAS Model GLDAS_CLSM025_DA1_D v2.2] mm over 2003-02-01 00:00:00Z - 2025-02-01 00:00:00Z, Region 74.954W, 6.474N, 74.853W, 6.534N



- The user-selected region was defined by 74.954W, 6.474N, 74.853W, 6.534N. The data grid also limits the analyzable region to the this point: 74.875W, 6.625N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetting granules that went into making this visualization result.
- Selected date range was 2003-02-01 - 2025-01-31. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

Figura 5.1.6.278 Serie diaria de variaciones del almacenamiento hídrico subterráneo (GWS) para la zona de estudio en promedio espacial derivados de GRACE y GLDAS – CLSM

Fuente: (SHI SAS, 2026)

En la [Figura 5.1.6.279](#) se muestra el procesamiento de dicha serie diaria para agregarla a escala mensual y anual, comparándola gráficamente con el comportamiento de la precipitación en la zona, a partir de la estación hidrometeorológica más cercana (Granja Experimental El Nus 23085080), mientras que en la [Figura 5.1.6.280](#) se muestra el ciclo promedio anual de la variación en el almacenamiento hídrico subterráneo (GWS) y la precipitación para el área de influencia. En todos los casos se observa una relación temporal entre la precipitación y GWS, con un rezago aproximado de al menos un mes; adicionalmente en la escala diaria se observan oscilaciones del orden de 20 cm, mientras que en la escala mensual – multianual pasan a ser del orden de 15 y 10 cm respectivamente, dichas variaciones aunque pequeñas en magnitud no son despreciables en variabilidad temporal, pues son comparables con oscilaciones del nivel piezométrico (WTF por sus siglas en inglés), a su vez dichas variaciones se relacionan con la capacidad de almacenamiento que tiene el medio hidrogeológico, permitiendo obtener insumos fundamentales para calibrar el parámetro de almacenamiento específico, el cual es fundamental para la estimación de caudales de infiltración en los escenarios prospectivos (SHI S.A.S., 2025).

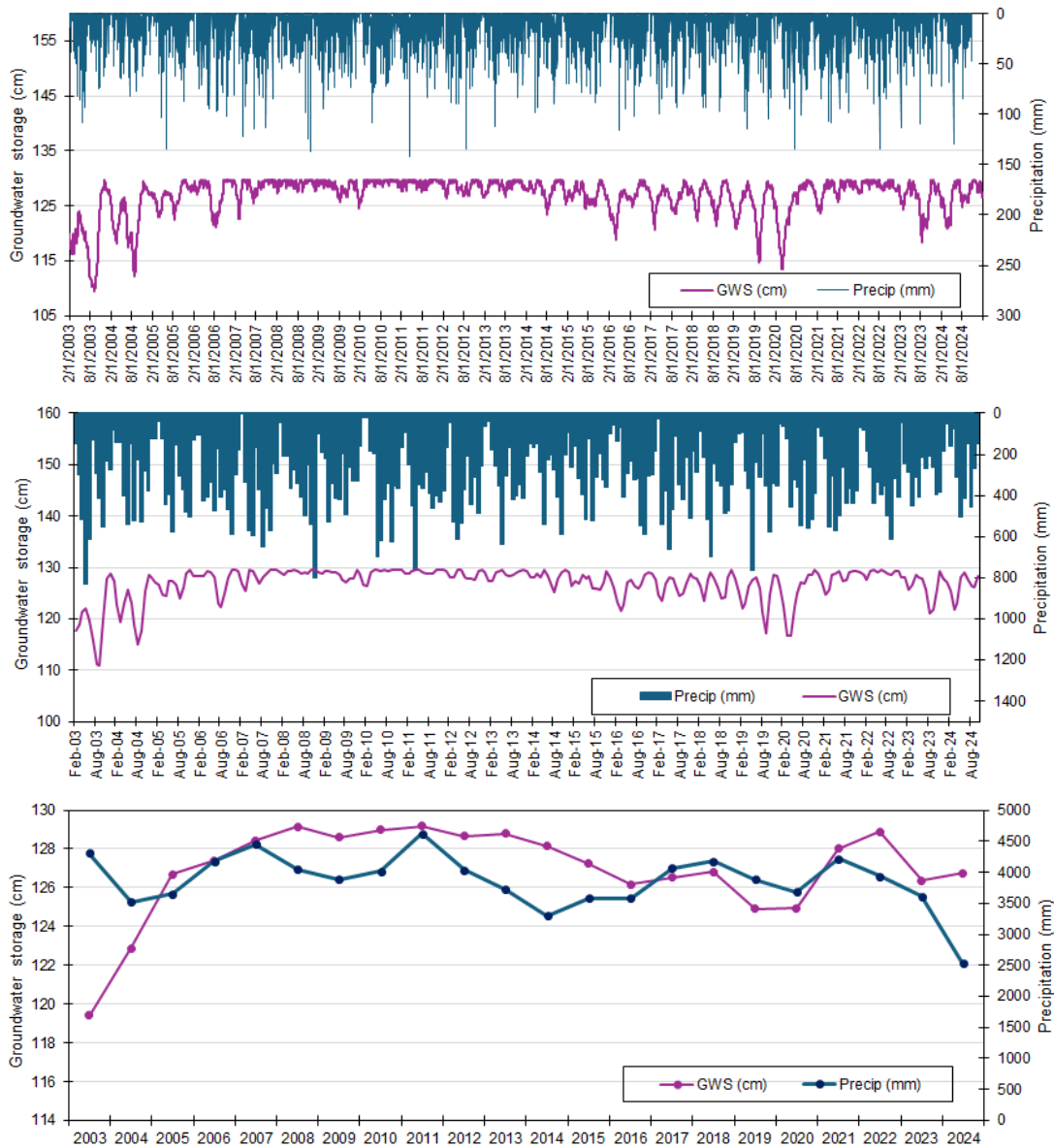


Figura 5.1.6.279 Comparación del comportamiento diario, mensual y anual de GWS y la precipitación en la zona de estudio

Fuente: (SHI SAS, 2026)

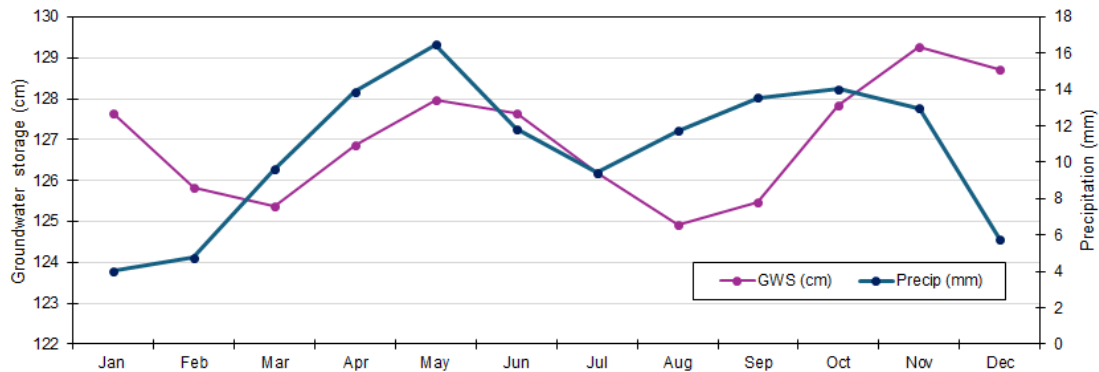


Figura 5.1.6.280 Ciclo promedio anual de GWS y la precipitación para el periodo 2003 – 2024 en la zona de estudio

Fuente: (SHI SAS, 2026)

B. Materiales y parámetros iniciales

Los parámetros objeto de calibración son: conductividades hidráulicas de las UHG, almacenamiento específico de las UHG, [tasa de recarga real distribuida en el dominio del modelo](#) y conductancias de los nodos de Transfer Flow. Para iniciar el proceso de calibración, es necesario definir los parámetros iniciales, los cuales se imponen lo más próximos a la realidad esperada, es decir corresponden a los obtenidos del MHC. Para el caso de [los parámetros hidráulicos, estos se asignan definiendo regiones por material \(material region\)](#), siguiendo a su vez la representación geométrica de las UHG e incluyendo las fallas regionales identificadas en el modelo conceptual, dichas fallas también cuentan con una geometría 3D (rumbo y buzamiento) que es incluida en la representación tridimensional de los [material region](#), tal como se muestra en la Figura 5.1.6.281 y en la Figura 5.1.6.282

Para cada material se asignan las conductividades hidráulicas de acuerdo con los [resultados de pruebas hidráulicas reportadas en el MHC](#). En la Tabla 5.1.6.116 se sintetizan las conductividades asignadas, considerando que es la misma en la orientación X e Y ($k_{xx} = k_{yy}$), y reduciéndose a un orden de magnitud en la orientación Z, con el fin de simular la condición ideal de flujo horizontal.

Adicionalmente, en el marco de la MEIA, se ha estimado en el MHC la recarga potencial por precipitación (RPP) espacialmente distribuida, y a escala diaria, lo cual permitirá realizar la calibración en estado transitorio, teniendo como objetivo de calibración las oscilaciones de nivel piezométrico de los piezómetros monitoreados y las oscilaciones de GWS derivados de GRACE. Dicha RPP es incorporada al modelo como una acción exterior de tipo influjo sobre el tope de la capa 1, y se ingresa espacialmente distribuida mediante interpolación ráster en FEFLOW, tal como se muestra en la [Figura 5.1.6.283](#). Es importante mencionar que esta primera condición corresponde a la recarga promedio anual de un año normal, dada en [m/d], para llevar a cabo inicialmente la calibración estacionaria, posterior a ello se incorporará la recarga de cada mes del año hidrológico típico para la calibración transitoria (SHI S.A.S., 2025).

Tabla 5.1.6.116 Asignación de las conductividades hidráulicas iniciales para la calibración del modelo numérico.

UHG	$K_{xx} = k_{yy}$		K_{zz}	
	m/s	m/d	m/s	m/d
UHG1	5,05E-05	4,3632	5,05E-06	0,43632
UHG2	3,97E-06	0,3430	3,97E-07	0,03430
UHG3	1,17E-04	10,1088	1,17E-05	1,01088
UHG4	5,24E-08	0,0045	5,24E-09	0,00045
UHG5	8,00E-05	6,9120	8,00E-06	0,69120
UHG6	6,63E-06	0,5728	6,63E-07	0,05728
UHG 7 Límite roca poco fracturada	2,67E-08	0,0023	2,67E-09	0,00023
UHG7 Límite roca poco fracturada - profunda	2,67E-08	0,0023	2,67E-09	0,00023
Falla 1	2,37E-08	0,0020510	2,37E-09	0,00020510
Falla 2	3,06E-08	0,00264	3,06E-09	0,000264
Falla 3	2,84E-08	0,00245	2,84E-09	0,000245
Falla 5	3,06E-08	0,00264	3,06E-09	0,000264
Falla 6	2,84E-08	0,00245	2,84E-09	0,000245

Fuente: (SHI SAS, 2026)

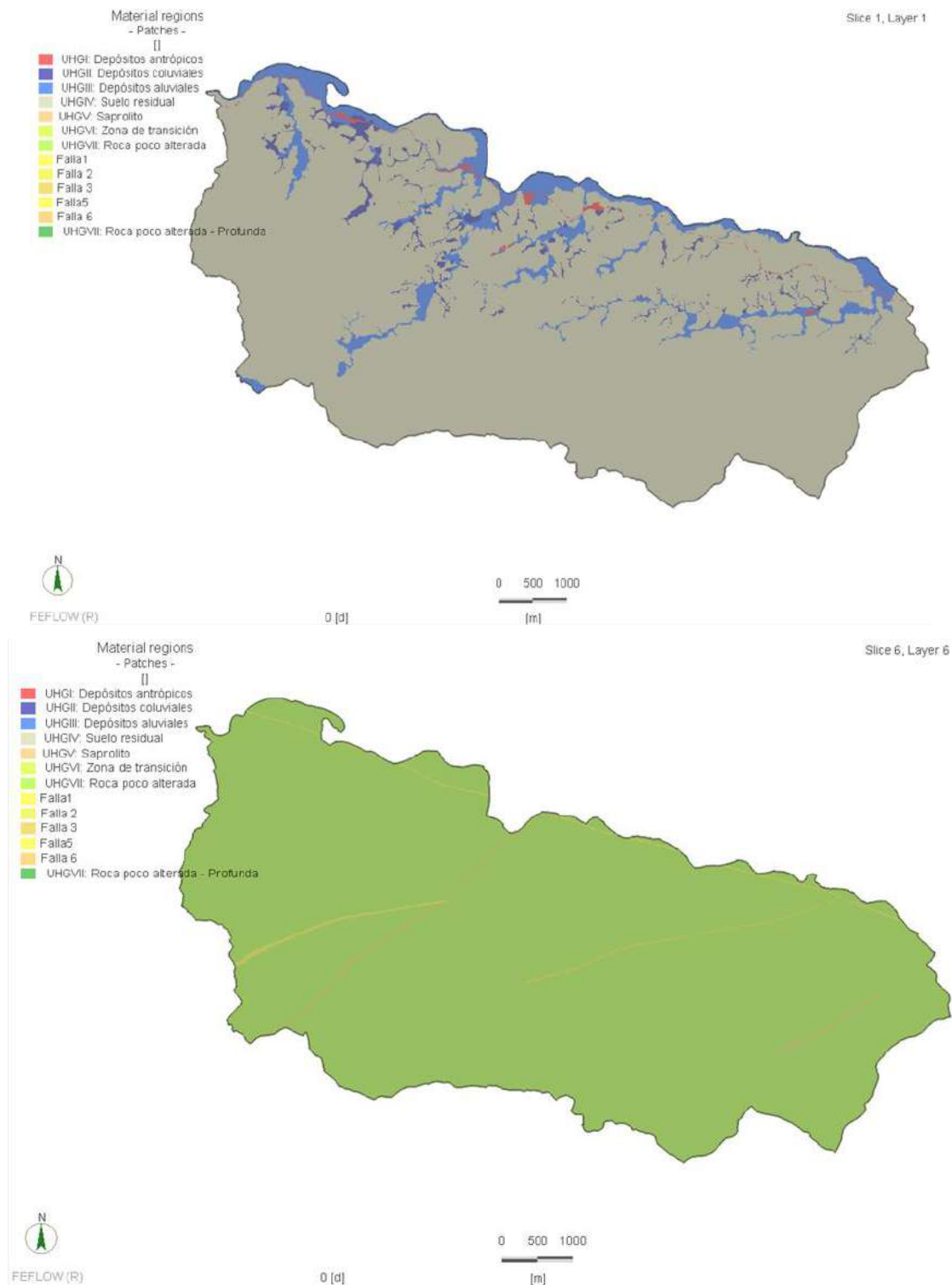


Figura 5.1.6.281 Materiales asignados a la capa 1 – corte 1 y capa 6 – corte 6 en el modelo numérico, representando la distribución espacial de las UHG

Fuente: (SHI SAS, 2026)

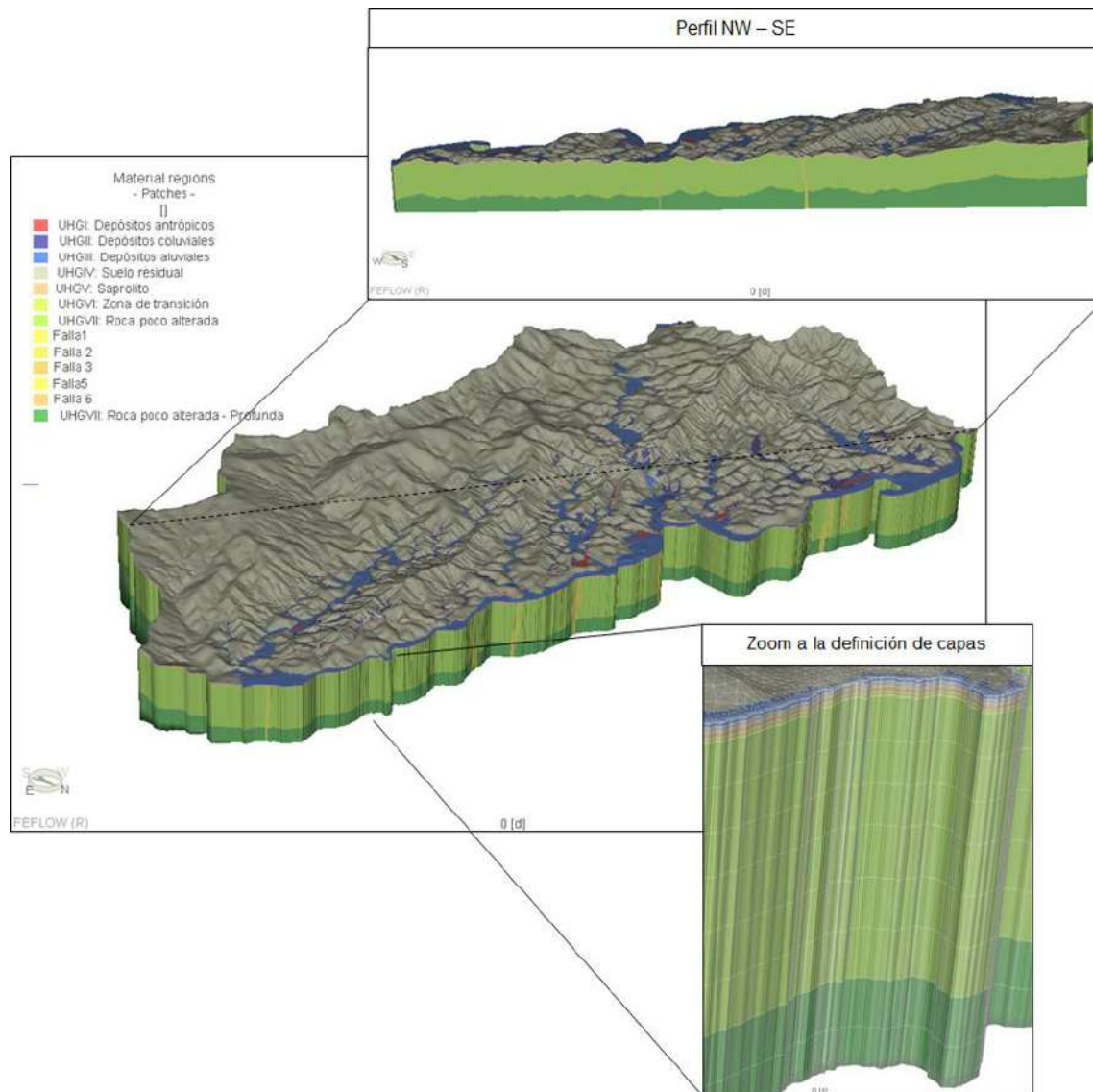


Figura 5.1.6.282 Unidades hidrogeológicas (UHG) representadas como materiales en el modelo 3D, incluyendo las fallas regionales.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

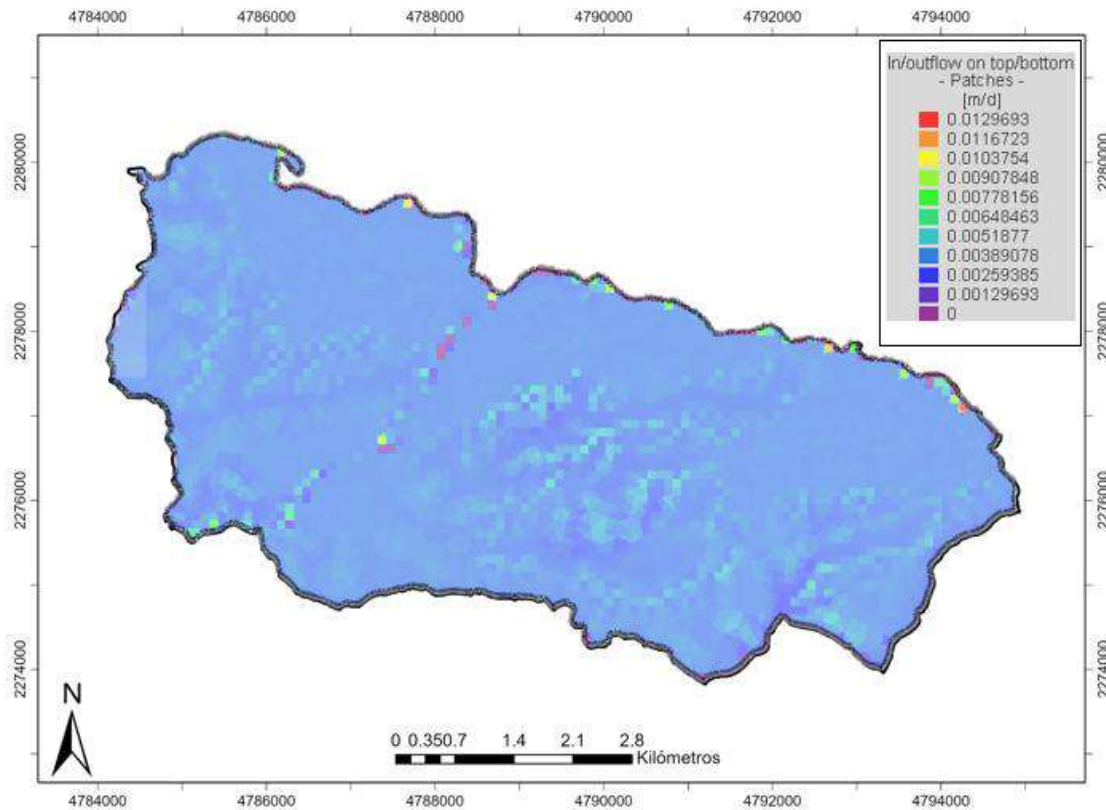


Figura 5.1.6.283 Tasa de recarga potencial (en m/d) incorporada al modelo numérico para fines de calibración estacionaria

Fuente: (SHI SAS, 2026)

Adicionalmente, para la condición de frontera Transfer Flow se requiere especificar la conductancia hidráulica (Φ) del lecho de los cauces, parámetro de difícil medición, por lo cual hace parte del conjunto de parámetros a ser calibrados, pero se requiere asignar valores iniciales, los cuales se han asignado con base en la experiencia en modelación y la magnitud de flujos de intercambio que se podrían dar (tanto en flujo base como recarga indirecta), dichos valores corresponden a 10 [1/día] para los flujos de salida y 5 [1/día] para los flujos de entrada (SHI S.A.S., 2025).

C. Proceso de calibración estacionaria y resultados

Los 15 piezómetros y los siete manantiales que conforman los objetivos de calibración del modelo numérico en estado estacionario son incorporados en las capas respectivas del modelo, tal como se sintetiza en la Tabla 5.1.6.117 y en la Figura 5.1.6.284, es importante mencionar que el nivel piezométrico que se considera para esta etapa es el promedio temporal de las campañas de monitoreo, tal como se consigna en la Tabla 5.1.6.117.

Tabla 5.1.6.117 Objetivos de calibración estacionaria incorporados al modelo numérico.

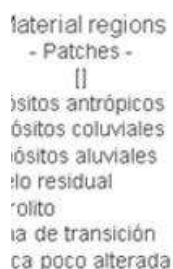
Nombre	Coordenada (CTM12)		UHG	Capa (corte)	Elevación punto captación (m.s.n.m)	Nivel piezométrico (m.s.n.m)
	Este (m)	Norte (m)				
PZA12-03	4788695.0	2278385.0	UHGIV (Suelo residual)	4	820	813.5
PZA12-08	4786818.0	2279510.0	UHGIII (Depósitos aluviales)	3	819.39	816.39
PZS12-12	4785711.0	2279056.6	UHGVI (Saprolito)	5	833.86	829.46
PZS12-14	4789241.2	2278423.3	UHGIV (Suelo residual)	4	818.79	817.09
PZR 13-05	4788795.7	2278273.3	UHGVI (roca fracturada)	8	818.05	814.95
PZR 13-07	4788059.7	2277532.1	UHGVI (roca fracturada)	8	914.25	912.15
PZR 13-09	4788416.7	2278012.2	UHGVI (roca fracturada)	8	824.53	815.13
PZS 13-17	4788803.7	2278276.3	UHGIV (Suelo residual)	4	818.03	814.33
DH-FS-309	4792271.5	2277047.3	UHGVI (Zona transición)	6	915.32	895.32
DH-FS-315	4794134.3	2276696.5	UHGIV (Suelo residual)	4	809	805.2
DH-TM-100	4793025.1	2276684.9	UHGIV (Suelo residual)	4	814.26	810.96
BH-5M-03	4790577.0	2277496.0	UHGVI (roca fracturada)	8	871.49	833.89
BH-5M-08	4790827.0	2277484.0	UHGVI (roca fracturada)	8	866.31	838.11
PZS-12-05	4794234.1	2276778.5	UHGVI (roca fracturada)	8	871.49	842.89
PZ4	4791328.0	2277254.0	UHGVI (Zona transición)	6	940.55	922.45
M 101	4788747.9	2276546.1	UHGVI (roca fracturada)	2	1017	1017
M 124	4789841.3	2277101.9	UHGVI (roca fracturada)	2	925	925
M 193	4785487.0	2277453.1	UHGVI (roca fracturada)	2	945	945
M 197	4785793.9	2277933.0	UHGVI (roca fracturada)	2	920	920
M 206	4786824.0	2277406.8	UHGVI (roca fracturada)	2	956	956
M 23	4785574.1	2276970.7	UHGVI (roca fracturada)	2	1115	1115
M 84	4790944.3	2277048.5	UHGVI (roca fracturada)	2	884	884

Fuente: (SHI SAS, 2026)

La calibración estacionaria se realiza de manera manual e iterativa, se evaluaron 14 escenarios de variación de los parámetros de calibración y combinación de estos (conductividad hidráulica, recarga y conductancias). Para evaluar la bondad de ajuste de los escenarios se utilizaron tres métricas estadísticas: el coeficiente de correlación lineal de Pearson, el error absoluto medio (MAE) y la raíz cuadrada del error estadístico medio (RMSE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |N_j - \hat{N}_j| \quad \text{Mean Absolute Error} \quad \bullet$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (N_j - \hat{N}_j)^2} \quad \text{Root Mean Squared Error} \quad \bullet$$



Fuente: (SHI SAS, 2026)

MODIFICACIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DEL PROYECTO
DE MINERÍA DE ORO A CIELO ABIERTO GRAMALOTE
08/2026

direcciones preferenciales de flujo identificadas en el análisis hidro estructural (N36-70E con buzamiento entre 50-80° al SE), convergiendo principalmente hacia el río Nus y con fuerte asociación al sistema regional de fallas, donde el componente k_{xx} es predominante, adicionalmente para la UHGVII se favorece el flujo vertical soportado en dicho análisis hidroestructural imponiendo $k_{zz} = 0.3 \cdot k_{yy}$, mientras que las fallas se incorporan isotrópicas.

Tabla 5.1.6.118 Parámetros del modelo numérico de flujo en escenario inicial y final de calibración

UHG	Parámetros iniciales		Parámetros finales		
	$K_{xx} = k_{yy}$	K_{zz}	K_{xx}	K_{yy}	K_{zz}
UHG1	4.36320	0.43632	4.36320	4.36320	0.43632
UHG2	0.34300	0.03430	0.34300	0.34300	0.03430
UHG3	10.10880	1.01088	10.10880	10.10880	1.01088
UHG4	0.00450	0.00045	0.30000	0.30000	0.03000
UHG5	6.91200	0.69120	4.00000	4.00000	0.40000
UHG6	0.57280	0.05728	1.20000	0.80000	0.12000
UHG7 Límite roca poco fracturada	0.00230	0.00023	0.09000	0.08300	0.02490
UHG7 Límite roca poco fracturada - profunda	0.00230	0.00023	0.09000	0.08300	0.02490
Falla 1	0.00205	0.00021	0.00800	0.00800	0.00080
Falla 2	0.00264	0.00026	0.00930	0.00930	0.00930
Falla 3	0.00245	0.00025	0.00600	0.00600	0.00600
Falla 5	0.00264	0.00026	0.00930	0.00930	0.00930
Falla 6	0.00245	0.00025	0.00600	0.00600	0.00600
Conductancia hidráulica de salida - drenajes principales (1/d)			Conductancia hidráulica de salida - drenajes principales (1/d)		
10			8		
Conductancia hidráulica de salida - drenajes sencillos (1/d)			Conductancia hidráulica de salida - drenajes sencillos (1/d)		
5			4		
Conductancia hidráulica de entrada - drenajes principales (1/d)			Conductancia hidráulica de entrada - drenajes principales (1/d)		
10			3		
Conductancia hidráulica de entrada - drenajes sencillos (1/d)			Conductancia hidráulica de entrada - drenajes sencillos (1/d)		
5			1.5		
Recarga promedio anual			Recarga promedio anual		

UHG	Parámetros iniciales		Parámetros finales		
	$K_{xx} = k_{yy}$	K_{zz}	K_{xx}	K_{yy}	K_{zz}
100% de la recarga proveniente del modelo SWB			60% de la recarga potencial en zona 1, 40% en zona 2 y 160% en zona 3		

Fuente: (SHI SAS, 2026)

Tabla 5.1.6.119 Síntesis de las métricas estadísticas de evaluación de ajuste

Métrica de ajuste	Escenario inicial	Escenario final
MAE	112,8%	6,1%
RMSE	145,4%	8,2%
Coefficiente de correlación	64,4%	95.92%

Fuente: (SHI SAS, 2026)

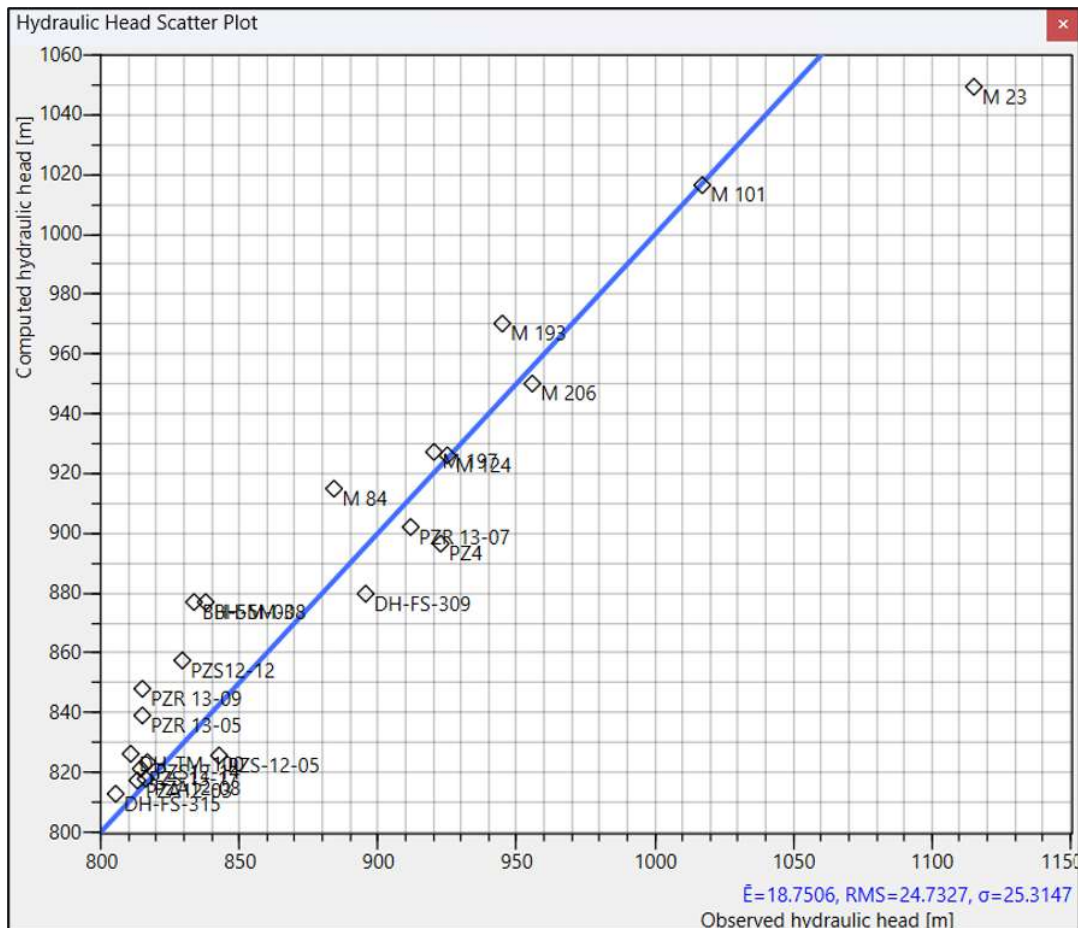


Figura 5.1.6.285 Diagrama de dispersión entre los niveles piezométricos (hydraulic head) observados y simulados a partir del modelo numérico de flujo calibrado en estado estacionario

Fuente: (SHI SAS, 2026)

Se resalta que la recarga fue calibrada por zonas altimétricas, la zona 1 corresponde a elevaciones menores a 830 m s.n.m, la zona 2 corresponde a elevaciones entre 830 y 875 m s.n.m y la zona 3 corresponde a elevaciones mayores a 875 m.s.n.m.

A partir del modelo calibrado en estado estacionario, se obtiene la superficie piezométrica para el área de influencia que se muestra en la [Figura 5.1.6.286](#) y en la [Figura 5.1.6.287](#); así como los [perfiles piezométricos](#) de la [Figura 5.1.6.288](#), donde se valida la tendencia general de flujos subterráneos mayoritariamente someros y de carácter local evidenciada en el Modelo Hidrogeológico Conceptual, exhibiendo una correlación con las tendencias topográficas, y mostrando afloramientos de nivel piezométrico en superficie, lo cual es lógico pues explica los flujos de intercambio entre las quebradas de la zona y las aguas subterráneas más superficiales, así como la presencia de diversos manantiales, [de igual manera se resalta la influencia de las fallas, principalmente en el perfil 2](#) (SHI S.A.S., 2025).

Finalmente, a partir del modelo calibrado en estado estacionario, se obtiene el balance hídrico general de la zona de modelamiento, que se resume en la [Tabla 5.1.6.120](#), donde se observa que, en términos netos, la recarga real se distribuye principalmente hacia las principales quebradas [internas](#), presentando un comportamiento mixto, entre cauces ganadores y perdedores de flujo, pero siendo mayoritariamente ganadores, conformando así su flujo base, sin embargo la totalidad de la recarga no satisface el flujo base de las corrientes; por tanto, tramos de cuerpos de agua resultan perdedores, cuyo flujo transita por el medio hidrogeológico y después dichos flujos aportan a conformar el flujo base de los tramos de cuerpo de agua ganadores. Esta situación conlleva a validar la hipótesis de la amplia necesidad de realizar la calibración transitoria, ya que el cambio en el almacenamiento puede ser significativo y ayudar a explicar dichos flujos de intercambio, [finalmente la condición de frontera regional representada por el río Nus se comporta como un río ganador, como era de esperarse, aunque de igual manera existen zonas donde la corriente es perdedora](#) (SHI S.A.S., 2025).

Tabla 5.1.6.120 Resultado del balance hídrico en estado estacionario en el modelo calibrado

Componente	Entrada (m³/s)	Salida (m³/s)	Neto (m³/s)
Carga constante (Constant Head)	0,10531	0,67045	-0,56514
Drenajes (transfer Flow)	1,1034	2,6601	-1,5567
Recarga (source (+))	2,1182	0.000	2,1182
Inbalance			-0,0036372

Fuente: (SHI SAS, 2026)

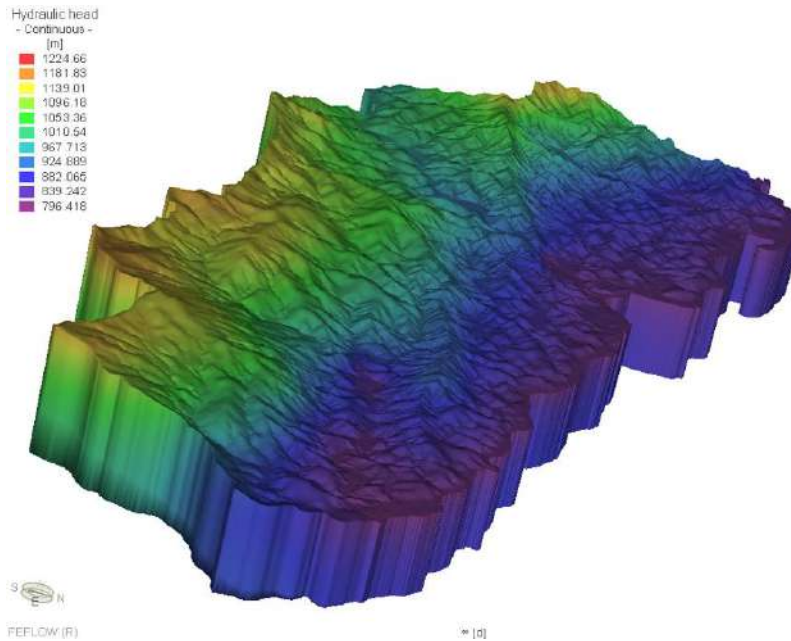


Figura 5.1.6.286 Piezometría 3D simulada en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio)

Fuente: (SHI SAS, 2026)

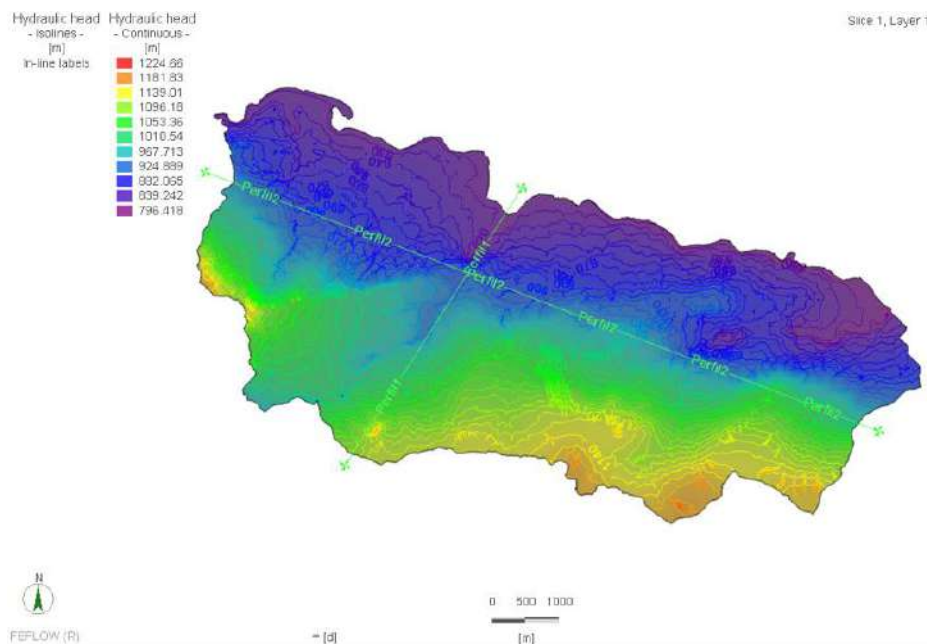


Figura 5.1.6.287 Isopiezas simuladas en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio) y ubicación de perfiles.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

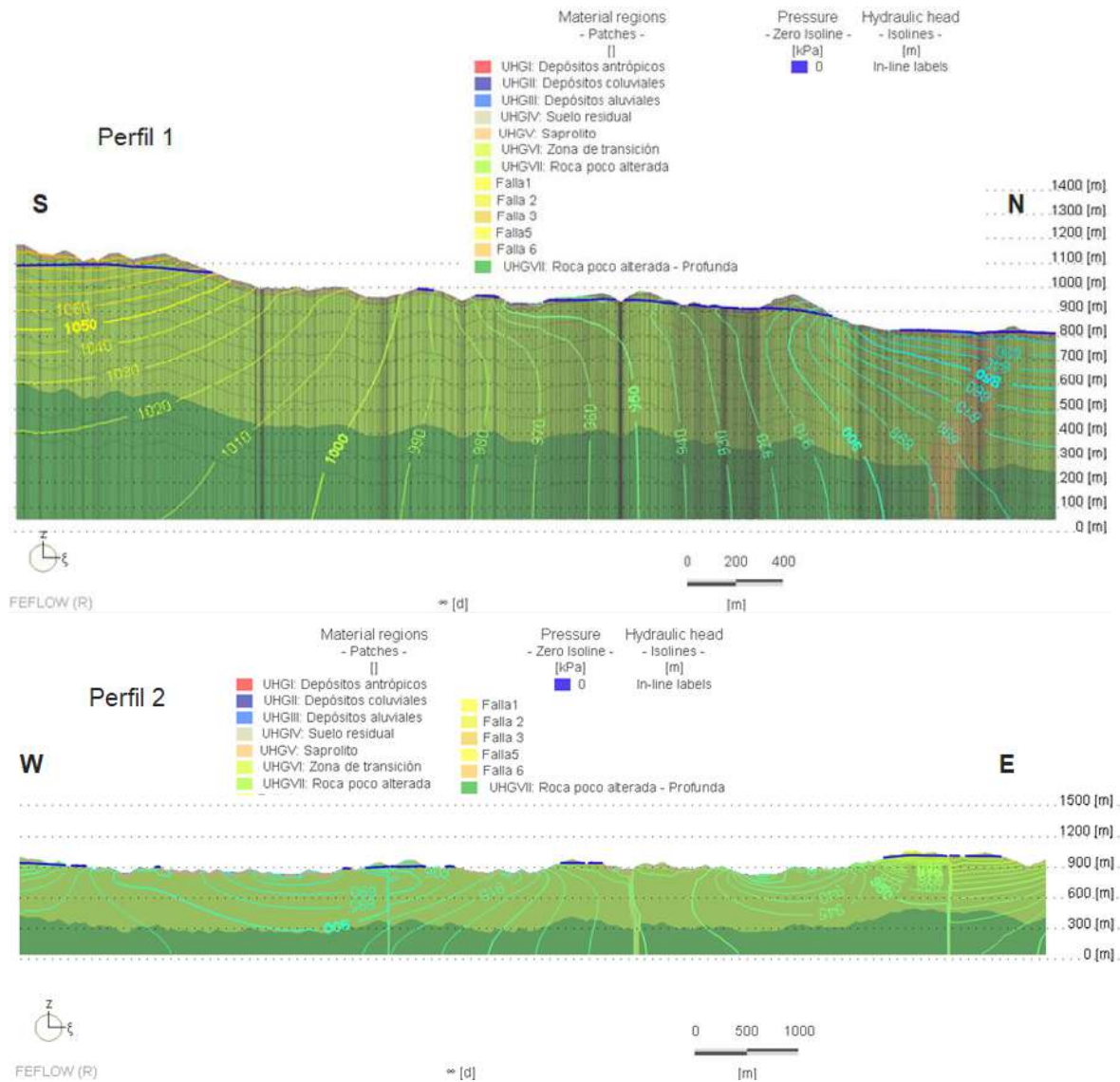


Figura 5.1.6.288 Perfiles piezométricos en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio)

Fuente: (SHI SAS, 2026)

5.1.6.6.7 Ajuste y validación en estado transitorio

La fase prospectiva del modelo, es decir la simulación en estado intervenido, debe realizarse en condiciones transitorias; para la cual es necesario resolver la ecuación de flujo de agua subterránea considerando las variaciones en el almacenamiento; por tanto, los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas relacionados con dicho almacenamiento deben ser considerados y ajustados previamente a dicha modelación.

Los parámetros de almacenamiento son el coeficiente de almacenamiento específico (S_s) y la porosidad eficaz (S_y). Dichos parámetros deben ser ajustados a partir de una

modelación transitoria en estado natural, dicho ajuste se realiza considerando las variaciones de recarga estimadas a partir del modelo de balance de humedad en el suelo, considerando un año normal, para lo cual, después de múltiples simulaciones se ha optado por discretizar el tiempo en cuatro periodos de estrés con longitud de 90 días cada periodo, representando así la variabilidad trimestral de un año normal. Para el ajuste se tuvo en cuenta las variaciones de niveles piezométricos registrados en 15 piezómetros entre febrero y mayo de 2025, tal como se mostró en la sección 5.1.6.2.4, donde se evidencia que sí existen variaciones de nivel piezométrico, pero dichas variaciones son relativamente pequeñas, del orden centimétrico, por lo cual el modelo en estado transitorio no deberá simular variaciones en órdenes superiores. En la [Figura 5.1.6.289](#) y en la [Tabla 5.1.6.121](#) se resumen las variaciones observadas de nivel piezométrico en promedio mensual para 2025 (SHI S.A.S., 2025).

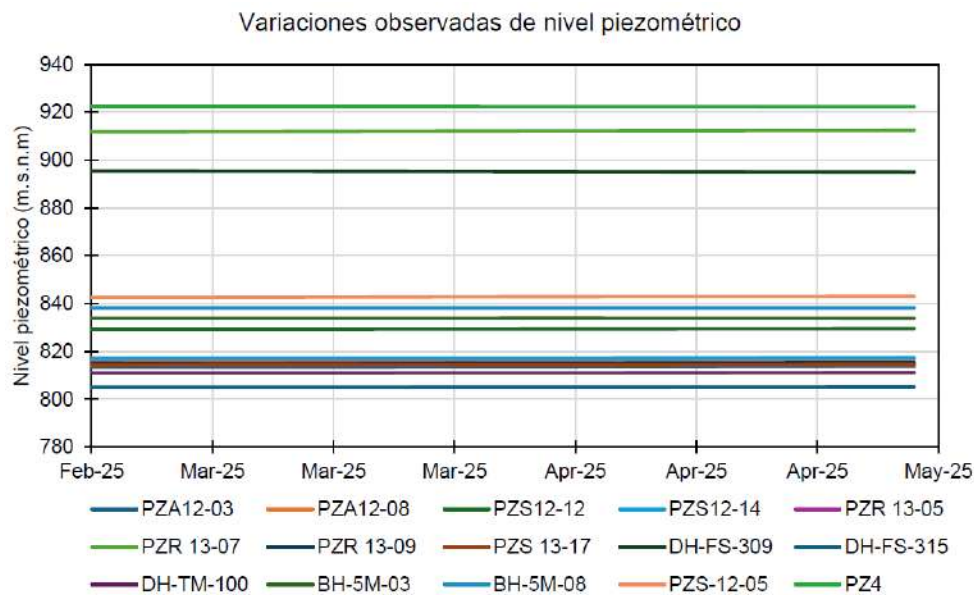


Figura 5.1.6.289 Variaciones temporales de nivel piezométrico observadas en los puntos de monitoreo

Fuente: (SHI SAS, 2026)

Tabla 5.1.6.121 Variaciones temporales mensuales del nivel piezométrico registrados en los puntos de monitoreo

Piezómetro	Niveles piezométricos (m s.n.m)				Rango variación (m)
	feb-25	mar-25	Apr-25	may-25	
PZA12-03	813,3	813,3	813,46	813,74	0,44
PZA12-08	816,19	816,19	816,39	816,7	0,51
PZS12-12	829,36	829,31	829,41	829,52	0,21
PZS12-14	816,89	817,09	817,09	817,31	0,42
PZR 13-05	814,95	814,9	814,98	815	0,1
PZR 13-07	911,85	911,95	912,2	912,35	0,5

Piezómetro	Niveles piezométricos (m s.n.m)				Rango variación (m)
	feb-25	mar-25	Apr-25	may-25	
PZR 13-09	815,53	814,93	815,05	815,26	0,6
PZS 13-17	813,43	814,43	814,38	814,5	1,07
DH-FS-309	895,52	895,47	895,27	895,04	0,49
DH-FS-315	805,1	805,15	805,18	805,25	0,14
DH-TM-100	810,76	810,91	810,96	811,16	0,4
BH-5M-03	833,99	833,89	833,94	833,88	0,12
BH-5M-08	838,11	838,11	838,11	838,11	0
PZS-12-05	842,89	842,79	842,97	843,03	0,24
PZ4	922,55	922,55	922,5	922,41	0,13

Fuente: (SHI SAS, 2026)

En la [Figura 5.1.6.290](#) y en la [Figura 5.1.6.291](#) se muestra la recarga asignada a cada periodo de estrés, la simulación transitoria se realiza bajo un escenario inicial de parámetros de almacenamiento asignados de manera conceptual (en función del tipo de litología de cada unidad hidrogeológica), los cuales se presentan en la [Tabla 5.1.6.122](#) (escenario inicial), con dicha asignación la simulación se desborda computacionalmente, sin generar convergencia en la solución, de tal forma fue necesario cambiar dichos parámetros y empezar a iterar para lograr en primera instancia la estabilidad numérica, una vez lograda dicha estabilidad, se debe garantizar coherencia en los niveles piezométricos simulados y en el balance de masas, de forma tal que más de 10 escenarios de parámetros de almacenamiento fueron probados, llegando a la asignación final que se presenta también en la [Tabla 5.1.6.122](#) (escenario final). Una vez obtenido un escenario consistente conceptual y numéricamente, se obtiene la superficie piezométrica simulada al final del año normal que se muestra en la [Figura 5.1.6.292](#), y [los perfiles](#) de flujo representativo que se [muestran](#) en la [Figura 5.1.6.293](#), donde se observa que no hay cambios significativos respecto a la condición estacionaria, lo cual resulta lógico puesto que los niveles observados en los piezómetros no muestran variaciones significativas, dicho resultado también es representado adecuadamente en los niveles piezométricos simulados en dichos piezómetros, tal como se resume en la [Figura 5.1.6.294](#) y en el diagrama de dispersión de la [Figura 5.1.6.295](#) (SHI S.A.S., 2025).

Finalmente, en la [Tabla 5.1.6.123](#) se resume el balance hídrico [al final de los 365 días de simulación](#) para la totalidad del dominio del modelo, donde se [observa que la variación en el almacenamiento aporta principalmente a los drenajes representados con transfer Flow, con una tendencia a ingresar agua desde el almacenamiento hacia el flujo base de dichas corrientes](#) (SHI S.A.S., 2025).

Tabla 5.1.6.122 Asignación de los parámetros de almacenamiento a las unidades hidrogeológicas dentro del modelo numérico

Unidad hidrogeológica (UHG)	Almacenamiento específico Ss (1/m)	
	Escenario inicial	Escenario final
UHG1	5,00E-04	0,01
UHG2	1,00E-04	0,01
UHG3	2,00E-03	0,01
UHG4	1,00E-02	0,15
UHG5	2,00E-03	0,001
UHG6	1,00E-02	0,0001
Límite roca poco fracturada	2,00E-06	6.00E-05
Roca fracturada de mayor profundidad (capa 13 a 16)	2,00E-06	6.00E-05
Falla 1	1,00E-06	4.00E-05
Falla 2	1,00E-06	4.00E-05
Falla 3	1,00E-06	4.00E-05
Falla 5	1,00E-06	4.00E-05
Falla 6	1,00E-06	4.00E-05

Fuente: (SHI SAS, 2026)

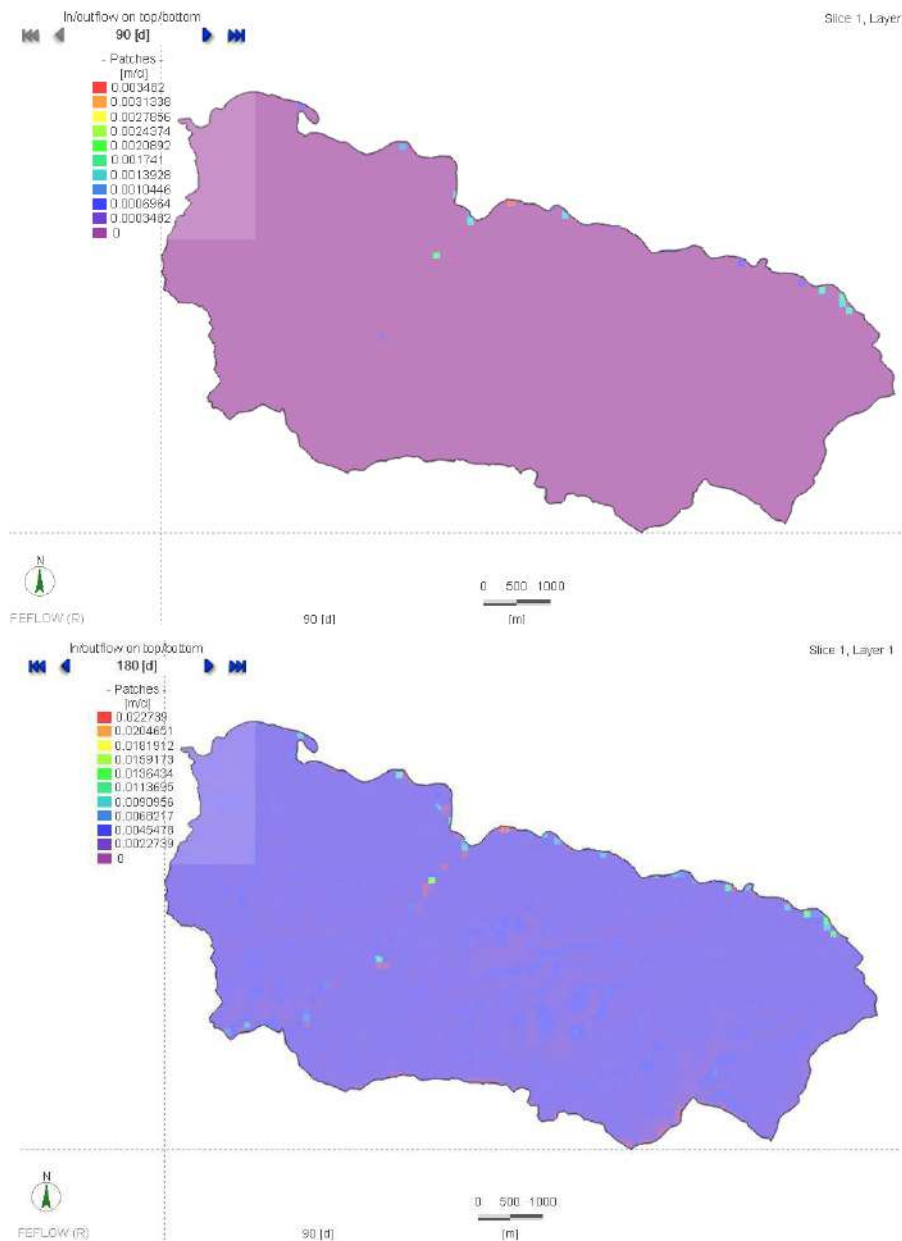


Figura 5.1.6.290 Recarga asignada en m/d para el trimestre Enero – Marzo (superior) y Abril – Junio (inferior)

Fuente: (SHI SAS, 2026)

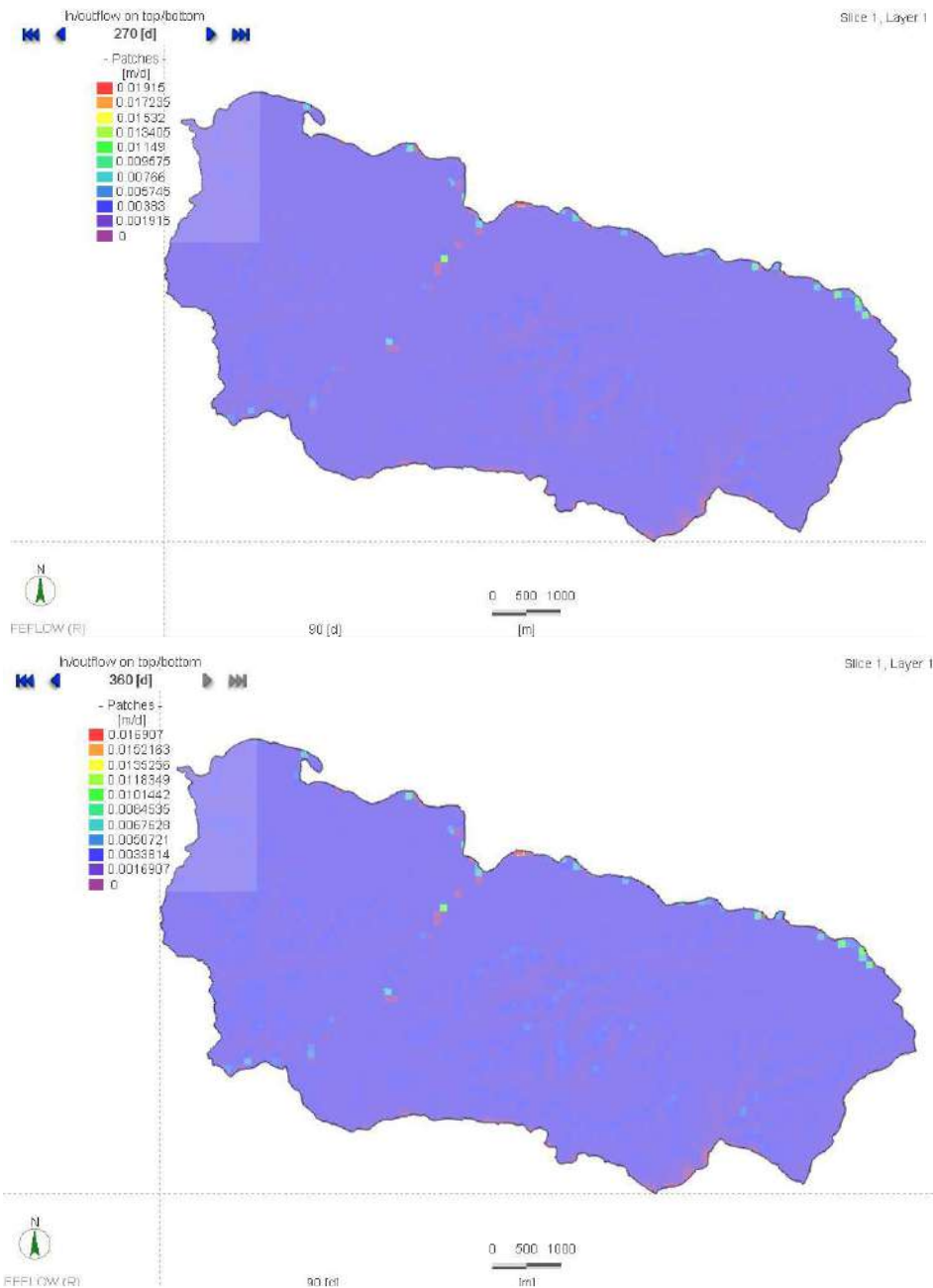


Figura 5.1.6.291 Recarga asignada en m/d para el trimestre Julio – Septiembre (superior) y Octubre – Diciembre (inferior)

Fuente: (SHI SAS, 2026)

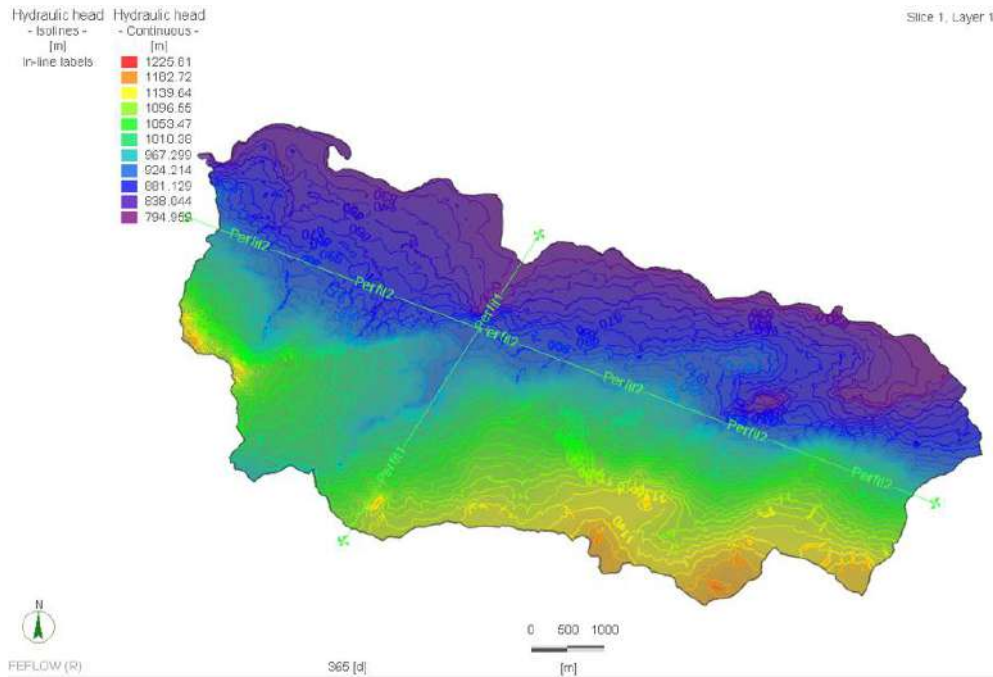


Figura 5.1.6.292 Piezometría simulada en la zona de modelamiento en condiciones transitorias (final del año normal)

Fuente: (SHI SAS, 2026)

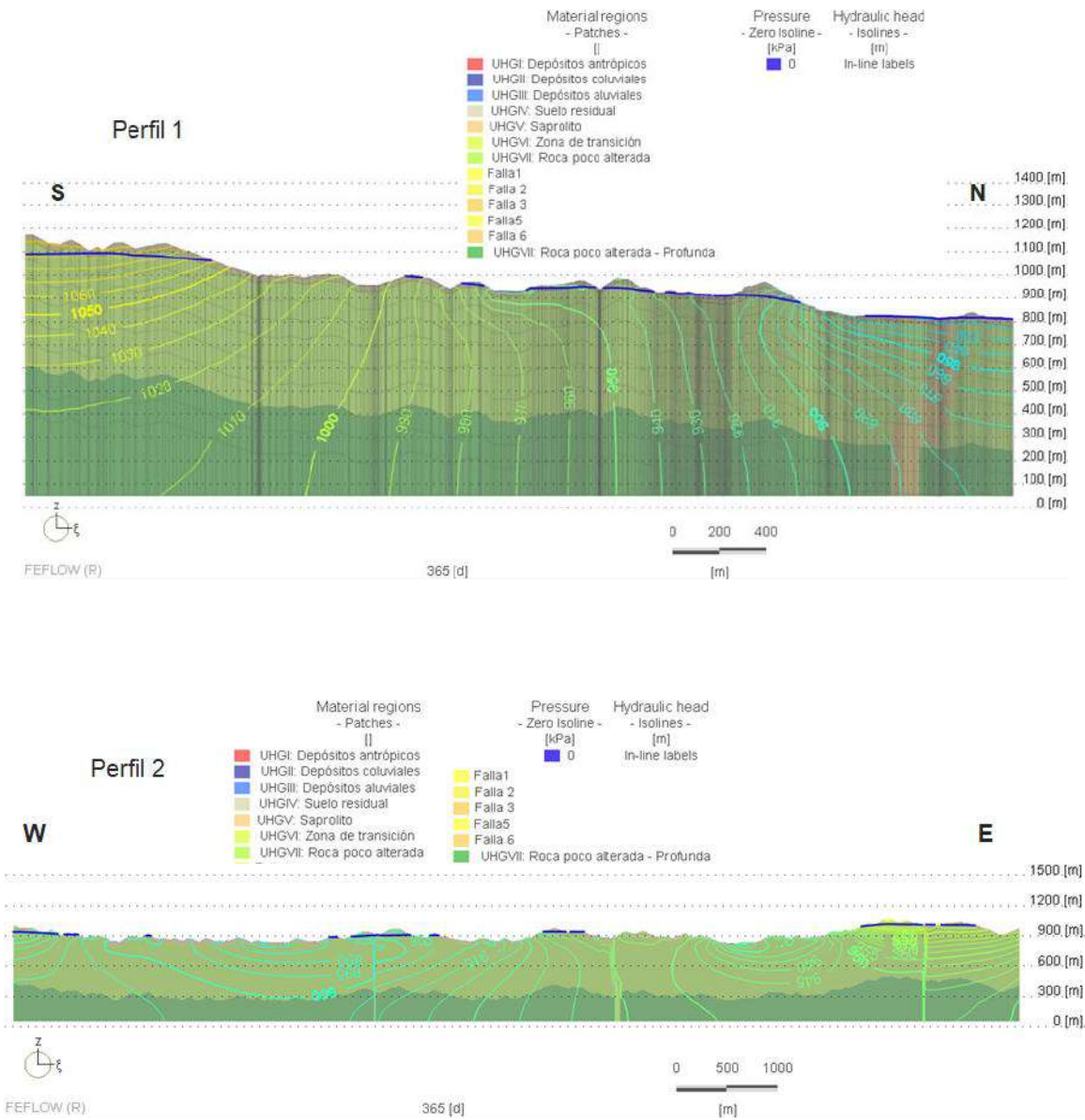


Figura 5.1.6.293 Perfiles piezométricos en la zona de modelamiento en condiciones transitorias (final del año normal)

Fuente: (SHI SAS, 2026)

Tabla 5.1.6.123 Síntesis del balance hídrico en el dominio del modelo en promedio temporal para el año de simulación.

Componente	Entrada (m³/s)	Salida (m³/s)	Neto (m³/s)
Carga constante (Constant Head)	0,10507	0,67196	-0,56689
Drenajes (transfer Flow)	1,1731	2,8405	-1,6674
Recarga (source (+))	2,1182	0	2,1182
Cambio en el almacenamiento (Storage)	0,23759	0,12384	0,11375
Inbalance			-0,00234

Fuente: (SHI SAS, 2026)

5.1.6.6.8 Simulación prospectiva

A. Metodología general

En esta etapa se incorpora al modelo calibrado en condiciones naturales transitorias (final de un año hidrológico normal), la influencia de la infraestructura asociada al proyecto. De acuerdo con el Programa de Trabajo y Obras (PTO) actual, el TAJO Gramalote tendrá un periodo de desarrollo de 10 años, empezando en 2029 y terminando en 2038, donde alcanza su máxima profundidad, estimada en 480 msnm, por ello desde el inicio del modelo la base del dominio completo se estableció en 50 msnm, para poder capturar el cono de abatimiento que puede alcanzar niveles inferiores al fondo del tajo, el modelo se configuró con un total de 15 capas y 16 superficies (slices), permitiendo simular la totalidad de la excavación y sus potenciales abatimientos. (SHI S.A.S., 2025).

La topografía resultante del TAJO se tiene disponible anualmente, por lo cual la simulación prospectiva se ha configurado en estado transitorio con longitud temporal de 365 días y paso de tiempo adaptativo (configuración automática de partición del tiempo en FEFLOW siguiendo una escala potencial en búsqueda de la mayor estabilidad numérica y convergencia), para un total de 10 escenarios secuenciales, así como un escenario final de cierre y post-cierre que se configura para 7.5 años (2737 días). En la Figura 5.1.6.296 se muestra la secuencia minera incorporada al modelo en términos de elevación, que resulta ser la variable fundamental para la simulación. También se incorporan los depósitos antrópicos año a año de acuerdo con el PTO (SHI S.A.S., 2025).

La estrategia para incorporar la geometría del Tajo es la siguiente:

- **Configuración topográfica en la capa 1:** la topografía del Tajo se ingresa modificando las elevaciones de la capa 1, de forma tal que se logra capturar todo el detalle de la excavación respectiva del año simulado del PTO, dicha modificación se impone solo en la capa 1 manteniendo las 16 capas subyacentes fijas, lo que permite mantener la estructura matricial y numérica del modelo constante, repercutiendo el cambio únicamente en la variable elevación. Para cada año la geometría 3D del modelo se vuelve a ejecutar.
- **Configuración de frontera Constant Head (HH):** para simular los flujos de filtración de aguas subterráneas hacia el Tajo se usa la condición de frontera de Constant Head con restricción tipo Seepage Face, la cual permite el flujo hacia la condición de frontera, pero no desde ella, de tal forma se estaría simulando el ingreso de agua y su posterior evacuación. La carga hidráulica en las HH asignadas se impone igual a la cota de excavación. Para el año 2 en adelante, los nodos de HH se configuran sobre las

superficies nuevas de excavación respecto al año anterior, simulando el drenado de las áreas ya excavadas hacia las zonas profundas del tajo.

- **Configuración de la conductividad hidráulica:** las áreas excavadas exponen la roca poco alterada y fracturada, que es la principal unidad que drena agua hacia el tajo, por lo que las áreas de excavación se asignan con material región igual a la unidad hidrogeológica UHGVII.
- **Configuración de la recarga:** cuando se realizan las excavaciones las áreas de superficie que generaban recarga hacia el sistema hidrogeológico pierden dicha función, por lo que se representan en el modelo con recarga cero, cubriendo la huella del Tajo de cada año.

Adicionalmente al Tajo Gramalote, dentro del modelo fueron incorporadas las obras de almacenamiento y manejo de material sobrante, específicamente las más grandes y representativas que contaban con la topografía proyectada anualmente según el PTO y sus actualizaciones. Dichas obras corresponden al depósito de estériles de San Antonio, depósito de estériles El Balsal, depósito de relaves (Tailings Management Facilities – TMF) y la presa o pila de arena. La ubicación en planta de estas obras fue presentada en el capítulo del Modelo Hidrogeológico Conceptual. De la [Figura 5.1.6.296](#) a la [Figura 5.1.6.300](#) se muestran perfiles representativos de las zonas de almacenamiento mencionadas, para algunos pasos de tiempo. (SHI S.A.S., 2025).

Todos estos elementos representan una mayor cota que la del terreno, y tienden a cerrar valles estrechos como el de la quebrada La Palestina, por lo que su configuración puede favorecer la acumulación de aguas contactadas con los materiales sobrantes, que potencialmente podrían infiltrarse a las unidades hidrogeológicas de la zona, dado el gradiente hidráulico que representan, o generar por equilibrio de presiones, flujos de intercambio desde el medio natural hacia el interior de dichas obras, que se conforman como Unidades Hidrogeológicas antrópicas, por tanto, la estrategia para incorporar estos depósitos es la siguiente:

- **Configuración topográfica en la capa 1:** similar a la configuración del Tajo, la geometría de los depósitos se incorpora entre la capa 1 la capa 2, permitiendo representar el espesor y el avance en dicho espesor de los depósitos en cada año.
- **Configuración de frontera Hydraulic Head (HH):** esta condición de frontera impone una carga hidráulica conocida, a partir de la cual se pueden generar flujos hacia el nodo o desde el nodo, dependiendo del sentido del gradiente hidráulico que se genere con las cargas hidráulicas (nivel piezométrico) de los alrededores. El nivel impuesto corresponde justamente a la cota resultante de la conformación del depósito y se configura en dos pasos: 1) con restricción tipo Seepage Face, es decir evitando flujos desde la HH hacia el medio, esta restricción se impone para simular que el material dispuesto aún no está saturado, permitiendo la reorganización de presiones alrededor de la obra, dicha condición se impone para los años 1 y 2, con el objetivo de simular una condición más realista de disposición del material y reacción del medio hidrogeológico circundante, 2) sin restricción tipo Seepage Face, permitiendo el flujo de entrada y salida desde la HH, con lo cual se asume que los depósitos se encuentran saturados y que el nivel piezométrico circundante puede interactuar con las UHG antrópicas, esta condición se impone desde el año 3 hasta el año 10, por tanto, se resalta que esta condición de frontera representará un escenario siempre potencial, bajo el supuesto de saturación desde el nivel impuesto hacia abajo, permitiendo el tránsito del frente de humedad y con ello el potencial transporte de aguas contactadas.

- **Asignación de los depósitos como unidades hidrogeológicas (UHG):** adicionalmente, tal como lo especifican los términos de referencia para elaboración de estudios de impacto ambiental para proyectos de minería (ANLA, 2016) y como es requerido numéricamente para el funcionamiento adecuado del modelo, las zonas de depósitos que se han mencionado con anterioridad se representan en el modelo numérico prospectivo como Unidades Hidrogeológicas (UHG) antrópicas, generando un cambio en la conductividad hidráulica superficial en las tres direcciones ($K_x = K_y$, $K_z = 0.1K_x$). Las conductividades se asignan en función del tipo de material que se retiene en los depósitos de acuerdo con las definiciones dadas por GCL (2025) y el modelo hidrogeológico conceptual actualizado en este informe. De esta manera, la conductividad hidráulica es un parámetro variable en el tiempo, pero únicamente de manera localizada y en la capa superficial (capa 1).

Finalmente, **otras obras** de interés para ser **incorporadas** al modelo numérico de flujo subterráneo **corresponden** a: 1) **el túnel de decantación** que se localizará atravesando del valle de la quebrada La Palestina al valle de la quebrada El Torito, como obra de soporte para el correcto funcionamiento de la TMF, dicho túnel tendría una longitud de 700 m, pendiente de 0.005, **cota de entrada de 833,52 m s.n.m y cota de salida de 830 m s.n.m**, cubierta de subsuelo entre 45 y 165 m y diámetro aproximado de 3.6 m (Golder Associates, 2017). b) **el túnel de desviación de la quebrada Guacas, cuya longitud es de 515 m, con cota de entrada de 948,99 m s.n.m y cota de salida de 880,50 m s.n.m**. La estrategia para incorporar **dichos túneles** al modelo es la siguiente:

- **Configuración de frontera Transfer Flow (TF):** Esta condición de frontera (BC) permite que el flujo se transfiera de un nodo a otro siguiendo la ecuación de flujo y las propiedades hidrogeológicas del modelo (material properties), se seleccionan los nodos que representen el alineamiento de los túneles de acuerdo con su elevación, para lo cual desde el inicio del modelo se configuró la capa 7 siguiendo dicho comportamiento altimétrico. Se impone una restricción (constraint) de tipo máximo flujo igual a cero, para configurar que los nodos únicamente reciban flujo desde las UHG (valores negativos de flujo) y que no se permita el ingreso desde las TF a las UHG (valores positivos de flujo). Para el caso del túnel de desviación, se incluye también modificaciones en nodos de TF que representan la quebrada Guacas, para generar el desvío hacia el túnel.
- **Configuración de las conductancias de la TF para que actúe como dren:** **se configuran** los elementos que coinciden con la TF que representan **los ejes de los túneles**, a dichos elementos se les asigna conductancias de entrada y salida, en este caso se configuró la misma, ya que después de diversas iteraciones se encontró que los nodos actúan fundamentalmente como salida de flujo porque en todos los casos el nivel piezométrico estaría por encima del eje del túnel. El valor asignado de conductancia ha sido objeto de análisis de sensibilidad.

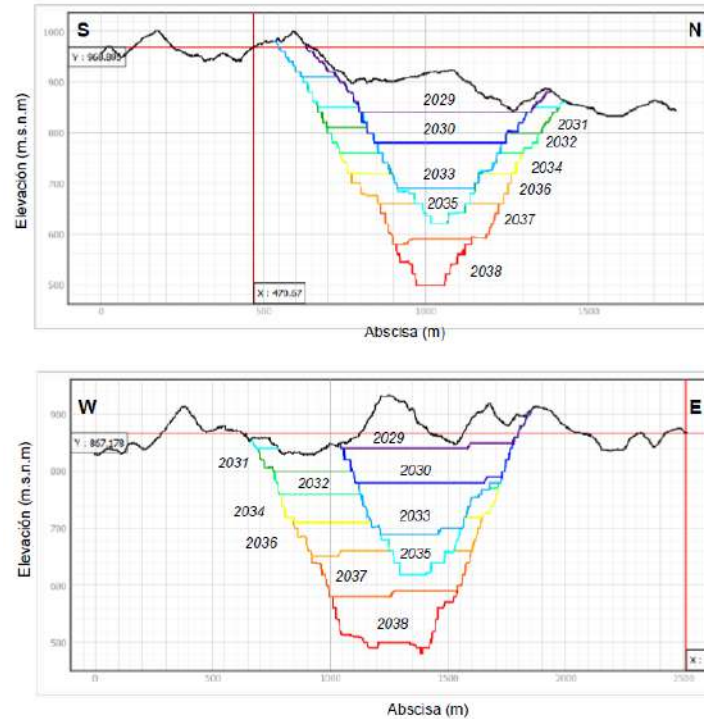


Figura 5.1.6.296 Configuración topográfica del Tajo Gramalote entre 2029 y 2038: perfiles en dirección Sur – Norte (superior) y Oeste – Este (inferior)

Fuente: (SHI SAS, 2026)

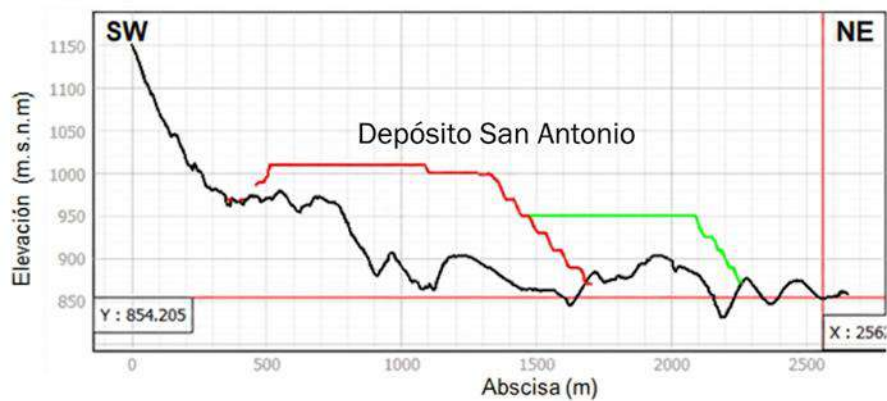


Figura 5.1.6.297 Configuración topográfica del depósito San Antonio para el año 2038. Perfil en dirección SW – NE.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

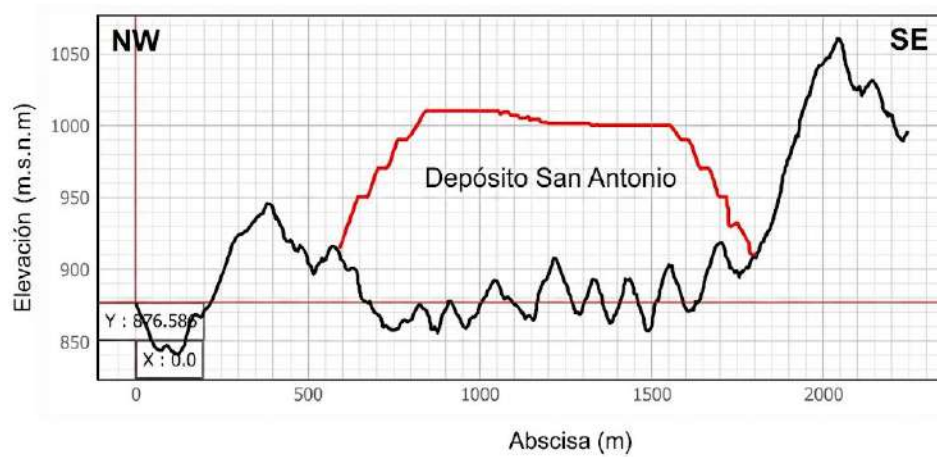


Figura 5.1.6.298 Configuración topográfica del depósito San Antonio (línea roja) para el año 2038. perfil en dirección NW -SE

Fuente: (SHI SAS, 2026)

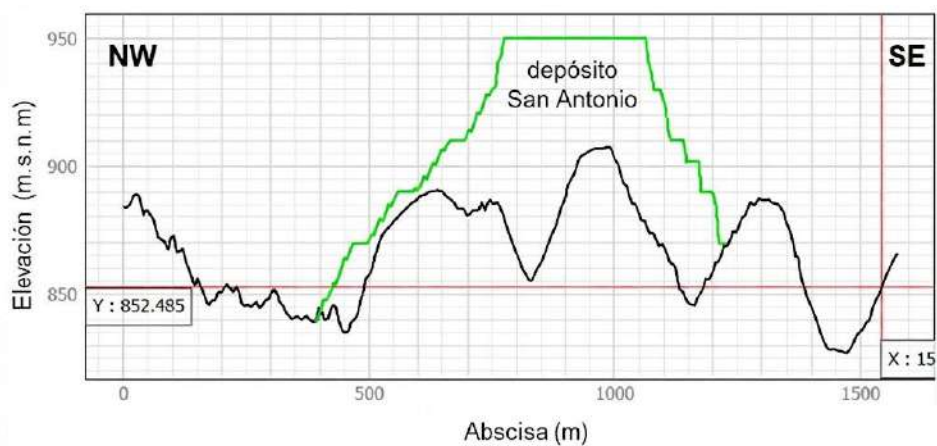


Figura 5.1.6.299 Configuración topográfica del depósito San Antonio para el año 2038. perfil en dirección NW – SE.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

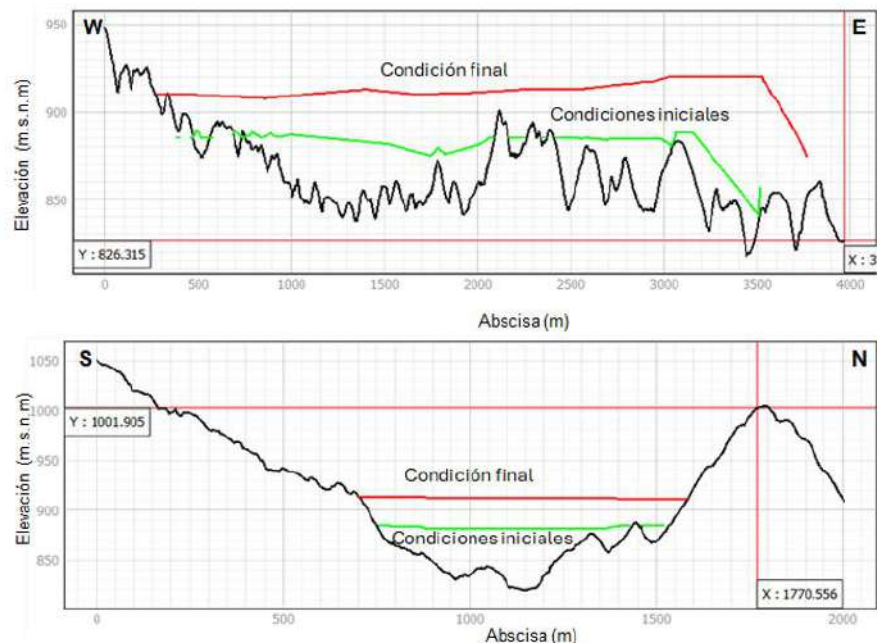


Figura 5.1.6.300 Configuración topográfica del depósito de relaves y el contrafuerte de arenas (presa o pila) para los años iniciales (línea verde) y para la condición final del proyecto (línea roja). Perfiles en dirección W-E (superior) y S-N (inferior).

Fuente: (SHI SAS, 2026)

Con el resultado final del año 2038 se configura el escenario de cierre y pos-cierre, que comprende un periodo total de 7.5 años, dicha condición se simula de acuerdo con el plan de cierre imponiendo la condición de frontera Constant Head en la huella final del Tajo con carga hidráulica de 815 m.s.n.sm, para representar la lámina de agua con la que se pretende llenar el Tajo al cabo de la operación del proyecto, dicho llenado se hará a partir del flujod e la quebrada Guacas, la cual se reconecta con el Tajo, por lo cual dentro del escenario de simulación de cierre, el túnel de desviación es eliminado y se restauran los nodos que le daban continuidad al trazado de la quebrada Guacas. En los depósitos de San Antonio y El Balsal se restablecen los flujos de recarga y se eliminan las condiciones de frontera de HH, mientras que en los depósitos de relaves se mantienen las condiciones de frontera asignadas en 2038, para simular las condiciones de saturación que se mantendrían en dicho espejo de agua. En la presa de arena también se eliminan las condiciones de fontera, permitiendo que los niveles piezométricos se reordenen. Es importante aclarar que el escenario de cierre y pos-cierre es conceptual.

B. Parametrización

Las obras mineras se han incorporado al modelo numérico de flujo subterráneo para representar el escenario prospectivo de simulación, para lo cual se han usado las estrategias de combinar [modificaciones geométricas de la capa 1](#), [incorporación de condiciones de frontera](#), [cambios en la recarga](#) y modificación de materiales (conductancias y conductividades [hidráulicas](#)), dichas estrategias requieren de una parametrización, la cual se basa en la información del Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) y en las pruebas

numéricas realizadas a los diferentes parámetros en el análisis de sensibilidad. Los parámetros mencionados y utilizados para la obtención de los resultados finales de la modelación prospectiva se muestran en la [Tabla 5.1.6.124](#). Es de aclarar que, en las fases de desarrollo del proyecto, el modelo deberá ser validado y actualizado con datos observados de caudales y descensos, por lo cual esta parametrización podría cambiar de manera [importante](#).

Tabla 5.1.6.124 Parametrización de las obras mineras proyectadas e incorporadas dentro del modelo numérico de flujo subterráneo

Obra	Periodicidad incorporada	Condición de frontera**	Material		
			Conductividad hidráulica (m/d)	Conductancia entrada (1/d)	Conductancia salida (1/d)
Tajo Gramalote	Anual	Constant Head con Seepage Face	Igual a la de la UHG7	NA	NA
Túnel de decantación	Primer año y constante durante los 10 años	Transfer Flow con condición de máximo flujo igual a cero	NA	0.001	0.001
Túnel de desviación	Primer año y constante durante los 10 años	Transfer Flow con condición de máximo flujo igual a cero	NA	0.001	0.001
Depósito San Antonio	Anual	Hydraulic Head con Seepage Face año 1 y 2, y sin restricción año 3 al 10	0.04	NA	NA
Depósito El Balsal	Anual	Hydraulic Head con Seepage Face año 1 y 2, y sin restricción año 3 al 10	0.04	NA	NA
Presa de colas	Anual	Hydraulic Head con Seepage Face año 1 y 2, y sin restricción año 3 al 10	0.02	NA	NA
Contrafuerte de arenas	Anual	Hydraulic Head con Seepage Face año 1 y 2, y sin restricción año 3 al 10	0.25	NA	NA

Fuente: (SHI SAS, 2026)

*** los niveles piezométricos de referencia en cada condición de frontera son asignados a partir de la interpolación de la topografía proyectada de cada obra a tamaño de píxel de 1 m x 1 m e incorporada a los modelos anuales en la capa 1.*

La incorporación de la geometría del Tajo y su asignación como materiales dentro del modelo numérico entre 2029 y 2038 se muestra de la Figura 5.1.6.305 a la Figura 5.1.6.310. La incorporación de los túneles se muestra en la Figura 5.1.6.315 y en la Figura 5.1.6.316. Y la incorporación y representación de las zonas de depósitos año a año, se muestra también de la Figura 5.1.6.305 a la Figura 5.1.6.310. La asignación de las condiciones de frontera, a manera de ejemplo, se muestran para el año 1 y el año 10 en la Figura 5.1.6.313 y en la Figura 5.1.6.314, respectivamente, mientras los cambios de la recarga a manera de ejemplo se muestran para el año 1 y el año 10 en la Figura 5.1.6.311 y en la Figura 5.1.6.312, respectivamente.

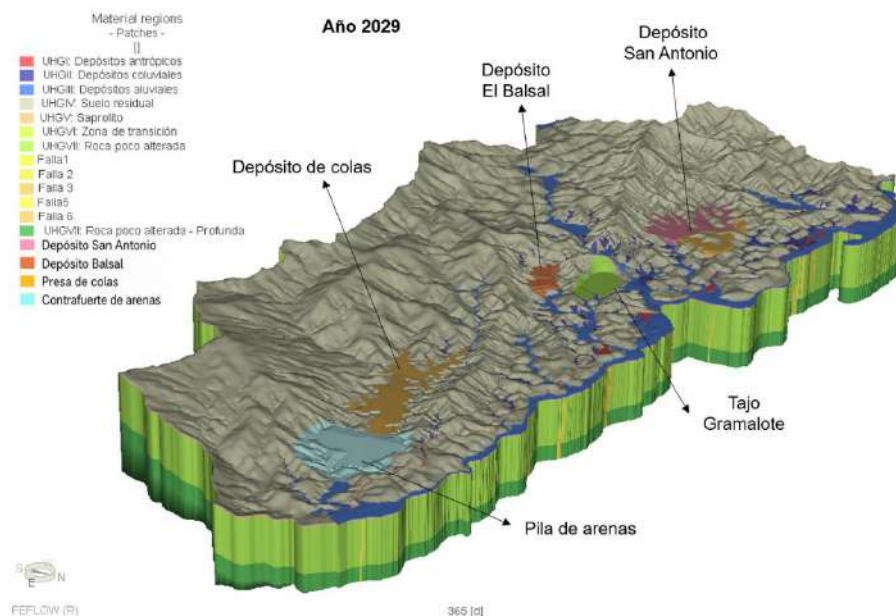


Figura 5.1.6.301 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2029 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

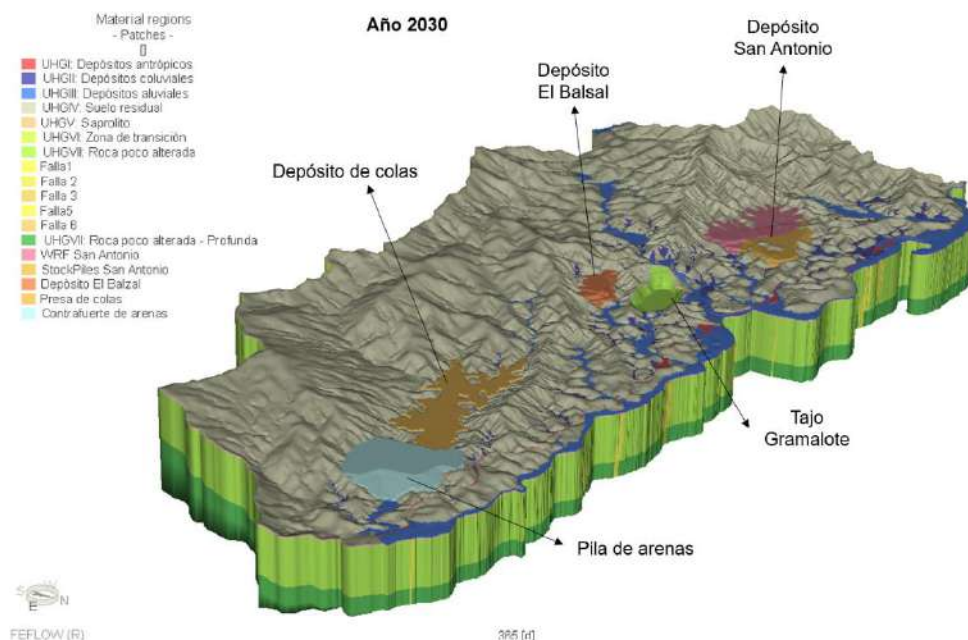


Figura 5.1.6.302 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2030 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

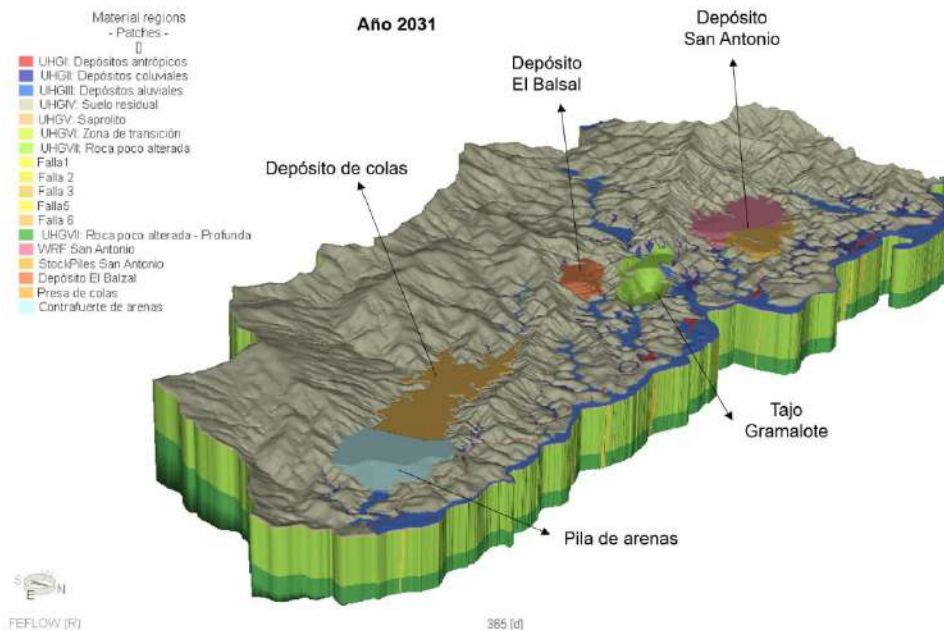


Figura 5.1.6.303 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2031 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

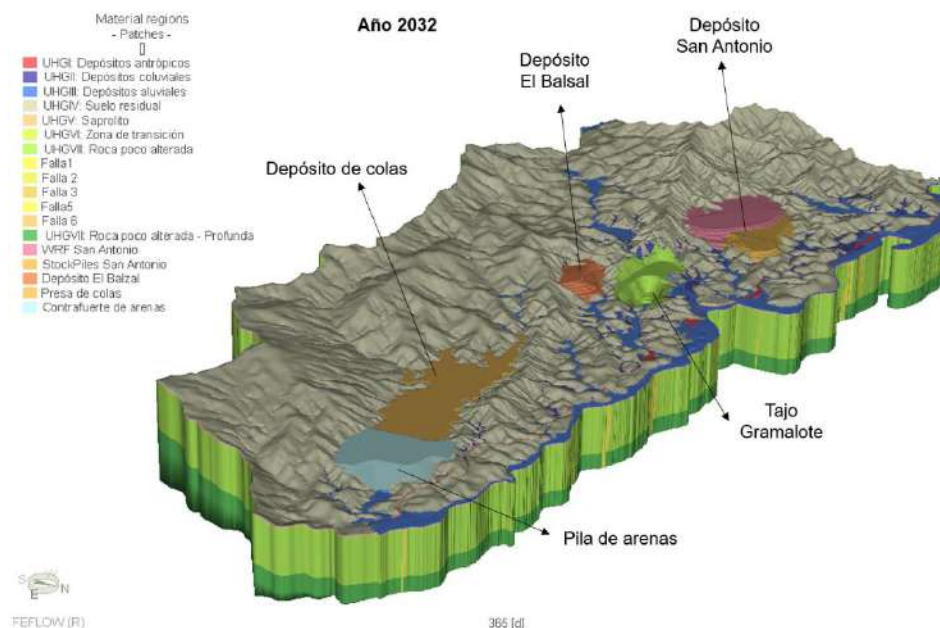


Figura 5.1.6.304 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2032 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

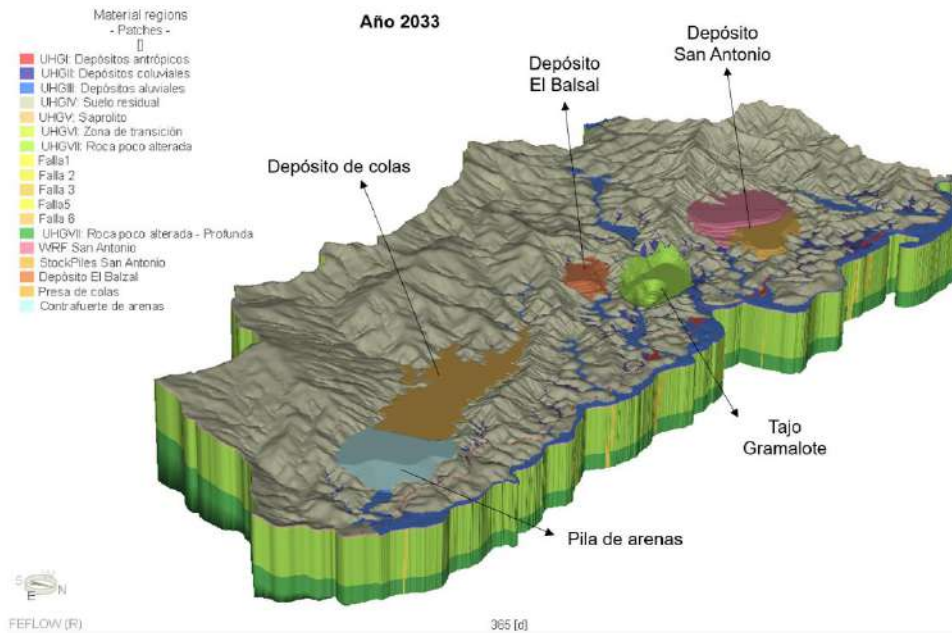


Figura 5.1.6.305 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2033 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

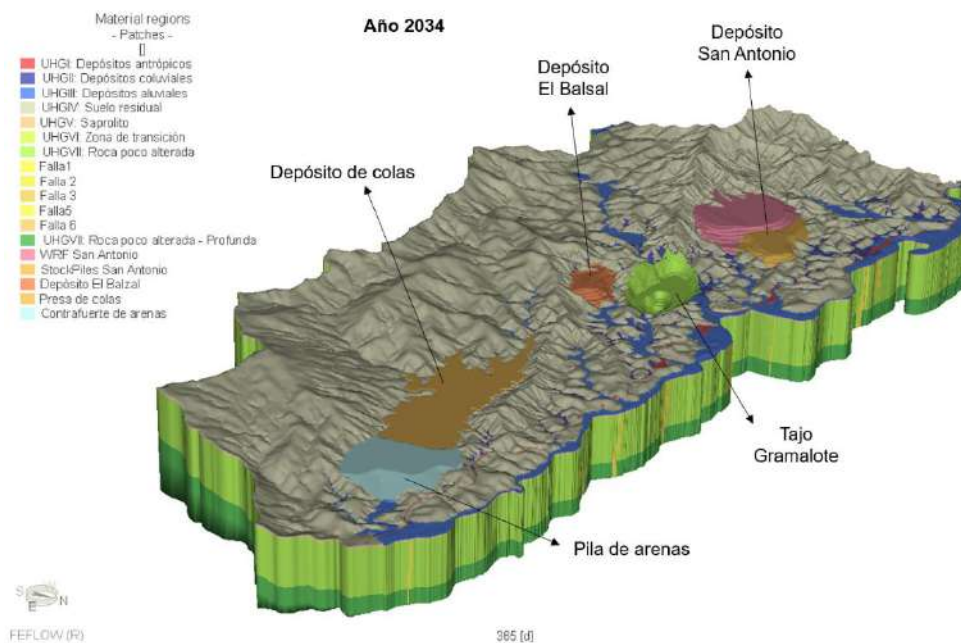


Figura 5.1.6.306 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2034 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

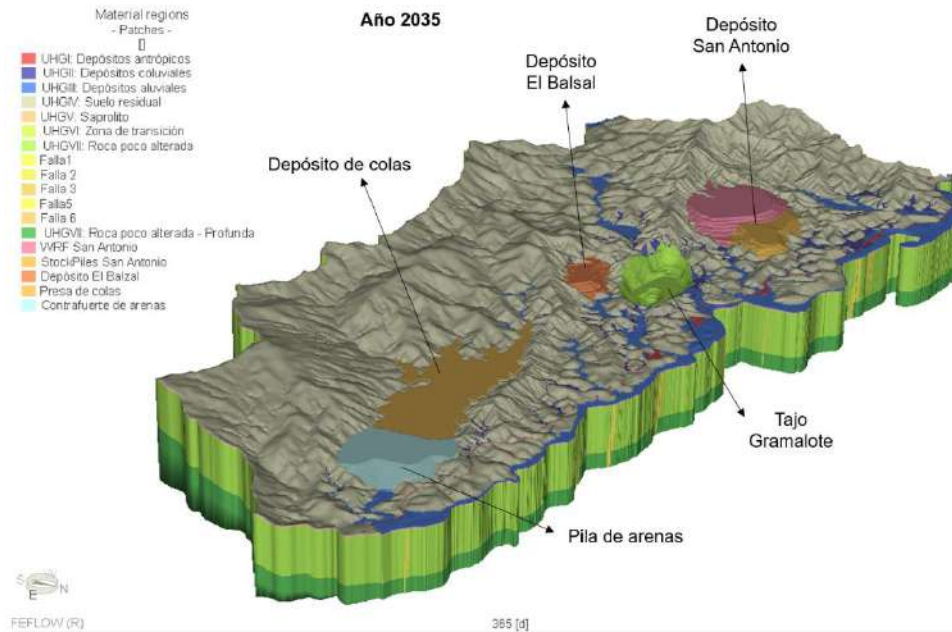


Figura 5.1.6.307 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2035 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

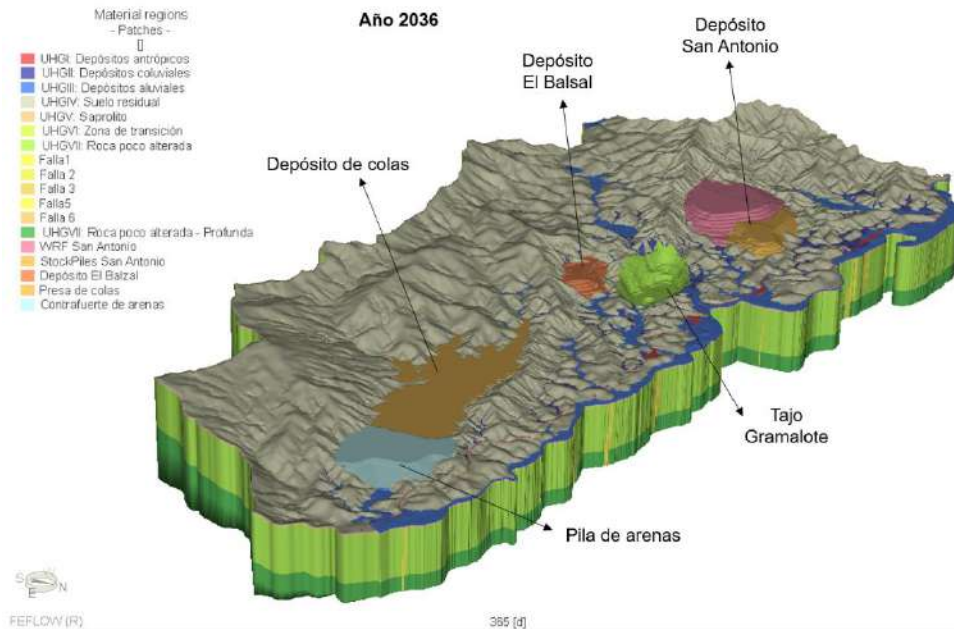


Figura 5.1.6.308 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2036 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

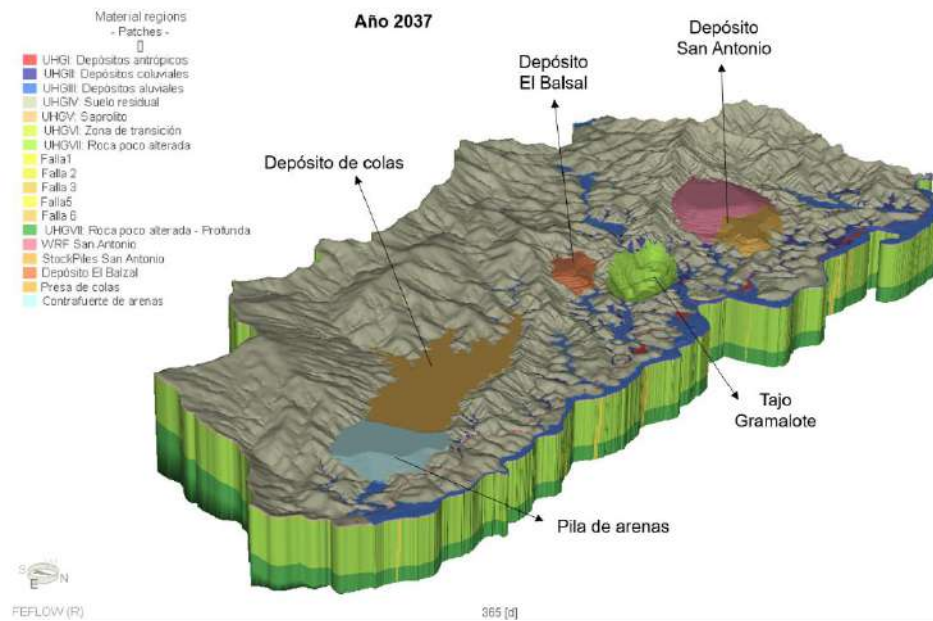


Figura 5.1.6.309 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2037 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

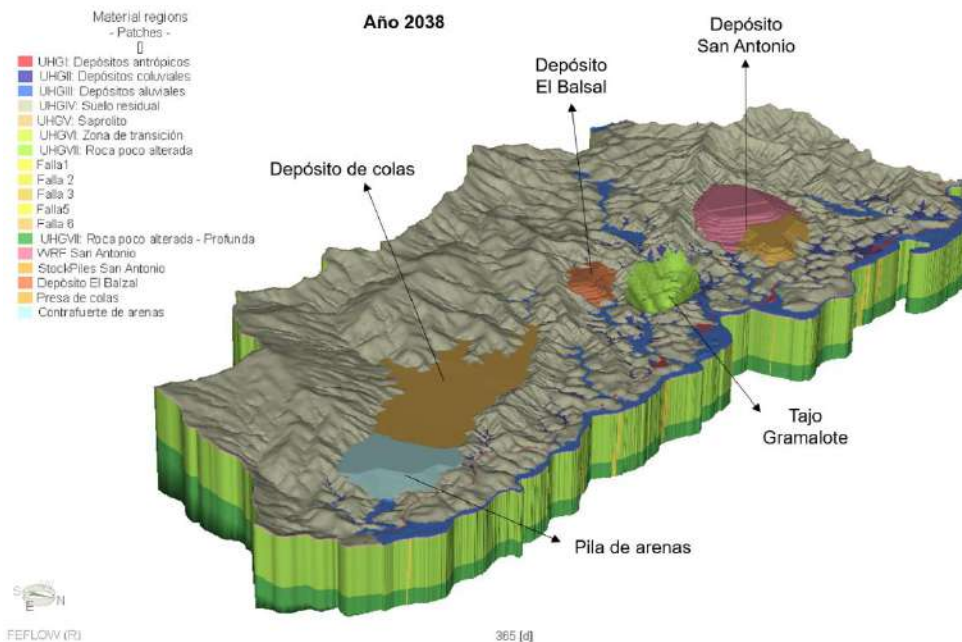


Figura 5.1.6.310 Geometría y materiales del desarrollo minero a 2038 sobre el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

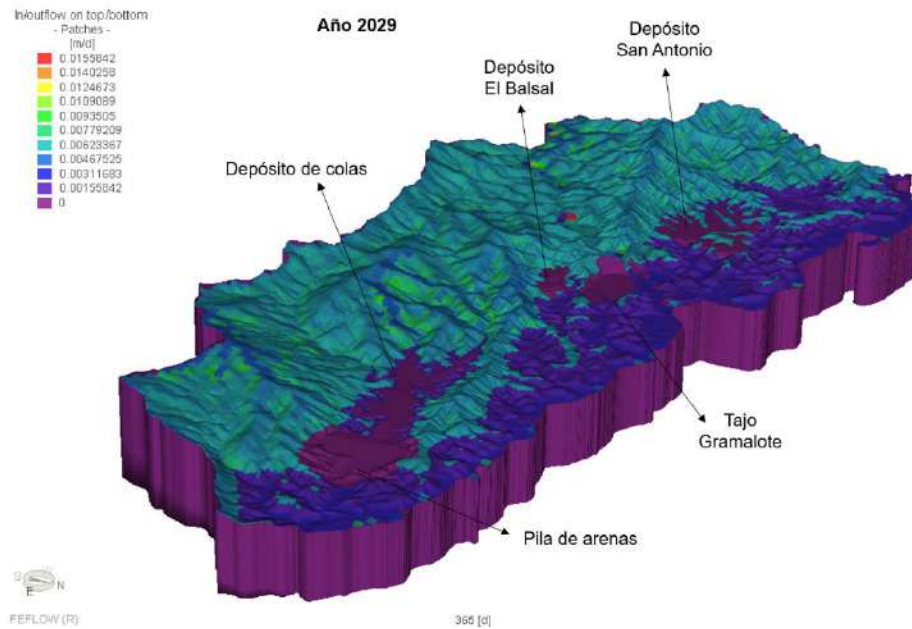


Figura 5.1.6.311 Configuración de cambios en la recarga en la huella de las obras mineras del año 2029 en el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

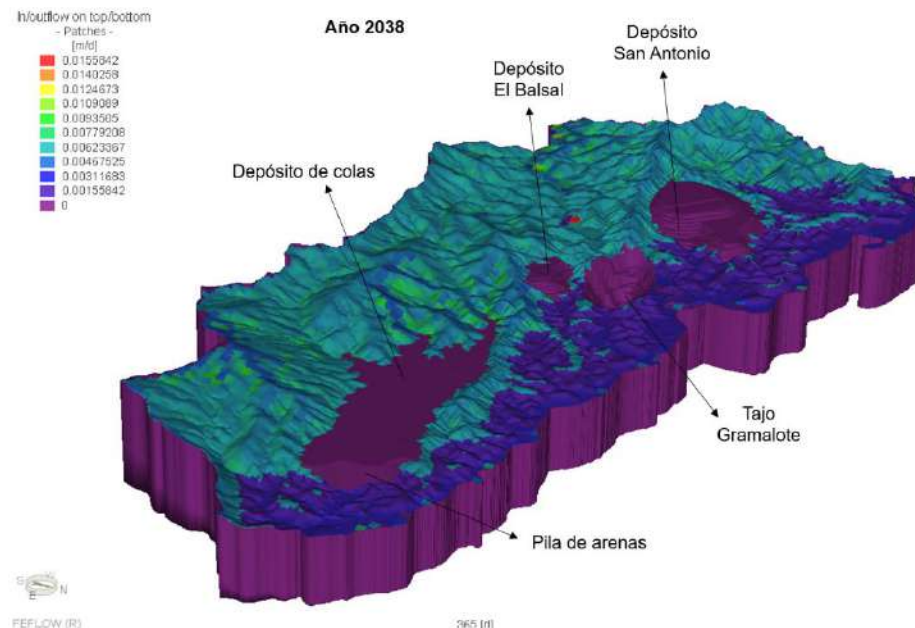


Figura 5.1.6.312 Configuración de cambios en la recarga en la huella de las obras mineras del año 2038 en el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

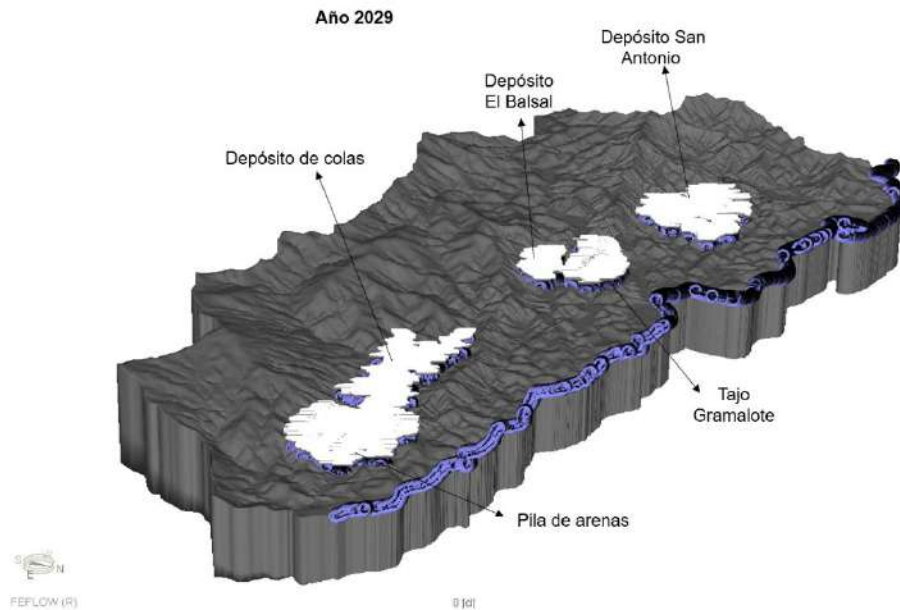


Figura 5.1.6.313 Configuración de las condiciones de frontera tipo Constant Head con Seepage Face para representar las obras mineras del año 2029 en el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

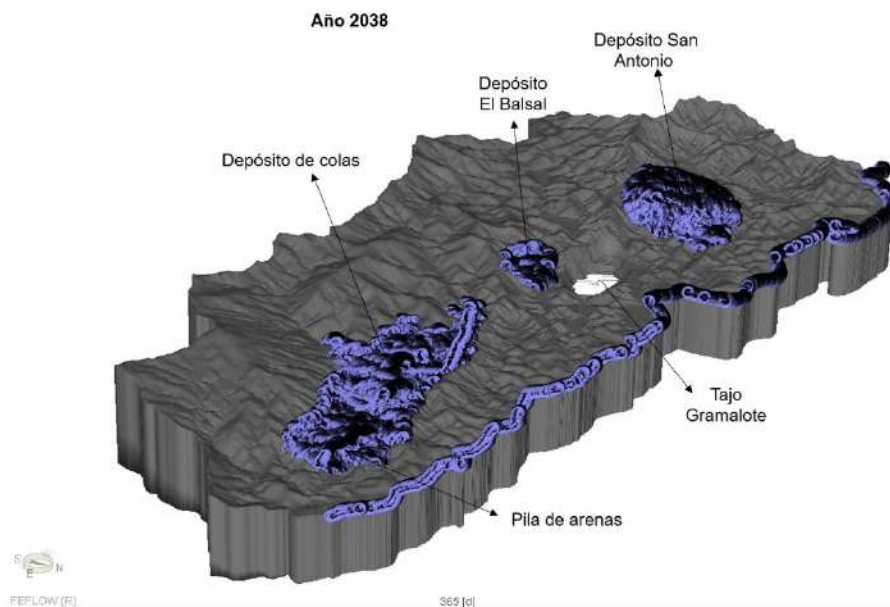


Figura 5.1.6.314 Configuración de las condiciones de frontera tipo Constant Head para representar las obras mineras del año 2038 en el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

Slice 7, Layer 7

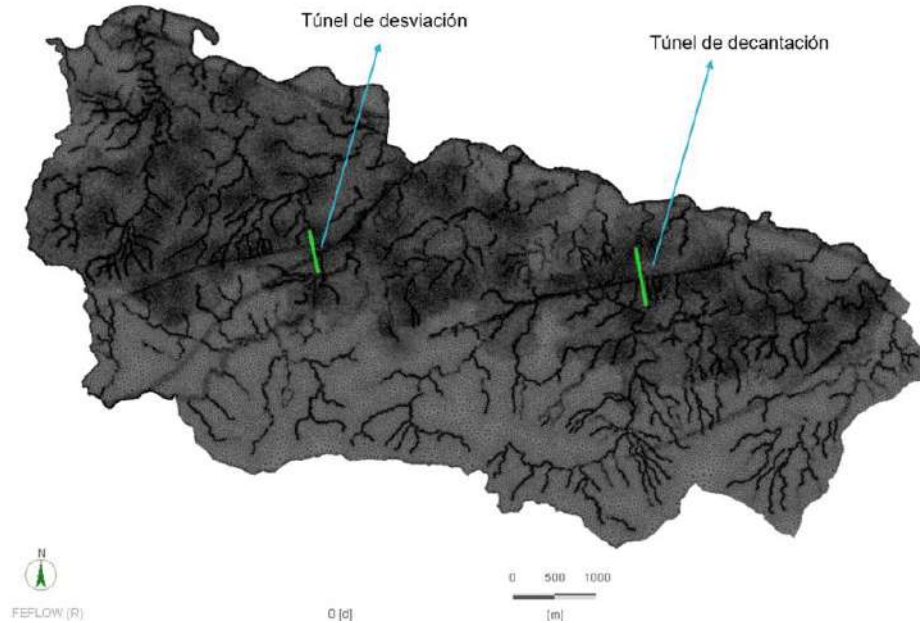


Figura 5.1.6.315 Configuración de las condiciones de frontera tipo Transfer Flow representando los túneles en la capa 7.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

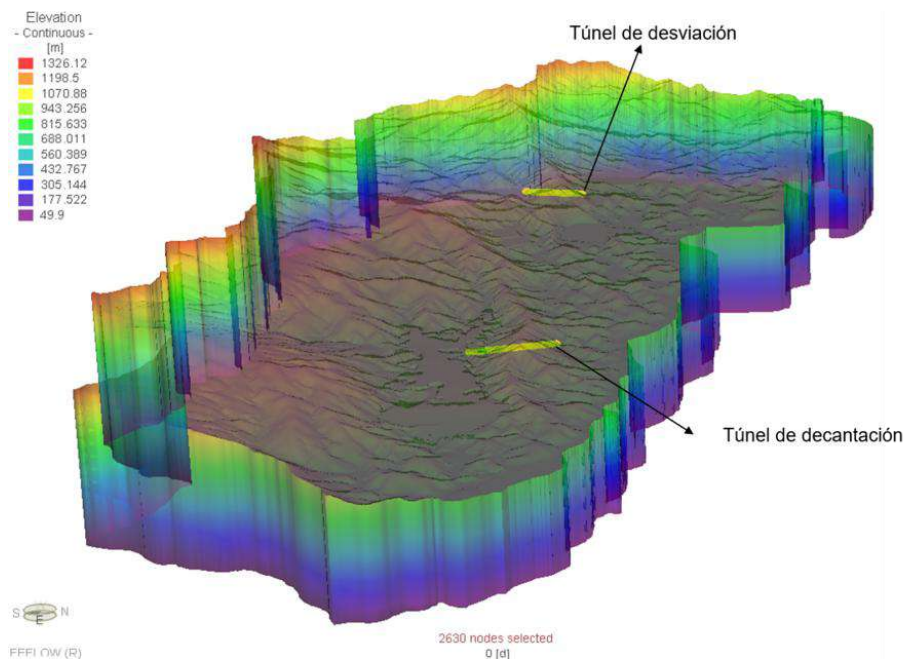


Figura 5.1.6.316 Asignación de los nodos Transfer Flow representando los túneles en el modelo hidrogeológico numérico 3D.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

C. Resultados

De la Figura 5.1.6.317 a la Figura 5.1.6.346 se muestra el resultado de los niveles piezométricos alrededor del Tajo Gramalote entre los años 2029 y 2038 en forma de perfiles, superficie piezométrica y en planta, junto con la ubicación de los puntos de agua caracterizados como manantiales, con el fin de evaluar, la magnitud de los abatimientos y los posibles impactos que puede ocasionar el abatimiento de agua subterránea sobre estos.

Los resultados muestran que las variaciones significativas son proporcionales a la cota de excavación de cada año y a la extensión en horizontal de dichas obras, de igual manera, dichas variaciones se concentran y confinan alrededor del tajo y se propagan especialmente en profundidad, mostrando que los niveles piezométricos superficiales sufrirían impactos locales, más no propagaciones regionales, adicionalmente, el resultado evidencia que los caudales de flujo proyectados provendrían fundamentalmente de variaciones en el almacenamiento.

Las liberaciones de almacenamiento de agua se producen en forma escalonada, manteniendo un comportamiento estable alrededor del caudal máximo de 350 l/s entre 2035 y 2038, este comportamiento solo es posible capturarse por la simulación transitoria efectuada. Conforme se llegan a las capas más profundas el caudal tiende a un comportamiento asintótico. Resulta clave identificar que el caudal de ingreso al Tajo está variando entre 135 l/s para el año 1 y 357 l/s para el año 10. El caudal máximo entonces se estaría presentando cuando se atraviesan las unidades hidrogeológicas superficiales, y se llega a la máxima profundidad en la unidad hidrogeológica 7 al finalizar el desarrollo del tajo.

En cuanto a los caudales de infiltración hacia los túneles, se evidencia un comportamiento asintótico en ambas infraestructuras, con tendencia a la estabilidad en los últimos años, presentándose el máximo caudal en el primer año, con 3.88 l/s y 0.449 l/s en los túneles de decantación y desviación, respectivamente, mientras que el patrón de estabilidad se da alrededor de 2.64 l/s y 0.21 l/s, respectivamente.

En cuanto a los caudales potenciales de filtración desde las obras de almacenamiento, se destaca una tendencia creciente en la mayoría de las obras, con excepción de la presa de arenas, donde el pico se presenta en el tercer año, con caudal máximo de 437 l/s, el cual descende de forma progresiva hasta 233 l/s en el último año, esto dadas las condiciones de permeabilidad de esta UHG antrópica que permite un drenado más rápido.

Los caudales de entrada desde las UHG naturales a las obras de almacenamiento deben analizarse en conjunto con los caudales potenciales de filtración, pues su comportamiento tiende a ser inverso, y la diferencia entre dichos caudales (de entrada y salida) representa el resultado del balance de agua en dichas estructuras, siendo relevante señalar que en el depósito de relaves, los flujos hacia la UHG antrópica son mayores que los que se presentan desde dicha UHG hacia el medio circundante, por tanto disminuyen los potenciales de filtración.

Para evidenciar los descensos en planta, así como las variaciones en las superficies piezométricas, se considera la capa 1 como la capa representativa, por lo que también se muestra la piezometría simulada año a año en la zona de modelación donde se ratifica lo mencionado con anterioridad, los descensos no se propagan en los niveles someros (capa 1) más allá de alrededor de 450 m aguas abajo del perímetro del Tajo, especialmente hacia el noreste, lo que indica que el efecto en el nivel freático es esencialmente local. En

contraste en profundidad (ver resultados de perfiles 1a y 2ª)) los descensos tienden a exhibir su mayor propagación, con una distancia horizontal de hasta 900 m alrededor del límite del tajo, considerando un umbral de descenso de 5 m. No obstante, es importante aclarar que estos descensos profundos no representan un abatimiento del nivel freático, sino una despresurización del fluido en la roca en profundidad, que no necesariamente se extienden por fuera del dominio del modelo, ya que las mayores propagaciones se presentan por debajo de la cota mínima del tajo, por lo que el agua (en caso de existir) se encontraría en un sistema confinado. En consecuencia, los cambios en el nivel piezométrico reflejan variaciones de presión asociadas al ajuste del estado interno de la roca debido a la construcción del tajo y no deben interpretarse como un descenso real del nivel de saturación.

Es relevante destacar que en la zona de estudio el medio profundo está constituido por roca cristalina, en la cual el flujo subterráneo se desplaza a través de fracturas, y que a medida que aumenta la profundidad el estado de esfuerzos tiende a ocasionar que las fracturas sean menos continuas y mucho más cerradas, lo que condiciona la distribución del agua subterránea e impide una transmisión vertical significativa. En estas condiciones, el sistema funciona como un recurso de almacenamiento hidráulico desconectado de los drenajes superficiales. Por su parte en el modelo se adopta un enfoque de medio poroso equivalente, que permite identificar las zonas preferentes del medio en profundidad, que liberan presión en forma de agua de almacenamiento hacia el tajo, lo que no implica aportes de ríos, quebradas o manantiales, que estarían asociadas a la capa 1.

En consecuencia, aunque los niveles piezométricos más profundos puedan quedar por debajo de la elevación del río Nus, ello no implica el riesgo de desecación, ya que, de acuerdo con el modelo conceptual, estos drenajes superficiales, así como los nacimientos de agua, se asocian al medio poroso superficial y no existe conectividad hidráulica vertical que permita que los descensos profundos se transmitan hacia el acuífero superficial que alimenta los cursos de agua. El sistema profundo regional se comporta de manera independiente del sistema somero y su despresurización no afectaría los afluentes superficiales.

Año 2029

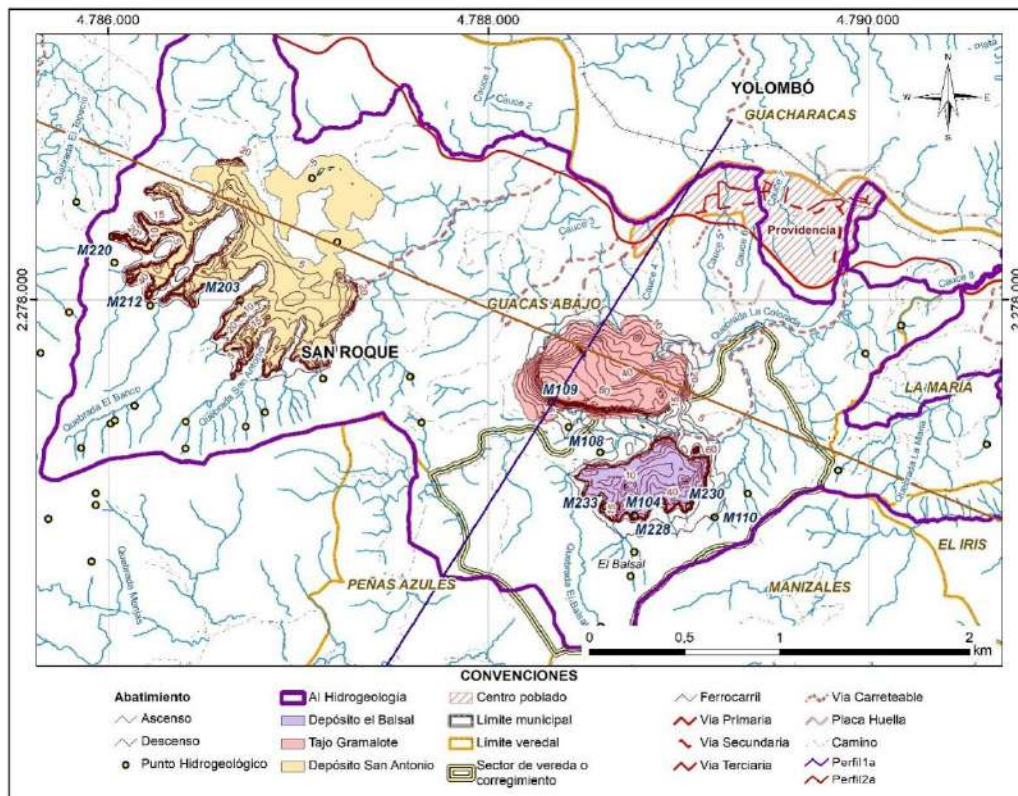


Figura 5.1.6.317 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2029 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

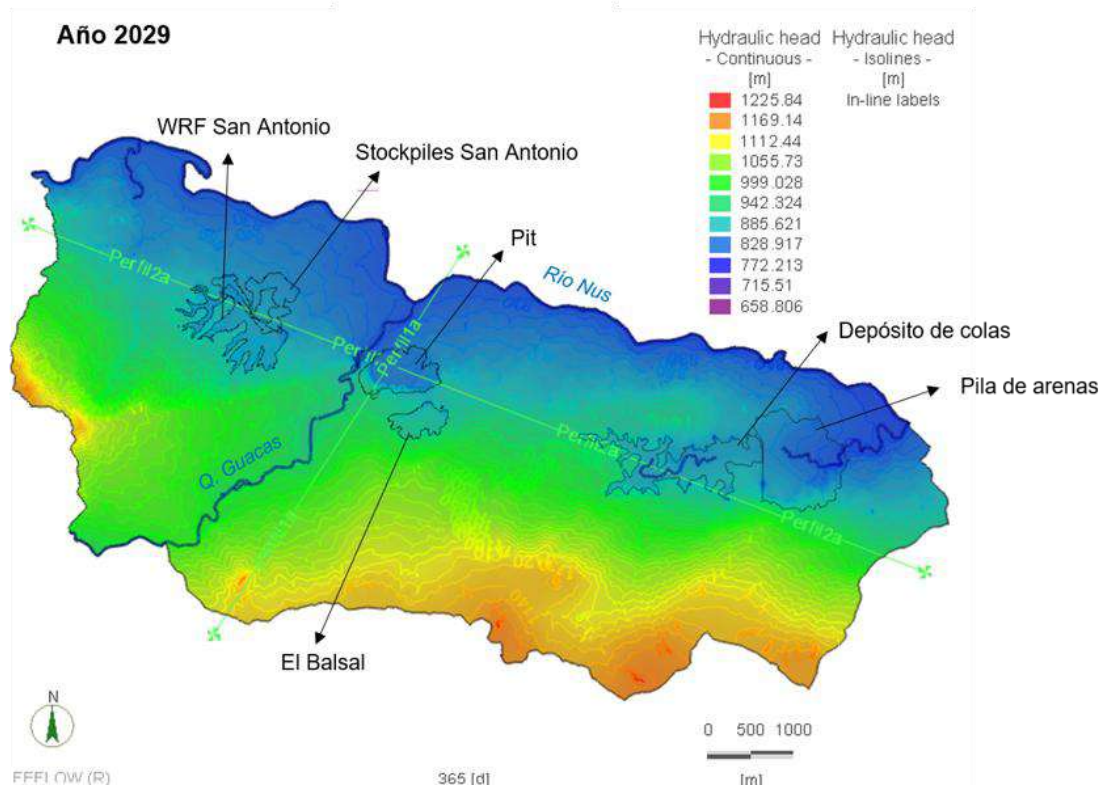


Figura 5.1.6.318 Superficie piezométrica simulada a 2029 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).

Fuente: (SHI SAS, 2026)

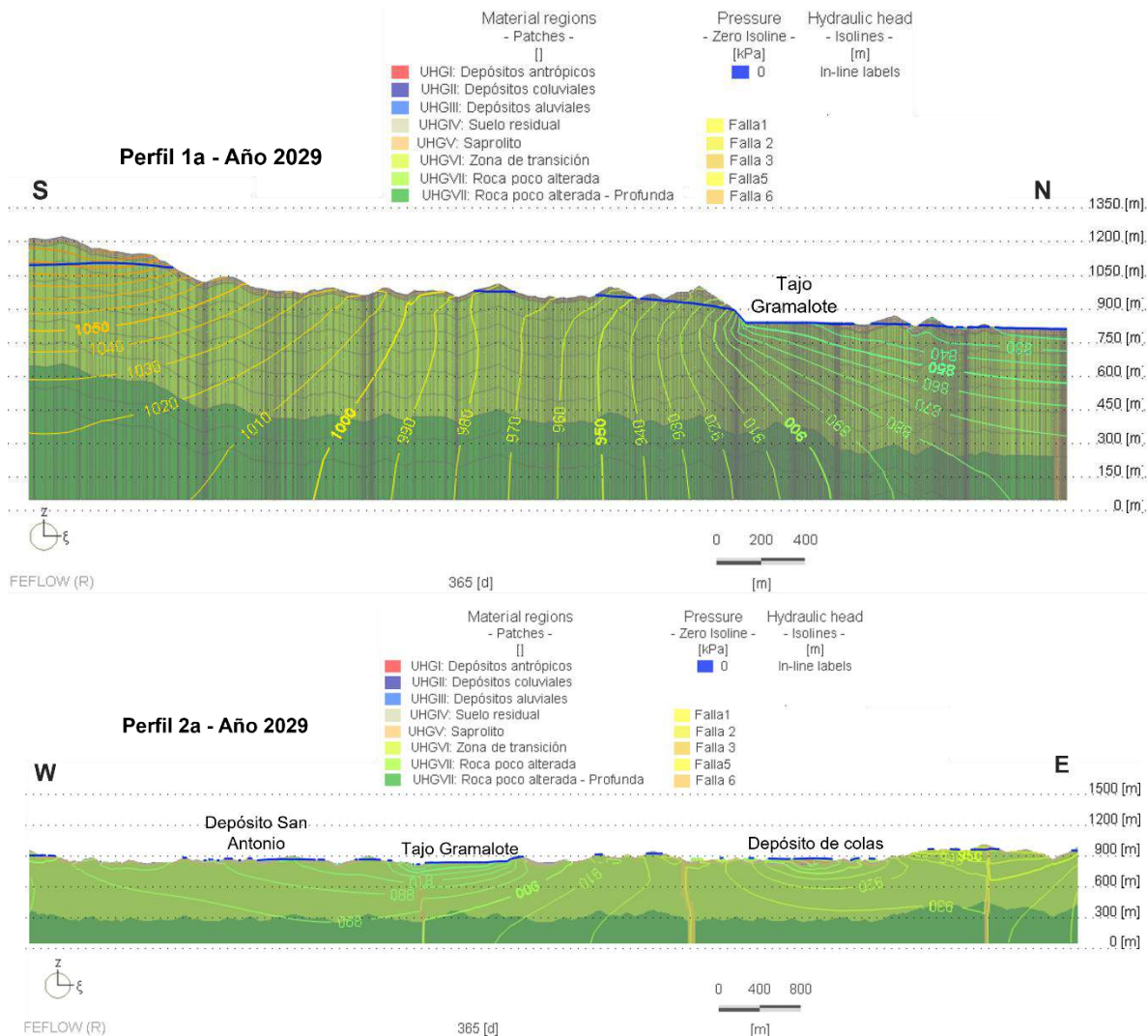


Figura 5.1.6.319 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2029 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.

Fuente: (SHI SAS, 2026).

De acuerdo con los resultados de la modelación numérica para el año 2029, los puntos M104, M108, M109, M110, M203, M212, M220, M228, M229, M230 y M233 presentarían una afectación potencial asociada al avance minero, debido a su proximidad al Tajo y a las áreas destinadas para el manejo de material (Depósito San Antonio y Depósito El Balsal), donde se concentran las principales variaciones del nivel piezométrico.

Año 2030

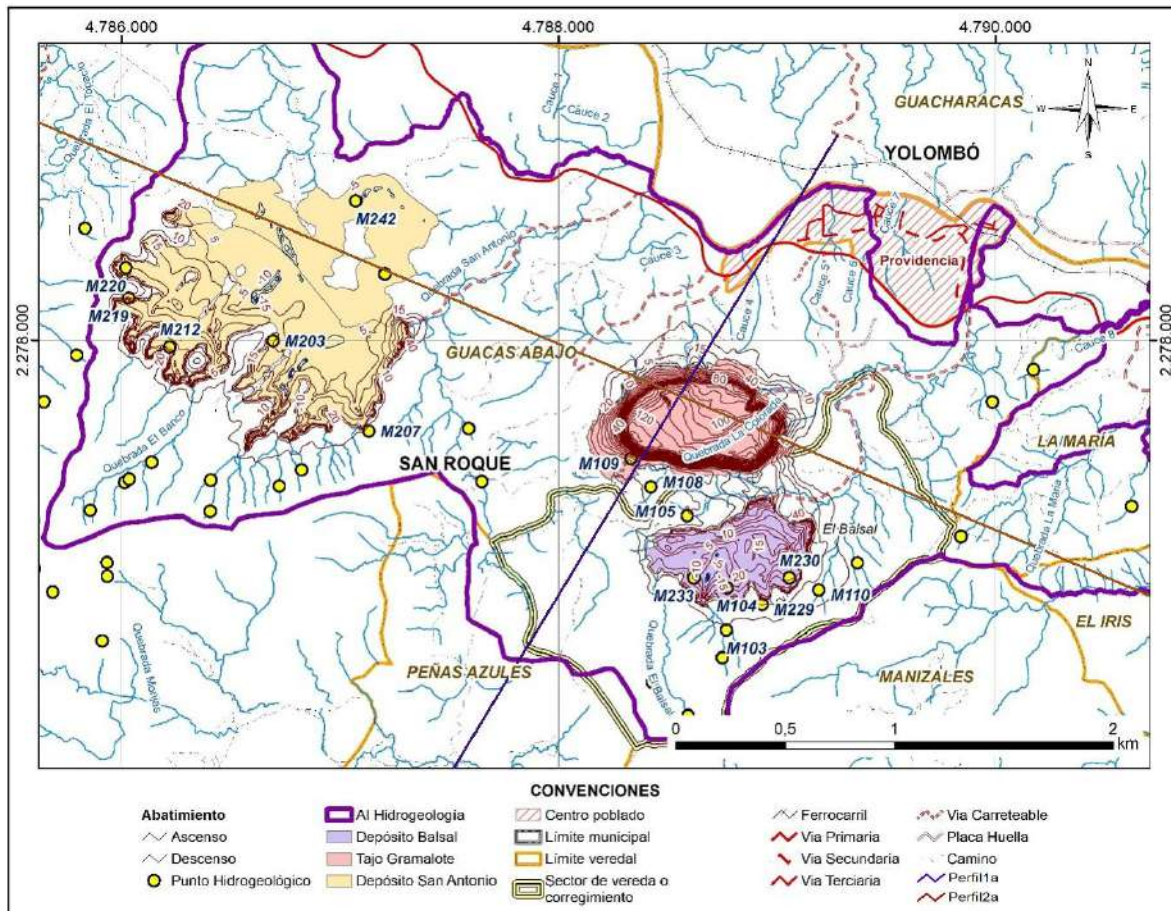


Figura 5.1.6.320 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2030 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

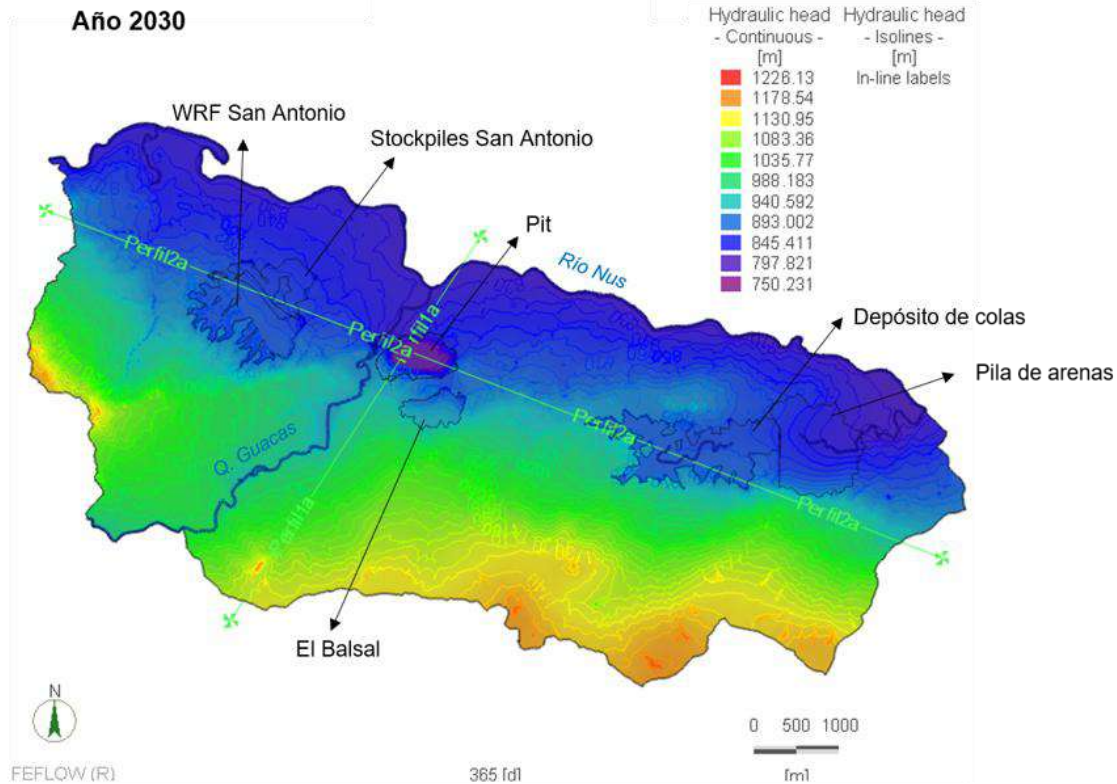


Figura 5.1.6.321 Superficie piezométrica simulada a 2030 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).

Fuente: (SHI SAS, 2026)

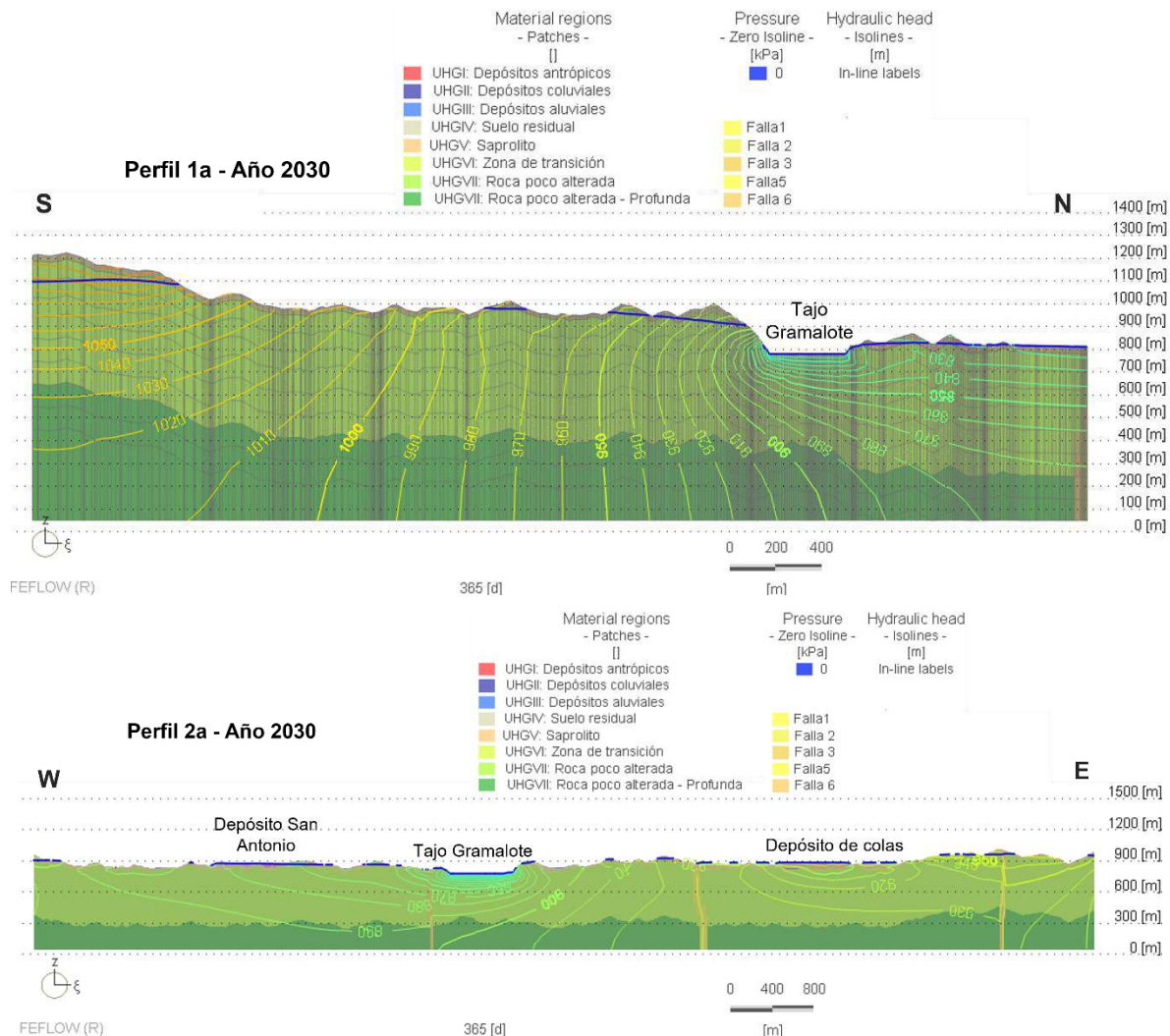


Figura 5.1.6.322 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2030 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

De acuerdo con los resultados de la modelación numérica para el año 2030, los puntos M103, M104, M105, M108, M109, M110, M113, M203, M207, M212, M219, M220, M228, M229, M230, M233 y M242 presentarían una afectación potencial asociada al avance minero, debido a su proximidad al Tajo y a las áreas destinadas para el manejo de material (Depósito San Antonio y Depósito El Balsal), donde se concentran las principales variaciones del nivel piezométrico.

Año 2031

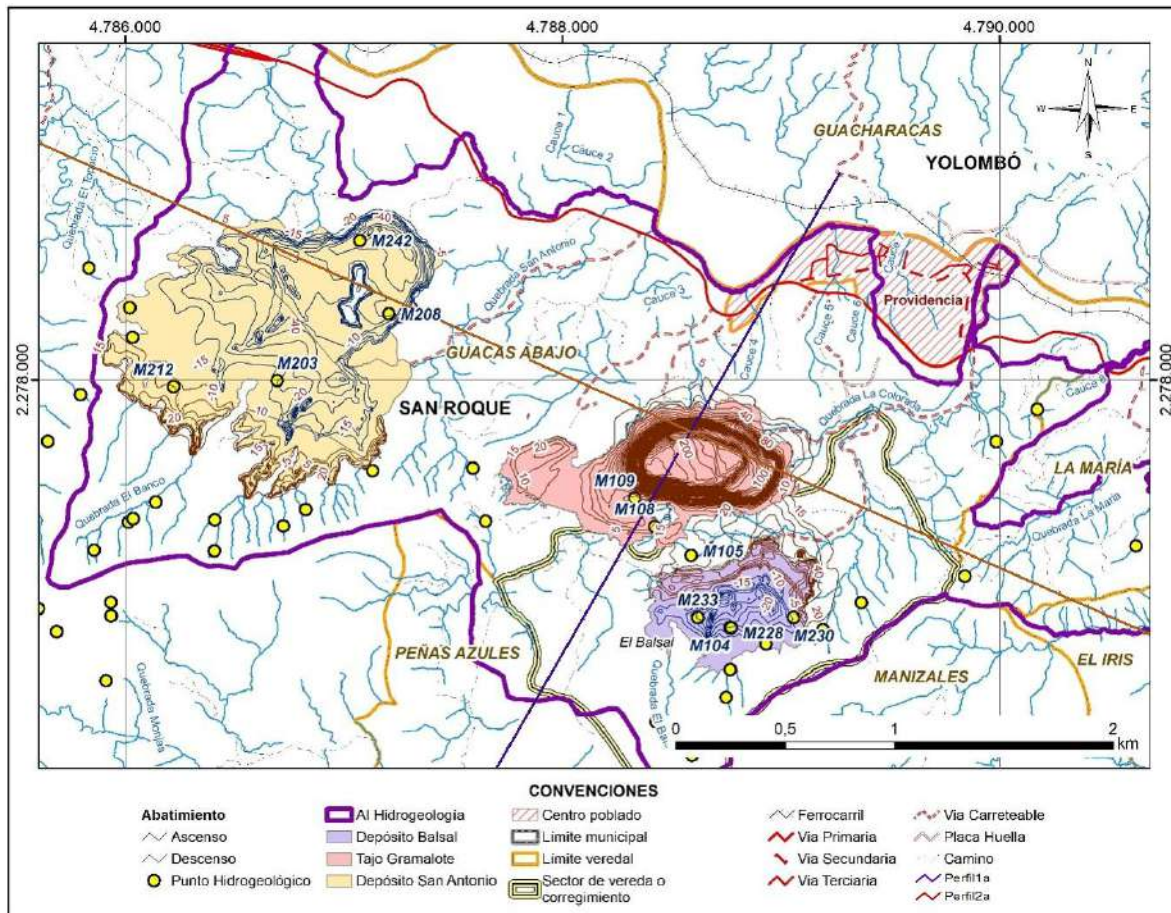


Figura 5.1.6.323 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2031 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

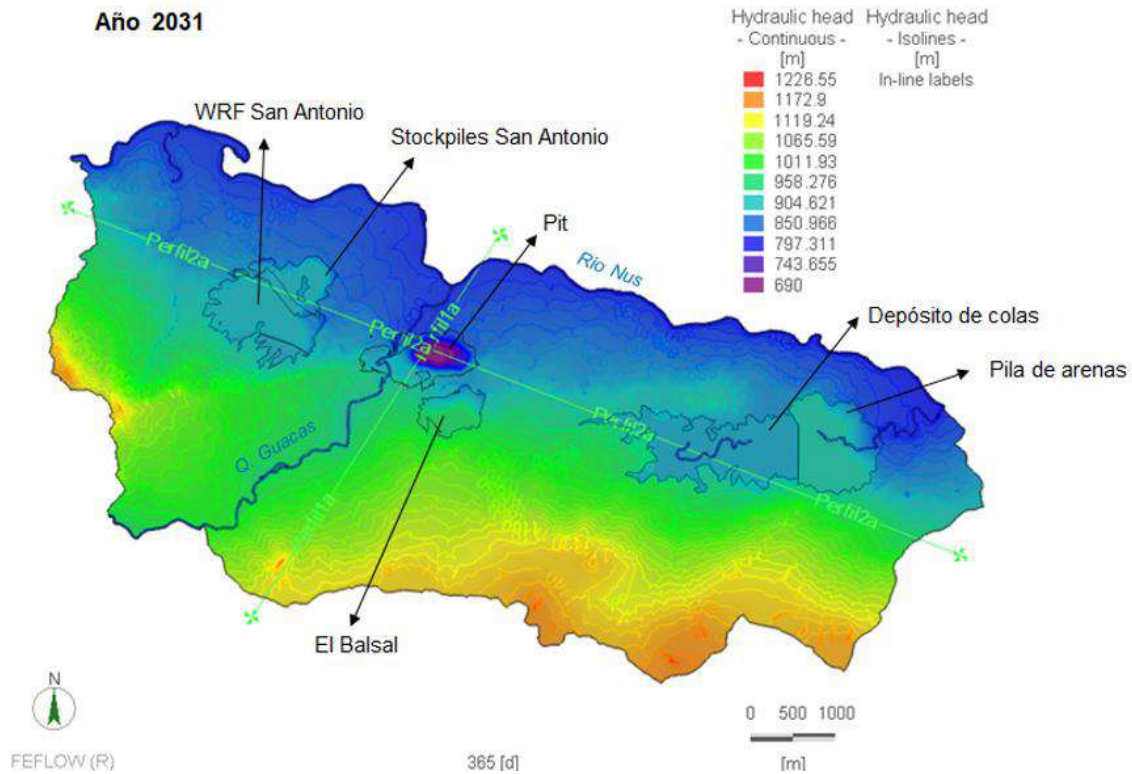


Figura 5.1.6.324 Superficie piezométrica simulada a 2031 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).

Fuente: (SHI SAS, 2026)

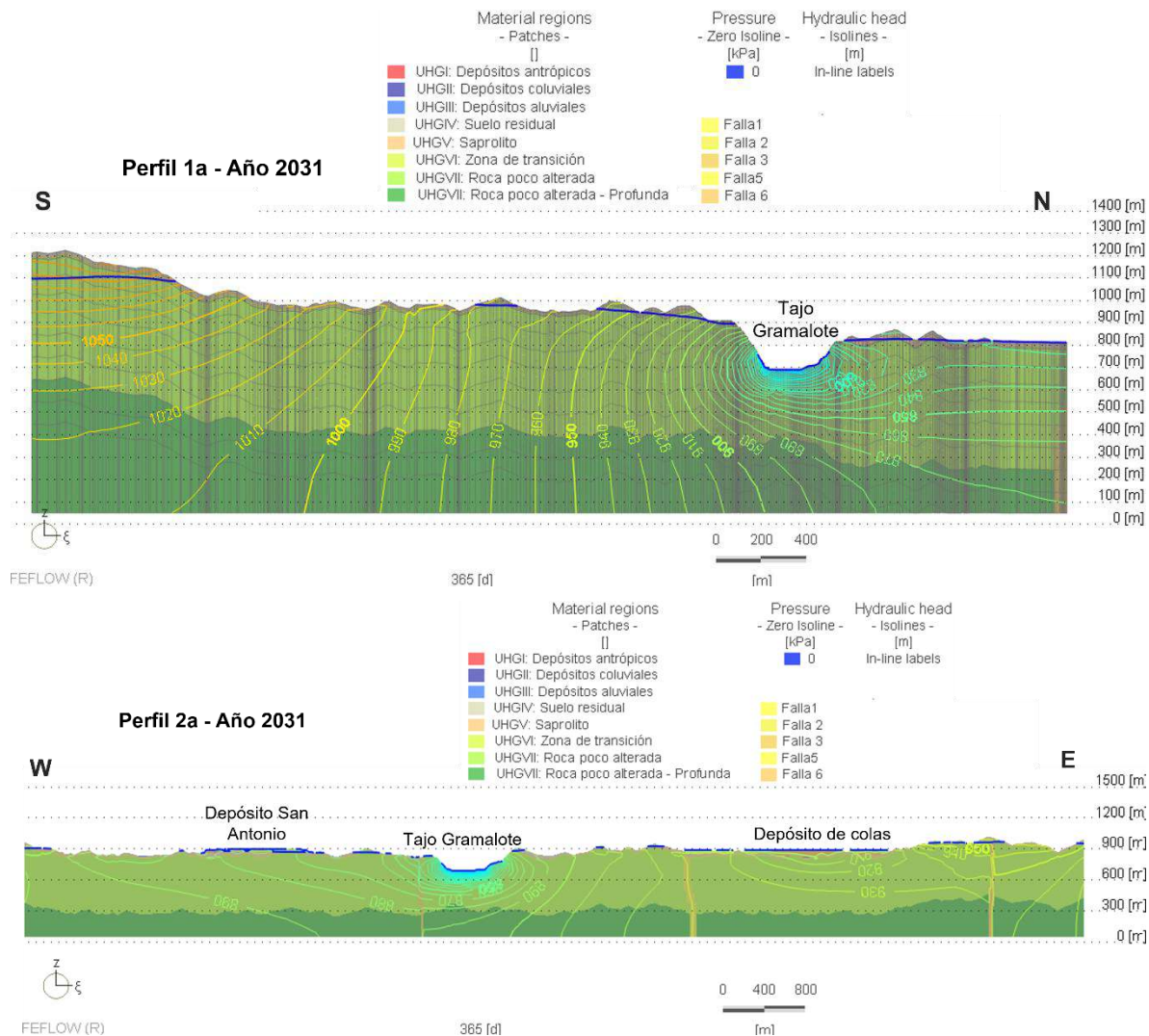


Figura 5.1.6.325 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2031 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

De acuerdo con los resultados de la modelación numérica para el año 2031, los puntos M104, M105, M108, M109, M203, M208, M212, M228, M230 y M242 presentarían una afectación potencial asociada al avance minero, debido a su proximidad al Tajo y a las áreas destinadas para el manejo de material (Depósito San Antonio y Depósito El Balsal), donde se concentran las principales variaciones del nivel piezométrico.

Año 2032

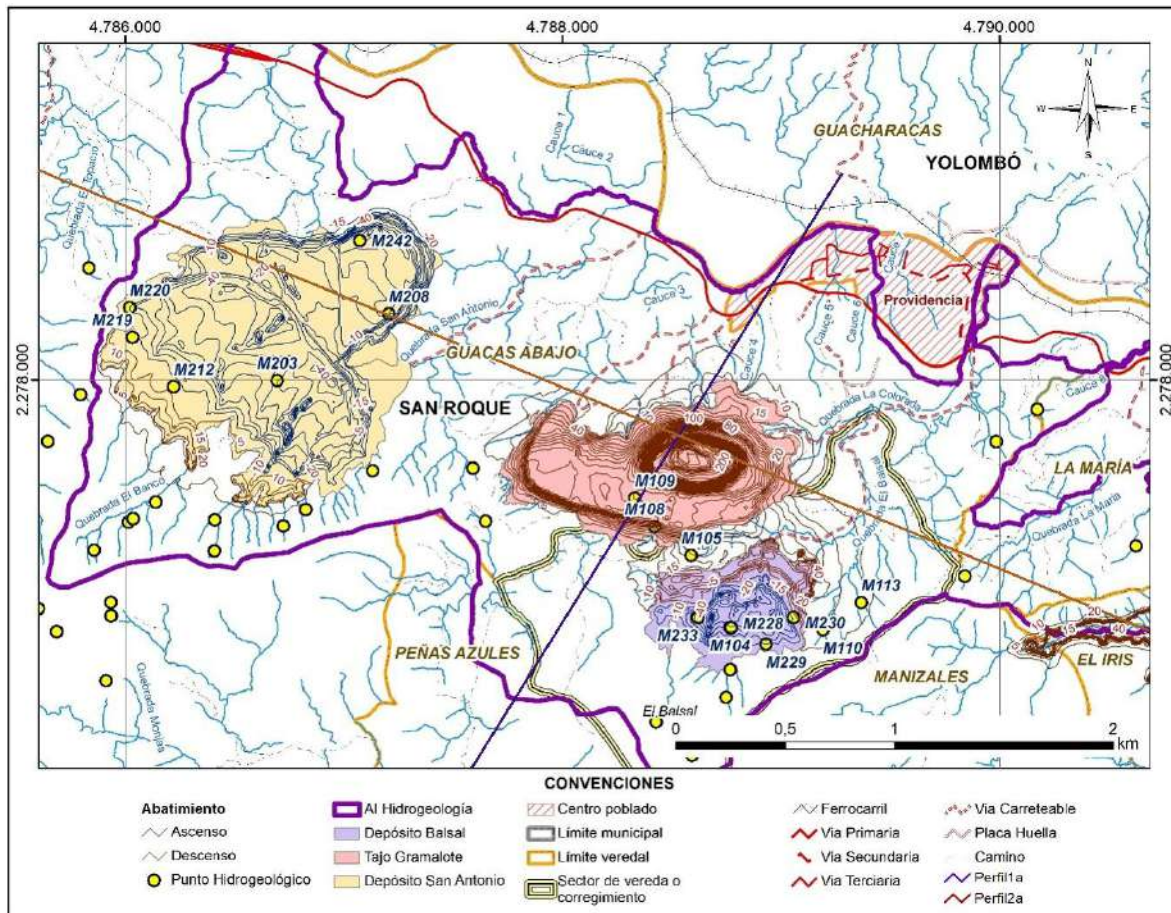


Figura 5.1.6.326 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2032 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

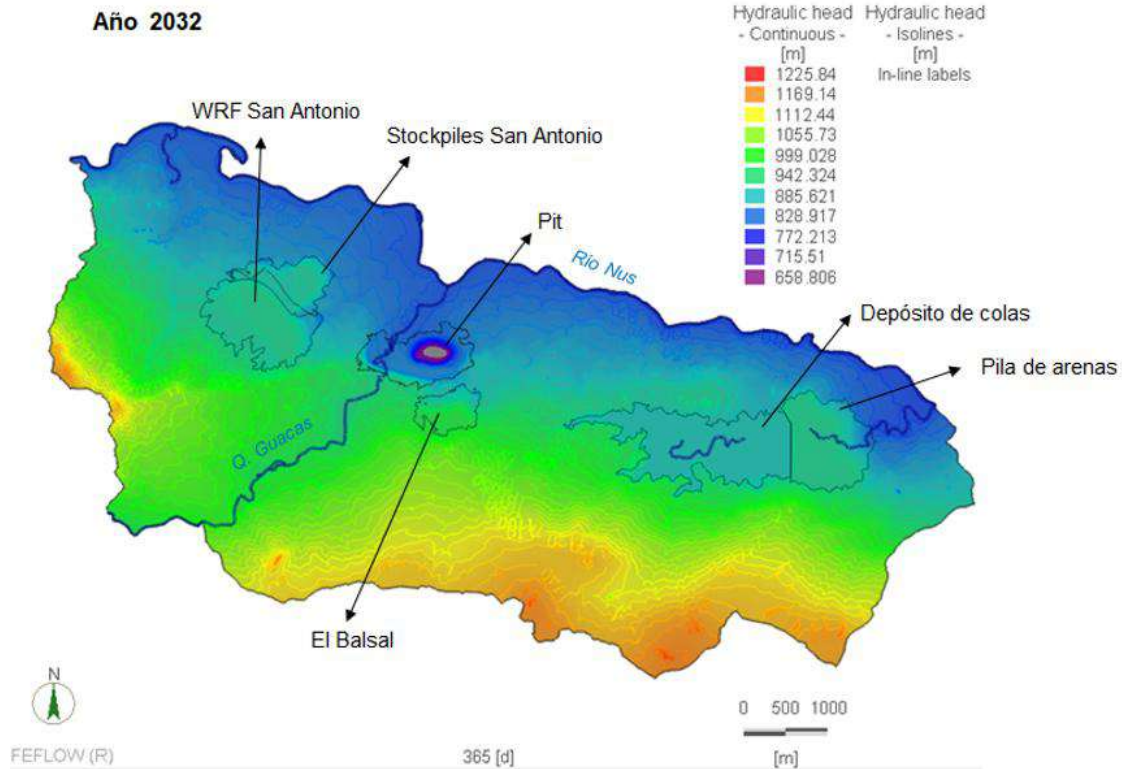


Figura 5.1.6.327 Superficie piezométrica simulada a 2032 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).

Fuente: (SHI SAS, 2026)

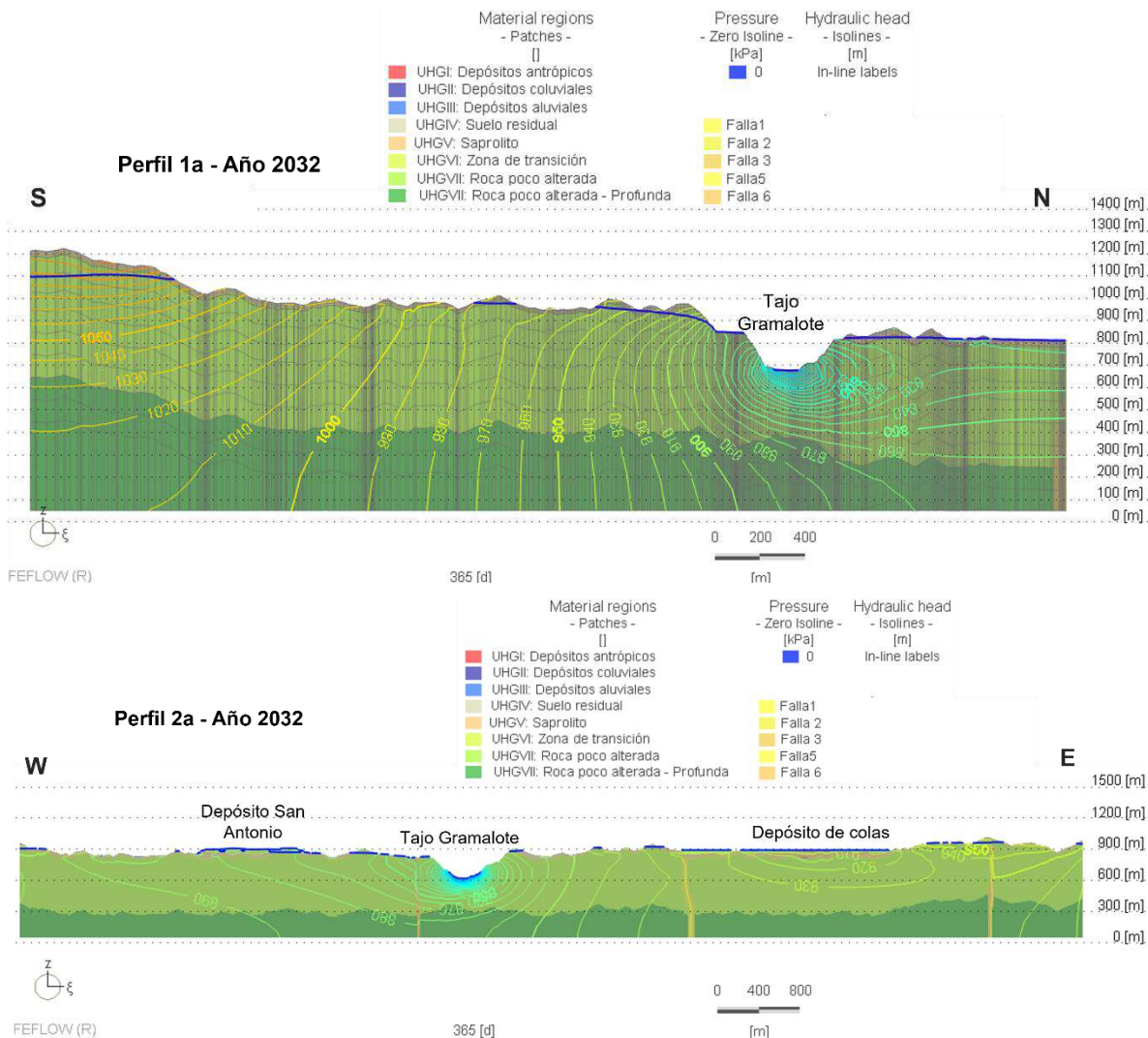


Figura 5.1.6.328 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2032 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

De acuerdo con los resultados de la modelación numérica para el año 2032, los puntos M104, M105, M108, M109, M110, M113, M203, M208, M212, M219, M220, M228, M229, M230, M233 y M242 presentarían una afectación potencial asociada al avance minero, debido a su proximidad al Tajo y a las áreas destinadas para el manejo de material (Depósito San Antonio y Depósito El Balsal), donde se concentran las principales variaciones del nivel piezométrico.

Año 2033

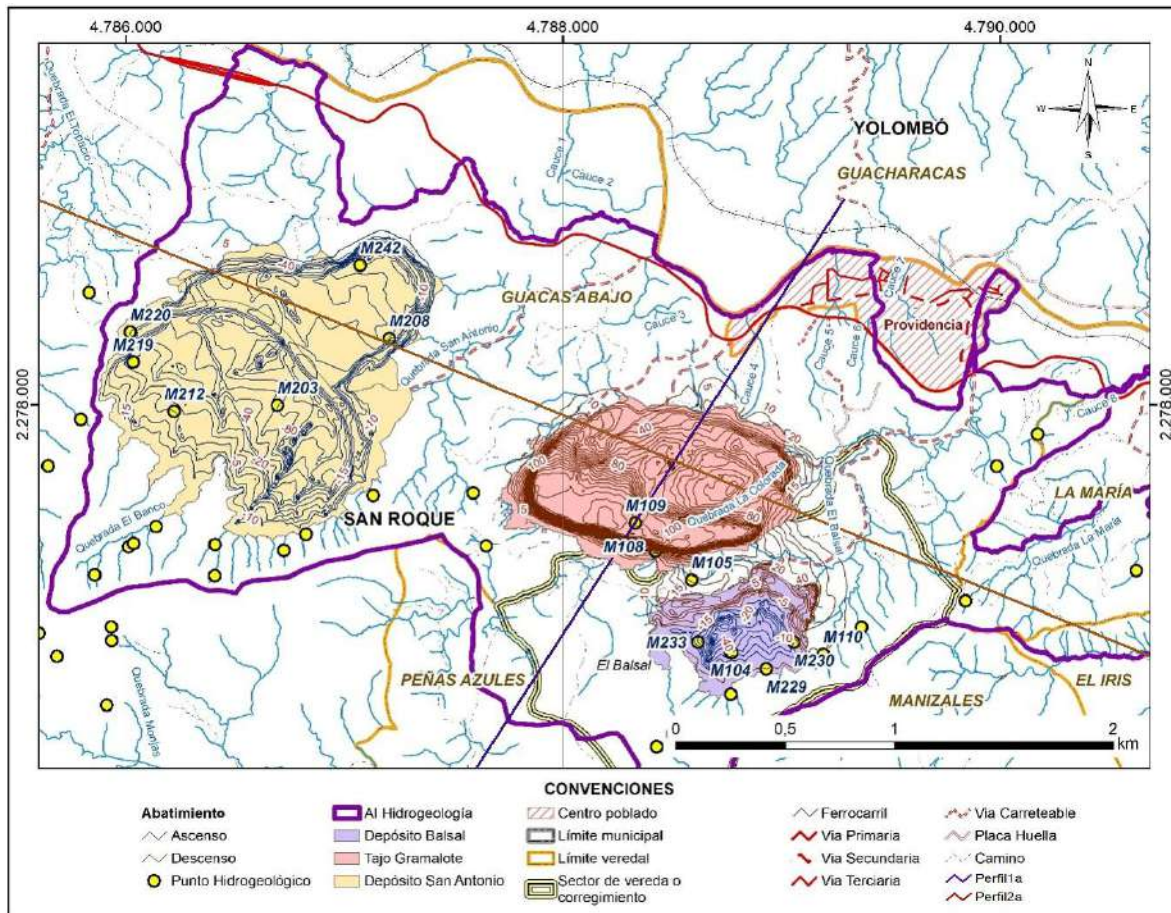


Figura 5.1.6.329 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2033 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

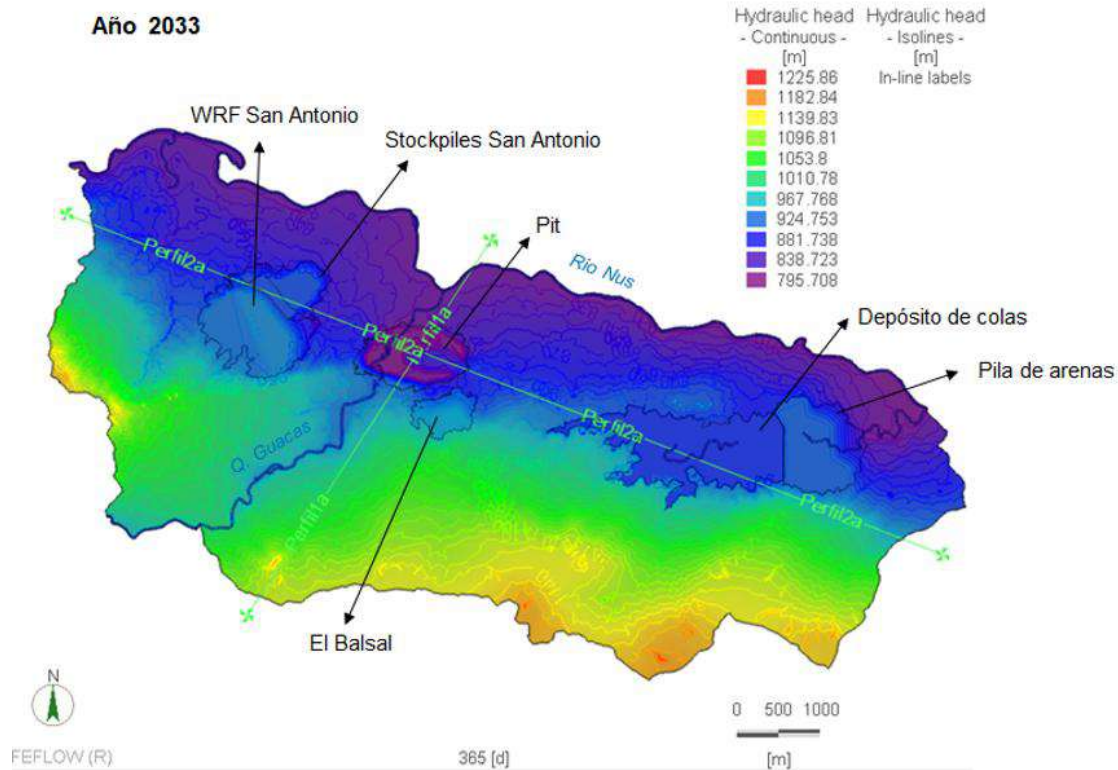


Figura 5.1.6.330 Superficie piezométrica simulada a 2033 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).

Fuente: (SHI SAS, 2026)

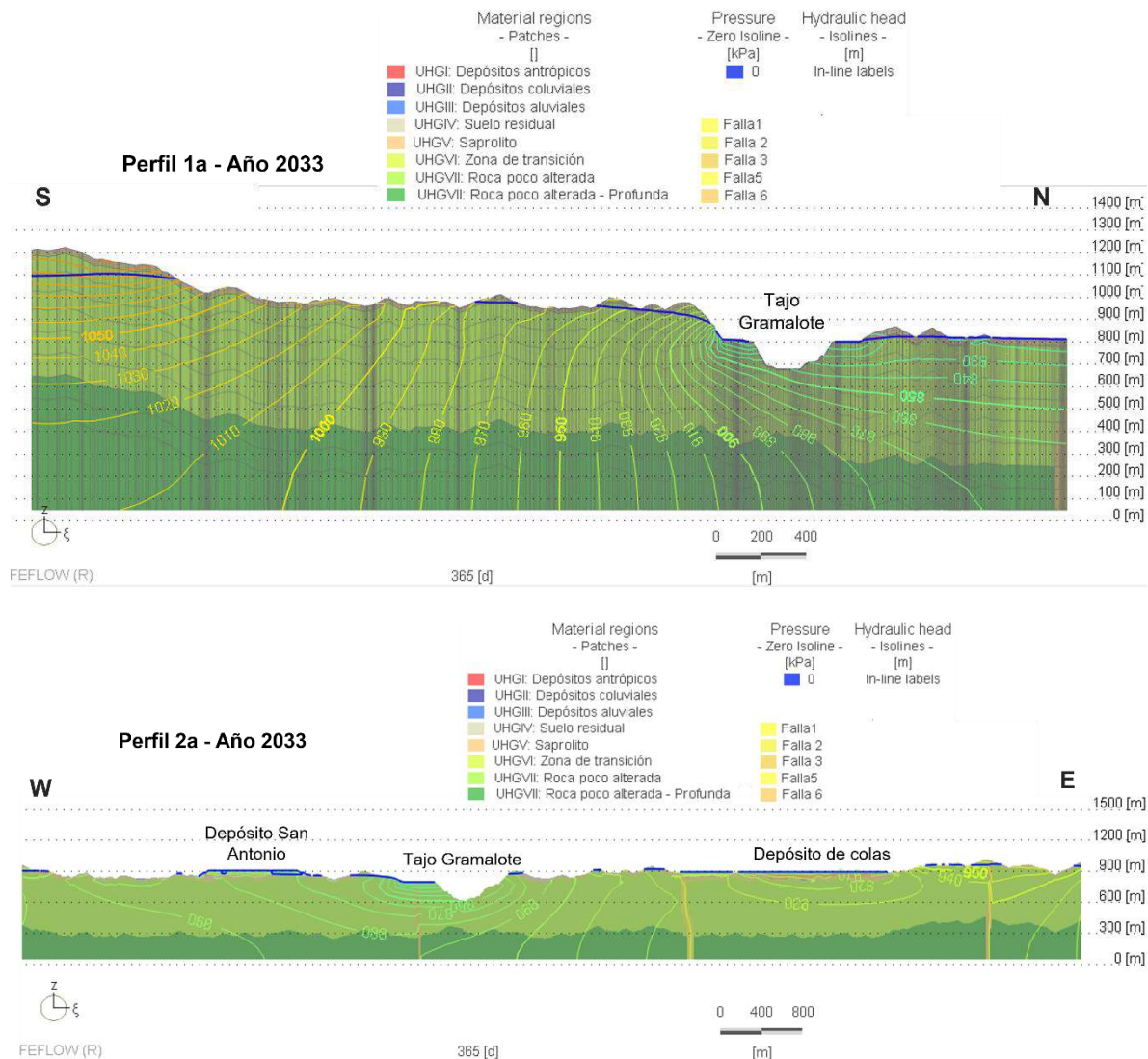


Figura 5.1.6.331 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2033 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

De acuerdo con los resultados de la modelación numérica para el año 2033, los puntos M104, M105, M108, M109, M110, M203, M208, M212, M219, M220, M228, M229, M230, M233 y M242 presentarían una afectación potencial asociada al avance minero, debido a su proximidad al Tajo y a las áreas destinadas para el manejo de material (Depósito San Antonio y Depósito El Balsal), donde se concentran las principales variaciones del nivel piezométrico.

Año 2034

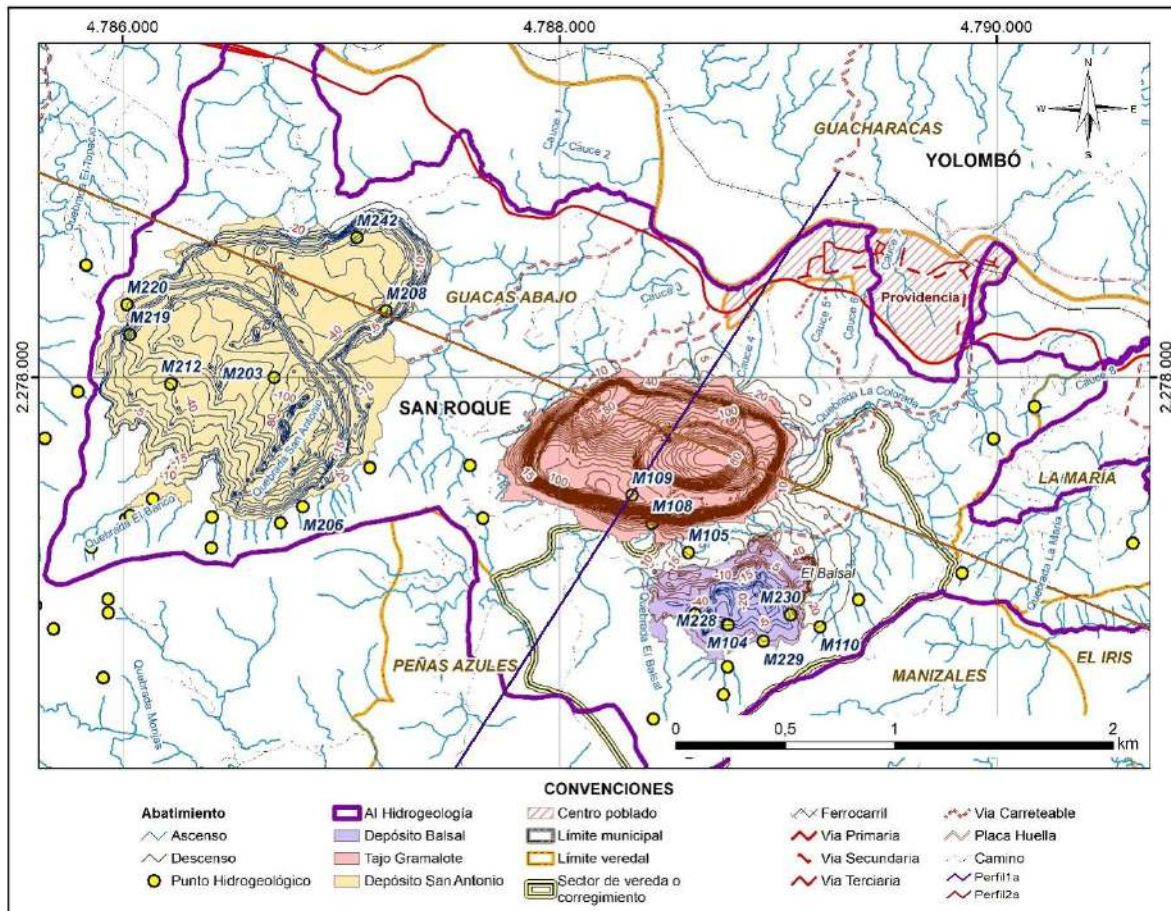


Figura 5.1.6.332 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2034 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

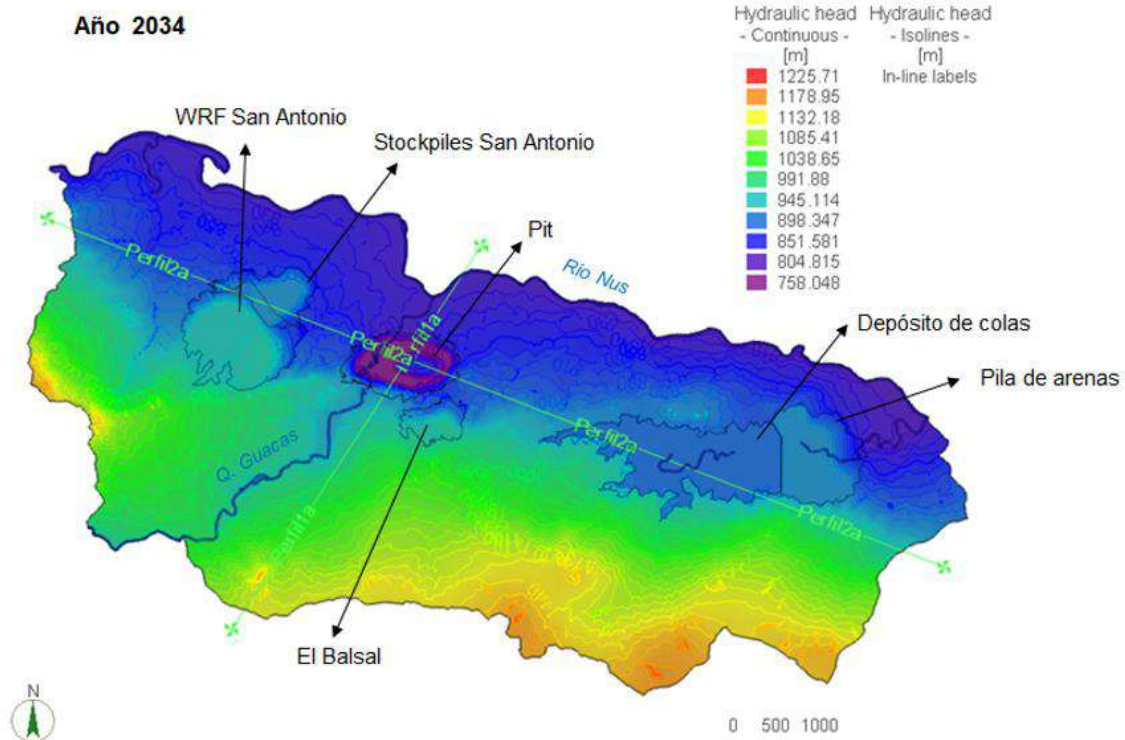


Figura 5.1.6.333 Superficie piezométrica simulada a 2034 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).

Fuente: (SHI SAS, 2026)

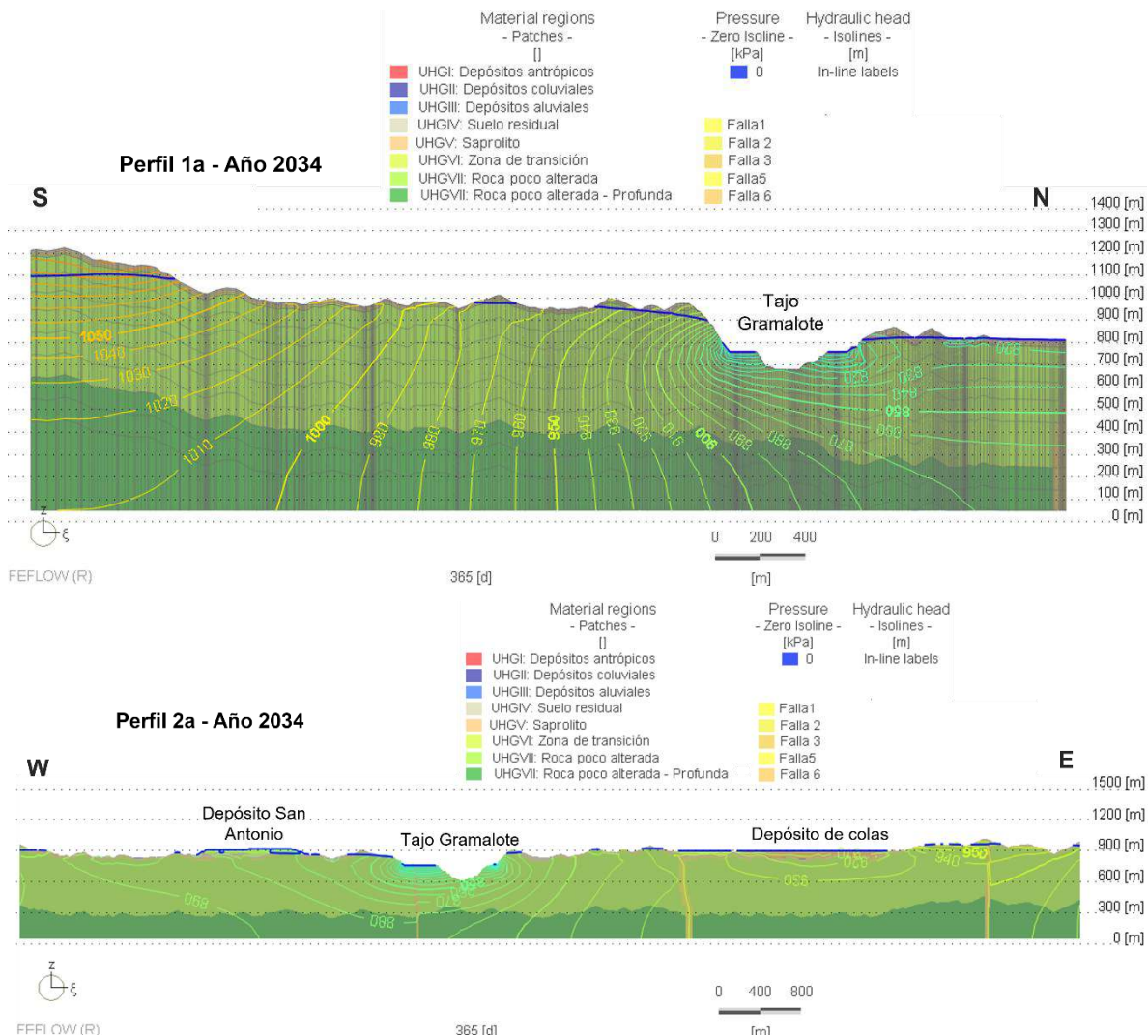


Figura 5.1.6.334 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2034 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

De acuerdo con los resultados de la modelación numérica para el año 2034, los puntos M104, M105, M108, M109, M110, M203, M208, M212, M219, M220, M228, M229, M230, M233 y M242 presentarían una afectación potencial asociada al avance minero, debido a su proximidad al Tajo y a las áreas destinadas para el manejo de material (Depósito San Antonio y Depósito El Balsal), donde se concentran las principales variaciones del nivel piezométrico.

Año 2035

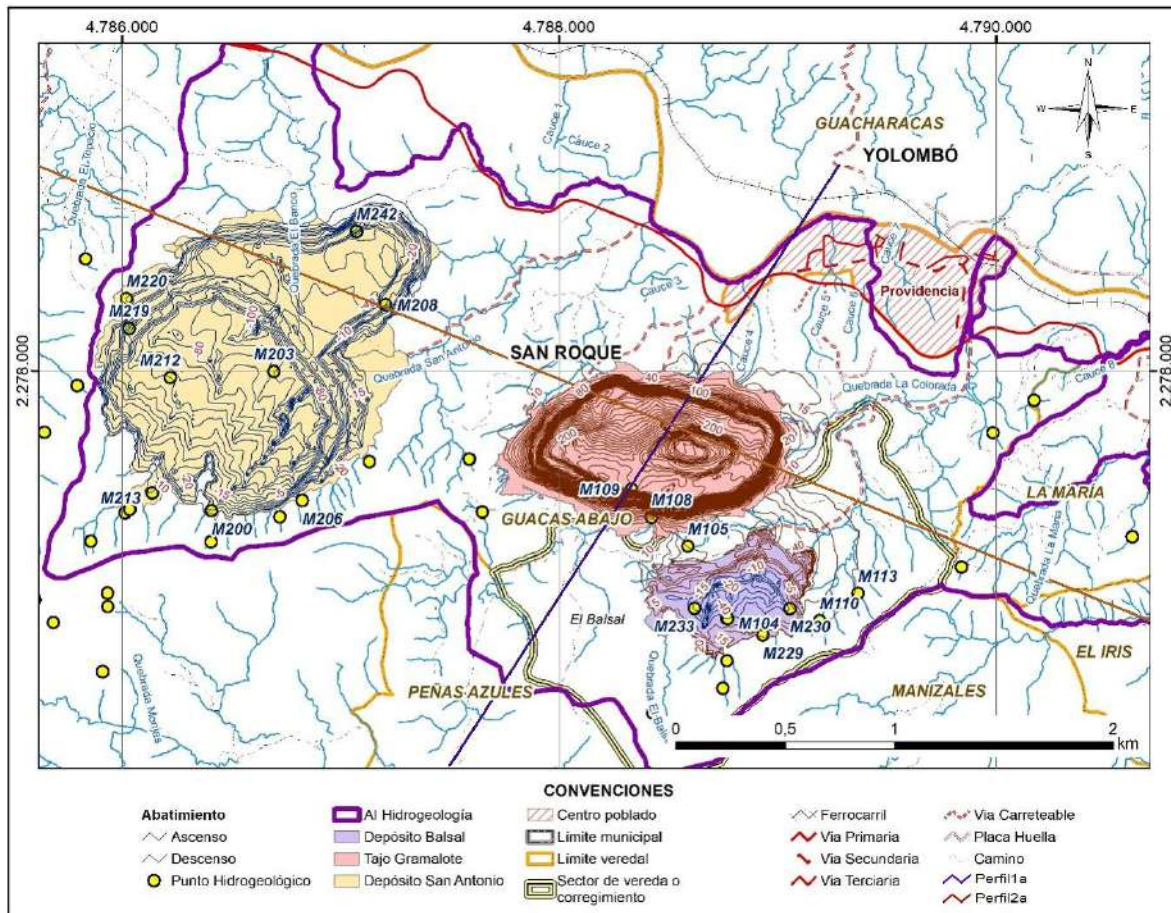


Figura 5.1.6.335 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2035 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

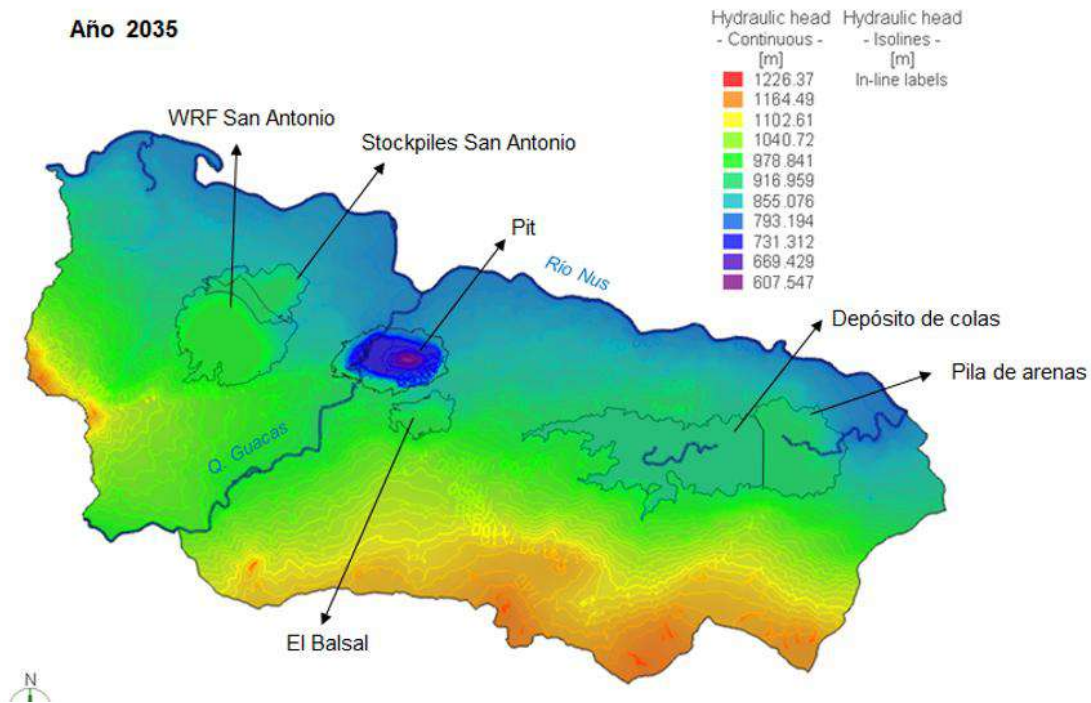


Figura 5.1.6.336 Superficie piezométrica simulada a 2035 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).

Fuente: (SHI SAS, 2026)

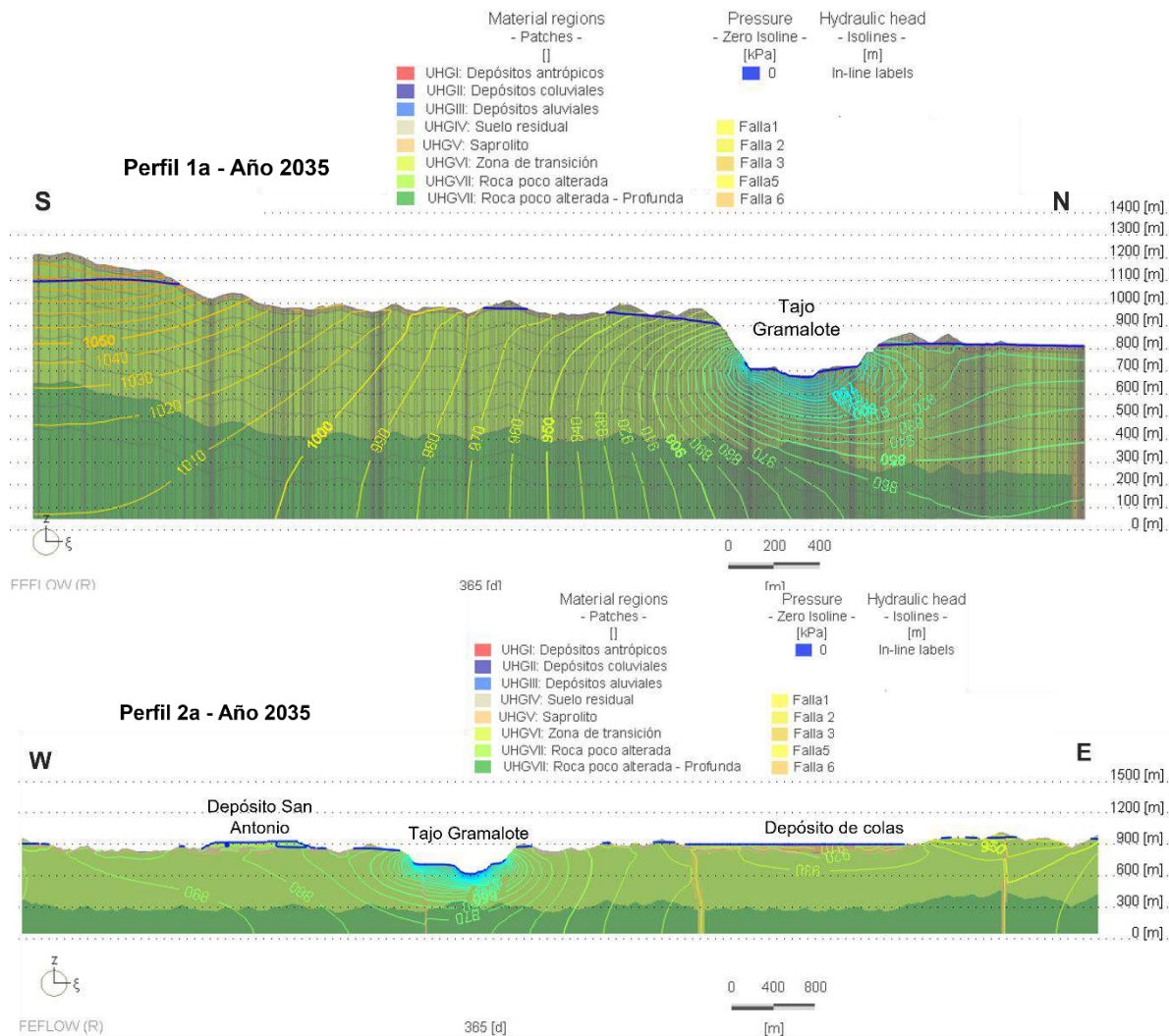


Figura 5.1.6.337 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2035 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

De acuerdo con los resultados de la modelación numérica para el año 2035, los puntos M104, M105, M108, M109, M110, M113, M200, M203, M206, M208, M212, M213, M219, M220, M228, M229, M230, M233 y M242 presentarían una afectación potencial asociada al avance minero, debido a su proximidad al Tajo y a las áreas destinadas para el manejo de material (Depósito San Antonio y Depósito El Balsal), donde se concentran las principales variaciones del nivel piezométrico.

Año 2036

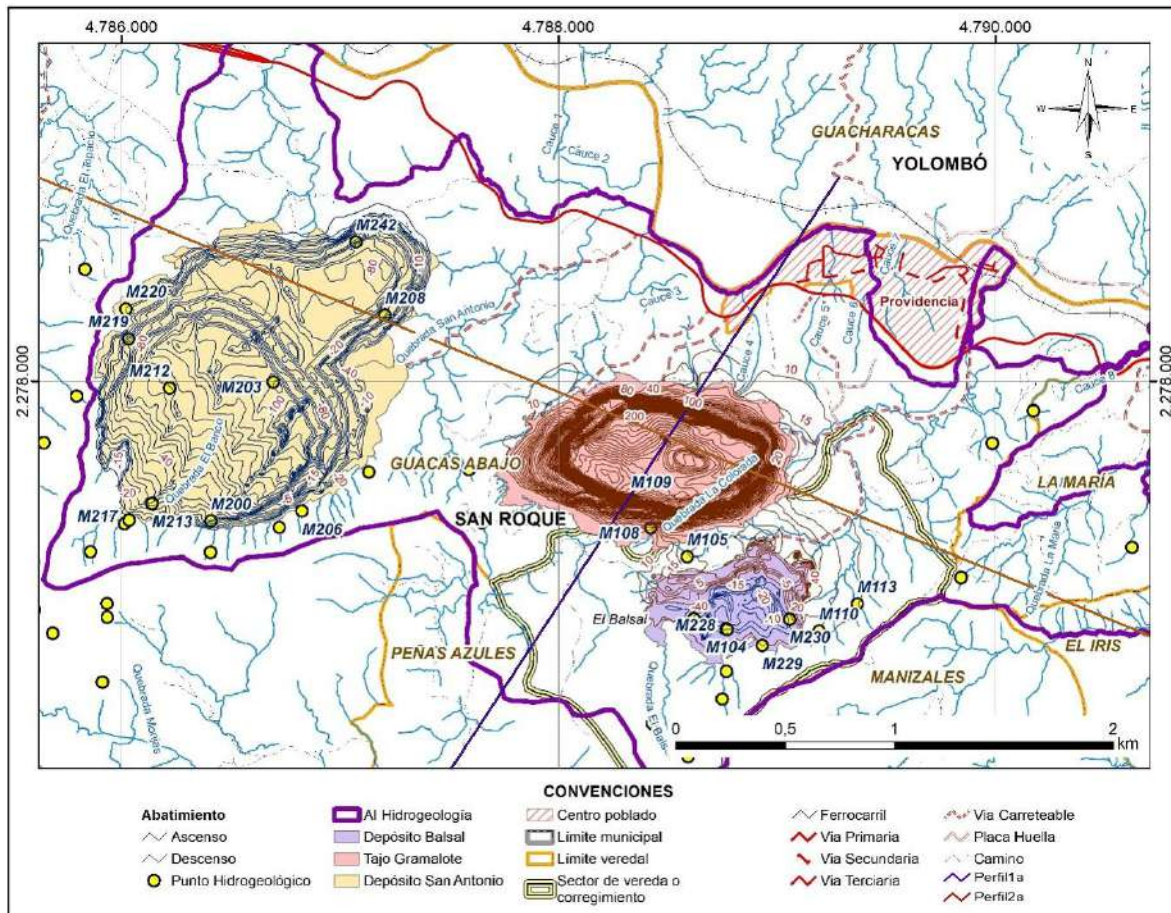


Figura 5.1.6.338 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2036 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

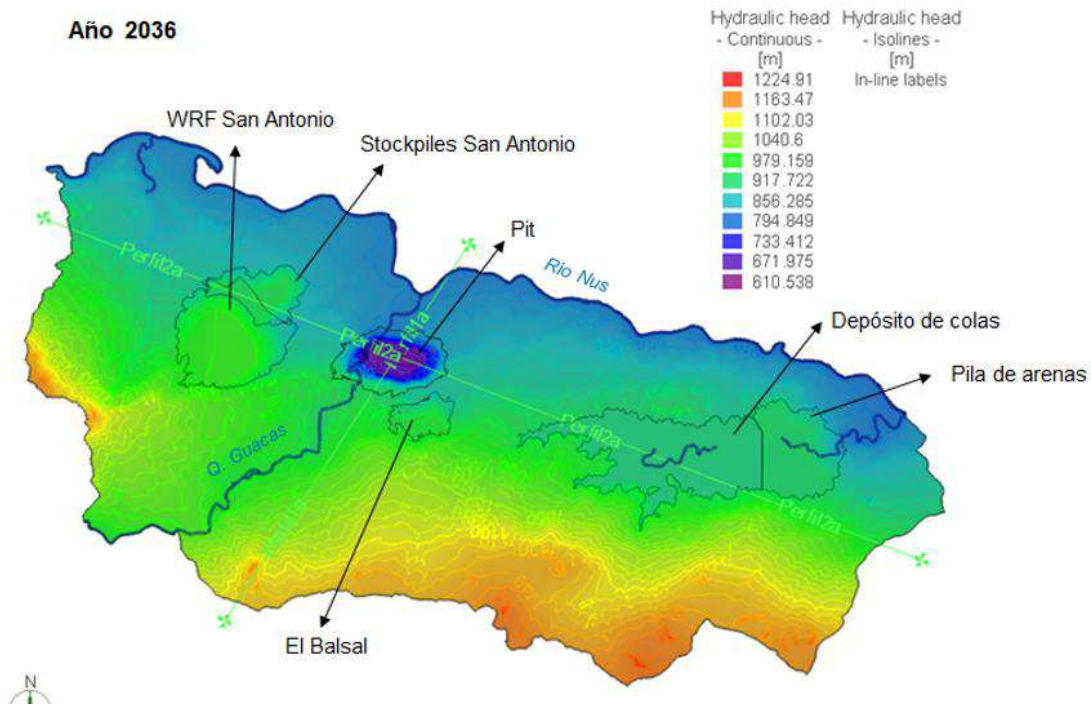


Figura 5.1.6.339 Superficie piezométrica simulada a 2036 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).

Fuente: (SHI SAS, 2026)

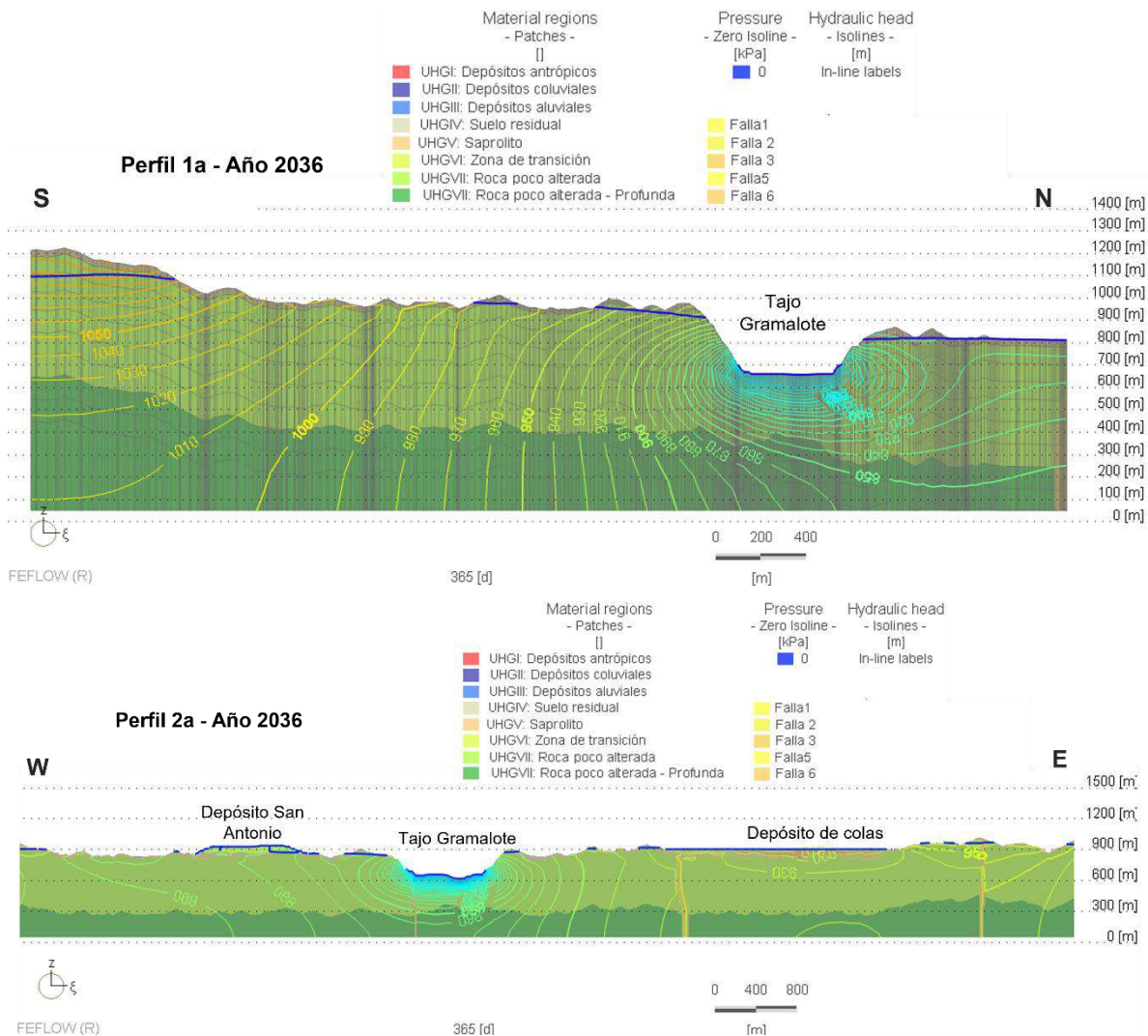


Figura 5.1.6.340 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2036 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

De acuerdo con los resultados de la modelación numérica para el año 2036, los puntos M104, M105, M108, M109, M110, M113, M200, M203, M206, M208, M212, M213, M217, M219, M220, M228, M229, M230, M233 y M242 presentarían una afectación potencial asociada al avance minero, debido a su proximidad al Tajo y a las áreas destinadas para el manejo de material (Depósito San Antonio y Depósito El Balsal), donde se concentran las principales variaciones del nivel piezométrico.

Año 2037

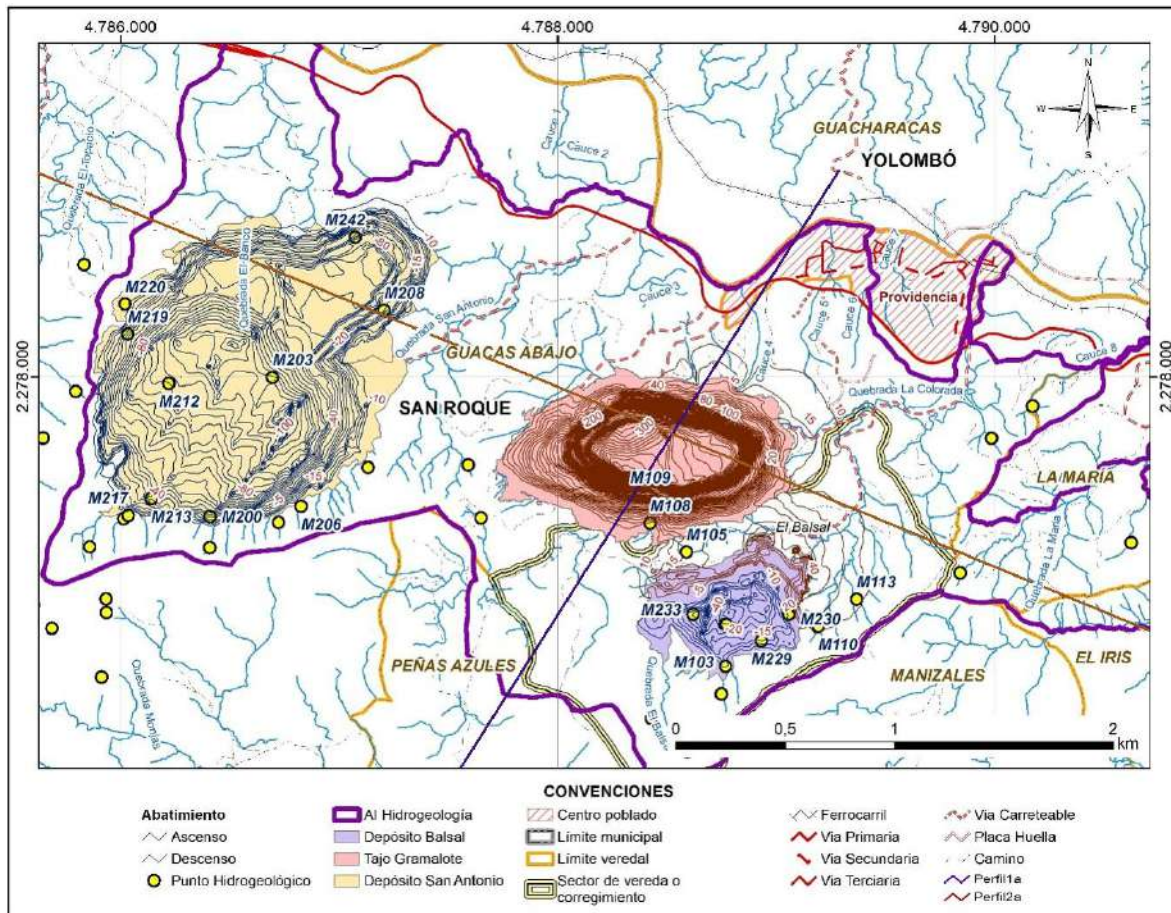


Figura 5.1.6.341 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2037 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

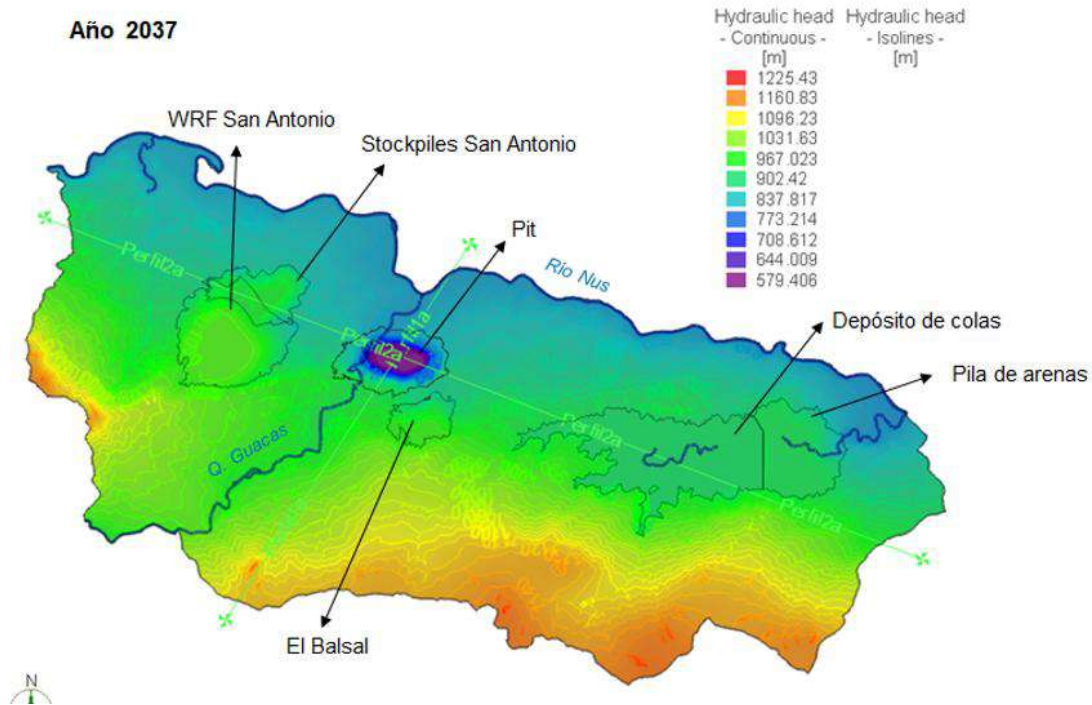


Figura 5.1.6.342 Superficie piezométrica simulada a 2037 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).

Fuente: (SHI SAS, 2026)

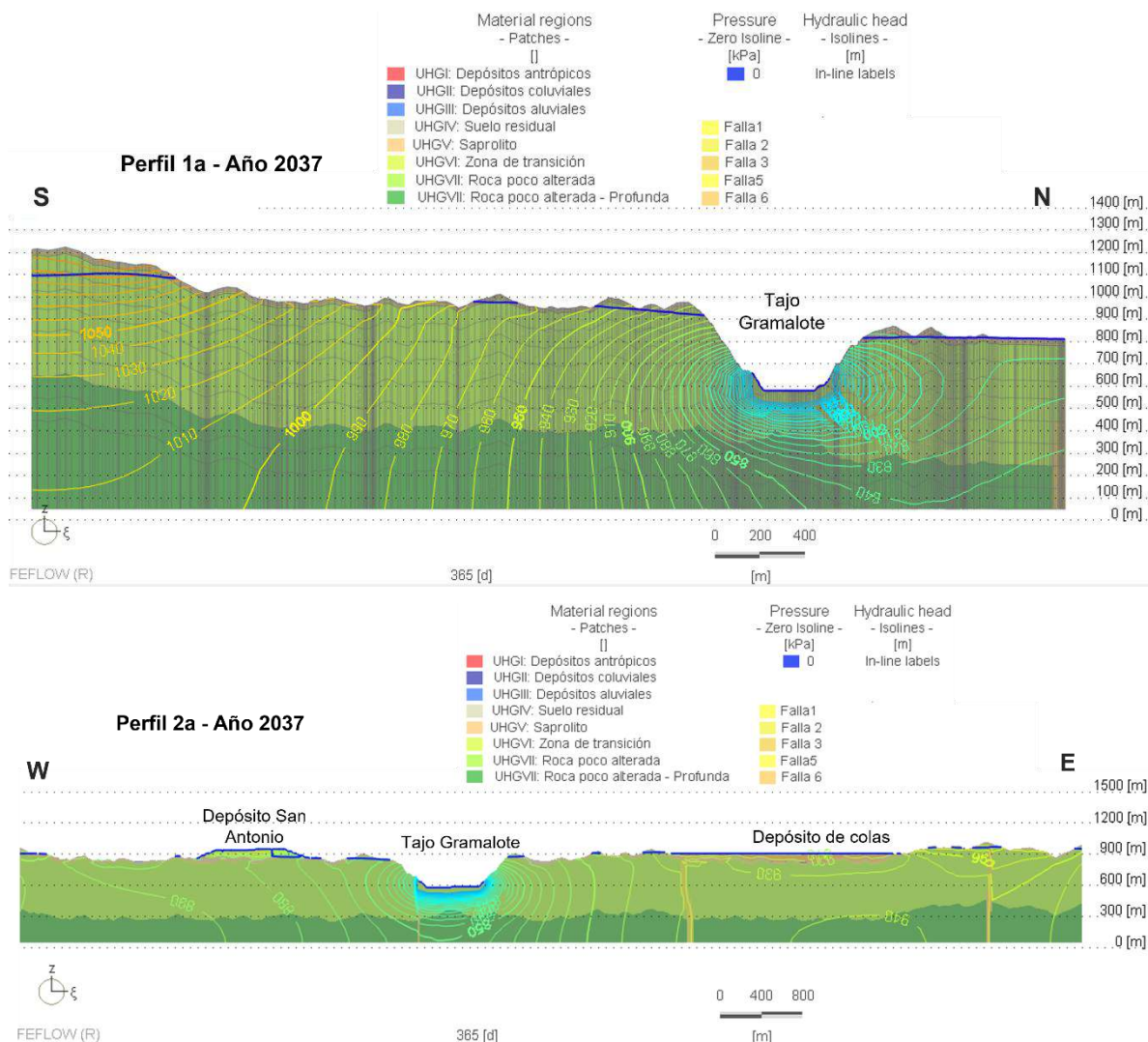


Figura 5.1.6.343 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2037 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

De acuerdo con los resultados de la modelación numérica para el año 2037, los puntos M103, M104, M105, M108, M109, M110, M113, M200, M203, M206, M208, M212, M213, M217, M219, M220, M228, M229, M230, M233 y M242 presentarían una afectación potencial asociada al avance minero, debido a su proximidad al Tajo y a las áreas destinadas para el manejo de material (Depósito San Antonio y Depósito El Balsal), donde se concentran las principales variaciones del nivel piezométrico.

Año 2038

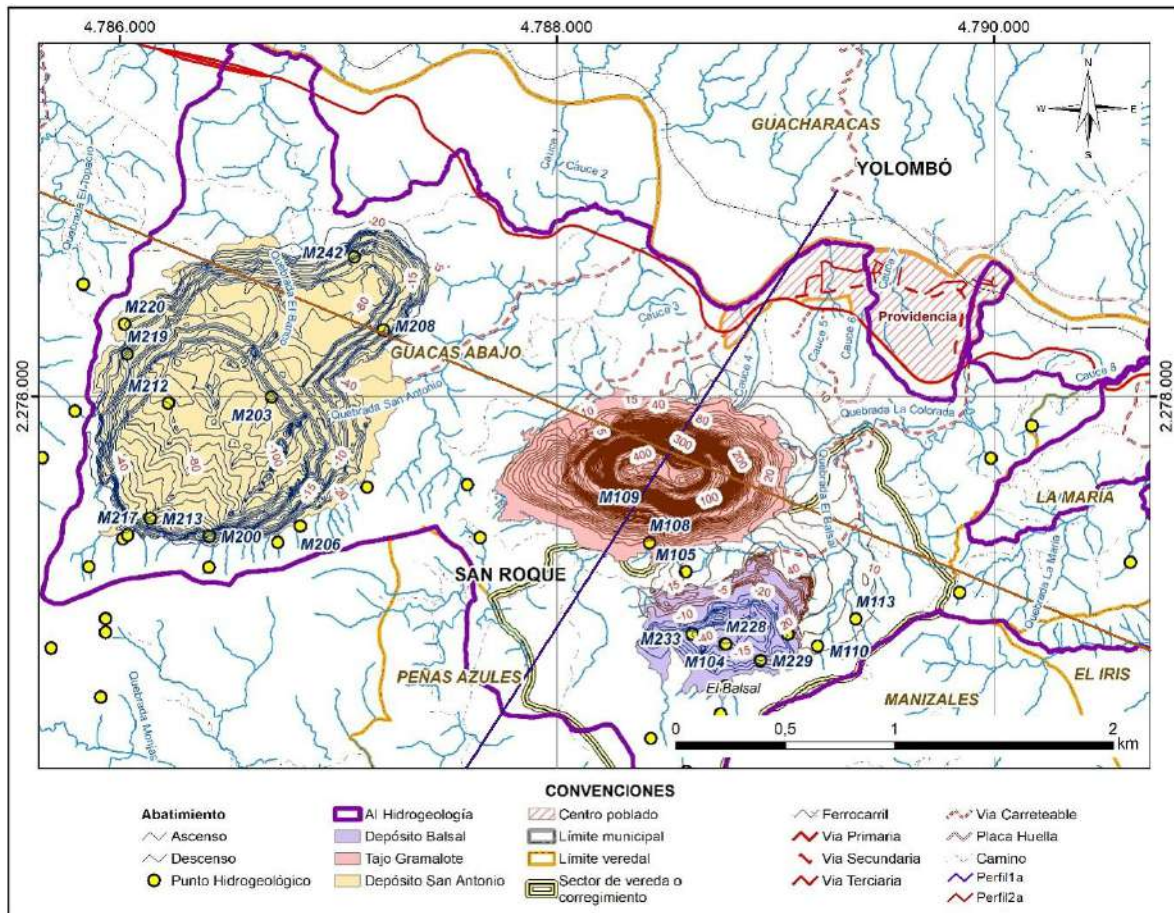


Figura 5.1.6.344 Variaciones en el nivel piezométrico en planta (ascensos y descensos) para el año 2038 y puntos hidrogeológicos potencialmente afectados.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

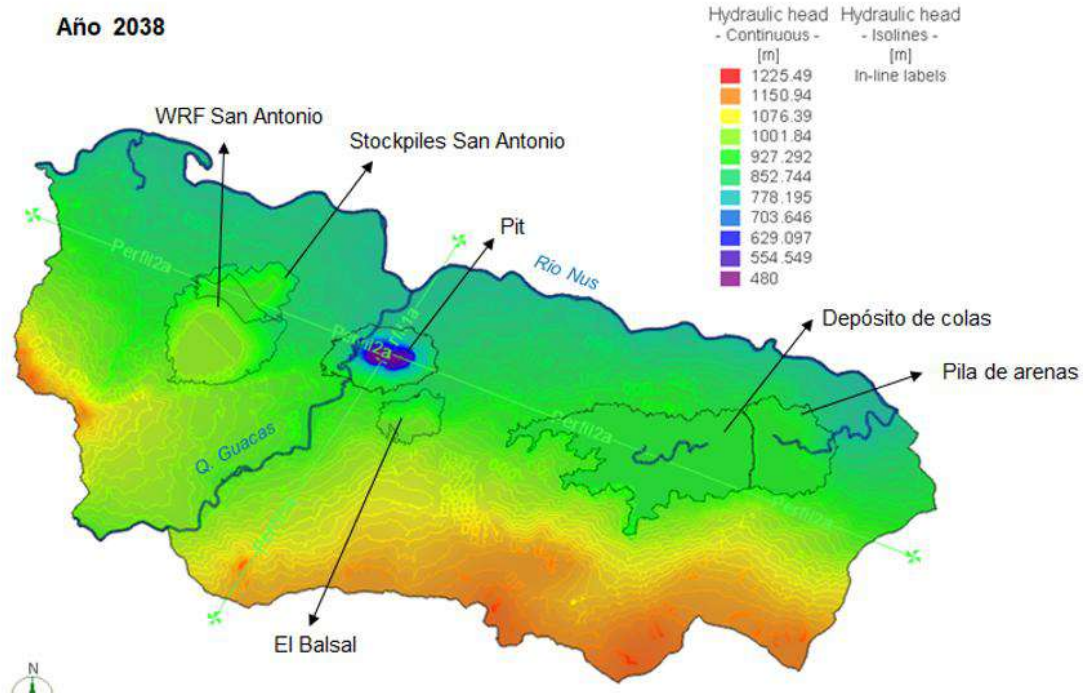


Figura 5.1.6.345 Superficie piezométrica simulada a 2038 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Tajo (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales).

Fuente: (SHI SAS, 2026)

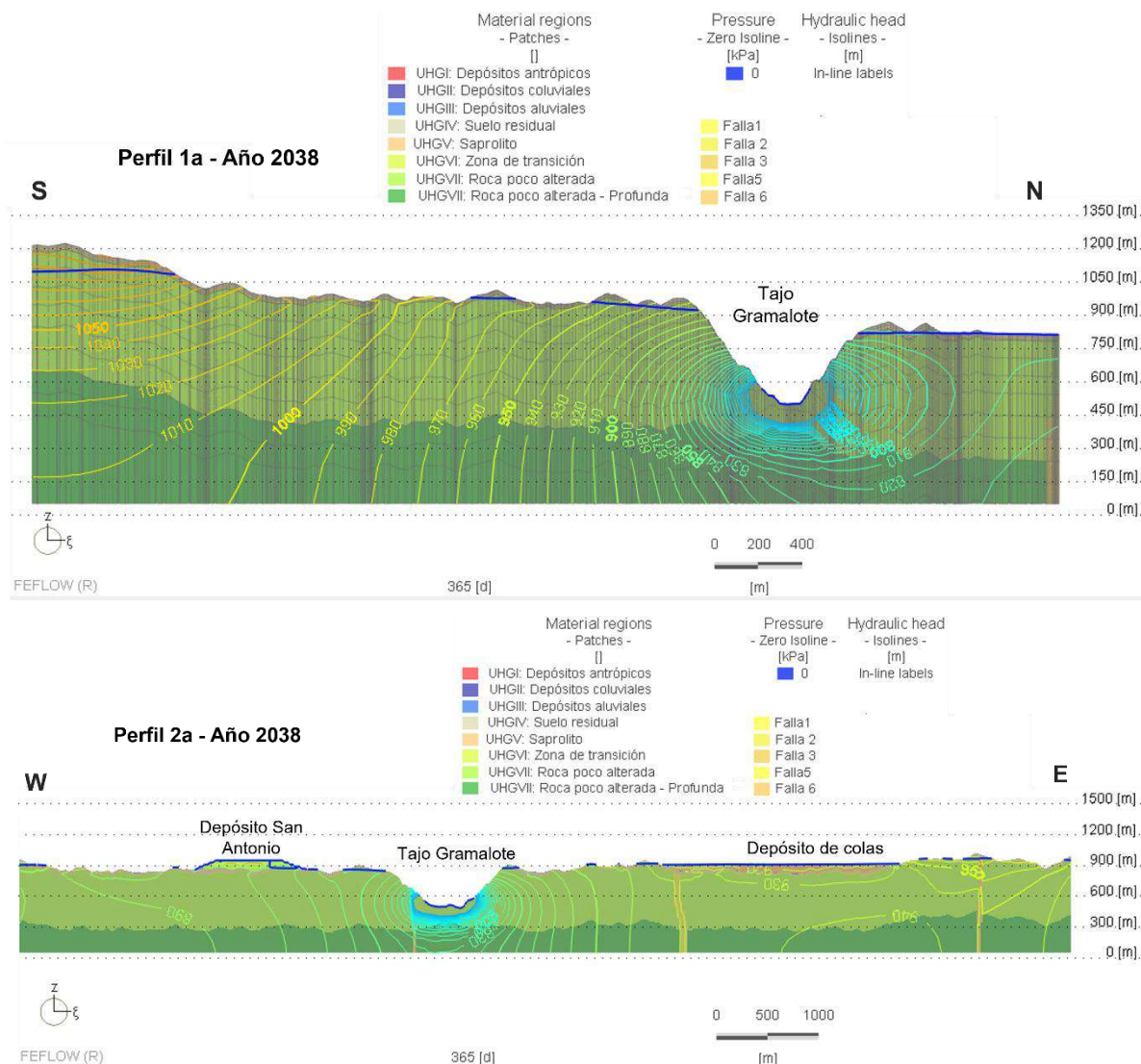


Figura 5.1.6.346 Perfiles hidrogeológicos denotando el cono de abatimiento alrededor del tajo Gramalote proyectado para el año 2038 (línea azul: posición del nivel freático) y la piezometría general resultante.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

De acuerdo con los resultados de la modelación numérica para el año 2038, los puntos M104, M105, M108, M109, M110, M113, M200, M203, M206, M208, M212, M213, M217, M219, M220, M228, M229, M230, M233 y M242 presentarían una afectación potencial asociada al avance minero, debido a su proximidad al Tajo y a las áreas destinadas para el manejo de material (Depósito San Antonio y Depósito El Balsal), donde se concentran las principales variaciones del nivel piezométrico.

Finalmente, en la Figura 5.1.6.347 se muestra el resultado de la piezometría simulada después de implementar el plan de cierre y post-cierre por 7.5 años (simulados con pasos de tiempo adaptativo), donde se evidencia claramente la restauración de diversas tendencias generales de flujo, especialmente en el sector El Balsal, aguas abajo del depósito de relaves y en el sector San Antonio, mientras que en el sector aledaño al Tajo los descensos se reducen notoriamente (aun 31% de descenso marginal cerca de los taludes sur del tajo) y el nivel piezométrico queda controlado por el espejo de agua resultante del llenado del Tajo hasta la cota 815 m.s.n.m.

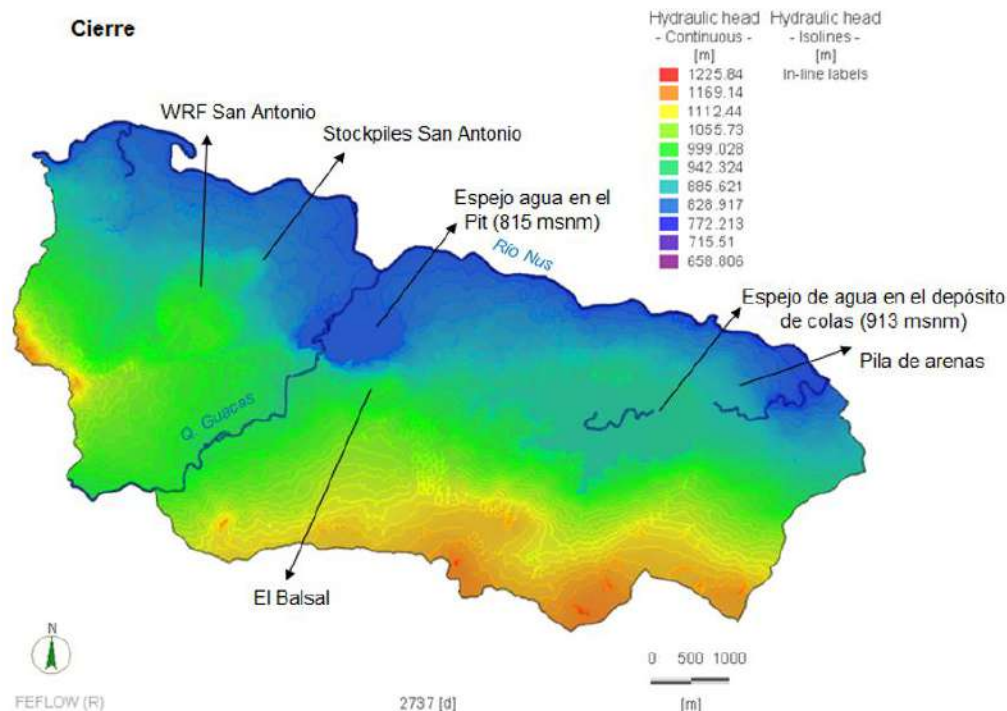


Figura 5.1.6.347 Piezometría simulada después del periodo de cierre y pos-cierre.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

En la Tabla 5.1.6.125, la Tabla 5.1.6.126 y de la Figura 5.1.6.348 a la Figura 5.1.6.352 se resumen los caudales de descarga hacia las obras subterráneas, tales como el tajo, los túneles de decantación y desviación y los caudales potenciales de filtración hacia los diferentes depósitos mientras que en la Figura 5.1.6.353 y la Figura 5.1.6.354 se presentan los caudales potenciales de filtración desde los diferentes depósitos, siendo estos últimos los máximos posibles bajo condiciones constantes de saturación total a partir del año 3, por lo que estos deben tomarse solo como valores indicativos. Los flujos potenciales de ingreso desde las UHG hacia los depósitos representan condiciones de acomodación local del nivel piezométrico en búsqueda entre otras de un balance de masas, producto de los cambios en presiones hidrostáticas y cambios en los flujos de recarga.

Tabla 5.1.6.125 Caudales proyectados de ingreso hacia las obras mineras proyectadas e incorporadas dentro del modelo numérico de flujo subterráneo

Año	Tajo Gramalote	Túnel de decantación	Túnel desviación	Depósito San Antonio	Depósito El Balsal	Depósito de relaves	Presa de arenas
2029	135.29	3.8838	0.44937	341.001	148.85	119.14	193.02
2030	229.48	2.3976	0.24387	223.244	105.38	99.271	13.767
2031	220.97	2.4235	0.233729	171.262	105.73	216.9	40.482
2032	280.54	2.46	0.22246	131.583	82.436	249.71	47.107
2033	267.9	2.4982	0.21567	116.202	87.478	293.62	53.229
2034	272.15	2.53	0.20836	124.014	82.496	251.91	58.464
2035	348.43	2.5638	0.20047	134.638	77.495	278.02	63.563
2036	350.25	2.5933	0.19881	149.459	76.84	346.46	68.205
2037	345.62	2.6212	0.20028	139.144	80.112	370.14	72.147
2038	357.1	2.6476	0.20115	172.262	80.541	432.52	73.878

Fuente: (SHI SAS, 2026)

Tabla 5.1.6.126 Caudales proyectados de infiltración desde las obras mineras proyectadas e incorporadas dentro del modelo numérico de flujo subterráneo

Año	Caudales de infiltración desde las obras propuestas (l/s)			
	Depósito San Antonio	Depósito El Balsal	Depósito de relaves	Presa de arenas
2029	0	0	0	0
2030	0	0	0	0
2031	34.554	28.563	59.68	436.67
2032	54.794	31.938	30.356	387.97
2033	78.961	26.618	28.376	346.97
2034	113.56	25.829	30.659	322.75
2035	131.59	22.732	26.433	298.27
2036	152.7	25.948	27.07	280.44
2037	146.1	42.284	25.206	262.47
2038	161.29	40.614	37.591	232.66

Fuente: (SHI SAS, 2026)

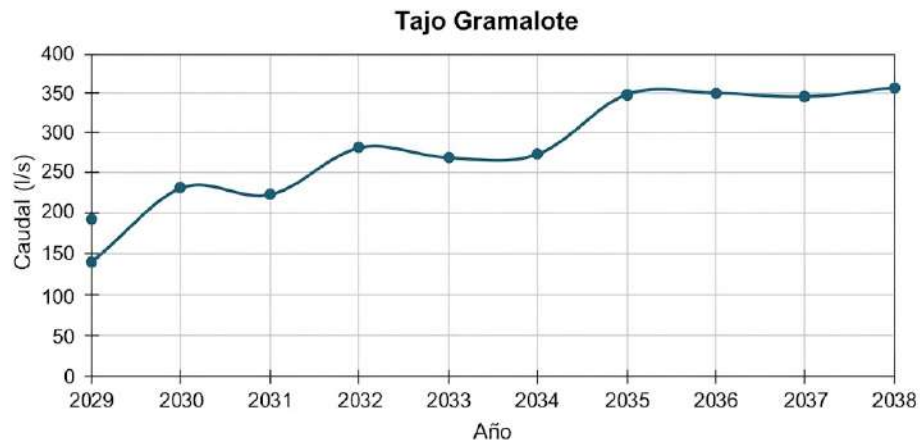


Figura 5.1.6.348 Caudales de descarga hacia el Tajo Gramalote durante los años de operación de la obra de acuerdo con el avance minero del PTO

Fuente: (SHI SAS, 2026)

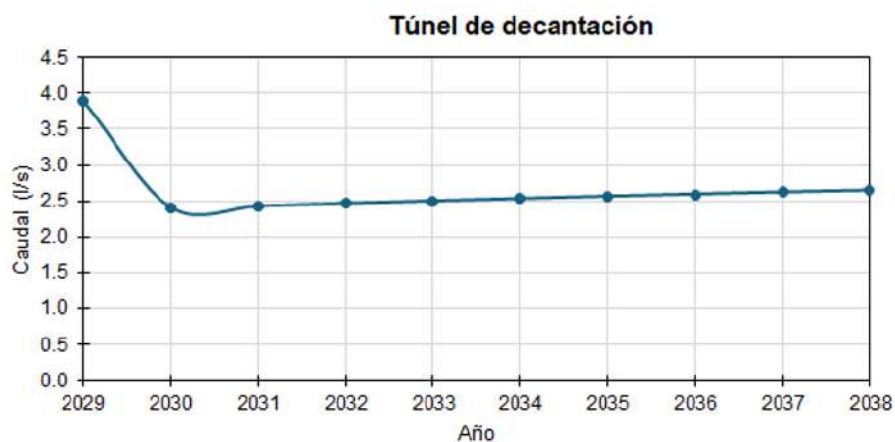


Figura 5.1.6.349 Caudales de descarga hacia el túnel de decantación durante los años de operación del proyecto

Fuente: (SHI SAS, 2026)

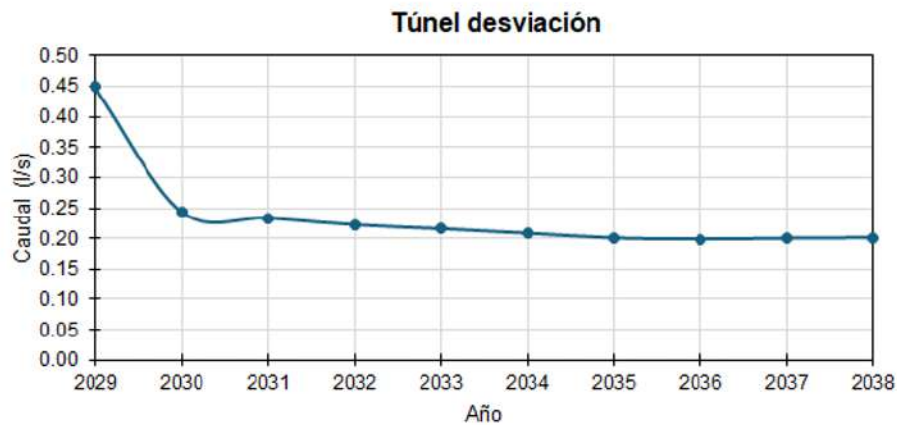


Figura 5.1.6.350 Caudales de descarga hacia el túnel de desviación durante los años de operación del proyecto

Fuente: (SHI SAS, 2026)

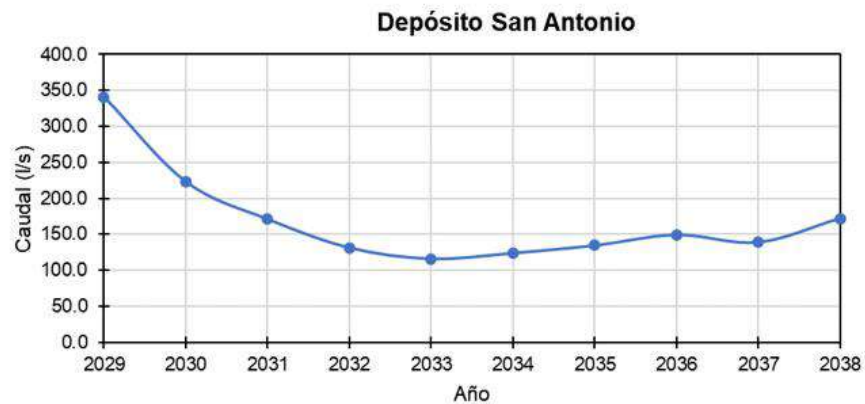
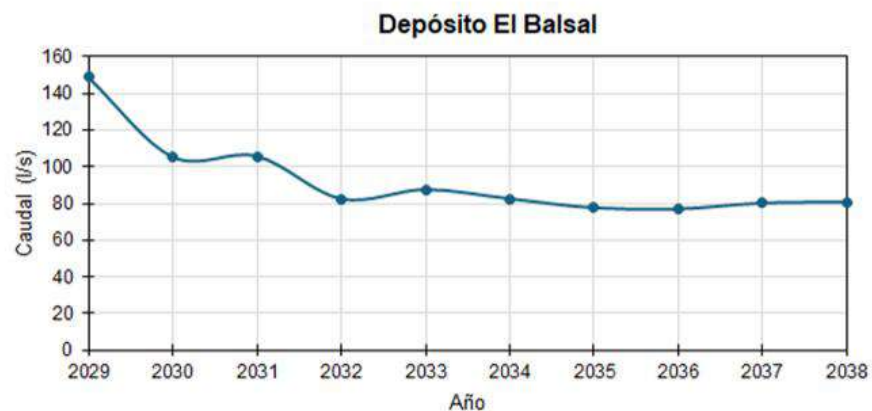


Figura 5.1.6.351 Caudales potenciales de filtración hacia el depósito San Antonio y El Balsal de acuerdo con los avances proyectados del PTO

Fuente: (SHI SAS, 2026)

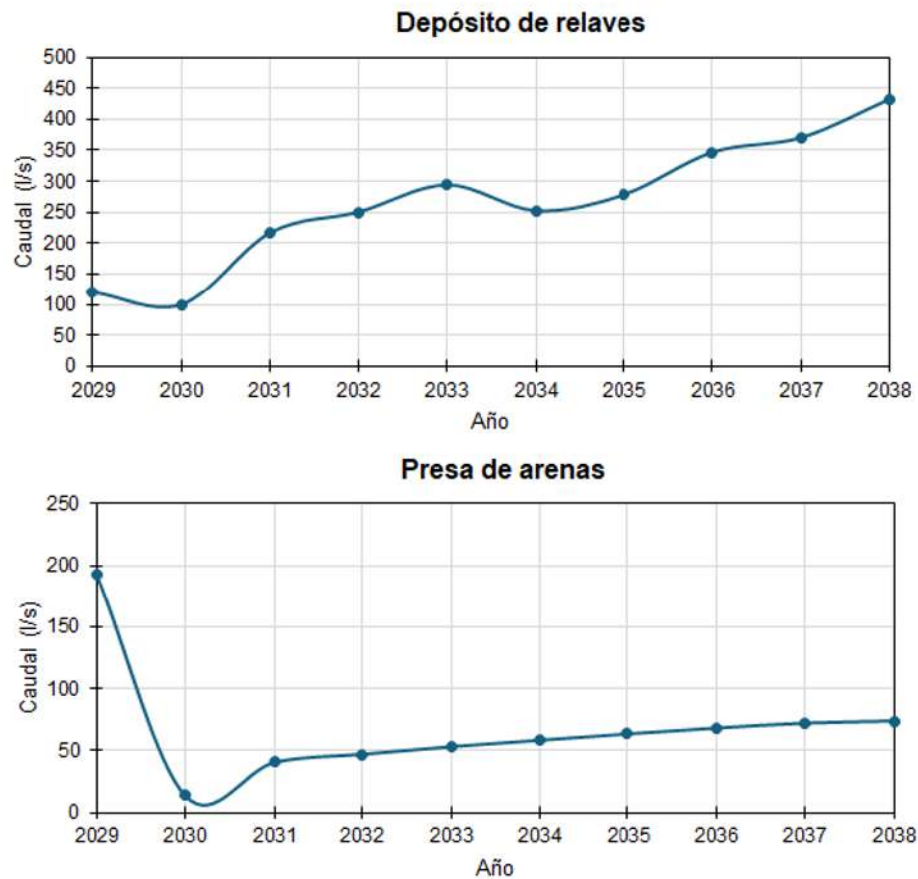


Figura 5.1.6.352 Caudales potenciales de filtración hacia las obras de la zona de manejo de colas de acuerdo con los avances proyectados del PTO.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

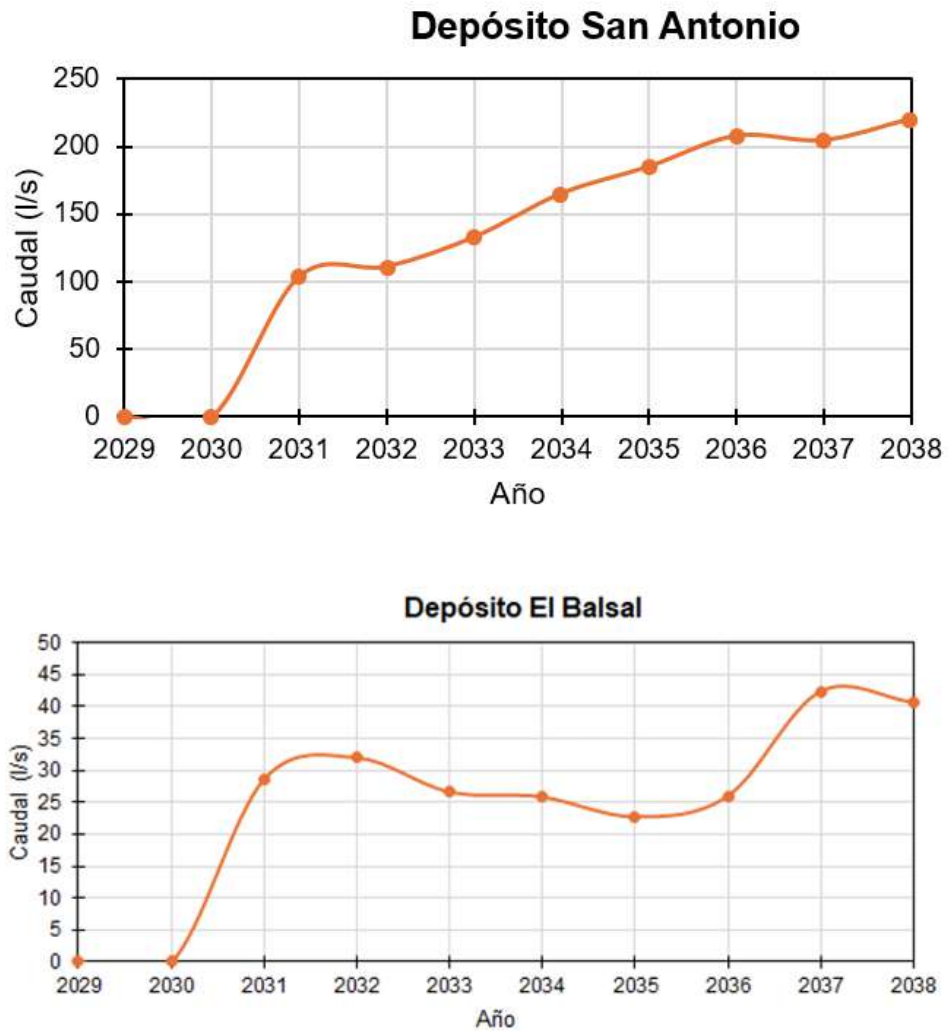


Figura 5.1.6.353 Caudales potenciales de filtración desde el depósito San Antonio y El Balsal de acuerdo con los avances proyectados del PTO.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

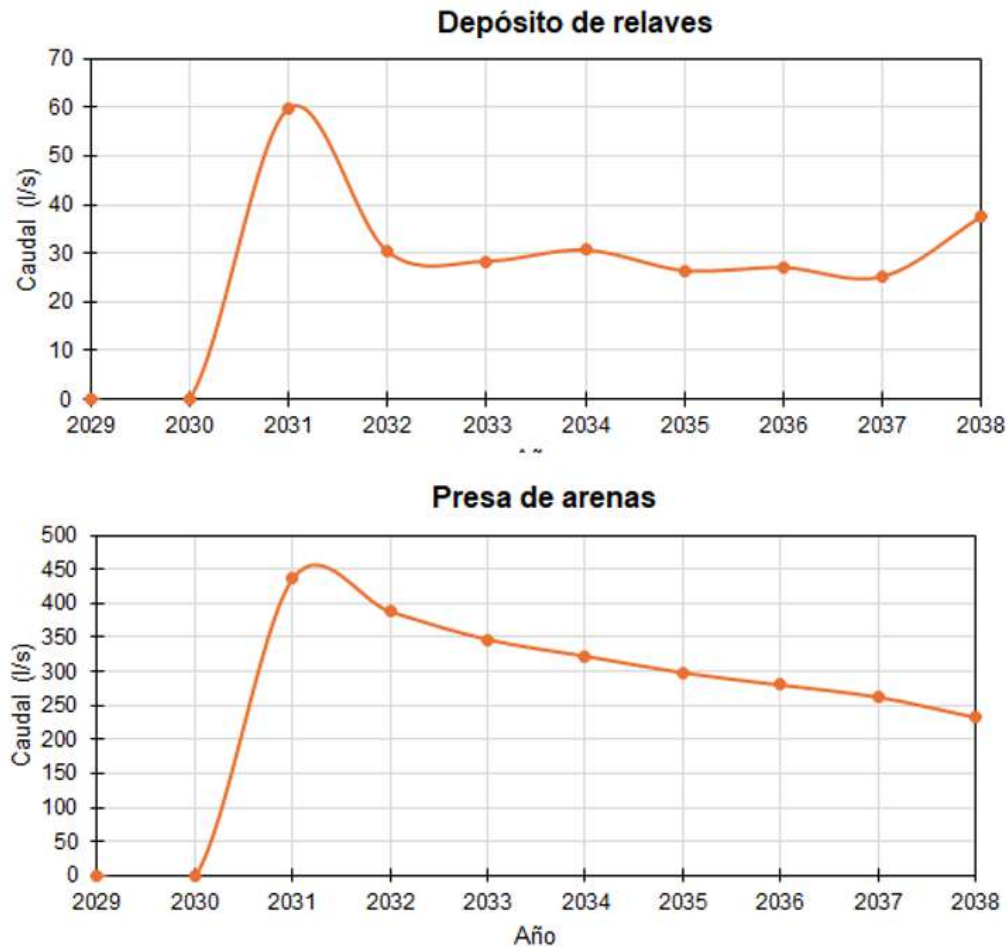


Figura 5.1.6.354 Caudales potenciales de filtración desde las obras de la zona de manejo de colas de acuerdo con los avances proyectados del PTO.

Fuente: (SHI SAS, 2026)

En relación con la quebrada Guacas, teniendo en cuenta la obra de desviación proyectada y la extensión tanto de las obras asociadas al Tajo como del cono de descensos máximos resultantes en la capa 1 (capa conectada con las corrientes superficiales), se obtiene la superposición de dichas áreas con la cuenca natural de la quebrada Guacas, para estimar los potenciales impactos sobre los flujos superficiales y subterráneos de la cuenca. En la Tabla 5.1.6.127 se obtienen los parámetros considerados y los resultados a nivel de áreas y flujos. Se aclara que la partición entre flujo superficial y subterráneo se ha obtenido mediante el índice de Flujo Base (IFB) estimado a partir de la serie diaria de caudales de la estación Caramanta del río Nus, considerando que el río Nus y sus afluentes (incluyendo la quebrada Guacas) mantienen constante esta relación hidrológica. El IFB se ha estimado mediante análisis gráfico y como el equivalente al caudal mínimo recurrente, es decir al asociado al periodo de retorno de 2,33 años siguiendo una función de distribución de probabilidad Gumbel (ver capítulo de Hidrología). Los flujos se han estimado aplicando

balance hídrico de largo plazo de acuerdo con el capítulo de Hidrología y las áreas aquí estimadas (Tabla 32).

Tabla 5.1.6.127 Variables y parámetros del análisis de afectación en la quebrada Guacas

Variable o parámetro (unidad)	Valor
Área cuenca (km ²)	64,13
Caudal medio (m ³ /s)	5,163
Índice de Flujo Base (IFB)	39%
Caudal superficial promedio (l/s)	3,140
Caudal subterráneo promedio (l/s)	2,023
Área de la cuenca dentro de la zona de modelación (km ²)	7,04
Área remanente sustrayendo el área del Tajo (Km ²)	6,61
Área remanente sustrayendo el área descensos (km ²)	6,59
Diferencia de área por flujos superficiales (km ²)	0,43
Diferencia de área por flujos subterráneos (km ²)	0,45
% de cambio de áreas de flujos superficiales	0,68%
% de cambio de áreas de flujos subterráneos	0,70%
Reducción De flujos superficiales (m ³ /s)	0,017
Reducción de flujos subterráneos (m ³ /s)	0,011
% de cambio de flujos superficiales	0,54%
% de cambio de flujos subterráneos	0,56%

Fuente: SHI S.A.S., (2025)

Se concluye que a nivel de flujos superficiales la cuenca de la quebrada Guacas podría tener una potencial pérdida de 17 l/s para la situación más crítica del desarrollo del proyecto (efecto acumulado del desarrollo de las obras del Tajo), lo que represente un 0.54% de reducción del caudal superficial promedio de dicha quebrada hasta su descarga en el río Nus, a nivel de flujos subterráneos la cuenca de la quebrada Guacas podría tener una potencial pérdida de 11 l/s para la misma situación ya expuesta, representando un 0.56% de reducción del caudal subterráneo (flujo base) de dicha quebrada hasta su descarga en el río Nus.

Es importante mencionar que, dado que el traslado del cauce de la quebrada Guacas se daría hacia la quebrada San Antonio, el área aportante de dicha quebrada suple la totalidad de los caudales de reducción en el componente superficial, y en el componente subterráneo también puede suplirlo en función del nivel de revestimiento del canal (que varía según el tipo de sección y tramo del canal por condiciones constructivas y morfométricas fluviales de acuerdo con el PTO).

5.1.6.6.9 Análisis de sensibilidad

El modelo numérico de flujo subterráneo ha sido evaluado bajo diferentes configuraciones de parámetros, lo cual ha permitido obtener el conjunto de parámetros más representativos que se ajuste al Modelo Hidrogeológico Conceptual, a las descripciones de las obras del PTO y que genere estabilidad numérica y valores consistentes. En la Tabla 5.1.6.20 se resume un conjunto de variaciones realizadas a los parámetros más significativos del

modelo, teniendo por variable de evaluación principal el caudal, ya sea de ingreso a obras subterráneas como el Tajo y el túnel, así como de filtración desde las obras superficiales. Las variaciones se realizaron en los años extremos del PTO, es decir en el año inicial (2029) y en el año final (2038)

Tabla 5.1.6.128 Síntesis de la variación de parámetros y los resultados de la sensibilidad de las variables frente a dichos parámetros

Parámetro	Rango de variación del parámetro		Variable de evaluación	Rango de variación de la variable de evaluación		Observación
	Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo	
Conductancia del túnel (1/d)	0,001	0,05	Caudal de ingreso al túnel (l/s)	4,96	109,4	cuatro simulaciones, dos intermedias
Conductancia de salida las paredes del Tajo (1/d)	2	50	Caudal de ingreso al Tajo año 2038 (l/s)	199,5	500	Tres simulaciones, una intermedia
Conductividad hidráulica de las capas más profundas (m/d)	0,00023	0,0023	Estabilidad numérica y convergencia	Inestabilidad y no convergencia	Convergencia y resultados coherentes	cuatro simulaciones, dos intermedias, solo en la máxima se genera convergencia
Conductancia de entrada en las paredes del Tajo (1/d)	0,0001	0,1	Estabilidad numérica y convergencia	Inestabilidad y no convergencia	Convergencia y resultados coherentes	Conceptualmente debería ser cero, pero numéricamente no resulta válido para convergencia
Conductividad hidráulica de los depósitos superficiales (m/d)	0,02	0,475	Caudales potenciales de filtración año 2029 (l/s)	68	534	cuatro simulaciones, dos intermedias

Fuente: (SHI SAS, 2026)

BIBLIOGRAFIA

- Agencia Internacional de Energía Atómica. (1981). *Statistical Treatment of Enviromental Isotope Data in Precipitation*. Austria: Technical Reports Series No. 206.
- Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW). (2010). *Guia Para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros*. Eugene.
- Álvarez-Villa, O. D. (2017). *MODELOS DE USO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS*. Unidad 6: Modelos de párametros distribuidos. Medellín , Colombia.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. (2023). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (24^a ed.). Washintong, DC: American Public Health Association.
- Anderson, M. P., & Woessner, W. W. (1991). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport* (Primera ed.). Academic Press.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport* (Segunda ed.). London: Elsevier.
- ANLA. (2016). *Terminos de referencia para la elaboración de estudio de impacto Ambiental. Proyectos de explotacion Minera*.
- ANLA. (2016). *Términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA Proyectos de Explotación Minera* . Bogotá.
- Barrera de Calderón , M. L. (2010). *Caracterización Hidrogeoquímica e Isotópica de Áreas de Recarga en el Acuífero de San Salvador*.
- Chica. (2012). *Elaboración del Modelo Estructural para un área de 59 Km2 localizados en las zonas de Influencia Directa e Indirecta del Proyecto Gramalote, localizado en el municipio San Roque, Antioquia, Colombia*.
- Chica. (2012). *Elaboración del modelo estructural para un área de 59 km2 localizados en las zonas de influencia directa e indirecta proyecto gramalote, localizado en el municipio san roque, Antioquia, Colombia*.
- Chica, A. (1979). *Aspectos mecánicos e hidráulicos de las rocas*. Medellín: Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill International editions.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1975). *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Editorial Omega, 2 vol.

- DHI. (2025). Training Manual FEFLOW 10.0: Groundwater modeling with Feflow 10.0.
- Diersch, H. (2014). *Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Berlin: Springer .
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1997). *Physical and Chemical Hydrogeology* (Segunda edición ed.). John Wiley E Sons, Inc.
- Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology*. . Prentice Hall.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Utilities, Municipal Authorities, and Environment Agencies*. Banco Mundial.
- Freeze Cherry. (1979). *Aguas subterráneas*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, vol. 7632, 604.
- Geodrill. (2025). *Ensayos Lugeon y Fefranc proyecto Gramalote*.
- Golder. (2013). *TMF Three-Dimensional Hydrogeology Modeling (Feflow)*.
- Golder. (2013). *TMF Three-Dimensional Hydrogeology Modeling (Feflow)*.
- Golder. (2020). *Memorando tecnico de caracterizacion geoquimicay potencial generacion de drenaje acido. Proyecto Gramalote*.
- Golder. (2020). *Memorando Tecnico N° de Referencia 20-06-01_20146474. REQUERIMIENTO LICENCIA - POTENCIAL DE GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO, PROYECTO GRAMALOTE, COLOMBIA*.
- Golder Associates. (2017). *EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA - DOCUMENTO TÉCNICO. Informe 1797151179_4300-2_087_TR_0*.
- Golder Associates Colombia S.A.S. (2017). *Gramalote FEED: Evaluación hidrogeológica – Documento técnico*. Bogotá: Gramalote Colombia Limited.
- Golder Associates Perú S.A. (2013). *TMF Dam Design Analyses Report*.
- Golder Associates Perú S.A. (2020). *Hydrogeological conceptual model - Gramalote feasibility stage*. Lima.
- Golder Associates Perú S.A. (2020). *Hydrogeological conceptual model - Gramalote feasibility stage*.
- Golder Associates Perú S.A. (2021). *Hydrogeological Numerical Model - Gramalote Feasibility Stage*.
- Gonfiantini, R., & Araguas, L. (1988). *Los Isótopos Ambientales en el Estudio de la Intrusión Marina*. Organismo Internacional de Energía Atómica, Granada.
- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

- González I, H. (2001). *Memoria Explicativa del Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000*. INGEOMINAS, Antioquia, Medellín.
- Gramalote. (2016). *San Antonio Plant Location – Geotechnical-Hydrogeological Characterization Factual Report*.
- Gramalote Colombia Limited. (2015). *Estudio de impacto ambiental proyecto minero Gramalote*.
- Gramalote Colombia Limited. (2018). *Modificación de Estudio de Impacto Ambiental para el proyecto de minería de oro a cielo abierto denominado "Gramalote"*. Medellín.
- Gramalote Colombia Limited. (n.d.). *Documento técnico con estándar. Tomo I. Estimación de recursos minerales. Título Minero T1429211*.
- Hidrogeocol. (2012). *Estudio Hidrogeológico Para la Línea Base del Proyecto Gramalote, en el Municipio de San Roque-Departamento de Antioquia. Informe Técnico de Prefactibilidad. Bogotá, July 2012*.
- Hidrogeocol. (2012). *Estudio Hidrogeológico para la Línea Base Del Proyecto Gramalote*.
- IAEA/WWO. (2024). *Global Network of Isotopes in Precipitation*. Retrieved from The GNIP Database: <https://nucleus.iaea.org/wiser>
- ICONTEC. (2014). *Guía Técnica Colombiana GTC-ISO 30 -Términos y definiciones usados en relación con los materiales de referencia* . Bogotá.
- IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA*. Bogotá, D.C.
- IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 386 p.
- Ideam, Invermar. (2021). *Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua*. Bogotá, D.C.
- INAP. (2014). *Global acid rock drainage guide GARD Guide*.
- Instituto Geológico y Minero de España. (1997). *Guía operativa para la recogida, almacenamiento y transporte de muestras de aguas subterráneas destinadas al análisis químico y bacteriológico*. .
- Integral S.A. (2018). *Respuesta de requerimientos de información adicional Modificación de licencia ambiental - I-0010208-GA_Resp_Autos_R00*.
- INTEGRAL S.A. (2025). *Modificación de licencia ambiental del proyecto de minería de oro a cielo abierto Gramalote*.
- Inteinsa. (2025). *Ensayos geofísicos de refracción sísmica y MASW Zona Planta - Gramalote*.

- International Atomic Energy Agency. (2001). Hidrología a Base de Isótopos Ambientales.
- Intgral S.A. (2018). *Modificación de Licencia Ambiental. I-0010208-GA-ML-R00*.
- Kamb, W. (1959). Ice petrofabric observations from Blue Glacier, Washington, in relation to theory and experiment. *Journal of Geophysical Research*.
- Kennessey, B. (1930). *Lefolyasi tényezok és retencik. Vizugy, Kuziemények*.
- Knight Piésold. (2013). *Tailings Management Facility (TMF) / Waste Rock Facility (WRF) Front-end Engineering Design (FEED) Hydrogeology Evaluation Report*.
- Lenderer, F. W. (2020). Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance. *Geophysical Research Letters*.
- Londoño Aguirre, R. D. (2015). *Definición de un Volumen Elemental de Referencia y Estimación de un Modelo de Conductividades Hidráulicas Equivalentes para un Sistema Acuífero en un Medio Fracturado*. Medellín: Tesis de Maestría - Universidad Nacional de Colombia.
- Lozano Hernández, B. L., Marín Celestino, A. E., Martínez Cruz, D. A., & Ramos Leal, A. J. (2024). A Systematic Review of the Current State of Numerical Groundwater Modeling in American Countries: Challenges and Future Research. *Hydrology*, 11(179), 1-18.
- MADS. (2014). *Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Martonne, E. (1926). *Aréisme et Indice d'aridité. Paris: Comptes Rendus de L'Academy of Science*.
- MEND. (2009). *Report, Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geological Material MEND*.
- Microlab Industrial. (2017, Septiembre 28). Retrieved from <https://www.microlabindustrial.com/blog/orp-el-otro-potencial-en-el-agua>
- Morales, J. (2021). *Geología estructural para hidrogeología: Notas de Clase Maestría en Ciencias de la Tierra*. Medellín: Universidad EAFIT.
- pHase Geochemistry. (2013). *Caracterización geoquímica Proyecto Gramalote*.
- pHase Geochemistry Inc. (2013). *Geochemical Characterization, Gramalote Project*.
- Price. (1997). *Guidelines and recommends methods for the prediction of metal leaching and acid rock drainage at mine sites in British Columbia*.
- Ribera, F. (2016). Salinidad y aguas subterráneas. *ResearchGate*.

- Romero. (2014). *Caracterización de la heterogeneidad y anisotropía de un medio fracturado y sus implicaciones hidrogeológicas usando prospección geoeléctrica e información RQD*. Medellín.
- S.C.S. (1964). *Hydrology, National Engineering Handbook*. Washington D.C.: Soil Conservation Service, U.S.D.A.
- Sceci, L. &. (2007). *Roughness control on hydraulic conductivity in fractured rocks*. New York: Hydrogeology Journal.
- SGC. (2015). *Memoria explicativa del mapa de geomorfología para movimientos en masa de la plancha 132 Yolombó, departamento de Antioquia*. Bogotá.
- SHI. (2025). *REPORTE DEL DIAGNÓSTICO Y MONITOREO DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS PARA EL PROYECTO MINERO GRAMALOTE*.
- SHI S.A.S. (2025). *Reporte del diagnóstico y monitoreo de niveles piezométricos, Monitoreo de isótopos ambientales y muestreo hidroquímico para el Proyecto Minero Gramalote Colombia*.
- SHI SAS. (2026). *ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA EL PROYECTO MINERO GRAMALOTE*. Medellín: GRAMALOTE COLOMBIA LIMITED.
- Singhal & Gupta. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Springer.
- Snow, D. (1970). The frequency and apertures of fractures in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*.
- Tardi, A., & Vittorini, S. (1977). *Il calcolo del coefficiente di deflusso su basi fisiografiche*.
- Toth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geophys. Res.*, 68, 4795-4811.
- UNESCO - IAEA. (2001). *Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications*.
- Vargas, M. (2010). *Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*. Bogotá: Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Viceministerio de Ambiente, Grupo de Recurso Hídrico.
- Velez O., M. V., & Rhenals G., R. L. (2008). Determinación de la Recarga con Isótopos Ambientales en los Acuíferos de Santa Fe de Antioquia.
- Vélez, M. V. (2004). *Hidráulica de aguas subterráneas*. Medellín: Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
- WSP. (2025). *Actualización del estudio geoquímico, Proyecto Gramalote Proyecto N° 24725192-D-2100-HQ-MEM-00001-1-0*.

