



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL DISTRITO SIERRA
GORDA Y PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS DE LAS NAPAS
FREÁTICAS DE FAENA SIERRA GORDA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

EUGENIO EDUARDO ROJAS CONTRERAS

PROFESOR GUÍA:
DIRK RUTTGER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS
KATJA DECKART

SANTIAGO DE CHILE

2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: Geólogo
POR: Eugenio Eduardo Rojas Contreras
FECHA: 15/01/2021
PROFESOR GUÍA: Dirk Ruttger**

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL DISTRITO SIERRA GORDA Y PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS DE LAS NAPAS FREÁTICAS DE FAENA SIERRA GORDA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA

Este Trabajo de Título, gestionado por la empresa Ruco Fresena Consultores Ltda. (Ruco), tiene como propósito caracterizar las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda, basado en data hidrológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica existente, con énfasis en los procesos hidrogeoquímicos generados por afecciones asociadas al tranque de relaves y sector de piscinas de la faena Sierra Gorda.

El distrito minero en cuestión se ubica en el desierto de Atacama, II región de Antofagasta, norte de Chile, en los alrededores de la localidad de Sierra Gorda y lo componen las faenas mineras Sierra Gorda, Spence y Centinela. El clima se caracteriza por una aridez extrema y sin cauces de agua superficial. La recarga al acuífero ocurre principalmente por flujos subterráneos de aguas provenientes de precipitaciones en la Cordillera de Los Andes que se infiltran.

La base de datos de faena Sierra Gorda fue proporcionada por Ruco, con mediciones desde el 2008 hasta el 2020. Mientras que para las faenas Spence y Centinela, se genera una a partir de la recopilación de datos expuestos en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y de los informes entregados al Servicio Nacional de Fiscalización Ambiental (SNIFA) como parte del compromiso ambiental establecido en las respectivas Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA). Todas las bases de datos cuentan con mediciones de niveles freáticos y parámetros fisicoquímicos, tal como resultados de análisis de calidad de agua (cationes y aniones).

Los resultados de la caracterización hidrogeoquímica del distrito Sierra Gorda, evidencian un alza de sólidos totales disueltos a medida que el agua subterránea pasa de estar alojada en depósitos aluviales a una unidad de roca fracturada. Este cambio en el medio hospedante produce un estancamiento del acuífero, que se traduce en aumentos de cationes y aniones de hasta dos órdenes de magnitud de diferencia entre las aguas de las faenas.

Por otro lado, infiltraciones en faena Sierra Gorda, provenientes desde el depósito de relaves y sector de piscinas hacia el acuífero, generan alzas en el nivel de aguas que van desde 6 m hasta 60,92 m. Sin embargo, las modificaciones en la signatura química del agua subterránea no se asocian directamente a la mezcla de aguas, sino que su origen se debe a que el acuífero entra en contacto con roca que previamente se encontraba no saturada, desencadenando procesos como hidrólisis y disolución de minerales. Además, diferencias de niveles freáticos, gradiente hidráulico, calidad del agua y perfiles geofísicos nanoTEM, alrededor del tranque de relaves, aportan a la existencia de una estructura norte-sur que desconecta el acuífero de faena Sierra Gorda.

AGRADECIMIENTOS

Primero, quiero agradecer a mi familia, quienes siempre me han apoyado en todo momento en este largo proceso, en particular, a mi madre, padre, hermanos y chiquitín.

También, quiero agradecer a todas las personas que de una u otra manera han formado parte de mi vida hasta ahora, que me han permitido llegar hasta donde estoy y que pueda culminar mi etapa universitaria.

A los cabros del aplicación, que hasta el día del hoy son mis amigos, a las personas que conocí por medio del escultismo, a los de futbol del día sábado, a los de Ammonaited F.C., el equipo del fósil que daba todo el aguante en cada partido, y a todas las personas lindas de geo que brindaron su grata compañía en los múltiples terrenos, pasillos y salas del departamento, y en los ratos de distención en el patio de los naranjos que, en ocasiones, nos tomaba todo el día.

Agradecer al grupo de campo 2 conformado por la Pili y Carlos, que más que un equipo de campo 2 se transformó en un grupo de discusión de hidro y de temas de la memoria. Agradecer al abuelo, Juanma, kim, titi, ale, juan, miguel, maxi, rodri y demás compañeros y compañeras de la generación.

Igualmente, quiero agradecer a Victoria y su familia por brindarme su amor, comprensión, integración, apoyo y comida.

A Dirk, por permitir realizar mi trabajo de título, su buena disposición ante todas mis dudas y guiar mi camino de trabajo. Al profe Brian, por gestionar mi tema de memoria y sus acertados comentarios que me ayudaban a mejorar. Finalmente, a la profe Katja por formar parte de la comisión y dar retroalimentación de mi trabajo.

Por último, quisiera agradecer a la naturaleza y todo lo que nos brinda, esta fue una de las principales razones por la cual entré a estudiar geología y hasta el día de hoy me sigue motivando.

Gracias totales.

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO	3
1.3 METODOLOGÍA	3
1.3.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y GENERACIÓN DE BASE DE DATOS	3
1.3.2 CONTEXTO GENERAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	4
1.3.3 PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN FAENA SIERRA GORDA	4
1.3.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	4
2 ANTECEDENTES GENERALES	5
2.1 UBICACIÓN Y ACCESOS	5
2.2 ANTECEDENTES DE TRABAJOS PREVIOS	6
2.3 CLIMA	8
2.3.1 DESÉRTICO NUBOSO	8
2.3.2 DESÉRTICO NORMAL	8
2.3.3 DESÉRTICO FRÍO	8
2.4 GEOMORFOLOGÍA	9
2.5 PRECIPITACIONES	10
2.6 HIDROGRAFÍA	10
3 MARCO GEOLÓGICO	12
3.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	12
3.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL	12
3.2.1 LITOLOGÍA	13
3.2.2 ESTRUCTURAS	16
3.2.3 MINERALIZACIÓN Y ALTERACIÓN	19
4 MARCO HIDROGEOLOGICO	21
4.1 FAENA SIERRA GORDA	21
4.1.1 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	21
4.1.2 PIEZOMETRÍA Y DIRECCIONES DE FLUJO	23
4.1.3 BALANCE HÍDRICO	27
4.2 FAENA SPENCE	29
4.2.1 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	29

4.2.2	PIEZOMETRÍA Y DIRECCIONES DE FLUJO.....	31
4.2.3	BALANCE HÍDRICO.....	34
4.3	FAENA CENTINELA.....	35
4.3.1	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	35
4.3.2	PIEZOMETRÍA Y DIRECCIONES DE FLUJO.....	37
4.3.3	BALANCE HÍDRICO.....	38
5	PUNTOS DE MUESTREO.....	40
5.1	UBICACIÓN, CARACTERÍSTICAS Y MEDICIONES.....	40
5.1.1	MINERA SIERRA GORDA.....	40
5.1.2	MINERA SPENCE.....	43
5.1.3	MINERA CENTINELA.....	47
5.2	GEOLOGÍA SUBTERRÁNEA DE PUNTOS DE MONITOREO EN FAENA SIERRA GORDA.....	49
6	QA/QC DE LOS DATOS.....	52
7	CONTEXTO GENERAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	55
7.1	NIVELES FREÁTICOS.....	55
7.1.1	FAENA SIERRA GORDA.....	55
7.1.2	FAENA SPENCE.....	59
7.1.3	FAENA CENTINELA.....	62
7.2	HIDROGEOQUÍMICA GENERAL.....	64
7.2.1	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.....	65
7.2.2	ELEMENTOS MAYORES.....	69
7.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO UNIVARIABLE.....	73
8	PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE FAENA SIERRA GORDA.....	78
8.1	CONTEXTO HIDROQUÍMICO ALREDEDOR DEL DEPÓSITO DE RELAVES.....	78
8.1.1	ANÁLISIS DE DENDOGRAMAS.....	78
8.1.2	COMPARACIÓN DE VARIABLES QUÍMICAS ENTRE SECTORES ESTE Y OESTE DEL DEPÓSITO DE RELAVES.....	80
8.2	EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS DATOS GEOQUÍMICOS.....	82
8.2.1	NIVELES FREÁTICOS EN EL TIEMPO.....	82
8.2.2	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL TIEMPO.....	86
8.2.3	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE ELEMENTOS MAYORES.....	90
8.2.4	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE ELEMENTOS MINORITARIOS Y TRAZA.....	94
8.3	ÍNDICES DE SATURACIÓN MINERAL.....	96
9	DISCUSIONES.....	103
9.1	CONTEXTO GENERAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	103

9.2 PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN FAENA SIERRA GORDA	109
10 CONCLUSIONES	119
11 RECOMENDACIONES	121
BIBLIOGRAFÍA	122
ANEXOS	125
ANEXO 1. HIDROGEOQUÍMICA GENERAL	125
ANEXO 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO UNIVARIABLE	136
ANEXO 3. ANÁLISIS DE DENDOGRAMAS	144
ANEXO 4. COMPARACIÓN DE VARIABLES QUÍMICAS ENTRE SECTORES ESTE Y OESTE DEL DEPÓSITO DE RELAVES.....	147
ANEXO 5. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN EL TIEMPO	150
ANEXO 6 ELEMENTOS MAYORES EN EL TIEMPO	154
ANEXO 7 ELEMENTOS MENORES Y TRAZA EN EL TIEMPO	158
ANEXO 8 PERFILES GEOFÍSICOS NANOTEM	167

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Ubicación y accesos.....	5
Figura 2.2: Tipos de clima de la región de Antofagasta. Modificado de Vergara (2014).....	9
Figura 2.3: Mapa hidrográfico de la zona de estudio. Elaborado en base a delimitación de cuencas de la DGA (2000).....	11
Figura 3.1: Mapa geológico de faenas Spence y Sierra Gorda a escala 1:100.000. Modificado de Duhart et al. (2018).	15
Figura 3.2: Mapa geológico de faena Centinela a escala 1:100.000. Modificado de Marinovic y García (1999) y GAC (2012).	16
Figura 3.3: Estructuras en el área de faenas Spence y Sierra Gorda. Extraídas de Arcadis (2015 y 2016) y Duhart et al (2018).	18
Figura 4.1: Cuenca de Sierra Gorda. Modificado de VAIGS (2014).	21
Figura 4.2: Piezometría preoperacional de faena Sierra Gorda. Extraída y modificada de VAIGS (2014).....	24
Figura 4.3: Piezometría del año 2019 de faena Sierra Gorda. Elaboración propia.....	25
Figura 4.4: Balance hídrico. Modificado de Itasca (2019).	28
Figura 4.5: Piezometría preoperacional (año 2004) de faena Spence. Extraída y modificada de Arcadis (2015).	32
Figura 4.6: Piezometría del año 2016 de Faena Spence. Tomada de Golder (2017).	33
Figura 4.7 Recarga y descarga del acuífero de faena Spence. A la izquierda se muestran las condiciones preoperacionales y la derecha el período de explotación. Tomada de Arcadis (2015).	35

Figura 4.8: Piezometría y distribución de unidades hidrogeológicas de faena Centinela sector POE. Tomada de GAC (2012).	38
Figura 5.1: Ubicación de puntos de monitoreo e instalaciones de minera Sierra Gorda	41
Figura 5.2: Ubicación de puntos de monitoreo minera Spence.	43
Figura 5.3: Ubicación de puntos de monitoreo minera Centinela.	47
Figura 7.1: Evolución de niveles freáticos y distribución de los pozos de faena Sierra Gorda y Pampa Lina y piezometría preoperacional.	57
Figura 7.2: Niveles freáticos en el tiempo minera Sierra Gorda.	58
Figura 7.3: Niveles freáticos en el tiempo zona de Pampa Lina.	58
Figura 7.4: Niveles freáticos en el tiempo minera Spence.	60
Figura 7.5: Evolución de niveles freáticos y distribución de los pozos de faena Spence y piezometría preoperacional.	61
Figura 7.6: Niveles freáticos en el tiempo minera Centinela.	62
Figura 7.7: Evolución de niveles freáticos y distribución de los pozos de faena Centinela y piezometría preoperacional.	63
Figura 7.8: Diagrama Durov de minera Sierra Gorda y Pampa Lina.	66
Figura 7.9: Distribución de TDS en el distrito Sierra Gorda. Concentraciones clasificadas en base a Reif y Alhalabi (2015).	68
Figura 7.10: Diagrama Piper minera Sierra Gorda	70
Figura 7.11: Diagramas Stiff minera Sierra Gorda.	70
Figura 7.12: Distribución de la composición química de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda.	72
Figura 7.13: Gráficos del promedio por pozo de solidos disueltos totales (TDS) versus aniones de Sierra Gorda, Pampa Lina, Spence instalaciones, Spence sector relaves y Centinela.	75
Figura 7.14: Gráficos de solidos disueltos totales (TDS) versus cationes de Sierra Gorda, Pampa Lina, Spence instalaciones, Spence sector relaves y Centinela.	77
Figura 8.1: Dendogramas representativos en las cercanías del depósito de relaves y sector de piscinas.	80
Figura 8.2: Evolución en el tiempo de los niveles freáticos de pozos CB-5, CB-6, CB-9, CB-7R, CB-8R, CB-11R y sondaje abierto CON-15.	84
Figura 8.3: Distribución espacial de pozos MCB	85
Figura 8.4: Evolución temporal de niveles freáticos de pozos MCB.	85
Figura 8.5: índices de saturación mineral pozos CB-5 y CB-6.	99
Figura 8.6: Índices de saturación mineral pozos CB-9 y CB-7R.	100
Figura 8.7: índices de saturación mineral de pozos CB-8R y CB-11R.	101
Figura 8.8: índices de saturación mineral de sondaje abierto CON-15.	102
Figura 9.1: Distribución de las composiciones químicas predominantes de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda y medio hospedante asociado.	104

Figura 9.2 Distribución de las concentraciones de TDS de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda y medio hospedante asociado.	105
Figura 9.3: Ubicación de perfiles geofísicos nanoTEM. y falla propuesta. Diferencia lateral de resistividades se interpreta como la presencia de una falla.	111
Figura 9.4: Relaciones sodio-nitrato y potasio-nitrato.....	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Permeabilidades (K) y espesores estimados de las unidades hidrogeológicas de faena Sierra Gorda.....	23
Tabla 4.2. Puntos de medición y niveles utilizados para elaborar piezometría con fecha julio del año 2019.	26
Tabla 4.3. Caudales máximos, mínimos y promedios estimados para cada salida natural de faena Sierra Gorda (Itasca, 2019).....	29
Tabla 4.4. Permeabilidades (K) y espesores estimados de las unidades hidrogeológicas de faena Spence.....	31
Tabla 5.1. Características de los puntos de monitoreo de faena Sierra Gorda y sector Pampa Lina.	42
Tabla 5.2. Características de los puntos de monitoreo instalaciones minera Spence.	44
Tabla 5.3. Características de los puntos de monitoreo asociados al depósito de relaves minera Spence.....	46
Tabla 5.4. Características de los puntos de monitoreo asociados a minera Centinela.	48
Tabla 5.5. Características geológicas de los puntos de monitoreo del sector depósito de relaves	50
Tabla 5.6. Minerales mapeados e interpretados de pozos alrededor del depósito de relaves.....	51
Tabla 6.1. Balance iónico de las muestras de aguas subterráneas descartadas en el distrito minero Sierra Gorda.....	53
Tabla 7.1. Resumen de medidas de pH y concentración de TDS.....	67
Tabla 7.2. Clasificación de aguas salinas. Modificado de Reif y Alhalabi (2015).	67
Tabla 7.3. Resumen de clasificación de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda.	71
Tabla 7.4. Promedio de parámetros de muestreo de minera Sierra Gorda, Pampa Lina, minera Spence instalaciones y sector de relave y minera Centinela	74
Tabla 8.1. Resumen de variables químicas presentes en los sectores este y oeste del depósito de relaves.....	81
Tabla 9.1. Elementos contenidos en fases minerales mapeadas e interpretadas.	116

1 INTRODUCCIÓN

El predominante clima desértico con casi nulas precipitaciones, en la depresión central de la región de Antofagasta, no permite la existencia de cursos de agua superficiales, salvo algunas excepciones como, por ejemplo, el río Loa y algunos tributarios. Sin embargo, producto de precipitaciones en lo alto de la Cordillera de Los Andes, es posible encontrar flujos de agua subterránea que recorren la región en dirección al mar (CIREN, 2016).

Naturalmente, producto de la interacción agua-roca, el recurso hídrico subterráneo suele cambiar la signatura química en su trayecto, elevando o disminuyendo la concentración de elementos químicos que se encuentran en ella en base a los minerales con los que interactúa. Algunos de los factores que influyen en la composición de las aguas son el tiempo de residencia de esta en el acuífero y procesos como la disolución, precipitación, hidrólisis, oxidación-reducción, intercambio iónico y adsorción (Apodaca, 2002).

En contraparte, obras antropogénicas, como las encontradas en la actividad minera, son una potencial fuente de contaminación de las aguas subterráneas si no se toman las medidas pertinentes. Tal es caso de los depósitos de relaves, que al ser el residuo de la actividad minera contienen sustancias químicas y metales pesados que pueden infiltrarse y llegar hasta el acuífero, afectándolo y produciendo un aumento de la salinidad.

Un ejemplo de contaminación desde el tranque de relaves es el de Las Tórtolas, en donde los pozos cercanos a este detectaron elevadas concentraciones de molibdeno y sulfatos (Calabrán, 2009). También, este proceso se ha generado en el depósito de relaves de la Minera Los Pelambres, dando origen a elevadas concentraciones de sulfato en las aguas subterráneas debido a la actividad antrópica (Fuentes, 2017).

Es por ello, que es de suma importancia generar redes de monitoreo de napas subterráneas que puedan detectar alteraciones en la calidad natural del recurso hídrico. Por este motivo, la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) crea el Servicio Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), el año 2012, con el fin de ser el ente encargado de contener la información de los seguimientos ambientales que fueron declarados en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y, posteriormente, aprobados en la Resolución de Calificación Ambiental (RCA), de cada minera previo a su construcción.

El distrito minero Sierra Gorda, ubicado en la II región de Antofagasta, involucra a las faenas Sierra Gorda, Spence y Centinela. La primera, propiedad de la compañía Sierra Gorda Sociedad Contractual Minera (SGSCM) y cuya apertura y operaciones comienzan el año 2014, explota un depósito tipo pórfido Cu-Mo. La faena cuenta con su respectivo tranque de relaves y una red de pozos distribuida en todo el sector de la minera que monitorea la calidad del agua subterránea y nivel freático. Esta última fue definida en el EIA del Proyecto Sierra Gorda el año 2010 (SWS, 2010a), aprobada el año 2011 en la RCA 126/2011 y modificada el año 2018 en la RCA 165/2018. Además, se cuenta con pozos y sondajes abiertos, de uso interno, cuya información no está comprometida en las RCA mencionadas.

La faena Spence, propiedad de BHP Billiton, explota un pórfido cuprífero e inicia sus operaciones el año 2006, luego de que la RCA 308/2002 aprobara el EIA Proyecto Spence (Knight Piésold, 2002), siendo la red de monitoreo final de aguas subterráneas aprobada en la RCA 15/2004

que actualiza al proyecto Spence. Además, el año 2017 la RCA 275/2017 da el visto bueno al EIA Minerales Primarios Minera Spence (Arcadis, 2015), estableciendo una red de pozos en el sector del futuro depósito de relaves asociado a la mineralización hipógena de faena Spence.

Por otro lado, la faena Centinela, propiedad de Antofagasta Minerals S.A., comprende los rajes Esperanza Sur y Encuentro para extraer el cobre de pórfidos cupríferos. Fue aprobada en la RCA 436/2016, asociada al EIA Desarrollo Minera Centinela (GAC, 2015), que da continuidad a la red de monitoreo de aguas subterráneas establecidas en las RCA 212/2008 y RCA 201/2013, que aprueban los EIA Proyecto Esperanza (GAC, 2007) y Proyecto Óxidos Encuentro (GAC, 2012), respectivamente.

Este Trabajo de Título, gestionado por la empresa Ruco Fresena Consultores Ltda., en adelante Ruco, tiene como propósito principal caracterizar hidrogeoquímicamente las napas freáticas del distrito Sierra Gorda, con énfasis en las infiltraciones desde el depósito de relaves y sector de piscinas, ocurridas en faena Sierra Gorda, que inciden en la calidad y nivel del acuífero en los sectores donde se producen las afecciones.

Para ello, primero se establece un contexto general de las aguas subterráneas comparando las faenas Sierra Gorda, Spence y Centinela, con el fin de determinar las diferencias en la calidad del recurso hídrico, entre los sectores mencionados, y su origen. Luego, se procede a estudiar en detalle la química del acuífero de faena Sierra Gorda cercano al depósito de relaves y área de piscinas, con el fin de comprender los procesos hidrogeoquímicos que se generan producto de infiltraciones asociadas a la actividad minera. Se utiliza el software Phreeqc para simular las fases minerales presentes en el acuífero y analizar si estas varían en el tiempo luego de la mezcla de aguas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda, Antofagasta, basado en la data hidrológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica existente, con énfasis en los procesos hidrogeoquímicos generados por infiltraciones al acuífero asociadas al tranque de relaves y sector de piscinas en el sector de SGSCM.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer un contexto general de las napas freáticas en el distrito Sierra Gorda en base a los datos de las faenas Sierra Gorda, Spence y Centinela.
2. Analizar variaciones en el espacio del nivel freático y calidad de aguas subterráneas en las instalaciones de minera Sierra Gorda.
3. Simular fases minerales producto de la interacción agua-roca en faena Sierra Gorda.
4. Comprender las modificaciones en el acuífero producto de infiltraciones asociadas a la actividad minera.

1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Diferencias en la signatura química de las napas subterráneas del distrito Sierra Gorda son resultado de variaciones en el medio hospedante del acuífero. Además, aumentos de niveles hídricos y cambios de la calidad del agua subterránea, ocurridos en tiempos recientes en faena Sierra Gorda, son producto de infiltraciones de aguas de procesos industriales mineros en las napas freáticas.

1.3 METODOLOGÍA

Para realizar este trabajo, la metodología a seguir comienza con una primera etapa de recopilación bibliográfica y generación de base de datos, seguido por el procesamiento de los valores obtenidos para determinar un contexto general de las aguas subterráneas del distrito minero y estudiar los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en faena Sierra Gorda. La tercera etapa, y última, es la de la interpretación de los resultados obtenidos previamente. El afán de la metodología a seguir es cumplir con los objetivos señalados anteriormente.

1.3.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y GENERACIÓN DE BASE DE DATOS

Se efectúa una compilación de material de interés, con el fin de entender la zona de trabajo, en donde se reúne información que proporciona los fundamentos teóricos como también estudios previos hechos en la faena minera (capítulo 2). Esto permite la realización del marco geológico e hidrogeológico para comprender el funcionamiento del sistema acuífero, capítulos 3 y 4 respectivamente.

Ruco proporciona información respecto a trabajos desarrollados, bases de datos de sondajes, perfiles geofísicos nanoTEM y bases de datos con mediciones de la calidad y niveles del acuífero de Sierra Gorda de uso interno restringido al público. Por otro lado, se obtienen datos de niveles y calidad del agua subterránea de las mineras Spence y Centinela, de los informes que son emitidos como parte del compromiso ambiental de monitorear las aguas subterráneas aprobado en las respectivas RCA, en la plataforma virtual del Servicio Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA) y de los EIA realizados en cada faena. Los pozos y datos de cada faena se presentan en el capítulo 5. El período de tiempo a analizar abarca desde la fase preoperacional hasta la etapa operacional (años 2019 y 2020).

Con las bases de datos ya generadas, se procede a realizar un QA/QC para depurar las mediciones que no sean representativas de los puntos de control producto de errores en la medición o de tipeo, entre otros. Este procedimiento se detalla en el capítulo 6.

1.3.2 CONTEXTO GENERAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Se analizan y comparan los datos compilados de niveles y calidad de las aguas subterráneas de las faenas Sierra Gorda, Spence y Centinela, estas últimas dos situadas aguas arriba de la faena principal de estudio, para entender la proveniencia de las napas freáticas y eventuales cambios y alteraciones en la química del agua previo llegar a faena Sierra Gorda.

Se caracterizan las aguas subterráneas por medio de diagramas Piper, para determinar el tipo de agua según elementos mayores, Durov, para comparar TDS y pH, y Stiff para observar la distribución espacial de la calidad de las aguas. Además, se realizan gráficos de niveles piezométricos en el tiempo para conocer, en primera instancia, tendencias y comportamientos que luego son interpretados. Por último, se efectúa un análisis estadístico univariable para comparar la signatura química del distrito minero. Los resultados son presentados en el capítulo 7.

1.3.3 PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN FAENA SIERRA GORDA

Se seleccionan y estudian los pozos cercanos al depósito de relaves y sector de piscinas para evaluar el comportamiento de niveles y calidad de agua. Primero, se realiza un análisis de dendogramas, mediante el software Statgraphics, para establecer un vínculo entre las aguas de los pozos mencionados y determinar una relación entre las muestras.

Posteriormente, con los pozos ya seleccionados, se plotean en el tiempo los parámetros fisicoquímicos y las concentraciones medidas de los cationes y aniones mayores, menores y traza con el fin de determinar en qué sectores, en qué momento y que parámetros de las aguas subterráneas presentan cambios en su tendencia normal. Luego, se continúa con una comparativa entre los pozos del sector este del depósito de relaves versus los del sector oeste. El software utilizado es Excel.

Para finalizar, se utiliza el software PHREEQC para calcular índices de saturación mineral en distintos puntos de monitoreo. De esta manera, se determinan las fases minerales que precipitan, las que están en equilibrio y las que están disueltas, logrando comparar entre distintos sectores y analizar como varían las fases minerales pre y post infiltración.

Los resultados de los procesos hidrogeoquímicos en faena Sierra Gorda se detallan en el capítulo 8.

1.3.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

La última etapa de este trabajo consiste en agrupar toda la información presentada anteriormente y conectar las ideas que surgen a partir de los resultados, interpretando estos y generando una discusión que permita dilucidar el contexto general de las aguas en el distrito Sierra Gorda y los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en la faena Sierra Gorda.

Las discusiones de este trabajo son presentadas en el capítulo 9 y las conclusiones en el capítulo 10.

2 ANTECEDENTES GENERALES

2.1 UBICACIÓN Y ACCESOS

Las faenas mineras Sierra Gorda, Spence y Centinela se ubican en la Región de Antofagasta, Provincia de Antofagasta, comuna de Sierra Gorda, a 4,5 km noroeste, 13 km noreste y 26 km sureste, aproximadamente, de la localidad de Sierra Gorda, que es la más cercana, y a unos 63 km, 50 km y 64 km, respectivamente, al suroeste de Calama, ver figura 2.1. Además, inmediatamente al este de faena Sierra Gorda y al suroeste de faena Spence se localiza el área de Pampa Lina.

Para acceder a las zonas mineras es necesario, para todas, transitar por la Ruta 25 y luego por un camino privado de las respectivas faenas, ver figura 2.1. Para ingresar a la minera Sierra Gorda se debe entrar por el camino privado de Sierra Gorda SCM, a la minera Spence por la Ruta Spence en el sector Carmen Alto, a la altura del kilómetro 50, y a la minera Centinela se accede por la Ruta Planta Concentradora. Desde el norte la Ruta 25 comienza en la ciudad de Calama, mientras que al sur comienza como un brazo de la Ruta 5.

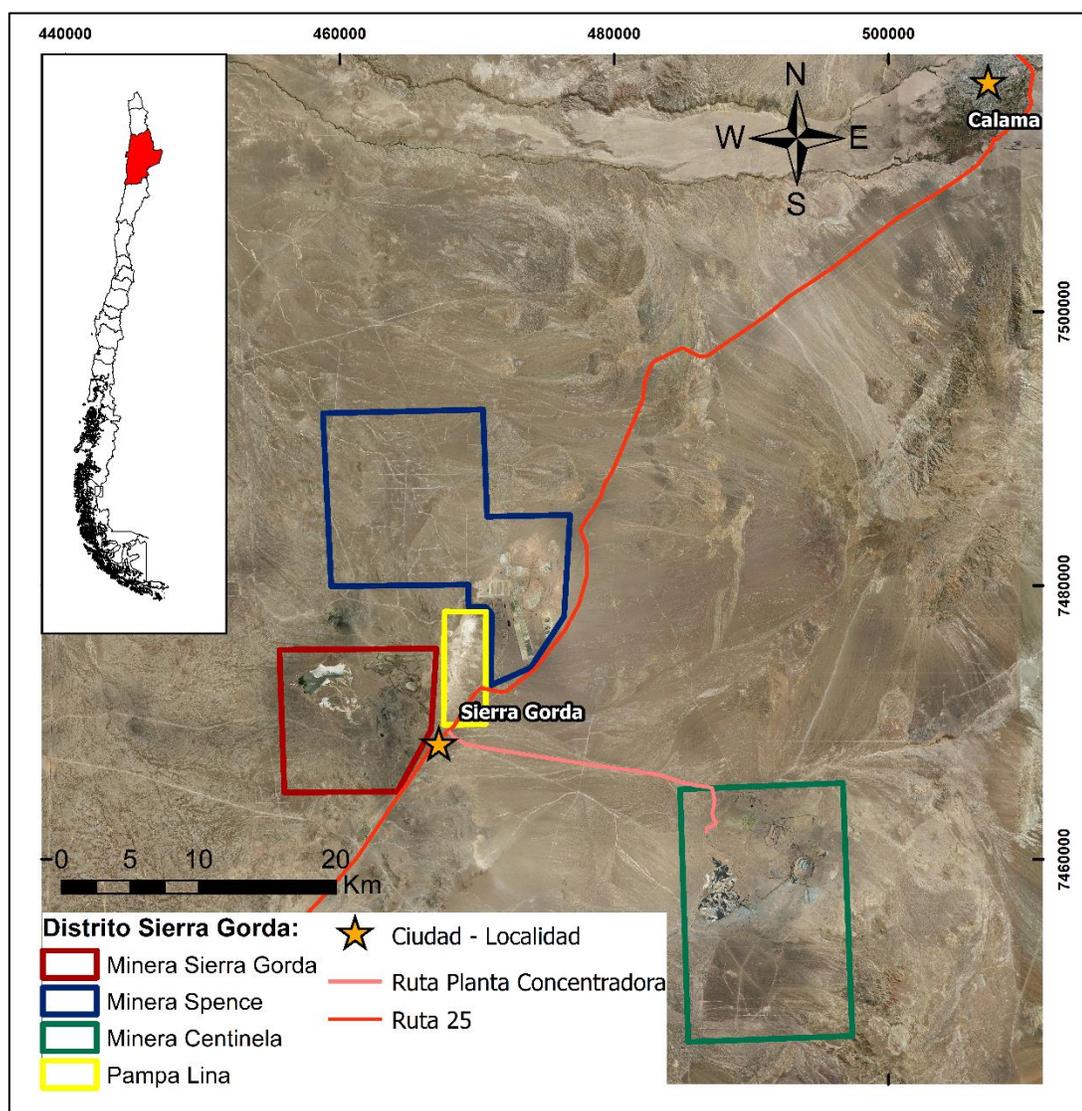


Figura 2.1: Ubicación y accesos.

2.2 ANTECEDENTES DE TRABAJOS PREVIOS

Faena Sierra Gorda:

La construcción de la mina Sierra Gorda comienza en agosto del año 2011 y finaliza en julio del 2014, operando con normalidad desde este año hasta la actualidad. Inicialmente, el año 2004, se realiza una serie de sondajes en la concesión minera de Sierra Gorda que permite obtener información acerca de la litología, alteración, mineralización, geoquímica, calidad geotécnica de las rocas y las estructuras presentes en el área de estudio, generando una completa evaluación y prospección geológica de la faena minera.

Previo a la etapa de construcción de la mina, se presenta, en mayo del 2010, el EIA Proyecto Sierra Gorda (Golder, 2010), en donde Schlumberger Water Service (SWS) realiza la primera caracterización hidrogeológica en el sector de SGSCM (SWS, 2010a). Esta consiste en la recopilación de mediciones del nivel freático y calidad del agua subterránea en pozos de observación establecidos desde el año 2008. Además, se determina la permeabilidad del acuífero y se genera la piezometría preoperacional y el Modelo Numérico Mina Catabela que proyecta los flujos de agua tras la apertura del rajo de la mina (SWS, 2010b).

El EIA Proyecto Sierra Gorda fue aprobado el año 2011 mediante la RCA 126/2011. Se dictamina que la construcción de la mina es ambientalmente factible y puede operar, pero debe seguir el plan de monitoreo de 12 pozos instalados alrededor y al interior de las instalaciones del proyecto, en los cuales se deben realizar mediciones mensuales del nivel freático y trimestrales de la calidad de agua subterránea considerando la concentración de cationes y aniones y parámetros fisicoquímicos. Además de generar actualizaciones del modelo numérico del acuífero del sector de SGSCM. La instalación de los pozos comienza el año 2011 y finaliza el 2013, siendo reportados en el documento Instalación de Pozos de Monitoreo Proyecto Sierra Gorda (SWS, 2013).

VAI Groundwater Solutions realiza, el año 2014, la primera actualización del modelo conceptual y numérico hidrogeológico del Proyecto Sierra Gorda, con datos comprendidos entre el 2008 y 2013. Se actualiza la piezometría, unidades hidrogeológicas, balance hídrico y estiman los efectos de profundización del rajo y, posiblemente, a pozos de terceros (VAIGS, 2014). Al año siguiente, la misma empresa produce el primer modelo conceptual y numérico del rajo Catabela (VAIGS, 2015). Además, Vergara (2014) analiza la geoquímica de las aguas, la interacción de estas con el cuerpo mineralizado y realiza un modelo inverso para mejorar la comprensión del sistema de agua subterránea

Knight Piésold (2014) realiza el Informe Técnico del Estudio Geológico Área Depósito de Relaves, caracterizando la superficie y subsuperficie del sector del depósito de relaves previo a su funcionamiento mediante una integración de calicatas, perfiles geofísicos, mapeo geológico y una recopilación de antecedentes como sondajes.

El año 2016, se realiza el EIA Adecuación Operacional del Depósito de Relaves y Optimización del Proyecto Sierra Gorda con su respectiva línea base hidrogeológica (SGA, 2016). Este documento incluye la segunda actualización del modelo hidrogeológico conceptual y numérico de faena Sierra Gorda (Arcadis, 2016), en donde se incorpora la zona no saturada para evaluar posibles infiltraciones desde el depósito de relaves y estimar su caudal.

Arcadis (2018) realiza una modelación hidrogeológica del sector del depósito de relaves en relación con el EIA del año 2016, en este documento se identifican las infiltraciones que podrían producirse en la zona no saturada, para ello se genera un modelo 3D que caracteriza a los sedimentos y rocas someras del área, además de un modelo hidrogeológico local.

El año 2018 se aprueba el proyecto Adecuación Operacional del Depósito de Relaves y Optimización del Proyecto Sierra Gorda por medio de la RCA 165/2018. Se da continuidad a la RCA 126/2011, reemplazando 5 pozos por otros 5 nuevos y exigiendo reportes trimestrales de los parámetros medidos. Adicionalmente, existen otros pozos de uso interno cuya información no está comprometida con el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

Por último, Itasca (2019) actualiza el modelo hidrogeológico conceptual existente para el proyecto Actualización del Depósito de Relaves e Instalaciones Anexas SGSCM, el cual pretende expandir el área del depósito de relaves.

Faena Spence:

La faena Spence comienza a operar el año 2006, posterior a que la RCA 308/2002 aprobara el EIA Proyecto Spence el año 2002 (Knight Piésold, 2002). En este documento se definen las líneas base con las condiciones preoperacionales, incluyendo a la componente hidrogeológica y su red de pozos de monitoreo de las aguas subterráneas. Sin embargo, la red definitiva de pozos fue determinada en la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) Actualización Proyecto Spence el año 2003.

El EIA Minerales Primarios Minera Spence (Arcadis, 2015) incorpora información relacionada al sector del futuro depósito de relaves de Spence (hacia el norte de minera Sierra Gorda), dado que el rajo minero será ampliado y profundizado con el fin de extender la vida útil del yacimiento mediante la extracción de minerales hipógenos, por lo que el procesamiento de estos, a través de flotación convencional, generará relaves. Se define una red de pozos (existentes y propuestos), para la componente hidrogeológica, que abarca un período comprendido entre los años 2012 y 2016 con monitoreo de la calidad del agua subterránea que son utilizados en este trabajo.

Los datos en el tiempo de niveles y calidad del agua subterránea de esta minera son obtenidos de los informes de monitoreo hidrogeológico enviados al SNIFA, como parte del compromiso ambiental adquirido en la RCA 15/2004 que actualiza al Proyecto Spence.

Faena Centinela:

La faena Centinela cuenta con información de los EIA Proyecto Esperanza (GAC, 2007) y Proyecto Óxidos Encuentro (GAC, 2012), en donde se definen las líneas base con las condiciones preoperacionales y las respectivas redes de pozos de monitoreo de las aguas subterráneas. También, se utiliza el EIA Desarrollo Minera Centinela del año 2015 (GAC, 2015) que integra a las mineras mencionadas antes, además de minera El Tesoro, bajo el nombre de minera Centinela y da continuidad a la red de monitoreo del acuífero de esta zona, de esta manera, Antofagasta Minerals aumenta la capacidad de extracción y beneficio mineral.

Se deja fuera de este estudio al sector de minera El Tesoro, dado que en el EIA Proyecto El Tesoro realizado el año 1997 (Dames & Moore Chile, 1997), y aprobado en la RCA 31/1997, no

se establece una red de pozos que monitoree la calidad del acuífero en la zona de minera Centinela, sino que se instala un campo de pozos al suroeste del Calama, que es donde se extrae el agua para abastecer las operaciones mineras. Dada la lejanía de los pozos de monitoreo al sector de interés, se consideran solo los datos de minera Esperanza, Proyecto Óxidos Encuentro, y su unión bajo el nombre de minera Centinela.

Además, se recopila la información de niveles y calidad del agua subterránea en el tiempo proveniente de los reportes entregados al SNIFA como parte del compromiso ambiental adquirido en la RCA 212/2008 (EIA Proyecto Esperanza) y RCA 201/2013 (Proyecto Óxidos Encuentro).

2.3 CLIMA

La región de Antofagasta se caracteriza por presentar un clima de aridez extrema y escasez de agua, destacando cuatro subtipos de climas desérticos descritos por CIREN (2016), en base a la Dirección Meteorológica de Chile, que se disponen en franjas longitudinales como se muestra en la figura 2.2.

2.3.1 DESÉRTICO NUBOSO

Franja extendida a lo largo de la región entre la costa y 20 km al interior donde se encuentra el relieve de la Cordillera de la Costa que impide el paso de la influencia marina hacia el continente. En esta zona predomina un clima con abundante humedad, neblinas matinales, ausencia de precipitaciones y un efecto modelador de la temperatura debido a la fría corriente de Humboldt.

2.3.2 DESÉRTICO NORMAL

Subclima que se encuentra tras la Cordillera de la Costa, hacia el interior del continente, por lo que no se ve afectada por la influencia del mar, dicho esto, se caracteriza por presentar una masa de aire muy estable y seca, que genera una aridez extrema, cielos despejados todo el año, humedad atmosférica baja, precipitaciones nulas o infrecuentes y una alta oscilación térmica entre 0°C y 30°C debido al enfriamiento nocturno. La aridez producida, en lo que se conoce como el Desierto de Atacama, es debido a que el anticiclón del Pacífico Sur bloquea el paso de sistemas frontales por el oeste, mientras que la Cordillera de los Andes impide el paso de masas de aire húmedas proveniente del este. El distrito Sierra Gorda presenta un clima desértico normal.

2.3.3 DESÉRTICO FRÍO

Franja climática situada entre los 2000-2500 m.s.n.m. y, aproximadamente, los 4000 m.s.n.m. Al igual que el subclima anterior, presenta una aridez extrema con ausencia de humedad y carencia de nubes, pero, se diferencian debido a que hay una variación de la temperatura y precipitaciones regulada por la altitud. El cielo suele estar despejado con una estadística meteorológica promedio de solo 16 días cubiertos en el año, mientras que el resto está despejado,

provocando una fuerte insolación durante el día y frío durante la noche debido a que nada se interpone para evitar la pérdida de calor por radiación.

2.3.3 TUNDRA DE ALTA MONTAÑA

Subclima de la región de Antofagasta que se presenta en el margen este de las franjas intermedias, donde se encuentran las cumbres altas de la Cordillera de los Andes, situándose sobre los 4000 m.s.n.m. en la zona altiplánica o Puna. Debido a la altitud, es que se presentan bajas temperaturas en el área durante todo el año, con variaciones entre los 0°C, incluso menos, hasta no superar los 10°C, ni si quiera en el verano, lo que permite la persistencia de hielo y nieve durante todo el año. Suelen producirse precipitaciones principalmente en forma de nieve con un aire seco y concentradas entre los meses de mayo y agosto, además de tormentas de verano.

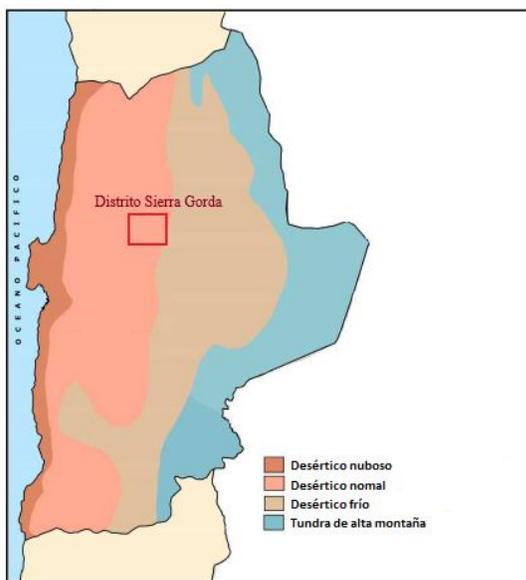


Figura 2.2: Tipos de clima de la región de Antofagasta. Modificado de Vergara (2014).

2.4 GEOMORFOLOGÍA

La región de Antofagasta se divide en las unidades geomorfológicas Cordillera de la Costa, Depresión intermedia, Cordillera de Domeyko o Precordillera y Cordillera de los Andes (Charrier, 2007).

El distrito Sierra Gorda se sitúa entre la Cordillera de la Costa por el oeste y la Precordillera por el este, lugar conocido como la Depresión Intermedia, a excepción de minera Centinela que se localiza en el piedemonte, donde comienza la precordillera. La cuenca en la cual está inserta es topográficamente baja, plana y se encuentra rodeada por algunos cerros de escasa altura. La faena Sierra Gorda se encuentra, aproximadamente, entre las cotas 1625 m.s.n.m. y 1785 m.s.n.m., alcanzando una altura máxima de 1.850 m.s.n.m. en un cerro que aflora al sur, entre el proyecto y

el poblado de Sierra Gorda, minera Spence se sitúa entre las cotas ~1600-1750 m.s.n.m. y Centinela entre los ~2100-2700 m.s.n.m.

2.5 PRECIPITACIONES

SGA (2016) realizó en el EIA Adecuación Operacional del Depósito de Relaves y Optimización del Proyecto Sierra Gorda un compilado de las líneas de base hidrológicas de las mineras Sierra Gorda, Spence y Centinela, determinando un fuerte gradiente de precipitaciones medias anuales entre las cotas 2.400 y 3.700 m.s.n.m. Por otro lado, para cotas inferiores a 2.400 m.s.n.m., que es donde se encuentra la mayor parte de las mineras en este trabajo, las precipitaciones medias anuales no presentan magnitudes relevantes.

Además, se caracterizan las precipitaciones en SGSCM mediante la estación meteorológica Sierra Gorda perteneciente a la DGA. Los resultados son valores nulos de precipitación, en donde hay solo 12 registros de lluvia en 24 años de mediciones, obteniendo un promedio anual de 2 mm (SGA, 2018).

Hacia faena Centinela, que es la zona de mayor altura del distrito minero, las escasas a nulas precipitaciones tienen valores promedio entre 3-5 mm anuales, típico del clima desértico. Sin embargo, es posible generar escorrentía por eventos de precipitación esporádicos (GAC, 2015).

2.6 HIDROGRAFÍA

La región de Antofagasta, al ser de un clima desértico extremo, no presenta cursos de agua naturales permanentes, con la excepción del Río Loa y los flujos de agua superficiales que lo alimentan. Este torrente es el más largo de Chile, con una extensión de 440 km. Su trayectoria comienza en la Cordillera de los Andes, en el volcán Niño, a una altura aproximada de 5.651 m.s.n.m., en donde la recarga se da por aguas de origen termal, el Invierno Boliviano y deshielos, y desemboca en el mar en Caleta Huelén, recorriendo la región de Antofagasta a lo ancho y siendo el único río en la región que desemboca en el mar. Los principales arroyos tributarios que aportan a la alimentación del Río Loa en su dirección hacia el océano son el río Salado, río San Pedro y río San Salvador.

Las mineras Sierra Gorda y Spence se ubican en el límite de la cuenca Río Loa, por el norte, y la cuenca Quebrada Caracoles, por el sur. Mientras que minera Centinela se sitúa solo en esta última.

Estas cuencas, ambas exorreicas, drenan una superficie de 33.081 y 18.295 km², respectivamente. Contienen una gran cantidad de quebradas que, en ocasiones, pueden presentar algún escurrimiento en los meses de verano producto del Invierno Boliviano, esto es, cuando se generan eventos de precipitación extrema en lo más alto de la Cordillera de Los Andes. En la figura 2.3 se muestra el trazado de ambas cuencas, las cuales fueron extraídas de la Mapoteca Digital de la Dirección General de Aguas (DGA, 2000).

Al no existir cursos de agua permanentes en el distrito Sierra Gorda, pero si escasas precipitaciones y altas tasas de evaporación, es posible la preservación de salares y depósitos de nitratos cerca de las faenas mineras, siendo el Salar de Pampa Blanca el más cercano a Sierra Gorda, en dirección sur, con una superficie aproximada de 68 km² (DGA, 2000).

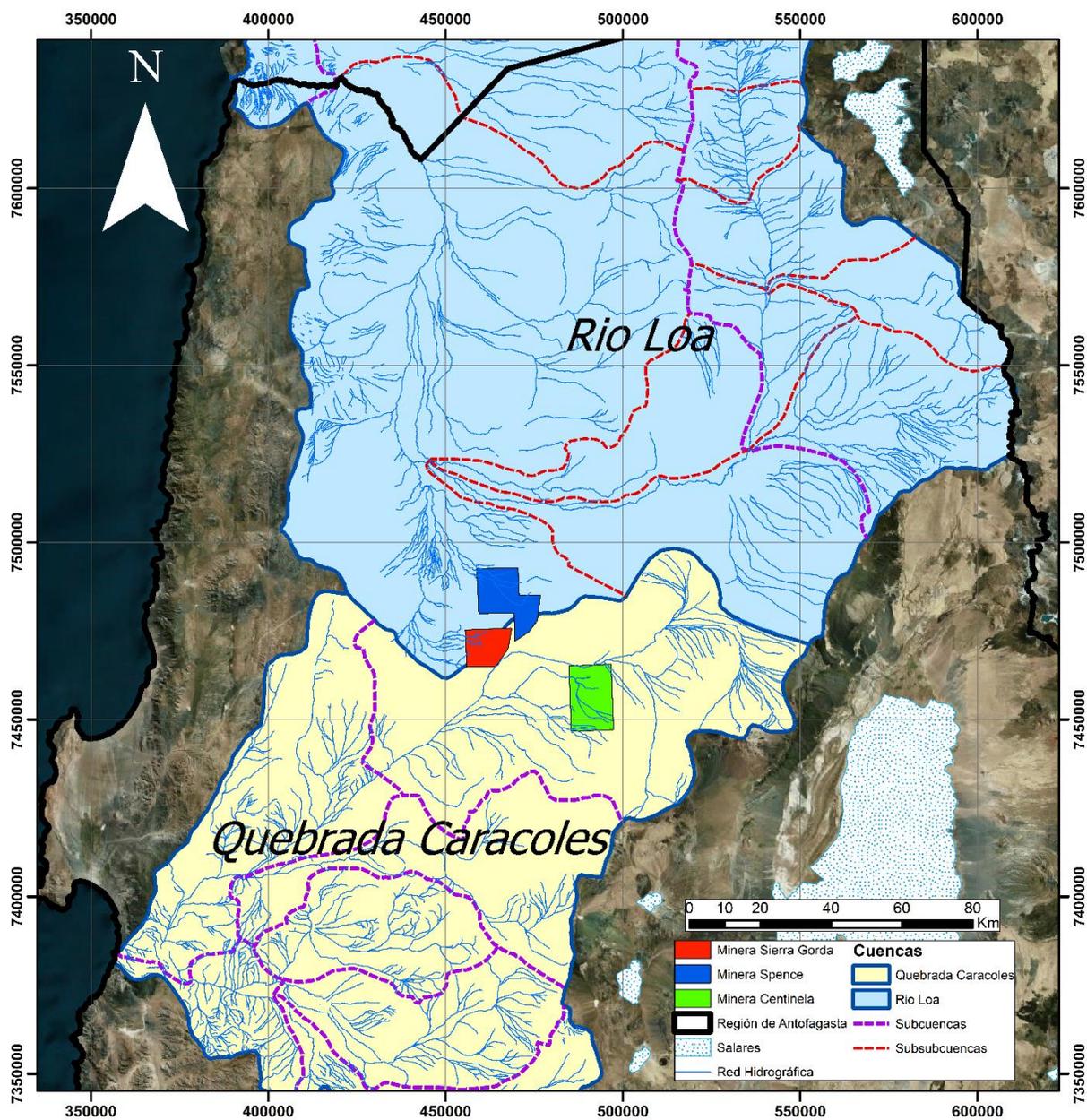


Figura 2.3: Mapa hidrográfico de la zona de estudio. Elaborado en base a delimitación de cuencas de la DGA (2000).

3 MARCO GEOLÓGICO

3.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Charrier et al. (2007) menciona que, al menos desde el Paleozoico Superior hasta la actualidad, el norte de Chile, en particular para este estudio, la región de Antofagasta presenta un margen continental activo que involucra la subducción de la corteza oceánica bajo la del continente y que se caracteriza por presentar dos eventos tectónicos que explican la evolución geológica de la zona. El primer período entre el Jurásico Temprano y el Cretácico Temprano destaca por el desarrollo del arco magmático y de una cuenca de tras arco en un régimen extensional. Por otro lado, el segundo período, que comprende desde el Cretácico Tardío al Holoceno, corresponde al desarrollo de la faja plegada y corrida en un régimen compresivo.

En la mayoría del norte de Chile se encuentran varias franjas metalogénicas, dispuestas longitudinalmente, con rica mineralización metálica de Cu-Mo-Au formadas entre el Mesozoico y Cenozoico. Estas se diferencian entre sí por su edad, posición geográfica y tipo de mineralización presente, las cuales tienen su génesis asociada al evento tectónico que dominaba en ese momento y las etapas de actividad ígnea (Maksaev et al., 2007).

El depósito mineral de faena Sierra Gorda se encuentra dentro de la Franja Metalogénica del Paleoceno a Eoceno Inferior, la cual se sitúa en la porción central del país y que incluye otros pórfidos cupríferos como Spence, Centinela, Gaby, Lomas Bayas, Cerro Colorado, Polo Sur, Fortuna del Cobre y Relincho. En la franja también es posible encontrar depósitos vetiformes mesotermales y/o epitermales auríferos que suelen presentarse en la periferia de los pórfidos cupríferos, aunque se han reconocidos algunos en sectores aislados (Maksaev et al., 2007).

En la región, también es posible encontrar estructuras macroregionales como la Falla de Atacama, que es un sistema de falla de tipo transcurrente sinistral desarrollado en el Cretácico Inferior y que generó fajas miloníticas a lo largo de la cordillera de la costa. Además, habría presentado movimientos verticales durante el Cenozoico. Otras estructuras presentes en la región son el Sistema de Falla Oeste, así como el lineamiento Calama-Antofagasta (Charrier et al. 2017).

3.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

El marco geológico local de las faenas Sierra Gorda y Spence se basa en la Carta Geológica de Sierra Gorda (Duhart et al., 2018) realizada a escala 1:100.000. La distribución superficial de las unidades mapeadas se muestra en la figura 3.1. Por otro lado, el marco geológico de faena Centinela se basa en la Hoja Pampa Unión (Marinovic y García, 1999) y la distribución de las unidades geológicas y estructuras se presenta en la figura 3.2.

3.2.1 LITOLOGÍA

Las rocas encontradas superficialmente en el distrito Sierra Gorda corresponden a rocas sedimentarias, volcánicas y plutónicas descritas a continuación:

Fm. Las Lomas (Trll) (Triásico Superior-Jurásico Inferior) (Marinovic et al., 1996):

Secuencia de lavas y tobas dacíticas de hasta 150 m de espesor que aflora en faena Centinela. Subyace al Grupo Caracoles con un contacto discordante erosivo y presenta un contacto por falla con la Formación Cinchado. Además, la intruyen pequeños stocks de dioritas.

Grupo Caracoles (Jgc) (Jurásico Medio-Superior) (Marinovic et al., 1996):

Serie sedimentaria marina compuesta por areniscas calcáreas, calizas, conglomerados y tobas, con presencia de depósitos evaporíticos y fósiles. Se dispone sobre la Fm. Las Lomas con un contacto erosivo y bajo la Fm. Cinchado con el mismo contacto. Aflora hacia el este de minera Centinela.

Fm. Llanura Colorada (Ksd) (Jurásico Superior-Jurásico Inferior) (Muñoz et al., 1989):

Secuencia sedimentaria continental que está conformada por una alternancia de calcilitas, areniscas calcáreas, calizas, lutitas y niveles evaporíticos de yeso. Sobreyace en concordancia al Grupo Caracoles y subyace en discordancia angular a la Fm. Quebrada Mala.

Fm. San Salvador (JKiss) (Titoniano alto-Cretácico Inferior bajo, ca <145 Ma) (Duhart et al., 2018):

Secuencia sedimentaria continental compuesta por limonitas laminadas, areniscas de grano fino a grueso, areniscas conglomerádicas y conglomerados matriz soportados. Esta unidad aflora en el rajo de Spence y hacia el norte de las instalaciones de esta minera.

Fm. Quebrada Mala (Ksqm) (Maastrichtiano, ca 73-65 Ma) (Montaño, 1976):

Se compone de: a) una sección inferior integrada por lavas y tobas riolíticas y dacíticas; b) tobas andesíticas, con intercalaciones de andesitas, areniscas y conglomerados en una posición estratigráfica intermedia; c) basaltos, andesitas basálticas, andesitas y, en menor proporción, traquiandesitas y traquidacitas, hacia la parte superior se encuentran intercaladas con tobas; d) conglomerados y areniscas en la porción superior de la formación. Aflora al norte, sur y este de la mina Sierra Gorda y al oeste de faena Centinela, no sobrepasando los 200 m de espesor.

Fm. Cinchado (Papd) (Paleoceno-Eoceno Inferior) (Marinovic et al., 1996):

Secuencia volcano-sedimentaria continental conformada por domos subvolcánicos, andesitas y tobas. Esta formación se presenta como la roca caja de los pórfidos de minera Centinela.

Complejo Intrusivo Sierra Gorda (Kssg) (Maastrichtiano, ca.71-65 Ma) (Duhart et al., 2018):

Intrusivos que afloran como una franja en todo el sector oeste de las faenas Sierra Gorda y Spence. Estas rocas incluyen desde gabros a granitos, con variedades monzogabros a monzogranitos. Este complejo intuye a la Formación Quebrada Mala.

Intrusivos del Paleoceno (Pai) (a1, a2, a3, b2, c) (ca. 64-56 Ma) (Duhart et al., 2018):

Se localizan en el rajo de las mineras Sierra Gorda y Spence (b2), como stocks, diques granodioríticos y brechas de turmalina y/o ígneas. También, afloran hacia al suroeste del rajo de Sierra Gorda unos cuerpos intrusivos elongados en dirección NEE-SSO compuestas por a1) dioritas a monzodioritas cuarcíferas, a2) sienos y monzogranitos, a3) granodioritas y tonalitas y c) basaltos, andesitas basálticas, andesitas y monzodioritas en forma de diques y pequeños cuerpos.

Depósitos aluviales del Mioceno Inferior-Mioceno Superior Bajo (Mal (a) - Mg) (Duhart et al., 2018):

Depósitos sedimentarios que afloran hacia el oeste de faena Sierra Gorda, en el sector de Pampa Lina y en faena Centinela. Se compone de gravas, arenas y limos. Los sedimentos se presentan débilmente compactados y con cemento de yeso y haluros. Estos depósitos no sobrepasan los 10 m de espesor.

Depósitos aluviales del Mioceno Superior-Plioceno (MsPa) (Duhart et al., 2018):

Se exponen hacia el sector oeste de faena Spence y en la zona de Pampa Lina. Se conforma por a gravas no consolidadas ni compactas, con una matriz arenosa-limosa.

Depósitos salinos del Mioceno Superior-Plioceno MsPs (a y b) (Duhart et al., 2018):

Corresponden a sedimentos salinos que se disponen como una franja dispuesta NE-SW en Pampa Lina. Estas constituidos por: a) Cloruros y Sulfatos mezclados con limos y nitratos que forman una costra salina con minerales como halita, darapskita, cuarzo, nitratina, albita baja y trazas de lautarita. b) Limos con cloruros y sulfatos, que están conformados por material detrítico, con menor proporción de sales.

Depósitos aluviales y coluviales del Pleistoceno-Holoceno (PIHac - Qa) (Duhart et al., 2018):

Relleno sedimentario que cubre la mayor parte de la zona de estudio encontrándose en todos los sectores. Corresponden a gravas, arenas y limos de origen coluvial y fluvial actualmente activos y relacionados a flujos esporádicos como lo son los aluviones.

Depósitos antrópicos (Han (b,c)) (Duhart et al., 2018):

Son los depósitos que están relacionados a la actividad minera, en donde es posible encontrar: a) pilas de lixiviación, b) relaves y c) desmontes.

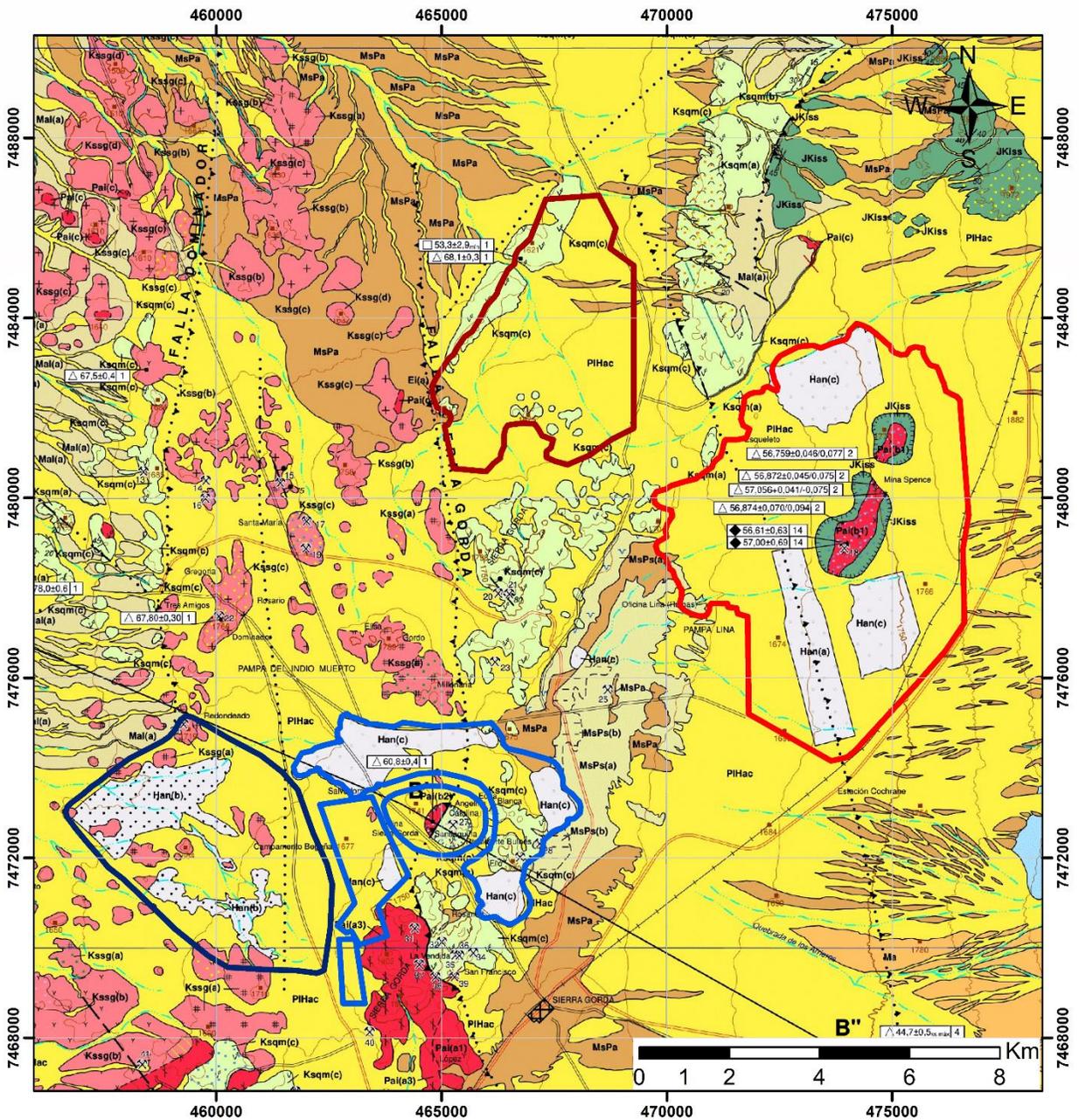


Figura 3.1: Mapa geológico de faenas Spence y Sierra Gorda a escala 1:100.000. Modificado de Duhart et al. (2018).

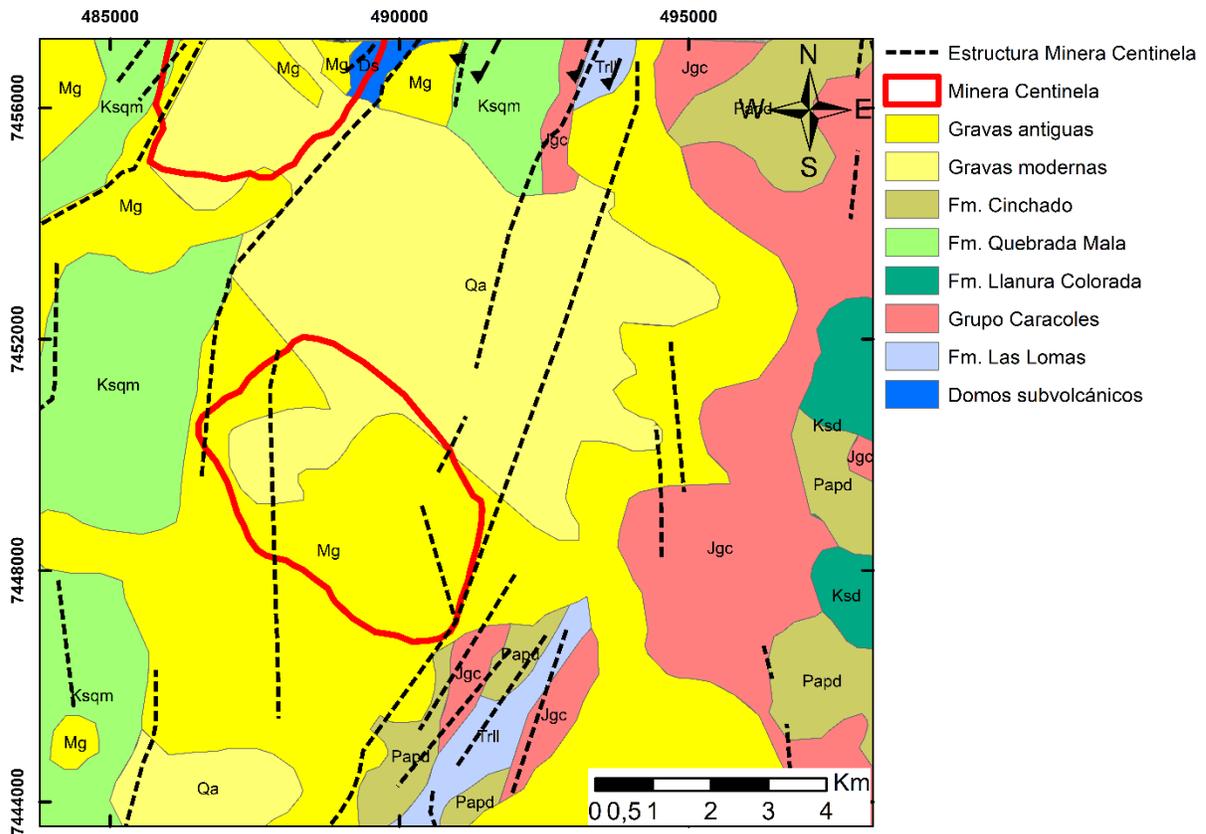


Figura 3.2: Mapa geológico de faena Centinela a escala 1:100.000. Modificado de Marinovic y García (1999) y GAC (2012).

3.2.2 ESTRUCTURAS

Las principales estructuras, y de mayor relevancia en el sector de estudio son fallas, las cuales se pueden encontrar a escala regional, como las descritas en la Carta de Sierra Gorda (Duhart et al., 2018), y a escala local, que han sido descritas por trabajos realizados en cada faena de estudio.

En la figura 3.3 se exponen las estructuras principales, catalogadas así para este estudio por su relevancia hidrogeológica, e inferidas/cubiertas en las faenas Sierra Gorda y Spence. Se presentan en azul y morado las estructuras locales en cada minera, tomadas de Arcadis (2015 y 2016) y Golder (2017), y en negro se muestran las estructuras obtenidas de la Carta Geológica de Sierra Gorda. Mientras que en la figura 3.2 se encuentran las estructuras de faena Centinela, tomadas de GAC (2015).

Según la Carta Geológica de Sierra Gorda (Duhart et al., 2018), 3 fallas inferidas/cubiertas interceptan a faena Sierra Gorda. Las fallas Sierra Gorda y Dominador son de tipo inversa, con orientación norte-sur y se encuentran cubiertas por depósitos sedimentarios. La Falla Sierra Gorda intersecta al rajo minero, mientras que la Falla Dominador es inferida hasta el sector norte del depósito de relaves, se desconoce si esta pudiese interceptarlo. Además, se reconoce una tercera falla inferida/cubierta de orientación norte-sur, en todo el sector este del depósito de relaves, de la cual se desconoce su cinemática. Esta estructura es corroborada por la Superintendencia de Geología de SGSCM (2020) durante la revisión detallada de sondajes, la cual, para este trabajo de

título, es catalogada como estructura principal; en el desarrollo de este estudio se presentan mayores detalles que aportan a la existencia de esta discontinuidad.

Hacia el sector este de faena Sierra Gorda, entre el rajo y Pampa Lina, se localiza un set de fallas con orientación N-S. Estas estructuras principales tienen un rol fundamental en la hidrogeología de la zona al generar una desconexión entre los acuíferos de ambos sectores, actuando como una barrera hidráulica al disponerse de manera perpendicular a la dirección del flujo (SWS, 2010a; VAIGS, 2014). Además, a estas estructuras se les atribuye la elongación, en la misma dirección, de los afloramientos donde se ubica faena Sierra Gorda, situados al oeste de este sector, y la geomorfología de la zona de Pampa Lina.

Las discontinuidades asociadas al rajo de faena Sierra Gorda, y sus alrededores, se caracterizan por presentar una dirección NO-SE y NE-SO orientándose casi ortogonalmente entre sí. Estas estructuras fueron mapeadas por SGSCM el año 2010 y están relacionadas a la mineralización ocurrida en el rajo.

Otro conjunto de fallas en faena Sierra Gorda presenta una orientación E-O, localizadas principalmente en el sector del depósito de relaves. Son inferidas mediante mapeo de superficie y a lineamientos inferidos que fueron obtenidos por métodos aeromagnéticos. También es posible encontrar estas estructuras en el sector del rajo.

En faena Spence, Duhart et al (2018) traza una estructura inferida/cubierta de tipo inversa y orientación noroeste-sureste que intercepta el sector de las instalaciones y este del depósito de relaves. Asimismo, según este autor la falla Sierra Gorda se presenta al oeste del tranque de relaves de Spence. Otras estructuras al norte de esta zona tienen una orientación suroeste-noreste.

Las estructuras locales en faena Spence suelen tener una dirección preferencial noreste-suroeste y noroeste-sureste, destacando el set de discontinuidades asociados al rajo. Además, se considera estructura principal aquella presente al oeste del rajo, con orientación hacia el noroeste, que produce un aumento del gradiente hidráulico hacia el noroeste del rajo y conecta hidráulicamente una parte del sector de las instalaciones con la del depósito de relaves (Golder, 2017). También, se consideran estructuras principales las situadas al oeste y norte del rajo con orientación suroeste a noreste; su importancia es detallada en el capítulo de las discusiones.

GAC (2015) no define alguna estructura con relevancia hidrogeológica dentro de la faena Centinela, por lo que, para este trabajo, ninguna estructura es catalogada como principal en esta zona. Sin embargo, las estructuras localizadas dentro de la faena suelen tener una orientación noreste-suroeste y noroeste-sureste y de tipo inversa.

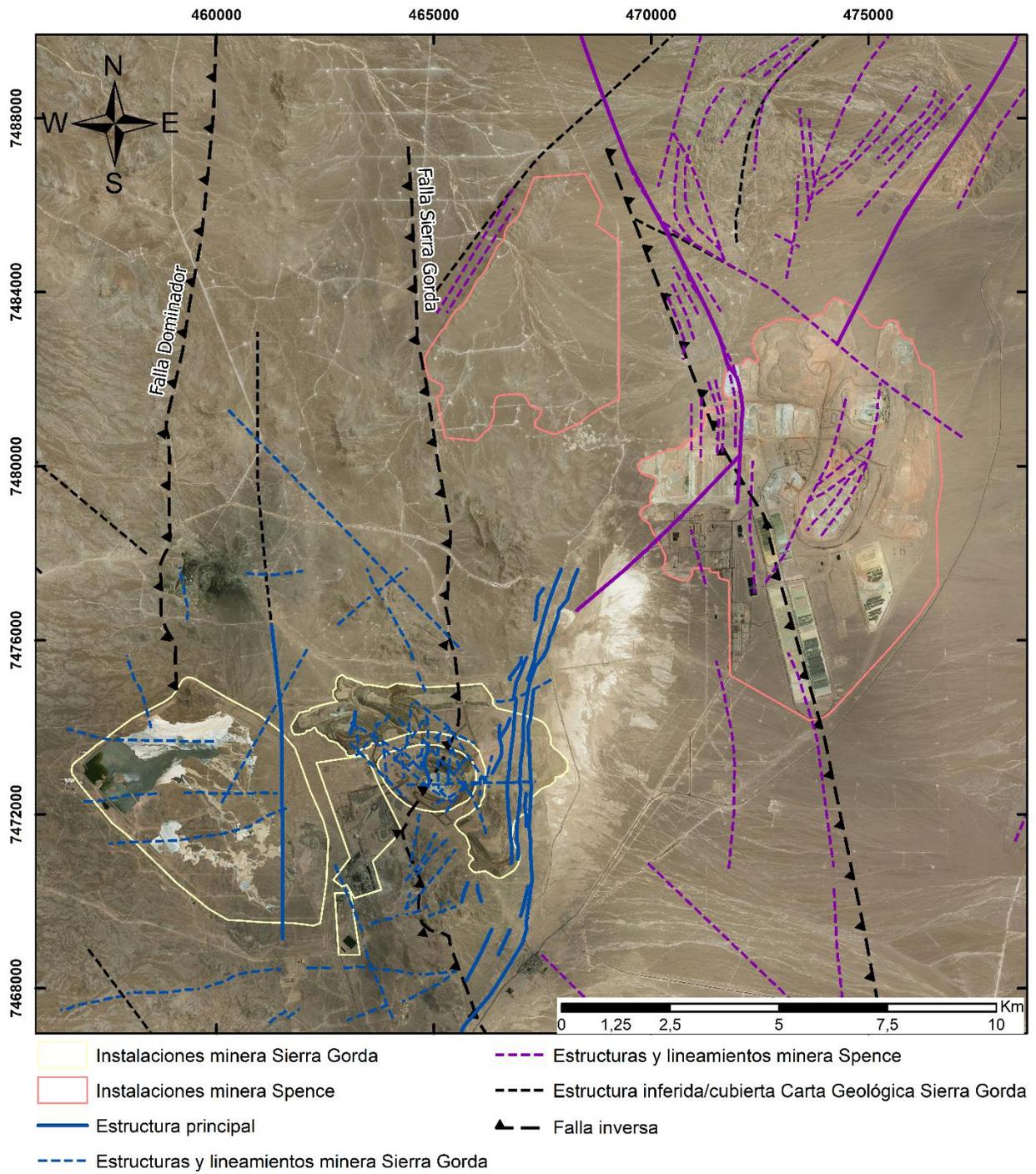


Figura 3.3: Estructuras en el área de faenas Spence y Sierra Gorda. Extraídas de Arcadis (2015 y 2016) y Duhart et al (2018).

3.2.3 MINERALIZACIÓN Y ALTERACIÓN

Faena Sierra Gorda:

Los recursos medidos en la Mina Sierra Gorda son de aproximadamente 1000 Mt con leyes de 0,42% de Cu, 0,027% de Mo y de 0,0069 g/t de Au, esto dispuesto en dos zonas con mineralización hipógena principal las cuales son Catalina y 281 (Shaver et al., 2009), y escasa mineralización supergena.

Maya (2004) define que la mina Sierra Gorda presenta una mineralización hipógena relacionada a 8 episodios magmáticos/hidrotermales/mineralizadores, con fluidos decrecientes en salinidad, temperatura y presión. Los minerales presentes con esta mineralización son calcopirita, molibdenita, pirita y covelina, tanto en vetillas como diseminado. En la mineralización dominan stockworks de calcopirita y pirita, encontrándose en mayor proporción el primer mineral, y vetas de molibdenita con halos de feldespatos potásico-biotita, asociada a pórfidos feldespáticos. También es posible encontrar mineralización diseminada de pirita y calcopirita, dominando el primer mineral, en la roca caja compuesta por andesita y monzodiorita.

En la zona del rajo de Sierra Gorda se presenta alteración hipógena potásica de biotita-feldespatos potásico en la roca caja correspondiente a la Formación Quebrada Mala, a esta alteración se le sobrepone una alteración sericita-turmalina-clorita-pirita. También se encuentra una alteración fílica de cuarzo-sericita, anhidrita y óxidos de hierro, con profundidades de aproximadamente 800m y afectando a pórfidos feldespáticos y roca caja, además esta alteración se sobrepone a una alteración propilítica que afecta a las rocas volcánicas andesíticas (Maya, 2004).

Hay casi nulo desarrollo de una alteración y mineralización supérgena, la cual es de un espesor menor a 20 m, principalmente de calcosina con algunos óxidos de cobre como atacamita, brocantita y antlerita.

Faena Spence:

El yacimiento de Spence es del tipo pórfido cuprífero, de edad paleocena (57 Ma), con una zona de enriquecimiento secundario. Este depósito es explotado a rajo abierto y se caracteriza por una parte somera lixiviada, seguida por una zona de óxidos compuesta principalmente por atacamita, un horizonte de enriquecimiento supérgeno de calcosina y covelina con de ley promedio 1% a ~600m de profundidad, el cual se originó por exhumación de los minerales hipógenos, principalmente de calcopirita.

La mineralización hipógena corresponde a pirita y calcopirita asociadas a las alteraciones potásica y fílica en stockworks, en donde su proporción varía en base a factores como la litología y alteración. Se han estimado leyes de cobre en calcopirita en el rango 0,1-0,7% CuT. También, la mineralización hipógena se presenta en la roca caja como un halo de calcopirita fina y diseminada de baja ley.

Se han detectado otros minerales hipógenos como molibdenita con calcopirita, en vetillas tipo B, pirita diseminada y masiva, en vetillas tipo D, y trazas de bornita, tetraedrita, covelina primaria, digenita, pirrotina, rutilo, galena y esfalerita.

Se han estimado recursos geológicos indicados e inferidos que alcanzan los 2.350 Mt 0.43 % CuT y 117 ppm Mo.

Faena Centinela:

En minera Centinela, el rajo Esperanza es un depósito mineral del tipo pórfido de cobre, oro, plata y molibdeno, que es explotado por medio de un rajo abierto. El cobre se presenta asociado a minerales del tipo sulfuros, con una proporción menor asociada a óxidos. Se estima un material total extraído de ~6200 mt, de los cuales ~1900 mt son de mineral y ~4300 mt son de lastre (GAC, 2015).

La alteración de este rajo evidencia un núcleo de alteración potásica inserto en zonas de alteración cuarzo-sericita y propilítica. Existe una alteración argílica intermedia entre el núcleo potásico y el halo fílico. En profundidad se encuentran skarn en rocas calcáreas. La mineralización de cobre se asocia al núcleo potásico que es la fuente de sulfuros y óxidos. Por otro lado, el oro y la plata se relacionan a los sulfuros de cobre, mientras que el molibdeno a la alteración argílica intermedia.

En la misma faena, el rajo Encuentro involucra la extracción de óxidos y sulfuros desde un pórfido cuprífero, con una estimación de material a ser extraído de ~4300 mt, siendo ~900mt de mineral y ~3400 mt de lastre. Se estima una columna mineralizada de 800m de espesor, en donde los óxidos de cobre se desarrollan en una cobertura de gravas con una potencia de 250m, lo que da cuenta de un proceso de oxidación in situ. También, destaca una mineralización mixta de calcosina, covelina, cuprita y cobre nativo bajo la zona de óxidos. Por último, la mineralización primaria de calcopirita y bornita ocurre como vetillas (GAC, 2012).

4 MARCO HIDROGEOLÓGICO

La denominada cuenca de Sierra Gorda se caracteriza por ser topográficamente plana y rodeada por pequeños cerros, en donde el distrito en estudio se localiza al noroeste de esta. VAIGS, en el modelo conceptual hidrogeológico del año 2014, delimita la cuenca como se muestra en la figura 4.1, redefiniendo límites y acotando la cuenca presentada por la DGA (2000) (figura 2.3). El distrito minero Sierra Gorda se localiza al noroeste de la cuenca, la cual tiene un área aproximada de 2.408 km² y su cota promedio es de 2.919 m.s.n.m. La cuenca es conformada por las quebradas Caracoles y Los Arrieros, encontrando las mayores elevaciones al este a ~3.800 m.s.n.m., y las menores hacia el oeste a ~1.400 m.s.n.m. La dirección de drenaje es en dirección sureste a noroeste.

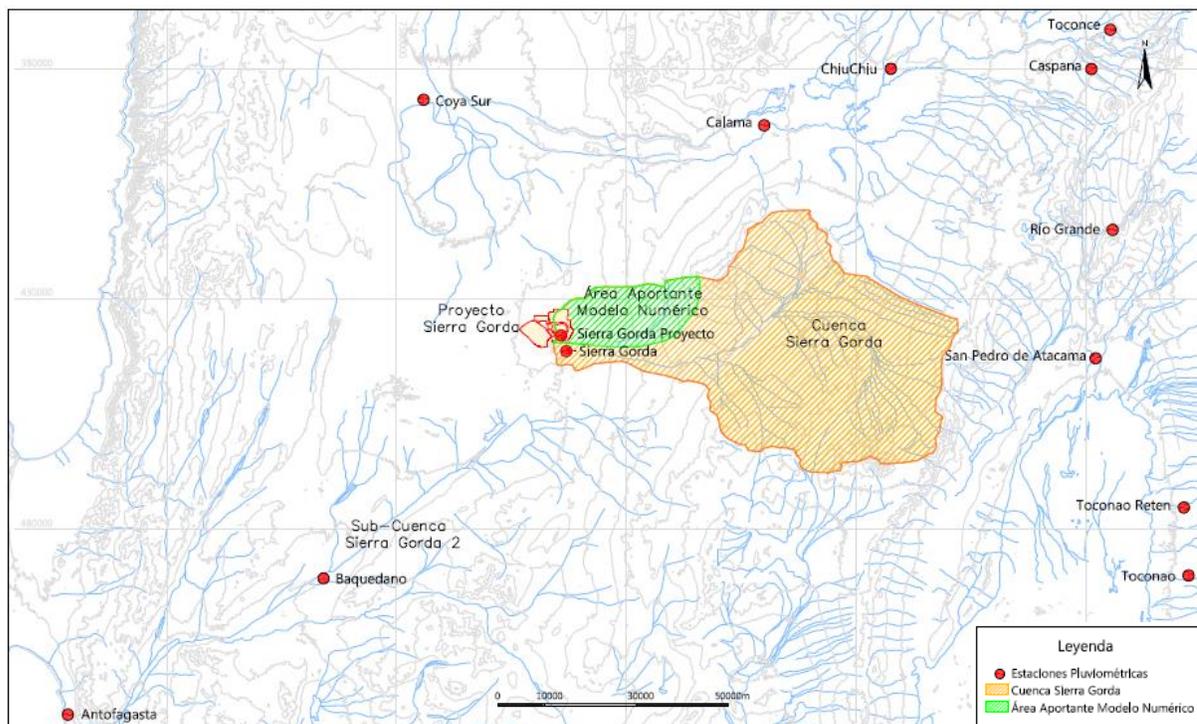


Figura 4.1: Cuenca de Sierra Gorda. Modificado de VAIGS (2014).

4.1 FAENA SIERRA GORDA

4.1.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

En base a descripciones geológicas, geotécnicas y ensayos hidráulicos de Packer, de inyección y de carga variable en sondajes del entorno de faena Sierra Gorda y Pampa Lina, SWS (2010a) definió inicialmente tres unidades hidrogeológicas, las que luego fueron refinadas por VAIGS (2014) y finalmente actualizadas por Itasca (2019). Este último añade una cuarta unidad asociada a las estructuras y subclasifica a las unidades 1 y 3 en la zona del rajo.

Unidad 1 (UH-1): Depósitos aluviales

Capa sedimentaria dispuesta superficialmente en toda la faena, está compuesta por arenas y gravas no consolidadas a moderadamente consolidadas. En el sector del tranque de relaves se han descrito los sedimentos con una capa de caliche y contenidos variables de sal.

En el área de faena Sierra Gorda, el espesor varía entre, aproximadamente, 2 y 26 m, encontrando los mayores espesores hacia el oeste del depósito de relaves. En el sector de Pampa Lina se encuentra la mayor potencia de esta unidad, comprendida entre 50 y 160 m en la parte más céntrica. Dado que, al menos en el sector de SGSCM, esta unidad no presenta un gran espesor, en relación con la profundidad del nivel freático, se posiciona sobre el nivel de aguas subterráneas formando la zona no saturada, por lo que tiene una importancia menor. La permeabilidad promedio es del orden de $4,5 \times 10^{-1}$ m/d.

Mediante información adquirida en sondajes geotécnicos y calicatas es posible subdividir esta unidad en dos:

Unidad 1.1 (UH-1.1): Caliche

Son los sedimentos descritos previamente que están cementados por sales con contenidos variables de cloruros, sulfatos y nitratos. Su distribución se limita solamente al área del depósito de relaves con una potencia promedio de 10 m.

Unidad 1.2 (UH-1.2): Zona de transición

Incluye a los sedimentos de depósitos aluviales y coluviales que no están cementados por sales, así como regolito y rocas con alto fracturamiento. Su espesor promedio es de ~10 m.

Unidad 2 (UH-2): Rocas meteorizadas y/o fracturadas

Esta unidad involucra a la roca volcánica (andesitas y tobas), intrusiva y pórfidos (mineralizados y estériles) que se presenta meteorizada y/o fracturada. Se distribuye en toda el área de estudio y se dispone bajo la unidad 1. Presenta un espesor que varía entre ~70 y 150 m y tiene una permeabilidad promedio de $2,9 \times 10^{-2}$ m/d.

Si bien, esta unidad tiene baja a muy baja permeabilidad, su fracturamiento interconectado le otorga la propiedad de almacenar y transmitir el flujo de agua subterráneo. Alberga gran parte del agua subterránea en el sector este del depósito de relaves, donde esta unidad tiene mayor espesor y los niveles de agua se encuentran a menor profundidad.

Unidad 3 (UH-3): Basamento

Bajo la UH-2, se encuentra la unidad impermeable de roca intacta y compacta correspondiente al basamento. Se compone de un macizo rocoso sano, con bajo grado de fracturamiento y alta calidad geotécnica ($RQD > 75\%$), compuesto de cuerpos intrusivos, andesitas y tobas, aunque estas últimas son menos frecuentes.

Esta unidad se distribuye en toda el área de faena Sierra Gorda a una profundidad mayor a los 100 m, con un espesor que excede los 750 m y permeabilidades promedio estimadas en $7,7 \times 10^{-4}$ m/d. Litológicamente coincide con la unidad 2, pero con una notable reducción en la cantidad de

fracturas. En el sector oeste del tranque de relaves, el agua subterránea se encuentra principalmente en esta unidad, debido a su mayor profundidad de nivel (>150 m).

Unidad 4: Estructuras del rajo

Corresponde a las estructuras mayores que actúan como conducto o barrera del agua subterránea en el rajo de Sierra Gorda, esto dado que el acuífero está condicionado por un fuerte componente estructural que sectoriza los niveles freáticos. Su distribución es casi exclusivamente del rajo, aunque también se incluyen otras fallas fuera de este sector que actúen como barreras o conductos de las aguas subterráneas.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados de conductividades hidráulicas de cada unidad y subunidad presentes en faena Sierra Gorda. Esta fue construida en base a los trabajos realizados por SWS (2010a), VAIGS (2015) y Arcadis (2018). Además, de pruebas hidráulicas de tipo Lugeon y Carga Variable realizadas por Itasca (2019).

Tabla 4.1. Permeabilidades (K) y espesores estimados de las unidades hidrogeológicas de faena Sierra Gorda (Itasca, 2019).

Unidad	K_{\min} (m/d)	K_{\max} (m/d)	K_{promedio} (m/d)	Espesor estimado (m)
UH 1	$1,4 \times 10^{-3}$	3,2	$4,5 \times 10^{-1}$	2-160
UH 1.1	$1,4 \times 10^{-3}$	3,2	5×10^{-1}	10
UH 1.2	$8,3 \times 10^{-3}$	2,7	$2,9 \times 10^{-1}$	10
UH 2	$2,8 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-1}$	$2,9 \times 10^{-2}$	70-150
UH 3	$8,6 \times 10^{-7}$	$4,4 \times 10^{-3}$	$7,7 \times 10^{-4}$	-
UH 4	2×10^{-4}	$1,6 \times 10^{-3}$	$8,9 \times 10^{-4}$	-

4.1.2 PIEZOMETRÍA Y DIRECCIONES DE FLUJO

Condiciones preoperacionales:

La figura 4.2 presenta la piezometría preoperacional de la faena Sierra Gorda considerando mediciones hasta el año 2013. Esta fue extraída y modificada de la actualización del modelo hidrogeológico realizado por VAIGS el año 2014.

En primera instancia, es preciso mencionar que entre los sectores de Pampa Lina y Sierra Gorda la estructura norte-sur actúa como una barrera hidráulica. Niveles con cota mayor hacia el oeste de la estructura y con cota menor hacia el este de esta, además de distintas direcciones de flujo a ambos lados de la discontinuidad, avalan a la estructura como una barrera (VAIGS, 2014).

En el sector de Pampa Lina, en la zona norte, se observa un efecto de cuenca cerrada, con flujos de agua ingresando desde todas las direcciones, pero sin salida. En el noreste de esta área, la piezometría se encuentra afectada por un campo de extracción de pozos, perteneciente a la Compañía Minera Cerro Dominador, que genera un cono de descenso, redirigiendo una parte del flujo. Por otro lado, en el área sur de Pampa Lina, el flujo adquiere una dirección de salida hacia el suroeste.

De acuerdo con la interpretación de VAIGS (2014), en el área de SGSCM el flujo de agua subterránea revela una dirección principal este-oeste, encontrando los niveles más altos hacia el noreste de la faena. También, hacia el noroeste del botadero de estériles, el flujo adquiere una orientación hacia el norte. Mientras que, hacia el sureste de la faena, el flujo se dirige hacia el sur bordeando a los macizos rocosos.

Por otro lado, hacia el sector este del depósito de relaves se evidencia un muy bajo gradiente hidráulico determinado en 0,001. En contraparte, hacia la zona oeste del depósito de relaves se exhibe un gradiente hidráulico mayor, del orden de 0,02.

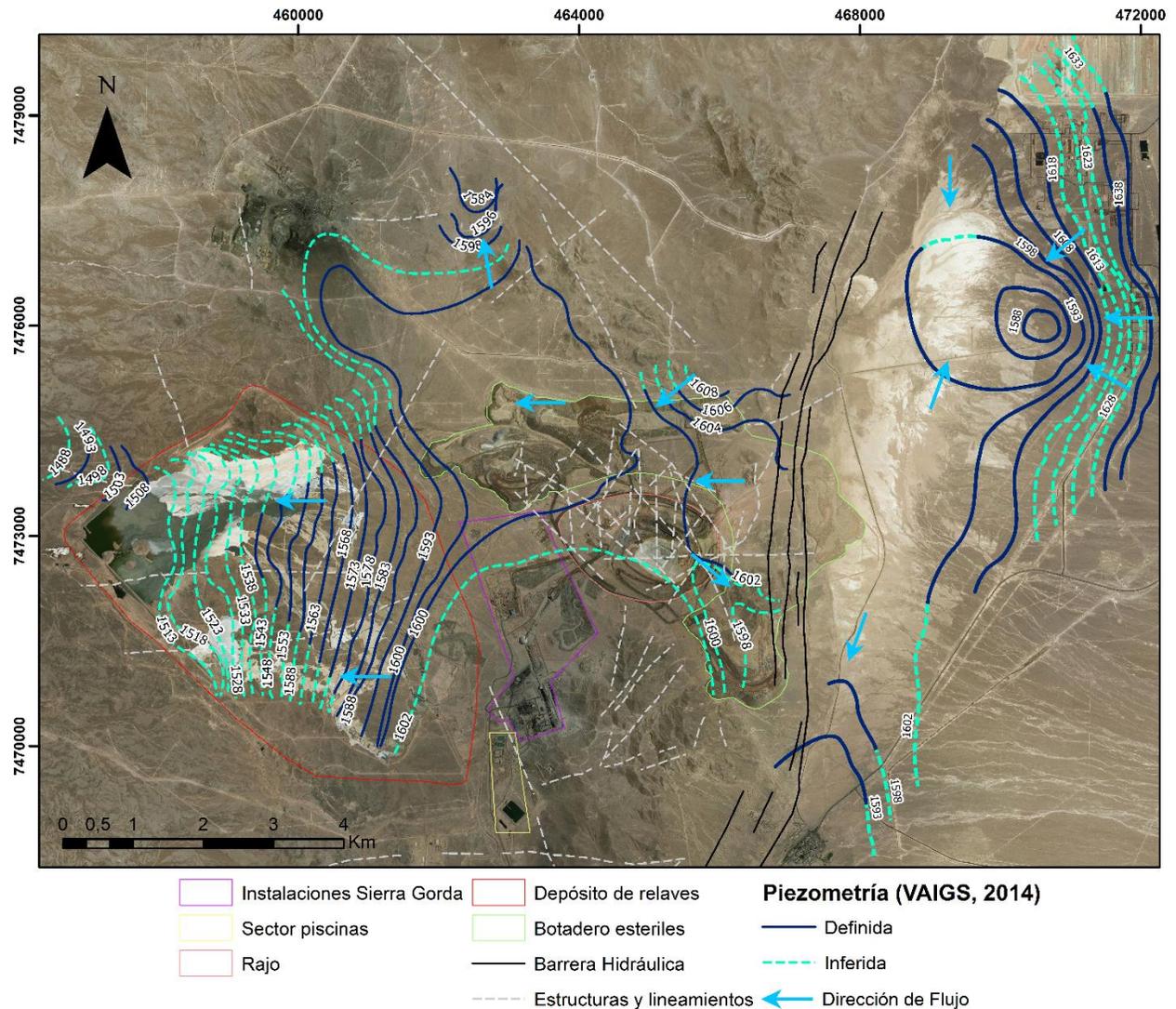


Figura 4.2: Piezometría preoperacional de faena Sierra Gorda. Extraída y modificada de VAIGS (2014).

Tabla 4.2. Puntos de medición y niveles utilizados para elaborar piezometría con fecha julio del año 2019.

Punto de medición	Coordenada Norte	Coordenada Este	Cota nivel freático (m.s.n.m.)
CB-2	7477061	470066	1595.49
CB-3	7474759	468471	1600.56
CB-4	7474018	467172	1604.29
CB-5	7476311	461870	1603.13
CB-6	7473734	462584	1615.38
CB-9	7469049	462714	1656.61
CB-10	7472183	466417	1601.07
CB07-R	7474175	456977	1405.35
CB08-R	7472559	456820	1419.76
CB11-R	7471405	457830	1417.64
CB12-R	7467262	466391	1582.17
QSCSG6-237	7470396	467601	1596.43
QSG08-431	7474403	465412	1601.51
QSG09-580	7478000	463000	1586.55
QSG09-582	7477000	462500	1587.78
QSG09-584	7476650	462650	1598.79
QSG09-585	7476750	462750	1599.40
QSG09-586	7476757	463752	1590.46
QSG09-605	7473950	468050	1609.61
QSG09-608	7473250	468750	1611.61
QSG10-775	7477802	462502	1585.78
MCB-02	7469969	461824	1586.76
MCB-03	7469578	462658	1630.11
MCB-04	7469221	462409	1637.37
S-4	7469690	459523	1494.90*
CON-10	7468329	455345	1466.87
CON-15	7472184	456664	1424.00
CON-16	7471485	456,384	1453.95
VWP-8	7472104	456633	1433.91
VWP-11	7471094	457653	1468.63
VWP-13	7474607	457779	1410.03
VWP-14	7473650	455383	1342.57
RDH-05	7471705	461557	1598.58
SM7-1	7472731	462304	1617.52
SM7-5	7472232	462530.00	1623.31
MP6-P1	7472412	462592.00	1622.01

* = nivel referencial.

Hacia el oeste y suroeste del rajo se observan dos domos de agua. En estas zonas, los niveles más altos se encuentran en el sector de piscinas, producto de infiltraciones de estas mismas, alcanzando la cota ~1656 m.s.n.m. Por otro lado, se registran niveles alrededor de los ~1.623 m.s.n.m. al este del tranque de relaves asociados a infiltraciones desde este depósito.

Al oeste de la estructura principal norte-sur que intercepta al depósito de relaves, el gradiente hidráulico se torna abrupto, aumentando en relación con el que se muestra hacia el sector este. Además, se detectan los niveles freáticos más profundos de toda la faena.

La diferencia de gradiente hidráulico, entre los sectores este y oeste de la estructura principal, puede ser explicado por una mayor cantidad de fracturas presentes entorno del rajo, las cuales facilitan la conducción del flujo subterráneo debido a una mayor interconectividad. Contrario al sector oeste, donde disminuye el grado de fracturamiento. Además, en esta zona se presume una compartimentalización, lo que es evidenciado, por ejemplo, en los puntos CON-15 y CON-16 que muestran una diferencia de nivel de ~30 m, siendo que están bastante cercanos entre sí. Esto puede ser producto de la baja interconectividad entre fracturas, lo cual dificulta la transmisividad del flujo subterráneo.

Por otro lado, la estructura principal, que intercepta al depósito de relaves, se dispone ortogonalmente a la dirección del flujo subterráneo proveniente desde el sector este, lo que da como resultado una barrera hidráulica que desconecta las zonas este y oeste de faena Sierra Gorda. Esta discontinuidad embalsa a las aguas provenientes del sector este, donde se encuentran los niveles más altos, y redirige el flujo de agua subterránea hacia el noroeste y suroeste. Más adelante se expone evidencia que apoya la existencia de esta estructura.

4.1.3 BALANCE HÍDRICO

Itasca (2019) realizó una actualización del balance hídrico considerando las mediciones de febrero del 2019 en su modelo conceptual hidrogeológico, analizando las entradas y salidas en el sistema acuífero como se muestra en la figura 4.4. En la tabla 4.3 se muestran los caudales mínimos, máximos y promedios para las recargas y salidas del acuífero de faena Sierra Gorda.

RECARGA

La ausencia de cauces superficiales permanente e intermitentes en el sector de estudio, debido al clima extremadamente árido, junto con nulas precipitaciones y altas tasas de evaporación, indican una recarga superficial natural al acuífero de faena Sierra Gorda despreciable. Las únicas entradas naturales se asocian a flujos subterráneos laterales provenientes desde el sector noreste (Itasca, 2019).

Otro aporte de agua al acuífero son las entradas antrópicas provenientes de infiltraciones desde el depósito de relaves y el sector de piscinas. Las infiltraciones desde el depósito de relaves al subsuelo y al acuífero se determinan producto del ascenso del nivel freático, mediante perfiles geofísicos nanoTEM y la hidroquímica (Itasca, 2019). Los procesos hidrogeoquímicos asociados a las infiltraciones se detallan más adelante en este trabajo.

Itasca (2019) estima una recarga natural desde el noreste con un promedio de 0,36 l/s. Mientras que, para los aportes antropogénicos, desde el depósito de relaves se estima un flujo promedio de 4,4 l/s y de 0,7 l/s desde el sector de piscinas, en particular de la piscina ICV.

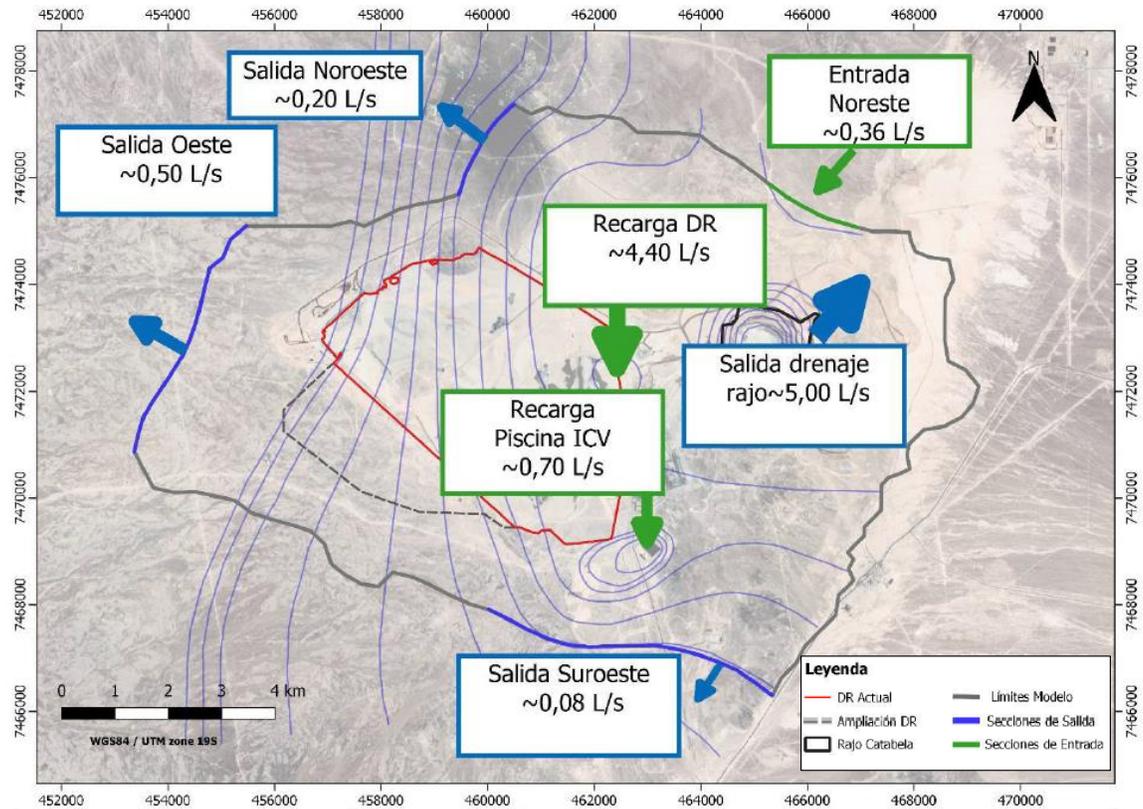


Figura 4.4: Balance hídrico. Modificado de Itasca (2019).

SALIDAS

Itasca (2019) define dos mecanismos de salida, uno asociado al agua drenada y evacuada desde el rajo minero y otro asociado a flujos de agua subterránea que salen naturalmente del área de faena SGSCM hacia el noroeste, oeste y suroeste.

El agua extraída del rajo tiene su origen asociado al drenaje del almacenamiento propio del acuífero, lo que se evidencia en el descenso de los niveles freáticos en el entorno próximo del rajo, cuyo caudal de descarga es estimado en 5 l/s, mayor a los 0,36 l/s de recarga desde el noreste.

Se definen 3 salidas naturales de flujo subterráneos, hacia el noreste, oeste y sur, las cuales coinciden con las direcciones de flujo mostradas en el mapa de piezometría. Se estima un caudal promedio de $1,7 \times 10^{-1}$ l/s hacia el noroeste, de $5,5 \times 10^{-1}$ l/s hacia el oeste y de $8,1 \times 10^{-1}$ l/s hacia el sur. Estos caudales se detallan en la tabla 4.3.

Como el balance hídrico es la sumatoria de entradas y salidas al acuífero, en base a los datos presentados se estima un exceso de salida por 0,31 l/s, lo que se refleja en el descenso de nivel freáticos en el rajo minero. El valor presentado es solo una aproximación del comportamiento de las aguas subterráneas.

Tabla 4.3. Caudales máximos, mínimos y promedios estimados para las recargas, salidas y balance hídrico del acuífero de faena Sierra Gorda (Itasca, 2019).

	Componente	Caudal_{min}(m/d)	Caudal_{max}(m/d)	Caudal_{promedio} (m/d)
Recarga	Flujo lateral noreste	4×10^{-5}	5,6	0,36
	Depósito de relaves	$4,1 \times 10^{-4}$	$6,02 \times 10^1$	4,41
	Piscina ICV	$6,7 \times 10^{-5}$	9,3	$7,2 \times 10^{-1}$
Salidas	Drenaje del rajo	0	6	5
	Noroeste	$1,6 \times 10^{-5}$	2,6	$1,7 \times 10^{-1}$
	Oeste	$5,4 \times 10^{-2}$	8,6	$5,5 \times 10^{-1}$
	Suroeste	$7,8 \times 10^{-5}$	12,5	$8,1 \times 10^{-1}$
Balance hídrico	Entradas - salidas	$4,41 \times 10^{-4}$	$5,66 \times 10^1$	$-3,18 \times 10^{-1}$

4.2 FAENA SPENCE

4.2.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Se definen las siguientes unidades hidrogeológicas en los sectores de las instalaciones y del depósito de relaves de faena Spence. La tabla 4.4 presenta las permeabilidades y espesores estimados de cada unidad (Arcadis, 2015).

Unidad 1: Depósitos coluviales superiores (UH-1)

Porción superior del acuífero compuesta principalmente por gravas y arena de grano grueso a fino con contenidos de arcilla y limo, como también arenas limosas y gravosas. Presenta porosidad primaria, con una permeabilidad promedio de $1,29 \times 10^{-1}$ m/d, lo que la convierte en la unidad más permeable del sistema hidrogeológico de faena Spence.

Esta unidad se distribuye en toda la minera presentando una potencia entre 10 m a 90 m. En la zona de las instalaciones de Spence, esta unidad no se encuentra saturada, a excepción del sector suroeste en donde se han detectado pocos metros de saturación. Por otro lado, en Pampa Lina esta unidad sedimentaria tiene un espesor saturado de 10 m a 30 m.

En el área del depósito de relaves la UH-1 se presenta no saturada, con un espesor limitado hacia el sur, pero hacia el norte aumenta su potencia.

Unidad 2: Capa de limo arenoso y arcilla (UH-2)

Dispuesta bajo la UH-1, esta unidad está constituida por capas alternantes de limo arenoso y arcilla que dan origen a un acuitardo. Tiene porosidad primaria, y una permeabilidad promedio de $2,21 \times 10^{-3}$ m/d. El contraste de permeabilidad con la unidad 1 permite que la UH-2 sea una barrera para el flujo vertical, generando un aislamiento entre los depósitos coluviales superiores (UH-1) y los depósitos aluviales inferiores (UH-3).

La UH-2 se distribuye únicamente en la zona de las instalaciones de Spence y Pampa Lina, donde se presenta continua con una potencia de 18 m a 40 m y parcialmente saturada hacia el suroeste del rajo. Se descarta su presencia en el área del depósito de relaves.

Unidad 3: Depósitos aluviales inferiores (UH-3)

Subyace a la UH-1 y/o UH-2. La componen capas de arenas gravosas y gravas arenosas, con contenidos variables y menores de limo y arcilla. La porosidad primaria le otorga una permeabilidad promedio de $2,59 \times 10^{-1}$ m/d, evidenciando una menor permeabilidad que la UH-2.

Esta unidad no se registra en la zona del depósito de relaves, pero si en los sectores de las instalaciones de Spence y Pampa Lina, en donde destaca por ser el acuífero principal y encontrarse confinado por la UH-2.

En el área de las instalaciones se presenta saturada o seca, con un espesor saturado máximo de 32 m. Mientras que, en Pampa Lina, tiene espesores saturados que varían de 34 a algo más de 80 m.

Unidad 4: Roca fracturada y meteorizada (UH-4)

Esta unidad es compuesta por rocas sedimentarias, volcánicas y pórfidos, se distribuye en toda la minera Spence bajo la UH-1 y/o UH-3, con una potencia que varía entre los 10 m a 60 m. La UH-4 se subdivide en dos unidades más específicas producto de la porosidad y permeabilidad.

- a) Rocas sedimentarias (UH-4a): Compuesta por areniscas y conglomerados con fangolitas y rocas calcáreas, con una permeabilidad promedio de $4,53 \times 10^{-2}$ m/d, producto de la porosidad primaria y secundaria que la caracteriza. El espesor de esta subunidad es de 10-60 m.
- b) Rocas volcánicas y plutónicas (UH-4b): Está conformada por andesitas con un tramo superior fracturado y/o meteorizado, que se dispone bajo la UH-1, UH-3 y/o UH-4a, con una permeabilidad promedio de $1,173 \times 10^{-2}$ m/d. En la zona de las instalaciones se encuentra muy fracturada, con un espesor de 2 m a 60 m y con presencia de alteración argílica que produce un sellado total o parcial de las fracturas, reduciendo la conductividad hidráulica. En el sector del depósito de relaves tiene potencias entre 15 m y 50.

Unidad 5: Unidad de roca fresca (UH-5)

Unidad compuesta principalmente por rocas volcánicas (andesitas) y, en menor medida, rocas sedimentarias y pórfidos poco o muy poco fracturados que subyacen a la UH-4. Si bien la litología es la misma que la UH-4, la UH-5 se caracteriza por presentar una menor conductividad hidráulica, con una permeabilidad promedio de $4,35 \times 10^{-3}$ m/d.

La UH-5, correspondiente al basamento, se distribuye en toda la faena de Spence y su espesor está reconocido hasta la profundidad máxima de los sondajes realizados. En el área del rajo se asocia a las zonas de sulfuros hipógenos con roca competente y fracturas que suelen estar cerradas o parcialmente cerradas. En el sector del depósito de relaves tiene valores de permeabilidad muy baja dando origen a un acuitardo o acuícludo.

Tabla 4.4. Permeabilidades (K) y espesores estimados de las unidades hidrogeológicas en las instalaciones y sector del depósito de relaves de faena Spence (Arcadis, 2015).

Unidad	K _{min} (m/d)	K _{max} (m/d)	K _{promedio} (m/d)	Espesor estimado (m)
UH-1	$8,64 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^2$	$1,29 \times 10^{-1}$	10-90
UH-2	1×10^{-4}	$4,32 \times 10^{-3}$	$2,21 \times 10^{-3}$	18-40
UH-3	$8,64 \times 10^{-4}$	$5,18 \times 10^{-1}$	$2,59 \times 10^{-1}$	34-80
UH-4a	$4,32 \times 10^{-3}$	$8,64 \times 10^{-2}$	$4,53 \times 10^{-2}$	10-60
UH-4b	$1,73 \times 10^{-5}$	$3,46 \times 10^{-2}$	$1,173 \times 10^{-2}$	2-60
UH-5	$6,91 \times 10^{-5}$	$8,64 \times 10^{-3}$	$4,35 \times 10^{-3}$	-

4.2.2 PIEZOMETRÍA Y DIRECCIONES DE FLUJO

Condiciones preoperacionales:

En la figura 4.5 se presenta la piezometría preoperacional del año 2004 de faena Spence, la cual fue extraída y modificada de Arcadis (2015). El período previo a la actividad minera solo estudia el sector de las instalaciones de Spence, por lo que no se considera piezometría en el área del depósito de relaves.

La piezometría revela en las instalaciones de Spence una dirección general de flujo noreste a suroeste, con cotas que varían entre los 1580 m.s.n.m., hacia el oeste, y 1720 m.s.n.m., hacia el noreste. Pero, a medida que el flujo se aproxima al sector centro, sur y hacia la zona de Pampa Lina, adquiere una dirección preferencial de este a oeste. Al noroeste de las instalaciones el flujo de agua adquiere una componente con dirección hacia el noroeste.

Los gradientes hidráulicos suelen ser bajos, excepto hacia el noroeste de las instalaciones y en las cercanías de Pampa Lina, en donde los niveles se presentan alterados por bombeos producidos por el campo de pozos de la Compañía Minera Cerro Dominador. Además, la profundidad del agua subterránea varía entre 34 a 80 m en la zona de las instalaciones de Spence.

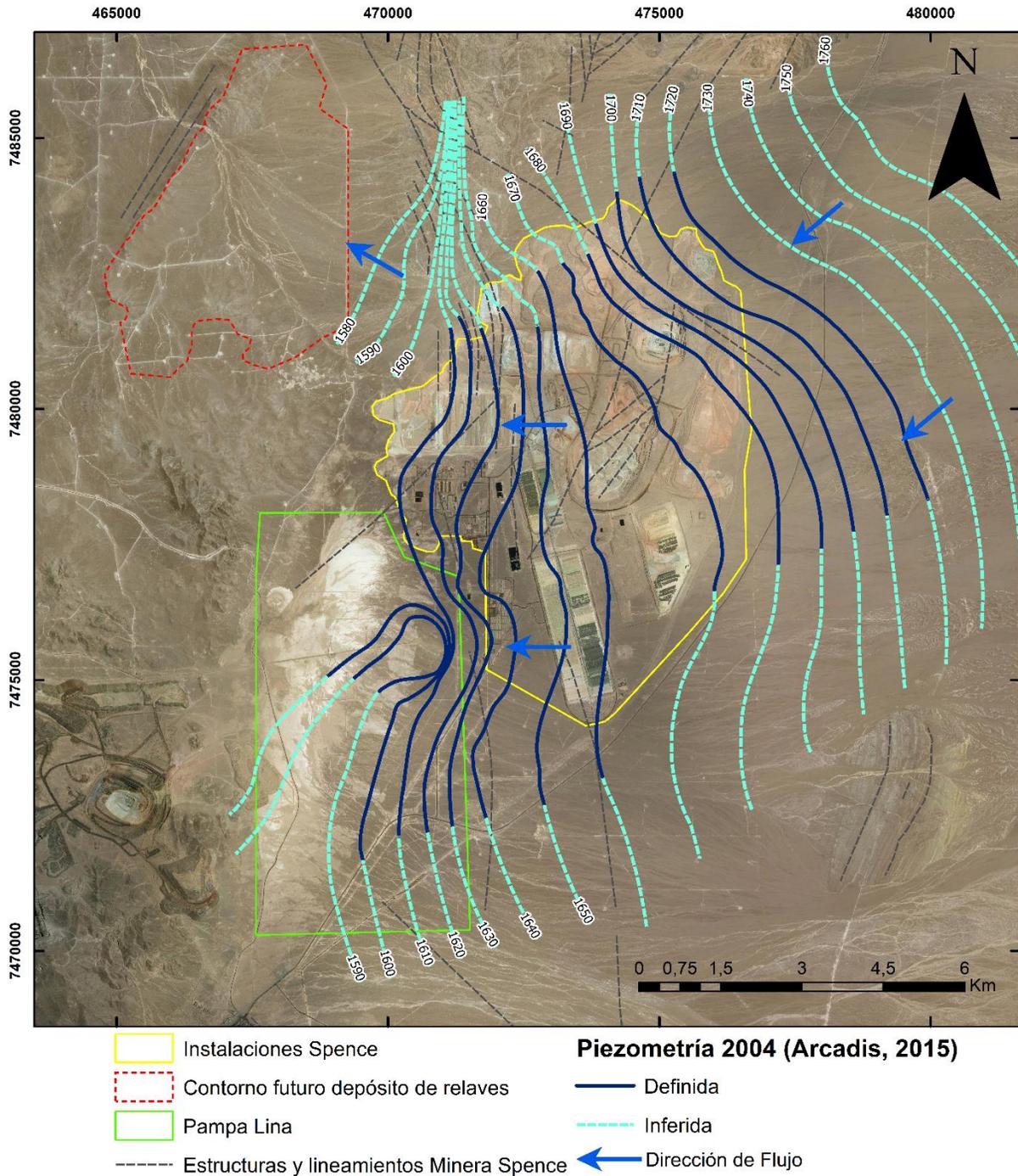


Figura 4.5: Piezometría preoperacional (año 2004) de faena Spence. Extraída y modificada de Arcadis (2015).

Condiciones operacionales:

La figura 4.6 muestra la piezometría realizada el año 2016 en minera Spence (Golder, 2017). Para su elaboración se utilizaron niveles de los sectores de las instalaciones y depósito de relaves de faena Spence y de faena Sierra Gorda. No son considerados niveles medidos en el Campo de Pozos Compañía Minera Cerro Dominador, por lo que no es posible observar el cono de depresión al este de Pampa Lina.

En el área de las instalaciones de Spence, la dirección general del flujo es noreste a suroeste, dirigiéndose hacia Pampa Lina, evidenciado por los niveles freáticos entorno a las cotas ~1720 m.s.n.m. y ~1650 m.s.n.m., respectivamente. Sin embargo, entorno al rajo, las cotas piezométricas se ven alteradas producto del cono de depresión, generado por el desagüe de la excavación minera, conforme la orientación noreste-suroeste de las estructuras (Golder, 2017).

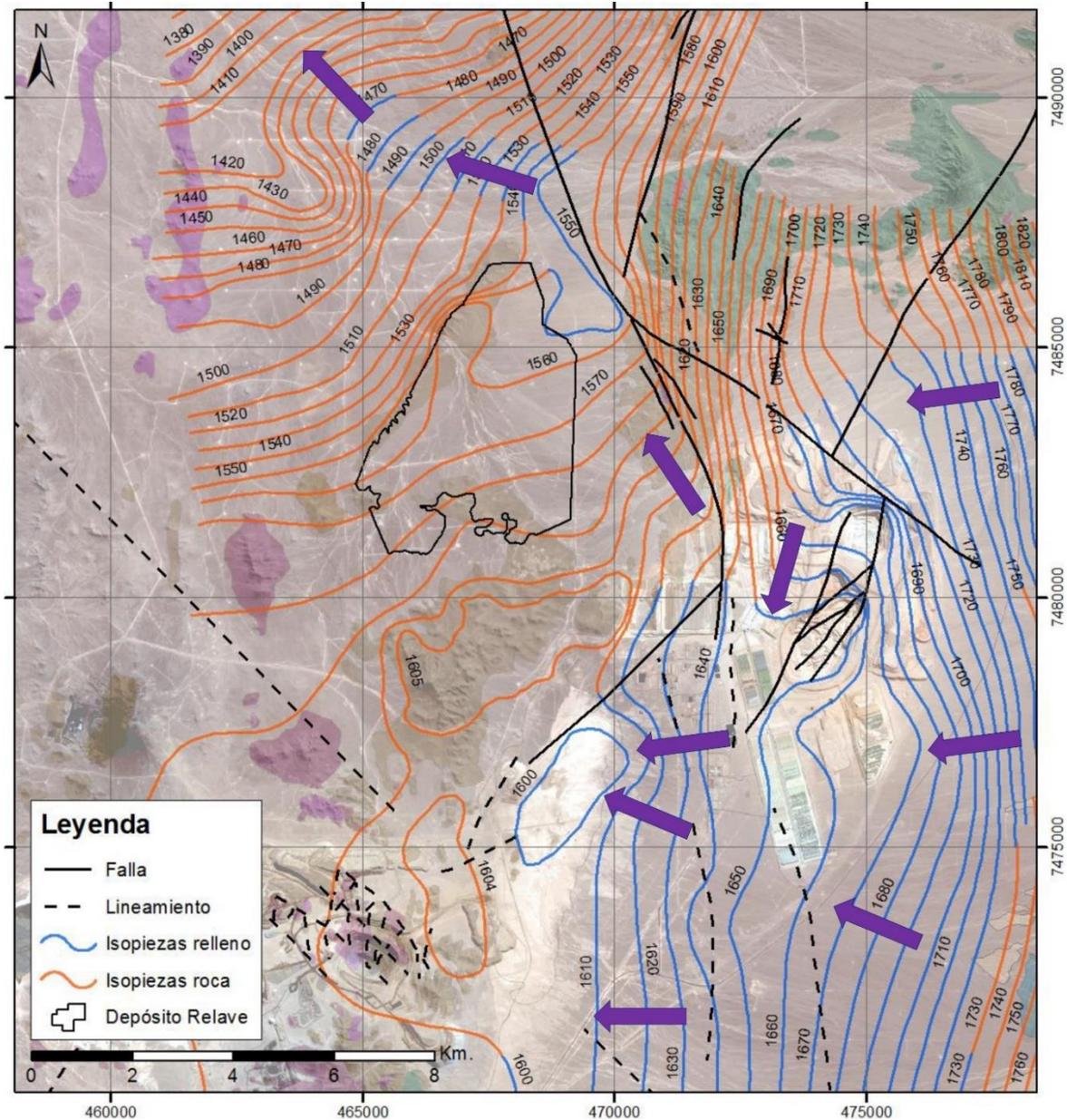


Figura 4.6: Piezometría del año 2016 de Faena Spence. Tomada de Golder (2017).

Hacia el oeste del rajo y en las cercanías de Pampa Lina, una parte del flujo de aguas subterráneas cambia su dirección a este-oeste. Se descarta un flujo desde los sedimentos de Pampa Lina hacia la roca existente en faena Sierra Gorda (Golder, 2017). Por otro lado, en la zona del depósito de relaves el flujo adquiere una dirección desde el sureste hacia el noroeste.

Los gradientes hidráulicos suelen ser bajos en el sector de las instalaciones, excepto hacia el sector norte del rajo, asociado a la estructura de orientación nor-noroeste (Golder, 2017), y en los alrededores de Pampa Lina, en donde el gradiente tiende a aumentar. En esta última zona se asocian a los bombeos producidos por pozos de terceros (Arcadis, 2015). Además, en las instalaciones, los niveles de agua se encuentran aproximadamente entre los 34-80m.

En el sector de las instalaciones de Spence y Pampa Lina se muestra que el agua subterránea se encuentra almacenada en el relleno sedimentario semiconsolidado. Mientras que, hacia la zona del depósito de relaves, el medio hospedante es roca de baja permeabilidad, siendo el agua almacenada en fracturas y/o discontinuidades.

Golder (2017) propone una conexión hidráulica, entre la zona del rajo y del depósito de relaves, por medio de la estructura con orientación nor-noroeste situada al oeste del rajo. Esta discontinuidad facilita un flujo, en esta dirección, desde el relleno sedimentario de las instalaciones hacia la roca del depósito de relaves. Con la excepción de este caso, no se ha evidenciado, hasta el momento, otra conexión entre el agua albergada en el relleno sedimentario y la roca.

4.2.3 BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico presentado es el realizado por Arcadis en el EIA Minerales Primarios Minera Spence (Arcadis, 2015). Este se calcula como la diferencia entre la suma de las entradas y suma de las salidas al sistema de agua subterráneas. La figura 4.7 muestra esquemáticamente las entradas y salidas del acuífero.

ENTRADAS

Se descarta una recarga directa asociada a precipitaciones debido al clima de aridez extrema en el cual esta inserta la faena Spence, con bajas tasas de precipitación y altas de evaporación. Tampoco se consideran recargas antrópicas provenientes desde los botaderos de ripios y estériles.

La principal recarga natural al acuífero de Spence es efectuada por flujos laterales de agua subterráneas provenientes desde el este, en donde se estima un flujo de recarga de 0,34-8,5 l/s que circula principalmente por la UH-3 y UH4b (Arcadis 2015).

SALIDAS

Las salidas naturales del agua subterránea ocurren hacia el noroeste y suroeste de la minera Spence. En el primer sector de descarga el recurso hídrico circula por la UH-4 y se estiman caudales entre 0,1-1,6 l/s. Mientras que, en la segunda zona se estiman caudales entre 0,3-7 l/s en las UH-1 y UH-3, consistente con mayores permeabilidades (Arcadis, 2015).

Por otro lado, también es posible encontrar salidas antrópicas relacionadas a extracciones de agua subterránea en pozos de producción en Pampa Lina y pozos de drenaje en el rajo de Spence. En el primer sector, se estima un caudal de explotación histórico entre los 3,2 y 6,6 l/s que va

disminuyendo con el tiempo. En el área del rajo se han determinado caudales de bombeo entre 0,5 y 1,1 l/s (Arcadis, 2015).

Por último, se considera un caudal de salida entre 8 a 10 l/s que está relacionado al agua que ingresa al rajo durante la profundización, por lo que se producen pérdidas de agua por evaporación de la superficie y subsuperficie, como también extracciones y acumulaciones superficiales de agua (Arcadis, 2015).

El balance hídrico se mostraba en equilibrio en el período preoperacional. Sin embargo, las operaciones mineras evidencian un balance negativo.

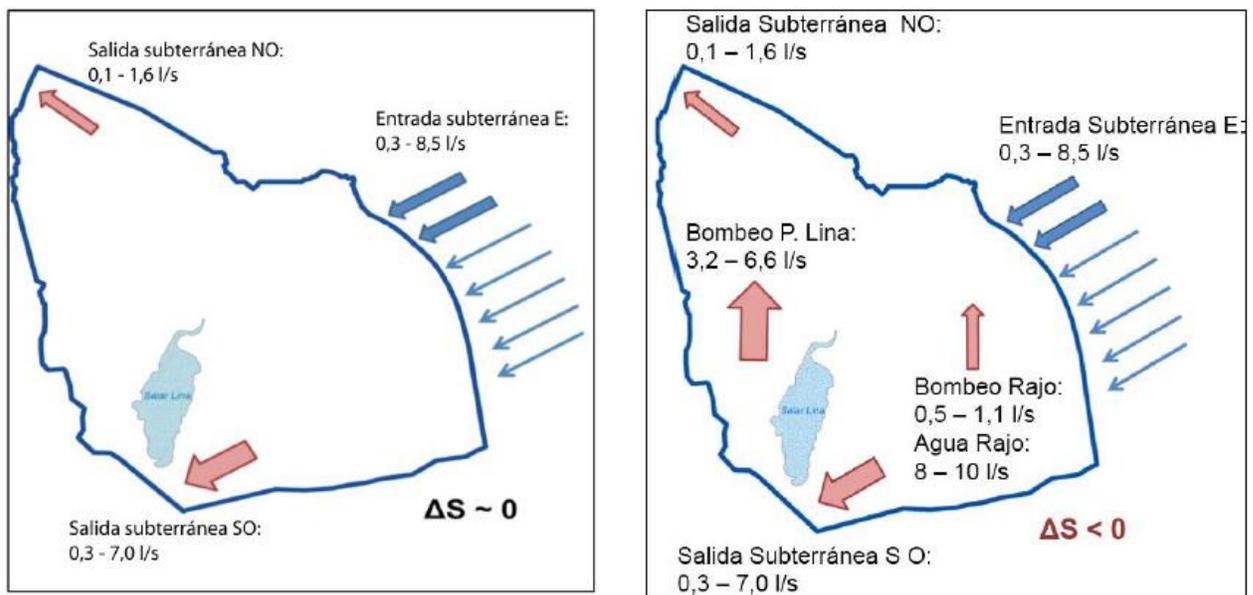


Figura 4.7 Recarga y descarga del acuífero de fauna Spence. A la izquierda se muestran las condiciones preoperacionales y la derecha el período de explotación. Tomada de Arcadis (2015).

4.3 FAENA CENTINELA

4.3.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

A continuación, se describen las unidades hidrogeológicas definidas en la línea de base de hidrogeología del EIA Proyecto Óxidos Encuentro (GAC, 2012).

Unidad 1: Sedimentos y roca de menor consolidación (UH-1)

Esta unidad es la de mayor permeabilidad, con valores entre 10^{-3} y 10^{-1} m/d, se subdivide en una parte superior de depósitos sedimentarios no-consolidados o semiconsolidados y otra inferior de roca fracturada y meteorizada. Estas dos subunidades se presentan interconectadas hidráulicamente, comportándose como un solo acuífero, principalmente libre. Sin embargo, producto del grado de consolidación de los sedimentos y del grado de fracturamiento y meteorización de las rocas, es posible encontrar confinamientos locales.

Los depósitos sedimentarios se componen de bloques, gravas, arenas y limos, con algunas intercalaciones de cenizas volcánicas, el grado de consolidación depende de la edad del depósito. El espesor de esta subunidad varía entre ~80 a ~150 m. Pero, se han detectado dos depresiones de elongación norte-sur que se asocian a un graben. La primera, situada al oeste del POE se extiende hacia el norte y la profundidad máxima perforada ha sido de 583 m en el piezómetro DP-3. Mientras que la segunda se localiza al este del POE con profundidades entre 150 a 200 m en el piezómetro DP-8.

En el sector del relave Esperanza, se ha registrado la UH-1 con espesores entre 300 y 500 m.

Bajo los depósitos sedimentarios, la roca fracturada y meteorizada tiene un espesor entre 30 a 50 m. Esta unidad no es homogénea, dado que el grado de fracturamiento y meteorización dependen del tipo de roca y estructuras, entre otros.

La UH-1 se distribuye en todo el sector del POE, encontrado la superficie piezométrica cercana al contacto grava-roca, con variaciones locales producto de la topografía de este contacto. Además, las depresiones mencionadas se encuentran saturadas.

Unidad 2: Rocas sedimentarias de mayor consolidación (UH-2)

Se compone principalmente de rocas sedimentarias del tipo bloque, gravas, arenas y limos, de mayor consolidación que la unidad anterior, e intercaladas con tobas riolíticas. Estas últimas alcanzan potencias considerables hacia el techo de la unidad. Las permeabilidades de esta unidad se estiman entre 10^{-5} y 10^{-3} m/d.

Dado que la UH-2 no es homogénea, es posible que existan confinamientos de estratos saturados que presentan mayor grado de fracturación o menor grado de consolidación, debido al lento avance de los flujos subterráneos.

No se ha determinado un espesor para esta unidad, pero se han encontrado potencias mayores a 100 m. Los niveles profundos tienen poco espesor saturado.

Esta unidad es posible encontrarla aflorando hacia el oeste y noroeste del POE como una barrera hidráulica producto de diferencias de permeabilidades.

Unidad 3: Basamento (UH-3)

Unidad compuesta por rocas volcánicas e intrusivas de mayor calidad geotécnica, por lo que se caracteriza por tener permeabilidades muy pequeñas, generando acuíferos fracturados de nula a muy baja importancia hidrogeológica. Zonas de mayor fracturación o estructuras, podrían dar paso a flujos lentos y limitados.

La UH-3 se dispone bajo la UH-2 y se estima una permeabilidad entre 10^{-5} y 10^{-3} m/d, no siendo posible limitar la potencia de esta unidad.

4.3.2 PIEZOMETRÍA Y DIRECCIONES DE FLUJO

La figura 4.8, extraída del EIA Proyecto Óxidos Encuentro (GAC 2012), muestra la piezometría, direcciones de flujo y distribución de unidades hidrogeológicas en faena Centinela sector POE. La fecha de construcción de este mapa es entre el 2010 y 2011 con la utilización de 128 sondajes que midieron nivel piezométrico.

Para este trabajo, no fue posible encontrar una piezometría con condiciones del período operacional y que involucre a toda la faena Centinela.

Las aguas subterráneas ingresan al sistema hidrogeológico desde el sector este, donde se localizan los sectores con mayor gradiente hidráulico y altitud. El flujo continúa con una dirección general hacia el oeste, circulando a través de la UH-1 y dando origen a un acuífero libre que es influenciado por la morfología del contacto grava-roca y la presencia de posibles paleocanales, produciendo cambios locales en la dirección del flujo.

Hacia el oeste, donde se localiza la depresión de ~200 m de profundidad (DP-8), el gradiente hidráulico tiende a disminuir y solo la parte superior del flujo continúa con dirección hacia el oeste por medio de paleocanales, el resto del agua se almacena en el relleno del graben.

En el límite oeste del sector de estudio se encuentra alzada la UH-2 y UH-3, formando una barrera hidráulica de orientación norte-sur. Por lo que el flujo de agua se ve obstruido por las rocas de muy baja a nula permeabilidad de estas unidades. Debido a esto, el flujo subterráneo es redireccionado hacia el noroeste, donde se localiza el relave Esperanza, se descarta un flujo con componente hacia el sur dado que en esta dirección aflora la UH-3, por lo que el flujo en este sentido se encuentra bloqueado.

Un escaso flujo de agua subterránea continúa con dirección oeste a través de las UH-2 y UH-3, pero reduciendo su velocidad y limitando su volumen, dando origen a acuíferos confinados.

Los flujos más lentos se localizan hacia el norte, cercano al rajo minero, en donde es posible localizar un acuífero fracturado en la UH-3. Además, se ha detectado alteración argílica con presencia de arcillas, lo que reduce la permeabilidad y modifica el flujo de manera local.

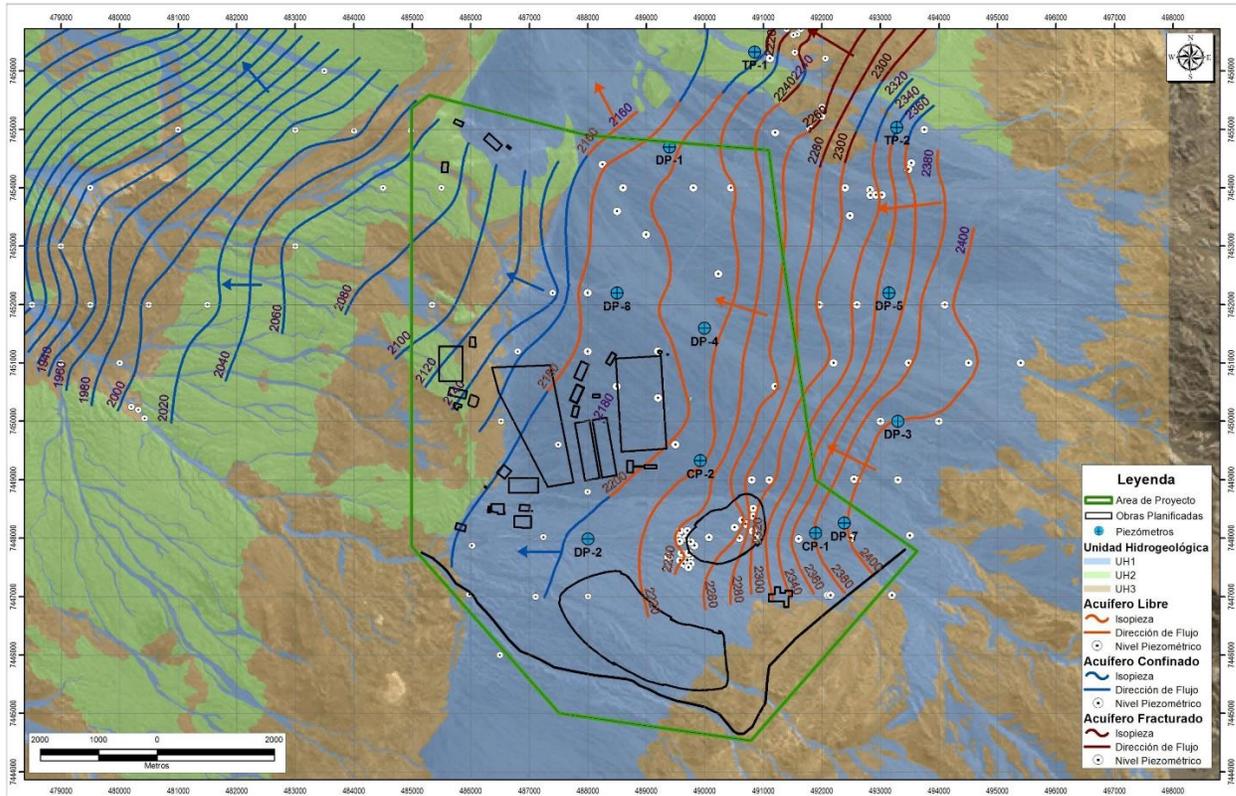


Figura 4.8: Piezometría y distribución de unidades hidrogeológicas de faena Centinela sector POE. Tomada de GAC (2012).

4.3.3 BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico presentado es el realizado por Gestión Ambiental Consultores en el EIA Desarrollo Minera Centinela (GAC, 2015). Este se calcula como la diferencia entre la suma de las entradas y suma de las salidas al sistema de agua subterráneas.

No fue posible, para este trabajo, acceder a información actualizada del balance hídrico de la zona de estudio. Los datos de caudales de entrada y salida corresponden a los proporcionados en la Adenda del EIA Desarrollo Minera Centinela (GAC, 2015)

ENTRADAS

La principal recarga al acuífero de faena Centinela es producto del flujo subterráneo entrante por las quebradas de la UH-1 y, en menor medida, por niveles saturados de mayor fracturación de las UH-2 y UH-3, provenientes desde las cuencas altas del sector este. Se estima una recarga a la zona del POE de 10 l/s.

La baja precipitación, sedimentos de baja permeabilidad y la profundidad de la zona saturada, dan cuenta de que no existe infiltración de agua lluvia al sistema subterráneo. Aunque, no se descarta una recarga proveniente de eventos lluviosos extremos, sin embargo, el volumen sería mínimo.

Los graben de dirección norte-sur localizados al este y oeste del POE, se consideran zonas de almacenamiento de agua. El amplio espesor sedimentario sería llenado de agua hasta rebalsar, permitiendo que escurra agua por el contacto grava-roca y por los potenciales paleocanales localizados en la UH-1.

SALIDAS

Las salidas de los flujos subterráneos de minera Centinela son producto de flujos subterráneos hacia el noroeste, en el sector del relave Esperanza, y por escurrimientos hacia el oeste a través de niveles confinados de la UH-2 y UH-3.

Para la zona se considera un régimen estacionario e inexistencia de otras descargas, por lo que se estima que el caudal de descarga es igual a la recarga del sistema, que es de 10 l/s (GAC, 2015).

5 PUNTOS DE MUESTREO

En esta sección se exponen los puntos de muestreo utilizados en las faenas mineras Sierra Gorda, Spence y Centinela, detallando su ubicación, características y las mediciones realizadas. Además, se describe la geología del subsuelo de minera Sierra Gorda asociada al depósito de relaves, por medio del mapeo e interpretación de sondajes.

5.1 UBICACIÓN, CARACTERÍSTICAS Y MEDICIONES

5.1.1 MINERA SIERRA GORDA

Los puntos de muestreo utilizados con mediciones del acuífero de la faena Sierra Gorda corresponden a los pozos CB-4, CB-5, CB-6, CB-7R, CB-8R, CB-9, CB-10 y CB-11R. Además, de los sondajes abiertos CON-10, CON-15, CON-16, QSG08-402 (QS-402), QSG08-431 (QS-431) y QSG08-493(QS-493). Ver figura 5.1 para observar la distribución espacial de estos puntos.

Los pozos CB-2, CB-3, CB-12R y el sondaje abierto QSCSG6-237 (QS-237) se sitúan al este del distrito Sierra Gorda, en el sector de Pampa Lina. Si bien, la minera Sierra Gorda es la encargada de monitorear estos puntos como parte del compromiso ambiental adquirido en el estudio de impacto ambiental, las muestras de agua no se consideran parte del acuífero de faena Sierra Gorda. Esto, por el set de estructuras con orientación N-S que actúan como una barrera del flujo, desconectando el acuífero del sector de Pampa Lina con el de Sierra Gorda mismo (VAIGS, 2014). De todas maneras, se utilizan las mediciones obtenidas en estos puntos para comparar la calidad de las aguas subterráneas de Pampa Lina con las de faena Sierra Gorda.

Todos los puntos de monitoreo mencionados cuentan con datos del nivel freático y calidad del agua subterránea, los cuales fueron proporcionados por Ruco. Para la calidad del agua, se consideran datos medidos en terreno y en el laboratorio de los parámetros fisicoquímicos temperatura, pH, conductividad eléctrica y TDS, excepto por la temperatura que solo tiene medición en terreno. Mientras que el monitoreo de la química del agua involucra a los cationes y aniones Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO₃, SO₄, F, N-NO₃, NO₃, Ag, Al, Cianuro, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Sr, V y Zn, además de medidas de la alcalinidad (como HCO₃). Estas medidas son registradas en totales.

El registro de datos de niveles freáticos y calidad del agua subterránea abarca desde el año 2008 hasta el año 2020. Los datos del nivel freático son realizados de manera mensual. Mientras que los de la calidad de agua son tomados de manera trimestral hasta marzo del año 2016, fecha desde la cual las mediciones son hechas de manera mensual hasta finales del año 2019; para el año 2020 se consideran mediciones trimestrales hasta abril. El comienzo de la toma de muestras en cada sector varía en base a la instalación de cada punto de monitoreo.

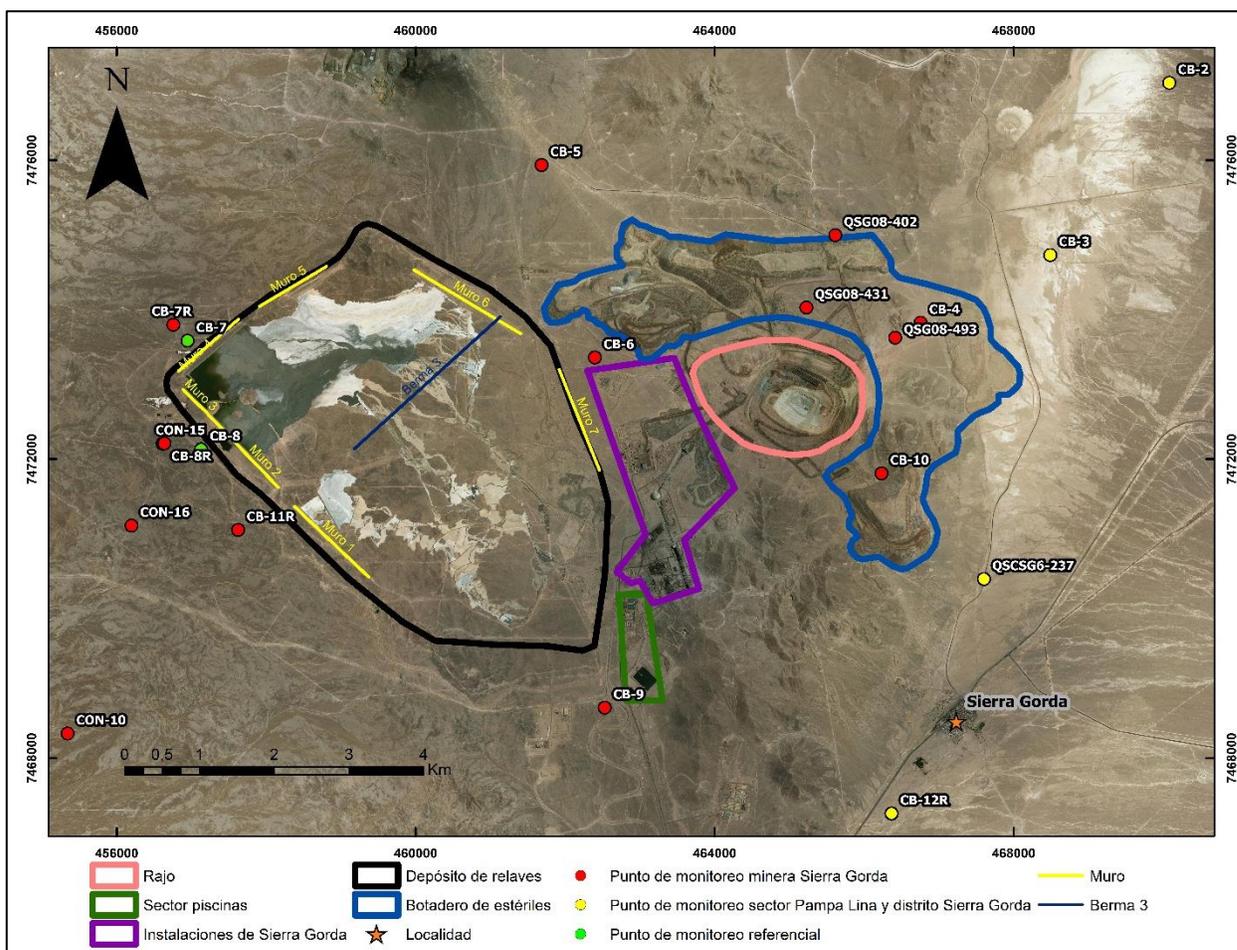


Figura 5.1: Ubicación de puntos de monitoreo e instalaciones de minera Sierra Gorda

Inicialmente, para el estudio de impacto ambiental realizado por Golder (2010), se utilizaron 16 sondajes abiertos verticales como puntos de muestreo con mediciones desde julio del 2008. Sin embargo, producto del avance del rajo, solo se encuentra actualmente operativo el punto QS-237, las perforaciones QS-402 y QS-493 presentan mediciones hasta enero y febrero del 2019, respectivamente, ya que su acceso se encuentra obstruido por el avance del botadero de estériles.

Posteriormente, luego de ser aprobado el Proyecto Sierra Gorda, se decreta en la RCA 126/2011 que se debe instalar una red de monitoreo de 12 pozos tipo Casagrande correspondiente a CB-1, CB-2, CB-3, CB-4, CB-5, CB-6, CB-7, CB-8, CB-9, CB-10, CB-11 y CB-12. Estos puntos fueron instalados entre el inicio del año 2011 y comienzo del año 2013, por lo que cuentan con datos desde estas fechas.

Los pozos CB-1, CB-11 y CB-12 no se utilizan en este trabajo, dado que se encuentran secos a lo largo del tiempo al no interceptar el nivel freático. Por otro lado, los puntos CB-7 y CB-8, situados al oeste del depósito de relaves, solo son utilizados de manera referencial, ya que inicialmente se encontraban secos (solo registrando mediciones del agua utilizada en la perforación de los pozos) debido a que su profundidad no llega al nivel freático. Luego, posterior a la descarga de relaves, estos pozos presentan mediciones de agua que son producto de infiltraciones desde este depósito antrópico, por lo que no representan la calidad de agua del acuífero de Sierra Gorda.

Entre los años 2015 y 2016 se realizan los sondeos abiertos de uso interno CON-10, CON-15, CON-16 y QSG08-431 (QS-431). Además, el año 2017 se instalan los pozos CB-1R, CB-7R, CB-8R, CB-11R y CB-12R para reemplazar a sus homónimos y de esta manera obtener muestreos de la calidad del agua y nivel estático del acuífero de faena Sierra Gorda en sus respectivas ubicaciones. Los pozos R se incluyen al compromiso ambiental con las autoridades producto de la RCA 165/2018.

La tabla 5.1 presenta la ubicación y características de los pozos utilizados en este trabajo.

Tabla 5.1. Características de los puntos de monitoreo de faena Sierra Gorda y sector Pampa Lina.

Punto monitoreo	Coordenada UTM		Cota pozo (m.s.n.m.)	Registro de datos		Z* (m)	Tipo
	N	E		Desde	Hasta		
CB-2*	7477035,00	470082,00	1629,06	02-2013	04-2020	50	C
CB-3*	7474732,00	468490,00	1628,08	02-2013	04-2020	52	C
CB-4*	7473826,00	466755,85	1645,23	11-2012	04-2020	350,6	C
CB-5*	7475936,98	461685,88	1656,34	02-2011	04-2020	80	C
CB-6*	7473360,95	462399,93	1660,09	02-2013	04-2020	308,3	C
CB-7*	7473584,10	456949,23	1600,80	02-2013	-	125,3	C
CB-7R*	7473800,00	456759,00	1592	07-2017	04-2020	250	C
CB-8*	7472130,46	457131,45	1607,75	02-2011	-	135,3	C
CB-8R*	7472207,00	456615,00	1594,96	07-2017	04-2020	250	C
CB-9*	7468675,03	462529,88	1678,64	02-2011	04-2020	182	C
CB-10*	7471.809,04	466233,73	1678,64	11-2012	04-2020	350,3	C
CB-11R*	7471053,00	457625,00	1614,89	07-2017	04-2020	250	C
CB-12R*	7467014,00	465486,00	1599	07-2017	04-2020	250	C
CON-10**	7468329,03	455345,93	1572	03-2016	07-2019	310	SA
CON-15**	7472210,00	456638,91	1526	12-2015	06-2019	386	SA
CON-16**	7471111,01	456199,92	1570	03-2016	07-2019	332	SA
QSG08-402**	7474997,43	465615,78	1649	07-2008	01-2019	300	SA
QSG08-493**	7473626,16	466416,06	1659	07-2008	07-2019	170	SA
QSCSG6-237**	7470396,00	467602,00	1624	07-2008	07-2019	60	SA
QSG08-431**	7474029,94	465228,47	1670,46	04-2016	07-2019	174	SA

Z*= Profundidad de punto de medición.

C= Pozo tipo Casagrande.

SA= Sondaje Abierto.

*= Red de monitoreo comprometida con la RCA.

**= Uso interno.

Los datos asociados a los puntos de control de las aguas preoperacionales fueron obtenidos del EIA del Proyecto Spence (Knight Piésold, 2002), en donde se realizaron muestreos en febrero y julio del año 2000 con mediciones de la conductividad eléctrica, TDS, pH, alcalinidad, Cl, F, SO₄, NO₃, Al, As, Ba, Be, Bi, B, Cd, Ca, Cu, Co, Cr, Fe, Li, Mg, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Pb, P, P, K, Se, Si, Na, Sr, Ta, Sn, Ti, V, Zn, tanto disueltos como totales.

Tabla 5.2. Características de los puntos de monitoreo instalaciones minera Spence.

Punto monitoreo	Coordenada UTM		Cota pozo (m.s.n.m.)	Datos obtenidos	
	N	E		Desde	Hasta
Pozo N-284	7480499	474902	1758	02-2000	07-2000
Pozo SRC 44	7480503	473500	1713	02-2000	07-2000
Pozo SRC 50	7479011	472500	1678	02-2000	07-2000
Pozo N-131	7481998	475003	1771	02-2000	07-2000
Túnel de exploración	7479861	474575	1745	02-2000	07-2000
Pozo CD	7473584	456949	1639	02-2000	07-2000
SPM-1	7484527	475980	1805.95	12-2012	12-2019
SPM-2	7478181	471644	1646.53	12-2012	12-2019
SPM-3	7481096	469757	1633.25	12-2012	12-2019
SPM-4	7482115	469421	1632.36	12-2012	12-2019
SPM-5	7483018	470008	1641.95	12-2012	12-2019
SPM-6	7480893	471558	1660.46	12-2012	12-2019
SPM-7	7480976	473577	1703.82	12-2012	12-2019
SPM-8	7482392	475814	1786.24	12-2012	12-2019
SPM-10	7479187	472500	1665.96	12-2012	12-2019
SPM-11	7478805	470523	1636.00	12-2012	12-2019
SPM-12	7477215	476037	1773.37	12-2012	12-2019
SPM-13	7477785	473970	1703.68	12-2012	12-2019
SPM-14	7476996	472021	1652.03	12-2012	12-2019
SPM-15	7475079	472119	1665.43	12-2012	12-2019
SPM-16	7474357	474351	1715.66	12-2012	12-2019
SPM-17	7473892	471894	1667.88	12-2012	12-2019
SPM-18	7472882	470090	1642.15	12-2012	12-2019
SPM-19	7479407	474895	1737.00	12-2012	12-2019
GTW-17	7479433	475089	1736.98	12-2012	12-2019

Los pozos con etiqueta SPM y el pozo GTW-17 son puntos de monitoreo asignados para el seguimiento ambiental de aguas subterráneas establecido en la RCA15/2004, por lo que cuentan con datos desde el año 2004. Sin embargo, para este estudio solo se obtuvieron a libre disposición en la plataforma de SNIFA, datos de esos pozos desde el año 2012 hasta el 2019 y un promedio de datos que abarca los años 2004, 2005 y 2006 obtenidos del EIA asociado a los minerales hipógenos (Arcadis, 2015).

Los puntos de muestreo SPM-1, SPM-2, SPM-6, SPM-8, SPM-9, SPM-10, SPM-11, SPM-13, SPM-14, SPM-15, SPM-16, SPM-17, SPM-18 y GTW-17, tienen mediciones trimestrales de la calidad del agua y mensuales del nivel freático. Por otro lado, los pozos SMP-7 y SMP-12 solo poseen mediciones mensuales del nivel freático dado que no se obtiene un volumen de extracción de agua suficiente para la caracterización química por la baja recuperación de su nivel. Se dejan fuera de este trabajo al pozo SPM-3, ya que se encuentra obstruido, y los pozos SPM-4 y SPM-5 que se encuentran secos desde el 2004. En la tabla 5.2 se muestran las características de los pozos.

Los parámetros fisicoquímicos medidos en el agua subterránea en estos pozos son pH, temperatura y conductividad eléctrica de terreno y laboratorio. Mientras que las mediciones de los elementos químicos corresponden Cl, SO₄, NO₃, HCO₃, alcalinidad (CaCO₃), Cu, As, K, Na, Mg, Ca, y Fe.

Finalmente, en el sector del futuro depósito de relaves, ubicado a ~10 km al norte de la faena de Sierra Gorda, se utiliza para este estudio a los pozos con etiqueta SPD y SPRC mostrados en la tabla 5.3. De ellos fue posible obtener mediciones puntuales, que involucra a solo un mes, de los años 2012, 2014, 2015 y 2016, que son los datos que se obtuvieron del EIA de ese proyecto (Arcadis, 2015) y su respectiva adenda.

Estos puntos de monitoreo cuentan con mediciones del nivel freático, aunque en ocasiones no son representativos dado que en el corto período monitoreado no logran el equilibrio, y de la calidad del agua, la cual considera los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura, conductividad eléctrica y TDS de terreno y laboratorio, y los iones Cl, SO₄, NO₃, nitrito, Cu, As, K, Na, Mg, Ca, HCO₃, Fe, F, Br, Li, Al, Si, Mn, Co, Rb, Sr, Mo, B y Zn; además se incluye alcalinidad (como CaCO₃).

Tabla 5.3. Características de los puntos de monitoreo asociados al depósito de relaves minera Spence.

Punto monitoreo	ID Alternativo	Coordenada UTM		Cota pozo (m.s.n.m.)	Datos obtenidos	
		N	E		Desde	Hasta
SPD1996*		7485096	463185	1574.2	2015	2015
SPD 2090	GD2	7485271	467157	1626	2012	2016
SPD 2120	GD4	7483284	469591	1625.4	2012	2016
SPD 2168	GD3	7486924	468927	1606.1	2012	2015
SPD 2200	GD5	7486417	465369	1566	2012	2012
SPD 2215	GD6	7482886	465104	1606.9	2012	2015
SPD 2235	GD1	7484215	466426	1638.1	2012	2016
SPRC 1027		7487140	465665	1563.7	2015	2016
SPRC 1592		7484570	468116	1592.3	2015	2016
SPRC 1602		7482823	467804	1609.1	2015	2015
SPRC 1617		7484742	465319	1583.6	2015	2015
SPRC 1632		7488269	469077	1618.1	2015	2016
SPRC 1653		7488155	463912	1452.4	2015	2015
SPRC 1664		7481324	466945	1641	2015	2016
SPRC 1741		7483979	463464	1589.8	2015	2016
SPRC 1957		7485015	462039	1582.6	2015	2016
SPRC 1983	GRC-03	7489084	462542	1531.5	2015	2016
SPRC 1984	GRC-04	7486205	462801	1576.1	2012	2015
SPRC 1997	GRC-01	7482705	470028	1639.8	2012	2015
SPRC 1998	GRC-02	7488589	467197	1575	2012	2016
SPRC 2000	GRC-05	7485790	466350	1573.4	2012	2016
SPRC 2001	GRC-06	7486637	467312	1581.4	2012	2015
SPRC 2843		7485584	469774	1653.2	2015	2016
SPRC 2849		7484246	459910	1566.2	2015	2016
SPRC 2851		7480848	461967	1629.7	2015	2016
SPRC 2856		7489576	462033	1523	2015	2015
SPD 2870	GD13	7480216	465059	1646	2016	2016
SPD 2864	GD14	7480841	470046	1642	2016	2016
SPD 2878	GD15	7481018	466907	1643.9	2016	2016
SPD 2869	GD8	7488537	465298	1555.7	2016	2016
SPD 2871	GD9	7488747	463590	1536.2	2016	2016

5.1.3 MINERA CENTINELA

Conforme la RCA 436/2016, la minera Centinela comprende los rajos Esperanza sur y Encuentro.

Los pozos considerados para este estudio en la faena Centinela son DP-1, DP-2, DP-3, DP-4, DP-5, DP-7, DP-8, TP-1, TP-2, PAB-01, PAB-02 y PAB-03 situados al sur, en el sector del Proyecto Óxidos Encuentro (POE). Además, se emplean los puntos de muestreo S-632, T-1, T-2, S-728, S-624, S-652 y S-705 en donde se encuentra actualmente el rajo Esperanza, y PM-1, PM-2 y PM-3 en el sector noroeste de la minera, aguas abajo del depósito de relaves. En la figura 5.3 se muestra la distribución de los puntos mencionados y en la tabla 5.4 sus características.

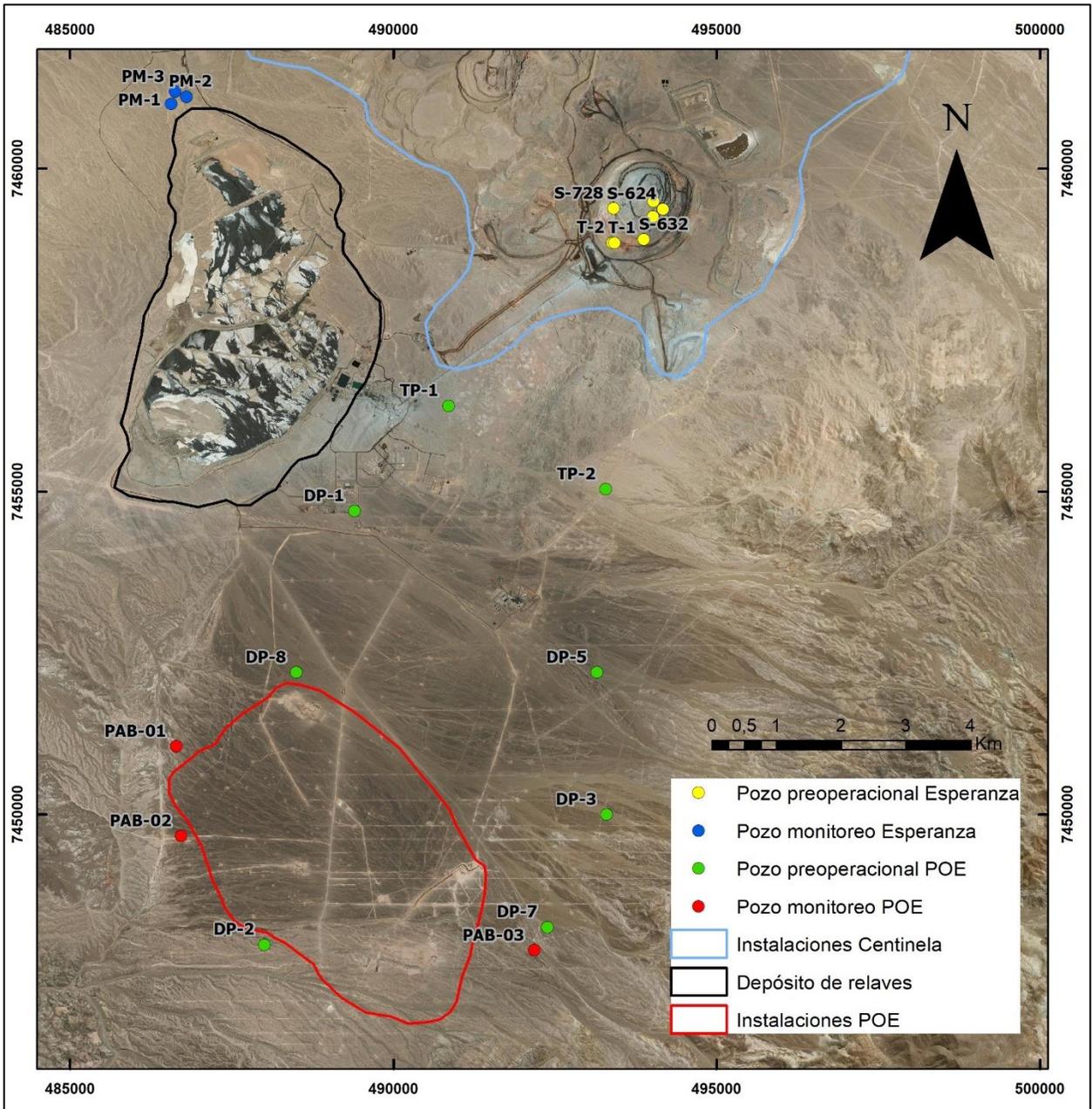


Figura 5.3: Ubicación de puntos de monitoreo minera Centinela.

Los puntos de muestreo S-632, T-1, T-2, S-728, S-624, S-652 y S-705 presentan mediciones preoperacionales de Ca, Na, Mg, K, SO₄, HCO₃, Cl, conductividad eléctrica, TDS y pH, realizadas en febrero, marzo y noviembre del año 2006. Estos datos fueron obtenidos del EIA del año 2008.

En los pozos preoperacionales DP-1, DP-2, DP-3, DP-4, DP-5, DP-7, DP-8, TP-1 y TP-2 se tomaron datos mensuales de la calidad del agua subterránea entre julio del 2011 y junio del 2012, los cuales se obtuvieron del estudio de impacto ambiental del año 2013 en el sector del Proyecto Óxidos Encuentro (POE). Los parámetros medidos fueron Conductividad eléctrica, TDS, alcalinidad (HCO₃), pH, Cl, F, SO₄, Sulfuro, N, Cr, SiO₂, Hg, Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, U, V, Zn. Solo los pozos TP-1 y DP-1 tienen mediciones anuales del nivel freático abiertas al público en la plataforma del SNIFA.

Tabla 5.4. Características de los puntos de monitoreo asociados a minera Centinela.

Punto monitoreo	Coordenada UTM		Cota (m.s.n.m.)	Datos obtenidos	
	N	E		Desde	Hasta
PAB-01	7451060	486640	2268	09-2014	12-2019
PAB-02	7449670	486720	2284	09-2014	12-2019
PAB-03	7447907	492178	2445	09-2014	12-2019
DP-1	7454701	489397	2261.74	07-2011	06-2012
DP-2	7447988	488006	2296.51	07-2011	06-2012
DP-3	7450004	493300	2436.17	07-2011	06-2012
DP-4	7451595	489995	2320.80	07-2011	06-2012
DP-5	7452203	493146	2410.37	07-2011	06-2012
DP-7	7448258	492384	2432.00	07-2011	06-2012
DP-8	7452201	488500	1887.30	07-2011	06-2012
TP-1	7456329	490852	2276.64	07-2011	06-2012
TP-2	7455039	493283	2381	07-2011	06-2012
S-632	7458905	493872	2336	02-2006	11-2006
T-1	7456329	490852	2317	02-2006	11-2006
T-2	7455039	493283	2319	02-2006	11-2006
S-728	7459386	493404	2316	02-2006	11-2006
S-624	7459375	494172	2343	02-2006	11-2006
S-652	7459498	494021	2341	02-2006	11-2006
S-705	7459258	494013	2340	02-2006	11-2006
PM-1	7461007	486560	2086	12-2013	12-2019
PM-2	7461115	486800	2082	12-2013	12-2019
PM-3	7461191	486620	2078	12-2013	12-2019

PAB-01, PAB-02 y PAB-03 son los puntos en los que se hace seguimiento ambiental trimestral de la calidad del agua y del nivel freático establecido en el EIA del POE el año 2013 y legalizado en la RCA 201/2013. Los datos fueron obtenidos de los informes entregados al SNIFA

en donde se presentan mediciones desde septiembre del año 2014. Los parámetros medidos corresponden a conductividad eléctrica, pH, temperatura, Al, As, Ca, Cl, Cu, Fe, Mn, Pb y SO₄.

Los pozos PM-1, PM-2 y PM-3 son las estaciones de monitoreo establecidas en la RCA 212/2008 y que cuentan con mediciones trimestrales de la calidad del agua y nivel freático desde el año 2013 hasta diciembre del 2019. Los datos fueron obtenidos del SNIFA y los parámetros monitoreados son temperatura, pH, conductividad eléctrica, TDS, Cl, HCO₃, SO₄, Ca, K, Mg, Na, Ag, Al, alcalinidad total, As, B, Ba, Be, Cd, CN, Co, Cr, Cu, F, Fe, Hg, Li, Mn, Mo, Ni, N-NO₃, Pb, Se, Sr, V, Zn.

5.2 GEOLOGÍA SUBTERRÁNEA DE PUNTOS DE MONITOREO EN FAENA SIERRA GORDA

Uno de los objetivos de este trabajo es estudiar los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en el acuífero de faena Sierra Gorda producto de las infiltraciones desde el depósito de relaves y sector de piscinas. Es por ello, que se recopila información acerca de la geología del subsuelo en los puntos de monitoreo cercanos a estas zonas. Dicho esto, se consideran de interés los pozos CB-5 y CB-6, que se sitúan en las zonas norte y noreste del tranque de relaves, y CB-9, ubicándose entorno al sector de piscinas, junto a los puntos CB-7R, CB-8R, CB-11R y CON-15, ubicados al oeste del tranque de relaves.

Todos los pozos mencionados se perforaron como sondajes verticales con el sistema aire reverso, por lo que la información geológica obtenida es a partir de muestras de roca triturada y, en consecuencia, no es detalle, por lo que no se precisan las fases minerales existentes más allá de las observadas en terreno. Para complementar la información, se añaden datos de algunos sondajes diamantina cercanos a los puntos de interés, siempre y cuando la profundidad intercepte la del nivel freático, que es lo relevante del asunto.

En la tabla 5.5 se muestra la información del subsuelo de los sectores este y oeste del depósito de relaves. En ella se marcan los niveles freáticos previo a las infiltraciones (NF_i) y los que han alcanzado en la última medición (NF_f) con fecha en julio del 2020, la profundidad del sondaje, litología, zona de alteración y mineralización mapeada.

En base a la información recopilada, es preciso comentar que la litología, zona de alteración y mineralización mapeada no varía sustancialmente en los puntos mencionados. La litología da cuenta de minerales como la albita, feldespato potásico, anortita, cuarzo, y ferromagnesianos como biotita, anfíboles y piroxenos. Las alteraciones que predominan son la cuarzo-sericita y la propilítica. La primera está relacionada a minerales como mica potásica, illita, cuarzo, dickita, sericita, pirofilita, carbonatos y feldespato; mientras que la segunda se asocia a calcedonia, epidota, zeolita, calcita, dolomita, albita, adularia, actinolita y clorita (Corbet & Leach, 1998). En la tabla 5.6 se muestra un resumen con los minerales mapeados e interpretados que será de utilidad para más adelante en el estudio.

Otros minerales que suelen repetirse en los distintos sectores son los óxidos de hierro (limonita, hematita, goetita), calcopirita, clorita, halita, yeso, anhidrita, óxidos de manganeso, pirita y calcita.

Tabla 5.5. Características geológicas de los puntos de monitoreo del sector depósito de relaves

Pozo (cota m.s.n.m.)	Profundidad (m)	Litología	Zona de alteración	Mineralización mapeada
CB-5 (1656,34)	74-78 (NF _f 51,36)	Sienogranito/ Monzogranito	Cuarzo sericita	Minerales de Cu y óxidos de Fe
	78-80 (NF _i 57,36)	Sienogranito/ Monzogranito	Cuarzo sericita. Fuertemente oxidado.	Óxidos de Fe
CB-6 (1660,09)	4-124 (NF _f 40,72) (NF _i 59,27)	Toba	Cuarzo sericita y arcillas (algunas secciones)	Óxidos de Fe (limonita, hematita, goethita)
	124-308	Toba	Propilítica	Calcopirita, clorita, hematita, limonita
CB-9 (1678,6)	2-26 (NF _f 18,01)	Monzodiorita	Cuarzo sericita	Óxidos de Fe y Mn
	26-76	Monzodiorita	Cuarzo sericita	Clorita
	76-100 (NF _i 79,6)	Monzodiorita	Cuarzo sericita	Óxidos de Fe (limonita)
	100-126	Monzodiorita	Cuarzo sericita	Plagioclasas alteradas, clorita
	126-182	Monzodiorita - Monzonita	Roca poco alterada y oxidada	Pirita, calcopirita, yeso
CB-7R (1592)	21-250 (NF 185,62)	Monzonita	Propilítica y potásica.	Sericita, Óxidos de hierro, biotita, feldespato potásico, sal, calcita, óxidos de manganeso, micas.
CB-8R (1594,96)	80-250 (NF 175,2)	Monzonita	Propilítica	Sal, óxidos de manganeso, mica, hematita, biotita, sericita, óxidos de hierro, clorita, epidota, arcillas
CB-11R (1614,89)	135-147,45 (NF 197,25)	Monzonita	Propilítica y cuarzo- sericita	Óxidos de hierro y manganeso, calcita, hematita, goethita, fracturas con relleno cuarzo sericita, arcillas, halita, epidota, clorita, yeso

NF_i = Profundidad nivel freático inicial.

NF_f = Profundidad nivel freático final.

NF = Profundidad nivel freático constante en el tiempo.

Tabla 5.6. *Minerales mapeados e interpretados de pozos alrededor del depósito de relaves.*

Pozo	Minerales mapeados e interpretados.
CB-5	Feldespató potásico, Cuarzo, Albita, Biotita, Kmica, Illita, Limonita, Hematita, Goethita, Yeso, Calcita, Anhidrita, Halita, Brocantita, Azurita, Malaquita, otros minerales de cobre.
CB-6	Albita, Anita, Calcita, Calcedonia, Epidota, Feldespató potásico, Adularia, Kmica, Illita, Cuarzo, Ceolita, Dolomita, Clorita, Halita, óxidos de Mn, Pirita, Minerales de cobre, Yeso, Anhidrita
CB-9	Calcita, Yeso, Anhidrita, Halita, Albita, Biotita, Feldespató potásico, Kmica, Illita, Cuarzo, Dolomita, óxidos de Mn, Hematita, Limonita, Goethita.
CB-7R	Clorita, epidota, sericita, hematita, biotita, feldespató potásico, limonita, hematita, goetita, halita, sal, calcita, óxidos de manganeso, mica, cuarzo, albita, anortita, biotita, anfíbol, piroxeno, yeso, anhidrita.
CB-8R	Sal, limonita, arena, clorita, óxidos de Mn, mica, hematita, biotita, sericita, goethita, clorita, epidota, arcillas, sericita, yeso, anhidrita, anortita, albita, feldespató, piroxenos, anfíbol.
CB-11R	Limonita, calcita, hematita, goethita, cuarzo, sericita, arcillas, halita, yeso, anhidrita, óxidos de manganeso, epidota, carbonatos, albita, anortita, ferromagnesianos, clorita.

6 QA/QC DE LOS DATOS

Con el fin de comprobar la confiabilidad de los datos, adquiridos en terreno y entregados por los laboratorios, se realiza un QA/QC a las mediciones en base a los métodos estándar para la examinación de agua y agua residual (APHA, AWWA, WEF, 2011). Para ello, primero se calcula analíticamente el balance iónico de los elementos mayores como sigue:

$$\text{Balance iónico (\%)} = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} \times 100$$

Los elementos utilizados para el cálculo del balance iónicos son $Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Cl^- + SO_4^{2-} + NO_3^- + HCO_3^-$. Normalmente, el error máximo se limita a 10%, sin embargo, para este estudio se permite un error máximo del 15%, con el fin de considerar el mayor número de datos posible. Todas las mediciones que tienen un balance iónico superior a este número son descartadas, dado que se puede subestimar o sobrestimar alguna concentración medida. En la tabla 6.1 se encuentran aquellas medidas que no fueron utilizadas.

Se descarta un total de 56 muestras de agua subterráneas entre el período comprendido entre los años 2008 y 2020, lo cual es un porcentaje bastante menor en relación con la cantidad de datos con los que se cuentan. Llama la atención la gran cantidad de muestras descartadas el año 2019 durante los meses de agosto, septiembre y octubre, en donde la mayoría de los resultados entregados por el laboratorio son poco confiables al entregar un balance iónico bastante alto.

Luego, se procede a identificar los outliers de los elementos químicos, estos son datos puntuales que se alejan notablemente del rango de valores que históricamente ha presentado el parámetro en cuestión, en un determinado punto de monitoreo, dado que son muy superiores o inferiores. Algunas de las formas en que se generan los outliers es debido a errores en la toma de muestras en terreno, en equipos de laboratorio, de tipeo y al cambiar de unidades de medidas, entre otros.

Una manera objetiva para detectar estos valores atípicos es calcular el promedio y desviación estándar de los datos que ha presentado un parámetro en el tiempo. La relación entre el dato en cuestión, el promedio y la desviación estándar (T) define si la medida es un outlier según la siguiente ecuación (APHA, AWWA, WEF, 2011):

$$T = \frac{|\text{Valor} - \text{Promedio}|}{\text{Desviación estándar}}$$

Si $T > 3$, el valor es considerado un outlier y, por consiguiente, no se considera al momento de trabajar con el resto de los datos. Por otro lado, para $T \leq 3$ el valor se considera válido dentro del registro histórico.

Para el control de calidad de los parámetros fisicoquímicos, primero se calcula la diferencia porcentual relativa (DPR) entre las mediciones de pH obtenidas en terreno y en laboratorio de la siguiente forma (APHA, AWWA, WEF, 2011):

$$DPR(\%) = \frac{2 \times |pH_{lab} - pH_{terreno}|}{pH_{lab} + pH_{terreno}} \times 100$$

Se establece un límite de error máximo del 20%. En caso de superar este umbral, se descarta la medición de terreno o la del laboratorio que no presente un valor acorde al registro histórico que presenta. De la misma manera se calcula la DPR para la conductividad eléctrica.

Además, se compara la medida de alcalinidad con el pH. Una muestra con pH <4,5 (pH ácido) no debería de presentar alcalinidad (APHA, AWWA, WEF, 2011). Por lo que, para muestras con pH inferior a 4,5 se espera una alcalinidad bajo el límite de detección. Si esto no ocurre, se descarta el pH, alcalinidad o ambos, esto en base a los registros históricos que muestran los parámetros, dado que el valor podría ser mayor o superior a lo que a presentado constantemente en el tiempo.

Tabla 6.1. Balance iónico de las muestras de aguas subterráneas descartadas en el distrito minero Sierra Gorda.

Punto de monitoreo	Fecha	Balance iónico (%)	Punto de monitoreo	Fecha	Balance iónico (%)
QSG08-493	11-11-2008	15.52	QSCSG6-237	01-08-2019	-80.98
QSCSG6-237	14-11-2008	16.51	CB-5	01-08-2019	-76.31
QSG08-402	11-02-2009	-73.82	QS608-431	06-08-2019	-87.93
QSG08-493	11-02-2009	-56.06	CB-4	06-08-2019	-90.21
QSCSG6-237	12-02-2009	-72.48	CB-10	06-08-2019	-60.95
QSG08-493	01-08-2009	16.23	CON-10	09-08-2019	-18.84
QSG08-402	01-05-2010	-52.56	CB-6	09-08-2019	-58.50
CB-9	13-02-2012	-48.58	CB-9	09-08-2019	-28.88
CB-3	28-02-2013	-37.01	CON-16	09-08-2019	-35.40
CB-6	28-02-2013	-19.71	CB7-R	09-08-2019	-30.94
CB-6	01-05-2013	-18.55	CB8-R	09-08-2019	-36.23
CB-6	23-11-2013	-40.35	CB11-R	09-08-2019	-42.73
QSG08-493	24-11-2013	-19.30	QSCSG6-237	24-09-2019	92.20
CB-4	11-12-2014	-26.42	CB-5	24-09-2019	84.65
CB-6	12-12-2014	-16.77	CON-10	26-09-2019	23.70
CB-4	07-10-2016	-16.24	CB-6	26-09-2019	32.00
CON-10	31-01-2017	19.94	CB-9	26-09-2019	17.08
QSG08-402	06-02-2017	45.30	CON-16	30-09-2019	94.06
QSG08-402	07-04-2017	36.69	CB7-R	30-09-2019	20.46
CB-9	17-07-2017	-46.73	CB8-R	30-09-2019	91.68
CB11-R	28-06-2018	-24.19	CB11-R	30-09-2019	77.42
QSG08-493	06-09-2018	-19.06	CB-6	16-10-2019	86.88
CB-9	13-09-2018	-15.34	QSCSG6-237	17-10-2019	39.98
CON-10	22-11-2018	-23.55	CB-5	17-10-2019	38.00
CB11-R	18-01-2019	17.02	CB8-R	29-10-2019	19.90
CON-16	18-01-2019	22.21	CB11-R	29-10-2019	48.65
CB-2	01-08-2019	-70.62	CON-16	30-10-2019	89.21
CB-3	01-08-2019	-73.47	CB7-R	30-10-2019	71.61

Por otro lado, se comprueba la validez de los TDS medidos por el laboratorio. Para ello, se calculan los TDS (TDS calculado) como la suma de los elementos mayores expresados en mg/L de la siguiente forma (APHA, AWWA, WEF, 2011):

$$TDS = 0,6 \times \text{Alcalinidad} + Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Cl^- + SO_4^{2-} + NO_3^- + B^+ + Sr^+$$

Para comparar los TDS calculados con los obtenidos por el laboratorio se determina un factor como sigue a continuación (APHA, AWWA, WEF, 2011):

$$\text{Factor} = \frac{TDS_{\text{laboratorio}}}{TDS_{\text{calculado}}}$$

La concentración de los TDS del laboratorio debe ser mayor que la calculada, dado que puede que algún elemento químico significativo no se haya incluido al cálculo. Por lo que el factor idealmente debería encontrarse dentro del rango 1 a 1,2, pero se acepta en este estudio hasta el intervalo 0,95 a 1,25. Para las muestras con factores fuera de este rango, se descartan los TDS medidos por el laboratorio solo si los TDS calculados cumplen con la siguiente condición (APHA, AWWA, WEF, 2011):

1. La razón entre TDS calculados y la conductividad eléctrica (CE) medida por el laboratorio (F1) se encuentra idealmente dentro del rango 0,55-0,7. Sin embargo, se acepta para este estudio hasta el rango 0,5-1.

$$F1 = \frac{TDS_{\text{calculados}}}{CE_{\text{lab}}}$$

2. Si F1 se encuentra fuera del rango, se calcula F2:

$$F2 = \frac{TDS_{\text{calculados}}}{CE_{\text{terreno}}}$$

Si F2 se encuentra dentro del rango 0,5-1, se descarta la CE medida por el laboratorio y los TDS del laboratorio, dejando los TDS calculados. Si F2 se encuentra fuera del rango se descarta el valor de los TDS calculados.

Este procedimiento se realiza principalmente para los datos de la minera Sierra Gorda, ya que las muestras de las mineras Spence y Centinela han tenido su control de calidad previo en cada reporte entregado al SNIFA y sus respectivos EIA (Arcadis, 2015 y GAC, 2015). Además, se utilizan las mediciones en totales, porque la faena Sierra Gorda no cuenta con mediciones disueltas.

7 CONTEXTO GENERAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Para establecer un contexto general de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda, se comparan las napas freáticas de las mineras Sierra Gorda, Spence y Centinela y zona de Pampa Lina, tanto en niveles como en calidad de agua, en base al registro preoperacional para asegurar dejar fuera posibles alteraciones externas.

En un primer paso, se analizan los niveles freáticos en el tiempo. Para luego continuar con la caracterización hidrogeoquímica general, en donde a través de diagramas Piper, Durov y Stiff y un análisis estadístico univariable, se determina la signatura química que caracteriza las aguas subterráneas de cada zona de interés y se estudia a que se debe la diferencia composicional entre ellas en caso de existir.

7.1 NIVELES FREÁTICOS

A continuación, se analizan los niveles freáticos en el tiempo. Para ello, se utilizan las mediciones desde el inicio del registro de niveles, en cada faena, hasta julio del año 2020, para Sierra Gorda, diciembre del año 2019, para Spence, y julio del año 2019, para Centinela.

7.1.1 FAENA SIERRA GORDA

En el sector de SGSCM y Pampa Lina se utilizan los puntos de monitoreo de la figura 5.1, los cuales cuentan con mediciones mensuales de los niveles del acuífero. La representación de estas superficies freáticas a lo largo del tiempo, y en cada punto de control, se muestra en la figura 7.1, en donde, además, se presenta la piezometría preoperacional.

Las figuras 7.2 y 7.3 muestran la diferencia de niveles entre los distintos puntos de medición para las zonas de faena Sierra Gorda y Pampa Lina, respectivamente. Es posible visualizar, en faena Sierra Gorda, 3 grupos de pozos que tienen en común la cota a la cual se encuentra el acuífero.

El primer grupo (color rojo) está compuesto por los sondajes abiertos QS-402, QS-431, QS-493 y los pozos CB-4, CB-5, CB-6, CB-9 y CB-10. Se caracteriza por presentar una cota preoperacional, entre los años 2008 y 2014, del nivel freático entorno a los ~1600 m.s.n.m. en el sector este de la estructura principal norte-sur que intercepta al depósito de relaves.

Luego de iniciadas las operaciones mineras (año 2014), se observan descensos de nivel en los puntos CB-4, CB-10 y QS-402, asociados a la excavación del rajo, ascensos en CB-5 y CB-6, relacionados a infiltraciones desde el depósito de relaves, y ascensos de nivel en CB-9, por infiltraciones desde el sector de piscinas. En los pozos CB-5, CB-6 y CB-9 el nivel de agua ha aumentado en 6 m (desde junio 2017), 18,47 m (desde marzo 2016), y 60,92 m (desde diciembre 2014), respectivamente. Estas afecciones se estudian en detalle en el siguiente capítulo. Por último, los puntos QS-493 y QS-431 se muestran relativamente estables en el tiempo.

Un segundo grupo lo conforman sondajes abiertos CON-10 y CON-16 (color celeste). El nivel de agua de estos puntos se encuentra entorno a los ~1455 m.s.n.m. y presenta niveles estáticos estables desde fines del 2014, fecha de la perforación, hasta la actualidad.

El grupo 3 (color verde) está compuesto por el sondaje abierto CON-15 y los pozos CB-7R, CB-8R y CB-11R y se caracteriza por presentar las menores cotas de toda la faena Sierra

Gorda. En casi tres años de registro, los pozos aún no han logrado recuperar su nivel inicial luego de la instalación el año 2017. Por otro lado, CON-15 cuenta con un nivel estable en ~1425 m.s.n.m. desde el año 2014, fecha de la perforación, hasta finales del 2019; a continuación, se observa una alteración y ascenso de nivel hasta alcanzar la cota ~1487 m.s.n.m. En el pozo CB-8R, ubicado cerca de CON-15, también se observa un ascenso de nivel desde la misma fecha, pero con menor magnitud. Se presume un origen similar para la alteración de estos dos puntos, cuya razón se describe en el siguiente capítulo.

Existe una diferencia del nivel de agua de ~145 m entre los grupos 1 y 2, de ~180 m entre los grupos 1 y 3 y de ~25 m entre los grupos 2 y 3 (figura 7.2). Se puede ver en la figura 7.1 que el primer grupo, situado hacia el este de la estructura norte-sur, presenta un gradiente hidráulico bastante plano que se ha mantenido históricamente estable entorno a la cota ~1600 m.s.n.m. Sin embargo, hacia el sector oeste de esta estructura el gradiente se torna abrupto, con cotas que se han mantenido estables a lo largo del tiempo, lo que se refleja en la diferencia de nivel con el sector este.

Una explicación a la diferencia de niveles freáticos entre el grupo 1 y el resto, es la presencia de la estructura principal de orientación norte-sur que intercepta al depósito de relaves. Esta desconecta las aguas de ambas zonas al actuar como una barrera hidráulica que embalsa las aguas del sector este. Además, es posible que otras estructuras dentro de la minera controlen los niveles formando compartimentalizaciones del acuífero.

Por otro lado, se presume que el sector este de la faena tiene una mejor interconectividad del acuífero relacionada a un mayor grado de fracturamiento, asociado al rajo, que facilita el tránsito del flujo subterráneo. No así en el sector oeste, donde los grupos 2 y 3, pese a estar cercanos entre sí, presentan una diferencia de nivel de ~25 m, lo que puede ser indicio de una baja interconectividad y/o un efecto de compartimentalización.

En el sector de Pampa Lina (color amarillo), CB-2 registra un descenso de nivel en ~2 m, desde el inicio de las mediciones, hasta inicios del 2020 en que comienza a recuperar su nivel. Esto se relaciona a la extracción de agua en pozos de terceros, lo que también afecta, en menor medida, a CB-3 con un descenso de nivel menor a 1 m. El sondaje abierto QS-237, que posee la mayor cantidad de registros, se presenta relativamente estable en los ~1596 m.s.n.m. Finalmente, el pozo CB-12R, que cuenta con datos desde mediados del 2018, presenta un nivel de agua relativamente estable entorno a los ~1582 m.s.n.m.

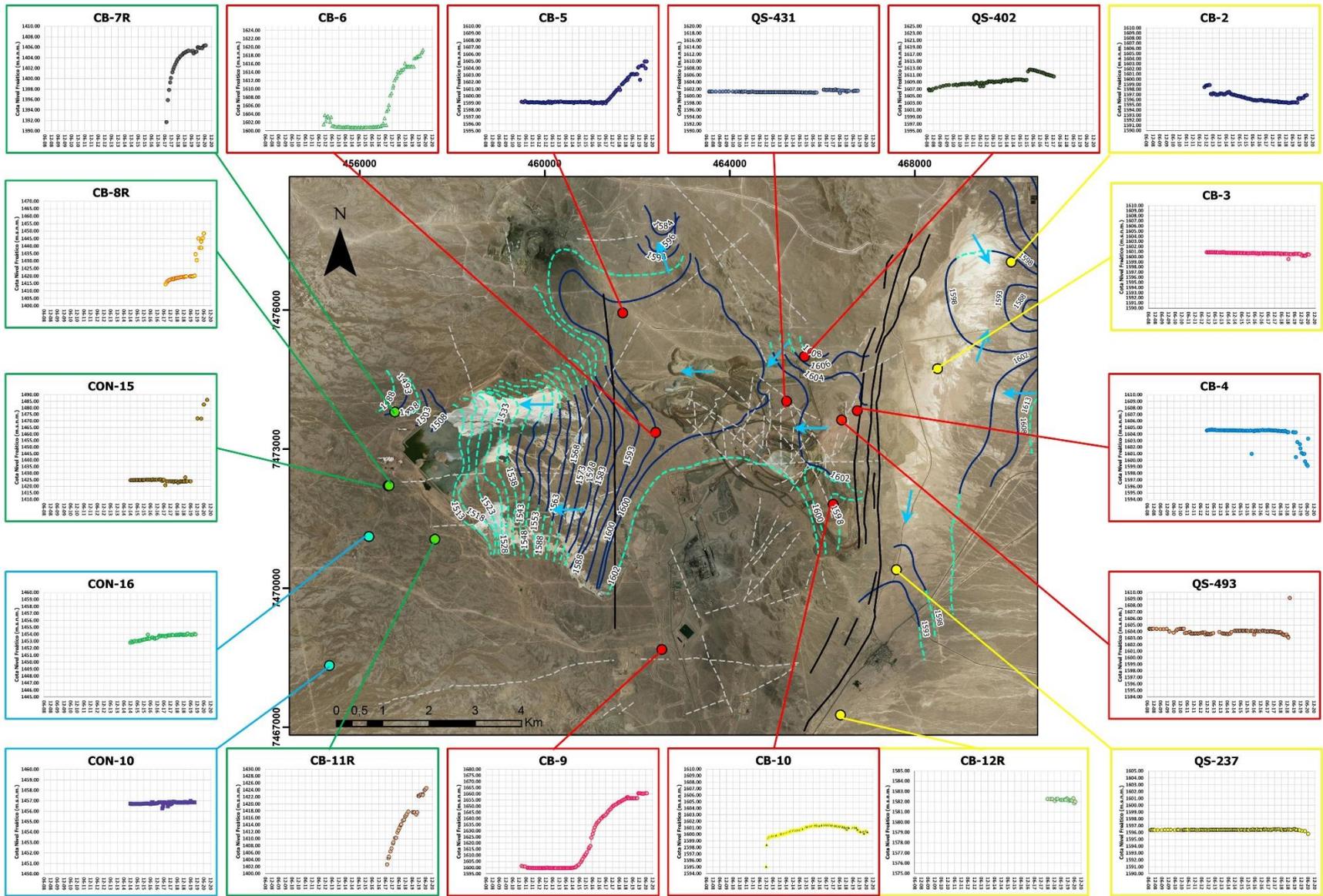


Figura 7.1: Evolución de niveles freáticos y distribución de los pozos de fauna Sierra Gorda y Pampa Lina y piezometría preoperacional.

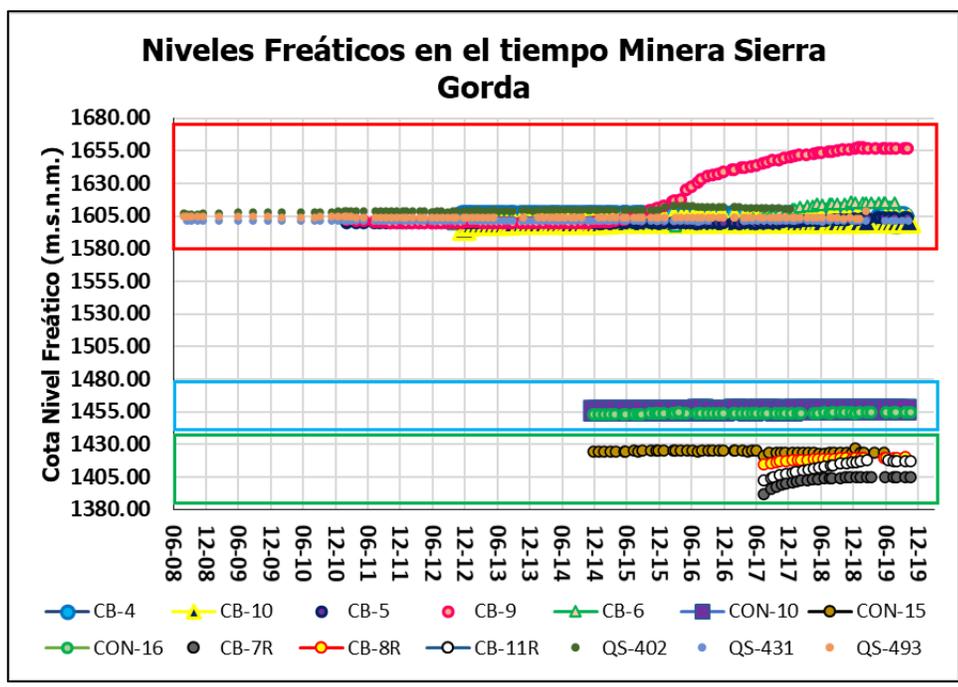


Figura 7.2: Niveles freáticos en el tiempo minera Sierra Gorda.

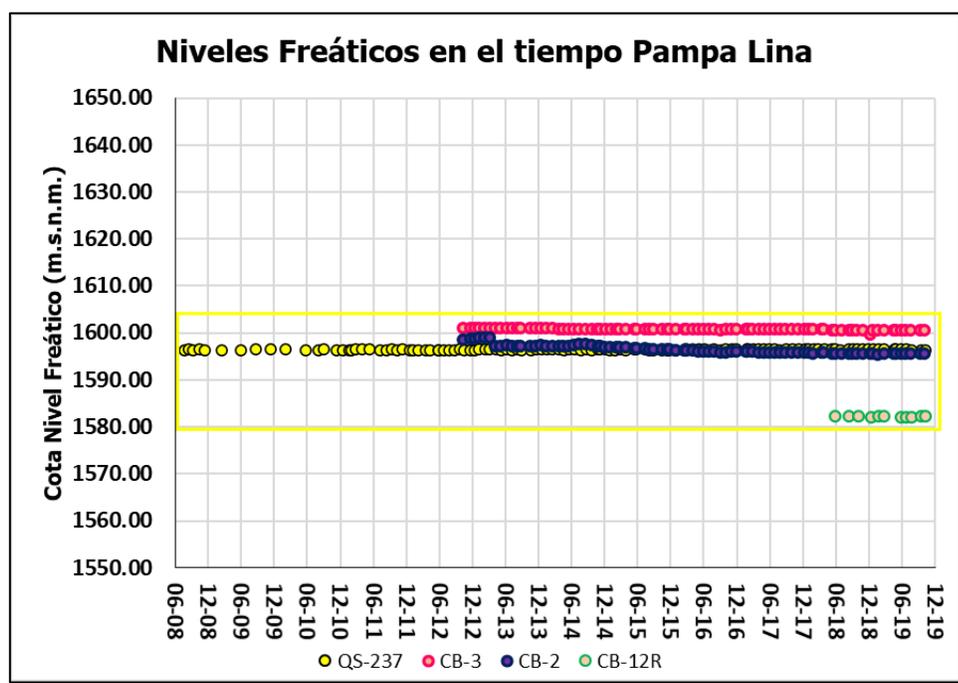


Figura 7.3: Niveles freáticos en el tiempo zona de Pampa Lina.

7.1.2 FAENA SPENCE

En las instalaciones de faena Spence se estudian los niveles de los pozos con etiqueta SPM y GTW-17, que son los puntos de monitoreo asignados por compromiso ambiental y que cuentan con el mayor registro de datos. La distribución de estos pozos se observa en la figura 5.2 encontrándose dentro y alrededor de las instalaciones de la minera.

Se dejan fuera de este análisis a los pozos de la fase preoperacional, por no contar con mediciones del nivel de agua, y a los pozos asociados al sector del futuro depósito de relaves, dado que los datos de nivel recopilados en el EIA Minerales Primarios de Spence (Arcadis, 2015) son de un intervalo de tiempo acotado y aun no se estabilizan por la muy baja permeabilidad de la roca.

En la figura 7.5 se muestra el registro de los niveles de aguas subterráneas a lo largo del tiempo, en un período comprendido entre los años 2012 y 2019, y su distribución, además de la piezometría preoperacional. Mientras que, en la figura 7.4, se comparan los niveles entre pozos, los cuales se pueden juntar en 4 grandes grupos descritos a continuación:

El grupo 1 (color verde) es el situado aguas arriba, al NE de las instalaciones de la faena, por lo que se caracteriza por presentar las cotas más altas. Se encuentran los pozos SPM-1, con un nivel relativamente de ~1722 m.s.n.m., y SPM-7 y SMP-8, ambos con una cota alrededor de los 1708 m.s.n.m.

El grupo 2 (color rosado) se localiza al sureste y este de Spence, en donde se encuentran los pozos SPM-12, SPM-13, SPM-16, caracterizados por presentar un nivel estable entorno a la cota ~1660 m.s.n.m, y el pozo GTW-17, el cual se encuentra cerca del rajo con una cota de ~1647 m.s.n.m desde que se tiene registro en este estudio. La distribución de estos puntos evidencia un bajo gradiente hidráulico en este sector. Además, desde mediados del 2017, el pozo SPM-13 registra un ascenso de ~4 m y los registros de GTW-17 presentan gran variación, dificultando observar el comportamiento de nivel en el tiempo.

El grupo 3 (color amarillo) se encuentra al centro de la faena y contiene a los puntos de monitoreo SPM-2, SPM-10, SPM-14, SPM-15 y SPM-17 con un nivel estático estable alrededor de los ~1640 m.s.n.m. A excepción del pozo SPM-14, los puntos evidencian un ascenso de ~ 2 m a mediados del año 2017.

El grupo 4 (color rojo) corresponde a los pozos situados al oeste de Spence, donde se localizan SMP-3, SPM-6, SPM-11 y SPM-18 con niveles en las proximidades de las cotas 1590, 1620, 1615 y 1605 m.s.n.m., respectivamente. Es el grupo donde el nivel de agua tiene menor elevación, evidenciando un flujo con dirección aproximada hacia el oeste. Además, es preciso mencionar que desde julio del 2017 se detecta un alza de, aproximadamente, 4,5 m en SPM-6 y de unos 6 m en SPM-11. Esto sea asocia a una infiltración desde la piscina de refino, que además disminuyó el valor de pH y elevó las concentraciones de sulfato y cobre en el último pozo mencionado (BHP, 2018a)

En base a la información registrada, los niveles freáticos más altos se encuentran hacia el sector este de Spence. En particular, hacia el sector noreste se localiza la superficie de agua más elevada (grupo 1), la cual evidencia una separación de ~61 m y ~88 m con sus pozos más cercanos, SPM-6 y GTW-17, respectivamente. Este cambio abrupto de gradiente hidráulico, en relación con

el bajo gradiente encontrado entre SMP-7 y SMP-8, podría reflejar una desconexión del sistema de aguas subterráneas del sector NE con el que se encuentra hacia el centro de Spence.

Por otro lado, las cotas del sector sureste también son altas, comparadas con el resto de los pozos, y con un gradiente hidráulico plano, que, a medida que va moviéndose en dirección oeste, va aumentando producto de que se encuentran cotas de menor altitud.

Las menores elevaciones del nivel freático se encuentran en los pozos SMP-3 y SPM-18, lo que da cuenta de una dirección de flujo desde el este-noreste hacia oeste-suroeste, donde se localiza Pampa Lina.

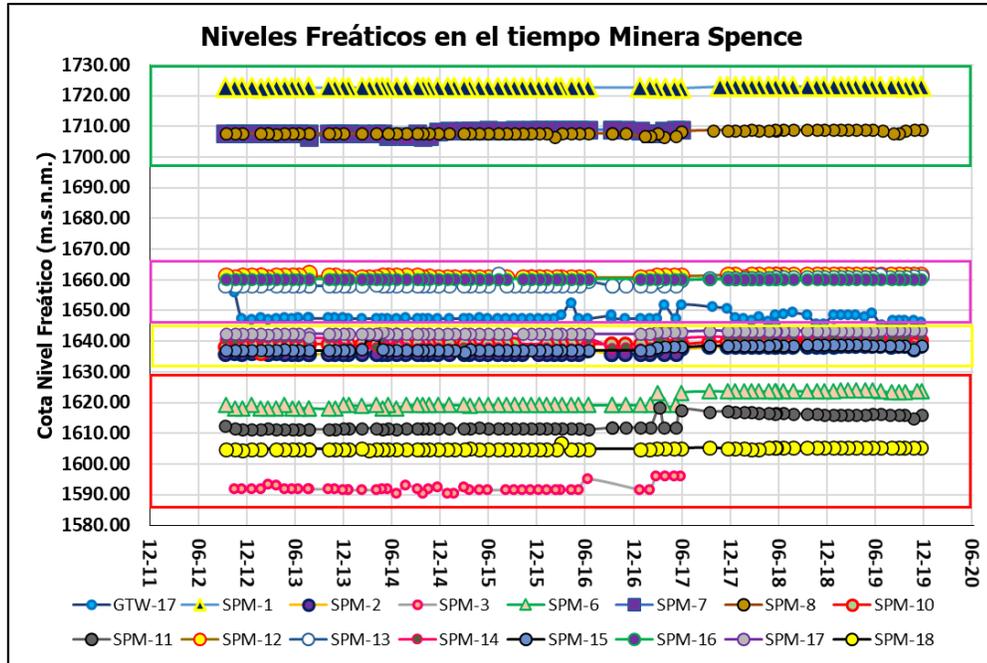


Figura 7.4: Niveles freáticos en el tiempo minera Spence.

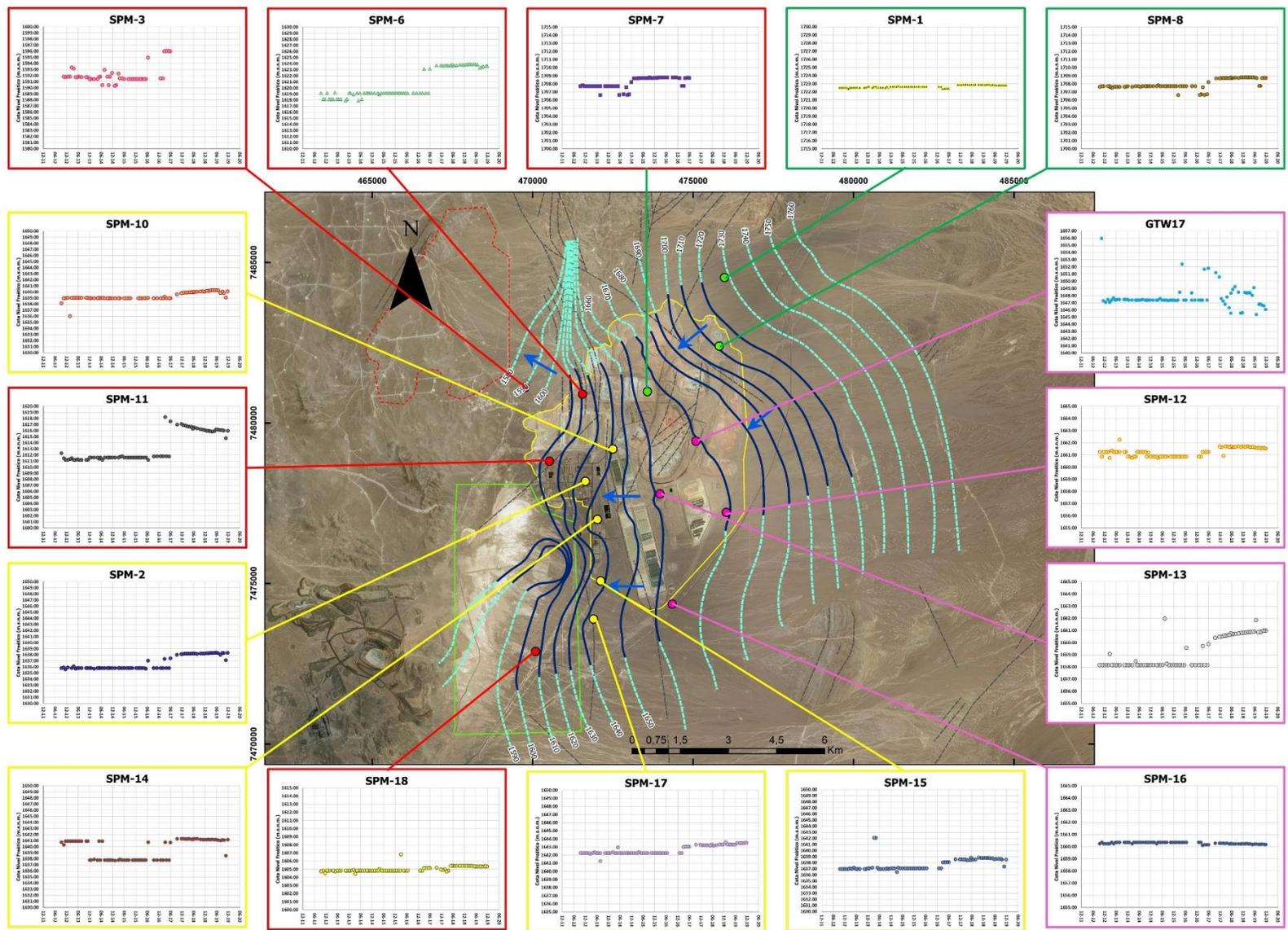


Figura 7.5: Evolución de niveles freáticos y distribución de los pozos de fauna Spence y piezometría preoperacional.

7.1.3 FAENA CENTINELA

En minera Centinela se utilizan los pozos de la figura 5.3, los cuales cuentan con mediciones mensuales desde el 2012 para PM-1, PM-2 y PM-3, trimestrales desde el 2014 para PAB-1, PAB-2 y PAB-3 y anuales desde el 2015 para TP-1 y DP-1. Los niveles en el tiempo y su distribución, además de la piezometría preoperacional, se observa en la figura 7.7 Mientras que, en la figura 7.6 se muestra la comparación entre los niveles de cada pozo.

Centinela presenta las cotas de mayor elevación, en relación con las faenas Sierra Gorda y Spence. Al sureste de la faena se encuentra el nivel estable más alto en, aproximadamente, los 2400 m.s.n.m. en el pozo PAB-3 (color rojo).

Siguen los pozos TP-1 y DP-1 (color verde) con un nivel estable alrededor de los 2200 m.s.n.m. en medio de la faena, al este del depósito de relaves. Además, se encuentran los puntos PAB-1 y PAB-2, en el sector suroeste de la minera, con una cota relativamente estable en las proximidades de 2140 y 2190 m.s.n.m., respectivamente.

Finalmente, se presentan los pozos de menor altitud dentro de faena Centinela situados al noroeste del depósito de relaves (color azul). PM-1 y PM-3 se muestran relativamente estables alrededor de la cota 2010 m.s.n.m. Sin embargo, PM-2 evidencia un alza de ~1 m desde el inicio del registro de este estudio, por lo que no es posible determinar cuando comienza este ascenso que no afecta a PM-1 y PM-3 pese a su cercanía. Además, PM-2 tiene un nivel ~50 m más alto que los otros pozos.

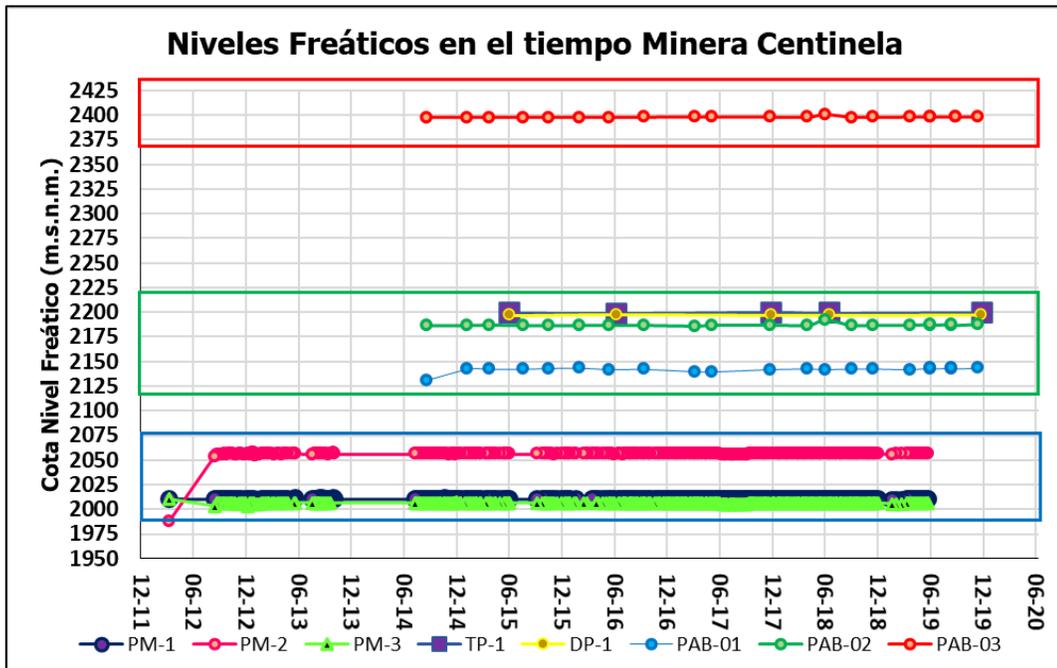


Figura 7.6: Niveles freáticos en el tiempo minera Centinela.

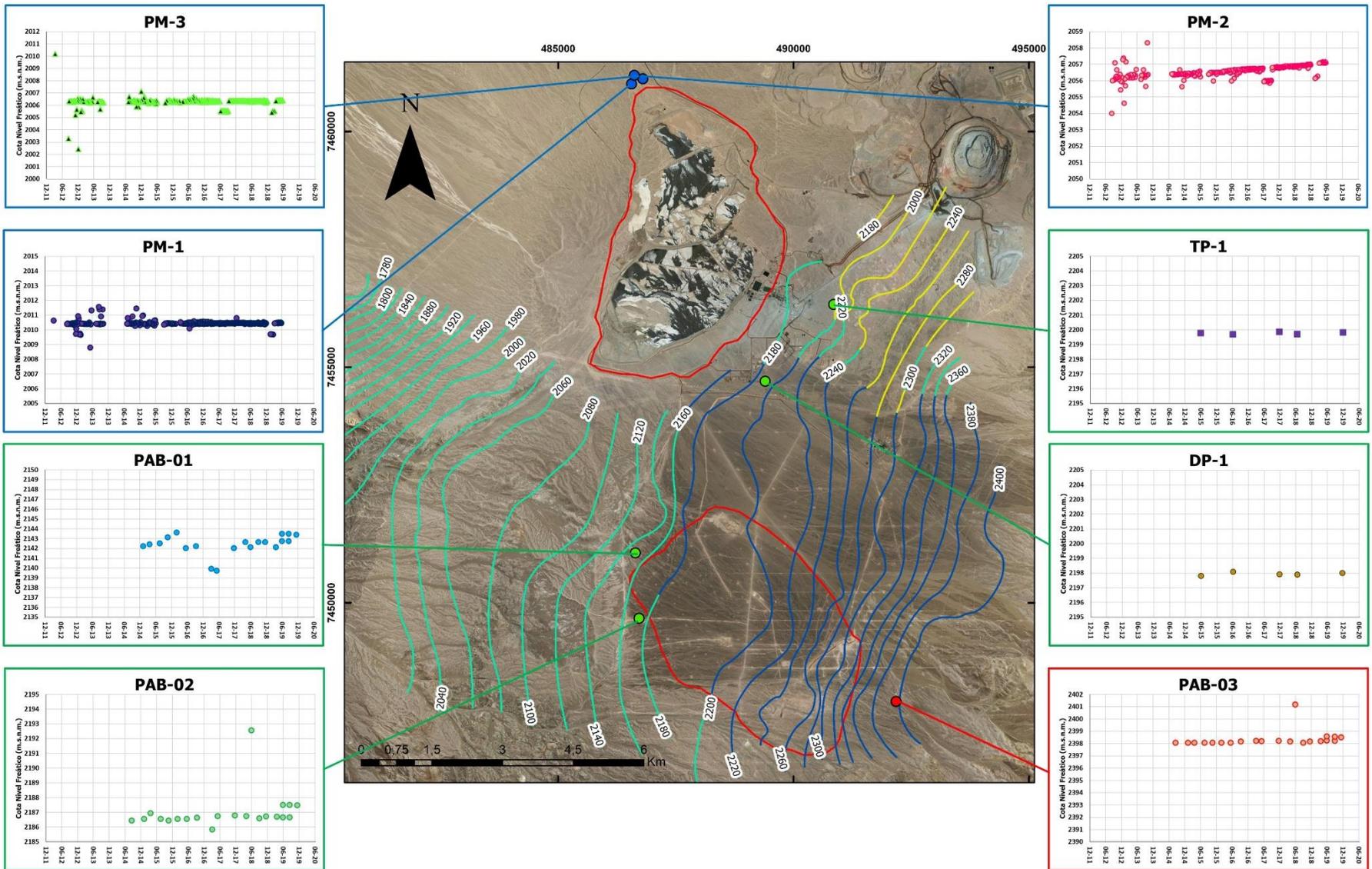


Figura 7.7: Evolución de niveles freáticos y distribución de los pozos de fauna Centinela y piezometría preoperacional.

7.2 HIDROGEOQUÍMICA GENERAL

Se comparan los datos de parámetros fisicoquímicos y elementos mayoritarios, preoperacionales y actuales, entre los sectores Sierra Gorda, Pampa Lina, Spence y Centinela, para analizar posibles modificaciones químicas del agua subterránea en su trayecto hacia aguas abajo.

Primero, se comparan los parámetros fisicoquímicos y elementos mayores a través de diagramas Durov, Piper y Stiff, realizados en cada área, para caracterizar las aguas de las faenas mineras. Luego, se procede a realizar un análisis estadístico univariable con cálculo de promedio, desviación estándar, máximos y mínimos, en cada zona, para tener valores referenciales de las faenas.

Para los diagramas, se establece una fecha en común de todas las mineras, idealmente lo más actual posible. Faena Sierra Gorda es la única que cuenta con datos del año 2020, por lo que se descarta este año, y sus últimas mediciones del año 2019 corresponden al mes de julio (las de los meses de agosto, septiembre y octubre son descartadas por los balances iónicos con alto error), por lo que se establece esta fecha como la ideal, ya que todas las zonas cuentan con mediciones de este momento. Sin embargo, para efectos de este estudio, se calcula un promedio entre los entre los meses de mayo, junio y julio para evitar posibles variaciones relevantes y suplir la depuración de outliers encontrados en el mes de julio. Además, se incluyen los datos preoperacionales de cada zona.

Con la fecha a utilizar ya definida, se seleccionan los pozos. En Sierra Gorda y Pampa Lina se utilizan los mismos puntos de muestreo que en el análisis del nivel freático, involucrando a los puntos CB-4, CB-5, CB-6, CB-7R, CB-8R, CB-9, CB-10, CB-11R, QS-431, CON-10, CON-15 y CON-16, para el primer sector, y a CB-2, CB-3, CB-12R y QS-237 para el segundo. Los datos preoperacionales corresponden al año 2008, que es cuando comienzan las primeras mediciones de los sondeos abiertos QS-237, QS-402 y QS-493, y al año 2013, con las primeras mediciones de la gran mayoría de los pozos CB.

Para la minera Spence, además de usar nuevamente los pozos SPM y GTW-17 que tienen datos de la química del agua, tanto actual como preoperacional (promedio de los años 2004, 2005, 2006), se ocupan los datos de la calidad del agua de los pozos que solo cuentan con mediciones preoperacionales, esto es en febrero y julio del año 2000 en los puntos PCD, N-284, SRC 44, SRC 50, N-131 y Túnel, y de los puntos de monitoreo asociados al sector del depósito de relaves. Para esta última zona, como no se cuentan con datos actuales del 2019, se utilizan los valores de la última medición, correspondiente al año 2016, solo para tenerlos de manera referencial. Son utilizados 20 pozos, en donde en la tabla 5.3 se pueden observar los años de registro.

Finalmente, para la minera Centinela se emplean los datos de los pozos PM-1, PM-2 y PM-3, que tienen mediciones actuales en la fecha estipulada, y se descartan los de PAB-1, PAB-2, y PAB-3, que, si bien también tienen datos actuales, no cuentan con la medición de todos los elementos mayores por lo que no se usan. Para los datos preoperacionales, se utilizan las mediciones del año 2011 de los pozos TP-1, TP-2, DP-1 DP-2, DP-3, DP-5, DP-7 y DP-8, y del año 2006 de los puntos T-1, T-2, S-705, S-652, S-624, S-728y S-632.

7.2.1 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

En la figura 7.8 y anexo 1.1 se muestra el diagrama Durov de la faena Sierra Gorda, incluyendo a los datos de Pampa Lina. Los diagramas de los sectores de faena Spence y Centinela se encuentran en los anexos 1.2, 1.3 y 1.4. Los valores de TDS y pH utilizados corresponden a los datos de laboratorio, dado que todas las faenas cuentan con estos valores, pero no con los datos de terreno recopilados para este estudio (Spence y Centinela).

En la faena Sierra Gorda, los datos preoperacionales son presentados en color azul y los actuales en color rojo, mientras que los de Pampa Lina son de color amarillo. No se observa gran variación de los datos en el tiempo, destacando el grueso de los valores por presentar un pH entre 6,5 y 8 en minera Sierra Gorda, a excepción de la muestra QS-493 del año 2013 que tiene un pH ~5, que puede ser debido a su cercanía con el rajo minero, y un pH entre 7,5-8 en Pampa Lina.

En cuanto a las concentraciones de TDS de laboratorio ploteados, se aprecia que los datos obtenidos en minera Sierra Gorda suelen ser superiores a los de Pampa Lina, presentando esta última un valor máximo cercano a los 40.000 mg/l, mientras que en la zona minera la mayoría de los datos se presenta sobre esta concentración.

Los valores de TDS preoperacionales de faena Sierra Gorda se sitúan en el intervalo ~37.000-85.000 mg/l. El punto CB-6 en el año 2013 presenta un menor valor (~10.000 mg/l), pero esto podría suceder debido a que el pozo fue instalado cerca de la fecha escogida, por lo que el agua puede no representar la composición del acuífero, sino que la usada en la instalación del pozo, reduciendo la concentración de TDS. En cambio, la medición del año 2019 de este pozo presenta valores cercanos al resto de la faena. Por otro lado, el punto QS-493 el año 2008 es el que presenta los mayores valores.

El mayor número de valores de TDS muestreados el año 2019, en faena Sierra Gorda, se encuentran en el rango ~40.000-75.000 mg/l. El pozo CB-11R presenta valores más bajos (~20.000 mg/l) y se encuentra distanciado de las concentraciones del resto de los puntos, posiblemente, dada la estabilización de nivel en este pozo, las muestras tomadas sean en parte agua residual utilizada en la instalación. Por otro lado, el punto CB-9 presenta las mayores concentraciones (~115.000 mg/l) sobre el resto de los demás pozos, esto puede ser debido a infiltraciones antrópicas que alteran las muestras de agua en este punto, considerando que el dato del año 2013 se observa con valores cercanos al resto de los pozos y su nivel actual de agua se encuentra alterado.

Para el sector de Pampa Lina, las concentraciones de TDS, tanto preoperacionales como las del año 2019, se encuentran dentro del rango ~10.000-40.000 mg/l. El punto QS-237 es el que presenta los mayores valores.

Diagrama Durov Sierra Gorda y Pampa Lina

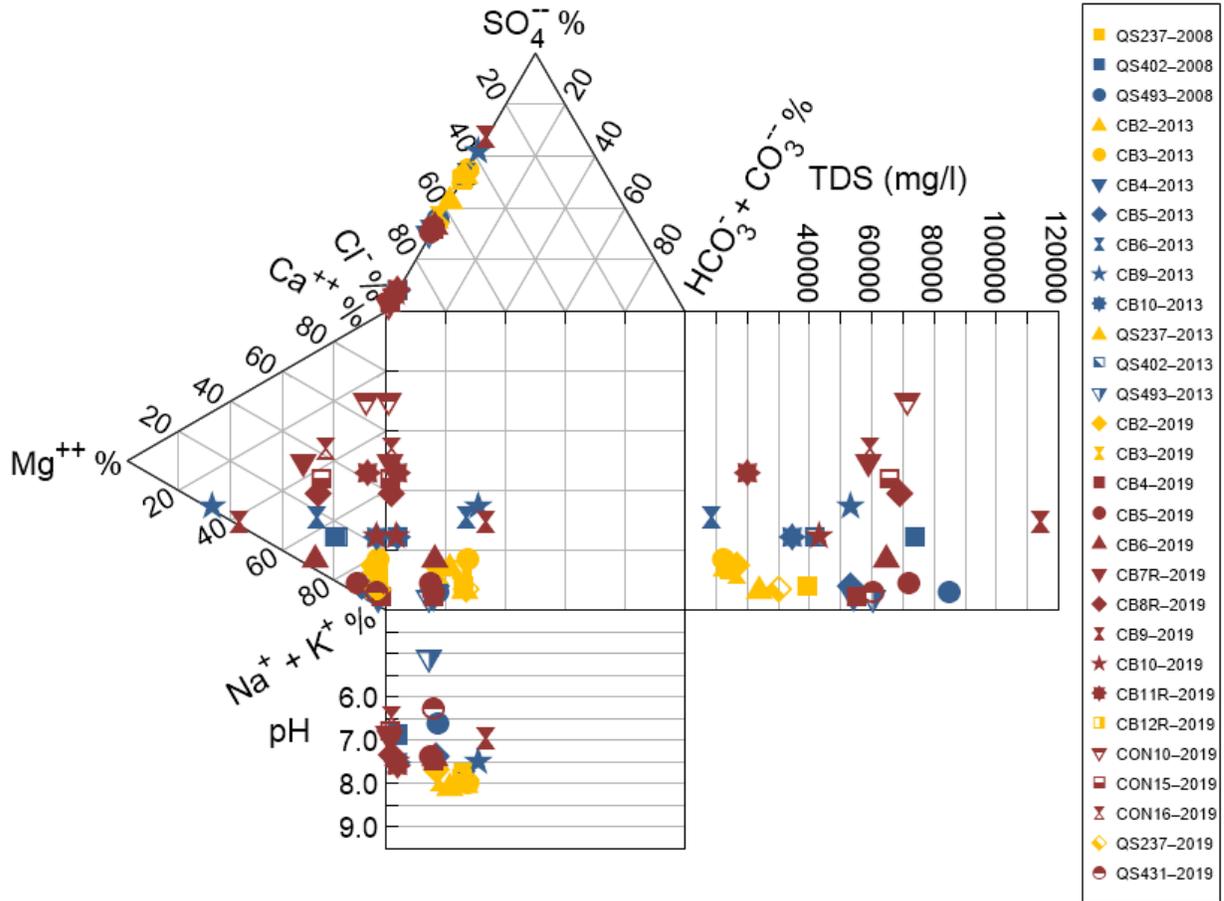


Figura 7.8: Diagrama Durov de minería Sierra Gorda y Pampa Lina.

El diagrama Durov de las instalaciones de faena Spence (anexo 1.2) presenta en verde y azul los pozos con datos preoperacionales del año 2000 y 2005, respectivamente, mientras que en rojo expone los datos del año 2019.

En esta zona el pH suele encontrarse en el rango 6,5-8,0, salvo dos mediciones preoperacionales, en el mismo punto de muestreo, que presentan un menor valor asociado a su cercanía con el rajo.

Los TDS de las instalaciones de Spence, evidencian un marcado grupo entre los ~7.000 y 35.000 mg/l, en donde se posicionan la gran mayoría de datos, y otro entre el rango ~40.000-70.000 mg/l que contiene a los pozos SPM-1 y SPM-6, al noreste y noroeste, respectivamente, de las instalaciones de Spence, y al punto SRC-44 con mediciones preoperacionales. Las concentraciones de TDS preoperacionales y del año 2019 son relativamente similares.

El diagrama Durov del sector del depósito de relaves de faena Spence (anexo 1.3) presenta en azul datos de los años 2012, 2014 y 2015 y en rojo los del año 2016. Por otro lado, el diagrama revela valores de pH entre el rango ~6-8.

Además, se observa que en esta área existe mayor variabilidad de los datos de TDS, encontrando concentraciones que van desde los ~35.000 mg/l hasta los ~375.000 mg/l. Excepto el pozo SPD 2200, que cuenta con datos del año 2012, el cual tiene concentraciones de ~12.000 mg/l y que se asocian a muestras de agua que contienen remanentes del agua utilizada en la perforación de este punto, lo cual disminuye las concentraciones.

En el diagrama Durov de fauna Centinela (anexo 1.4) se presentan en azul datos preoperacionales del año 2006 del sector del rajo Esperanza, en verde valores preoperacionales del sector del POE y en rojo datos del año 2019.

En esta fauna, las mediciones de pH van desde los 6 hasta los 8, con un punto entorno al rajo mostrando un pH ~5,5. Las concentraciones de TDS de laboratorio muestran un gran grupo entre los ~7.000 mg/l - 20.000 mg/l, TP-1 evidenciando valores entorno a los ~42.000 mg/l y puntos cercanos al rajo (S-624 y S-632) alrededor de los ~75.000 mg/l.

En la tabla 7.1 se muestra un resumen con los valores obtenidos de pH y TDS para las zonas de estudio.

Tabla 7.1. Resumen de medidas de pH y concentración de TDS.

Zona	Sierra Gorda	Pampa Lina	Spence instalaciones	Spence depósito relaves	Centinela
pH	6,5-8	7,5-8	6,5-8	6-8	6-8
TDS (mg/l)	40.000-75.000	10.000-40.000	7.000-70.000	35.000-375.000	7.000-75.000

En todos los sectores estudiados se revela un pH neutro alcalino entre 6 y 8, para las aguas subterráneas. Por otro lado, en base a la clasificación de aguas salinas (Reif y Alhalabi, 2015) mostrada en la tabla 7.2, como contexto general predominan aguas subterráneas altamente salinas, muy altamente salinas y aguas de salmueras en el distrito Sierra Gorda.

Tabla 7.2. Clasificación de aguas salinas. Modificado de Reif y Alhalabi (2015).

Clasificación salina del agua	TDS (mg/l)
Agua fresca	< 500
Agua levemente salina	500 – 1.500
Agua moderadamente salina	1.500 – 7.000
Agua altamente salina	7.000 – 15.000
Agua muy altamente salina	15.000 – 35.000
Agua salmuera	> 35.000

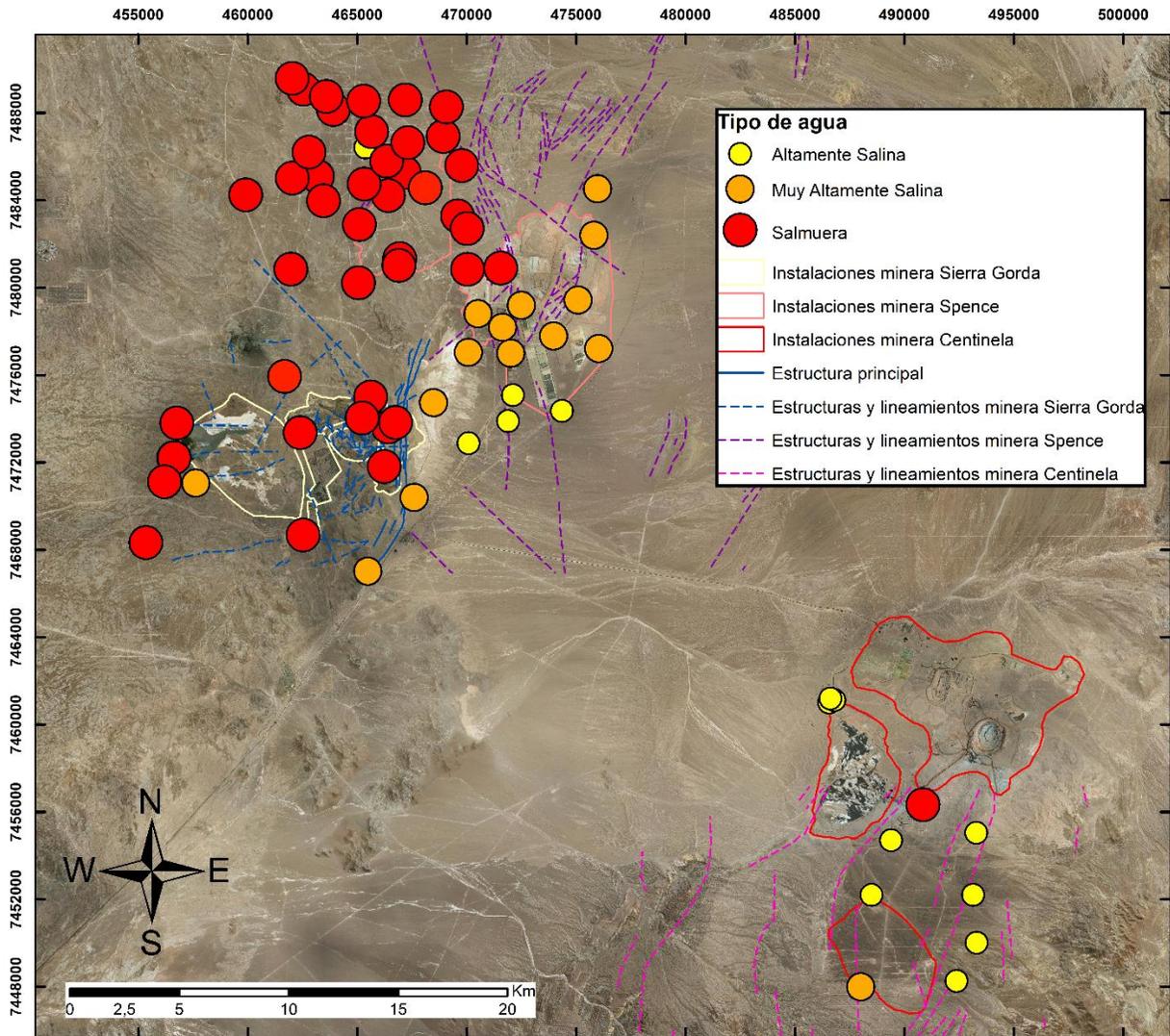


Figura 7.9: Distribución de TDS en el distrito Sierra Gorda. Concentraciones clasificadas en base a Reif y Alhalabi (2015).

La figura 7.9, que muestra la distribución de TDS en el distrito Sierra Gorda, revela que la faena Centinela presenta las menores concentraciones de TDS, predominando principalmente aguas altamente salinas, aunque algunos puntos muestran aguas muy altamente salinas y de salmuera. Hacia el suroeste del sector de las instalaciones de Spence también dominan aguas altamente salinas. Sin embargo, para el resto de esta área, y la zona de Pampa Lina, aumentan las concentraciones de TDS encontrando aguas muy altamente salinas. Finalmente, hacia el noroeste del distrito Sierra Gorda, en los sectores del depósito de relaves de Spence y faena Sierra Gorda, se localizan las mayores concentraciones de TDS, evidenciando aguas de salmuera.

Hay un claro aumento de la salinidad a medida que el flujo subterráneo se dirige de minera Centinela (sureste) hacia las faenas Sierra Gorda y Spence (noroeste). Además, la mayor diferencia de salinidades se presenta entre los sectores de la minera Centinela, instalaciones de Spence y Pampa Lina con las faenas Sierra Gorda y Spence sector depósito de relaves.

7.2.2 ELEMENTOS MAYORES

El diagrama de Piper de minera Sierra Gorda se muestra en la figura 7.10 y anexo 1.5 y los Stiff en la figura 7.11 y anexo 1.9, ambos también presentan los resultados de Pampa Lina. Los diagramas Piper de los sectores las instalaciones y depósito de relaves de faena Spence y faena Centinela se encuentran en los anexos 1.6, 1.7 y 1.8, respectivamente, mientras que los diagramas Stiff de estas zonas en los anexos 1.10 y 1.11.

La faena Sierra Gorda destaca por presentar tres tipos distintos de aguas: 1) Cloruradas sódicas, 2) Cloruradas cálcicas y 3) Sulfatas magnésicas. En el sector de Pampa Lina predominan las aguas sulfatadas sódicas, aunque también con presencia de cloruradas sódicas.

La distribución de diagramas de Stiff evidencia que las aguas subterráneas de Pampa Lina contienen menores concentraciones de iones, pero con una composición más homogénea, que las de faena Sierra Gorda; siendo el punto QS-237 el que presenta las mayores concentraciones de elementos.

En el sector de SGSCM, se observa un primer grupo de aguas alrededor del rajo minero con una composición clorurada sódica, este está compuesto por los puntos CB-4, CB-5, CB-6, CB-10 y QS-431. El pozo CB-6 varía algo su contenido, disminuyendo levemente las concentraciones de cloro y sodio para aumentar levemente las de magnesio y sulfato, lo que podría asociarse producto de la interacción con la zona mineralizada del rajo.

Al suroeste del rajo, se encuentra el pozo CB-9 con aguas sulfatadas magnésicas y concentraciones más altas que el resto de los otros puntos.

Al oeste de la faena las aguas cambian su composición a cloruradas cálcicas, con los valores de calcio más altos en los puntos CON-10 y CON-16, y las menores concentraciones de calcio, pero aun así mayor que en el sector este, en CB-7R, CB-8R, CB-11R y CON-15. Esta diferencia en la clasificación de las aguas es una primera aproximación que refleja una desconexión hidráulica entre los sectores este y oeste del depósito de relaves, lo que se continuará tratando más adelante.

En las instalaciones de minera Spence las aguas subterráneas son similares composicionalmente, clasificándolas como cloruradas y sulfatadas sódicas, en donde las mayores concentraciones son presentadas por los pozos SMP-1 y SPM-6. El primero, en el análisis de niveles mostraba una cierta desconexión en su nivel, lo que puede reflejarse composicionalmente también. Por otro lado, el segundo pozo presenta una composición similar a las aguas que se sitúan hacia el sector del relave de Spence.

Con la excepción de esos dos puntos mencionados, las concentraciones de las instalaciones de Spence son menores que las observadas en faena Sierra Gorda y a la vez similares con las de Pampa Lina, considerando que la dirección del flujo subterráneo se dirige hacia este último sector.

Diagrama Piper Sierra Gorda

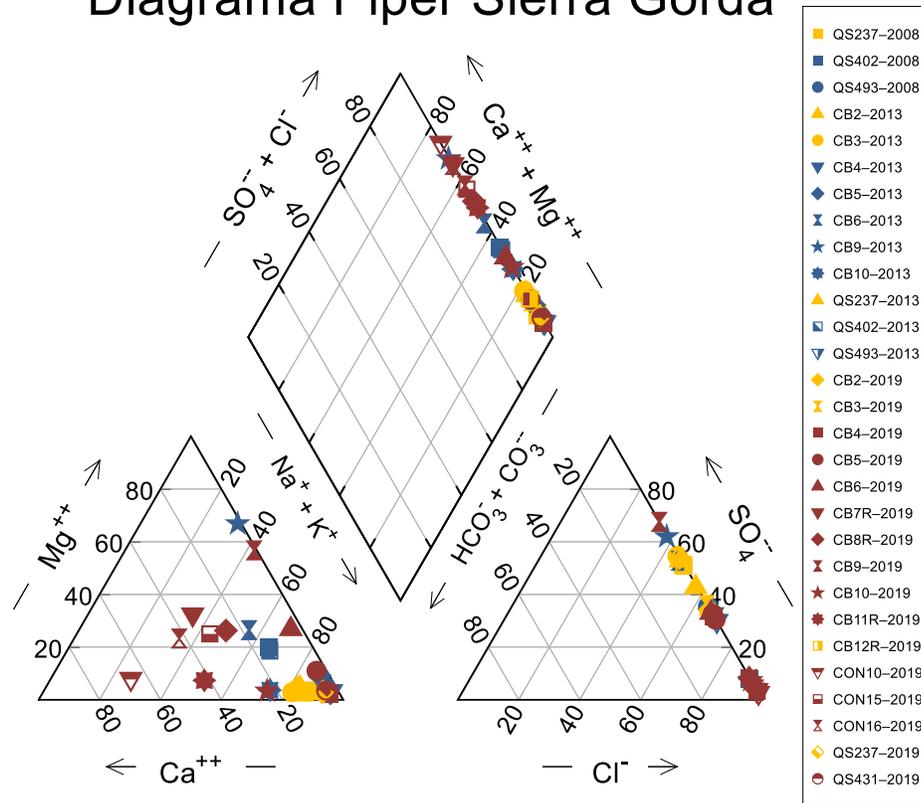


Figura 7.10: Diagrama Piper de minera Sierra Gorda y Pampa Lina.

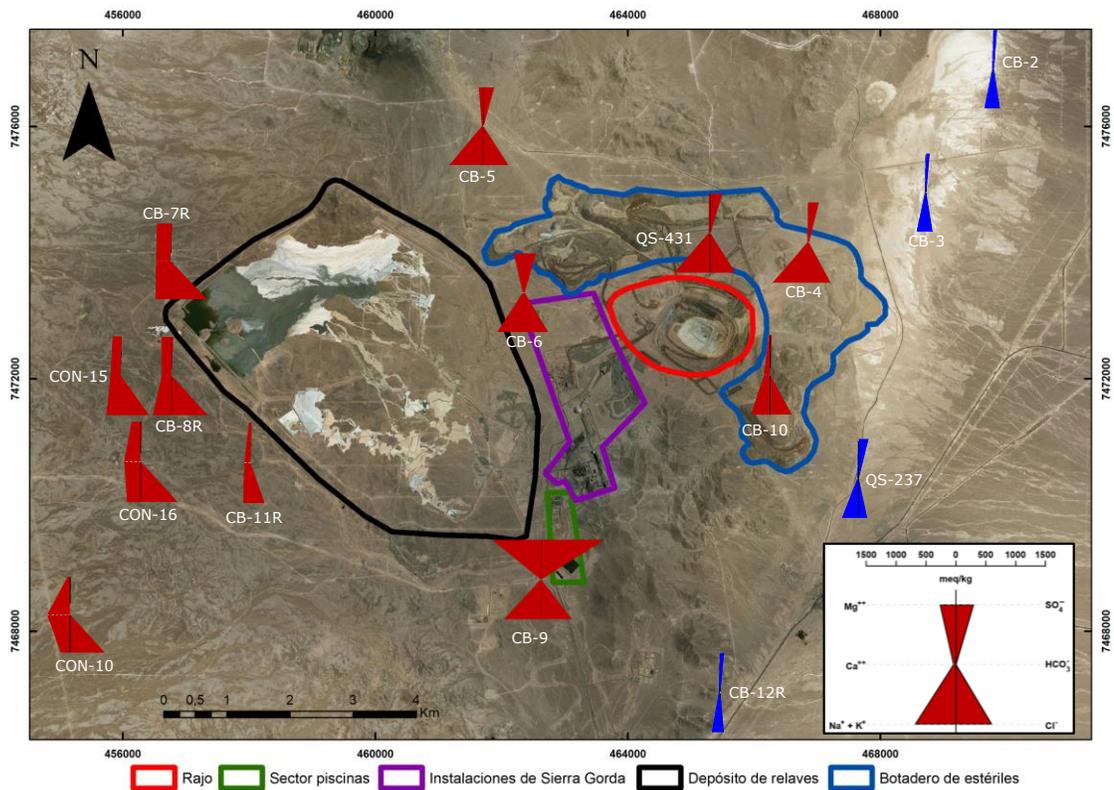


Figura 7.11: Diagramas Stiff de julio del 2019 de minera Sierra Gorda y Pampa Lina.

Hacia el noroeste de las instalaciones de Spence, en el área del futuro depósito de relaves, los datos son utilizados solo de manera referencial dado que son hasta del año 2016, por lo que no se puede analizar si estos han evolucionado químicamente en el tiempo. A pesar de ello, los diagramas muestran aguas de distinta índole, clasificándolas como cloruradas cálcicas y sódicas y sulfatas magnésicas.

En minera Centinela predominan aguas subterráneas sulfatadas sódicas, con presencia de aguas cloruradas sódicas. Por lo general, son homogéneas composicionalmente y presentan mucha menor concentración de elementos mayoritarios que faena Sierra Gorda y Spence sector depósito de relaves, pero similar a las de Pampa Lina y sur de las instalaciones de Spence.

En la tabla 7.3 se muestra un resumen con las aguas características de cada sector analizado.

Tabla 7.3. Resumen de clasificación de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda.

Sector	Sierra Gorda	Pampa Lina	Instalaciones Spence	Spence sector relaves	Centinela
Tipo de agua	Clorurada sódica	Clorurada sódica	Clorurada sódica	Clorurada sódica	Clorurada sódica
	Clorurada cálcica	Sulfatada sódica	Sulfatada Sódica	Clorurada cálcica	Sulfatada sódica
	Sulfatada magnésica	-	-	Sulfatada magnésica	-

En la figura 7.12 se visualiza la distribución de la composición química de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda. En esta zona predominan aguas subterráneas con una composición clorurada sódica, seguida por sulfatada sódica, luego clorurada cálcica y finalmente sulfatada magnésica.

En faena Centinela, suroeste de las instalaciones de Spence y sur de Pampa Lina existe mayor presencia de aguas sulfatadas sódicas. Sin embargo, en el norte de Pampa Lina, el resto de las instalaciones de Spence, el sector del depósito de relaves de Spence y la zona este de faena Sierra Gorda, predominan las aguas cloruradas sódicas.

Hacia el oeste de faena Sierra Gorda las aguas subterráneas muestran una composición clorurada cálcica, distinta al resto de esta zona. Esta signatura química también es posible localizarla hacia el noroeste del sector del depósito de relaves de Spence, pero con una distribución dispersa.

Por último, solo un punto de faena Sierra Gorda y tres pozos en el sector del depósito de relaves de Spence revelan una composición sulfatada magnésica dentro del distrito Sierra Gorda.

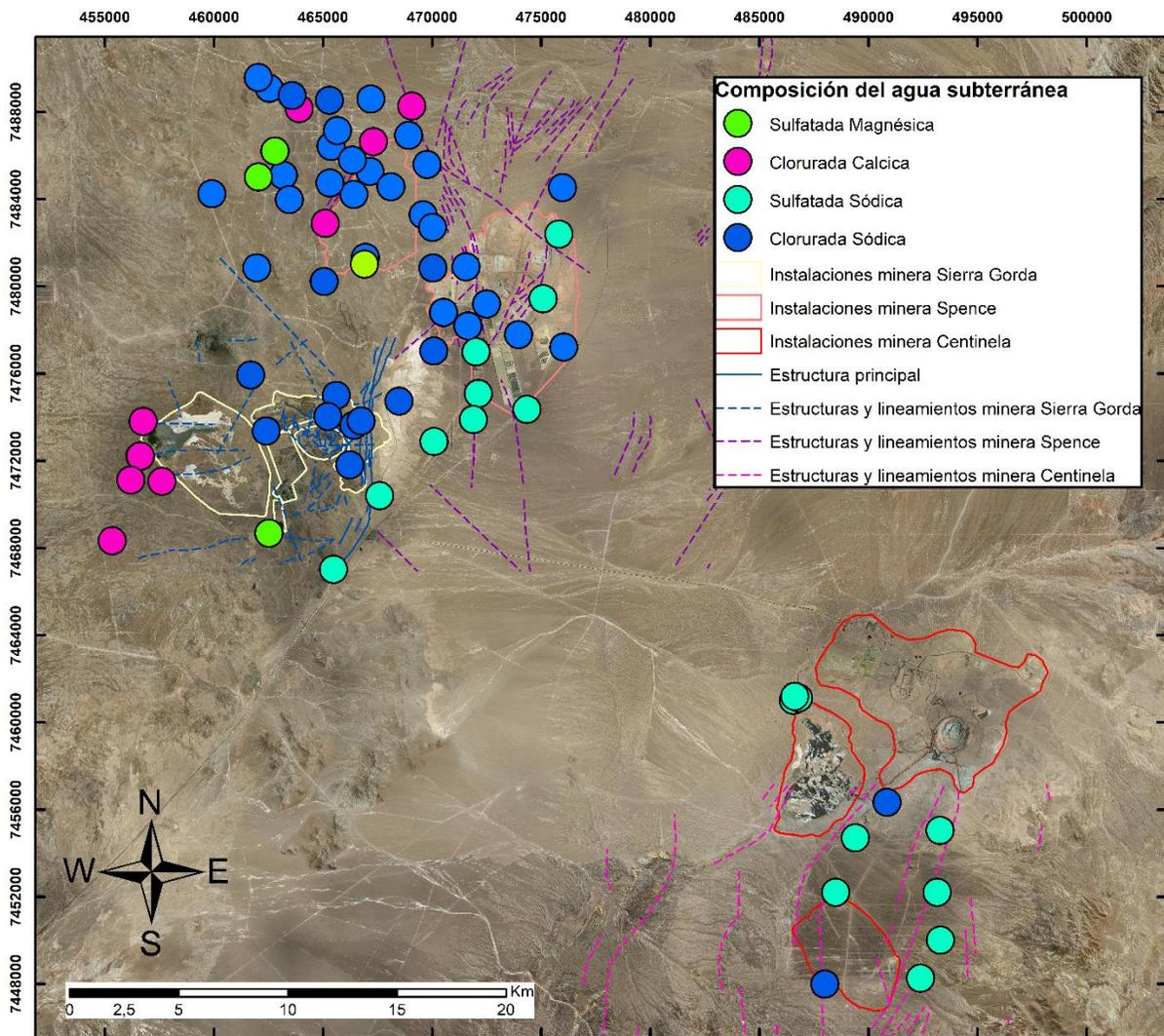


Figura 7.12: Distribución de la composición química de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda.

7.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO UNIVARIABLE

A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico univariante efectuados en el distrito Sierra Gorda, con el fin de comparar las concentraciones y valores de parámetros fisicoquímicos que caracterizan a las aguas subterráneas de cada faena. Este análisis involucra el cálculo de variables estadísticas básicas como lo son el promedio, desviación estándar, coeficiente de variación, mínimo y máximo de cada dato geoquímico obtenido.

Los datos utilizados son todos aquellos que aprueban el control de calidad mencionado en el capítulo 6. Además, se utiliza el registro de datos de todos los pozos de cada faena, reemplazando aquellas mediciones que poseen valores bajo el límite de detección por un valor igual a la mitad del límite mencionado.

Se comparan 30 elementos químicos (Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO₃, SO₄, F, NO₃, Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Sr, V) y los parámetros fisicoquímicos temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE) y TDS de terreno y laboratorio, siendo las instalaciones de Spence el sector del que recopila un menor número de parámetros geoquímicos.

En la tabla 7.4 se encuentra un resumen con los promedios de minera Sierra Gorda, Pampa Lina, instalaciones de Spence, sector depósito de relaves de Spence y Centinela de todos los parámetros geoquímicos medidos en el agua subterránea, para visualizar de manera más fácil la comparación. Los demás datos estadísticos y números de muestras utilizadas de cada localización están contenidos en los anexos 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5.

Los datos indican que la temperatura junto al pH (terreno y laboratorio) son los parámetros que presentan menor variación en las aguas subterráneas del distrito minero, caracterizándolas por presentar valores entre los ~22-26°C y ~6.8-7.8, respectivamente. El sector de SGSCM es el que presenta los menores valores de pH, pero aun así todas mantienen un carácter neutro oscilando entorno a pH 7. Además, esta zona es la que presenta la mayor cantidad de datos de análisis hidroquímico.

Las conductividades eléctricas (CE), de terreno y laboratorio, y TDS de laboratorio evidencian diferencias dentro del distrito Sierra Gorda, estos dos parámetros están relacionados entre sí, esto quiere decir que una alta conductividad eléctrica es producto de un alto contenido de elementos inorgánicos en el agua.

A continuación, se comparan los valores de conductividad eléctrica y TDS de laboratorio de las diferentes faenas: Centinela presenta los menores valores promedio de CE (16.821,98 uS/cm) y TDS (12.790,33 mg/l), le siguen los sectores de Pampa Lina (28.841,18 uS/cm y 22.536,33 mg/l) y las instalaciones de Spence (35.172,21 uS/cm y 22.333,76 mg/l) que tienen valores similares entre sí. Luego, sigue la faena Sierra Gorda (75.510,71 uS/cm y 67.708,49 mg/l) con valores que son un poco más que el doble de las medidas en estas zonas, y, finalmente, se encuentra al sector del futuro depósito de relaves de Spence (108.722,33 uS/cm y 124.910,39 mg/l), en donde los valores evidencian los máximos de toda la zona estudiada.

Tabla 7.4. Promedio de parámetros de muestreo de minera Sierra Gorda, Pampa Lina, minera Spence instalaciones y sector de relave y minera Centinela

		Promedio				
		Sierra Gorda	Pampa Lina	Spence instalaciones	Spence sector rel.	Centinela
T*	°C	25,30	22,69	25,88	24,88	22,86
pH*		6,81	7,77	7,36	7,03	7,76
CE*	uS/cm	71.363,47	29.024,32	37.537,59	112.063,97	14.083,20
TDS*	mg/l	38.923,72	18.685,89			
pH		6,89	7,75	7,32	7,13	7,53
CE	uS/cm	75.510,71	28.841,18	35.172,21	108.722,33	16.821,98
TDS	mg/l	67.708,49	22.536,33	22.333,76	124.910,39	12.790,33
Ca	mg/l	3.011,56	583,30	792,43	8.252,37	645,97
Mg	mg/l	3.410,84	131,47	316,60	5.008,40	229,90
Na	mg/l	14.475,47	6.879,10	6.258,24	27.656,12	3.387,04
K	mg/l	177,32	53,25	64,92	253,43	32,71
Cl	mg/l	26.471,12	6.256,29	7.364,12	61.249,59	2.927,71
HCO₃	mg/l	130,22	98,00	96,51	318,35	70,26
SO₄	mg/l	14.485,89	7.133,47	6.382,08	15.112,11	4.547,27
F	mg/l	0,89	1,99		0,81	0,84
NO₃	mg/l	5.788,01	2.301,58	1.049,59	5.866,62	972,70
Ag	mg/l	0,04	0,02			0,01
Al	mg/l	1,57	17,36		7,78	3,23
As	mg/l	0,10	0,08	0,06	0,07	0,10
B	mg/l	50,51	55,86		68,64	31,03
Ba	mg/l	0,11	0,10			0,01
Be	mg/l	0,02	0,02			0,02
Cd	mg/l	0,07	0,01			0,01
Co	mg/l	0,09	0,05		0,06	0,01
Cr	mg/l	0,05	0,11			0,03
Cu	mg/l	0,53	0,21	9,18	0,21	0,04
Fe	mg/l	3,27	10,79	2,99	7,47	2,00
Hg	mg/l	0,98	1,48			0,00
Li	mg/l	2,20	1,48		4,09	1,82
Mn	mg/l	6,73	0,87		2,40	0,11
Mo	mg/l	0,07	0,19		0,33	0,14
Ni	mg/l	0,12	0,07			0,02
Pb	mg/l	0,13	0,12			0,02
Se	mg/l	0,17	0,03			0,27
Sr	mg/l	32,54	11,48		170,50	8,71
V	mg/l	0,07	0,15			0,02
Zn	mg/l	1,36	0,38		0,80	0,11

*= Medición adquirida en terreno

Las diferencias más grandes en la signatura química de las aguas subterráneas ocurren, principalmente, en los elementos mayores y algunos menores, que además son los iones que cuentan con más información. Es por ello, que en cada pozo de cada sector de estudio se calcula el promedio de los sólidos totales disueltos y de iones mayoritarios y minoritarios.

Los anexos 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 muestran el promedio calculado para cada pozo de cada faena de los aniones Cl, SO₄, HCO₃ y NO₃ y los cationes Ca, Mg, Na, K, B y Sr, además del promedio de TDS.

Las figuras 7.13 y 7.14 muestran gráficamente el promedio de concentraciones de aniones y cationes, respectivamente, versus las medidas de TDS en cada pozo, en escalas logarítmicas.

Los registros de calidad del agua del sector del depósito de relaves de Spence están limitadas como máximo hasta el año 2016, pero se incluyen para tenerlas como referencia. Cabe destacar, que los muestreos recopilados en las instalaciones de Spence no consideran datos de B ni de Sr.

El Cl es el anión que presenta las diferencias más claras entre las faenas, con una tendencia de ir aumentando sus concentraciones, desde Centinela, que tiene los menores valores (2.927,71 mg/l), seguido por Pampa Lina (6.256,29 mg/l) y Spence instalaciones (7.362,12 mg/l), con medidas similares, y faena Sierra Gorda (26.471,12 mg/l) hasta llegar a Spence sector relaves con los mayores valores (61.269,69 mg/l) de todo el distrito Sierra Gorda.

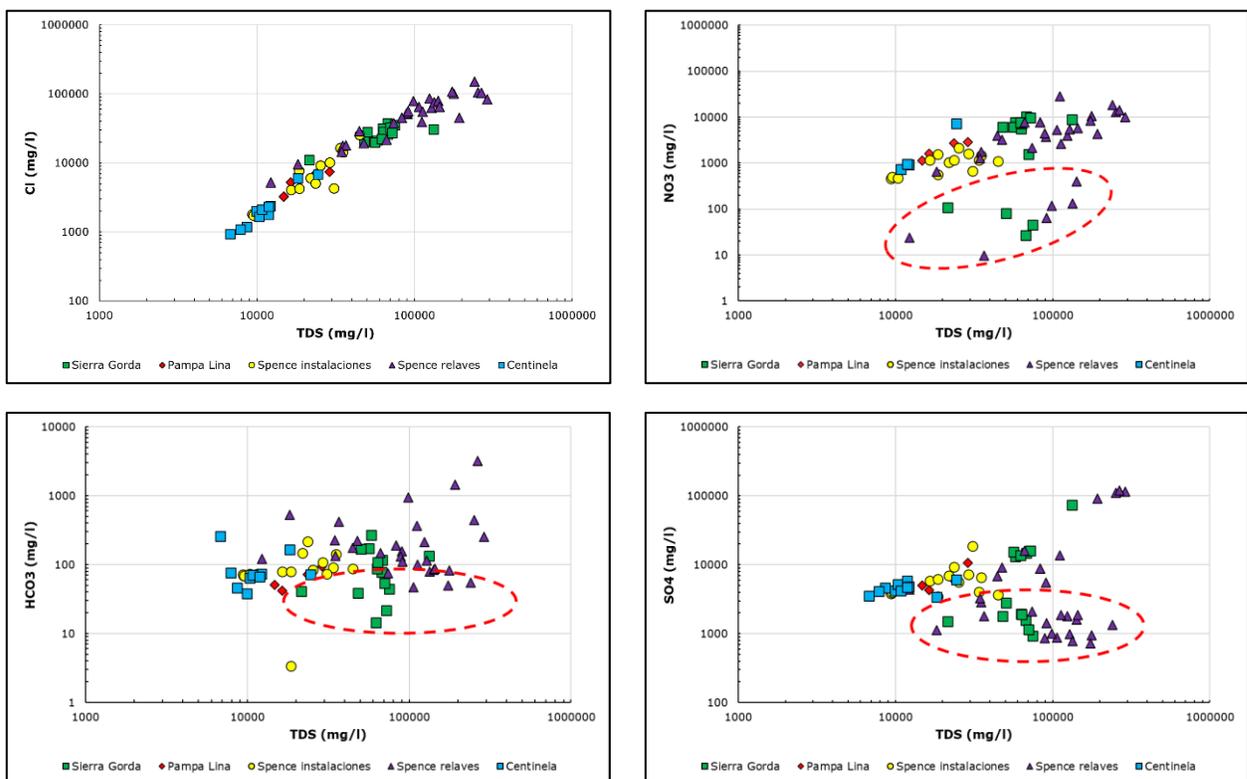


Figura 7.13: Gráficos del promedio por pozo de sólidos disueltos totales (TDS) versus aniones de Sierra Gorda, Pampa Lina, Spence instalaciones, Spence sector relaves y Centinela.

La misma tendencia general se da con los otros aniones, pero no tan marcada dado que presenta variaciones en algunos pozos. Por ejemplo, en las zonas marcadas en rojo en la figura 7.13, se evidencian concentraciones más bajas o iguales de NO_3 , SO_4 y HCO_3 en determinados puntos de minera Sierra Gorda y Spence sector relaves con el resto de las zonas, evidenciando un comportamiento diferente a la tendencia general de aumento.

En el sector del depósito de relaves de Spence, los tres aniones muestran una distribución dispersa en los puntos de muestreo. Puede ser que agua remanente, utilizada en la perforación de los pozos, incida en una reducción de las concentraciones del agua subterránea, considerando que las perforaciones fueron realizadas entre el 2011 y 2016 y que el medio hospedante del acuífero es roca de muy baja permeabilidad.

En faena Sierra Gorda, a los bajos valores de nitrato y bicarbonato se les atribuye la misma explicación que para el sector relaves de Spence. Sin embargo, las concentraciones más bajas de sulfato corresponden a agua subterránea localizada hacia el oeste del depósito de relaves.

Para el caso de los cationes (Ca, Mg, Na, K, B y Sr) se muestra nuevamente, y muy marcadamente, la tendencia de aumentar las concentraciones hacia minera Sierra Gorda y Spence sector relaves. Además, también se muestra que solo algunos pozos de estas dos faenas tienen concentraciones similares con las aguas de minera Centinela, Spence instalaciones y Pampa Lina, escapando de este trend, lo que se refleja en los gráficos de Ca, B y Sr (zona roja en figura 7.14).

En el sector del depósito de relaves de Spence el Ca, B y Sr evidencian una distribución dispersa de los puntos de muestreo, por lo que bajos valores se atribuyen a la misma explicación que para los aniones. En faena Sierra Gorda, los valores más bajos de boro se localizan al oeste del depósito de relaves, mientras que los valores más bajos de calcio y estroncio se ubican al este del tranque de relaves.

Otro punto relevante de mencionar es la magnitud en que las medidas de concentración se diferencian. Si bien, minera Centinela suele tener las concentraciones más bajas de aniones y cationes, los datos de Pampa Lina y Spence instalaciones, que son similares entre sí, no superan en ningún orden de magnitud de diferencia a las medidas de iones en las aguas subterráneas de esta faena. Caso contrario se da entre estos tres sectores mencionados con las mineras Sierra Gorda y Spence sector relaves, en donde es muy común encontrar diferencias de un orden de magnitud e incluso dos. A su vez, entre estos dos últimos lugares no se suele superar un orden de diferencia, evidenciando concentraciones parecidas entre sí.

El cloro es el anión de mayor relevancia en todo el contexto general con un promedio en minera Sierra Gorda de 26.471,12 mg/l, seguido por el sulfato (14.485,89 mg/l), nitrato (5.788 mg/l) y, finalmente, el bicarbonato, que presenta las menores concentraciones (130,22 mg/l). En cuanto a los cationes, el que tiene mayor presencia es el sodio (14.475,47 mg/l), seguido por el magnesio (3.410,84 mg/l), calcio (3.011,56 mg/l) y, por último, el potasio (177.32 mg/L). El boro y estroncio también adquieren importancia en la zona, destacando con promedios en faena Sierra Gorda igual a 50,51 mg/l y 32,54 mg/l, respectivamente.

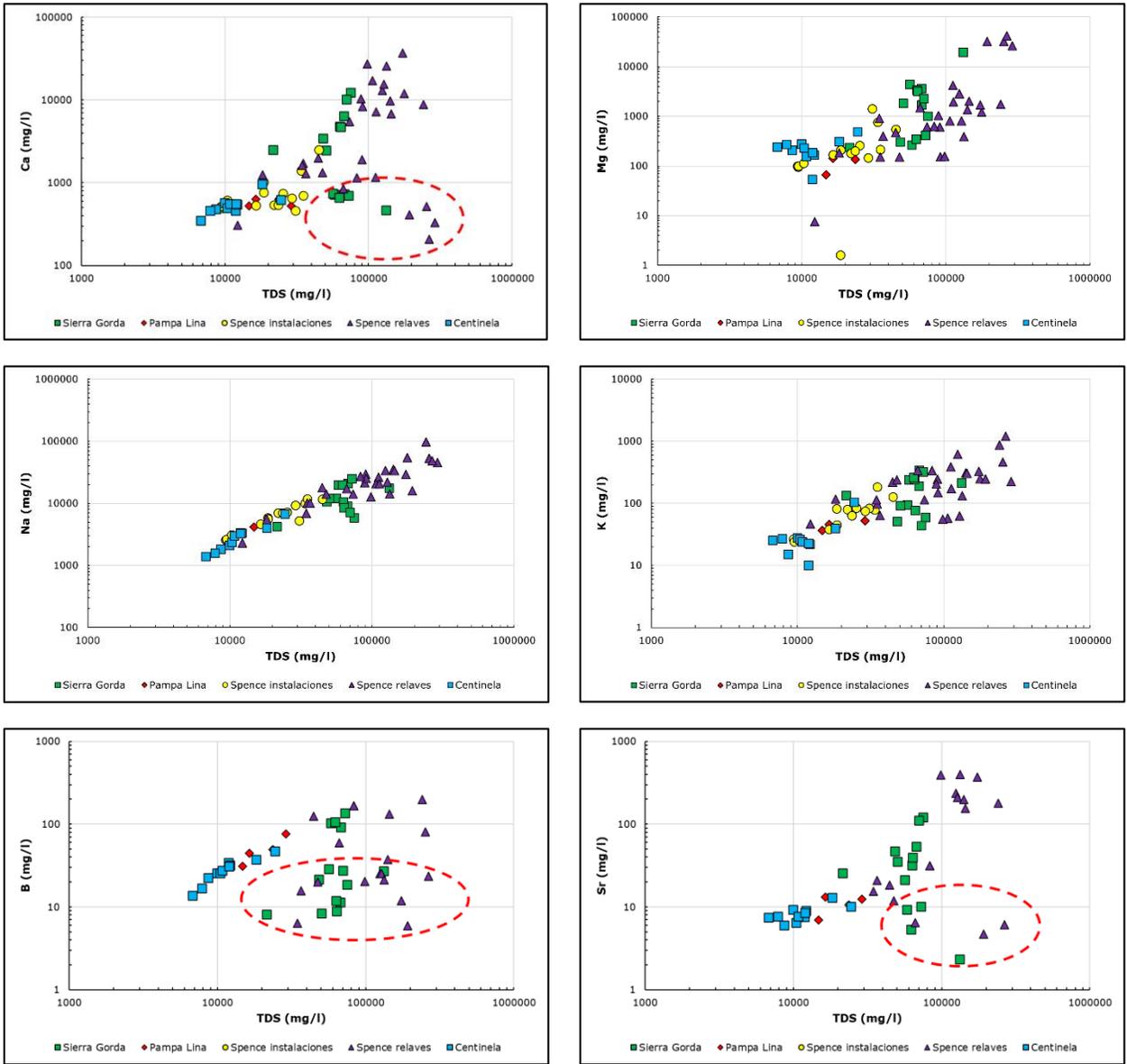


Figura 7.14: Gráficos de solidos disueltos totales (TDS) versus cationes de Sierra Gorda, Pampa Lina, Spence instalaciones, Spence sector relaves y Centinela.

8 PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE FAENA SIERRA GORDA

Se analizan los procesos hidroggeoquímicos, ocurridos en tiempos recientes en las aguas subterráneas de la faena Sierra Gorda, asociados a infiltraciones desde el depósito de relaves y sector de piscinas, con la finalidad de comprobar el origen del ascenso de niveles cercanos al depósito de relaves y sector piscinas y evaluar afecciones a la calidad del agua.

Para ello, primero se establece un contexto hidroquímico alrededor de las zonas de interés con el afán de comparar la signatura química entre los puntos de monitoreo, hay que recordar que existe una diferencia entre los gradientes hidráulicos de los sectores este y oeste del tranque de relaves, lo que también se refleja en la composición de las aguas. Esto se logra mediante el análisis de dendogramas y comparación de elementos de interés entre los sectores.

Se continúa con un estudio de los niveles freáticos y analitos, medidos en terreno y laboratorio, desde el inicio del monitoreo en cada punto hasta la actualidad, para detectar en que pozos se han producido infiltraciones y que parámetros químicos son los que presentan modificaciones en su tendencia natural. Finalmente, se calculan los índices de saturación mineral en el tiempo, con el fin de comprobar si la mezcla de aguas produce reacciones químicas que modifiquen las concentraciones de las napas subterráneas y así determinar la fuente de los ascensos de aguas.

Los pozos de interés para este análisis son CB-5, CB-6 y CB-9, situados en el área central de la faena minera, al noreste del depósito de relaves y cerca del sector de piscinas (CB-9), y los puntos CB-7R, CB-8R, CB-11R, CON-15 y CON-16 ubicados al oeste del depósito de relaves. En la figura 5.1 se encuentra la distribución espacial de estos puntos.

Además, solo se utilizan las mediciones que aprobaron el control de calidad detallado en el capítulo 6.

8.1 CONTEXTO HIDROQUÍMICO ALREDEDOR DEL DEPÓSITO DE RELAVES

8.1.1 ANÁLISIS DE DENDOGRAMAS

Para la elaboración de dendogramas se utiliza el software Statgraphics. En estos gráficos se agrupa a los pozos de estudio en conglomerados, los cuales son grupos que contienen a los puntos de monitoreo que poseen características similares, que para este caso son las mediciones de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de cationes y aniones. Las variables consideradas son temperatura, pH, CE y TDS de laboratorio, Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO₃, SO₄, NO₃, B, Sr, Mn, Li y Fe.

El procedimiento consiste en que, inicialmente, cada pozo se encuentra separado del resto y luego se combinan los dos que tienen los valores más cercanos entre sí, dando origen a los primeros grupos. Después se recalcula la distancia entre los grupos, combinando los dos más cercanos para formar un nuevo conglomerado. Este proceso es repetido hasta generar un único gran

grupo que contiene al resto. Se utilizan dos métodos distintos, el del Vecino Más Cercano y el de Ward, para comprobar que los conglomerados sean los mismos.

Para el análisis de dendogramas, además de utilizar los pozos mencionados previamente, se añaden los puntos CON-10 y CON-16, para cubrir un área más amplia del sector oeste del depósito de relaves, y CB-7 y CB-8, que si bien no llegan hasta el acuífero de Sierra Gorda, son utilizados a modo de referencia, dado que sus mediciones en la zona no saturada aportan datos de la interacción de agua con sales cementantes de la unidad sedimentaria que son disueltas producto de infiltraciones desde el depósito de relaves.

Las mediciones utilizadas son agrupadas en trimestres para suplir los outliers eliminados, considerando a febrero, marzo y abril el primer trimestre, a mayo, junio y julio el segundo, agosto, septiembre y octubre el tercero y a noviembre, diciembre y enero el cuarto. Esta división se hizo en base a que el último muestreo, utilizado en este estudio, de todos los pozos mencionados datan de mayo, junio y julio del año 2019 (el año 2020 no tiene datos de todos estos puntos). Por otro lado, la fecha de inicio del análisis de dendogramas abarca desde el segundo semestre del año 2017, que es cuando se obtienen las primeras medidas en los pozos CB-R.

Previo a este trabajo, Vergara (2014) realizó dendogramas entre los años 2012 y 2013 que evidencian una primera agrupación en el sector de Pampa Lina con los puntos CB-2, CB-3 y QS-237, lo que es consistente con lo mostrado hasta ahora debido al sistema de fallas norte sur que separa a este sector con faena Sierra Gorda, un segundo grupo con CB-4, CB-5, CB-10, QS-402, QS-493 y QS-352, caracterizados por estar en los alrededores del rajo minero al este del depósito de relaves y finalmente un grupo compuesto únicamente por el pozo CB-9, distanciado del resto.

En la figura 8.1 se muestra un ejemplo de dos dendogramas representativos correspondientes al segundo semestre del 2017 y cuarto semestre del 2018, el resto de las figuras son presentadas en los anexos 3.1, 3.2 y 3.3. Las líneas horizontales que conectan grupos indican un conglomerado.

Los resultados exponen tres grandes grupos, que son los que más se repiten y a su vez tienen subdivisiones:

El primer grupo está compuesto por los puntos CB-7R, CB-8R, CB-11R, CON-10, CON-15 y CON-16 (verde). Coincidentemente, todos estos se sitúan al oeste del depósito de relaves. Además, existe un subconglomerado que agrupa a CON-10 y CON-16, distanciándolos del resto. Por otro lado, los otros cuatro restantes suelen mostrar resultados similares entre sí, en especial CB-8R y CON-15 que son los más cercanos y acostumbran a estar asociados con CB-7R y algo más distanciado de CB-11R.

CB-5, CB-6 y CB-9 es el segundo conglomerado (rojo), especialmente difieren con el grupo anterior debido a que se localizan al este del depósito de relaves. Los primeros dos pozos siempre se presentan cercanos entre sí, mientras que CB-9 se encuentra más alejado de estos, evidenciando una separación con todos los puntos de faena Sierra Gorda, mismos resultados son mostrados en el estudio previo (Vergara, 2014).

La última agrupación resultante es la de los pozos CB-7 y CB-8 (azul), que muestran una distancia abismal en relación con el resto de los puntos. Esto ocurre dado que sus mediciones del

agua corresponden a soluciones acuosas hiperconcentradas, producto de que las aguas de infiltración desde el depósito de relaves disuelven sales encontradas en los primeros metros de la capa sedimentaria. Por lo que no representan el agua del acuífero de Sierra Gorda, pero aportan una primera impresión respecto a infiltraciones desde el tranque de relaves que será tratada más adelante.

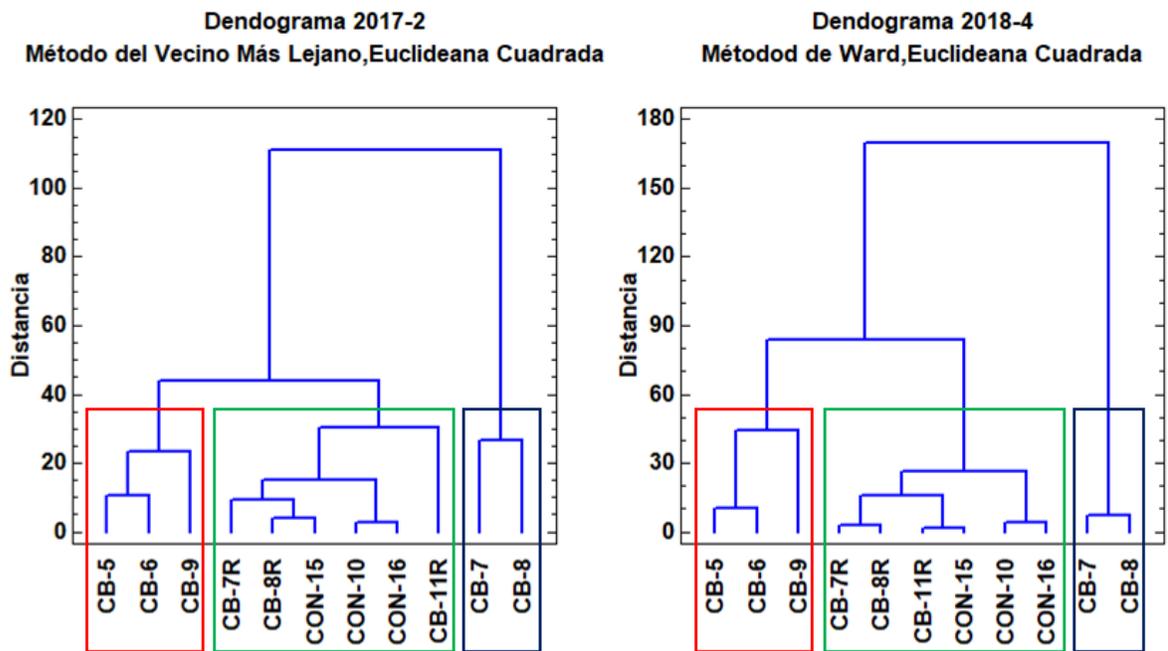


Figura 8.1: Dendrogramas representativos en las cercanías del depósito de relaves y sector de piscinas.

8.1.2 COMPARACIÓN DE VARIABLES QUÍMICAS ENTRE SECTORES ESTE Y OESTE DEL DEPÓSITO DE RELAVES

A continuación, se procede a dilucidar cuales parámetros fisicoquímicos y elementos son los que evidencian diferencias entre los sectores este y oeste del tranque de relaves, que es donde se localizan los dos grupos principales. Para esto, se utilizan los pozos más cercanos al sector de interés y que cuenten con mediciones del acuífero de faena Sierra Gorda, o sea, los puntos CB-7R, CB-8R, CB-11R y CON-15 hacia el oeste y CB-5, CB-6 y CB-9 hacia el este.

Para apreciar la magnitud de diferencia entre los puntos, se grafican en el tiempo y en escala logarítmica las medidas de cada pozo, a excepción de los elementos que presentan medidas bajo el límite de detección. Los gráficos se encuentran en los anexos 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4.

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos, CB-11R es el pozo que presenta los menores valores de TDS de laboratorio y conductividad eléctrica. Es posible que en este punto exista agua remanente de la instalación del pozo, y en consecuencia las concentraciones muestreadas no sean completamente del acuífero de faena Sierra Gorda. Contrariamente, CB-9 muestra un ascenso en sus concentraciones de TDS, debido a infiltraciones desde el sector de piscinas, por lo que sus medidas se comienzan a distanciar del resto. Los demás pozos no muestran diferencias relevantes

entre sí en estos parámetros, como tampoco lo hacen en los datos de pH, demostrando en todos los puntos cifras similares.

Los aniones cloro, bicarbonato y nitrato no revelan deferencias entre los sectores este y oeste, salvo los pozos CB-11R, que para los tres aniones tiene concentraciones por debajo de las del resto, y CB-7R, que tiene medidas de nitrato incluso menores que el pozo anterior. El sulfato es el anión clave al evidenciar que los puntos del lado oeste del depósito de relaves tienen concentraciones de un orden más bajo que los de la otra zona; a su vez, en el lado este, el pozo CB-9 destaca por presentar los mayores valores de toda faena Sierra Gorda, superando en casi un orden de magnitud a CB-5 y CB-6 y en casi dos órdenes a los puntos del sector oeste.

El calcio y estroncio son los cationes con mayor presencia al oeste del tranque de relaves, siendo un orden superior a los del este. Los valores de estroncio en CB-5 y CB-9 son casi nulos y en CB-6 son superiores a estos dos, pero aun así más bajos que los del otro sector.

Para el resto de los cationes, el sodio y boro muestran sus mayores concentraciones hacia el lado este. El primero tiene valores de casi un orden más que el lado oeste, mientras que el segundo presenta sus máximos en CB-5, con magnitudes de casi un orden mayor que la zona oeste.

En el magnesio no se observa una diferencia significativa a ambos lados del tranque de relaves, pero si en CB-9, que cuenta con concentraciones de un orden superior a los demás pozos, y en CB-11R, en donde estas son de un orden inferior a las del resto. Por último, el potasio no revela diferencias entre ambas zonas de interés, sin embargo, el pozo CB-5 es el que ha presentado los mayores valores a lo largo del tiempo.

También, se comparan los elementos menores litio, manganeso, aluminio, arsénico, hierro y cobre, pero sus concentraciones no permiten establecer una separación entre los sectores analizados, dado que muestran valores semejantes a ambos lados. Solo destacan las concentraciones de arsénico medidas en el pozo CB-9 que suelen ser superiores a las del resto de puntos de monitoreo.

En la tabla 8.1 se expone un resumen de las variables químicas presentes en los sectores este y oeste del depósito de relaves. Los parámetros no mencionados son aquellos que no presentan una diferencia entre ambas zonas.

Tabla 8.1. Resumen de variables químicas presentes en los sectores este y oeste del depósito de relaves.

Sector	Mayores concentraciones
Este	Na, SO ₄ , B, Mg (CB-9), TDS (CB-9)
Oeste	Ca, Sr

8.2 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS DATOS GEOQUÍMICOS

En lo que sigue, se muestra la evolución de la calidad de las aguas subterráneas, en cada punto de interés, desde el inicio del monitoreo hasta el último muestreo considerado para este estudio en abril del año 2020. Además, se presentan las variaciones del nivel freático en cada punto de muestreo.

Los datos de calidad de agua en CB-5 y CB-6 son comparados con los muestreos realizados desde el interior de la cubeta del depósito de relaves. Mientras que los de CB-9 se contrastan con las muestras de agua adquiridas en el sector de piscinas.

Es necesario tener presente las siguientes consideraciones a la hora de visualizar los datos:

- Inicialmente, la gran mayoría de las muestras eran tomadas mediante una bomba sumergible posterior a un proceso de purga que extraía un volumen de agua de 2 a 3 veces el interior del pozo. El problema con este procedimiento es que algunos pozos no lograban recargarse debido a la falta de aporte por la baja permeabilidad del basamento. En octubre del año 2014 la forma de muestreo es modificada, desde esta fecha la toma de muestras es realizada mediante un bailer, que es un tubo con una capacidad de ~1L que se inserta en el pozo para sacar la muestra; se desconoce cuánto volumen de agua se purga antes de la toma de muestra.
- Desde enero del 2015 la empresa “ETFA” SGS es la encargada de realizar este procedimiento y de analizar la muestra de agua adquirida en su propio laboratorio. Los resultados se caracterizan por presentar continuas variaciones en las mediciones y concentraciones, de la mayoría de los elementos menores y traza, bajo el límite de detección, a pesar de que previamente estas presentaban ciertos valores. Además, frecuentemente los resultados de balance iónico sobrepasan el 10% de error, incluidas las mediciones realizadas en agosto, septiembre y octubre del 2019.
- En noviembre del 2019 se cambia la empresa “ETFA” de muestreo, siendo ahora Cesmec la encargada de la toma de muestras y análisis. El procedimiento continúa siendo por medio de un bailer, sin embargo, se obtienen concentraciones de los elementos menores y traza que previamente no eran medidas.
- Por último, se informa que el inicio de la descarga de relaves bajo la berma 3, sector oeste del depósito de relaves (figura 5.1), comienza en agosto del año 2014, mientras que arriba de la berma 3, zona este depósito de relaves, se efectúa en enero del año 2017.

8.2.1 NIVELES FREÁTICOS EN EL TIEMPO

Se analizan los niveles freáticos para detectar posibles infiltraciones desde el tranque de relaves y/o sector de piscinas que alteren la estabilidad de la superficie del agua en los puntos de interés. La figura 8.2 muestra la evolución de los niveles freáticos en el tiempo.

Hacia el oeste del tranque de relaves, los pozos CB-7R, CB-8R y CB-11R muestran desde el inicio de las mediciones un ascenso del nivel freático, el cual se asocia a la recuperación natural de la superficie de agua, luego del descenso generado por las instalaciones de los pozos, y que sería retardado por la muy baja permeabilidad del basamento que hospeda al agua. Se observa una estabilidad del nivel, en estos pozos, el segundo semestre del año 2019. Sin embargo, se considera que las mediciones realizadas en esa fecha contienen errores, ya que, posteriormente, hubo un cambio de empresa en la toma de datos y los niveles de CB-7R y CB-11R evidencian una continuación en la recuperación de la superficie freática que es consistente con la que se presentaba previamente. Desde la supuesta estabilidad (octubre del año 2019) los pozos CB-7R y CB-11R ascendieron en 1,08 y 6,95 m respectivamente.

Por otro lado, el pozo CB-8R revela un ascenso del nivel en 28,31 m, desde octubre del año 2019, mientras que el sondaje abierto CON-15, ubicado próximo a CB-8R, exhibe un alza de 62,33 m, desde junio del año 2019. Este último punto presenta una estabilidad previa, entorno a la cota ~1424 m.s.n.m., que se observa abruptamente alterada, mientras que el punto CB-8R cambia drásticamente su pendiente de ascenso, inicialmente por la recuperación del nivel, por lo que se descartan errores en la toma de datos y se asocian estas alteraciones a procesos externos. El sondaje abierto CON-15 no se encuentra sellado en todo su largo, como si lo está el pozo, por lo que, posiblemente, afecciones superficiales provenientes desde el depósito de relaves infiltren hasta el acuífero a través de esta apertura. Esta inyección desde la superficie generaría un empuje lateral, por medio de fracturas interconectadas, hacia el pozo CB-8R, que presenta menores alzas de nivel.

Los pozos localizados al este del tranque de relaves presentan alteraciones en su nivel freático posterior descarga de relaves sobre la berma 3, a inicios del 2017. CB-5 mostraba estabilidad alrededor de la cota ~1.599 m.s.n.m., pero entre junio del 2017 y julio del 2020 ha registrado un ascenso del nivel freático de 6 m. Lo mismo ocurre en CB-6, en donde inicialmente el nivel del agua subterránea bordeaba los ~1.601 m.s.n.m. hasta marzo del 2017, fecha desde la que este aumenta en 18,47 m hasta el año 2020. Ambos pozos muestran a comienzos del 2019 una estabilización, que se revierte en un nuevo ascenso desde el año 2020, y cuya fase se atribuye a errores en la toma de datos al no ser consistente con los ascensos de nivel previos y posterior a esta fecha. La única fuente de agua cercana y que puede aportar tal cantidad de agua en estos sectores es el depósito de relaves, por lo que los aumentos de nivel se asocian a esta obra antrópica.

Al sur de estos pozos, CB-9 registra un alza en el nivel freático en 60,92 m desde octubre del año 2014 hasta julio del 2020. Las posibles fuentes antrópicas cercanas que pueden aportar agua son el depósito de relaves, al noroeste de este punto, y/o las piscinas ICV (agua potable) y de agua de mar, ambas localizadas al noreste de CB-9 y más cercanas.

La figura 8.3 muestra la distribución espacial de los pozos MCB, en las cercanías de CB-9, y la figura 8.4 la evolución de sus niveles freáticos en el tiempo. En estos puntos se realizan mediciones desde el segundo semestre del año 2017 hasta octubre del año 2019.

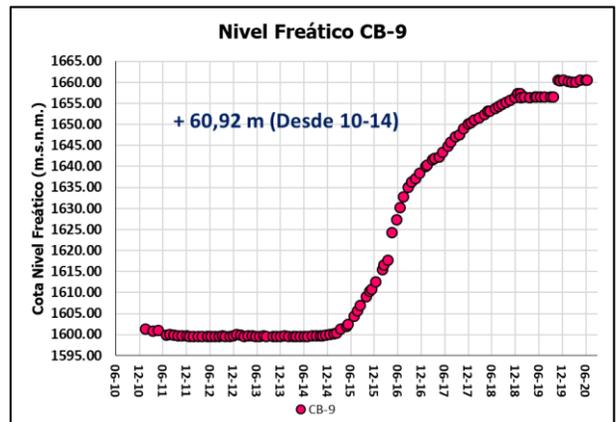
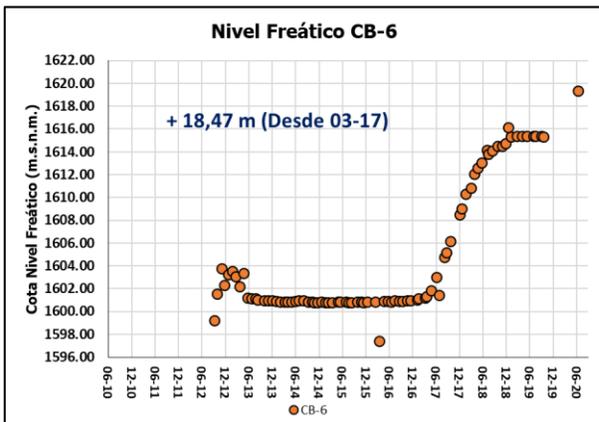
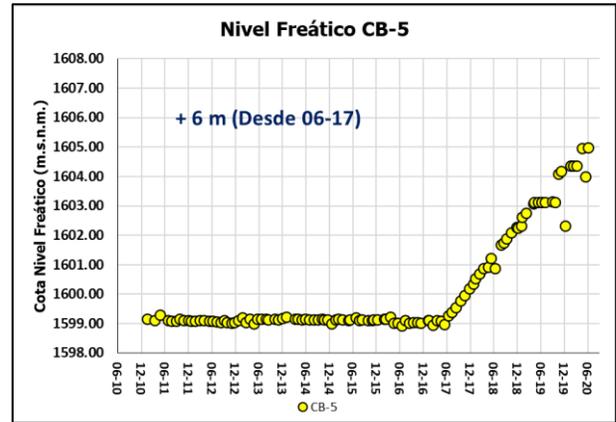
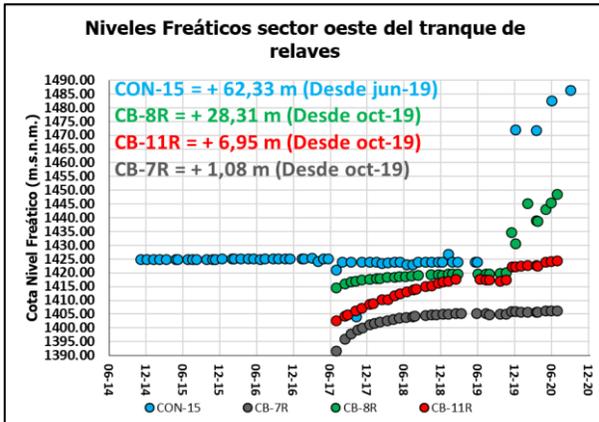


Figura 8.2: Evolución en el tiempo de los niveles freáticos de pozos CB-5, CB-6, CB-9, CB-7R, CB-8R, CB-11R y sondaje abierto CON-15.

MCB-01 y MCB-02 son los pozos más cercanos al depósito de relaves y sus niveles se muestran relativamente estables alrededor de las cotas ~1595,5 m.s.n.m. y ~1586 m.s.n.m., respectivamente. Aunque MCB-01 se registra seco la mayoría del tiempo. Por el contrario, los pozos MCB-03 y MCB-04 registran un aumento del nivel, desde el inicio de sus mediciones, en ~17 m y ~16 m, respectivamente. Otro dato relevante de considerar es que a inicios del año 2019 se efectúa una reparación del fondo de la piscina de agua de mar y, coincidentemente, desde este instante comienza una estabilización del nivel en los pozos MCB-03, MCB-04 y CB-9.

El comportamiento de niveles, en particular de los pozos MCB-03 y MCB-04, apunta al sector de piscinas como el origen de los ascensos observados, dado que los pozos MCB-01 y MCB-02, ubicados más próximos al depósito de relaves, no revelan aumentos en sus niveles. Posiblemente, la afección proviene desde la piscina de agua de mar, ya que los niveles se estabilizan una vez que esta es reparada. Pero no se descarta que también exista un aporte desde la piscina ICV.

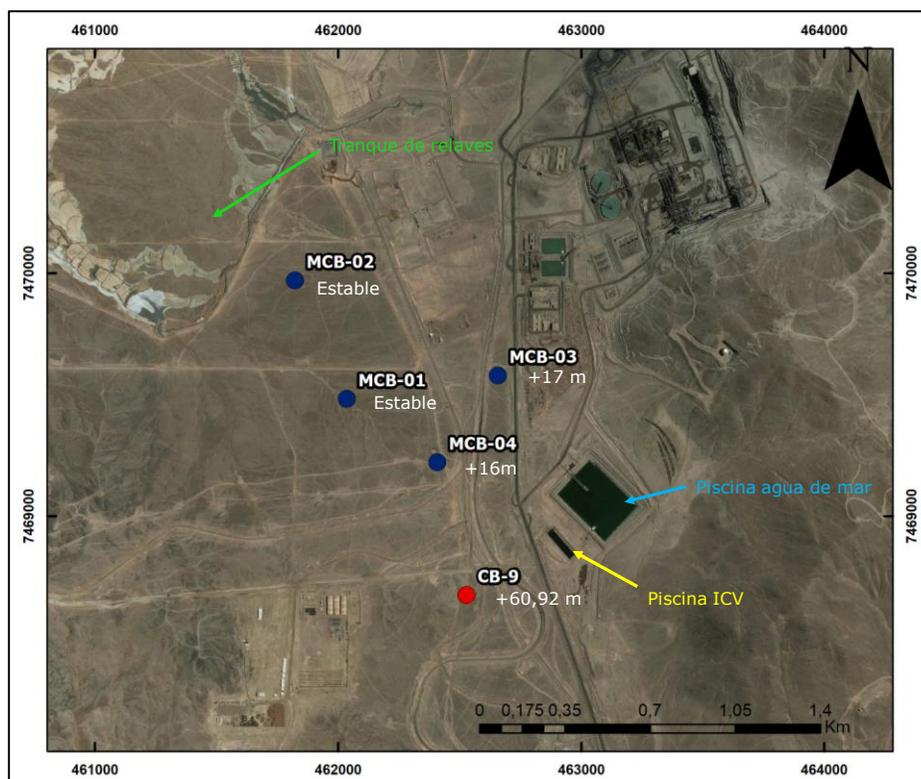


Figura 8.3: Distribución espacial de pozos MCB y sus respectivos ascensos de niveles de agua subterránea.

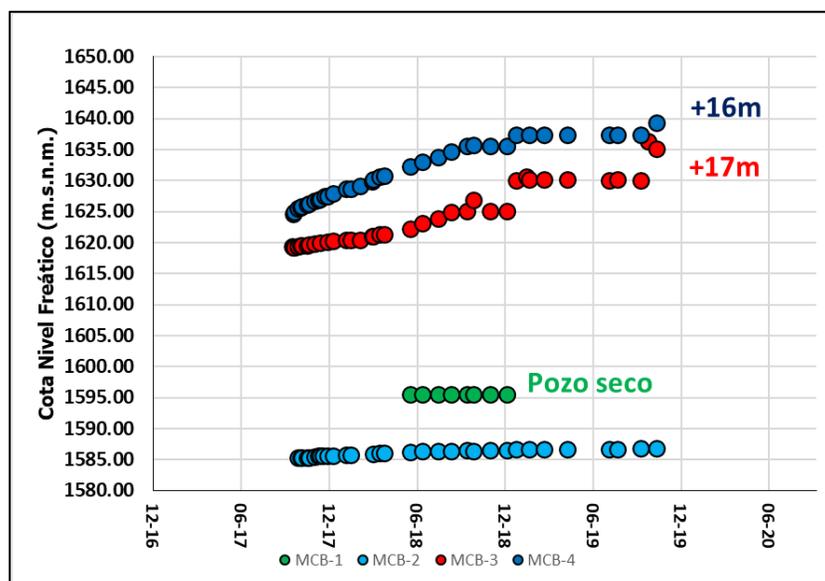


Figura 8.4: Evolución temporal de niveles freáticos de pozos MCB.

8.2.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL TIEMPO

En los anexos 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7 se muestra el comportamiento en el tiempo de los parámetros fisicoquímicos tales como la temperatura, pH, conductividad eléctrica y TDS, medidos en terreno, laboratorio y calculados (para el caso de los TDS), por punto de monitoreo.

- CB-5:

El pozo CB-5 presenta una temperatura que varía aproximadamente entre los 22-27°C, manteniéndose estable en este intervalo. Por otro lado, el pH de terreno antes de agosto del 2014 presenta valores dentro del rango aproximado 5,5-6,5, con la excepción de solo tres datos que se encuentran fuera (~5,3, ~6,7 y ~7,5). Posterior a esa fecha, el grueso de los datos de terreno y laboratorio suele encontrarse, aproximadamente, en el rango de pH 7-8, presentando solo una muestra de terreno pH igual a 6,4.

Por otro lado, las mediciones de conductividad eléctrica, de terreno y laboratorio, se encuentran históricamente entre los ~75.000-90.000 uS/cm, pero presentando un aumento de los valores de conductividad de terreno desde el segundo semestre del 2017 hasta inicios del 2019, en donde algunos valores exceden el rango histórico alcanzando hasta los ~95.000 uS/cm. Sin embargo, posterior a esa fecha se retorna al rango histórico.

Los valores de TDS calculados y de laboratorio se encuentran dentro de los ~65.000-80.000 mg/l, no presentando variaciones significativas dentro de ese rango, hasta el primer semestre del año 2016. Posterior a esta fecha, y hasta el año 2018, las concentraciones se mantienen relativamente estables en los ~70.000 mg/l. Desde el año 2019 hay un ascenso hasta los ~80.000 mg/l.

Contrariamente, antes de mediados del 2014 los TDS medidos en terreno se encuentran alrededor de los 55.000 mg/l, para posteriormente descender y adquirir valores cercanos a los 40.000 mg/l. Desde el segundo semestre del 2017 los valores de TDS terreno comienzan a aumentar hasta alcanzar valores cercanos a los 60.000 mg/l, mostrando una tendencia casi estable entorno a estos valores, para a inicios del 2019 volver a descender hasta los ~35.000 mg/l.

Los parámetros fisicoquímicos se presentan relativamente estables en el tiempo, variando dentro de un rango de valores. Pese al alza del nivel freático, los parámetros analizados no evidencian una alteración asociada a este proceso.

- CB-6:

La temperatura se presenta estable a lo largo del tiempo, encontrándose aproximadamente entorno a los 25°C. El pH medido en terreno y laboratorio también suele encontrarse estable dentro del rango 7-8, que es algo menor que el pH medido en el tranque de relaves, el cual está entorno al pH 8, superando este valor hasta ~8,5.

Por otra parte, las conductividades eléctricas medidas en terreno y laboratorio presentan constantes aumentos desde el inicio del monitoreo el año 2013. La primera presenta un aumento

desde ~35.000 uS/cm hasta una estabilización en un pequeño período de tiempo entorno a los 60.000 uS/cm, para luego continuar desde el segundo semestre del 2016 con un aumento que se estabiliza alrededor de los ~67.000 uS/cm. Se continua con un nuevo ascenso de los valores a inicios del 2018 que perdura hasta el segundo semestre del 2019, alcanzando un peak entorno a los 80.000 uS/cm. Para el año 2020 los valores descienden alrededor de los 70.000 uS/cm. Se interpreta el primer aumento producto de que las mediciones iniciales pueden corresponder a agua relacionada a la instalación del pozo hasta lograr el nivel de estabilización mencionado, los otros incrementos se dan cuando comienzan los ascensos del nivel freático.

La conductividad eléctrica de laboratorio también presenta un primer aumento asociado a la estabilización producto de la instalación del pozo. El segundo ascenso en los valores ocurre desde ~64.000 uS/cm hasta ~68.000 uS/cm, donde adquiere una estabilización hasta inicios del 2018, fecha desde la cual aumenta por tercera vez alcanzando un peak ~75.000 uS/cm y encontrándose dentro del rango 70.000-75.000 uS/cm hasta el primer semestre del 2020.

Las concentraciones de TDS medidas en terreno, al igual que las medidas de conductividad eléctrica, presentan los menores valores al inicio del muestreo, producto del agua usada en la instalación del pozo, que van desde los ~17.000 mg/l a los ~30.000 mg/l, donde se estabiliza hasta el segundo semestre del 2016, fecha desde la que adquiere un nuevo ascenso que se muestra estable entorno a los 33.000 mg/l hasta inicios del 2018, momento desde el cual las concentraciones continúan aumentando hasta alcanzar un máximo de ~51.000mg/l.

Los valores de TDS en laboratorio y calculados son parecidos entre sí, pero superiores a las medidas in situ, y evidencian un aumento en las concentraciones que va desde los ~60.000 mg/l hasta un peak de ~70.000 mg/l. Este aumento es menos abrupto que el mostrado por las mediciones in situ.

Las muestras de agua realizadas en el depósito de relaves suelen tener mayores valores que los del pozo CB-6, con la conductividad eléctrica encontrándose entre ~60.000 y 130.000 uS/cm y los TDS entre ~40.000 y 130.000 mg/l. Ambos parámetros presentan alta variabilidad en los datos.

La CE y TDS evidencian una primera etapa de estabilización del pozo hasta el año 2014. Este equilibrio es interrumpido a mediados del 2016 con un aumento de estos valores que coincide, al mismo tiempo, con los primeros ascensos del nivel freático (aún no se dispara todo del nivel). Se detecta una tercera etapa de incrementos a inicios del 2018.

- CB-9:

Los registros de temperatura no presentan grandes variaciones, oscilando entorno a los 25°C. En cuanto al pH, las mediciones in situ y de laboratorio son bastantes similares entre sí, denotando un pH alrededor de 7. Sin embargo, desde finales del 2017 el pH de terreno muestra un leve descenso alcanzando valores cercanos al pH 6,5. Las mediciones de pH del agua de mar son superiores, encontrándose dentro del rango ~7.5-8.

La conductividad eléctrica en terreno presenta valores alrededor de los 90.000 uS/cm, en el rango ~80.000-95.000 uS/cm con un aumento que alcanza un peak en los ~100.000 a fines del 2016. Luego, la conductividad eléctrica se reduce hasta los 80.000 uS/cm, a inicios del 2017, que

continúa con un progresivo aumento hasta llegar a valores cercanos a ~105.000 uS/cm, superando la tendencia histórica. Esto ocurre hasta la última medición el año 2020.

La conductividad eléctrica de laboratorio dispone de valores similares a la in situ, presentando un primer aumento, comenzando el 2016, desde los ~85.000 uS/cm hasta alcanzar los ~105.000 uS/cm a fines del 2016. Luego los valores se reducen hasta ~82.000 uS/cm para continuar con un claro aumento desde principio del 2017 alcanzando un máximo valor de ~115.000 uS/cm. Este ascenso se presenta hasta las últimas mediciones.

El agua de mar muestra valores muy por debajo del pozo CB-9 entorno a los 55.000 uS/cm hasta inicios del 2019.

La concentración de los TDS en terreno se mantiene estable cercano a los ~50.000 mg/l hasta el comienzo del 2018, año en que aumenta sus concentraciones hasta los ~70.000 mg/l. Para el 2019, los valores alcanzan los ~75.000 mg/l. Durante el 2020 los datos continúan mostrando aumento hasta ~105.000 mg/l.

En contra parte, inicialmente los TDS medidos en laboratorio y calculados se muestran estables en ~60.000 mg/l hasta mediados del 2014. Posterior a esto, las concentraciones aumentan continuamente, alcanzando los ~200.000 mg/l. Este aumento de las concentraciones coincide con el ascenso del nivel freático, por lo que podría guardar relación con las infiltraciones de las instalaciones de Sierra Gorda.

- CB-7R:

Todos los parámetros fisicoquímicos supervisados en el pozo CB-7R se encuentran estables sin grandes alteraciones.

La temperatura se encuentra entorno a los 27°C. El pH de terreno evidencia un valor alrededor de 6.8 con una baja que alcanza el pH 6, mediados del 2019, pero que luego vuelve a retornar a un pH 6.8. Por su lado, el pH de laboratorio se presenta en equilibrio alrededor del pH 7.

La conductividad eléctrica de terreno y laboratorio se encuentran entre los 80.000 y 90.000 uS/cm, respectivamente. Ambas mediciones se presentan relativamente estables dentro de ese rango durante el registro.

Los TDS medidos in situ se concentran cerca de los ~40.000 mg/l, alcanzando hasta los ~58.000 mg/l. Los datos entregados por el laboratorio son superiores a los de terreno, concentrándose entorno a los 70.000 mg/l, pero con un aumento que alcanza los 80.000 mg/l en el 2020. Por otro lado, los TDS calculados presentan valores menores a los del laboratorio y son los que se encuentran más estables en las proximidades de los 58.000 mg/l.

- CB-8R:

Los datos de temperatura son estables a lo largo del registro alrededor de los 27°C. Por su lado, el grueso de pH medido en terreno y laboratorio se encuentra entre 7-7.5 y equilibrado.

La conductividad eléctrica medida en terreno varía dentro del rango ~70.000-95.000 mg/l. Mientras que la obtenida en laboratorio se muestra constante en las cercanías de los 80.000 uS/cm.

La conductividad eléctrica medida en laboratorio se muestra constante en las cercanías de los 80.000 uS/cm. Mientras que la obtenida in situ presenta mayor variabilidad en el registro dentro del rango 60.000-95.000 mg/l.

Las mediciones in situ de TDS tienen alta variabilidad entre los 30.000-60.000 mg/l. Por otro lado, la concentración de TDS entregados por el laboratorio se encuentran dentro del rango ~60.000-75.000 mg/l, con mayor estabilidad entorno a los 65.000 mg/l. Mientras que los TDS calculados presentan valores en el rango 50.000-63.000 mg/l.

- CB-11R:

La temperatura se muestra estable y cercana a los 27°C. El pH medido en terreno y en laboratorio tiene mediciones en equilibrio en las cercanías de 7,5, excepto en el año 2019, cuando descienden hasta los ~6,8, pero nuevamente retornan a la tendencia histórica el año 2020.

La conductividad eléctrica obtenida en terreno varía entre los ~25.000-35.000 uS/cm. Por otro lado, la entregada por el laboratorio se encuentra entre los ~25.000-30.000 uS/cm, sin grandes variaciones. El año 2020 ambas mediciones tienen valores similares.

En cuanto a los TDS, el medido en terreno tiene alta variabilidad entre los ~14.000-22.000 mg/l, el entregado por el laboratorio tiene las mayores concentraciones entre los ~20.000-25.000 mg/l y el calculado se encuentra entre los 17.000-22.000 mg/l

- CON-15:

La temperatura oscila entre los ~25-30°C. El pH tomado en terreno tiene una buena correlación con el de laboratorio, encontrando valores alrededor de 6,8.

Los datos de la conductividad eléctrica adquiridos en terreno varían en el rango 55.000-85.000 uS/cm; el grueso de los valores se sitúa en las proximidades de 70.000 uS/cm. Mientras que las medidas de conductividad eléctrica de laboratorio se muestran estables alrededor de los 73.000 uS/cm.

Los TDS medidos en terreno presentan una alta dispersión entre 28.000-51.000 mg/l, los obtenidos en laboratorio se encuentran dentro del intervalo 53.000-75.000 mg/l y los calculados entre los 50.000-60.000 mg/l.

8.2.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE ELEMENTOS MAYORES

Los elementos mayoritarios determinados para la faena Sierra Gorda son aquellos que en el análisis estadístico (anexo 2.1) presentan concentraciones mayores a 5 mg/L (Merkel, 2002). Dicho esto, son los elementos Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO₃, SO₄, NO₃, B y Sr, los cuales serán analizados por pozo para establecer posibles alteraciones de elementos químicos en el tiempo en distintas zonas de la minera Sierra Gorda. En los anexos 6.1, 6.2 y 6.3 se encuentran los gráficos de evolución de elementos mayores en el tiempo.

- CB-5:

El calcio muestra una tendencia estable con valores que varían dentro del rango ~500-900 mg/l a lo largo de su registro. Contrariamente, las concentraciones de magnesio han ido en descenso desde el inicio del monitoreo, comenzando con mediciones cerca de los 2.000 mg/l para terminar en los ~1.000 mg/l el año 2020. Cuando el nivel del agua asciende se observa un pequeño ascenso en ~400 mg/l, pero que luego continúa rápidamente con la baja de los valores.

El sodio presenta valores históricos dentro del intervalo 18.000-25.000 mg/l. El año 2017 se logra una estabilización en los ~19.500 mg/l que se pierde a finales del 2018, posterior al ascenso del nivel de agua, debido que aumentan progresivamente las concentraciones alcanzando hasta los ~26.000 mg/l. Por su lado, números de potasio están estables entre los ~250-400 mg/L, solo presentando concentraciones en los ~140 y ~200 mg/l el año 2020.

Los valores de boro y estroncio no evidencian alteraciones, destacando por una estabilidad dentro de los rangos ~70-130 mg/l y ~0,1-1,3 mg/l, respectivamente.

En cuanto a los aniones, el cloro tiende a presentar concentraciones estables en los ~25.000 mg/l, mientras que el nitrato varía dentro de los ~8.000-12.000 mg/l sin cambios considerables. El bicarbonato se caracteriza por grandes variaciones, estabilizándose entorno a los ~150 mg/l hasta finales del 2018, fecha desde la que se reduce la concentración a ~80 mg/l. El sulfato dispone de concentraciones de ~17.000 mg/l, que luego descienden hasta estabilizarse entre los 11.000-15.000 mg/l; posterior al ascenso del nivel freático se encuentran algunos valores superiores a este rango el año 2020.

- CB-6:

Las concentraciones de calcio se han mantenido relativamente estable alrededor de los 750 mg/l, variando dentro del rango ~500-950 mg/l. No se observa una alteración en los valores de calcio post ascenso de nivel debido a infiltraciones desde el depósito de relaves, considerando que las concentraciones en el tranque de relaves son superiores a las adquiridas en el pozo, dado que se usan aditivos ricos en calcio en el proceso de flotación para aumentar el pH y no producir acidez, por lo que las concentraciones de este catión no se ven alteradas por el agua de relaves.

El magnesio presenta notables variaciones a lo largo del tiempo. Desde el inicio de la toma de datos hay un incremento en las concentraciones desde los ~1.500 mg/l hasta los ~5.500 mg/l el primer semestre del 2018. Posterior a esta fecha, junto al ascenso del nivel de agua, los valores van

continuamente descendiendo hasta lograr concentraciones cercanas a los 2.800 mg/l el año 2020. Por otro lado, las muestras del depósito de relaves presentan cifras menores, a las medidas por el pozo, en el rango ~1.000-3.800 mg/l. El descenso empieza 1 año después del comienzo del ascenso del nivel, por lo que podrían asociarse a una mezcla con las aguas infiltradas del tranque de relaves, pero también podría ser algo más general en el acuífero considerando que CB-5 presenta descensos de magnesio desde el inicio de la toma de datos hasta la actualidad.

El sodio es el catión con mayor presencia en este sector. En un inicio las concentraciones se estabilizan cerca de los ~10.000 mg/l hasta mediados del 2016, que es cuando hay un constante aumento que pareciera lograr un equilibrio alrededor de los 15.000 mg/l a inicios del 2019 y que perdura hasta el 2020. Es preciso mencionar que los mayores aumentos coinciden con el ascenso del nivel freático, y la estabilización de este es al mismo tiempo que la de la concentración del sodio.

El catión con menor presencia es el potasio. Su concentración no suele presentar variaciones relevantes, dentro del rango ~50-100 mg/l, hasta inicios del 2018 en donde las cifras comienzan a aumentar levemente logrando concentraciones de ~150 mg/l. Para el 2020 los valores nuevamente entran al rango que venía presentando históricamente. Los valores de potasio del tranque de relaves suelen ser de un orden más que los del agua subterránea y, como se aprecia en el anexo 6.1, el ascenso de la concentración de potasio es solo de ~50 mg/l.

El boro es un catión que desde el inicio del registro se presenta estable con concentraciones entre los ~20-30 mg/l hasta mediados del 2017. Desde este instante, los datos aumentan continuamente hasta alcanzar un peak de ~50 mg/l, superior a la tendencia histórica y manteniéndose así hasta el 2020. El incremento de boro se inicia cuando aumenta el nivel del agua y los dos se estabilizan al mismo tiempo. Sin embargo, las concentraciones de boro en el tranque de relaves son inferiores a las de las aguas subterráneas, por lo que el ascenso podría no estar asociado directamente a estas aguas.

Antes del año 2017, el estroncio se encuentra en las aguas subterráneas del pozo CB-6 entre los ~20-40 mg/l. Posterior a esta fecha, hay un marcado descenso en donde la concentración se encuentra alrededor de los ~15 mg/l. La disminución en los valores se da en el instante en que asciende la napa subterránea. Además, el estroncio en las muestras del tranque de relaves se caracteriza por una menor concentración, por lo que la disminución de este elemento en el agua subterránea puede estar asociado a la infiltración. Por otro lado, el estroncio suele reemplazar al calcio en la estructura de los minerales, como por ejemplo en plagioclasas cálcicas; por lo que no se descarta un proceso relacionado a esta sustitución iónica.

En cuanto a los aniones, el cloro es el que evidencia las mayores concentraciones en ~20.000 mg/l. Estas aumentaron desde los ~11.000 mg/l, en el inicio del registro, hasta los ~20.000 mg/l durante el primer semestre del año 2016, este incremento puede ser producto de la estabilización del agua del pozo por la instalación de este. Desde inicios del año 2019 los valores han aumentado desde los 20.000 mg/l hasta los ~22.000 mg/l en el 2020. No se observa una correlación entre el ascenso del nivel freático y los niveles del cloro. Se podría decir que infiltraciones desde el relave no han alterado las concentraciones de cloro, considerando que estas tienen un mayor contenido que las aguas subterráneas.

El bicarbonato es el anión que tiene una menor presencia en el sector. En un comienzo adquiere una estabilidad entorno a los ~140 mg/l los años 2014 y 2015, para luego aumentar su concentración y mostrar un equilibrio en ~160 mg/l a fines del 2016 e inicios del 2017. Desde esta última fecha, la concentración aumenta hasta alcanzar un peak de ~200 mg/l a inicios del 2019, mismo instante en que el nivel freático se estabiliza. Posterior a esto, los valores de bicarbonato descienden entre ~110-150 mg/l. En todo momento la concentración del anión bicarbonato medida en el depósito de relaves es inferior a la medida en el pozo, por lo que no se encuentra una relación directa entre la infiltración y este ascenso.

El sulfato muestra hasta inicios del 2017 una estabilidad en el intervalo ~15.000-17.500 mg/l. Posterior a esta fecha presenta una ampliación de este rango encontrando concentraciones entre los ~12.500-17.500 mg/l. Si bien, la disminución en los valores es relativamente baja, la reducción de la concentración podría estar asociada a infiltraciones desde el tranque de relaves, considerando que este último tiene valores inferiores al agua subterránea.

El nitrato suele mostrarse estable en las cercanías de los 6.500 mg/l. Sin embargo, entre los años 2016 y 2017 se detecta un alza hasta los ~7.500 mg/l, a mediados del 2017, para luego descender bruscamente hasta los ~4000 mg/l y continuar con un progresivo aumento logrando la estabilidad que se tenía en un comienzo. El descenso mencionado coincide con el aumento del nivel freático, por lo que podría haber una alteración producto del agua del relave que tiene menor concentración de nitrato. Ahora bien, esto solo ocurre en un lapsus acotado y no perdura en el tiempo.

- CB-9:

El calcio suele presentar un comportamiento estable dentro de los ~300-700 mg/l, aunque desde el año 2016 los datos tienden a aglomerarse entorno a los ~400 mg/l, que son concentraciones que también tiene el agua de mar. La piscina ICV presenta medidas casi nulas de este catión.

El magnesio dispone valores alrededor de los ~17.500 mg/l hasta el ascenso del nivel freático, desde este momento las concentraciones van en aumento hasta lograr un peak de ~32.500 mg/l a mediados del 2018. Luego de esto, los valores descienden hasta los ~8.000 mg/l el año 2020. Además, entre los años 2016 y 2017 hay un descenso desde los 21.000 mg/l hasta los 12.500 mg/l, pero que luego vuelve aumentar siguiendo la tendencia de aumento inicial. Las concentraciones de magnesio de muestras de agua de mar son de ~2.000 mg/l y las de la piscina ICV de ~0 mg/l, muy inferiores a las de las aguas subterráneas.

Previo a las infiltraciones, el sodio se concentra en ~15.000 mg/l. Pero, luego muestra una tendencia de aumento de los valores hasta los ~30.000 mg/l. Mientras tanto, el agua de mar exhibe medidas inferiores alrededor de los ~10.000 mg/l y el agua de la piscina ICV casi nulas.

Desde el comienzo de registros de calidad de agua, el potasio se muestra estable en ~150 mg/l hasta mediados del 2017, desde esta fecha los valores aumentan alcanzando hasta los ~1.400 mg/l el año 2020. El agua de mar presenta mayores valores que el agua subterránea al comienzo, alrededor de los ~400 mg/l, pero que luego son superados. La piscina ICV muestra mediciones casi nulas de potasio.

Inicialmente, el boro dispone de concentraciones que se encuentran en ~15 mg/l hasta principios del 2016, que es cuando los valores ascienden hasta alcanzar un máximo de ~110 mg/l el año 2020. Por el contrario, las medidas en el agua de mar son estables en ~8 mg/l y las de la piscina ICV aún mucho más bajas.

En un principio el estroncio se concentra en los ~5 mg/l, pero después los valores descienden a ~1 mg/l a mediados del año 2017. Posterior a esta fecha, se observa una tendencia ascendente de las concentraciones hasta los 6 mg/l. Sin embargo, en la última medición del 2020, los valores retornan a ~1 mg/l. Por su lado, el agua de mar presenta valores de ~7 mg/l y la piscina ICV casi nulas.

El cloro, a lo largo del registro, tiende a presentar concentraciones estables en los ~29.000 mg/l, con una alteración los años 2015 y 2016 en donde aumenta sus valores para luego retornar a la estabilidad. El agua de mar exhibe valores inferiores en los ~20.000 mg/l, mientras que la piscina ICV contiene escaso contenido de cloro.

Al comienzo del registro, el bicarbonato presenta valores entre los ~300-500 mg/l, los cuales descienden desde el año 2015 para encontrarse estables dentro del rango ~70-200 mg/l, presentando una alta variabilidad en los datos; posiblemente este comportamiento se debe al cambio de procedimiento en la toma de muestras. El agua de mar contiene concentraciones similares entorno a los ~100 mg/l y el agua de la piscina ICV en ~80 mg/l.

El anión sulfato muestra una tendencia a aumentar sus concentraciones, cuyos valores van desde los ~60.000 mg/l, previo al ascenso del nivel de agua, hasta alcanzar un máximo de ~140.000 mg/l a inicios del 2019, luego las concentraciones descienden hasta los ~70.000 mg/l el año 2020. Entre los años 2016 y 2017 se presenta un descenso en las concentraciones, similar a lo ocurrió con el magnesio, para luego retornar a la tendencia ascendente. El agua de mar tiene mediciones inferiores entorno a los ~ 2.000 mg/l, mientras que los de la piscina ICV son cercanos a ~0 mg/l.

Por último, el nitrato a lo largo de su registro evidencia que los valores van en un continuo aumento desde los ~7.000 mg/l, previo a las infiltraciones de agua, hasta los ~20.000 mg/l el año 2020. Contrariamente, el agua de mar y de la piscina ICV tienen valores cercanos a ~0 mg/l, muy inferiores a las medidas del agua subterránea.

- CB-7R:

En este pozo las concentraciones de los elementos son muy estables, al igual que en todos los del sector oeste del tranque de relaves. El sodio es el que muestra una mayor presencia, con una concentración alrededor de los ~8.000 mg/l, seguido por el calcio entre los ~5.000- 8.000 mg/l, magnesio en los ~3.000-4.500 mg/l, potasio en ~150 mg/l, boro entre ~5-15 mg/l, y finalmente estroncio en ~60 mg/l.

En los aniones, el cloro es estable alrededor de los ~35.000 mg/l, el bicarbonato entre los ~70-120 mg/l, el sulfato en los ~1.500 mg/l y el nitrato, con muy bajas concentraciones, en los ~25 mg/l.

- **CB-8R:**

El calcio se encuentra dentro de los ~3.000-6.000 mg/l, magnesio en los ~2.500-4.500 mg/l, sodio entre los ~8.000-13.000 mg/l, potasio en los ~200-300 mg/l con una baja el año 2020 hasta valores de ~100 mg/l, boro en los ~8-14 mg/l y estroncio entre ~25-45 mg/l.

Por otro lado, las concentraciones de cloro son estables en los ~32.000 mg/l, el bicarbonato entre los ~80-140 mg/l, sulfato en ~2.000 mg/l y, por último, las concentraciones nitrato tienden a estar dentro del intervalo ~4.000-7.000 mg/l.

- **CB-11R:**

Las concentraciones de este pozo se presentan estables en ~2.000-3.000 mg/l para el calcio, ~200-300 mg/l el magnesio, 3.500-5.000 mg/l el sodio, 100-160 mg/l el potasio, ~5-11 mg/l el boro y ~20-30 mg/l el estroncio.

El cloro tiene valores estables en ~10.500 mg/l, el bicarbonato en ~45-65 mg/l, el sulfato en ~1.500 mg/l y el nitrato entre los ~90-120 mg/l.

- **CON-15:**

El último punto de control también es consistente con el resto y evidencia estabilidad en sus concentraciones. Además, las concentraciones muestreadas se parecen a las CB-8R, que es el pozo cercano. Los valores de calcio son de ~4.700 mg/l, magnesio de ~3.300 mg/l, sodio entre ~8.000-10.000 mg/l, potasio entre ~50-110 mg/l, boro entre ~5-15 mg/l y estroncio en ~30 mg/l.

Los aniones también presentan concentraciones estables, el cloro en ~28.000 mg/l, bicarbonato en ~110 mg/l, sulfato en ~2.000 mg/l y el nitrato entre ~6.000-8.000 mg/l.

8.2.4 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE ELEMENTOS MINORITARIOS Y TRAZA

Los elementos menores son aquellos que registran concentraciones entre 0,1 mg/l y 5 mg/l, mientras que los elementos trazas son aquellos que tienen una presencia menor a los 0,1 mg/l (Merkel, 2002). Por lo que, en base al análisis estadístico realizado, se consideran elementos menores a los iones F, Al, Cu, Li, Mn, Fe y Zn mientras que los elementos trazas son As, Ba, Be, Cr, Cn, Pb, Se, V, Zn, Mo, Ni, Hg, Cd y Co. Los anexos 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4 muestran la evolución de estos elementos en el tiempo.

El análisis de estos elementos se ve dificultado ya que muchos suelen presentar concentraciones bajo el límite de detección por un tiempo prolongado o, en algunos casos, a lo largo de todo el registro; además de presentar gran variabilidad en los datos. Por lo que se presta mayor atención a los iones con mayor presencia. Dicho esto, los informes de resultados no reportan información relevante los siguientes elementos: Cn, Ag, Co, Cd, Ba, Be, Cr, Mo, Ag, Ni, V, Se y Pb.

El flúor presenta concentraciones de ~0,6 mg/l en CB-7R y CB-8R, ~0,7 mg/l en CB-11R, ~0,2 mg/l en CON-15, ~0,1-1 mg/l en CB-5, ~0,2-0,9 mg/l en CB-6 y ~0,5 mg/l en CB-9.

Los valores del aluminio oscilan entorno a los ~2 mg/l en CB-7R, entre ~0,1-3 en CB-8R, ~0,1 mg/l en CB-11R, ~0,5-3,5 mg/l en CON-15, ~0,1-1 mg/l en CB-5, ~0,1-1,6 mg/l en CB-6 y ~0,1-2 mg/l en CB-9.

En el pozo CB-7R las concentraciones de arsénico se encuentran entre los ~0,025-0,005 mg/l, en el pozo CB-8R entre los ~0,005-0,03 mg/l, ~0,1 mg/l en CB-11R, ~0,005 mg/l en CON-15, ~0,005-0,2 mg/l en CB-5, ~0,01 mg/l en CB-6 y ~0,02-0,12 mg/l en CB-9.

El hierro presenta concentraciones de ~4 mg/l en el pozo CB-7R, ~0,5-5 mg/l en CB-8R, entre ~1-5 mg/l en CB-11R, ~1-6 mg/l en CON-15, un aumento desde los ~0,5 mg/l hasta alcanzar los ~7 mg/l en CB-5 cuando comienza a ascender el nivel freático, ~0,5 mg/l en CB-6 con un leve aumento hasta los ~2 mg/l luego del alza del nivel de agua y un ascenso en el pozo CB-9 desde los ~0,5 mg/l hasta los ~3 mg/l.

El manganeso suele encontrarse con concentraciones de ~13 mg/l en CB-7R, ~3,5 mg/l en CB-8R, ~0,4 mg/l en CB-11R, ~0,4 mg/l en CON-15, ~0,1 mg/l en CB-5 con valores iniciales de ~25 mg/l, un alza desde los ~20 mg/l hasta los ~30 mg/l que sigue con un descenso hasta los ~10 mg/l en CB-6, un ascenso desde el ~1 mg/l hasta los ~35 mg/l en CB-9

El litio tiene concentraciones de ~3,2 mg/l en CB-7R, entre ~0,1-1,7 mg/l en CB-8R, ~0,4-0,8 mg/l en CB-11R, ~1,3 mg/l en CON-15 y de ~2-5 mg/l en CB-5. En CB-6 las concentraciones se encuentran entre los ~1-1,7 mg/l, pero con un aumento de los valores hasta alcanzar un peak de ~3,7 mg/l. CB-9 también presenta un ascenso desde los ~0,5 mg/l hasta los ~5,5 mg/l el año 2020. En ambos pozos los aumentos en las concentraciones de Li se dan al mismo tiempo en que el nivel de aguas subterráneas asciende.

El cobre presenta concentraciones de ~0,6 mg/l en CB-7R, bajo el límite de detección en CB-8R, ~0,1 mg/l en CB-11R, ~0,2 mg/l en CON-15, ~0,2 mg/l en CB-6 y un ascenso desde los ~0,2 mg/l hasta los ~0,9 mg/l en CB-9.

El zinc presenta valores de ~0,5 mg/l en CB-7R, ~0,45 mg/l en CB-8R, ~0,1-0,25 mg/l en CB-11R, ~4-10 mg/l en CON-15, ~0,5-1,5 mg/l en CB-5, ~0,1-0,5 mg/l en CB-6 y ascenso desde los ~0,5 mg/l hasta un peak de ~14 mg/l en CB-9 el 2019.

Finalmente, el mercurio, si bien en todos los pozos presenta mediciones bajo el límite de detección, en CB-9 las concentraciones comienzan a aumentar progresivamente hasta alcanzar un peak en los ~0,035 mg/l a inicios del 2019, pero luego estos valores descienden nuevamente bajo el límite de detección.

8.3 ÍNDICES DE SATURACIÓN MINERAL

El índice de saturación mineral (SI) es un método simple para determinar si una solución está en equilibrio termodinámico, sobresaturada o subsaturada con respecto a un mineral. Se define como la división entre el producto de la actividad iónica (IAP) y por el producto de solubilidad (K_S) expresada como logaritmo, tal como muestra la siguiente ecuación:

$$SI = \log \left(\frac{IAP}{K_S} \right)$$

El IAP se obtiene a partir de las concentraciones efectivas, esto es, mediante el coeficiente de actividad y concentración medida analíticamente, además, considera variables como la temperatura, presión, fuerza iónica y la formación de complejos. En contra parte, el K_S es independiente de otros iones y sólo depende de la temperatura y presión (Merkel, 2002).

Si el índice de saturación es positivo se dice que la solución esta supersaturada respecto de la fase sólida, por lo cual, tiene la capacidad de precipitar el mineral. Por otro lado, si el índice de saturación es negativo, la solución está subsaturada en relación con la fase mineral y la va a disolver. Finalmente, si la solución está en el punto de saturación (SI=0) significa que está en equilibrio con la fase mineral y no va a precipitar ni a diluir este sólido (Holland, 2003). Sin embargo, para alcanzar o salir del equilibrio las concentraciones no ocurren al instante, por lo que se acepta un rango de -0,2 a 0,2 para esta situación (Merkel, 2002).

En este trabajo, los índices de saturación de los minerales se calculan utilizando el software PHREEQC (Parkhurst and Appello, 1999) en conjunto con la base de datos WATEQ4F, que se considera la más adecuada debido a que en comparación a otras bases contiene la mayor cantidad de los elementos químicos necesarios para este estudio. Además, que posee minerales más representativos para la faena Sierra Gorda.

Para las simulaciones se escoge el trimestre 2 (mayo, junio y julio) de cada año y se consideran los períodos pre y post ascensos del nivel de agua. Para los pozos CB-5 y CB-6 se selecciona el período 2015 a 2019, para CB-9 entre 2014 y 2019, para CB-7R, CB-8R y CB-11R el período 2017 a 2019 y para CON-15 desde el año 2016 al 2019.

En las figuras 8.5, 8.6, 8.7 y 8.8, se reportan los resultados del cálculo de índices de saturación mineral para los pozos CB-5, CB-6, CB-9, CB-7R, CB-8R, CB-11 y CON-15, utilizando las concentraciones respectivas de cada pozo para el cálculo. Debido a que existe una amplia lista de fases disueltas, se establece un límite hasta el -2.

En lo que sigue, se mencionan los resultados que tienden a repetirse en los años estudiados para las fases minerales simuladas. Los minerales marcados con * significa que han presentado una variación en el tiempo.

- **IS > 0:**

CB-5: Al(OH)₃, alunita, basaluminita, bohemita, ferrita cúprica, ferrita cuprosa, diásporo, dolomita, Fe(OH)_{2.7}Cl₃, gibbsita, goethita, hematita, huntita*, jarosita-K, jarosita-Na, caolinita, maghemita, magnetita.

CB-6: Alunita, basaluminita, bohemitita, cupricferrita, cuprousferrita, diásporo, dolomita, $\text{Fe}(\text{OH})_{2.7}\text{Cl}_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$, Gibbsita, goethita, hematita, jarosita, Kmica, maghemita, magnesita, magnetita, rodocrosita.

CB-9: Alunita, basaluminita, bohemitita, caolinita, cupricferrita, cuprousferrita, diásporo, dolomita, $\text{Fe}(\text{OH})_{2.7}\text{Cl}_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$, Gibbsita, goethita, hematita, jarosita, Kmica, maghemita, magnesita, magnetita.

CB-7R: Alunita, $\text{Al}(\text{OH})_3^*$, basaluminita, bohemitita, caolinita, cupricferrita, cuprousferrita, diásporo, dolomita, $\text{Fe}(\text{OH})_{2.7}\text{Cl}_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$, Gibbsita, goethita, hematita, jarosita, Kmica, maghemita, magnetita.

CB-8R: Alunita, $\text{Al}(\text{OH})_3^*$, basaluminita, bohemitita, caolinita, calcita, cupricferrita, cuprousferrita, diásporo, dolomita, $\text{Fe}(\text{OH})_{2.7}\text{Cl}_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$, Gibbsita, goethita, hematita, jarosita, Kmica, maghemita, magnetita.

CB-11R: Alunita, $\text{Al}(\text{OH})_3^*$, bohemitita, calcita, cupricferrita, cuprousferrita, diásporo, dolomita, $\text{Fe}(\text{OH})_{2.7}\text{Cl}_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$, Gibbsita, goethita, hematita, jarosita, Kmica, maghemita, magnetita.

CON-15: Alunita, $\text{Al}(\text{OH})_3$, bohemitita, calcita, cupricferrita, cuprousferrita, diásporo, dolomita, $\text{Fe}(\text{OH})_{2.7}\text{Cl}_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$, Gibbsita, goethita, hematita, jarosita, Kmica, maghemita, magnetita.

- **IS ~ 0 (-0,2 a 0,2):**

CB-5: Anhidrita, yeso, calcita.

CB-6: Anhidrita, aragonito, calcita, celestita*, yeso.

CB-9: Anhidrita, yeso.

CB-7R: Anhidrita, aragonito, calcita, magnesita, yeso.

CB-8R: $\text{Al}(\text{OH})_3$, Anhidrita, aragonite, magnesita, yeso.

CB-11R: $\text{Al}(\text{OH})_3$, Anhidrita, aragonite, basaluminita, calcita, celestita, dolomita, magnesita, yeso.

CON-15: Anhidrita, aragonite, calcita, magnesita, yeso.

- **IS < 0:**

CB-5: Adularia, albita, annita, antlerita, aragonito, atacamita, azurita, baritina, birnessita, bixbyita, brocantita, celestita, clorita*, $\text{Cu}(\text{OH})_2$, epsomita, fluorita, halita, illita, magnesita, malaquita, manganita, mirabilita, montomorillonita, nsutita, pirolusita, pirofilita, rodocrosita*, smithsonita, tenorita y thenardita.

CB-6: Adularia, $\text{Al}(\text{OH})_3$, Albita, annita, baritina, beidelita, clorita, epsomita, fluorita, halita, huntita, illita, jurbanita, caolinita*, mirabilita, montomorillonita, nahcolita, nesquehonita, flogopita, pirolusita, siderita, strontianita, tenorita y thenardita.

CB-9: Adularia, $\text{Al}(\text{OH})_3^*$, Albita, annita*, aragonito, baritina, beidelita, calcita, celestita*, clorita*, epsomita, fluorita, halita, huntita*, illita, jurbanita, mirabilita, montomorillonita, nahcolita, nesquehonita, flogopita, pirolusita, rodocrosita, siderita, strontianita, tenorita y thenardita.

CB-7R: Adularia, Albita, annita, baritina, beidelita, celestita, clorita, epsomita, fluorita, halita, huntita, illita, jurbanita, mirabilita, montomorillonita, nahcolita, nesquehonita, flogopita, pirolusita, rodocrosita, siderita, strontianita, tenorita y thenardita.

CB-8R: Adularia, Albita, annita, baritina, beidelita, celestita, clorita, epsomita, fluorita, halita, huntita, illita, jurbanita, mirabilita, montomorillonita, nahcolita, nesquehonita, flogopita, pirolusita, rodocrosita, siderita, strontianita, tenorita y thenardita.

Alunita, $\text{Al}(\text{OH})_3^*$, bohemitita, calcita, cupricferrita, cuprousferrita, diásporo, dolomita, $\text{Fe}(\text{OH})_{2.7}\text{Cl}_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$, Gibbsita, goethita, hematita, jarosita, Kmica, maghemita, magnetita.

CB-11R: Adularia, Albita, annita, baritina, beidelita, clorita, epsomita, fluorita, halita, huntita, illita, jurbanita, caolinita, mirabilita, montomorillonita, nahcolita, nesquehonita, flogopita, pirolusita, rodocrosita, siderita, strontianita, tenorita y thenardita.

CON-15: Adularia, Albita, annita, baritina, beidelita, clorita, epsomita, fluorita, halita, huntita, illita, jurbanita, caolinita, magnesita, mirabilita, montomorillonita, nahcolita, nesquehonita, flogopita, pirolusita, rodocrosita, siderita, strontianita, tenorita y thenardita.

En resumen, los índices de saturación mineral de los pozos del sector este del tranque de relaves no tienden a variar entre los años analizados, a excepción de algunos pocos casos, pero que no marcan un hito entre períodos pre y post infiltraciones. Esto es un indicador de que, si bien el nivel freático comienza a ascender, la mezcla de aguas entre relaves o piscinas con las aguas subterráneas no modifican la signatura química inmediatamente dentro del período de tiempo analizado.

Los pozos del sector oeste del tranque de relaves presentan índices de saturación mineral estables en el tiempo, consistentes con que CB-7R y CB-11R no presentan alteraciones externas, aparte de la estabilización natural del nivel por la instalación del pozo y baja permeabilidad del basamento, y con que CB-8R y CON-15 no exhiben un tiempo prolongado de afecciones externas.

Figura 8.5: índices de saturación mineral pozos CB-5 y CB-6.

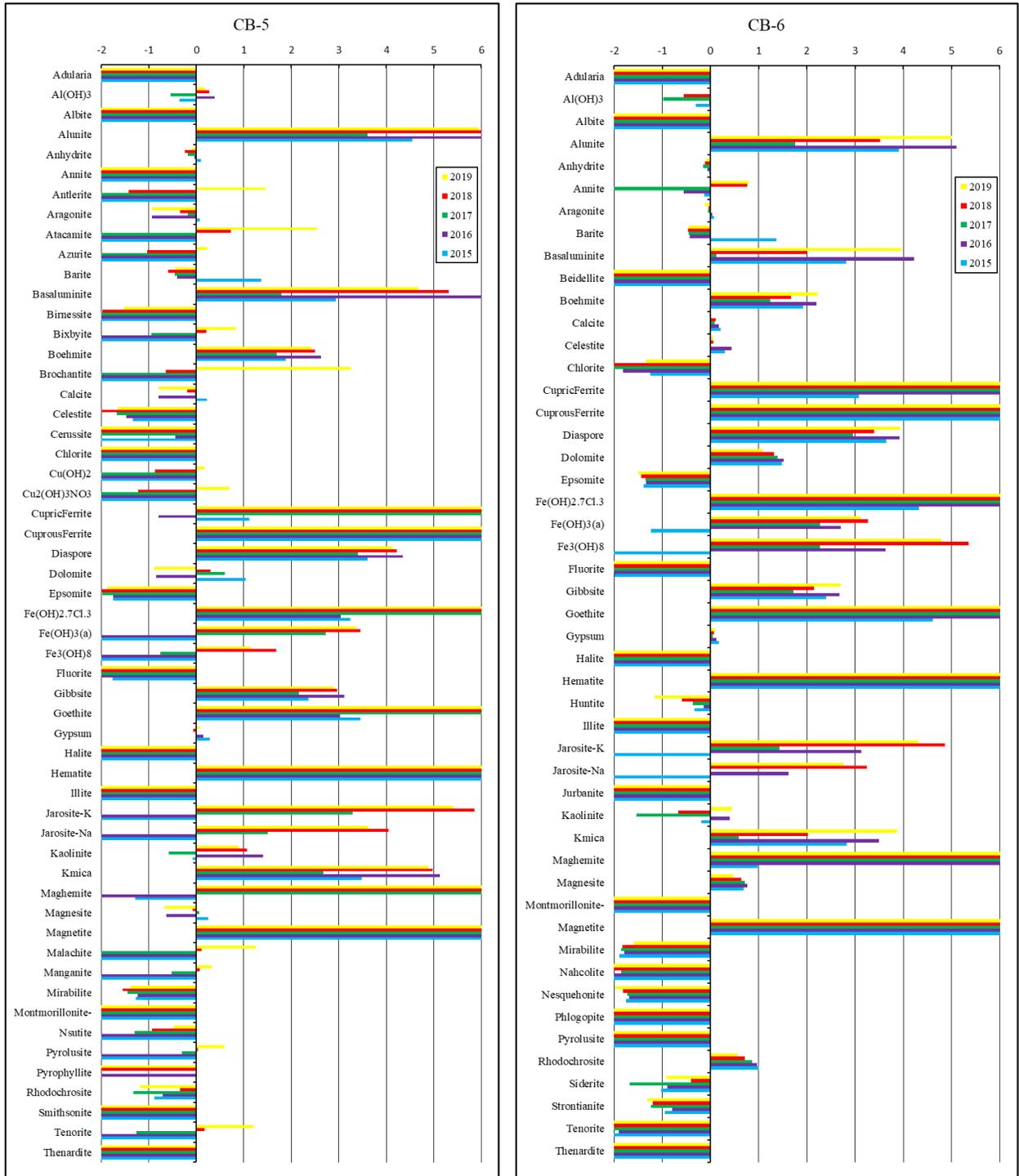


Figura 8.6: Índices de saturación mineral pozos CB-9 y CB-7R.

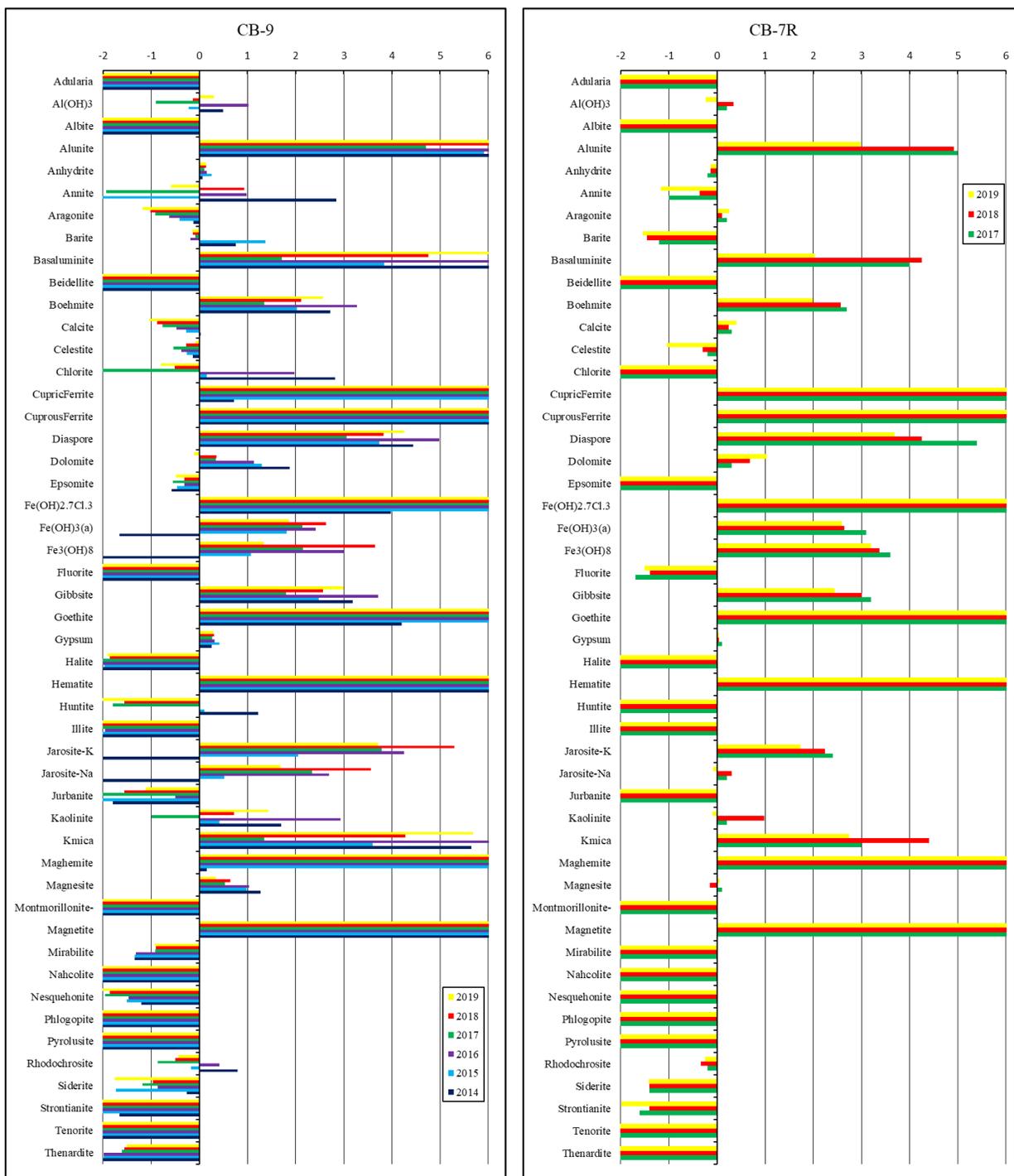
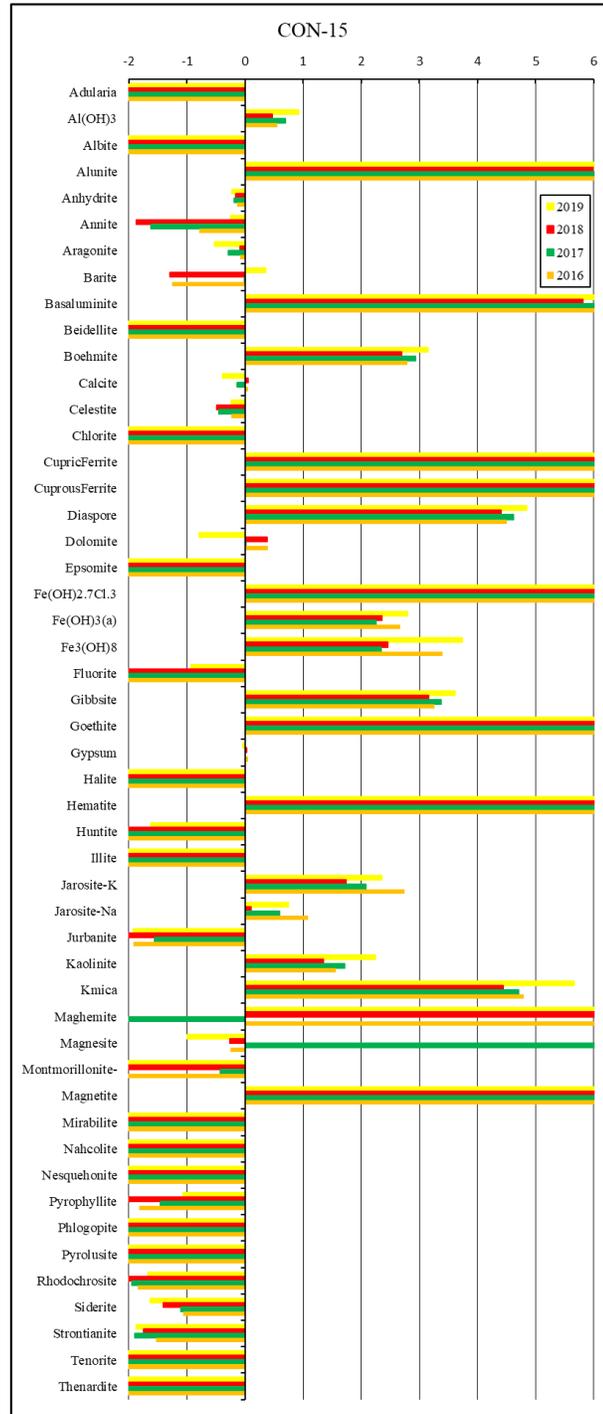


Figura 8.7: índices de saturación mineral de pozos CB-8R y CB-11R.



Figura 8.8: índices de saturación mineral de sondaje abierto CON-15.



9 DISCUSIONES

La composición final del agua subterránea está definida, principalmente, por la signatura química inicial que esta presenta, en conjunto con los minerales que se disuelven del entorno, resultando en un aumento de las concentraciones, y los que precipitan, restando determinados elementos químicos (Hollan, 2003). Adicionalmente, hay que considerar una serie de factores que controlan estos procesos de interacción agua-roca, como, por ejemplo, el tiempo de residencia del recurso hídrico en el medio hospedante, la solubilidad de los minerales presentes en la roca caja, si existe intercambio iónico entre especies, la adsorción generada por superficies activas que pueden remover elementos desde una solución, entre otros más (Giblin, 2001).

9.1 CONTEXTO GENERAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El clima tiene un papel preponderante en el área de estudio, donde las casi nulas precipitaciones y altas tasas de evaporación no permiten la existencia de cursos de agua superficial en el distrito Sierra Gorda, por lo que una recarga natural directa desde la superficie a las aguas subterráneas es escasa. Sin embargo, en la Cordillera de Los Andes, la principal recarga de napas freáticas está controlada por eventos de precipitación (nieve y/o lluvia) que infiltran directamente, o generan un escurrimiento superficial de agua con posterior infiltración, permitiendo que los acuíferos presentes aguas abajo sean recargados medias flujos subterráneos laterales.

La caracterización hidrogeoquímica general realizada durante este estudio dilucida tanto diferencias como similitudes entre las faenas analizadas. En el distrito Sierra Gorda predominan aguas neutras a alcalinas, con un pH que varía aproximadamente entre 6 a 8, temperaturas de ~25°C y con altos contenidos de sólidos totales disueltos, encontrando principalmente aguas altamente salinas (7.000-15.000 mg/l), muy altamente salinas (15.000-35.0000 mg/l) y de salmueras (>35.000 mg/l), lo que indica la existencia de aguas subterráneas profundas y de salares, común a encontrar en la zona de trabajo.

La primera diferencia composicional se observa en la figura 9.1, en donde aguas sulfatadas sódicas solo se localizan con mayor presencia en Pampa Lina, Instalaciones de minera Spence y minera Centinela. Por otro lado, aguas cloruradas cálcicas y sulfatadas magnésicas solo se ubican en el sector del depósito de relaves de Spence y minera Sierra Gorda. Además, aguas con una composición clorurada sódica se distribuyen en todo el distrito Sierra Gorda, destacando su presencia en minera Spence y minera Sierra Gorda, lo cual, según secuencia de Chebotarev (1955), evidencia aguas evolucionadas en la línea de flujo con predominancia de los aniones cloro y sulfato y leves valores para el bicarbonato, lo que indica que el recurso hídrico tiene un largo tiempo de residencia en el acuífero.

Diferencias composicionales relevantes, dentro del distrito Sierra Gorda, radican en las concentraciones de elementos mayores, al igual que TDS, las cuales aumentan en el sentido desde minera Centinela, instalaciones de Spence y Pampa Lina, con valores similares, minera Sierra Gorda, y, por último, faena Spence sector depósito de relaves. Esta tendencia es revelada por las concentraciones de los aniones cloro, nitrato, bicarbonato y sulfato (figura 7.13), y los cationes calcio, magnesio, sodio, potasio, boro y estroncio (figura 7.14).

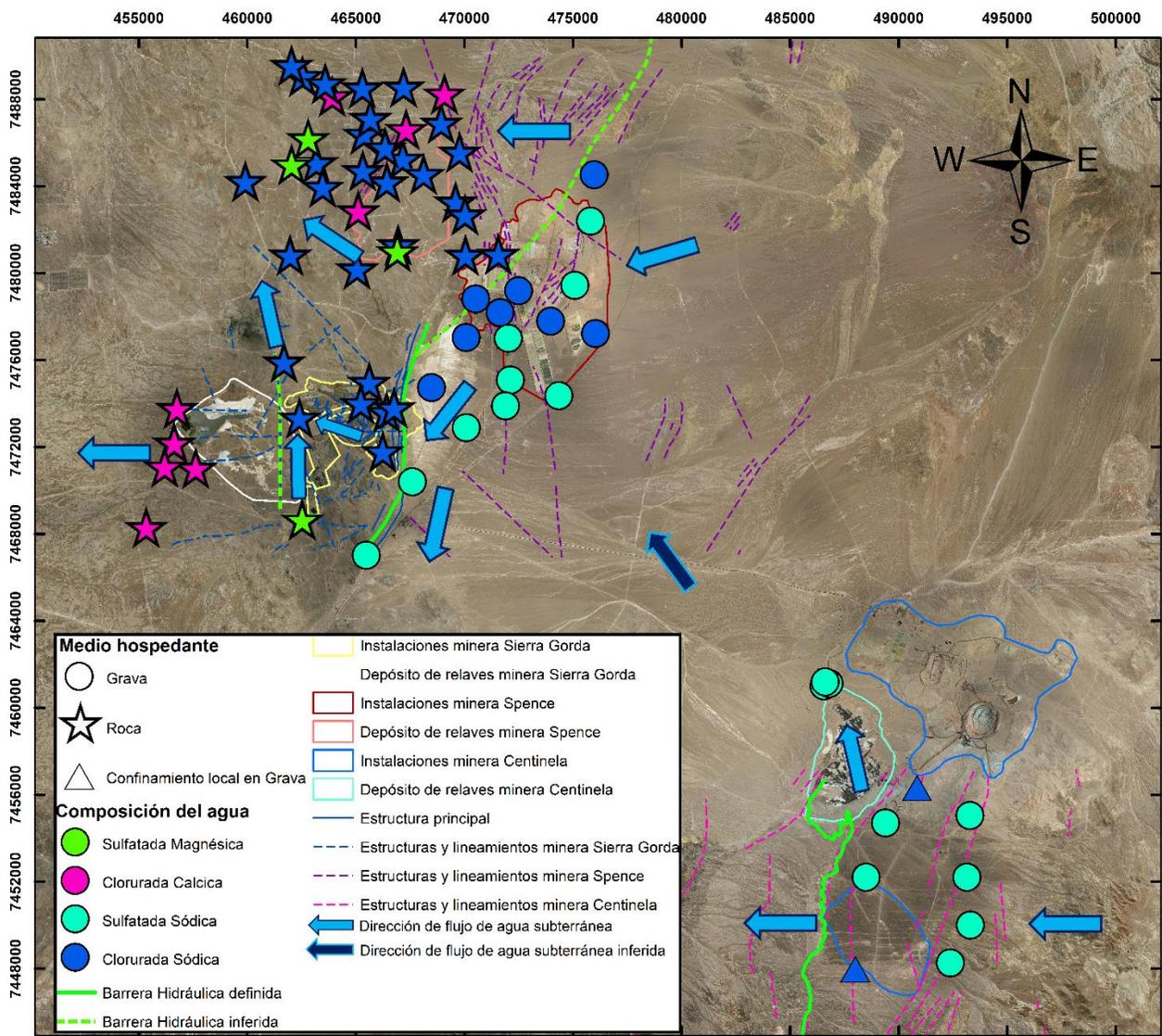


Figura 9.1: Distribución de las composiciones químicas predominantes de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda y medio hospedante asociado.

Solo algunos pozos de faena Spence sector depósito de relaves y faena Sierra Gorda no evidencian una relación de aumento de TDS con incremento de ion, este caso es asociado a nitrato, bicarbonato, sulfato, calcio, boro y estroncio. En Spence sector depósito de relaves, los elementos mencionados revelan una distribución dispersa en los puntos de muestreo, lo que se asocia a que agua remanente, utilizada en la perforación de los pozos, genera una reducción en las concentraciones del agua subterránea, considerando que los puntos de muestreo tienen un registro acotado en el tiempo, por lo que los niveles aún no se han recuperado completamente, y el medio hospedante del acuífero es roca de muy baja permeabilidad, lo que dificulta que el agua sea renovada.

A los bajos valores de nitrato y bicarbonato en faena Sierra Gorda, también se les atribuye la misma explicación que para el sector del depósito de relaves de Spence al presentar una distribución dispersa. Sin embargo, las concentraciones más bajas de sulfato y boro se encuentran localizadas al oeste de la estructura principal norte-sur que intercepta al tranque de relaves,

mientras que las concentraciones más bajas de calcio y estroncio se presentan al este de esta discontinuidad. Se presume que esta sectorización de aguas dentro de la faena es debido a un equilibrio composicional con la roca huésped, resultado del prolongado tiempo de residencia y efecto de la barrera hidráulica inferida que intercepta al depósito de relaves.

En la figura 9.2 se presenta la distribución de TDS dentro del distrito Sierra Gorda y el medio hospedante en cada punto. La dirección de flujo general en la zona es de este a oeste, con algunas desviaciones locales. La tendencia de aumentar los TDS, desde faena Centinela hacia las faenas Spence y Sierra Gorda, coincide con la dirección general hacia la cual se dirigen las aguas subterráneas. Esta modificación en la composición química es debido procesos como disolución de minerales, hidrólisis, hidratación, adsorción, etc. Los cuales, están controlados por variables como, por ejemplo, el tiempo de contacto agua-roca y la litología con la cual interactúa el agua subterránea.

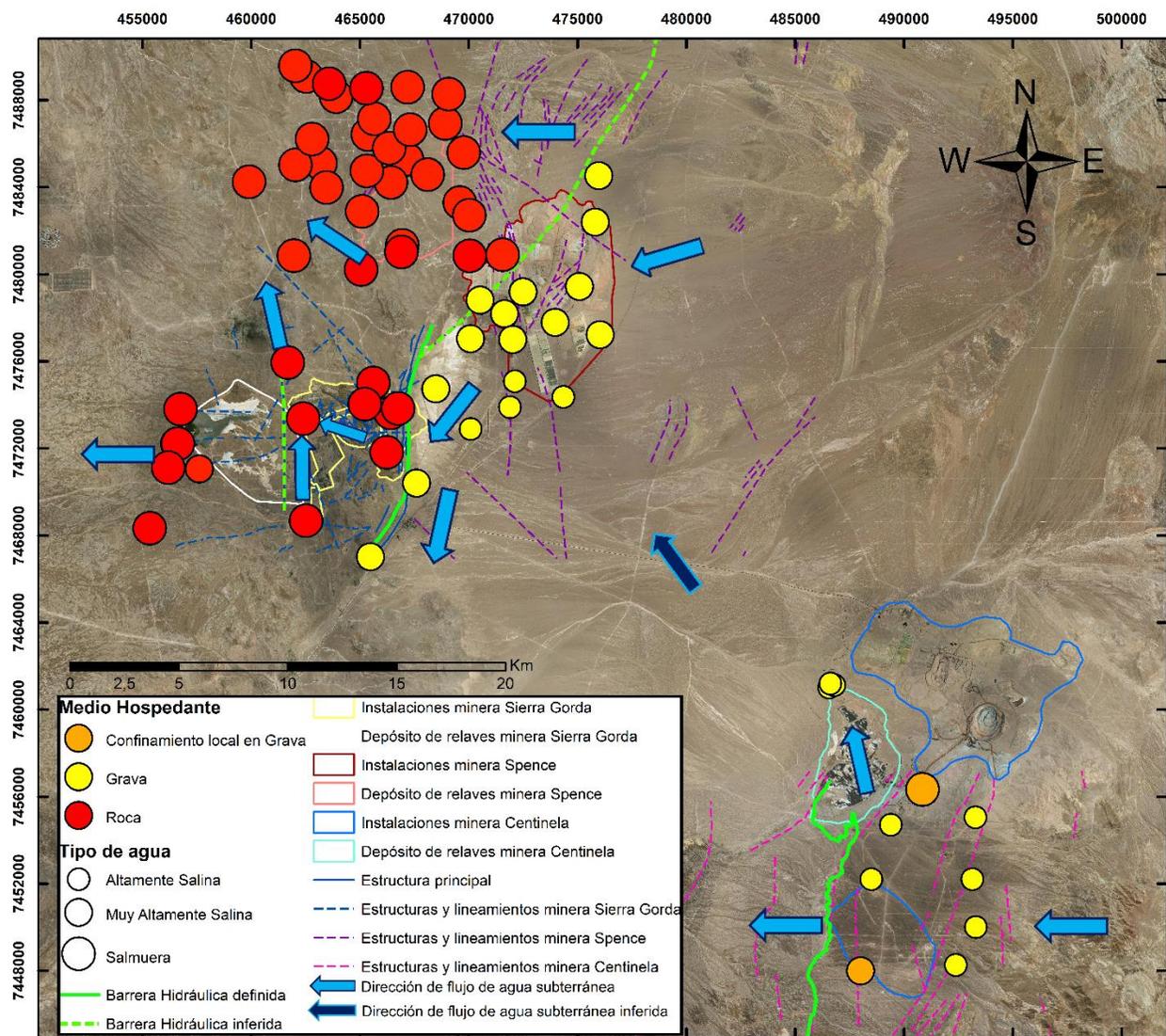


Figura 9.2 Distribución de las concentraciones de TDS de las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda y medio hospedante asociado.

En minera Centinela, GAC (2012) define tres unidades hidrogeológicas (UH) en el EIA relacionado al Proyecto Óxidos Encuentro (POE):

La UH-1 es la unidad más somera, más permeable y está compuesta por depósitos sedimentarios no consolidados o semiconsolidados, principalmente grava, y una parte inferior de roca fracturada y meteorizada, generando un acuífero libre, aunque en algunas zonas presenta confinamientos locales producto del grado consolidación, de fracturamiento y meteorización de la roca de la subunidad inferior. Además, se distribuye en los sectores del POE y del depósito de relaves sobre el resto de las unidades con un espesor entre los 80-140 m y se caracteriza por presentar tres depresiones de ~600 m (DP-3), ~150-200 m (DP-8) y ~300-500 m (zona del depósito de relaves) de profundidad.

Bajo la UH-1 se dispone la UH-2 compuesta de rocas sedimentarias de mayor consolidación y tobas riolíticas, por lo que la permeabilidad es mayor, permitiendo escasos flujos subterráneos que avanzan de forma muy lenta, generando un acuífero confinado. En esta unidad se han reconocido espesores que van desde ~50 m a más de 200 m. Además, hacia el oeste-suroeste, fuera de la faena, se encuentra aflorando junto a la UH-3.

Finalmente, subyaciendo a las demás unidades, la UH-3, correspondiente al basamento, incluye rocas volcánicas e intrusivas con permeabilidades muy pequeñas y flujos subterráneos lentos y limitados a discontinuidades, dando origen a acuíferos fracturados confinados. Esta unidad es la más inferior y no ha sido delimitada.

En las figuras 9.1 y 9.2 se observa que faena Centinela presenta las menores concentraciones de TDS de todo el distrito Sierra Gorda, predominando principalmente aguas altamente salinas, aunque algunos determinados puntos muestran aguas muy altamente salinas (DP-2) y de salmuera (TP-1). Además, se evidencia que las aguas con menor salinidad se relacionan con una composición sulfatada sódica, mientras que las de mayor salinidad se asocian a aguas cloruradas sódicas.

Las aguas subterráneas entrantes desde el sector este de faena Centinela, provenientes de las recargas de la Cordillera de Los Andes, ingresan al acuífero con una dirección este-oeste y son hospedadas en la potente unidad sedimentaria (UH-1) a una profundidad, registrada por los niveles de este estudio, entre ~25-140 m. Los puntos que indican aguas altamente salinas y sulfatadas sódicas se relacionan con un medio hospedante de grava, mientras que los que revelan aguas muy altamente salinas y de salmuera y cloruradas sódicas están asociados a confinamientos locales en gravas. Dicho de otra manera, una menor permeabilidad se traduce en un aumento de salinidad al estancar el flujo del recurso hídrico.

Hacia el oeste de faena Centinela, las unidades de menor permeabilidad (UH-2 y UH-3) se encuentran alzadas y dispuestas con una orientación norte-sur, por lo que actúan como una barrera hidráulica al desviar el flujo subterráneo, con dirección aproximada este-oeste, hacia el noroeste donde se localiza el depósito de relaves de Centinela (pozos PM-1, PM-2 y PM-3). Sin embargo, parte del flujo conserva la dirección inicial este-oeste, limitando su velocidad producto de la baja permeabilidad de la UH-2 y UH-3 en relación con la UH-1 (GAC, 2012).

En minera Spence, Arcadis (2015) define 5 unidades hidrogeológicas, siendo las primeras tres caracterizadas por una mayor permeabilidad, asociada a porosidad primaria, mientras que las dos restantes por una permeabilidad más baja, relacionada a porosidad secundaria.

La unidad sedimentaria superior (UH-1) está compuesta principalmente por grava, distribuida tanto en los sectores de las instalaciones y depósito de relaves de Spence, con un espesor entre 10-90 m y es la que presenta una mayor permeabilidad. Bajo esta, subyace una unidad impermeable compuesta por limo arenoso y arcilla (UH-2), dispuesta solo en las instalaciones de la faena con potencias entre 18-40 m y menor permeabilidad que las unidades adyacentes, por lo que actúa como barrera de flujo vertical generando aislamiento entre la UH-1 y UH-3. Bajo estas unidades se encuentra una unidad sedimentaria inferior (UH-3), constituida principalmente por grava, distribuida solo en las instalaciones de Spence con una potencia entre 34-80 m.

La cuarta unidad (UH-4), de rocas sedimentarias, volcánicas y pórfidos fracturados y meteorizadas, se distribuye en toda la faena Spence con potencias entre 10-60 m y presenta una permeabilidad más baja, que las unidades anteriores, asociada al grado de fracturamiento y meteorización. Finalmente, la UH-5 de roca fresca, correspondiente al basamento, se compone de rocas volcánicas y pórfidos poco o muy fracturados y altamente competentes, por lo que es la unidad con menor permeabilidad distribuida en toda la faena.

En el sector de las instalaciones de minera Spence y Pampa Lina, las unidades de mayor relevancia son las UH-1, UH-2 y UH-3 ya que albergan al recurso hídrico. La primera unidad no está saturada en el área del rajo de Spence, pero si hacia el suroeste de las instalaciones, donde se registran pocos metros de saturación, y en Pampa Lina, donde la UH-1 se encuentra saturada entre 10 m a 30 m. Por otro lado, la UH-2 está parcialmente saturada hacia el suroeste y en Pampa Lina. Finalmente, hacia el sur y suroeste de las instalaciones, la UH-3 se presenta parcialmente saturada con un espesor de 34 a 80 m en Pampa Lina. La UH-3 forma el principal acuífero de las instalaciones de Spence y Pampa Lina.

En el área del depósito de relaves de Spence, las rocas del basamento (UH-4 y UH-5) forman el medio hospedante de las aguas subterráneas, mientras que el relleno sedimentario (UH-1) no es de importancia al encontrarse no saturado. Esto es debido a que, en esta zona, las rocas forman parte de un plegamiento subvertical, contrario al sector de las instalaciones de Spence y Pampa Lina, donde no se aprecia esta deformación (Arcadis, 2015).

En las figuras 9.1 y 9.2 se muestra que el flujo de aguas subterráneas, proveniente desde minera Centinela, se dirige en una dirección aproximada sureste-noroeste, por lo cual llega hasta las instalaciones de Spence y sector de Pampa Lina recorriendo una distancia de ~25 km. Se infiere, en base a la información recopilada, que en ese trayecto el medio hospedante de las napas freáticas corresponde a la unidad sedimentaria de gravas descrito por ambas mineras. En su recorrido, el recurso hídrico al interactuar con los minerales a su alrededor modifica su signature química, lo que se traduce en un aumento en las concentraciones de los elementos químicos y TDS.

En faena Spence predomina una dirección general de las aguas subterráneas de noreste a suroeste. Hacia el sur-suroeste de las instalaciones de Spence y este de Pampa Lina se presentan las menores concentraciones de TDS, encontrando aguas altamente salinas con una composición sulfatada sódica y siendo grava el medio hospedante (UH-1 y UH-3). Las concentraciones son

levemente mayores a las existentes en faena Centinela y con los mismos elementos mayores predominando, lo que puede ser un indicio de que en esta zona las aguas provienen desde esa minera.

En el centro y noreste de las instalaciones de Spence y resto de Pampa Lina se observa una mayor concentración de iones y una composición clorurada sódica, correspondientes a aguas muy altamente salinas hospedadas en gravas de las UH-1 y UH-3. Estas aguas se relacionan al flujo entrante desde el noreste de las instalaciones de faena Spence.

Hacia noroeste de las instalaciones de Spence y en el sector del depósito de relaves de esta faena, las concentraciones de calidad del agua aumentan notablemente, encontrando aguas de salmuera con composiciones cloruradas sódicas y cálcicas y sulfatadas magnésicas, las cuales se asocian a un medio hospedante de roca (UH-4 y UH-5) que limita el almacenamiento y transmisividad del agua subterráneas al grado de fracturamiento y la interconectividad entre estas.

Entre los sectores de las instalaciones y depósito de relaves de Spence se observa el contraste de salinidades generado por un medio hospedante de grava y otro de roca. Es por ello que, en base a la diferencia de permeabilidades entre las unidades que aloja al agua subterránea, se infiere una barrera hidráulica con orientación suroeste-noreste entre ambas zonas, la cual sería la prolongación de la barrera hidráulica generada por la estructura norte-sur que desconecta los acuíferos de faena Sierra Gorda y Pampa Lina (VAIGS, 2014). Además, esta barrera hidráulica inferida sigue el lineamiento de las estructuras definidas por Golder (2017) (figura 3.3) y el límite de la divisoria de aguas de la DGA (2000) (figura 2.3), al presentar la misma orientación y localización.

En faena Sierra Gorda se dispone una unidad somera de sedimentos (UH-1), compuesta principalmente por gravas, que varía entre ~6-26 m y se presenta no saturada, por lo que no es de relevancia en esta zona. Bajo esta unidad subyacen rocas volcánicas e intrusivas de menor permeabilidad que se caracterizan por su mayor grado de meteorización y fracturación (UH-2), cuyas características permiten el almacenamiento del recurso hídrico hacia el este y noreste del tranque de relaves, donde el nivel de agua se encuentra a menor profundidad (~60 m). Por último, debajo de la UH-2 se ubica la UH-3, correspondiente al basamento, que presenta permeabilidad aún más baja y es el medio hospedante del acuífero hacia el oeste del tranque de relaves, donde el nivel se presenta a mayor profundidad (>150 m).

En las figuras 9.1 y 9.2 se observa que el flujo de aguas subterráneas, hospedado en grava, proveniente desde Pampa Lina con dirección a faena Sierra Gorda, es interceptado por la barrera hidráulica de estructuras con orientación norte-sur, además de roca con baja permeabilidad, por lo que no ingresa al acuífero de Sierra Gorda y es desviado hacia el sur. Se descarta que el flujo adquiera una dirección hacia el norte, por la barrera hidráulica inferida al norte de Pampa Lina.

En faena Sierra Gorda, el medio hospedante de las aguas subterráneas es roca, lo que está asociado a altas salinidades, evidenciando aguas de salmuera con composiciones cloruradas sódicas y cálcicas y sulfatadas magnésicas. Hacia el este de esta minera, en el sector de Pampa Lina, es posible visualizar la diferencia de salinidades producto del medio hospedante. Hacia el norte de faena Sierra Gorda, en el sector del depósito de relaves de Spence, también se localizan aguas de salmuera alojadas en roca y que presentan una composición similar.

En el distrito Sierra Gorda, las unidades de sedimentos (grava) tienen una alta permeabilidad (porosidad primaria), lo que facilita la circulación de las aguas subterráneas, resultando en que estas se puedan renovar con el tiempo y que no se estanquen en la misma ubicación. Debido a esto, la salinidad aumenta desde faena Centinela hasta faena Spence y Pampa Lina, pero no en magnitudes relevantes y, a su vez, estos dos últimos sectores muestran concentraciones similares entre sí debido a su cercanía. Además, estas zonas presentan composiciones semejantes (sulfatada sódica).

Contrariamente, las unidades de roca son caracterizadas por una baja permeabilidad, donde el flujo de las aguas subterráneas está controlado por el grado y apertura de fracturas (porosidad secundaria), lo que reduce la transmisividad del recurso hídrico y su almacenamiento. Esto genera casi un estancamiento de las aguas subterráneas en faena Sierra Gorda y sector del depósito de relaves de Spence, lo que implica mayor tiempo de interacción con la roca huésped, modificación de la signatura química y un aumento de salinidad, dando cuenta de concentraciones de iones de uno a dos órdenes de magnitud de diferencia con el agua hospedada en grava.

Además, en el agua hospedada en grava suele predominar una composición sulfatada sódica y, en menor medida, clorurada sódica, mientras que en el agua hospedada en roca destacan composiciones cloruradas sódicas con menor presencia de aguas cloruradas cálcicas y sulfatadas magnésicas. Estas diferencias composicionales en las aguas albergadas en roca se interpretan producto de que esta suele ser un medio hospedante heterogéneo, con variaciones mineralógicas verticales y horizontales, por lo que el agua al encontrarse casi estancada entra en equilibrio con la mineralogía de la roca.

La limitante de este análisis es que no es posible determinar si las aguas subterráneas de cada faena presentan el mismo origen. Se interpreta que las aguas localizadas al sur de las instalaciones de faena Spence provienen desde el sector de faena Centinela (desde el límite sureste de la cuenca hidrográfica). Sin embargo, a las aguas entrantes desde el noreste de minera Spence se les desconoce su origen. Por otro lado, las aguas encontradas en faena Sierra Gorda, al presentarse casi estancadas en un medio de baja a muy baja permeabilidad y existir una barrera hidráulica de orientación norte-sur, que desconecta el acuífero de esta faena con el de Pampa Lina (Vergara, 2014), confirma que las aguas de faena Sierra Gorda no presentan el mismo origen que las aguas de Pampa Lina y las instalaciones de faena Spence.

9.2 PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN FAENA SIERRA GORDA

La piezometría de la línea base (figura 4.2) revela que, en el sector este de la faena, en los alrededores del rajo y de la planta, y norte de faena Sierra Gorda, domina un gradiente plano alrededor de la cota ~1.600 m.s.n.m. con niveles freáticos a una profundidad de ~60 m, sin considerar los ascensos de la superficie de agua por infiltraciones desde el tranque de relaves y sector de piscinas. Mientras que, hacia el sector oeste del tranque de relaves, el gradiente se torna abrupto variando entre las cotas ~1580 m.s.n.m. y ~1360 m.s.n.m. con profundidades del nivel del agua mayores a ~170 m.

La química de las aguas subterráneas también evidencia diferencias entre ambos sectores. El análisis de dendogramas agrupa a los pozos CB-5, CB-6 y CB-9 (sector este y noreste del

depósito de relaves), que se caracterizan por presentar mayores concentraciones de sodio, sulfato y boro, al mismo tiempo, CB-9 evidencia las mayores concentraciones de magnesio, sulfato y TDS de toda la minera. En contra parte, el otro gran grupo se compone por los puntos CB-7R, CB-8R, CB-11R y CON-15 (sector oeste del depósito de relaves), los cuales presentan mayores concentraciones de calcio y estroncio, en relación con la zona este.

En el sector este y noreste del tranque de relaves, el agua subterránea se hospeda en la UH-2, la cual se caracteriza por una baja permeabilidad, en donde el almacenamiento y transmisividad del flujo de agua están controladas por la cantidad de fracturas que posee el macizo rocoso y la interconectividad entre ellas, mientras que, hacia el sector oeste del tranque de relaves, el recurso hídrico se encuentra en la UH-3, con un reducido grado de fracturamiento.

Ruco proporciona cuatro perfiles geofísicos nanoTEM realizados delante del muro 6 con una profundidad de ~100 m, los cuales se presentan en los anexos 8.1 y 8.2, en donde se muestran los perfiles originales con las medidas de resistividades eléctrica (A), las zonas con menores resistividades destacadas (B) y los perfiles continuos ensamblados (C). El objetivo de estos es medir resistividades eléctricas, así, medidas bajas son indicadores de zonas húmedas y/o saturadas, mientras que valores altos se interpretan como sedimentos o roca seca.

De acuerdo con la interpretación de Geodatos (2020) y Ruco (2020), los resultados son consistentes con lo que se conoce de los niveles freáticos, dando cuenta de un cambio de resistividades. En el sector este, donde los niveles se encuentran entre ~50-70 m de profundidad, se detecta presencia de bajas resistividades, menores a 15 ohm-m a estas profundidades, rango que se interpreta para indicar la presencia de humedad o saturación, en los perfiles L6-100, L6-0 y hacia el sureste de L61 y L62. Por otro lado, el sector oeste evidencia un aumento de resistividades de 30->70 ohm-m en L61 y L62, lo que se relaciona con roca seca, guardando relación con niveles de más de 170 m de profundidad.

La diferencia lateral de resistividades se interpreta como la presencia de una falla, la cual concuerda con la estructura inferida/cubierta en la Carta Geológica de Sierra Gorda (Duhart et al., 2018) y que es corroborada por la Superintendencia de Geología SGSCM (2020), en base a diferencias litológicas a ambos lados de la traza. En la figura 9.3 se muestra la ubicación de los perfiles geofísicos y la traza de una falla propuesta.

En base a los antecedentes, se observan variaciones entre las aguas subterráneas de los sectores este y oeste de la estructura norte-sur que intercepta al depósito de relaves. Estas son evidenciadas por cambios en la profundidad del nivel de agua, gradiente hidráulico, calidad del agua y resistividades medidas en perfiles geofísicos nanoTEM. Por lo que es posible trazar un límite, entre los sectores este y oeste del tranque de relaves, que es interpretado como una falla de orientación aproximada norte-sur que coincide con la traza de Duhart et al. (2019), que es afirmada por la Superintendencia de Geología SGSCM (2020), pero desplazada ~200 m hacia el oeste, y que desconecta los acuíferos de ambas zonas, explicando de esta manera sus diferencias.

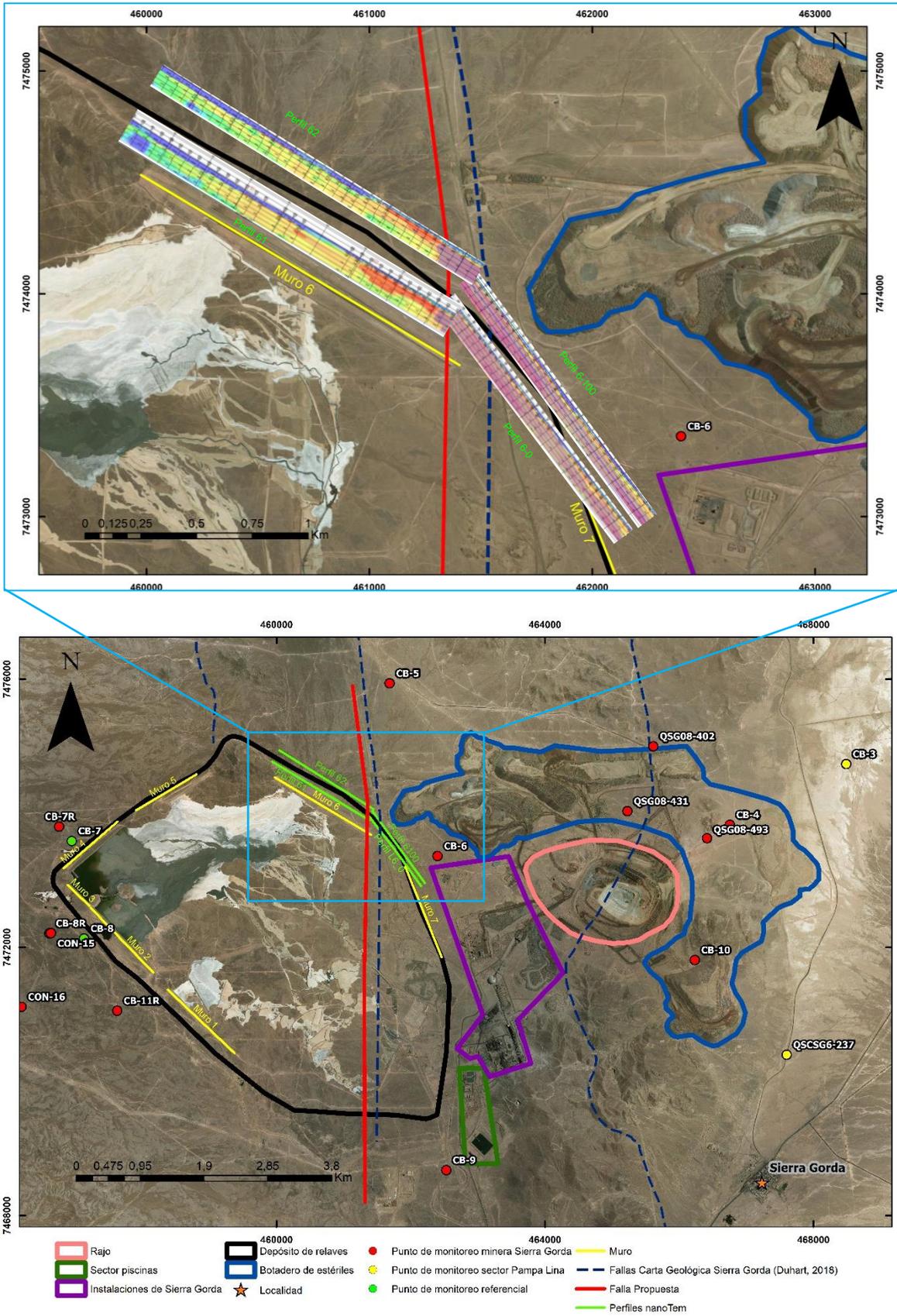


Figura 9.3: Ubicación de perfiles geofísicos nanoTEM, y falla propuesta. Diferencia lateral de resistividades se interpreta como la presencia de una falla.

Ahora bien, a pesar de la estructura propuesta, se presume que en la zona este y noreste de la faena Sierra Gorda existe una mayor cantidad de fracturas relacionadas al cuerpo mineralizado, lo que permite una mejor interconectividad entre discontinuidades y facilita la circulación de las aguas subterráneas, lo que es reflejado en el gradiente plano entorno a la cota ~1600 m.s.n.m. distribuido en toda esta zona.

Hacia el sector oeste de la faena, los puntos CB-8R, CB-11R y CON-15 evidencian una diferencia de ~25 m con los sondajes abiertos CON-10 y CON-16, pese a su cercanía; mientras que CB-7R muestra una diferencia de ~15 m con los otros tres, en base a esto se presume una baja interconectividad entre fracturas. Además, dada la profundidad hacia el acuífero (>170 m), es de esperarse encontrar roca de mejor calidad geotécnica que la dispuesta más cerca de la superficie, por lo que la baja permeabilidad podría generar compartimentalizaciones que son evidenciadas por diferencias de niveles locales por desconexiones.

En otro tema, los puntos de monitoreo CB-7R, CB-8R, CB-11R muestran, desde el inicio de las mediciones, un ascenso del nivel freático que se asocia a la recuperación natural de la superficie de agua (figura 8.2), luego del descenso generado por las instalaciones de los pozos, y que sería retardado por la muy baja permeabilidad del basamento que hospeda al agua. Hasta la última medición utilizada en este estudio, en julio del año 2020, los niveles no se han estabilizado.

El pozo CB-8R, desde octubre del año 2019, cambia drásticamente su pendiente de ascenso de recuperación de nivel debido a posibles alteraciones externas, ascendiendo en 28,31 m. Por otro lado, el sondaje abierto CON-15, que se mostraba estable entorno a la cota ~1424 m.s.n.m. registra un alza de nivel en 62,33 m desde junio del año 2019 (figura 8.2).

El punto CON-15 no se encuentra sellado en todo su largo, como si lo está el pozo, por lo que, posiblemente, infiltraciones superficiales, provenientes desde el depósito de relaves, se incorporen al acuífero a través de esta apertura. Este ingreso de aguas desde horizontes someros generaría un empuje lateral, por medio de fracturas interconectadas, hacia el pozo CB-8R, que se ubica en las inmediaciones de CON-15 y que presenta menores alzas de nivel. En otros puntos de monitoreo del entorno no se observa un alza de nivel relacionada que soporte la presencia de una compartimentalización del agua subterránea.

Ninguno de los pozos del sector oeste presenta variaciones en la calidad del agua subterránea, presentando concentraciones de los elementos relativamente estables en el tiempo. Es de esperar que, si continúan los aportes de agua externos a la apertura de CON-15, existan modificaciones en las concentraciones de los iones en este punto y CB-8R.

Por otro lado, en la misma área, se presentan acumulaciones de agua en los pozos CB-7 y CB-8, instalados en la zona no saturada profunda, originadas por infiltraciones desde el depósito de relaves que se desplazan en los horizontes subsuperficiales. Estas muestras de agua se caracterizan por altas concentraciones de iones debido a la disolución sales encontradas en la unidad sedimentaria, la cual presenta una potencia de hasta 26 m en este sector. Sin embargo, estas acumulaciones de agua no entran en contacto con el acuífero.

Hacia el este del depósito de relaves, los pozos CB-5, CB-6 y CB-9 registran desde unos años ascensos del nivel de agua subterránea en 6 m, 18,47 m y 60,92 m, respectivamente, hasta julio del año 2020 (figura 8.2). Los aumentos en CB-5 y CB-6 se asocian a infiltraciones desde el

depósito de relaves debido a ser la única fuente potencialmente contaminante en las cercanías. En CB-9, las probables fuentes de infiltración son el tranque de relaves y el sector de piscinas.

Se descartan afecciones en CB-9 con origen desde el depósito de relaves, ya que los puntos MCB-01 y MCB-02, que se ubican más cerca al relave, se han mostrado estables en el tiempo (figura 8.4). Contrario a MCB-03 y MCB-04 que registran aumentos de 17 m y 16 m, respectivamente, desde que se comenzaron a monitorear, revelando un respectivo aumento con respecto al nivel preoperacional. Estos últimos dos puntos, junto con CB-9, son los más cercanos al sector de piscinas, por lo que se interpreta una infiltración desde esta zona.

Ahora bien, no es posible reconocer con exactitud si la fuente de contaminación es la piscina ICV, la de agua de mar o ambas. La piscina con agua de mar fue reparada a inicios del 2019, misma fecha en que el nivel freático comienza a estabilizar en los puntos MCB-03, MCB-4 y CB-9, por lo que puede ser un indicador de que el agua provenga de esta. Por otro lado, no hay evidencia en este estudio que permita descartar ni asegurar infiltraciones desde la piscina ICV, sin embargo, Itasca (2019) las asocia a esta fuente mediante métodos geofísicos.

Hay que considerar que en los sectores donde ocurren las infiltraciones (CB-5, CB-6 y CB-9) la unidad sedimentaria es reducida, no siendo de importancia, por lo que se asume una recarga directa al acuífero a través de las fracturas de la roca y se descarta una mayor disolución de sales, desde los sedimentos, que aumente la salinidad del agua previo a que esta interactúe con la napa.

El análisis de dendogramas (figura 8.1 y anexo 3) muestra una amplia separación en los parámetros de los pozos CB-7 y CB-8 con los puntos del sector este del tranque de relaves, avalando que no ocurre una disolución de sales previo a que el agua de relave se mezcle con las aguas subterráneas, de lo contrario los grupos estarían más cercanos entre sí.

Junto al ascenso del nivel freático, los tres pozos en cuestión aumentan los valores de conductividad eléctrica y TDS. El pozo CB-9 revela alzas de sodio, magnesio, potasio, sulfato, bicarbonato, nitrato, boro, estroncio, litio, manganeso, arsénico, hierro, cadmio, zinc y mercurio. Mientras que los demás elementos se mantienen estables en el tiempo, incluidos el calcio y cloro. Por su lado, el pozo CB-6 tiene aumentos en los valores de sodio, potasio, bicarbonato, nitrato, boro, hierro y litio, y descensos en las concentraciones estroncio y manganeso, encontrando los demás elementos estables en el tiempo. En ambos pozos, el magnesio tiene un ascenso en sus concentraciones, pero posterior a ello estas tienden a descender. Finalmente, el pozo CB-5 solo muestra leves alzas en el contenido de hierro y sodio.

El pozo CB-9 presenta los cambios más considerables en su composición química, consistente con que el nivel freático muestra los mayores ascensos, dado que las afecciones por infiltraciones desde el sector de piscinas han sido más prolongadas (desde el 2014). Casi todos los elementos medidos, con la excepción del calcio, presentan concentraciones más altas que el agua de mar, por lo que se espera que la mezcla de estas soluciones produzca un efecto de dilución, generando una reducción en los valores de los elementos medidos en agua subterráneas. Sin embargo, sucede lo contrario, los resultados evidencian que las concentraciones de los elementos en el acuífero se mantienen estables o aumentan, lo que revela que la modificación en la composición química no se asocia directamente por la mezcla con el agua de mar, ni con el agua

de la piscina ICV, esta última utilizada solo de manera referencial ya que se cuenta con solo un dato y refleja composiciones aún más bajas que el agua de mar.

Algo similar sucede en el pozo CB-6, en donde los valores de calcio, cloro y sulfato se muestran aproximadamente estables pese a que las concentraciones del relave son mayores. El nitrato, bicarbonato, boro, hierro y litio muestran alzas, siendo que los valores del relave son inferiores. El sodio y potasio también muestran aumentos, pero con la diferencia de que las concentraciones del relave son mucho mayores, ahora bien, las modificaciones del potasio son leves en comparación a la magnitud de las concentraciones del agua del relave. El estroncio y manganeso evidencian descenso en sus valores, consistente con las mediciones del agua del relave.

El pozo CB-5 presenta las menores modificaciones composicionales y de nivel freático, guardando relación con que las afecciones desde el relave se han producido en un tiempo más acotado (desde el 2017). La mezcla con el agua del relave no ha producido cambios significativos en la signatura química, solo ha elevado levemente las concentraciones de hierro y sodio, mientras que las del resto de elemento se muestra estable dentro de un rango de valores.

Los tres pozos demuestran que no existe una relación de ascenso, descenso o estabilidad de las concentraciones producto de la mezcla de las aguas subterráneas con las aguas del relave o de las piscinas, a pesar de que algunos elementos coinciden con su comportamiento, pero son los menos, no afectando a la gran mayoría.

Es preciso mencionar que, como se analizó previamente, el recurso hídrico de la faena Sierra Gorda se encuentra casi estancado en roca, por lo que naturalmente ya cuenta con altas concentraciones de cationes y aniones, presentando una calidad similar e incluso peor que las aguas del relave y de las piscinas. Entonces, al producirse la mezcla de aguas, los cambios composicionales podrían ser casi imperceptibles inmediatamente. Otro factor que puede influir es la cantidad de aporte de agua antrópica en relación con el agua subterránea.

El cálculo de los índices de saturación mineral (figuras 8.5, 8.6, 8.7 y 8.8) revela que no se constata un cambio sustancial entre períodos pre y post infiltraciones, evidenciando nuevamente que las modificaciones químicas no se producen directamente por la mezcla de aguas, considerando que estas tienen distintas condiciones.

También, es importante destacar que las concentraciones de cloro son las más estables de todos los elementos. Este anión se caracteriza por ser conservativo, esto quiere decir que es menos reactivo y, en consecuencia, que es difícil que sus concentraciones se alteren producto de reacciones de interacción agua-roca (a menos que sea por disolución de halita), por lo que su estabilidad en el registro revela que la mezcla de aguas no genera modificaciones en las concentraciones de este elemento.

Entonces, si los cambios en la química del agua subterránea no son producto de un efecto directo por la mezcla de aguas antrópicas y naturales ¿a qué se deben las modificaciones en la signatura química del agua subterránea posterior a las infiltraciones?

El ascenso del nivel freático implica que el agua subterránea se pone en contacto con roca que antes se encontraba no saturada. Estos minerales presentan condiciones oxidantes, dado que el oxígeno de la atmósfera puede penetrar a estos niveles producto de las fracturas existentes en el

macizo rocoso, por lo que es posible que la roca pueda encontrarse levemente meteorizada. Con esto, es factible que debido al ascenso del agua se produzca un efecto de lavado de la roca, en donde se dé lugar a procesos químicos de interacción agua-roca que liberen cationes y aniones hacia la solución, como, por ejemplo, disolución de sales e hidrólisis de silicatos, entre otros.

Debido a la mineralogía silicatada característica de la roca mapeada en sondajes, se atribuye a la hidrólisis de silicatos como uno de los principales procesos que modifican la calidad del agua subterránea. Además, esto sería avalado por el cálculo en los índices de saturación mineral, en donde arcillas, resultado de este proceso químico, como la caolinita y halloysita destacan con $IS > 0$.

La tabla 9.1 muestra los minerales mapeados e interpretados, según pozos y sondajes cerca del depósito de relaves, y los elementos químicos que puede liberar de esa fase. Se añade la nitratina, o mejor conocido como caliche, y el salitre, dado que son minerales asociados a depósitos de nitratos, los cuales son comunes de encontrar en la zona de estudio en paragénesis con la halita y que tienen asociada una componente de origen hidrotermal (Collao et al., 2002), por lo que pueden encontrarse en roca rellenando fisuras, como se ha encontrado hacia el sector este. Además, de asociarse con pequeñas cantidades de calcita, ceolita y boratos (Pueyo et al., 1998).

Los nitratos y boratos no están presentes en la base de datos utilizada en el software Phreeqc, ni han sido específicamente mapeados en los pozos, pero se incluyen en el análisis debido al contexto en el cual se encuentra inserto la faena Sierra Gorda. Se espera que el comportamiento de estos minerales sea similar al de la halita, dado que también son sales y tienen un origen común.

CB-5, CB-6 y CB-9 han experimentado alzas en las concentraciones de sodio. La albita y ceolita son silicatos que pueden liberar este catión producto de hidrólisis. Si bien estos minerales no pueden ser disueltos como una sal, presentan un índice de saturación menor a cero que se interpreta como que no se encuentran en equilibrio con la solución. La halita (NaCl) también puede aportar sodio dado que se disuelve en todo momento ($IS < 0$), pero se descarta que sea toda la fuente de este catión debido a que el cloro se presenta constante en el registro, excepto por un leve período en CB-9.

Otro mineral asociado a la liberación de sodio es la nitratina o mejor conocida como caliche (NaNO_3). Algunos valores medidos en CB-6 y CB-9 tienden a agruparse en una relación 1:1 de sodio y nitrato, pero no es una tendencia general, por lo que el ascenso en las concentraciones de este catión puede deberse a este mineral, pero no en su totalidad. La figura 9.4 muestra el aumento de concentraciones de los iones sodio-nitrato y potasio-nitrato en los pozos CB-6 y CB-9.

En virtud de lo anterior, aparte del sodio proveniente de la disolución de sales como la halita y/o nitratina, que no demuestran una clara relación, se interpreta que la principal fuente de sodio proviene de la hidrólisis de plagioclasa sódica (albita) y/o ceolitas, aunque no se descarta que las otras fases minerales mencionadas tengan un aporte menor de sodio.

Figura 9.4: Relaciones sodio-nitrato y potasio-nitrato.

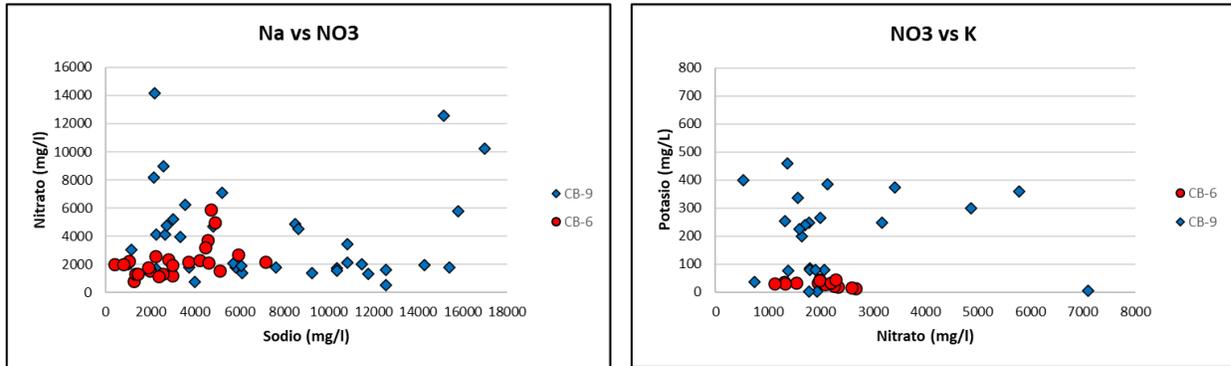


Tabla 9.1. Elementos contenidos en fases minerales mapeadas e interpretadas.

Elemento	Mineral
Na	Albita, halita, ceolita, nitratina*.
K	Feldespatos potásicos, Kmica*, salitre*.
Mg	Dolomita*, silicatos ferromagnesianos, micas, clorita.
Ca	Calcita, yeso, feldespatos cálcicos, ferromagnesianos, anhidrita.
Cl	Halita.
HCO₃	Carbonatos, Calcita, Dolomita*.
SO₄	Yeso, sulfuros, anhidrita.
NO₃	Nitratina*, salitre*.
B	Borax*.
Li	Clorita, evaporitas.
Sr	Celestita*, reemplazo de calcio.
Fe	Silicatos, siderita*, hematita, goethita, limonita.
Mn	Pirolusita, nsutita*, birnesita* y rodocrosita*.

*= Minerales interpretados.

Los ascensos en las concentraciones de potasio se generan principalmente por hidrólisis de feldespatos y mica potásicas, ambas fases se muestran en desequilibrio con la solución. Otro mineral que puede aportar al alza de este catión es el salitre (KNO_3), dado que también se evidencian aumentos en el contenido de nitrato. Sin embargo, no se observa una clara relación 1:1 entre estos iones, en donde el nitrato presenta mayores ascensos que el potasio. Por lo que el salitre podría aportar una cantidad menor de potasio con relación al feldespato y micas. Por otro lado, puede existir otro mineral aparte del caliche y salitre que aumente las concentraciones de nitrato y que no haya sido considerado para este estudio.

El calcio no ha evidenciado alteraciones en las concentraciones a lo largo del tiempo, mostrándose estable, lo que se relaciona con que la calcita, el yeso y la anhidrita, que son potenciales fuentes, presentan un $\text{IS} \sim 0$, por lo que se encuentran en equilibrio con la solución, no disolviéndose ni precipitando. Otras fuentes de calcio a considerar son los feldespatos y ferromagnesianos ricos en este catión, pero al no existir alzas de este elemento se interpreta que estos minerales no tienen una gran presencia en esta zona. Posiblemente la roca proviene de un magma cuya composición es más evolucionada y por eso destacan los ascensos de sodio y potasio en vez de este catión.

Contrariamente, el magnesio evidencia en un comienzo ascensos en sus concentraciones que se pueden relacionar a la meteorización de silicatos ferromagnesianos, cloritas y micas, como la flogopita, que liberan magnesio. Sin embargo, los últimos registros muestran en CB-6 y CB-9 descensos en los valores que podrían estar relacionados a la formación de arcillas como la beidellita y montmorillonita que consumen el magnesio existente en la solución, considerando que las arcillas se originan producto de la meteorización de los silicatos. Ahora bien, los descensos también pueden ser debido a que alguna fase mineral ya fue consumida por completo y ya no genera más aporte de este catión, o tal vez se deba algo más general como lo mostrado en CB-5, en donde las concentraciones de magnesio vienen reduciéndose previo a las alteraciones antrópicas.

Los ascensos de sulfato solo ocurren en CB-9. Se descarta disolución de yeso y anhidrita, que son dos fases comunes de encontrar en el sector, ya que se calcula un $\text{IS} \sim 0$ presentándose en equilibrio con la solución. Tampoco se considera sulfato proveniente de la oxidación de la pirita, que tiene una menor presencia en esta zona, dado que eso implica generar un pH más ácido y altas concentraciones de hierro, lo cual no es demostrado por el registro de pH que se mantiene estable en el tiempo, ni tampoco con las concentraciones de este catión. Posiblemente el sulfato provenga de la disolución-meteorización de minerales sulfatados como alunita, brocantita, antlerita, malaquita, azurita o jarosita, aunque no se descarta alguna otra fuente no considerada en este estudio.

El boro y litio también revelan alzas en sus concentraciones juntos con el ascenso del nivel freático. Phreeqc no incluye minerales que estén formados a partir de estos elementos, sin embargo, ambos se caracterizan por ser iones que van quedando en las fases residuales del magma, por lo que tienen un origen común con los nitratos, con esto se espera que puedan encontrarse rellenando fracturas y con un comportamiento similar a las sales. Aparte, el boro es contenido en el mineral borax, el cual es habitual encontrarlo relacionado a la meteorización de rocas ígneas, por lo que el ascenso en las concentraciones de boro puede relacionarse a esta fase mineral. Por otro lado, es usual encontrar cloritas ricas en litio, en consecuencia, la liberación de litio, y su alza en las concentraciones, se asocia a la hidrólisis de clorita.

El aumento en las concentraciones de estroncio puede ser explicado por procesos de meteorización de silicatos que contengan calcio, dado que el estroncio suele reemplazar a este catión en la estructura de los minerales al tener radios iónicos similares. Otra posible fuente es la disolución de la fase celestita (SrSO_4), la cual, además de explicar el aumento en las concentraciones de estroncio, se relaciona con los aumentos de sulfato. Sin embargo, este mineral es interpretado y no se ha comprobado su presencia en el sector.

Los aumentos en la concentración de manganeso se pueden asociar a la disolución de pirolusita, nsutita, birnesita y rodocrosita, los cuales tienen $IS < 0$. Además, este último mineral se puede relacionar con los ascensos de bicarbonato. Por otro lado, los ascensos en las concentraciones de hierro pueden estar asociadas a la hidrólisis de silicatos ferromagnesianos, descartando a los óxidos de hierro dado que presentan $IS > 0$.

No se sabe con certeza del origen de los aumentos en las concentraciones de arsénico, mercurio, cadmio y zinc en el pozo CB-9, ya que la información de mapeo no entrega datos acerca de fases minerales asociadas a estos elementos. Por lo que se deja como una limitante para este trabajo.

Los principales ascensos en las concentraciones analizados hasta aquí ocurren en los pozos CB-6 y CB-9. El pozo CB-5 solo presenta leves aumentos en el contenido de sodio y hierro, lo que se relaciona con que el nivel de agua aun no entra en contacto con una cantidad suficiente de roca y que este empezó a subir pocos meses después de CB-6, por lo que el agua subterránea presenta un menor tiempo de residencia como para aumentar sus concentraciones. Es de esperarse que en la medida que el nivel vaya creciendo, y el tiempo de residencia sea más prolongado, también las concentraciones de los cationes y aniones también vayan aumentando.

Es relevante continuar con el monitoreo de calidad de agua en el pozo CB-5 para comprobar si la composición cambia a medida que el nivel se va alzando. Dado que los demás cationes y aniones no presentan alzas en este punto, es otra evidencia de que las modificaciones en la signatura química del agua subterránea no son directamente producto de la mezcla con el agua de relave y piscinas, sino que estas se generan por un efecto indirecto al entrar en contacto con mayor cantidad de roca que antes se encontraba no saturada.

Por último, el sector oeste de faena Sierra Gorda se caracteriza por presentar, a diferencia de la zona este, altas concentraciones de calcio y estroncio y un nivel de agua a mayor profundidad alojado en fracturas de rocas ígneas. Se asocia que el calcio proviene de silicatos menos evolucionados composicionalmente como, por ejemplo, plagioclasas (anortita) y ferromagnesianos cálcicos; el estroncio presenta el mismo comportamiento que el calcio debido a que es común la sustitución iónica entre estos iones al tener radios iónicos parecidos.

Además, como el agua subterránea de faena Sierra Gorda presenta un mayor tiempo de residencia al encontrarse casi estancada, desencadena una serie de procesos químicos que la ponen en equilibrio con la roca de su entorno, resultando en que la composición del agua se asemeja a la de los minerales a su alrededor. Es por ello, que hay variación en los aniones y cationes que dominan en el acuífero, destacando aguas cloruradas sódicas al este del tranque de relaves, aguas sulfatadas sódicas en el pozo CB-9 y aguas cloruradas cálcicas al oeste del tranque de relaves.

10 CONCLUSIONES

- 1) El distrito Sierra Gorda se caracteriza por presentar aguas subterráneas neutras-alcalinas que varían entre un pH de 6 a 8, con contenidos de sólidos totales disueltos que las catalogan como aguas altamente salinas (7.000-15.000 mg/l), muy altamente salinas (15.000-35.000 mg/l) y aguas de salmueras (35.000 mg/l). Además, la composición química de los acuíferos las permite clasificar como aguas cloruradas sódicas, presentes en todo el distrito minero, sulfatadas sódicas, localizadas en Pampa Lina, instalaciones de Spence y faena Centinela, cloruradas cálcicas y sulfatadas magnésicas, presentes en las faenas Sierra Gorda y Spence sector relaves.
- 2) Distintos medios hospedantes originan diferencias composicionales y de salinidades, en uno o dos órdenes de magnitud, en las aguas subterráneas del distrito Sierra Gorda. En faena Centinela, sector de las instalaciones de Spence y Pampa Lina, la roca caja corresponde principalmente a grava, la cual implica mayor permeabilidad (porosidad primaria), velocidad flujo y facilidad de renovar el agua, resultando en una reducción del tiempo de interacción agua-roca y, en consecuencia, menor acumulación de iones.

En contra parte, el agua de faena Sierra Gorda y sector del depósito de relaves de Spence está contenida en roca, la cual limita su capacidad de almacenar y transmitir el agua al grado e interconectividad de fracturas (porosidad secundaria). Por lo que, la permeabilidad muy baja, lentitud del flujo y casi nula renovación del recurso hídrico, generan casi un estancamiento del agua subterránea que favorece los procesos químicos de interacción agua-roca, aumentando la concentración de cationes y aniones en la solución acuosa. Además, un mayor tiempo de residencia en la roca permite que el agua entre en equilibrio con los minerales a su alrededor, resultando en zonas con distintas composiciones.

- 3) Se propone que el acuífero de la faena Sierra Gorda presenta una desconexión hidráulica entre los sectores noreste-este (pozos CB-5, CB-6 y CB-9) y oeste (puntos CB-7R, CB-8R, CB-11R y CON-15) del depósito de relaves, producto de una estructura de orientación aproximada norte-sur. Las evidencias que avalan esta falla son dadas por los niveles freáticos, gradiente hidráulico, calidad de agua y perfiles geofísicos nanoTEM. La superposición de estos últimos, junto con la piezometría, permite trazar la estructura, la cual sigue el mismo lineamiento que una estructura inferida/cubierta propuesta por el Sernageomin, y confirmada por SGSCM, pero desplazada ~200 m hacia el oeste.

El sector este se caracteriza por presentar un gradiente hidráulico natural plano entorno a la cota ~1600 m.s.n.m., en donde los datos químicos juntan a los pozos CB-5, CB-6 y CB-9 como un grupo con altas concentraciones de sodio, sulfato y boro en relación con el lado opuesto, a su vez, el pozo CB-9 presenta los mayores valores de magnesio y TDS. Además, los perfiles nanoTEM evidencian roca saturada, consistente con profundidades de ~60 m. Contrariamente, en la zona oeste el gradiente hidráulico se torna abrupto, variando entre las cotas ~1340-1580 m.s.n.m. y los puntos CB-7R, CB-

8R, CB-11R y CON-15 se correlacionan químicamente de buena manera, caracterizándose por presentar altas concentraciones de calcio y estroncio en relación con la zona este. Asimismo, en esta ubicación, los perfiles nanoTEM indican roca no saturada al presentar niveles con más de 150 m de profundidad.

- 4) En el sector oeste del depósito de relaves se evidencian ascensos de nivel en 28,31 m, desde octubre del 2019, y 62,33 m, desde junio del 2019, en los puntos CB-8R y CON-15, respectivamente. El origen de estas afecciones se asocia a infiltraciones desde el depósito de relaves, las cuales ingresan a través de la apertura del sondaje abierto CON-15 y luego son empujadas lateralmente, por medio de interconectadas, hasta el pozo CB-8R. No obstante, la calidad del agua no presenta modificaciones en el registro.

Los pozos CB-7R y CB-11R aun no logran la estabilización del nivel luego de su instalación, proceso que sería retardado por la muy baja permeabilidad del basamento. A pesar de ello, la calidad del agua se mantiene relativamente estable en el registro.

Hacia el sector este del tranque de relaves, los pozos CB-5, CB-6 y CB-9 han experimentado alzas de nivel en 6 m, 18,47 m y 60,92 m, respectivamente. Los dos primeros puntos están asociados a infiltraciones desde el tranque de relaves, mientras que el restante, a aportes desde el sector de piscinas, no siendo posible reconocer con exactitud si estas provienen desde la piscina ICV o de agua de mar. Debido a estas afecciones, el pozo CB-5 solo ha experimentado leves alzas en las concentraciones de sodio y hierro, CB-6 en los valores de sodio, potasio, magnesio, bicarbonato, nitrato, litio y boro, y, por último, el punto CB-9 revela ascensos en las concentraciones de sodio, magnesio, potasio, sulfato, bicarbonato, nitrato, boro, estroncio, litio, manganeso, arsénico, hierro, cadmio, zinc y mercurio.

- 5) Los resultados revelan que la calidad del acuífero de faena Sierra Gorda es similar, e incluso peor, que las aguas encontradas en el tranque de relaves y sector de piscinas, por lo que modificaciones en la signatura química del acuífero no son producto de un efecto directo de la mezcla de aguas, sino que el ascenso del nivel freático pone en contacto al acuífero con roca que previamente se encontraba no saturada. Este macizo rocoso se puede encontrar levemente meteorizado, ya que el oxígeno atmosférico puede penetrar en profundidad a través de fracturas características de la UH-2. El agua subterránea, al entrar en contacto con la roca no saturada, cambia las condiciones oxidantes del medio hospedante, lo que permite desencadenar procesos hidroquímicos como hidrólisis de minerales y disolución de sales, entre otros, que liberan cationes y aniones a la solución, aumentando sus concentraciones en el tiempo.

11 RECOMENDACIONES

En base a este estudio, se proponen las siguientes recomendaciones a futuro:

- Analizar el origen de las aguas subterráneas en el distrito Sierra Gorda y determinar diferencias de sus respectivas composiciones.
- En faena Sierra Gorda, realizar análisis periódicos de isótopos estables ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) y/o de azufre o algún otro componente utilizado en la generación de relaves, que relacione las aguas del depósito de relaves y los pozos alrededor de este, principalmente, CB-5, CB-6, CB-9, CB-8R y CON-15, ya que estos presentan afecciones antrópicas. El fin de esto es definir con exactitud el origen de las afecciones.
- Instalar una red de pozos de observación de las zonas saturada y no saturada, frente a cada muro de tranque de relaves, para detectar inmediatamente infiltraciones; además de realizar mediciones geofísicas anuales.
- Sellar el sondaje abierto CON-15 en todo su largo para impedir que infiltraciones penetren hasta el acuífero a través de esta apertura.
- Realizar un estudio detallado de la mineralogía del macizo rocoso que permita conocer con exactitud las fases minerales presentes y relacionarlas de mejor manera al ascenso de las concentraciones de iones en el agua subterránea.
- Analizar las muestras colectadas de agua subterránea para la fracción de disueltos, aparte de los totales, para ampliar la información y comparar con las totales.
- Continuar con el monitoreo de la calidad del agua en los pozos donde se han detectado afecciones externas, con el afán de seguir analizando de evolución de las concentraciones de cationes y aniones en el tiempo.
- Realizar una modelación de transporte reactivo en PHREEQC, o software afín, para simular posibles cambios de la calidad del agua subterránea a raíz de las infiltraciones, lo que ayuda a saber si, y cuando, se puede esperar aproximadamente modificaciones de la calidad del agua y su magnitud.

BIBLIOGRAFÍA

- APHA, AWWA, WEF. 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition. Washington DC: Baird, R., Eaton, A., Rice, E.
- Apodaca, L., Jeffrey, B., Michelle, C. 2002. Water quality in shallow alluvial aquifers, Upper Colorado River Basin, Colorado, 1997. *J. Am. Water Res. Assoc.* 38 (1), pág. 133–143.
- Arcadis. 2015. Proyecto Minerales Primarios Minera Spence. Estudio de Impacto Ambiental. Medio físico. Línea de base hidrogeología.
- Arcadis. 2016. Actualización del Modelo Hidrogeológico Sierra Gorda.
- Arcadis, 2018. Modelación Hidrogeológica del sector del Depósito de Relaves.
- BHP. 2018a. Informe Monitoreo Hidrogeológico. Minera Spence S.A. Julio-diciembre 2017.
- Calabrán, R. 2009. Evaluación del riesgo ambiental del tranque de relaves las tórtolas ubicado en la comuna de Colina, Región Metropolitana de Santiago. Memoria para optar al título de Geógrafo. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- CIREN. 2016. Antecedentes Climáticos II Región de Antofagasta. Ministerio de Agricultura, Sistemas de Información Territorial de Humedales Altoandinos (SITHA).
- Collao, S., Arce, E., Andía, A. 2002. Mineralogía, química e inclusiones fluidas en los depósitos de nitratos de María Elena, II región, Chile. *Boletín de la sociedad chilena de química*, volumen 47.
- Charrier, R., Pinto, L. y Rodríguez, M.P., 2007. Tectono-stratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile, in: *Geology of Chile*, Chapter 3 (Gibbons, W. and Moreno, T., editors), The Geological Society, London, Special Publication, p. 21-116.
- Corbett, G. y Leach, T, 1998. Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. *Society of Economic Geologist*, Special Publication Number 6, 237 pp.
- Chebotarev, I. 1995. Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, volume 8, pages 22-32.
- Dames & Moore Chile. 1997. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto El Tesoro.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2000. Mapoteca Digital. Recuperado de <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca>
- Duhart P., Muñoz, J., Quiroz, D., Maestre, A., Varas, G. 2018. Carta Sierra Gorda, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 198, 1 mapa escala 1:100.000. 1 CD con anexos. Santiago.
- Fuentes, M. 2017. Origen y procesos hidrogeoquímicos de los recursos hídricos en la cuenca del Río Cuncumén. Memoria para optar al título de Geóloga. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

- Geodatos. 2020. Estudio Geofísico de Resistividad Método Transiente Electromagnético NanoTEM Sector Muro 6, Región de Antofagasta. Sección de Modelos 1D, NanoTEM.
- Gestión Ambiental Consultores (GAC). 2007. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Esperanza, Región de Antofagasta, Chile.
- Gestión Ambiental Consultores (GAC). 2012. Línea de base hidrogeología. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Óxidos Encuentro, Región de Antofagasta, Chile. Anexo 2.2.
- Gestión Ambiental Consultores (GAC). 2015. Estudio de Impacto Ambiental Desarrollo Minera Centinela, Región de Antofagasta, Chile.
- Giblin, A., 2001, Groundwaters: Geochemical Pathfinders to Concealed Ore Deposits. CSIRO. Exploration and Mining.
- Golder. 2010. Proyecto Sierra Gorda. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Sierra Gorda.
- Golder. 2017. Adenda Complementaria. Respuestas al Informe Consolidado N°2 de Solicitud de Aclaraciones, Rectificaciones y/o Ampliaciones Complementario al Estudio de Impacto Ambiental “Proyecto Minerales Primarios Minera Spence”. Anexo 4.5, Actualización y Verificación de Información Hidrogeológica en la zona del Proyecto Spence.
- ITASCA. 2019. Modelo Conceptual Hidrogeológico Proyecto: Actualización del Depósito de Relaves e Instalaciones Anexas SGSCM. Estudio de Impacto Ambiental, Anexo 4-3.
- Holland, H. D., and Turekian, K., K., 2003, Treatise on Geochemistry, Volume 1, Meteorites, Comets and Planets. Edited by Andrew M. Davis, Elsevier.
- Knight Piésold S.A. 2002. Proyecto Spence. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Spence.
- Knight Piésold S.A., 2014. Informe técnico del estudio geológico área Depósito de Relaves.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., Camus, F. 2007. Metallic ore deposits. En: Moreno, T. y Gibbons, W. The Geology of Chile. London, The Geological Society Publishing House. 395p
- Maya, J. 2004. Geología y evaluación de yacimientos polimetálicos del Distrito Sierra Gorda, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas, Programa especial de titulación para optar al título de Geólogo (Inédito), 90 p. Antofagasta.
- Marinovic, N., García, M. 1999. Hoja Pampa Unión, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, N° 9, mapa escala 1:250.000.
- Merkel, B. J., and Planer-Friedrich, B., 2002, Groundwater Geochemistry, A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems. Edited by Darrell Kirk Nordstrom, Springer, 207 p.
- Parkhurst, D. L., and Appelo, C. A. J., 1999, User’s Guide to PHREEQC (Version 2) – A Computer Program For Speciation, Batch Reaction, One-Dimensional Transport and Inverse Geochemical Calculations. Water Resources Investigation Report 99-4259, U.S. Geological Survey.

- Pueyo, J., Chong, G., Vega, M. 1998. Mineralogía y evolución de salmueras madres en el yacimiento de nitratos Pedro de Valdivia, Antofagasta, Chile. Revista geológica de Chile, volumen 25.
- Schlumberger Water Services (SWS). 2010a. Caracterización Hidrogeológica Proyecto Sierra Gorda. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Sierra Gorda de minera Quadra Chile Ltda.
- Schlumberger Water Services (SWS), 2010b. Modelo numérico Mina Catabela.
- Schlumberger Water Services (SWS), 2013. Instalación de Pozos de Monitoreo Proyecto Sierra Gorda.
- SGA S.A., 2016. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto “Adecuación Operacional del Depósito de Relaves y Optimización del proyecto Sierra Gorda”
- SGA Gestión Ambiental. 2018. Línea de base hidrológica. Estudio de Impacto Ambiental. Actualización del depósito de relaves e instalaciones anexas.
- Shaver, S., Manske, S., Currie, J., Fahey, P. Maya, J., Stein, H., Huard, J. 2009. The Sierra Gorda porphyry Cu-Mo (-Au) deposit, Region II, northern Chile, part 2: intrusive relations and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Re-Os molibdebnite geochronology of the Catalina and 281 zone mineralization centers. Portland GSA Annual Meeting, 26-7.
- Superintendencia de Geología SGSCM. 2020. Reporte de Geología Zona Depósito de Relaves.
- Reif, J., Alhalabi W. 2015. Solar-thermal powered desalination: Its significant challenges and potential”. Renewable and Sustainable Energy Reviews. volumen 48, pages 152-165.
- Ruco Fresena (Ruco). 2020. Revisión y análisis de estudio geofísico NanoTEM Geodatos 2019/2020, y distribución de niveles en área este del depósito de relaves SGSCM. 2001_MT10_v0.
- VAI Groundwater Solutions (VAIGS). 2014. Actualización Modelo Hidrogeológico, Proyecto Sierra Gorda.
- VAIGS. 2015. Modelo Hidrogeológico Rajo Catabela.
- Vergara, P. 2014. Procesos de interacción agua-roca, variaciones geoquímicas de aguas subterráneas en el proyecto Sierra Gorda, Región de Antofagasta. Memoria para optar al título de Geóloga. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

ANEXOS

ANEXO 1. HIDROGEOQUÍMICA GENERAL

Anexo 1.1 Diagrama Durov de fauna Sierra Gorda y Pampa Lina.

Diagrama Durov Sierra Gorda y Pampa Lina

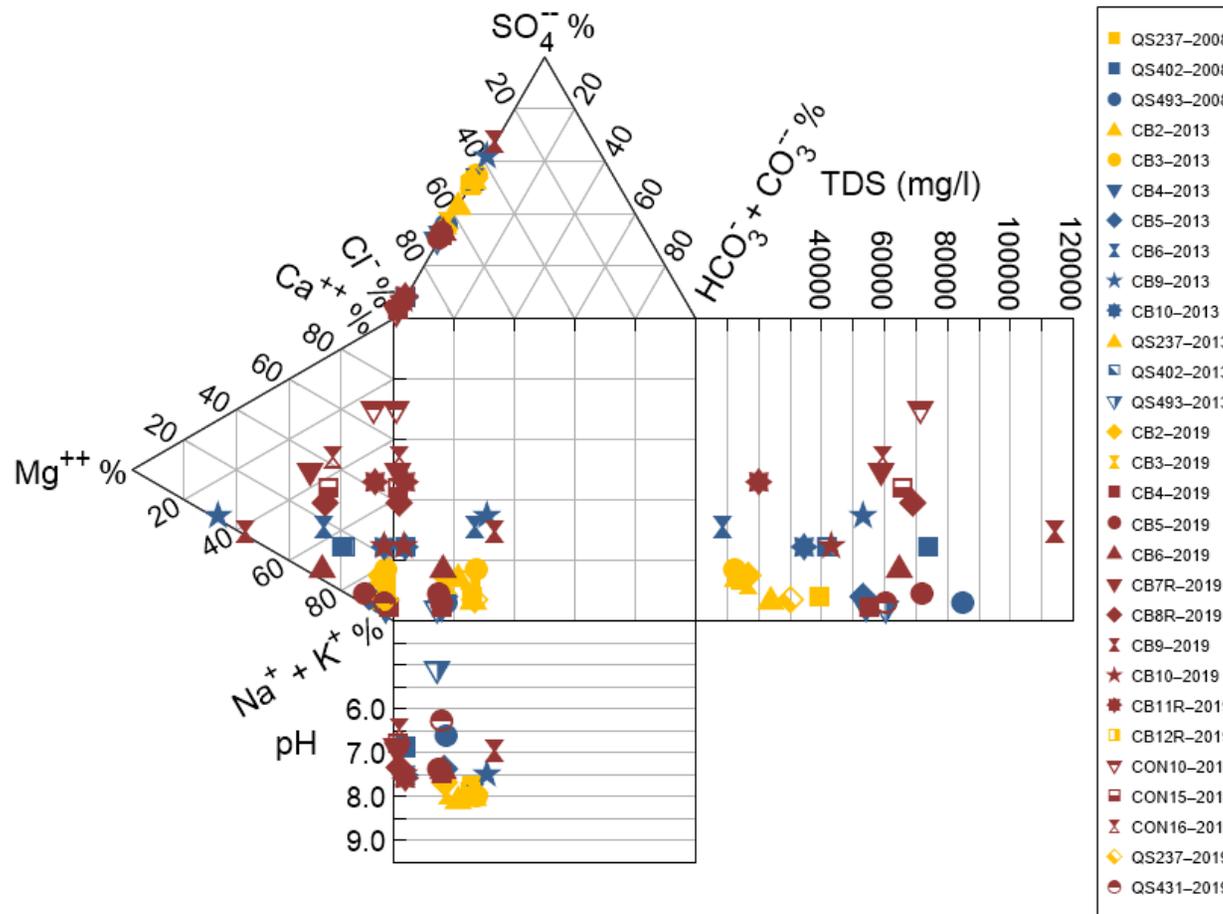


Diagrama Durov Spence

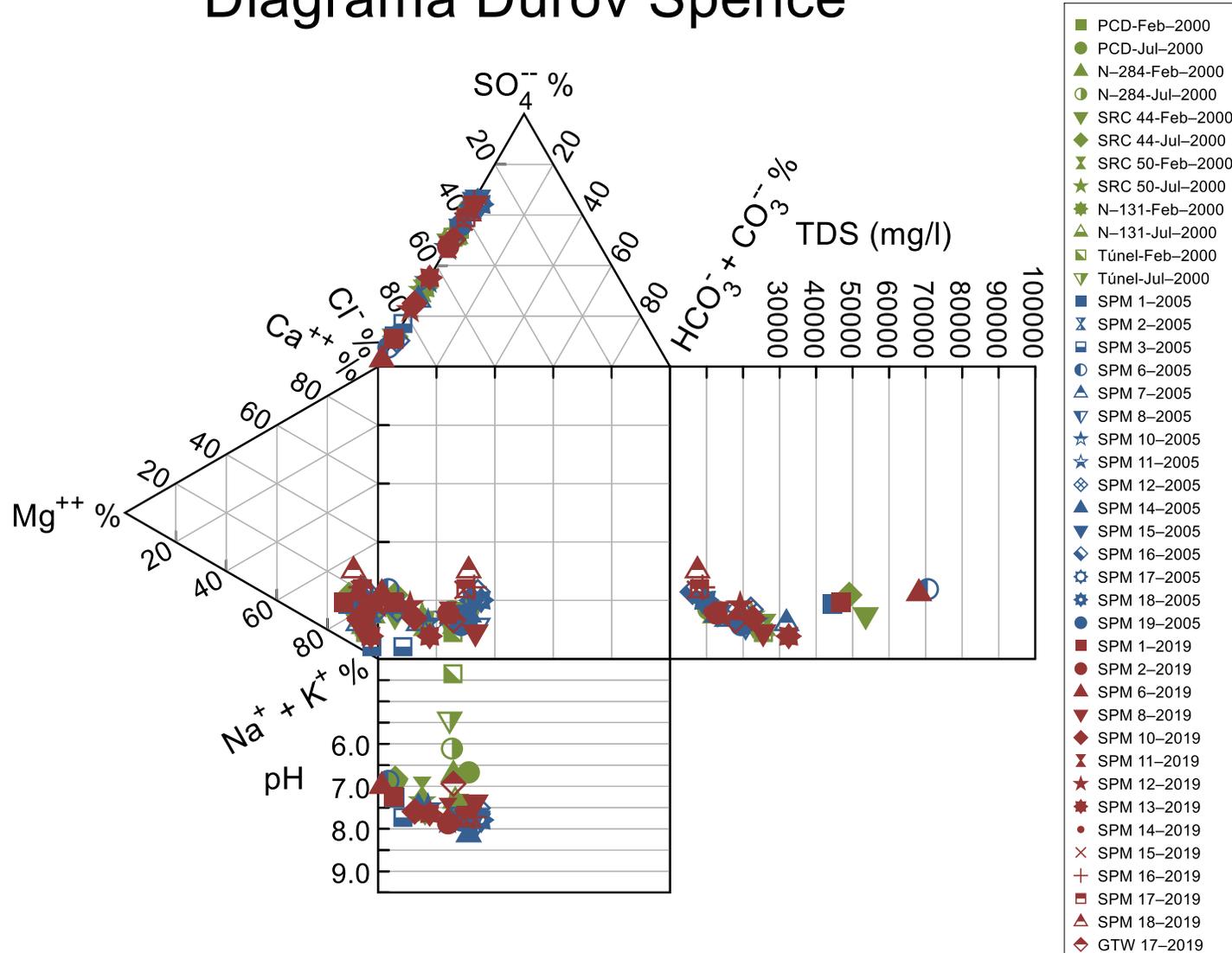


Diagrama Durov Spence sector relaves

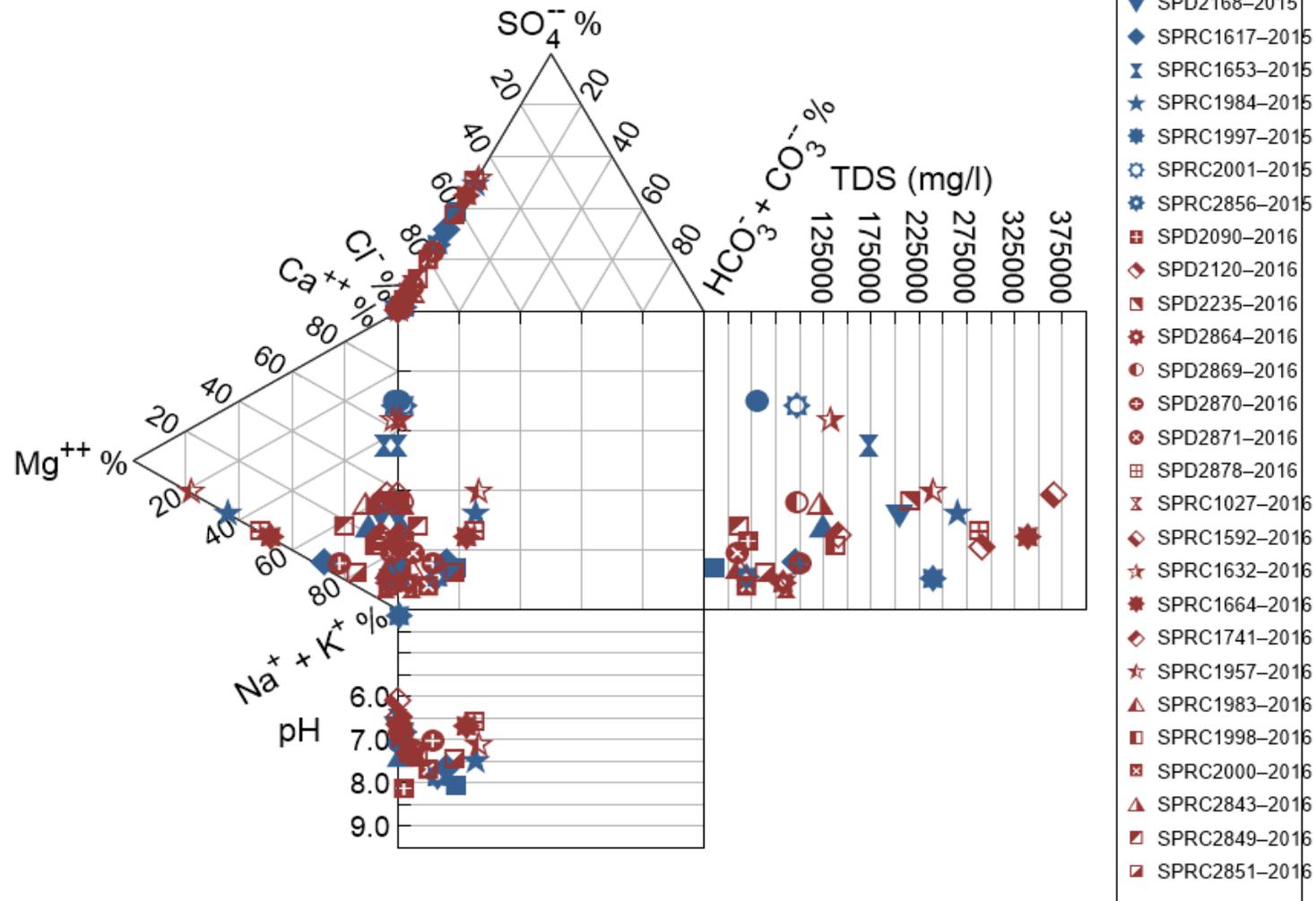


Diagrama Durov Centinela

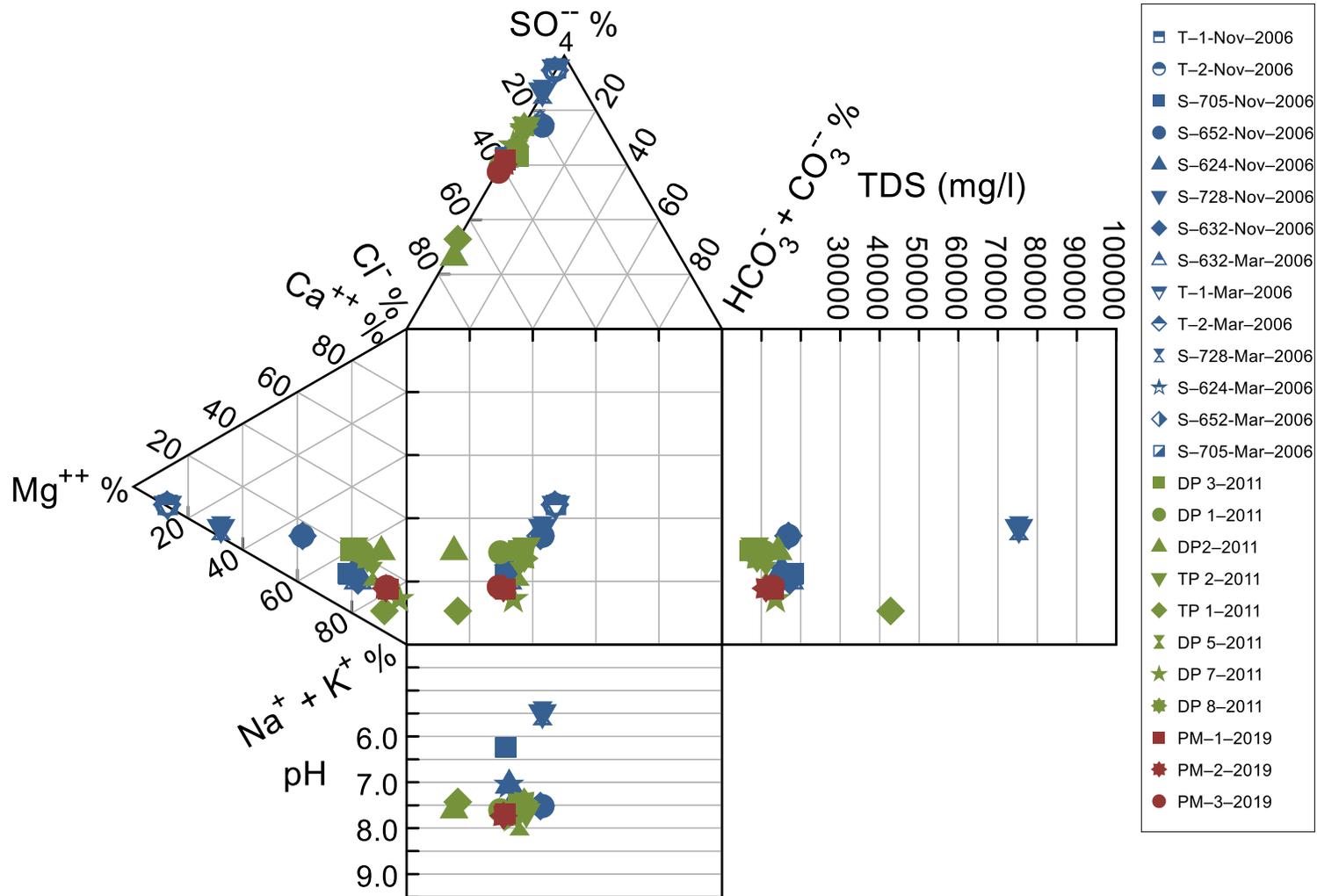


Diagrama Piper Sierra Gorda

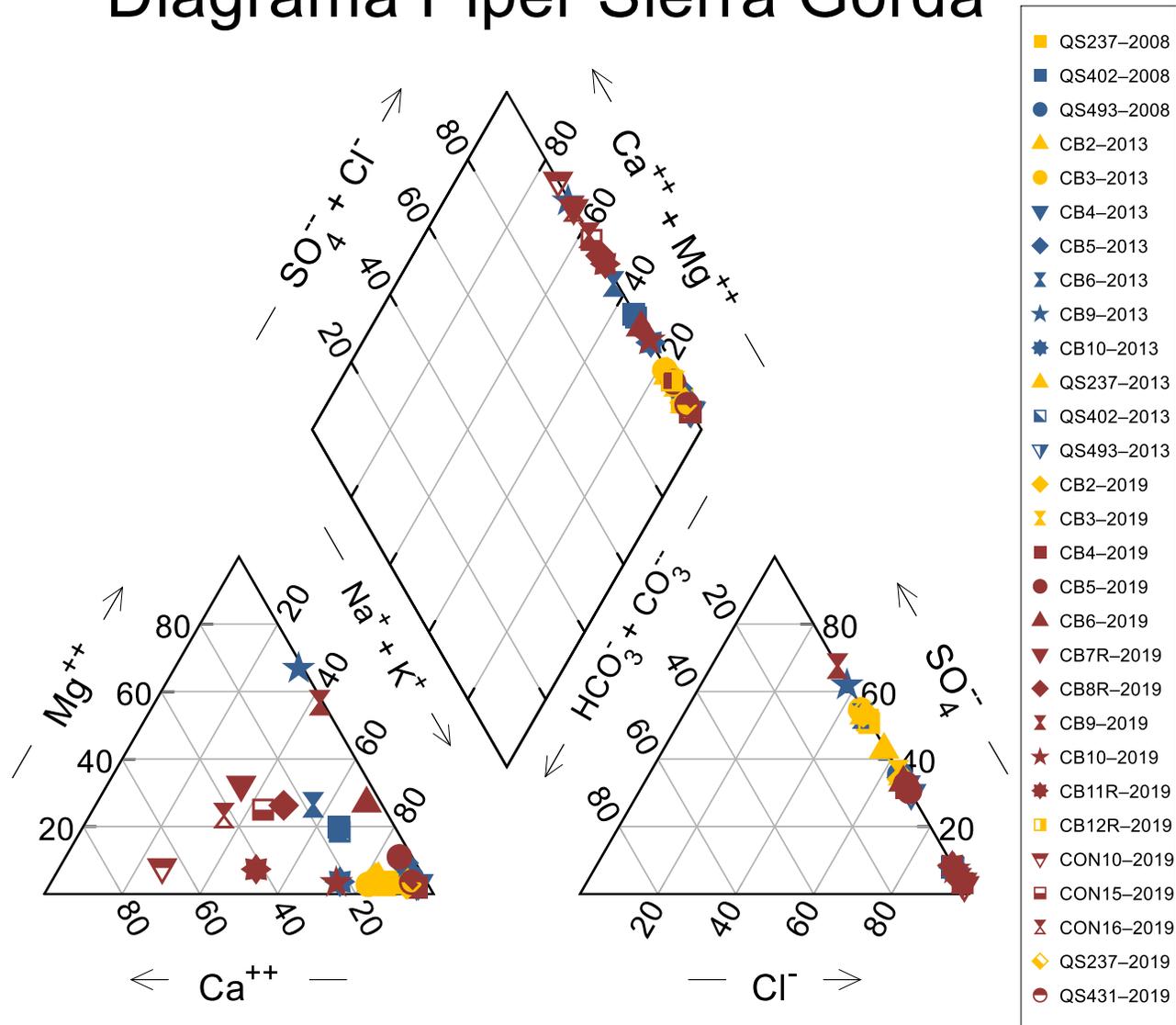


Diagrama Piper instalaciones Spence

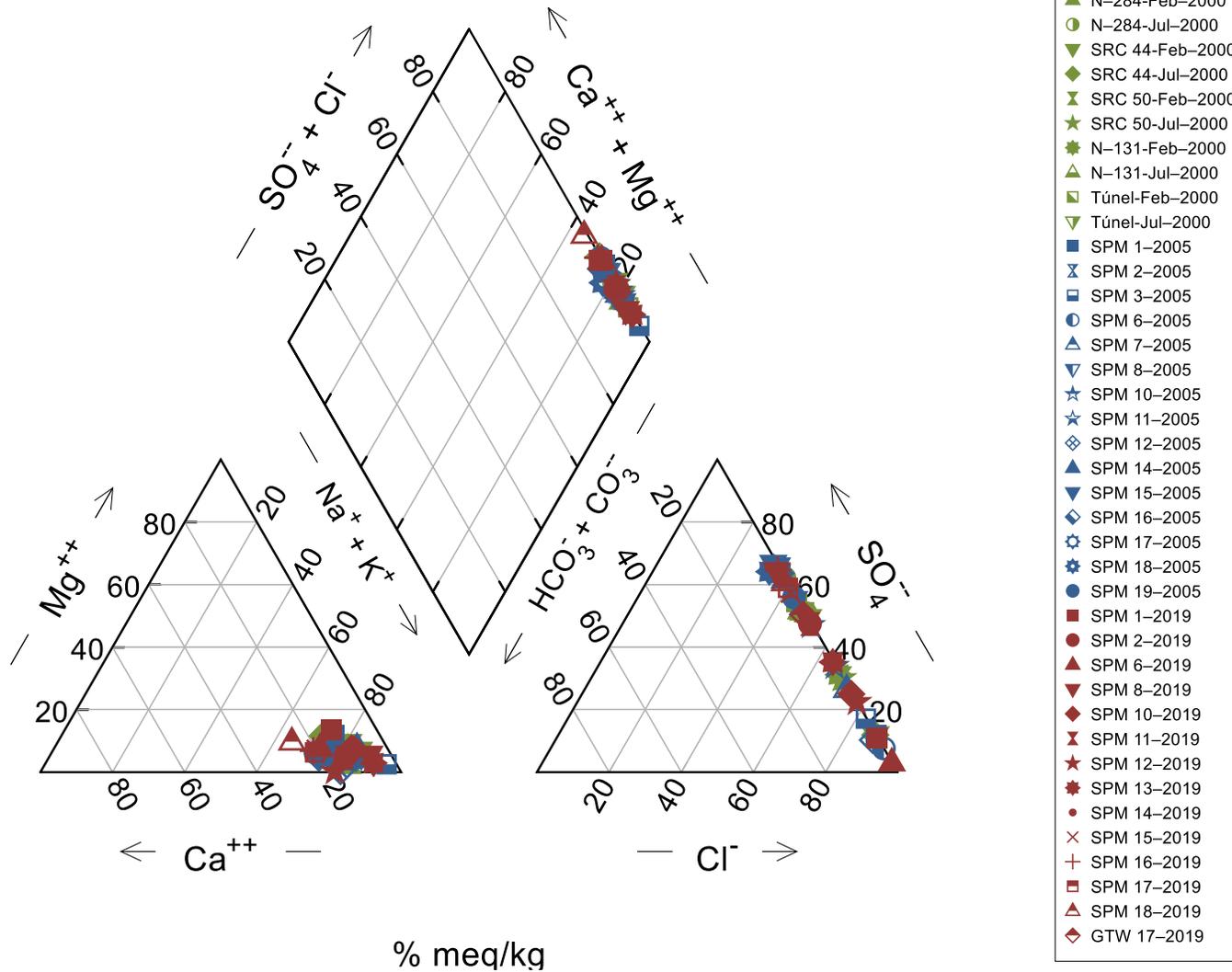


Diagrama Piper Spence sector relaves

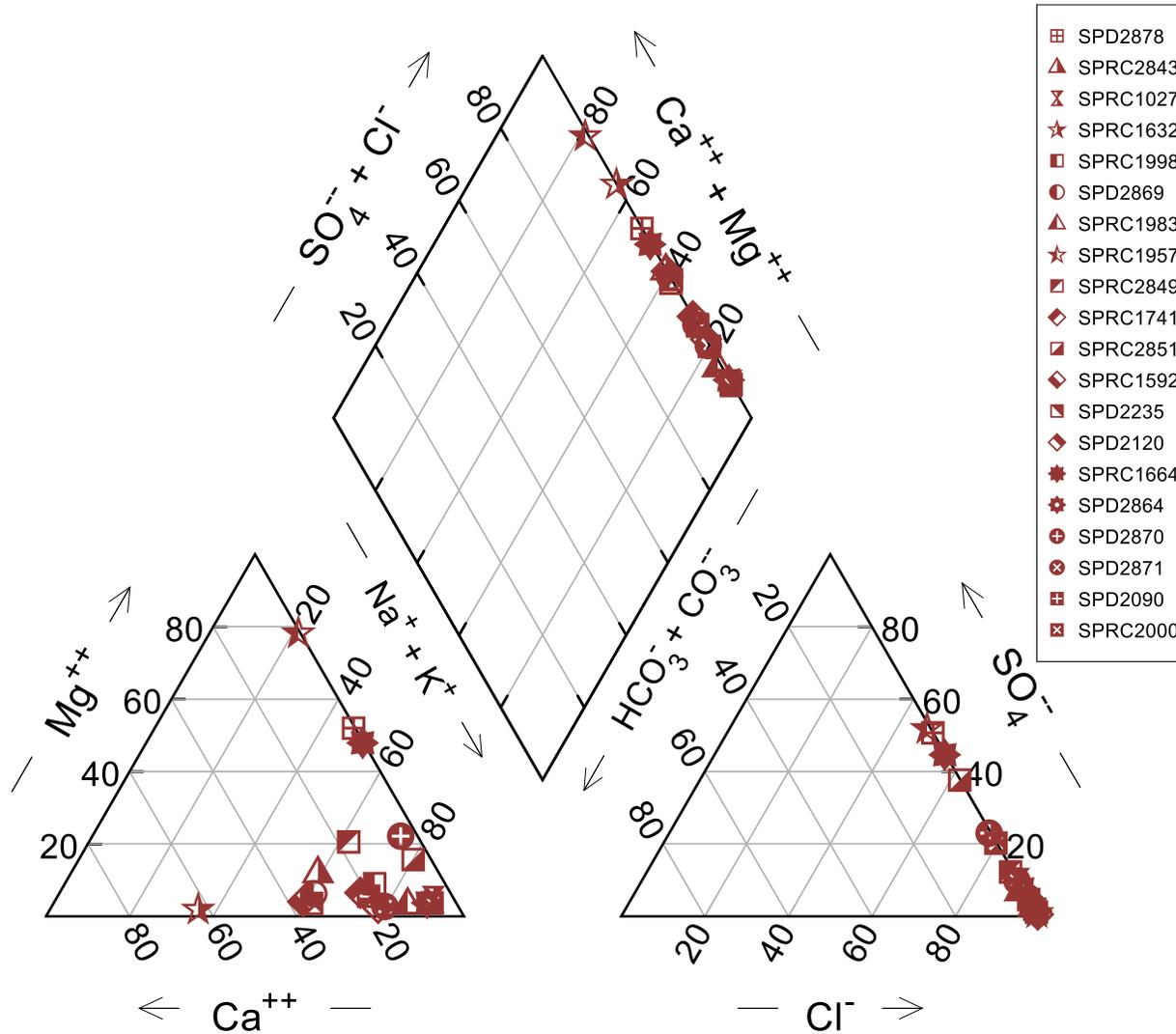
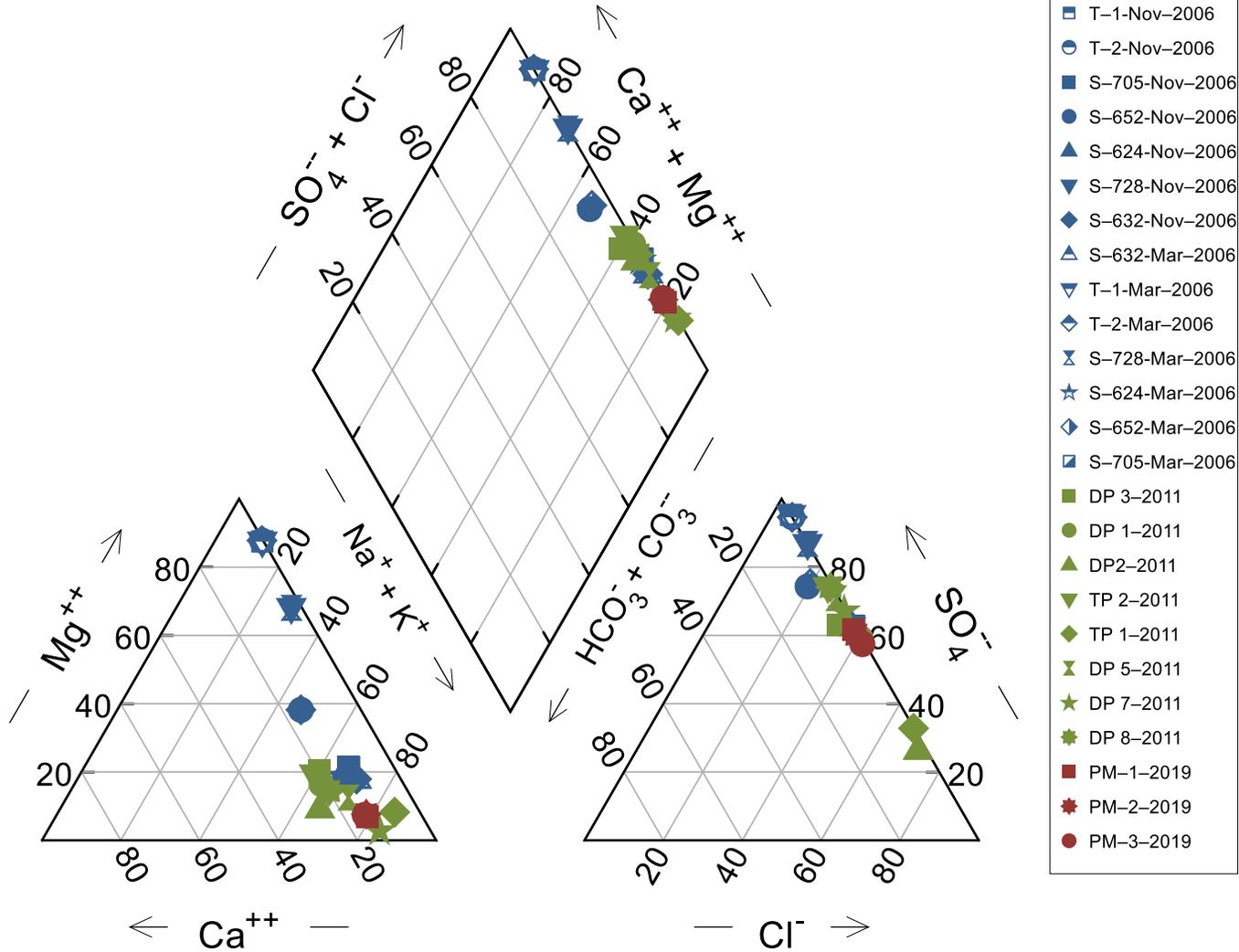
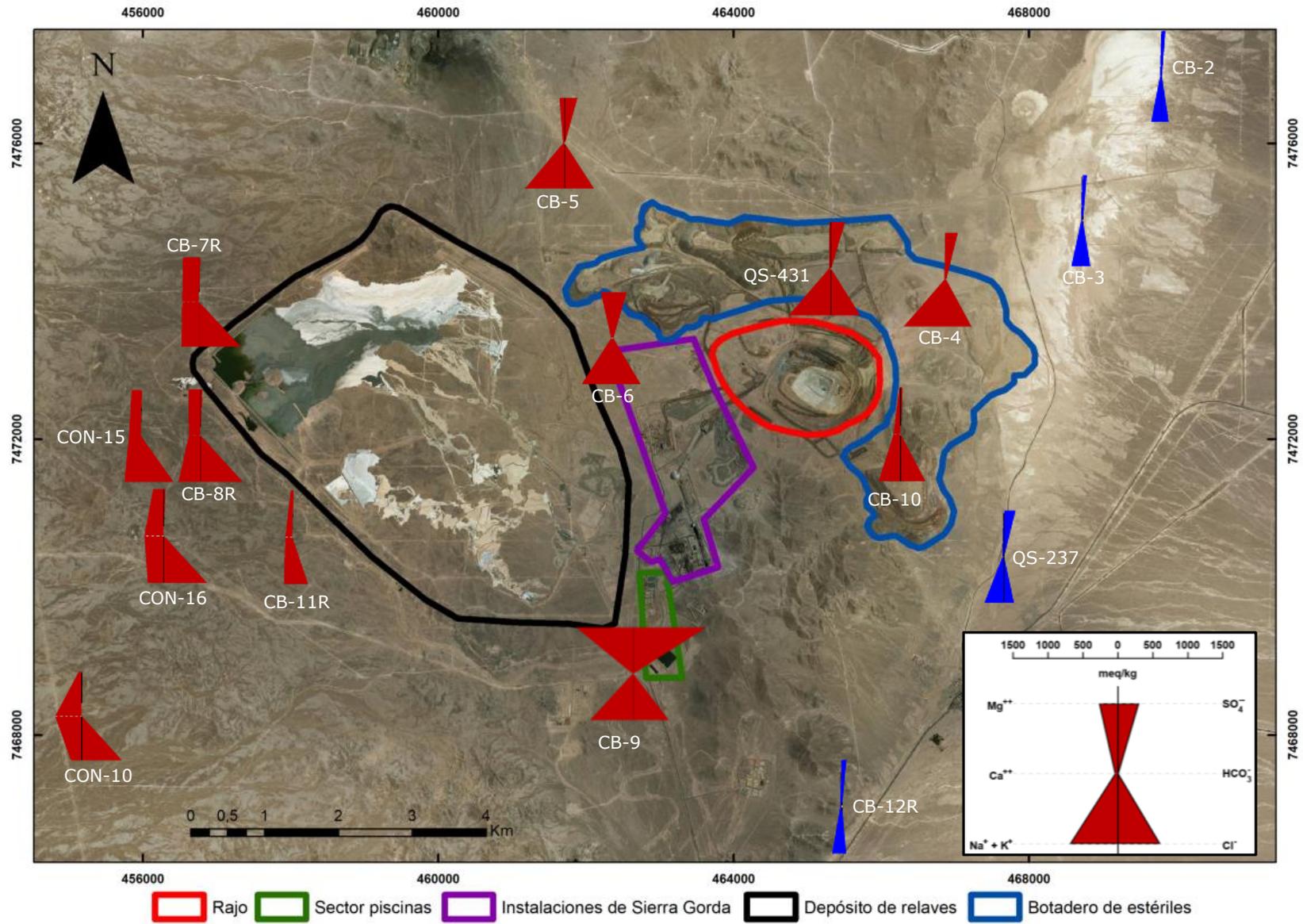


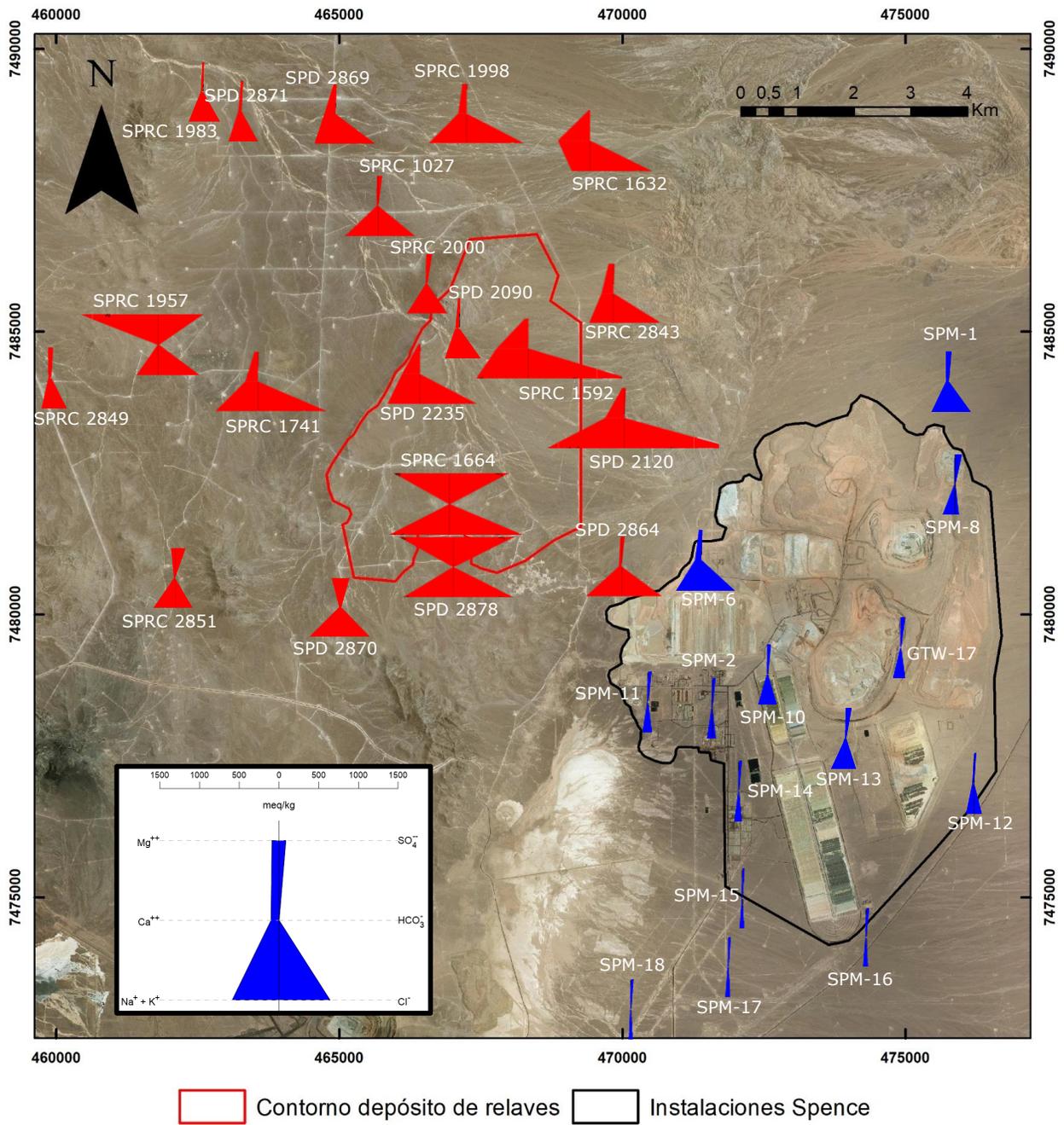
Diagrama Piper Centinela



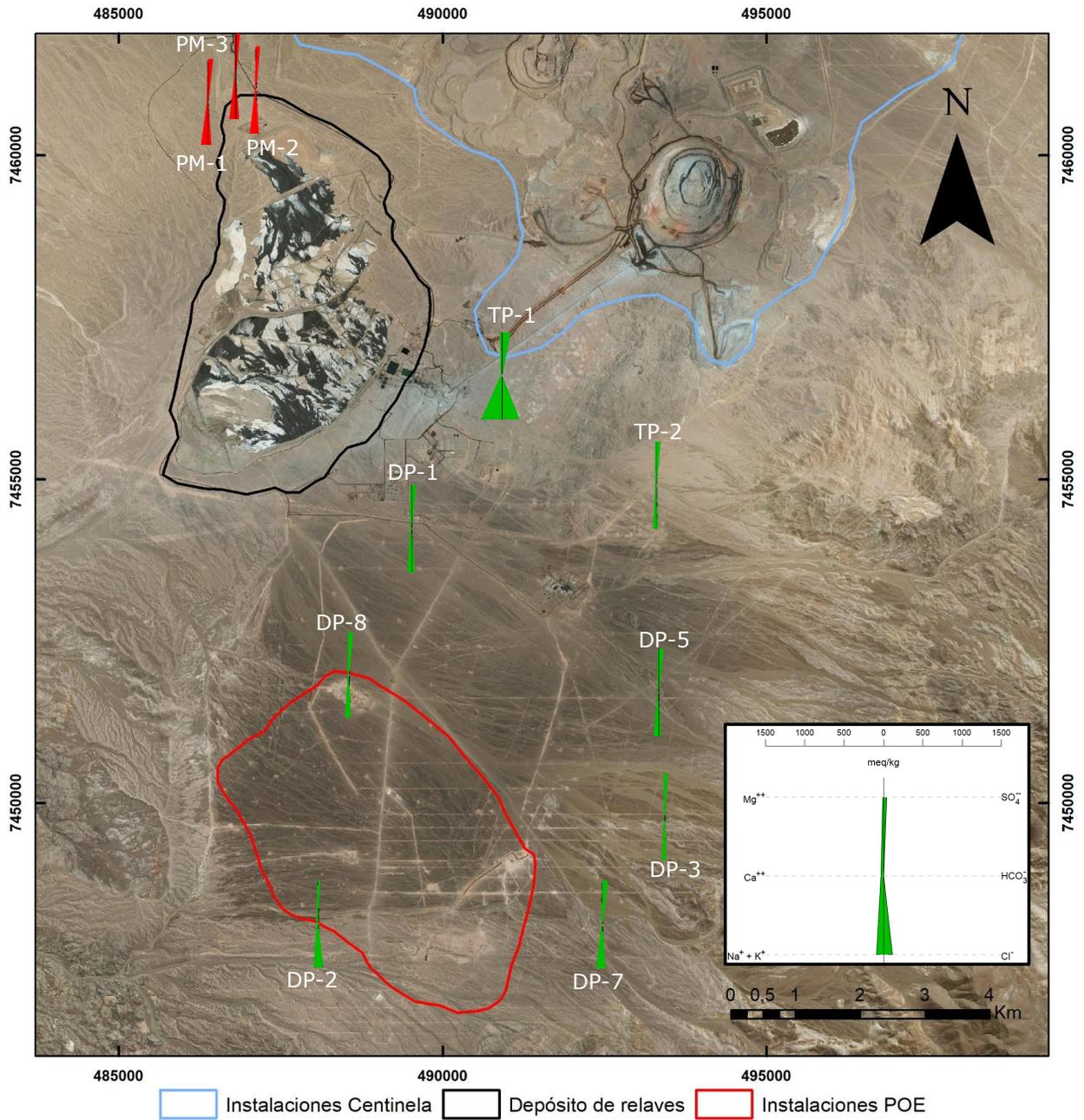
Anexo 1.9 Diagramas Stiff de fauna Sierra Gorda y Pampa Lina.



Anexo 1.10 Diagramas Stiff faena Spence.



Anexo 1.11 Diagramas Stiff de fauna Centinela.



ANEXO 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO UNIVARIABLE

Anexo 2.1 Parámetros estadísticos de minera Sierra Gorda.

Sierra Gorda								
		Datos	Promedio aritmético	Desv. Est.	Cv (%)	Máx.	Mín.	Rango
T*	°C	590	25.30	1.71	6.75	30.10	20.80	9.30
pH*		586	6.81	0.98	14.37	8.26	6.00	2.26
CE*	uS/cm	590	71363.47	18854.01	26.42	124700.0	2530.0	122170.0
TDS*	mg/l	544	38923.72	14818.61	38.07	73800.00	1264.0	72536.00
pH		508	6.89	0.56	8.16	7.85	6.40	1.45
CE	uS/cm	502	75510.71	13905.40	18.42	114400.0	24900	89500.00
TDS	mg/l	579	67708.49	29697.13	43.86	225394	19462	205932
Ca	mg/l	596	3011.56	3511.61	116.60	15176.00	261.60	14914.40
Mg	mg/l	586	3410.84	5661.74	165.99	33020.00	189.50	32830.50
Na	mg/l	599	14475.47	6993.59	48.31	59560.00	251.00	59309.00
K	mg/l	580	177.32	119.91	67.62	641.01	10.62	630.39
Cl	mg/l	595	26471.12	6368.63	24.06	49329.70	9410.0	39919.70
HCO ₃	mg/l	405	130.22	88.95	68.31	514.84	28.06	486.78
SO ₄	mg/l	594	14485.89	22483.94	155.21	140314.4	777.92	139536.5
F	mg/l	589	0.89	1.04	116.27	6.08	0.05	6.03
NO ₃	mg/l	589	5788.01	4090.68	70.68	20931.65	14.82	20916.83
Ag	mg/l	603	0.04	0.07	158.17	0.34	0.001	0.34
Al	mg/l	584	1.57	6.72	428.00	156.53	0.025	156.51
As	mg/l	589	0.10	0.79	789.95	0.25	0.00015	0.25
B	mg/l	590	50.51	48.52	96.05	122.15	0.91	121.24
Ba	mg/l	598	0.11	0.48	438.17	7.79	0.005	7.79
Be	mg/l	601	0.02	0.09	579.87	0.07	0.0005	0.07
Cd	mg/l	589	0.07	0.14	203.93	1.09	0.001	1.09
Co	mg/l	598	0.09	0.29	330.72	2.56	0.0016	2.56
Cr	mg/l	599	0.05	0.12	246.41	0.75	0.005	0.75
Cu	mg/l	593	0.53	4.95	928.35	1.93	0.005	1.93
Fe	mg/l	588	3.27	14.14	433.10	328.79	0.004	328.79
Hg	mg/l	599	0.98	16.13	1647.27	13.34	0.00025	13.34
Li	mg/l	599	2.20	1.53	69.79	4.96	0.005	4.96
Mn	mg/l	599	6.73	8.86	131.60	48.95	0.005	48.95
Mo	mg/l	594	0.07	0.14	200.95	1.19	0.0025	1.19
Ni	mg/l	595	0.12	0.33	288.71	2.61	0.005	2.61
Pb	mg/l	603	0.13	0.48	361.37	3.56	0.00005	3.56
Se	mg/l	604	0.17	0.81	484.35	2.04	0.00012	2.04
Sr	mg/l	583	32.54	42.08	129.33	431.68	0.005	431.68
V	mg/l	604	0.07	0.10	149.83	0.74	0.0005	0.74
Zn	mg/l	589	1.36	2.20	161.56	14.52	0.005	14.51

Anexo 2.2 Parámetros estadísticos de Pampa Lina.

Pampa Lina								
		Datos	Promedio aritmético	Desv. Est.	Cv (%)	Máx.	Mín.	Rango
T*	°C	195	22.69	1.85	8.13	28.50	16.23	12.27
pH*		192	7.77	0.29	3.70	8.64	6.87	1.77
CE*	uS/cm	194	29024.32	10493.75	36.16	89000.00	11420.00	77580.00
TDS*	mg/l	176	18685.89	16195.85	86.67	98290.00	5743.00	92547.00
pH		170	7.75	0.15	1.96	8.10	7.29	0.81
CE	uS/cm	170	28841.18	9444.84	32.75	57900.00	16740.00	41160.00
TDS	mg/l	202	22536.33	7622.88	33.82	48400.00	12985.00	35415.00
Ca	mg/l	204	583.30	99.40	17.04	944.10	219.00	725.10
Mg	mg/l	203	131.47	42.32	32.19	269.49	26.67	242.82
Na	mg/l	205	6879.10	2544.30	36.99	12815.00	3501.50	9313.50
K	mg/l	197	53.25	28.15	52.87	310.77	0.18	310.59
Cl	mg/l	203	6256.29	1881.70	30.08	13326.60	2599.00	10727.60
HCO₃	mg/l	93	98.00	40.77	41.60	281.82	35.00	246.82
SO₄	mg/l	205	7133.47	3074.84	43.10	13369.00	2409.00	10960.00
F	mg/l	199	1.99	1.42	71.03	9.54	0.005	9.54
NO₃	mg/l	201	2301.58	1210.84	52.61	7081.43	998.74	6082.69
Ag	mg/l	206	0.02	0.03	170.39	0.25	0.001	0.25
Al	mg/l	196	17.36	58.87	339.16	624.40	0.005	624.40
As	mg/l	200	0.08	0.11	135.44	0.75	0.006	0.74
B	mg/l	198	55.86	20.11	36.00	108.40	7.40	101.00
Ba	mg/l	204	0.10	0.21	223.02	1.47	0.0005	1.47
Be	mg/l	205	0.02	0.09	576.67	1.25	0.0005	1.25
Cd	mg/l	206	0.01	0.04	299.49	0.25	0.0001	0.25
Co	mg/l	205	0.05	0.15	316.98	1.11	0.0001	1.11
Cr	mg/l	203	0.11	0.21	202.35	1.90	0.0025	1.90
Cu	mg/l	201	0.21	0.62	294.02	6.38	0.005	6.38
Fe	mg/l	193	10.79	20.76	192.39	143.80	0.005	143.80
Hg	mg/l	205	1.48	14.81	1003.4	181.10	0.000005	181.10
Li	mg/l	204	1.48	0.56	37.99	3.26	0.005	3.26
Mn	mg/l	194	0.87	2.34	268.14	18.14	0.002	18.14
Mo	mg/l	202	0.19	0.19	104.23	1.03	0.00090	1.03
Ni	mg/l	205	0.07	0.18	260.30	1.25	0.00431	1.25
Pb	mg/l	205	0.12	0.38	318.28	2.78	0.00025	2.78
Se	mg/l	203	0.03	0.07	232.99	0.40	0.00025	0.40
Sr	mg/l	197	11.48	5.03	43.77	36.79	0.17	36.62
V	mg/l	204	0.15	0.50	329.47	4.83	0.001	4.83
Zn	mg/l	195	0.38	1.42	376.86	12.38	0.0025	12.38

Anexo 2.3 Parámetros estadísticos de instalaciones de Spence.

Instalaciones de Spence								
		Datos	Promedio aritmético	Desv. Est.	Cv (%)	Máx.	Mín.	Rango
T*	°C	346	25.88	7.55	29.19	156.60	13.75	142.85
pH*		374	7.36	0.78	10.61	10.80	3.36	7.44
CE*	uS/cm	371	37537.59	35987.2	95.86	195000	6800	188200
TDS*	mg/l							
pH		367	7.32	0.91	12.44	10.98	3.20	7.78
CE	uS/cm	388	35172.21	28701.37	81.60	178000.0	3400.0	174600.0
TDS	mg/l	388	22333.76	16260.12	72.81	79974.15	2624.3	77349.84
Ca	mg/l	388	792.43	840.23	106.03	6218.00	26.76	6191.24
Mg	mg/l	388	316.60	525.14	165.87	3125.00	0.60	3124.40
Na	mg/l	388	6258.24	5089.57	81.33	28477.00	60.00	28417.00
K	mg/l	388	64.92	68.35	105.28	394.00	6.00	388.00
Cl	mg/l	388	7364.12	9543.94	129.60	51260.00	27.00	51233.00
HCO₃	mg/l	387	96.51	67.60	70.04	467.00	1.00	466.00
SO₄	mg/l	388	6382.08	5310.87	83.22	35521.00	557.00	34964.00
F	mg/l							
NO₃	mg/l	387	1049.59	2588.13	246.59	30600.00	2.85	30597.15
Ag	mg/l							
Al	mg/l							
As	mg/l	388	0.06	0.13	234.30	1.28	0.001	1.28
B	mg/l							
Ba	mg/l							
Be	mg/l							
Cd	mg/l							
Co	mg/l							
Cr	mg/l							
Cu	mg/l	388	9.18	46.89	510.65	328.00	0.0005	328.00
Fe	mg/l	388	2.99	6.82	228.47	60.18	0.0045	60.18
Hg	mg/l							
Li	mg/l							
Mn	mg/l							
Mo	mg/l							
Ni	mg/l							
Pb	mg/l							
Se	mg/l							
Sr	mg/l							
V	mg/l							
Zn	mg/l							

Anexo 2.4 Parámetros estadísticos de Spence sector relaves.

Spence sector relaves								
		Datos	Promedio aritmético	Desv. Est.	Cv (%)	Máx.	Mín.	Rango
T*	°C	146	24.88	2.50	10.06	31.00	6.25	24.75
pH*		127	7.03	0.87	12.43	12.70	5.39	7.31
CE*	uS/cm	141	112063.97	54828.83	48.93	243600.0	17010.0	226590.0
TDS*	mg/l							
pH		131	7.13	0.58	8.09	9.30	4.18	5.12
CE	uS/cm	155	108722.33	62197.29	57.21	255000.0	907.00	254093.0
TDS	mg/l	102	124910.39	84807.89	67.89	374400.0	31610	342790.0
Ca	mg/l	168	8252.37	9748.16	118.13	37909.94	168.00	37741.94
Mg	mg/l	168	5008.40	10843.94	216.52	51000.00	0.19	50999.81
Na	mg/l	168	27656.12	20803.31	75.22	105211.5	2290.0	102921.5
K	mg/l	168	253.43	213.68	84.32	1425.58	33.00	1392.58
Cl	mg/l	168	61249.59	42063.71	68.68	163633.0	5200.0	158433.0
HCO₃	mg/l	134	318.35	532.52	167.27	3425.76	1.00	3424.76
SO₄	mg/l	168	15112.11	32514.78	215.16	131291.0	180.89	131110.1
F	mg/l	123	0.81	1.78	218.76	13.39	0.005	13.39
NO₃	mg/l	151	5866.62	6261.18	106.73	28806.94	2.45	28804.49
Ag	mg/l							
Al	mg/l	123	7.78	28.08	360.77	222.46	0.002	222.46
As	mg/l	151	0.07	0.12	181.89	1.12	0.00003	1.12
B	mg/l	32	68.64	59.20	86.25	200.23	5.89	194.34
Ba	mg/l							
Be	mg/l							
Cd	mg/l							
Co	mg/l	52	0.06	0.10	166.49	0.64	0.02	0.62
Cr	mg/l							
Cu	mg/l	156	0.21	0.26	122.21	2.22	0.0002	2.22
Fe	mg/l	155	7.47	25.07	335.81	208.19	0.006	208.19
Hg	mg/l							
Li	mg/l	32	4.09	2.59	63.26	9.30	0.28	9.02
Mn	mg/l	32	2.40	4.30	178.94	20.52	0.0001	20.52
Mo	mg/l	129	0.33	0.33	98.60	1.52	0.0002	1.52
Ni	mg/l							
Pb	mg/l							
Se	mg/l							
Sr	mg/l	32	170.50	163.74	96.04	491.93	0.56	491.37
V	mg/l							
Zn	mg/l	123	0.80	1.90	238.85	14.77	0.0005	14.77

Anexo 2.5 Parámetros estadísticos de minera Centinela.

Centinela								
		Datos	Promedio aritmético	Desv. Est.	Cv (%)	Máx.	Mín.	Rango
T*	°C	178	22.86	1.95	8.53	28.40	17.30	11.10
pH*		145	7.76	0.33	4.31	8.34	5.54	2.80
CE*	uS/cm	143	14083.20	5757.05	40.88	48400.00	13.39	48386.61
TDS*	mg/l							
pH		149	7.53	0.36	4.76	8.30	6.50	1.80
CE	uS/cm	151	16821.98	10177.94	60.50	49200.00	5300.00	43900.00
TDS	mg/l	234	12790.33	7352.91	57.49	45737.00	5661.00	40076.00
Ca	mg/l	294	645.97	401.61	62.17	2708.00	242.00	2466.00
Mg	mg/l	223	229.90	221.64	96.41	2550.00	46.44	2503.56
Na	mg/l	233	3387.04	2367.92	69.91	15300.00	354.00	14946.00
K	mg/l	214	32.71	39.08	119.49	241.00	5.40	235.60
Cl	mg/l	296	2927.71	2746.97	93.83	16794.80	529.80	16265.00
HCO ₃	mg/l	116	70.26	13.12	18.68	162.10	36.00	126.10
SO ₄	mg/l	296	4547.27	1428.92	31.42	10364.00	905.00	9459.00
F	mg/l	115	0.84	0.60	71.43	2.53	0.005	2.53
NO ₃	mg/l	113	972.70	1195.29	122.88	12829.00	144.00	12685.00
Ag	mg/l	114	0.01	0.01	127.70	0.03	0.000025	0.02
Al	mg/l	168	3.23	18.17	561.97	174.20	0.0025	174.20
As	mg/l	169	0.10	0.12	122.75	0.59	0.00025	0.59
B	mg/l	112	31.03	19.42	62.58	97.68	7.34	90.34
Ba	mg/l	115	0.01	0.01	66.60	0.03	0.005	0.026
Be	mg/l	110	0.00	0.01	153.43	0.03	0.0015	0.024
Cd	mg/l	115	0.01	0.01	120.14	0.04	0.0001	0.041
Co	mg/l	110	0.01	0.01	121.63	0.03	0.00025	0.025
Cr	mg/l	115	0.03	0.02	77.84	0.13	0.0015	0.130
Cu	mg/l	169	0.04	0.15	403.00	1.81	0.00025	1.8
Fe	mg/l	164	2.00	10.34	517.51	96.10	0.005	96.10
Hg	mg/l	113	0.00	0.00	275.51	0.00	0.000025	0.003
Li	mg/l	112	1.82	0.94	51.42	5.33	0.75	4.58
Mn	mg/l	164	0.11	0.40	349.06	3.62	0.0001	3.62
Mo	mg/l	112	0.14	0.09	66.82	0.33	0.00784	0.32
Ni	mg/l	115	0.02	0.03	119.40	0.19	0.0015	0.19
Pb	mg/l	166	0.02	0.01	69.30	0.10	0.0001	0.10
Se	mg/l	115	0.27	0.36	130.80	1.46	0.0025	1.46
Sr	mg/l	112	8.71	2.66	30.55	18.50	5.04	13.46
V	mg/l	110	0.02	0.04	186.82	0.31	0.0025	0.31
Zn	mg/l	115	0.11	0.12	113.34	0.75	0.0085	0.74

Anexo 2.6 Promedio aritmético de TDS y elementos mayores de minera Sierra Gorda.

Sierra Gorda													
	Registro		TDS	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	B	Sr
Punto	Desde	Hasta	mg/l										
CB-10	nov-2012	jul-19	48231	3441	301	10585	51	20354	39	1800	6127	22	47
CB-11R	jul-2017	ago-17	21549	2505	236	4178	133	10914	41	1502	108	8	25
CB-4	nov-12	jul-19	58071	725	261	19664	240	21177	266	13118	7590	103	9
CB-5	feb-11	jul-19	68063	730	1681	20819	338	25949	118	14929	10148	92	0
CB-6	ago-13	jul-19	56430	748	4357	11992	93	19784	173	15340	6071	29	21
CB-7R	ago-17	jul-19	67575	6407	3600	8971	189	37223	78	1575	27	11	54
CB-8R	jul-17	jul-19	63154	4824	3364	10565	241	31448	88	1944	5550	12	32
CB-9	feb-11	jul-19	132212	467	19469	17580	212	30621	135	73587	8780	27	2
CON-10	abr-16	jul-19	74948	12316	1006	5850	59	35221	44	939	46	19	122
CON-15	dic-15	jul-19	63765	4707	3166	8549	76	28227	109	1911	7349	9	40
CON-16	abr-16	jul-19	70284	10240	2248	7061	43	32435	53	1158	1567	27	112
QS-402	jul-08	ene-19	50466	2473	1804	11953	92	27684	169	2792	81	8	35
QS-431	ago-16	jul-19	62324	661	344	19670	260	22048	15	13633	7709	107	5
QS-493	jul-08	jul-19	72346	701	413	24773	322	27412	22	15886	9716	136	10

Anexo 2.7 Promedio aritmético de TDS y elementos mayores de Pampa Lina.

Pampa Lina													
	Registro		TDS	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	B	Sr
Punto	Desde	Hasta	mg/l										
CB-12R	jul-17	jul-19	14790	524	66	4128	36	3254	51	4993	1138	31	7
CB-2	feb-13	jul-19	16434	632	142	4621	46	5205	42	4286	1599	44	13
CB-3	may-13	jul-19	23616	638	135	6822	70	6922	72	6002	2712	49	11
QS-237	jul-08	jul-19	28917	526	144	9409	53	7454	95	10622	2894	76	12

Anexo 2.8 Promedio aritmético de TDS y elementos mayores de instalaciones de Spence.

Spence instalaciones													
	Registro		TDS	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	B	Sr
Punto	Desde	Hasta	mg/l										
GTW-17	dic-12	dic-19	21918	540	178	6965	79	6023	147	6957	1027		
SPM1	dic-12	dic-19	33833	1395	751	9871	78	16381	90	4089	1175		
SPM10	dic-12	dic-19	25351	746	257	7234	83	9168	85	5614	2162		
SPM11	dic-12	dic-19	30941	460	1405	5213	83	4252	74	18676	664		
SPM12	jun-18	dic-19	18571	1016	2	5768	81	7652	3	3480	570		
SPM13	dic-12	dic-19	29093	657	145	9251	74	10058	109	7188	1607		
SPM14	dic-12	dic-19	16487	535	166	4609	38	4052	79	5826	1166		
SPM15	dic-12	dic-19	9495	498	94	2595	24	1749	69	3993	471		
SPM16	dic-12	dic-19	9377	516	99	2560	26	1796	72	3850	457		
SPM17	dic-12	dic-19	9517	523	99	2628	24	1721	69	3943	505		
SPM18	dic-12	dic-19	10370	612	112	3091	27	1675	73	4304	471		
SPM2	dic-12	dic-19	18650	762	209	5574	45	4239	79	6191	1546		
SPM3	dic-12	nov-16	35232	700	213	11812	182	14290	142	6529	1452		
SPM6	dic-12	nov-16	44962	2512	543	11574	126	25342	88	3677	1098		
SPM8	dic-12	nov-16	23572	539	199	6991	63	5063	219	9326	1170		

Anexo 2.9 Promedio aritmético de TDS y elementos mayores de minera Centinela.

Centinela													
	Registro		TDS	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	B	Sr
Punto	Desde	Hasta	mg/l										
DP-1	jul-11	jun-12	9976	573	273	2094	28	1982	38	4224		26	9
DP-3	jul-11	jun-12	6793	349	241	1382	25	926	260	3569		14	7
DP-5	ago-11	jun-12	10399	493	227	2336	26	1645	64	5165		26	6
DP-7	sept-11	jun-12	11879	458	53	3354	10	1792	71	5802		34	8
DP-8	sept-11	jun-12	8645	485	205	1836	15	1170	46	4641		22	6
DP2	ago-11	jun-12	18225	966	308	4015	39	5982	166	3388		38	13
TP 2	ago-11	jun-12	7875	464	270	1557	27	1085	77	4147		17	8
TP 1	ago-11	jun-15	24472	622	483	6673	104	6802	73	6082	7230	47	10
PM-1	abr-15	oct-19	12180	548	165	3310	22	2359	73	4828	912	32	9
PM-2	abr-15	oct-19	10804	559	155	2958	24	2093	71	4250	738	28	8
PM-3	abr-15	oct-19	11931	555	184	3255	22	2329	67	4710	950	31	9

Anexo 2.10 Promedio aritmético de TDS y elementos mayores de minera Spence sector relaves.

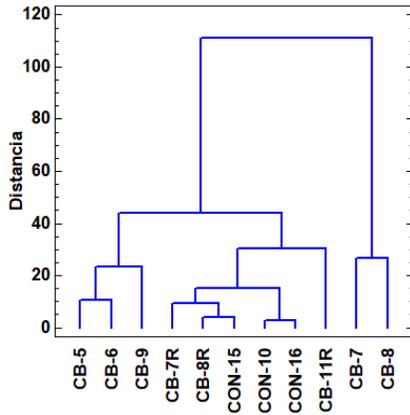
Spence sector relaves													
	Registro		TDS	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	B	Sr
Punto	Desde	Hasta	mg/l										
GD13	feb-16	abr-16	111546	1169	4178	26381	385	39031	363	13670	28373		
GD14	feb-16	abr-16	90496	1896	606	29473	245	51524	155	5533	3723		
GD15	abr-16		289192	331	26192	45812	224	83656	253	115123	9938		
GD8	feb-16	abr-16	73746	5484	610	14035	113	37742	75	2100	2133		
GD9	feb-16	abr-16	35059	1720	151	10107	98	17756	135	2858	1771		
SPD2090	ene-12		18241	1250	182	5507	117	9587	526	1138	656		
SPD2120	ene-12	ene-15	177074	11875	1204	54723	248	100901	83	951	10722		
SPD2168	ene-12	ene-15	89008	10255	1038	21412	205	52262	132	857	4468		
SPD2200	ene-12		12269	307	8	2290	47	5203	122	4389	24		
SPD2215	ene-12	ene-14	91263	8355	154	25093	149	56036	111	1435	63		
SPD2235	ene-14	ene-15	106562	17054	804	20492	58	64628	47	877	5299		
SPD1996	ene-15	mar-15	124450	12940	2837	33636	617	85630	211	1793	3903	25	235
SP1027	feb-15	abr-16	83021	1152	627	26902	336	45056	191	8705	7800	166	31
SP1592	feb-15	abr-16	83021	1152	627	26902	336	45056	191	8705	7800	166	31
SP1617	feb-15	mar-15	128407	15408	803	21831	63	62860	115	980	5496	25	209
SP1632	feb-15	abr-16	133436	25777	388	14280	132	75887	79	787	131	21	401
SP1653	feb-15	mar-15	173510	36623	1684	29291	326	107315	50	719	8411	12	372
SP1664	jul-15	abr-16	252951	517	32081	53321	462	104442	446	110607	12808	81	1
SP1741	feb-15	abr-16	141544	9778	1344	35109	308	78970	84	1589	403	37	199
SP1957	feb-15	abr-16	192697	413	32012	15950	247	45171	1450	90549	4255	6	5
SP1983	un-14	abr-16	36714	1279	396	10100	63	17959	417	1813	10	16	21
SP1984	feb-15	mar-15	265470	209	41775	48224	1203	104257	3178	119560	14068	23	6
SP1997	feb-15	mar-15	240650	8787	1737	98230	870	149757	55	1337	18645	198	178
SP1998	mar-12	abr-16	144318	6800	2010	33624	306	65056	88	1870	5711	132	155
SP2000	feb-15	abr-16	44714	1978	471	17883	219	28877	175	6787	3974	125	18
SP2001	feb-15	mar-15	98330	27022	156	12708	55	78687	949	996	119	20	394
SP2843	jun-15	abr-2016	112761	7209	1930	20505	172	55222	100	1863	2631		
SP2849	feb-15	abr-2016	34611	1617	904	6895	114	14520	225	3293	1262	6	15
SP2851	feb-15	mar-15	66489	851	1490	17459	340	21729	149	16070	7749	60	6
SP2856	feb-15		47714	1321	150	14035	237	19332	220	9131	3220	20	12

*SP hace referencia a la etiqueta SPRC

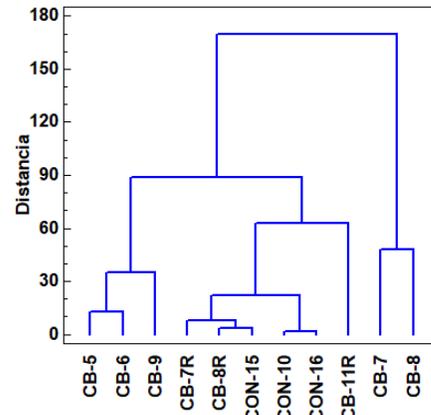
ANEXO 3. ANÁLISIS DE DENDOGRAMAS

Anexo 3.1 Dendrogramas de pozos cercanos a depósito de relaves y sector de piscinas año 2017.

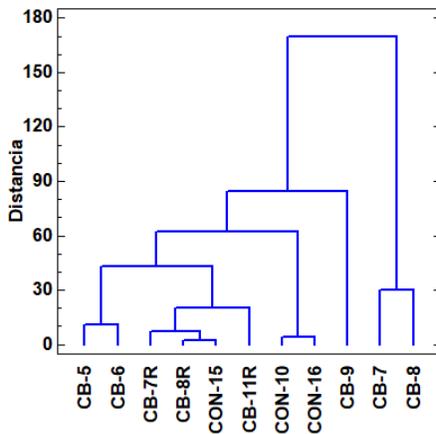
Dendograma 2017-2
Método del Vecino Más Lejano, Euclídeana Cuadrada



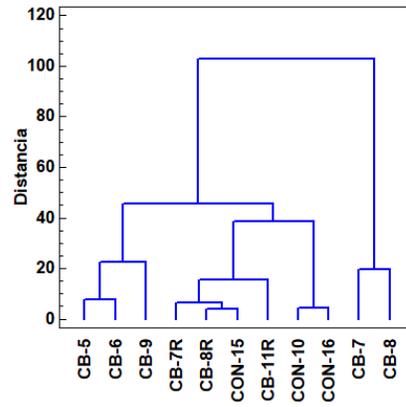
Dendograma 2017-2
Método de Ward, Euclídeana Cuadrada



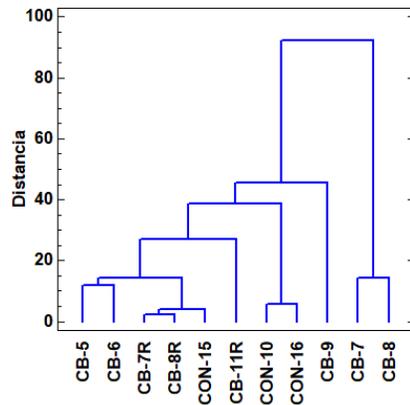
Dendograma 2017-3
Método de Ward, Euclídeana Cuadrada



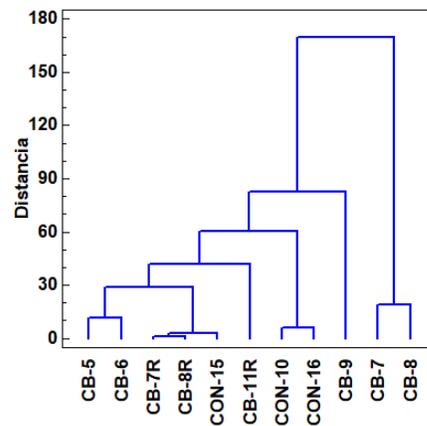
Dendograma 2017-3
Método del Vecino Más Lejano, Euclídeana Cuadrada



Dendograma 2017-4
Método del Vecino Más Lejano, Euclídeana Cuadrada

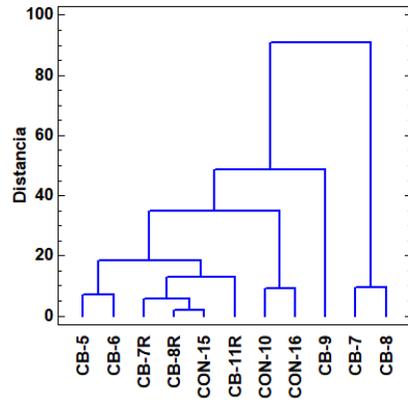


Dendograma 2017-4
Método de Ward, Euclídeana Cuadrada

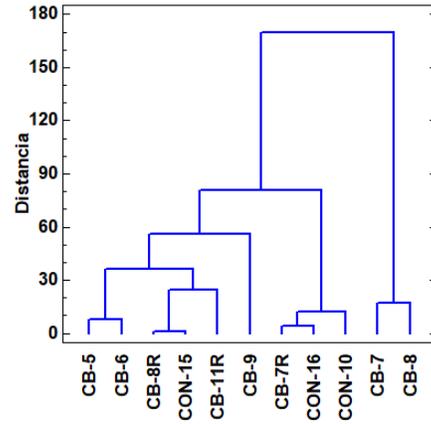


Anexo 3.2 Dendrogramas de pozos cercanos a depósito de relaves y sector de piscinas año 2018.

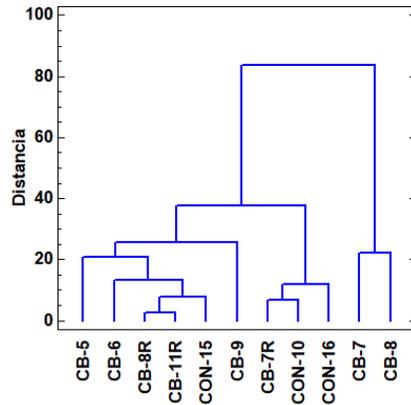
Dendrograma 2018-1
Método del Vecino Más Lejano, Euclídeana Cuadrada



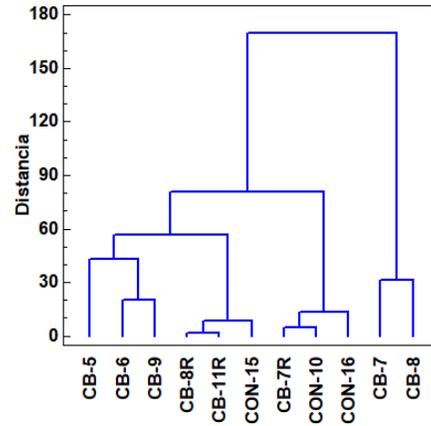
Dendrograma 2018-1
Método de Ward, Euclídeana Cuadrada



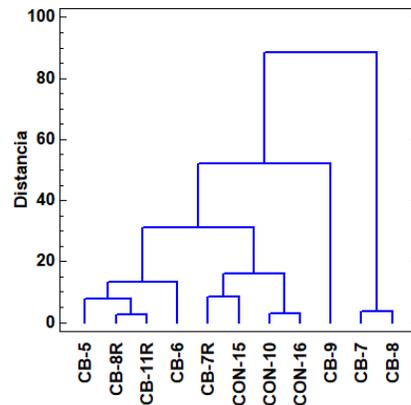
Dendrograma 2018-2
Método del Vecino Más Lejano, Euclídeana Cuadrada



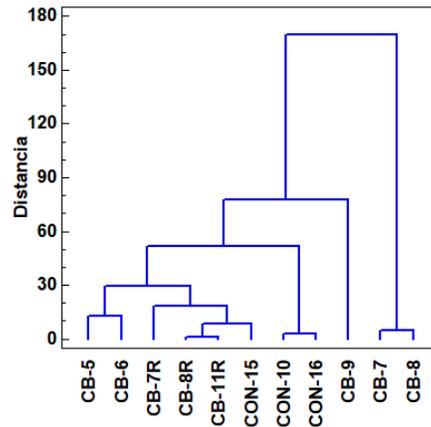
Dendrograma 2018-2
Método de Ward, Euclídeana Cuadrada



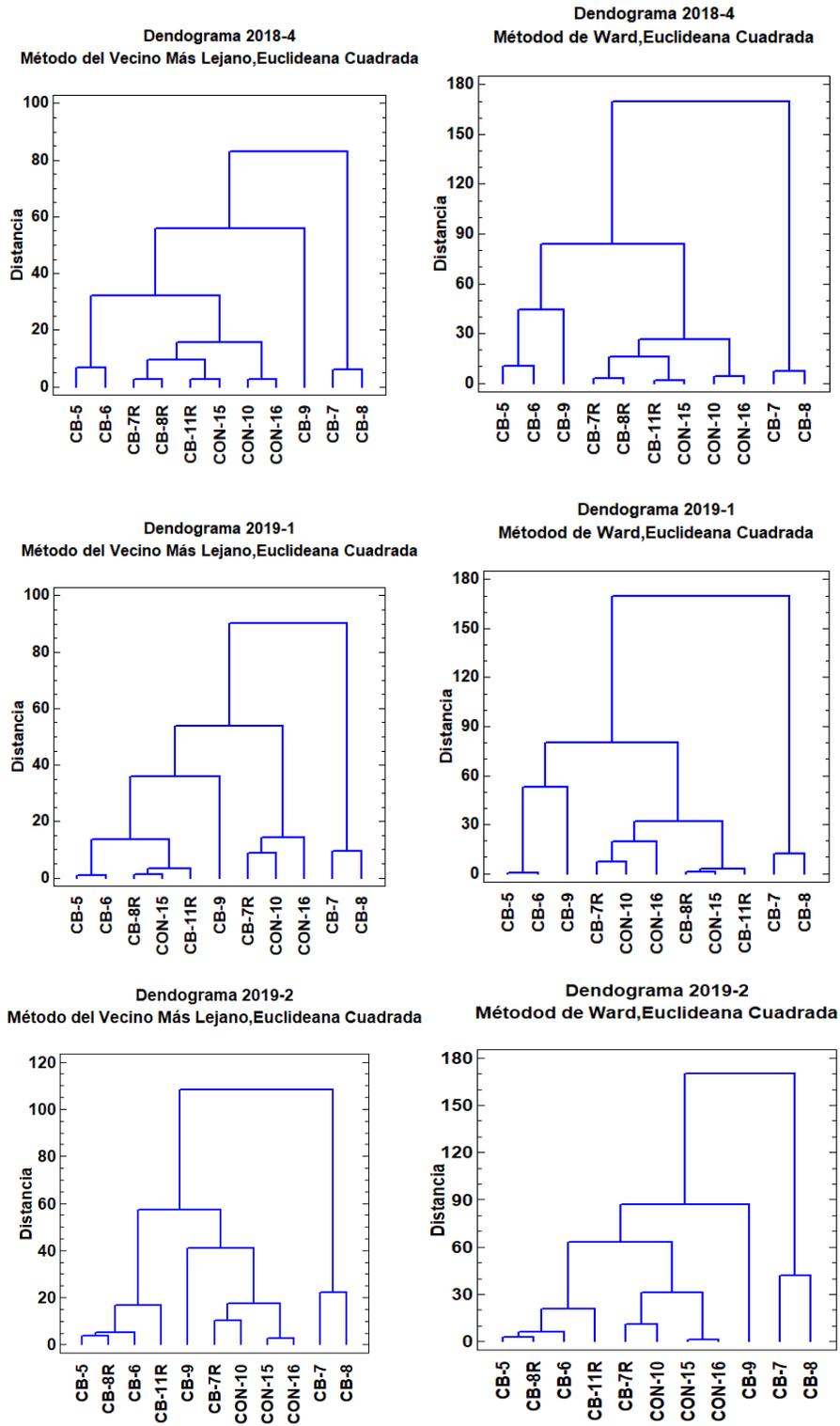
Dendrograma 2018-3
Método del Vecino Más Lejano, Euclídeana Cuadrada



Dendrograma 2018-3
Método de Ward, Euclídeana Cuadrada

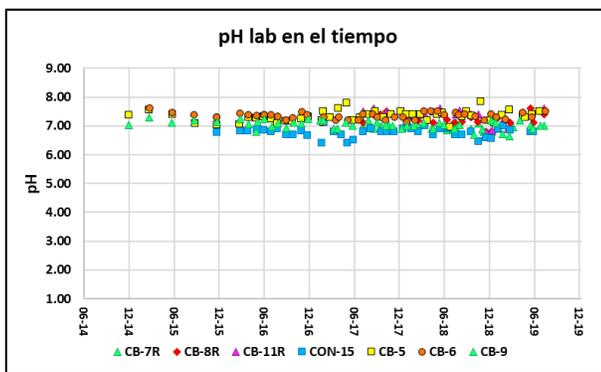
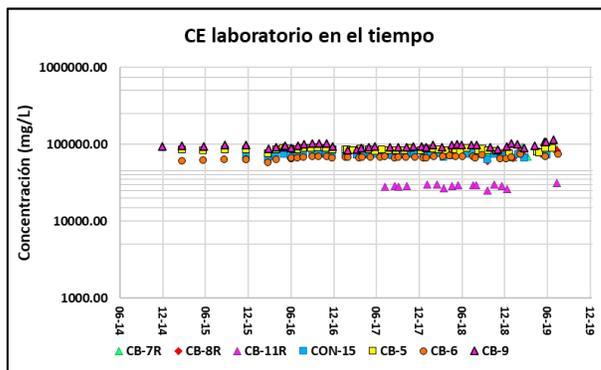
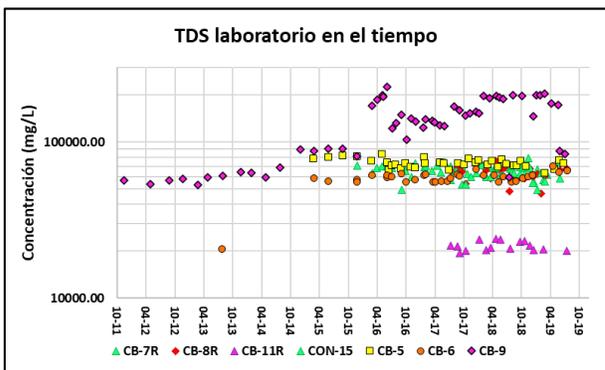


Anexo 3.3 Dendrogramas de pozos cercanos a depósito de relaves y sector de piscinas año 2018 y 2019.

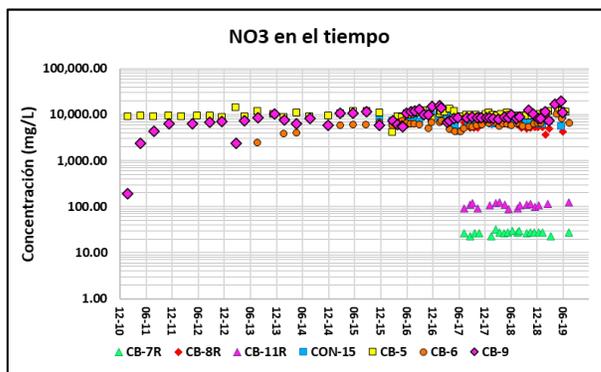
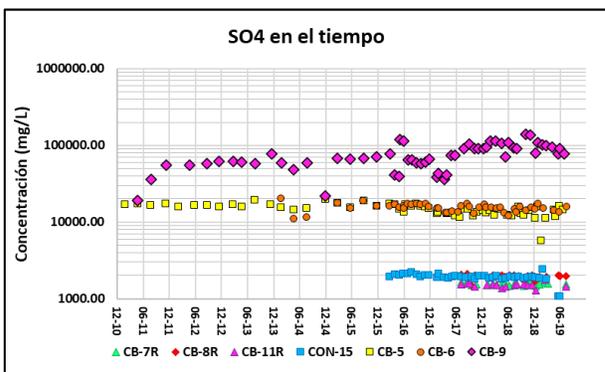
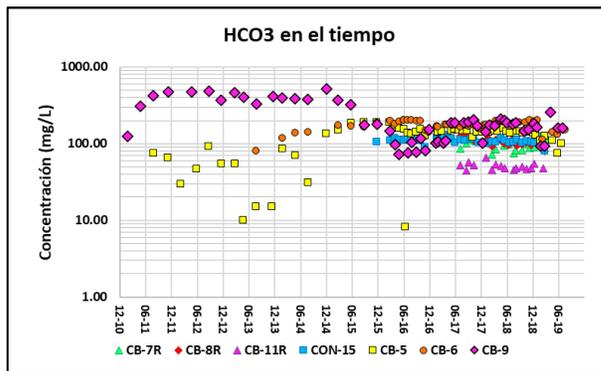
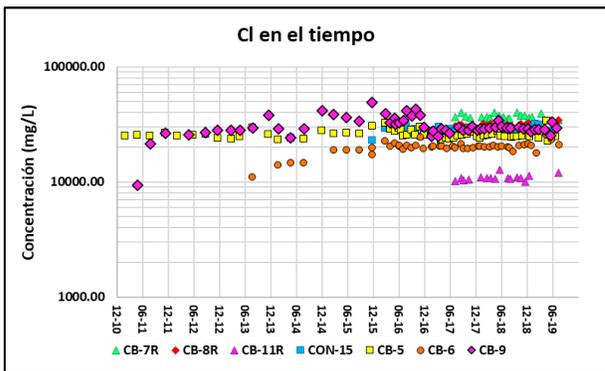


ANEXO 4. COMPARACIÓN DE VARIABLES QUÍMICAS ENTRE SECTORES ESTE Y OESTE DEL DEPÓSITO DE RELAVES

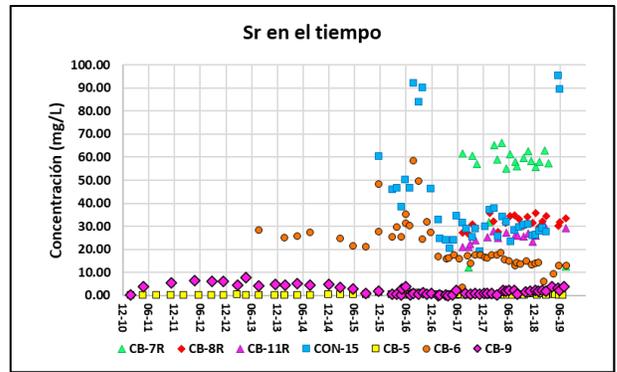
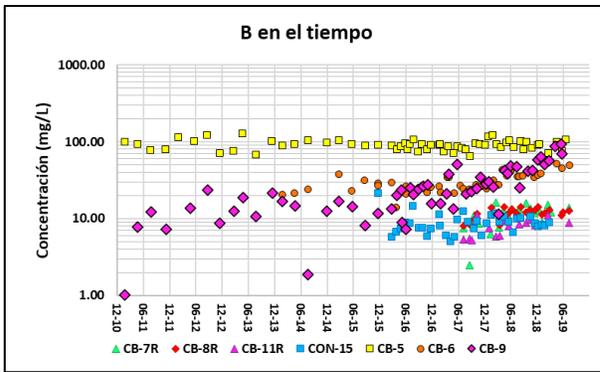
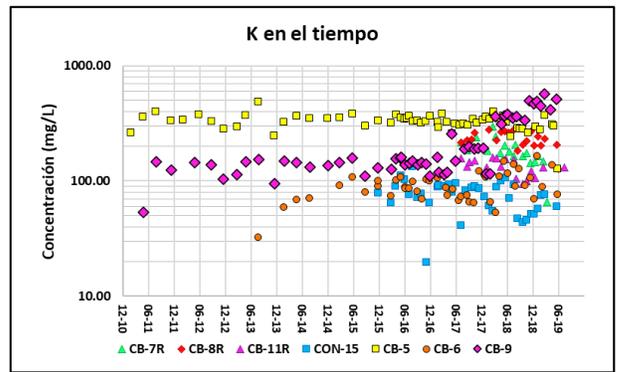
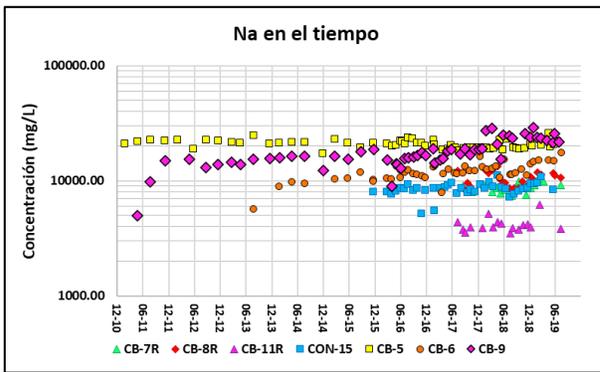
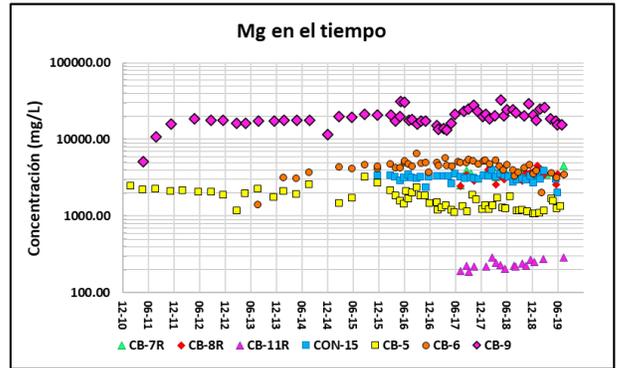
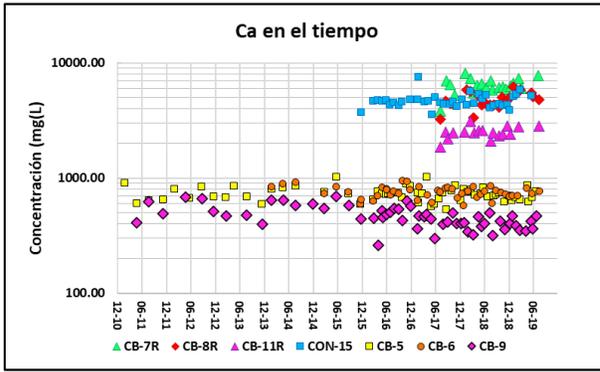
Anexo 4.1 Gráficos comparativos de parámetros fisicoquímicos entre sectores este y oeste del depósito de relaves.



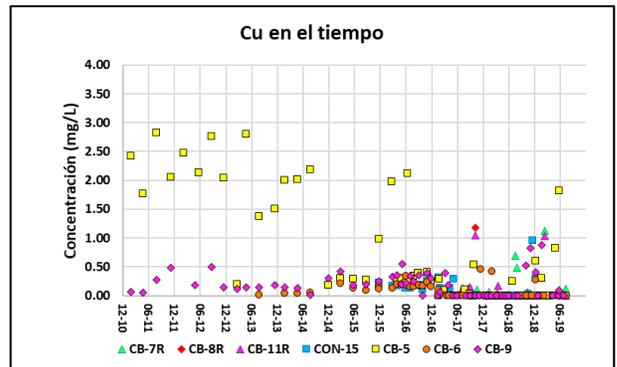
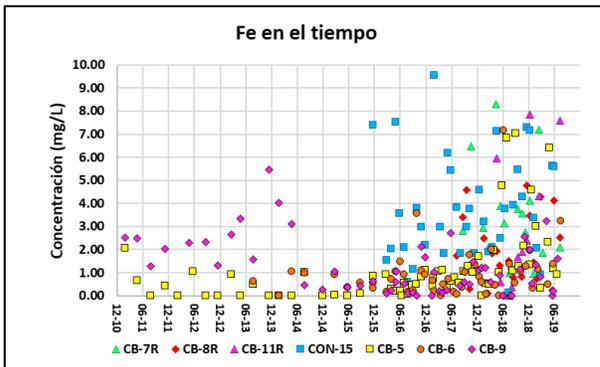
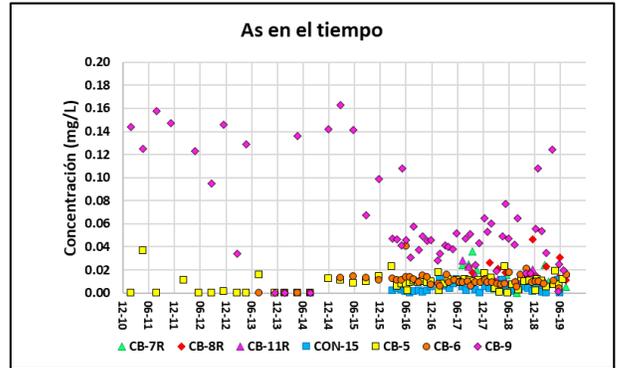
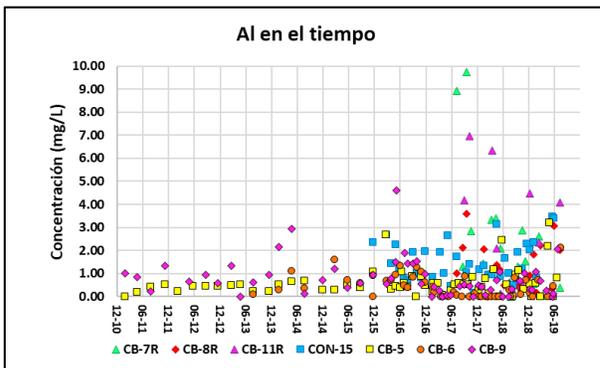
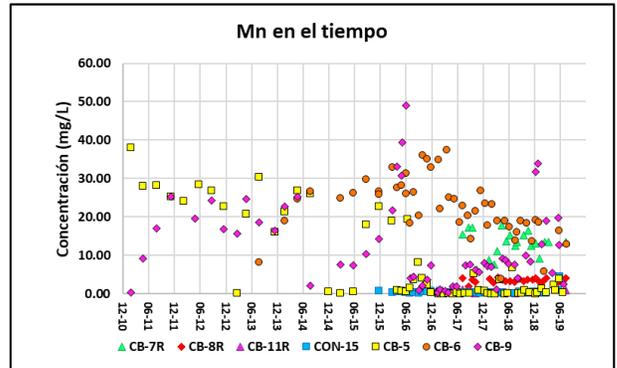
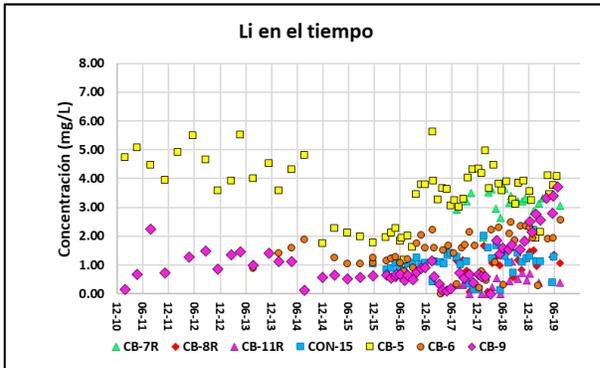
Anexo 4.2 Gráficos comparativos de aniones mayores entre sectores este y oeste del depósito de relaves.



Anexo 4.3 Gráficos comparativos de cationes mayores entre sectores este y oeste del depósito de relaves.

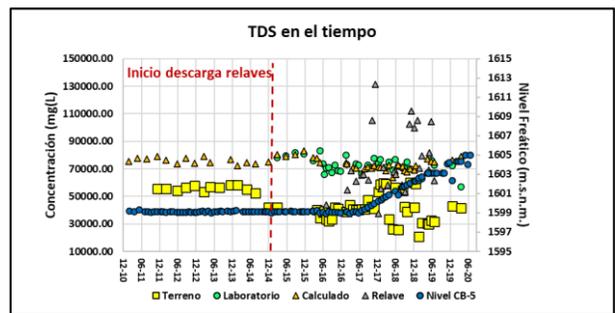
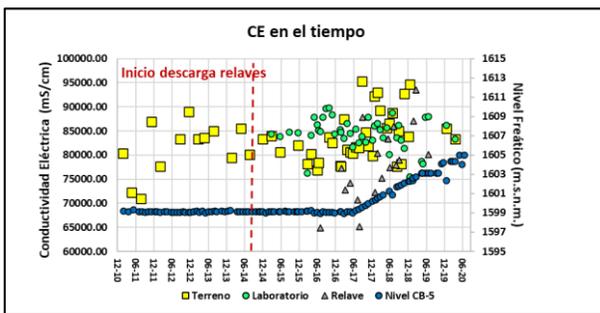
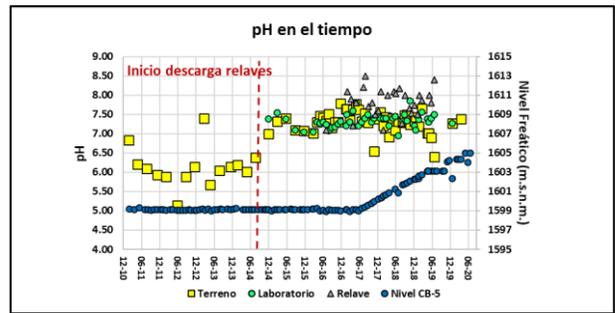
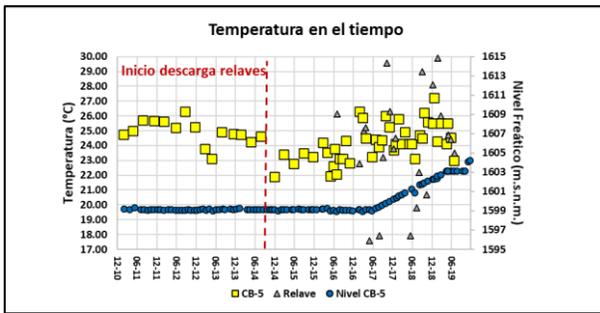


Anexo 4.4 Gráficos comparativos de elementos menores entre sectores este y oeste del depósito de relaves.

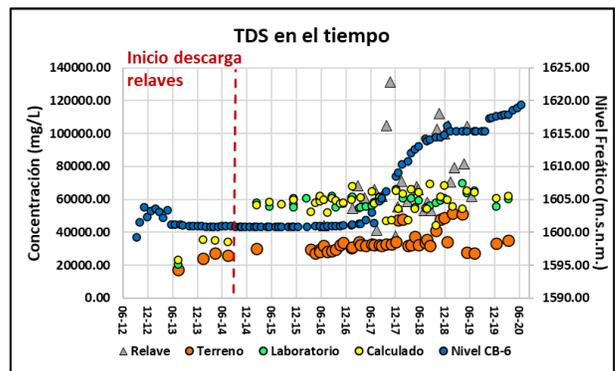
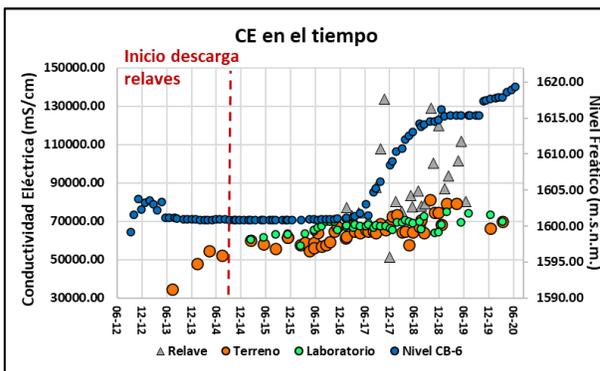
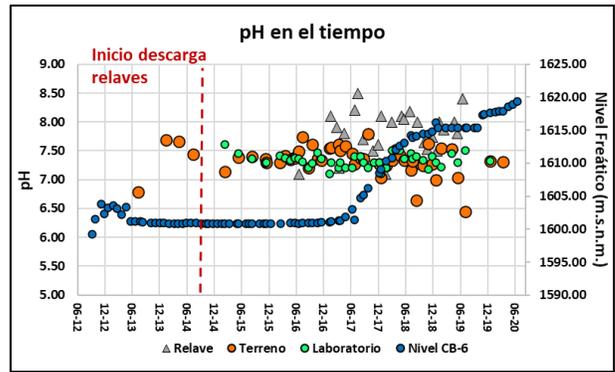
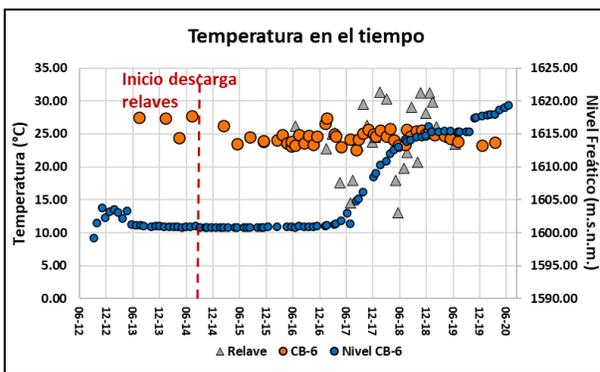


ANEXO 5. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN EL TIEMPO

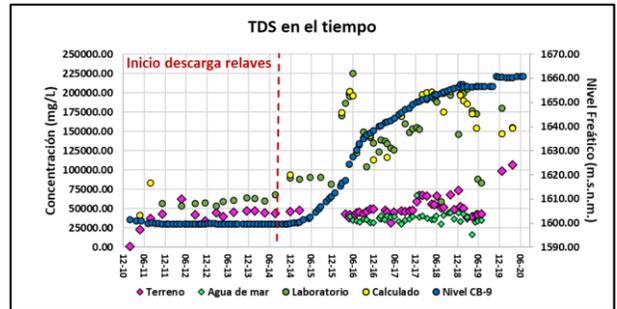
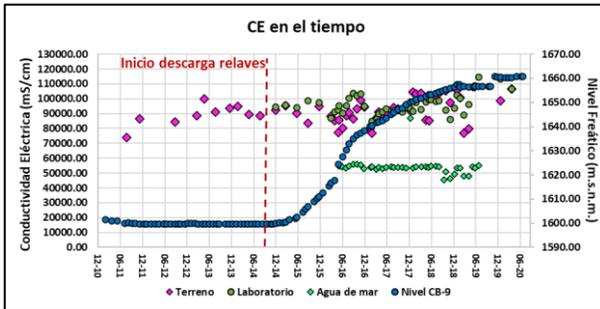
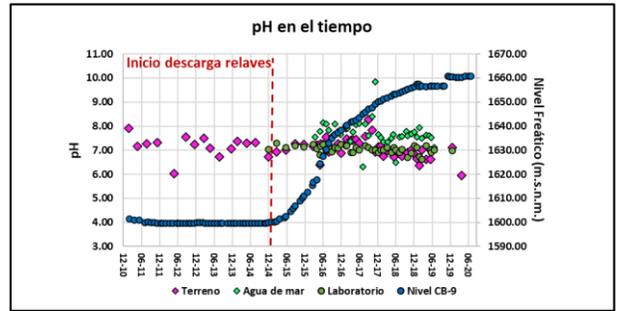
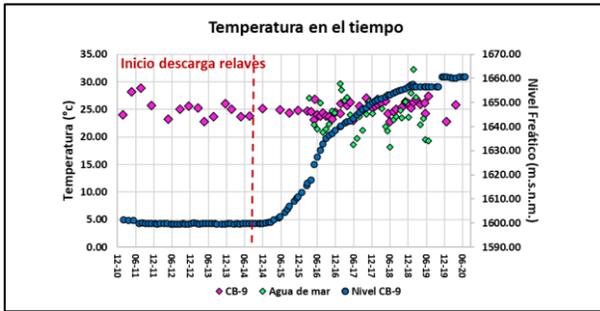
Anexo 5.1 Parámetros fisicoquímicos en el tiempo de pozo CB-5.



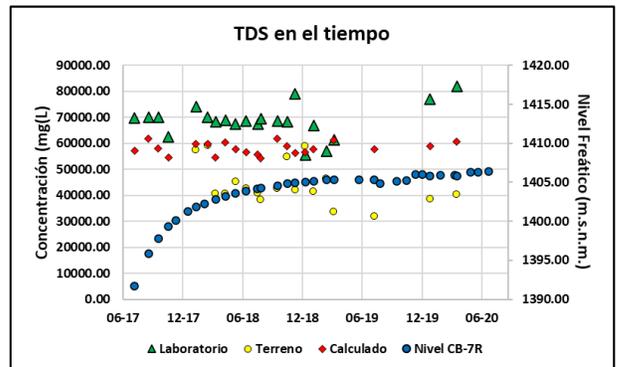
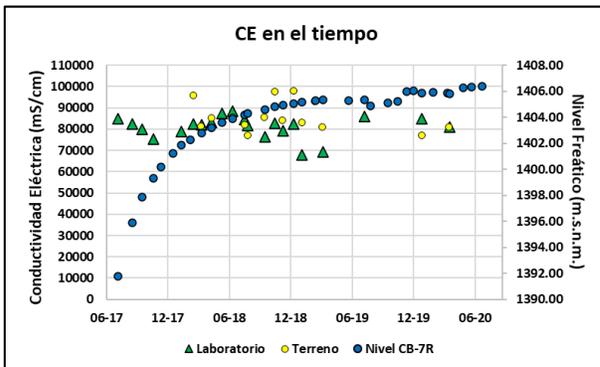
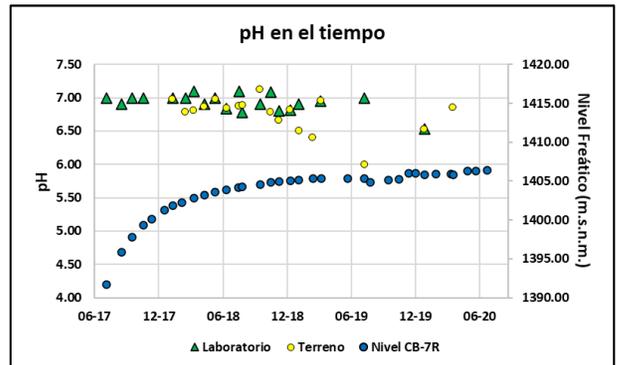
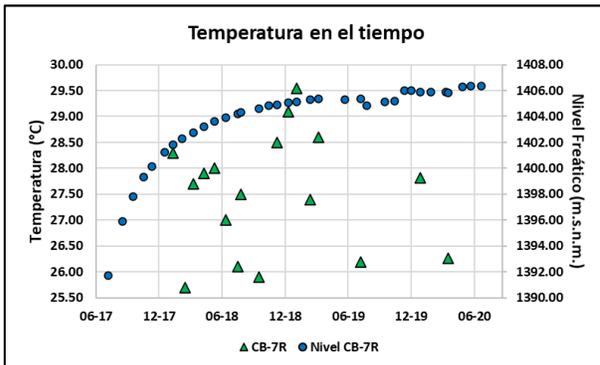
Anexo 5.2 Parámetros fisicoquímicos en el tiempo de pozo CB-6.



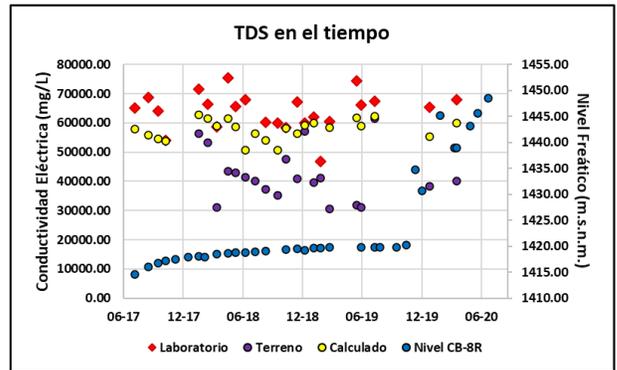
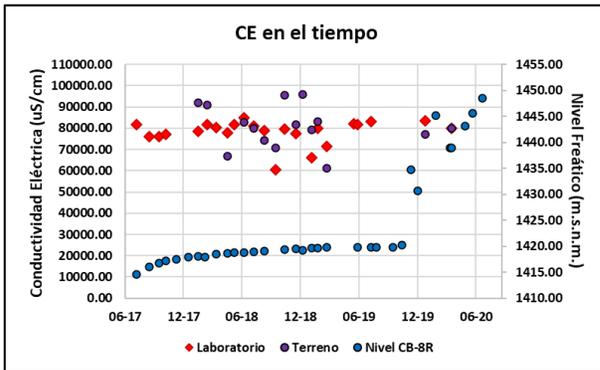
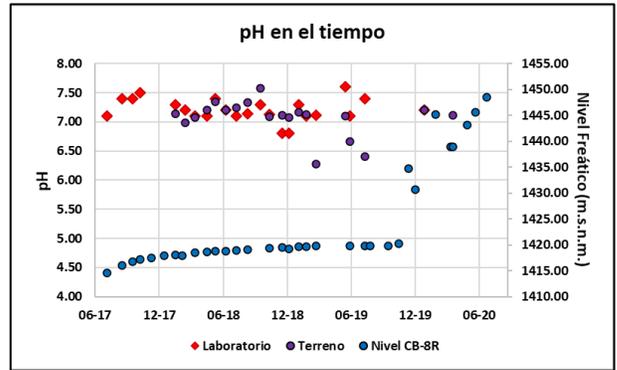
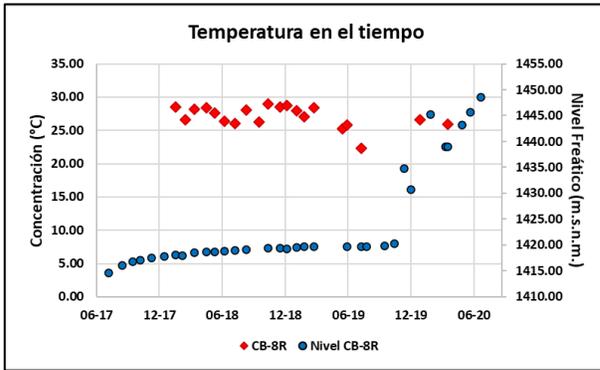
Anexo 5.3 Parámetros fisicoquímicos en el tiempo de pozo CB-9.



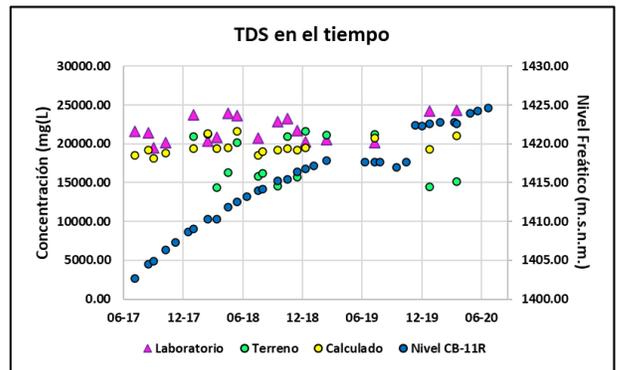
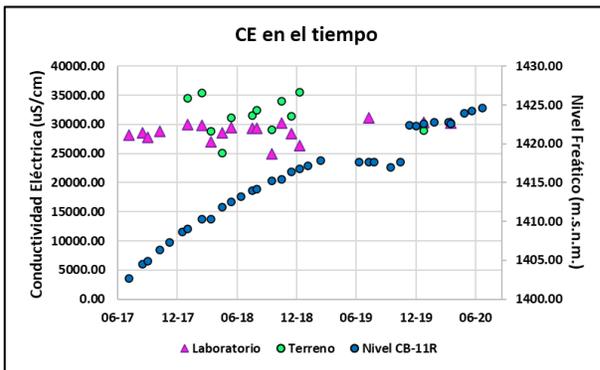
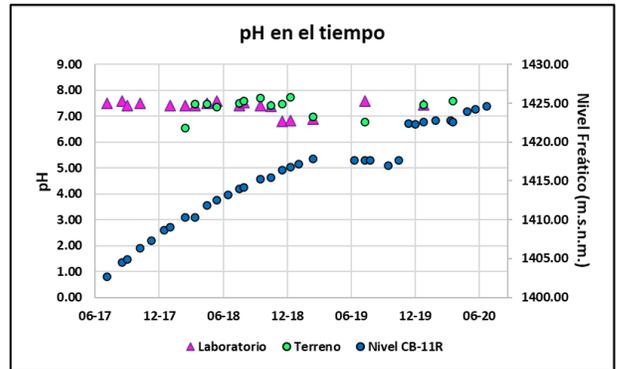
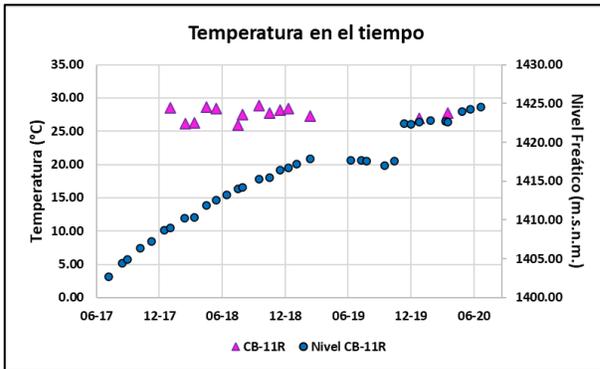
Anexo 5.4 Parámetros fisicoquímicos en el tiempo de pozo CB-7R.



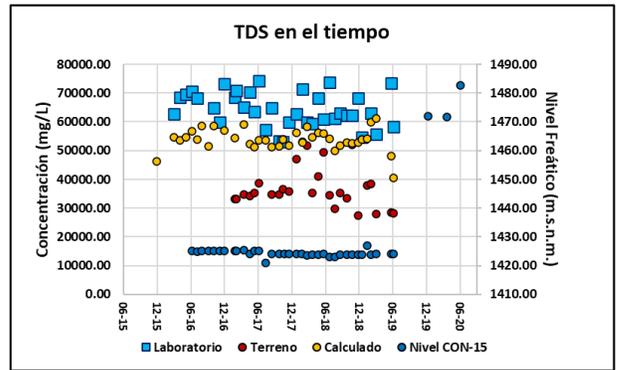
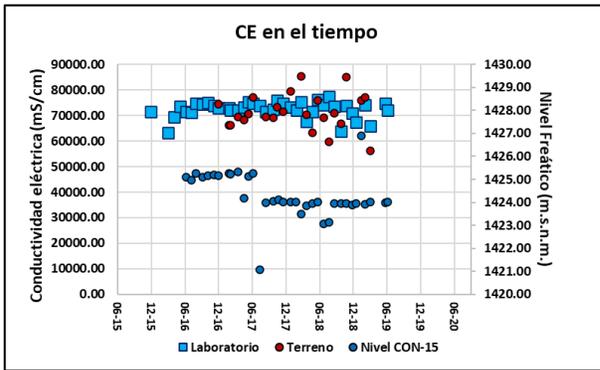
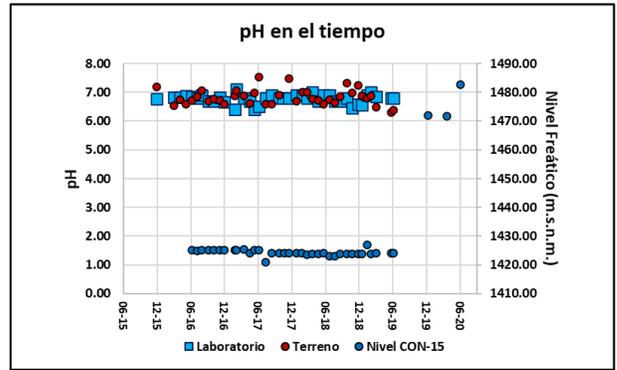
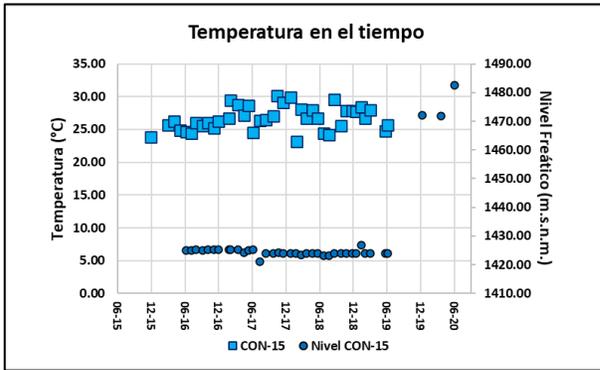
Anexo 5.5 Parámetros fisicoquímicos en el tiempo de pozo CB-8R.



Anexo 5.6 Parámetros fisicoquímicos en el tiempo de pozo CB-11R.

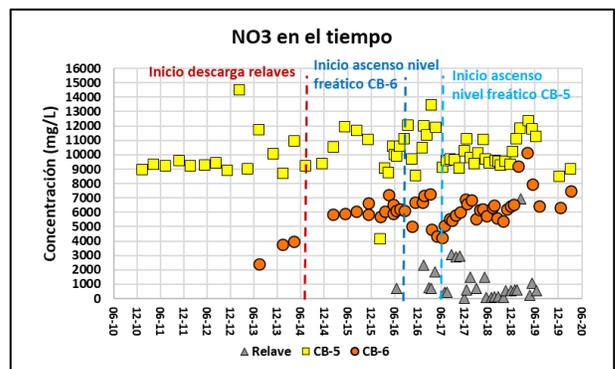
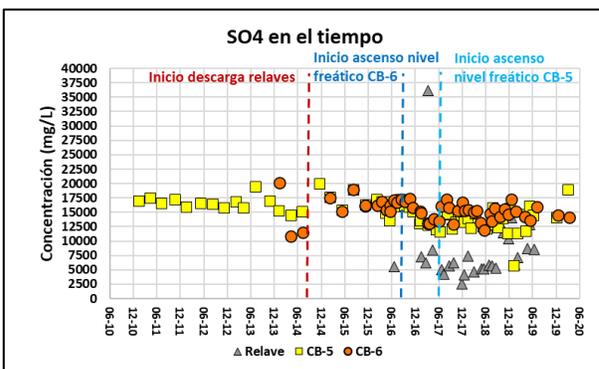
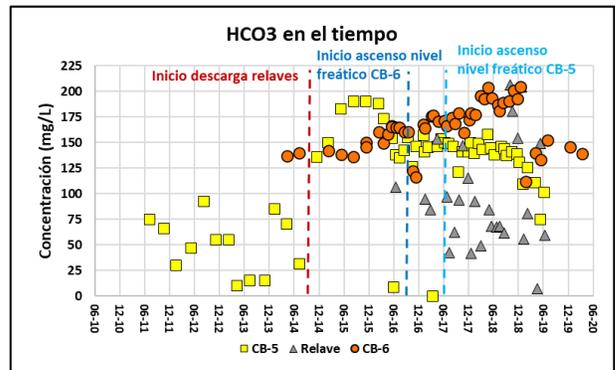
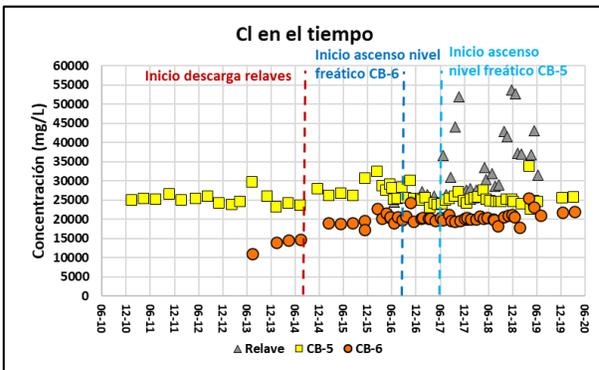
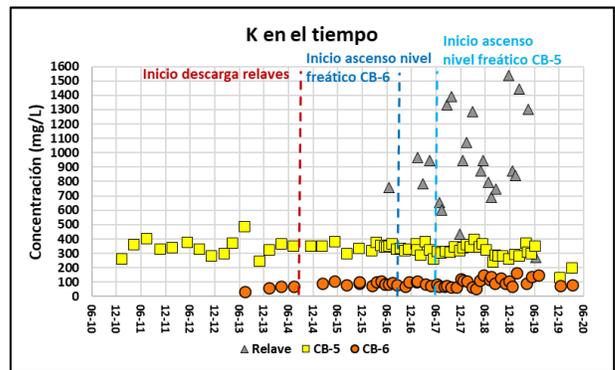
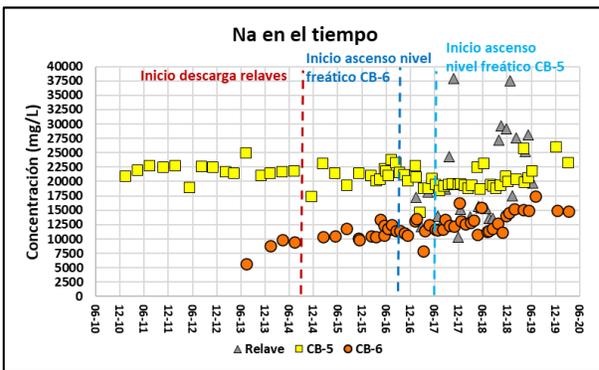
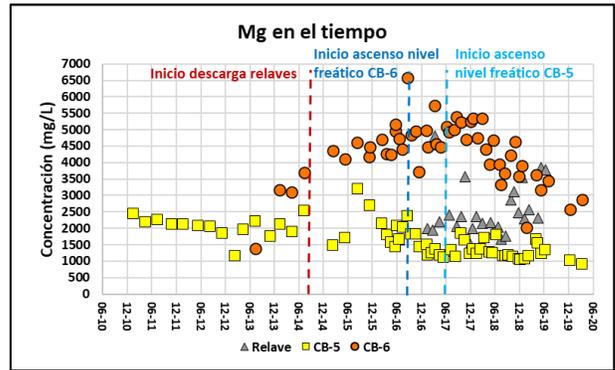
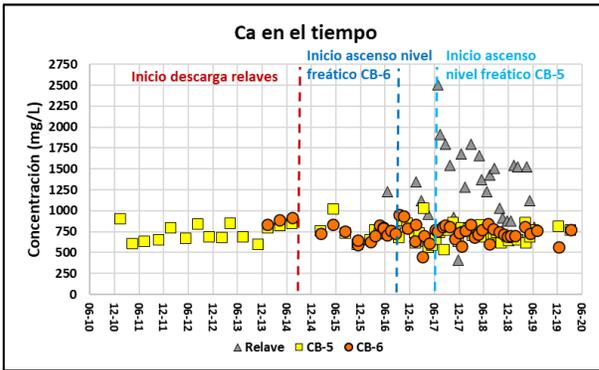


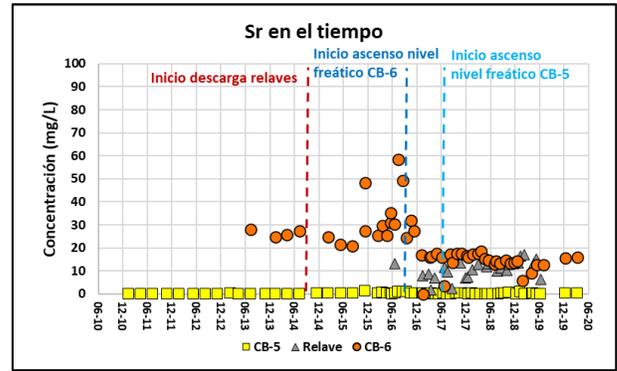
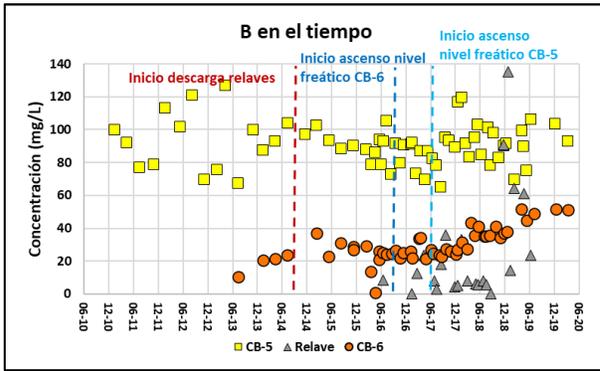
Anexo 5.7 Parámetros fisicoquímicos en el tiempo de CON-15.



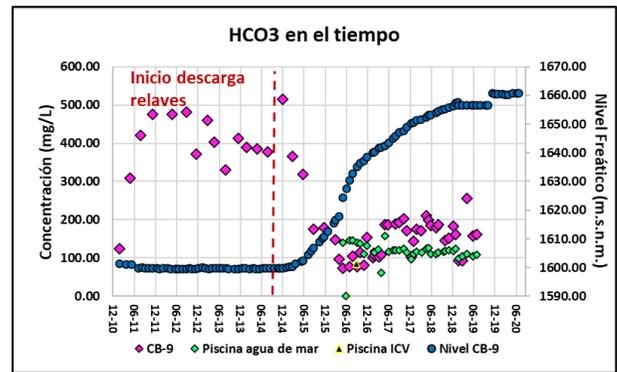
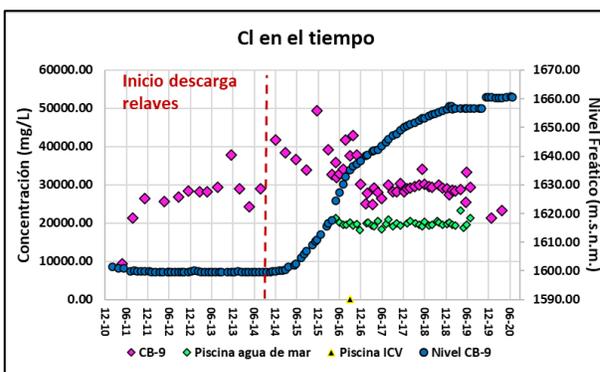
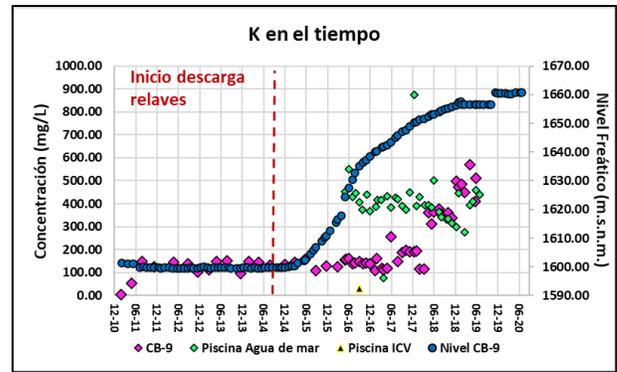
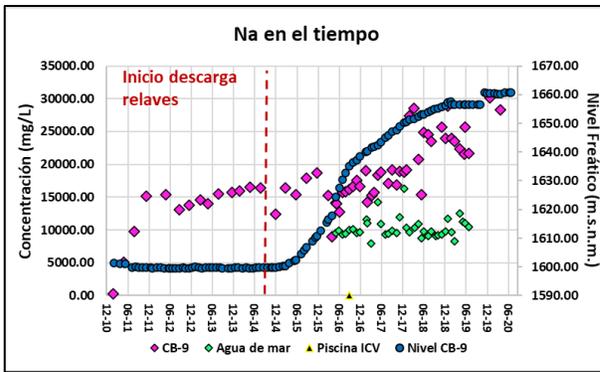
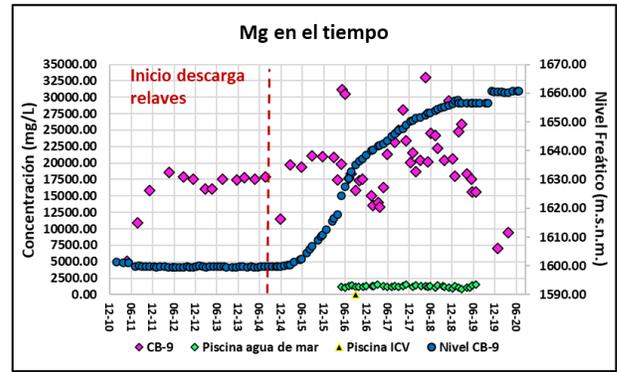
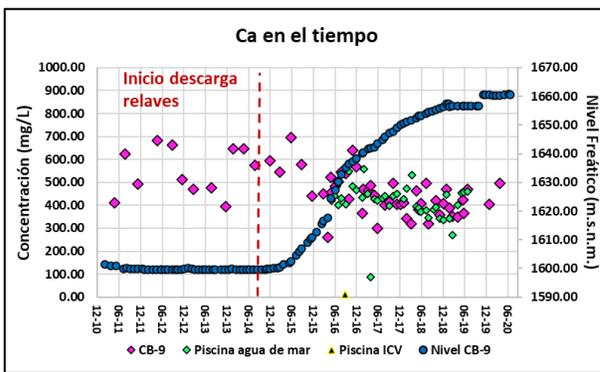
ANEXO 6 ELEMENTOS MAYORES EN EL TIEMPO

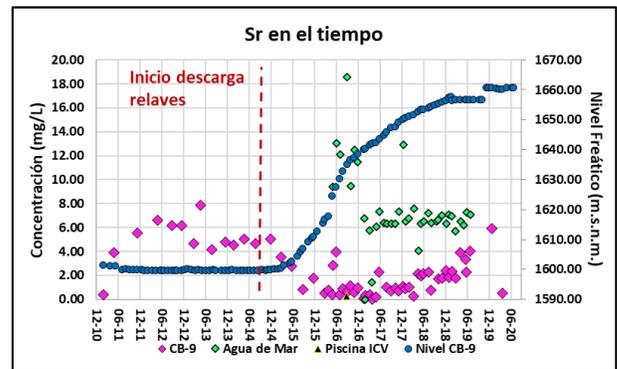
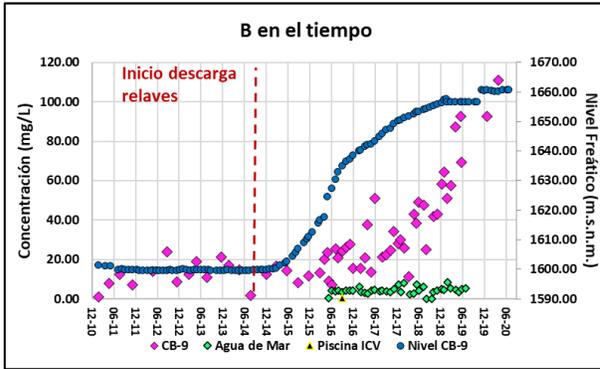
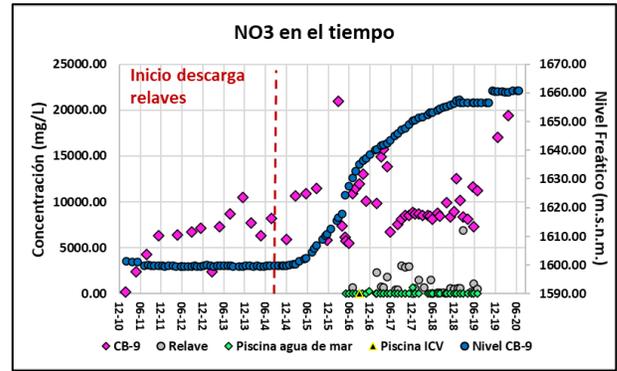
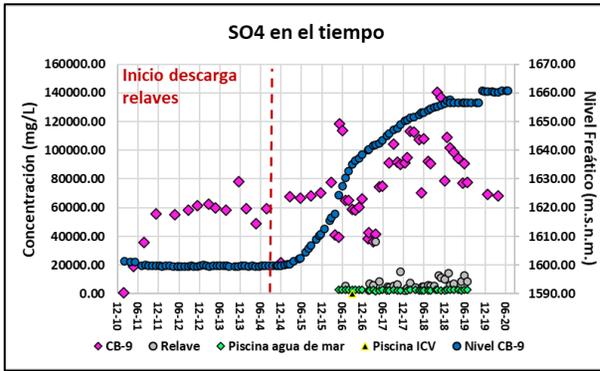
Anexo 6.1 Elementos mayores en el tiempo pozos CB-5 y CB-6.



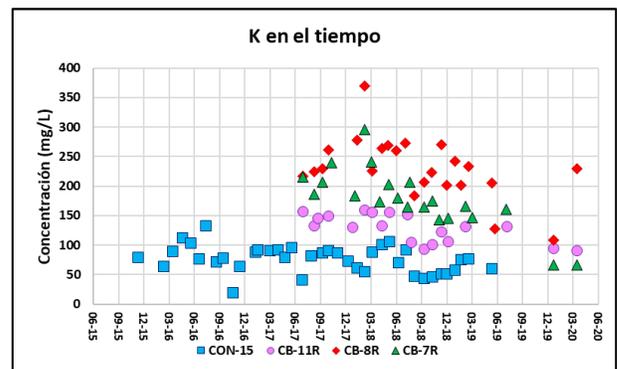
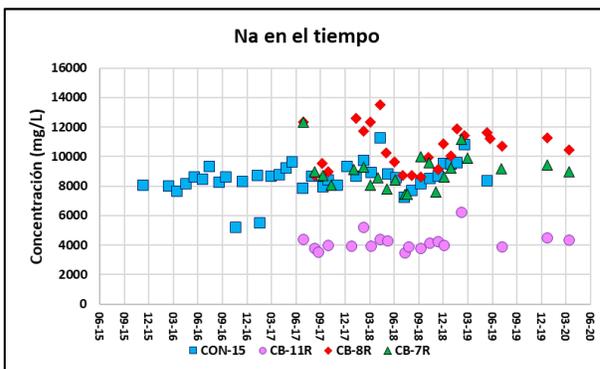
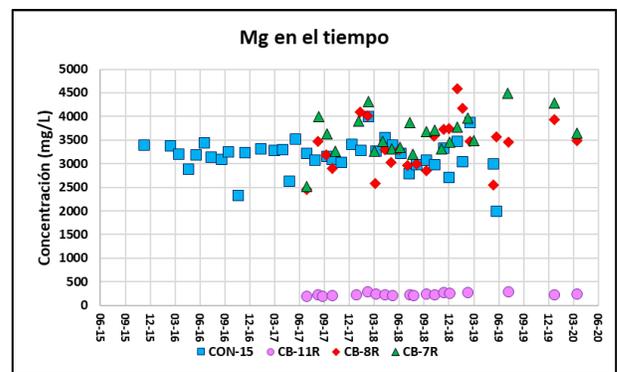
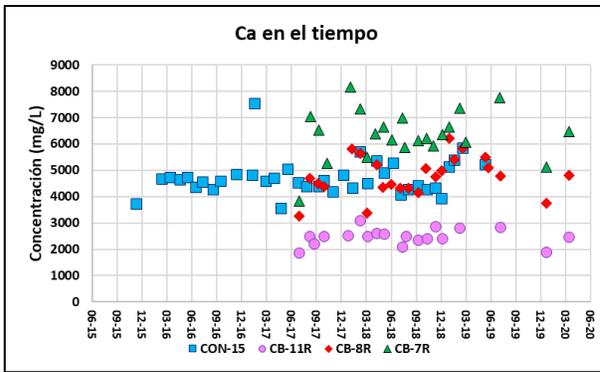


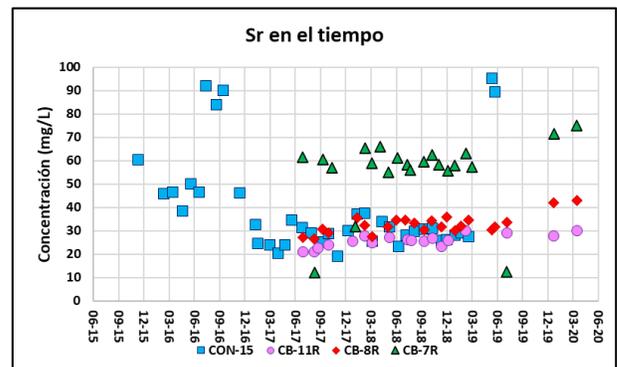
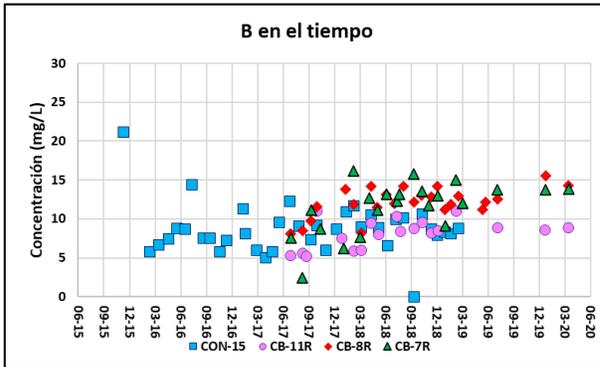
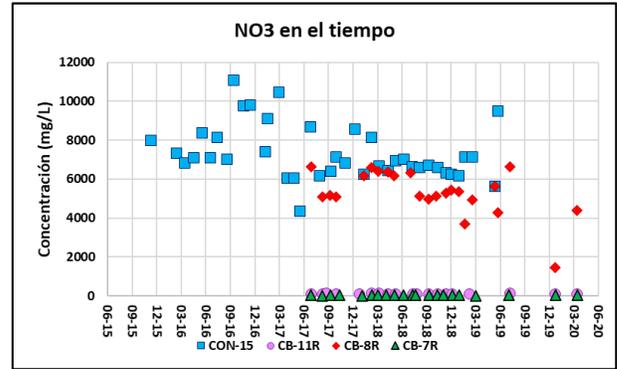
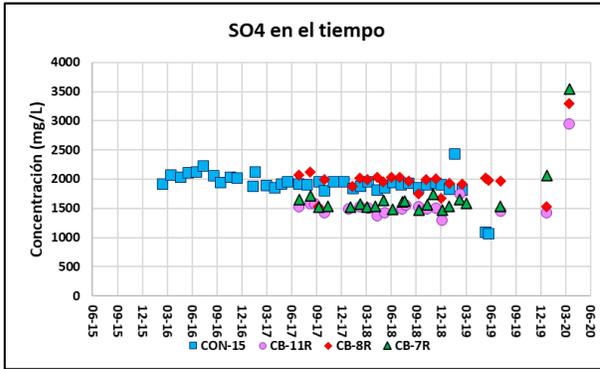
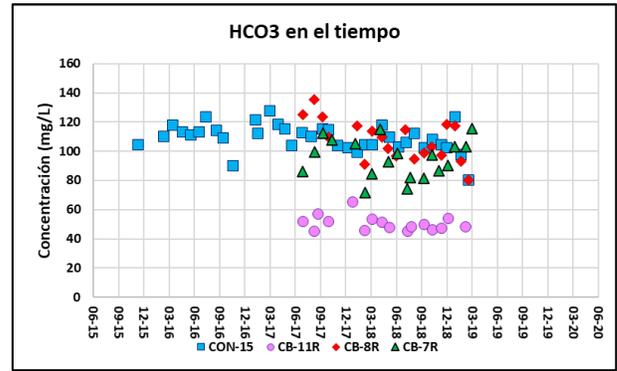
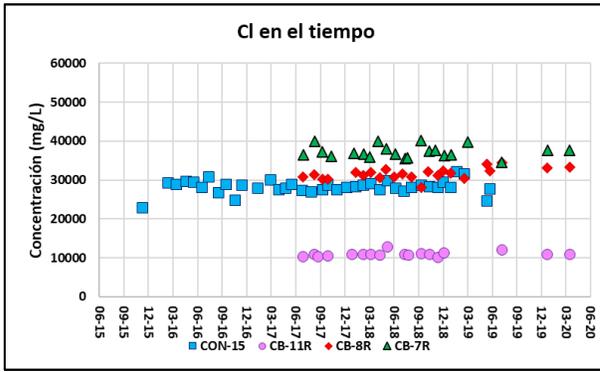
Anexo 6.2 Elementos mayores en el tiempo pozo CB-9.





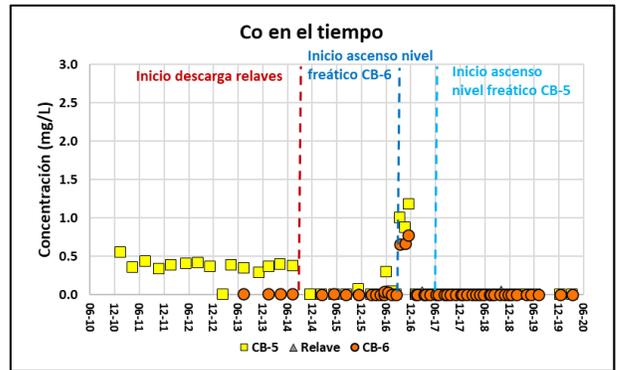
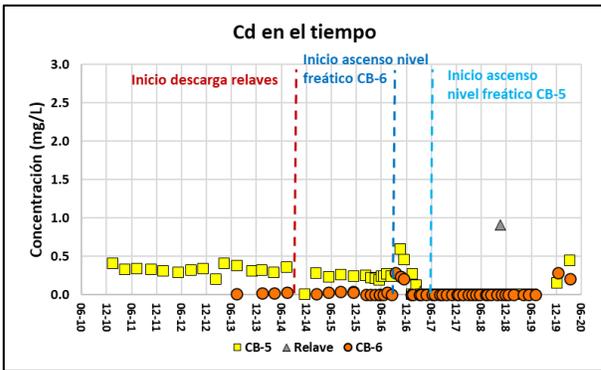
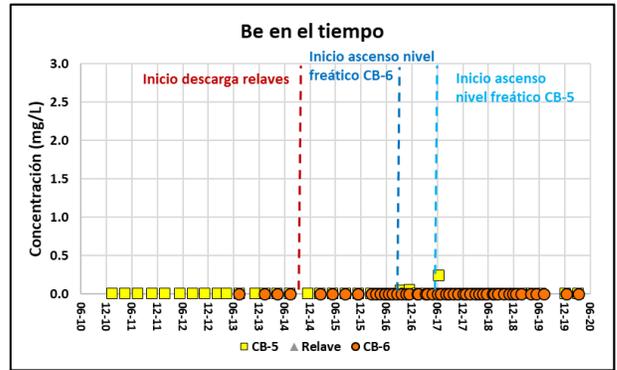
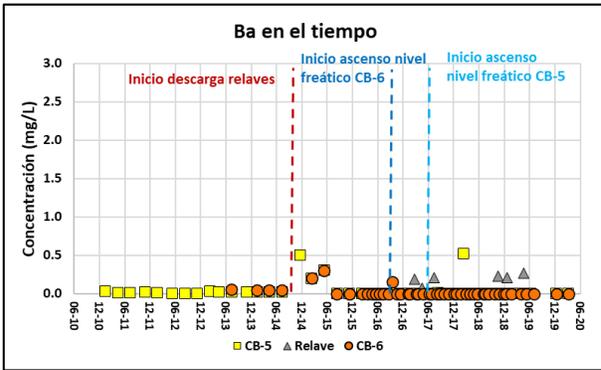
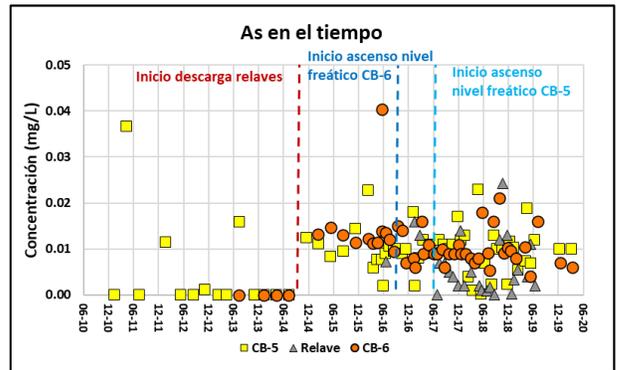
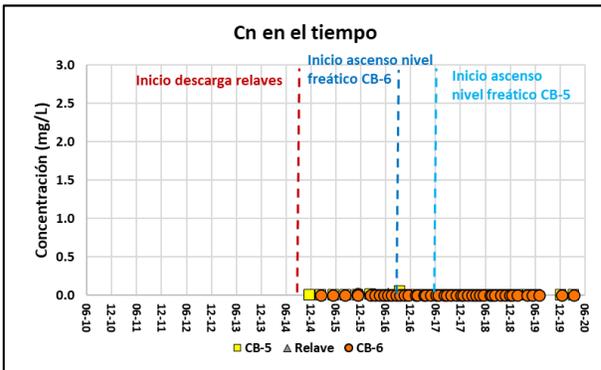
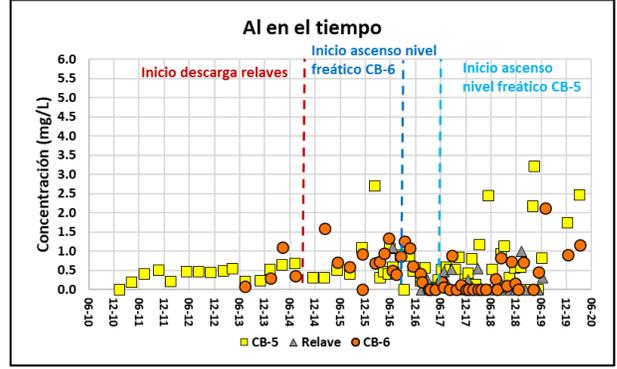
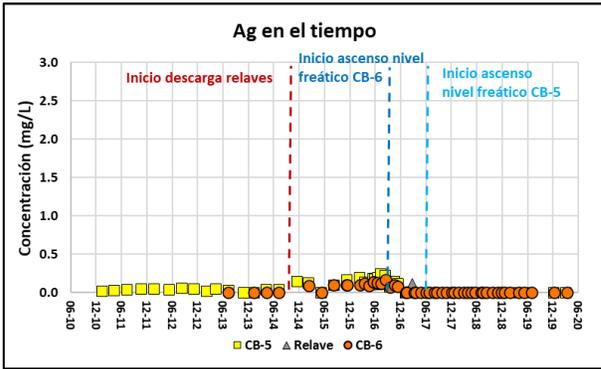
Anexo 6.3 Elementos mayores en el tiempo en puntos CON-15, CB-7R, CB-8R, CB-11R.

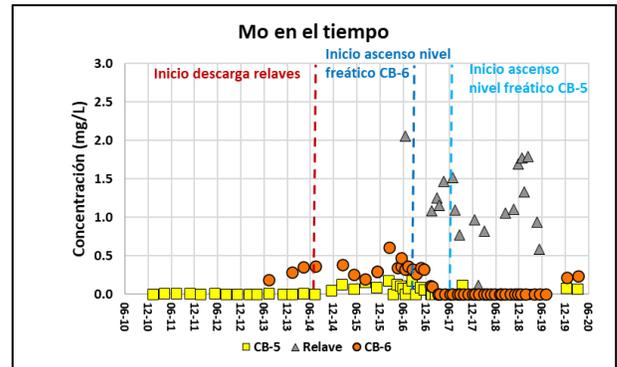
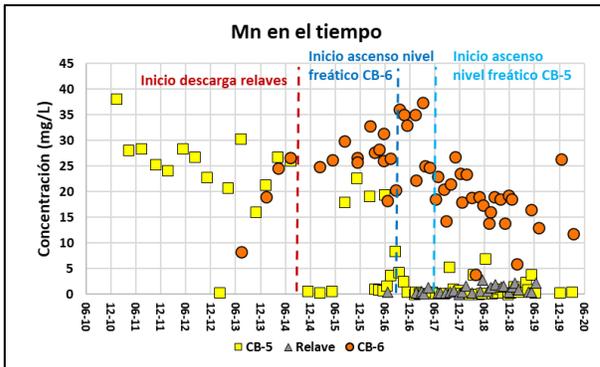
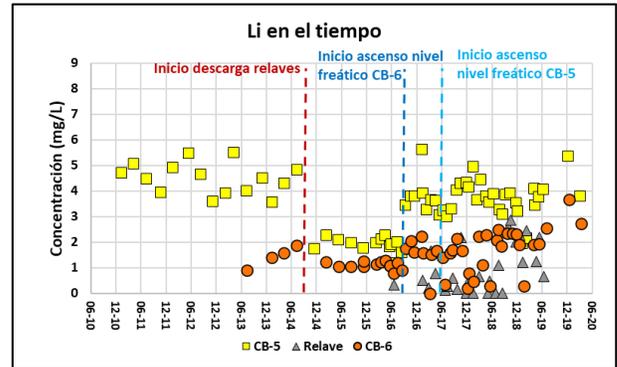
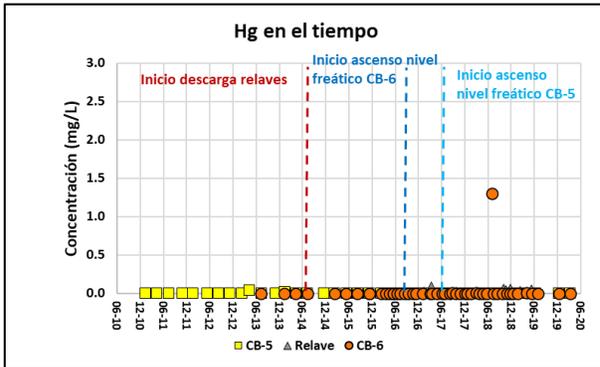
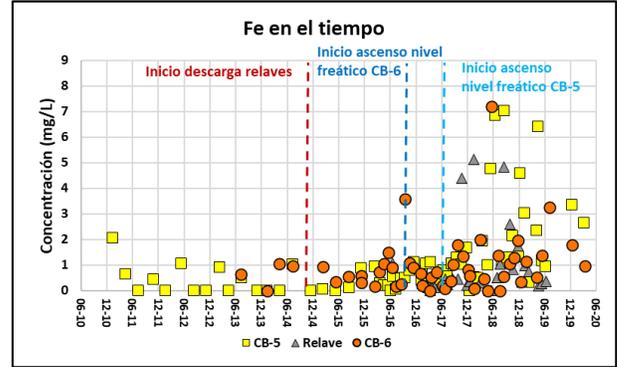
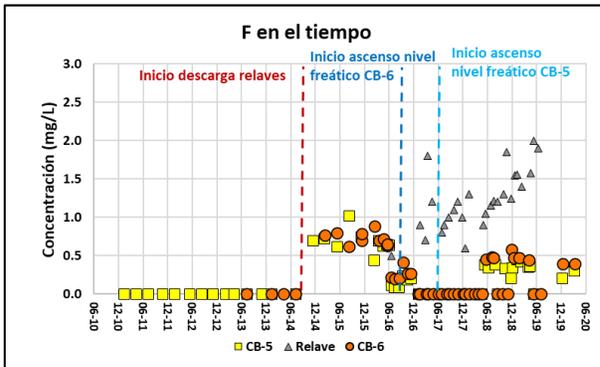
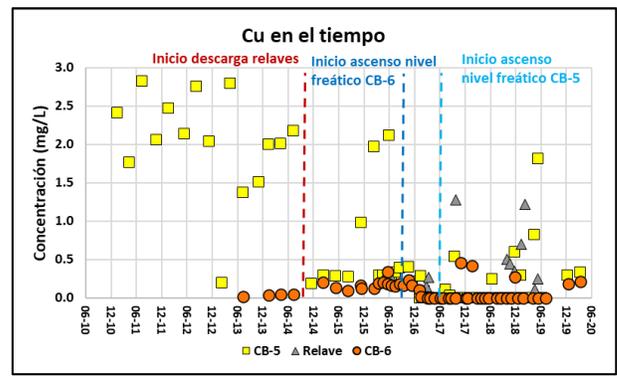
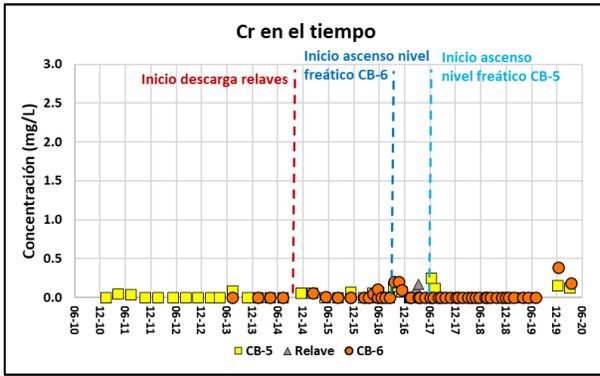


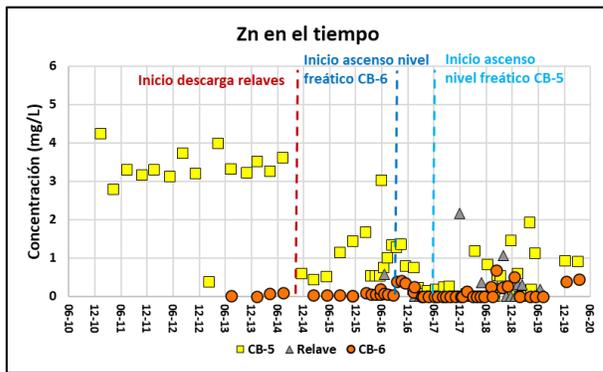
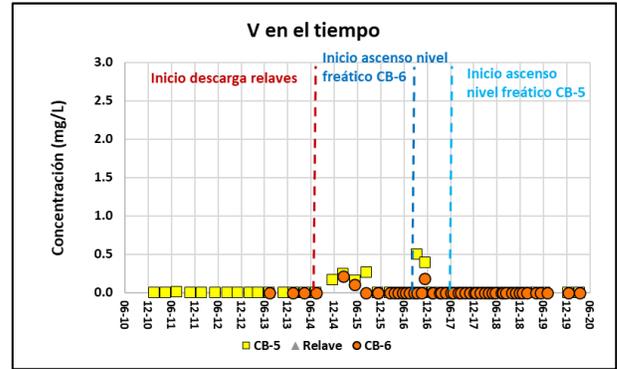
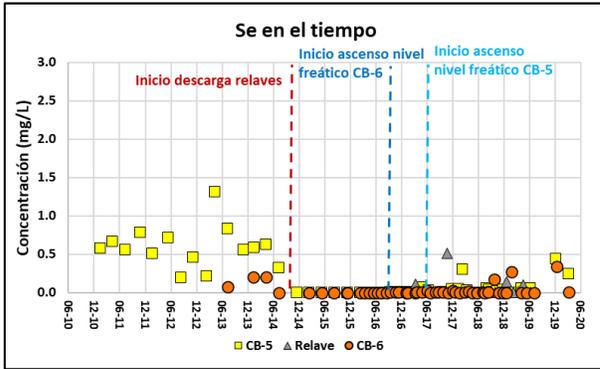
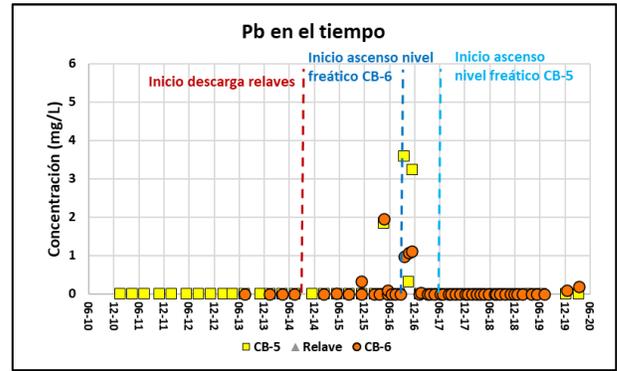
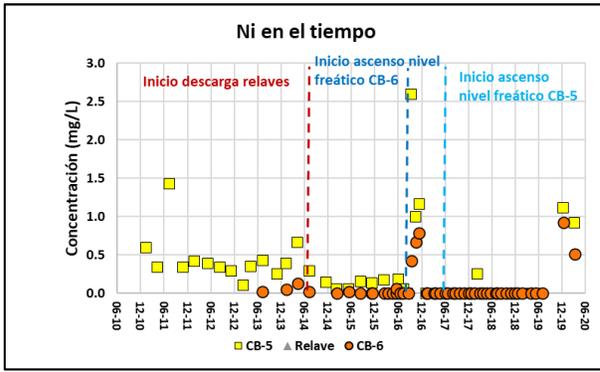


ANEXO 7 ELEMENTOS MENORES Y TRAZA EN EL TIEMPO

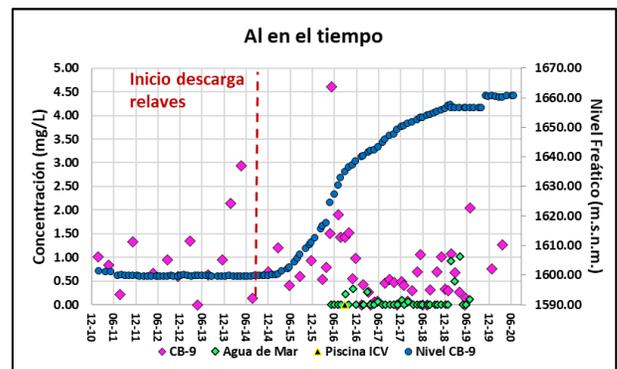
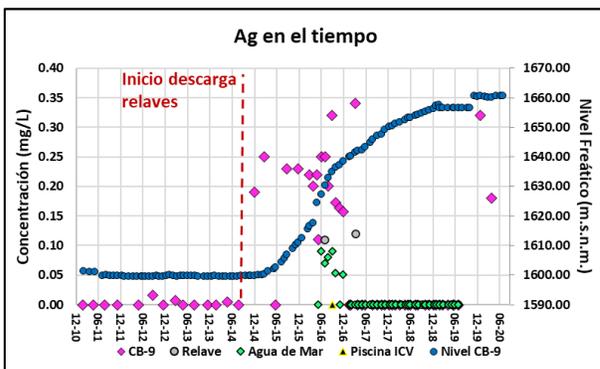
Anexo 7.1 Elementos menores y traza en el tiempo en pozos CB-5 y CB-6.

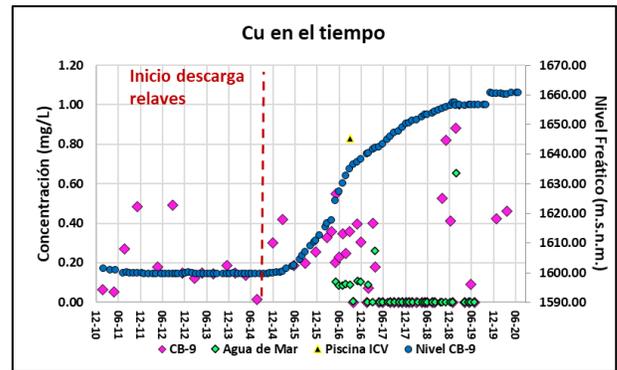
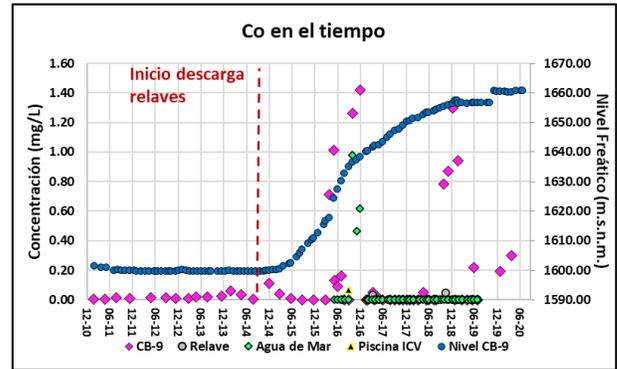
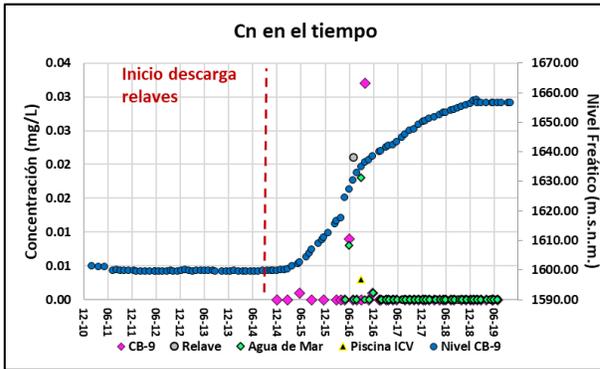
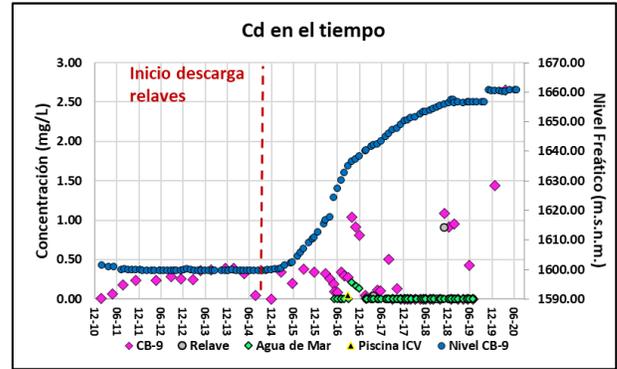
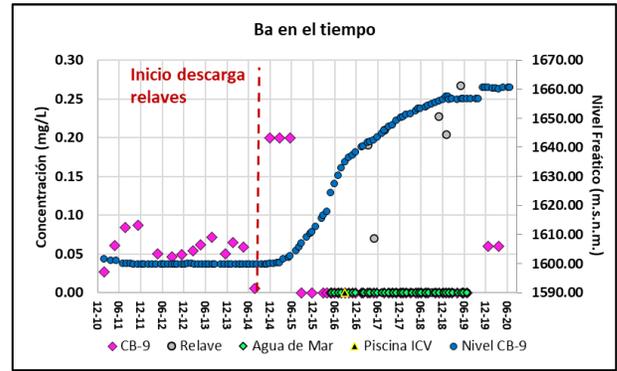
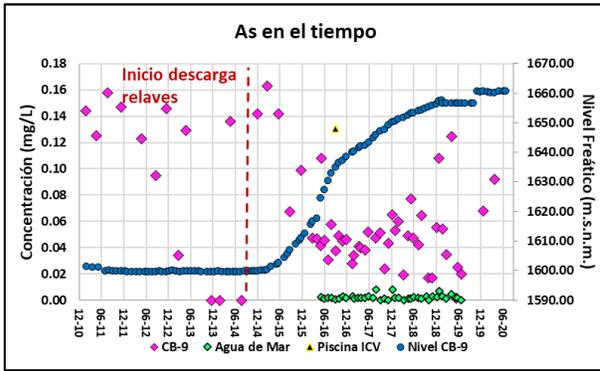


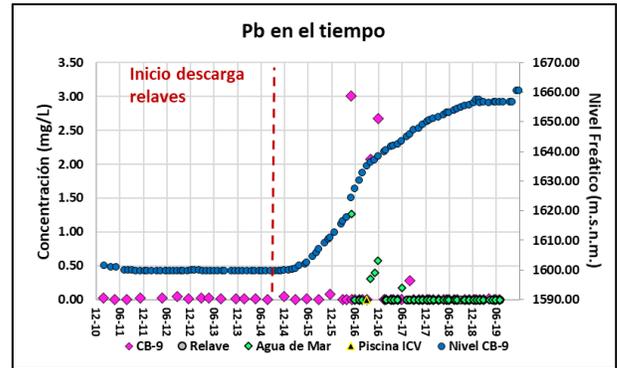
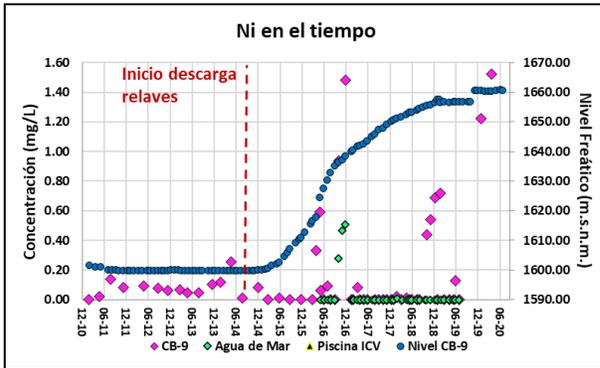
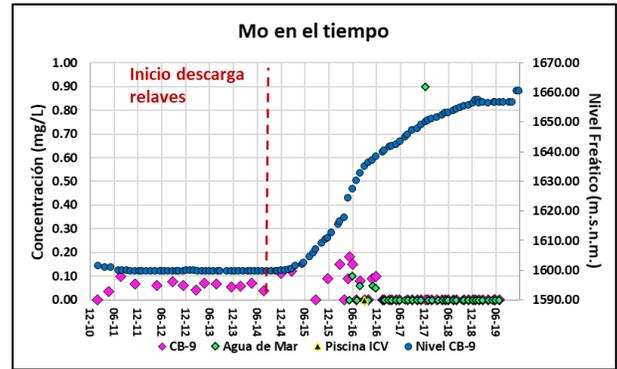
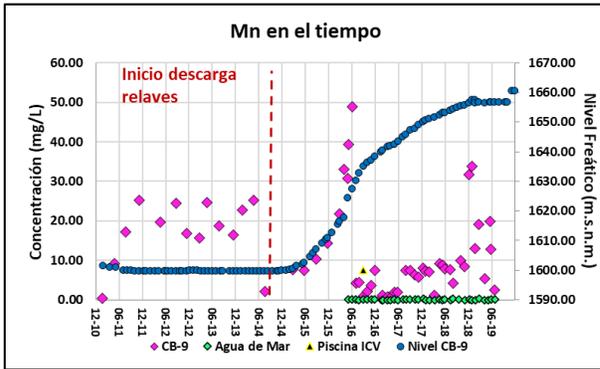
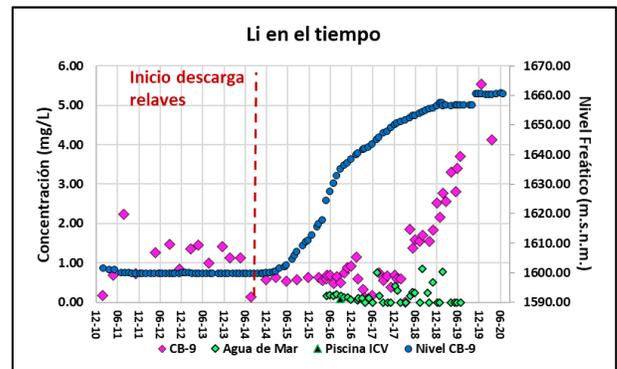
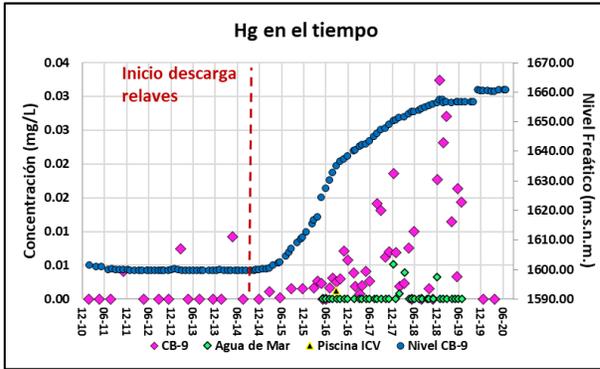
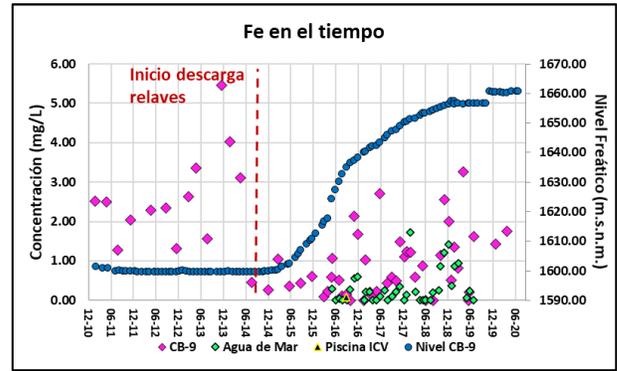
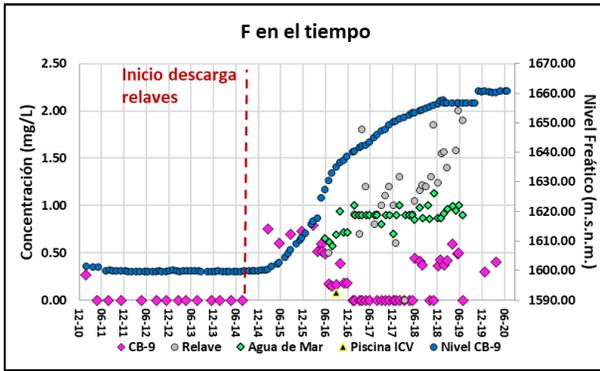


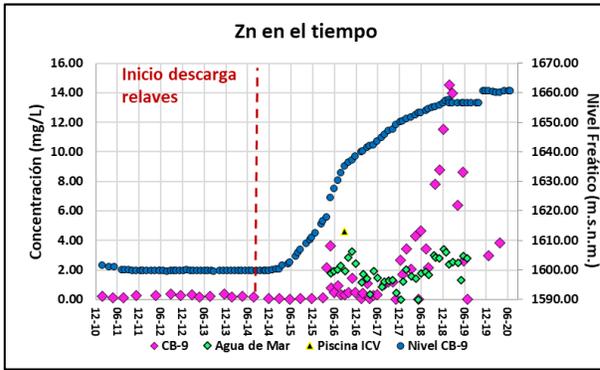
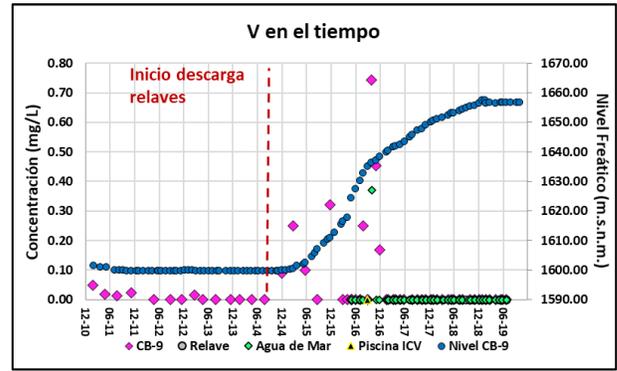
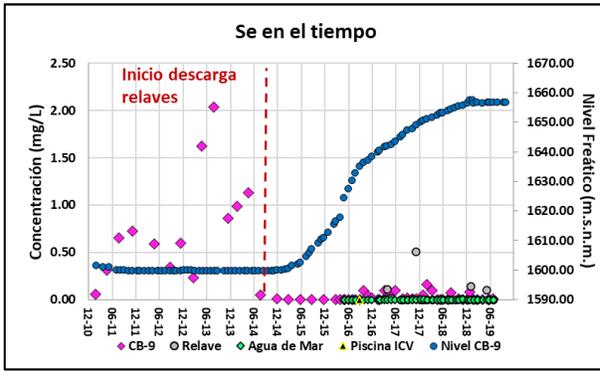


Anexo 7.2 Elementos menores y traza en el tiempo en pozo CB-9.

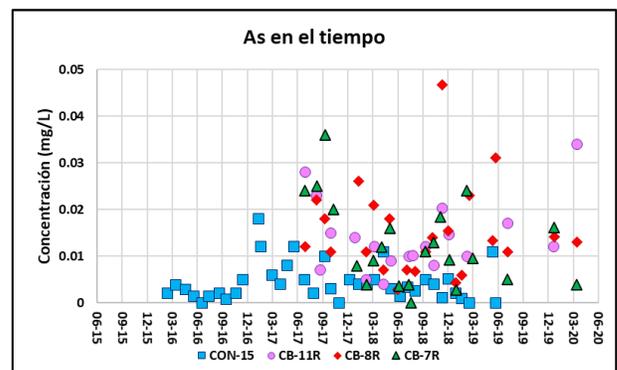
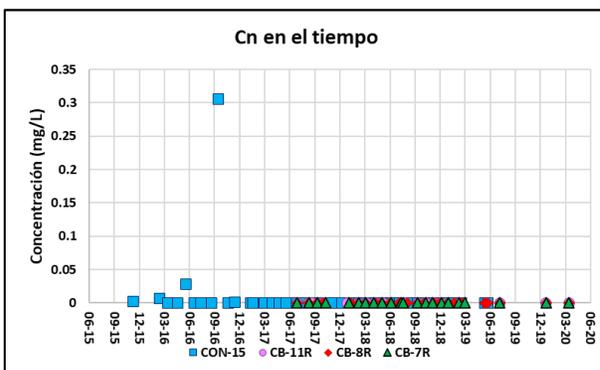
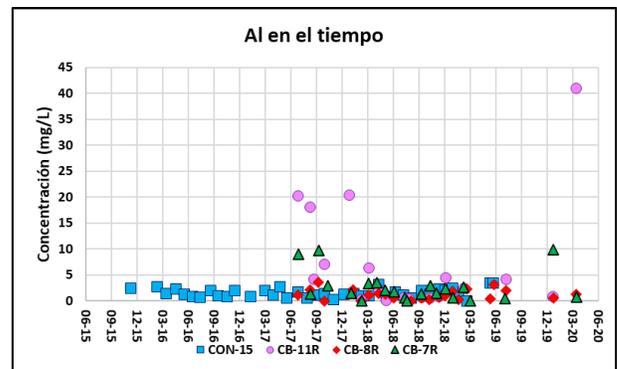
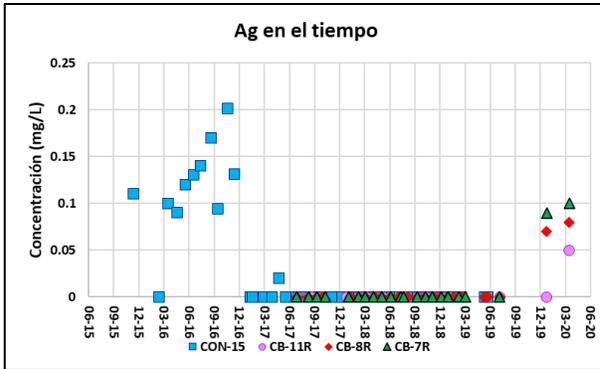


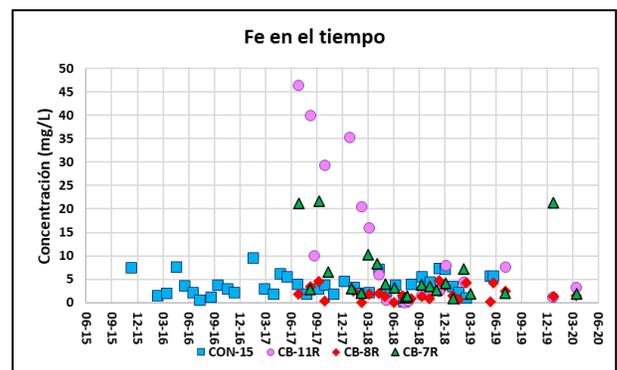
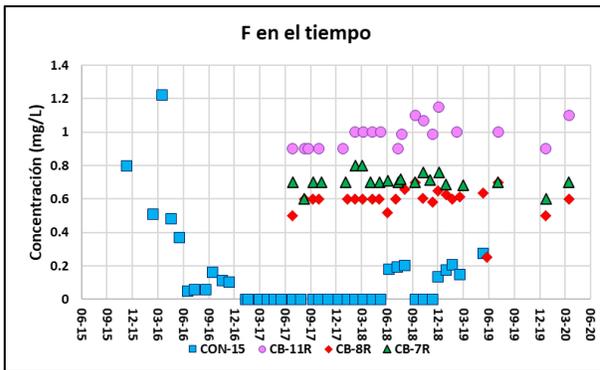
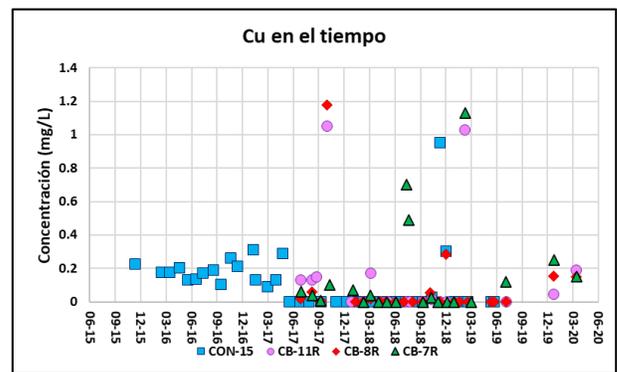
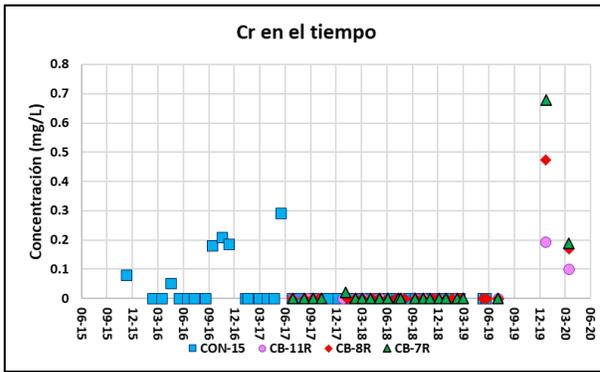
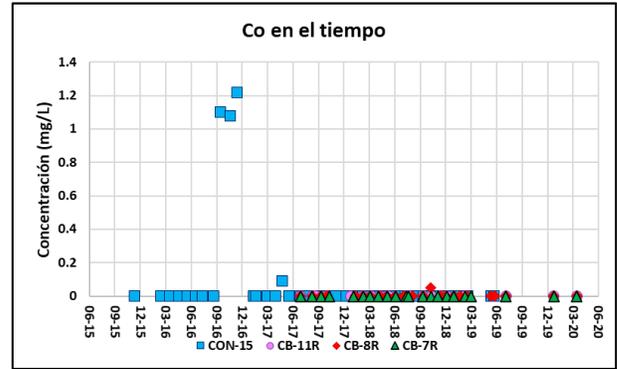
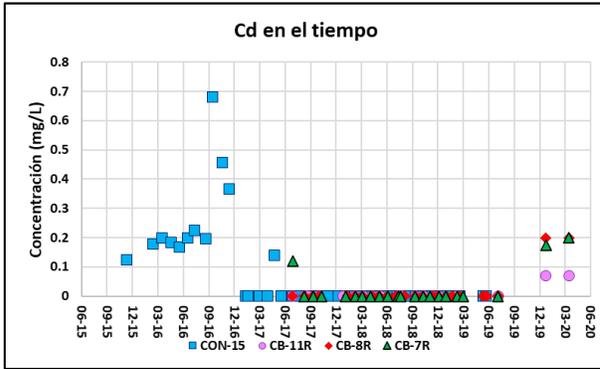
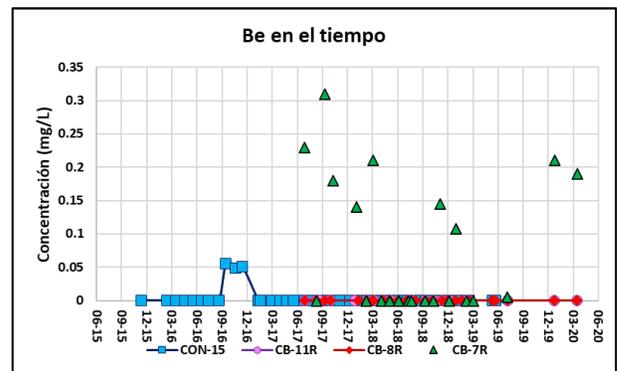
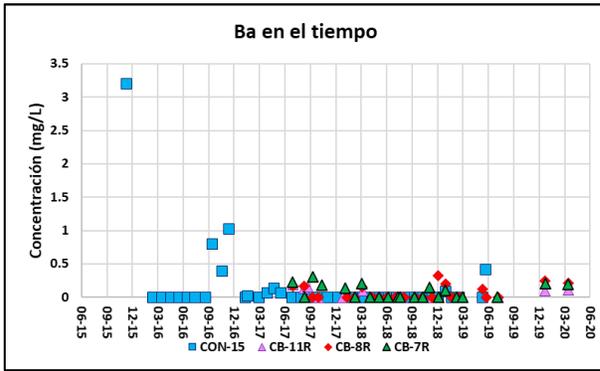


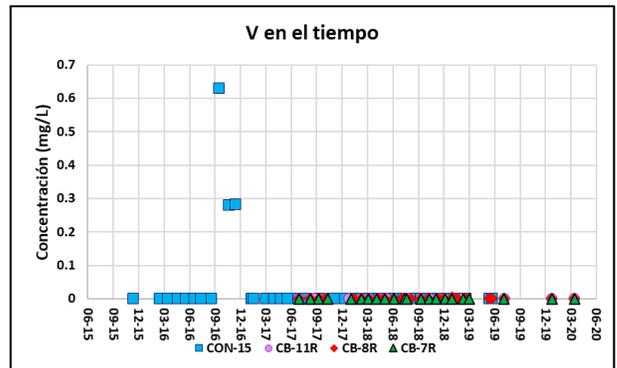
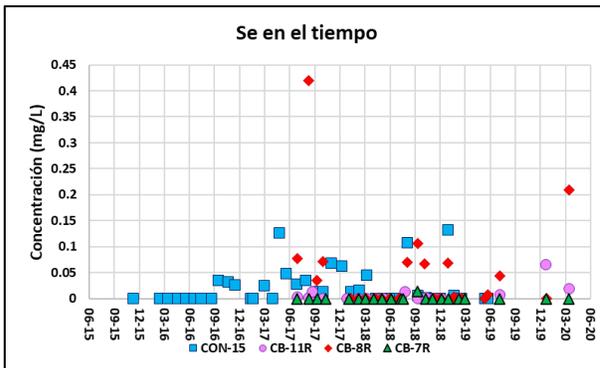
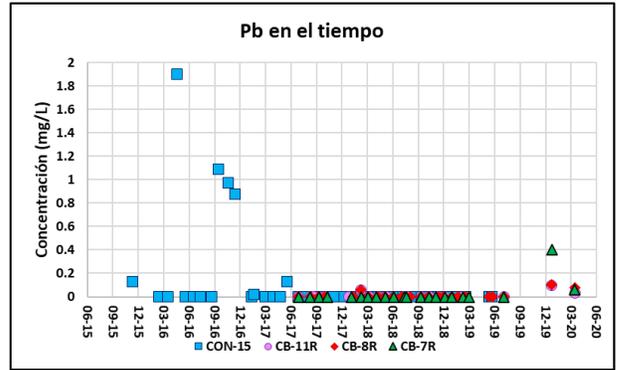
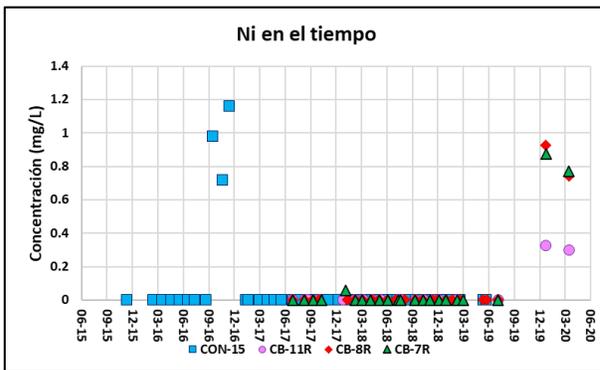
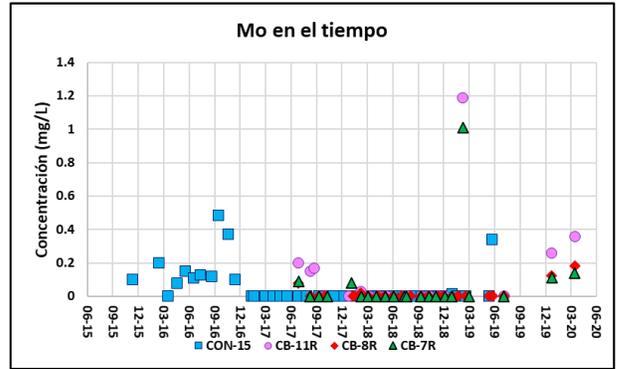
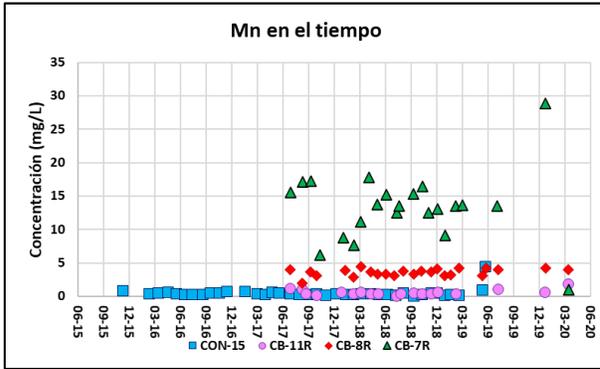
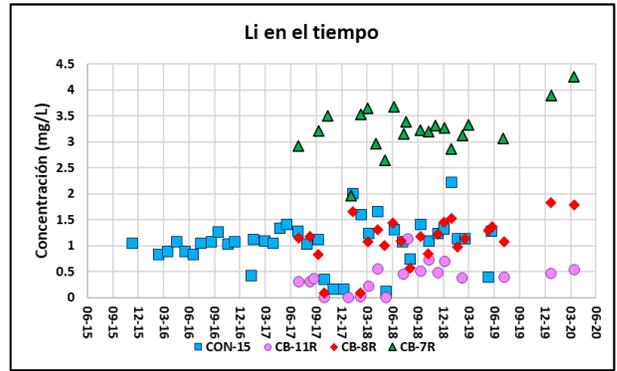
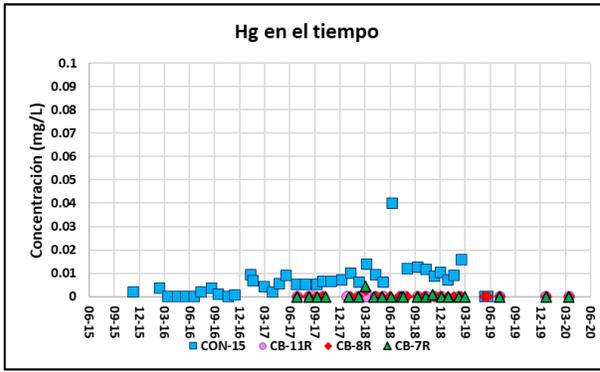


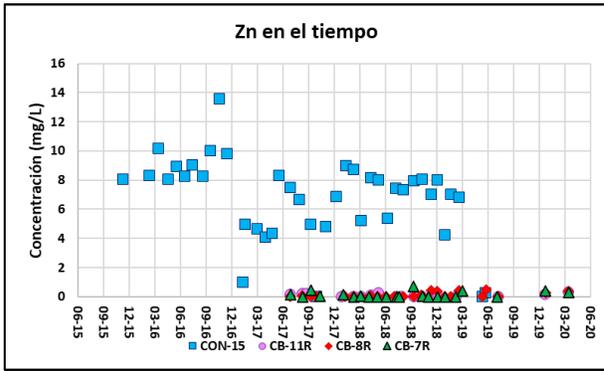


Anexo 7.3 Elementos menores y traza en el tiempo en puntos CON-15, CB-7R, CB-8R y CB-11R



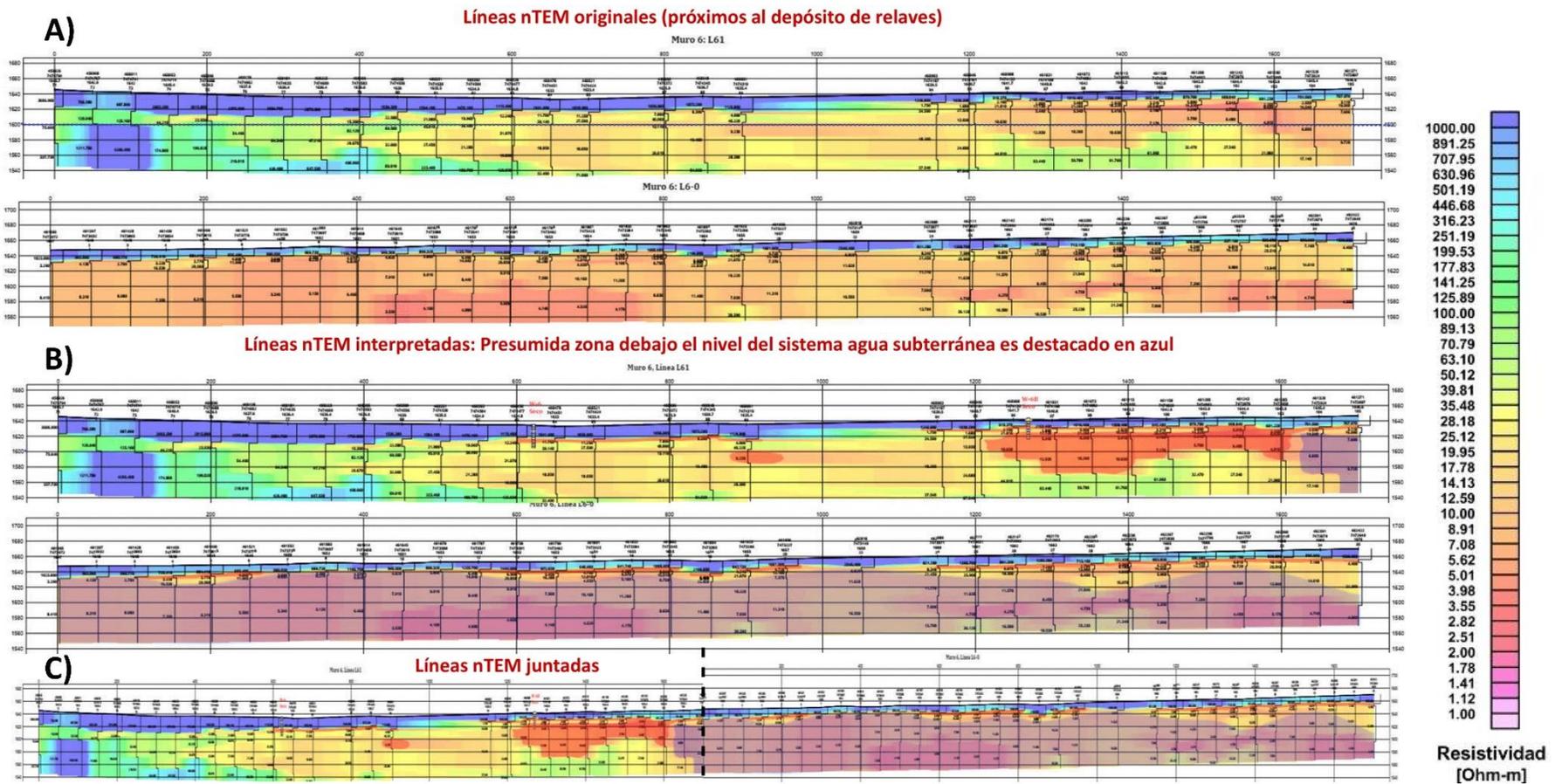






ANEXO 8 PERFILES GEOFÍSICOS NANOTEM

Anexo 8.1 Perfiles geofísicos nanoTEM L61 y L6-0.



Anexo 8.2 Perfiles geofísicos nanoTEM L62 y L6-100.

