



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

**DETERMINACIÓN DE LÍNEA DE BASE GEOQUÍMICA PARA LA
CUENCA ALTO TINGUIRIRICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEOLOGO

CRISTOBAL IGNACIO MENDEZ MORGADO

PROFESOR GUÍA:

JAMIE BUSCHER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DOLORINDA DANIELE

CLAUDIA CANNATELLI

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geólogo.
POR: Cristóbal Ignacio Méndez Morgado
FECHA: 5/03/2018
PROFESOR GUÍA: Jamie Buscher

DETERMINACIÓN DE LÍNEA DE BASE GEOQUÍMICA PARA LA CUENCA ALTO TINGUIRIRICA

El presente Trabajo de Título consiste en un estudio geoquímico de la cuenca fluvial Alto Tinguiririca. Esta corresponde a una subcuenca de la cuenca del río Rapel, y se encuentra inmersa en la Cordillera de los Andes entre las latitudes 34°35'0" y 35°0'0", en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

Se tomaron un total de 12 muestras de agua durante el verano del año 2017, entre las cuales 1 era de una vertiente, 2 de piscinas de aguas termales y las 9 restantes de cauces fluviales activos. Estas fueron sometidas a un análisis químico de elementos mayores, menores y trazas, y posteriormente se construyeron diagramas hidrogeoquímicos y estadísticos para identificar anomalías y procesos que ocurren en la cuenca.

Además de manera complementaria se obtuvieron muestras de sedimentos transportados en suspensión en los mismos puntos, los cuales fueron analizados mediante un microscopio electrónico de barrido.

Los resultados permitieron dividir las muestras en tres grupos. Las aguas termales forman el grupo que más difiere del resto, y se caracterizan por ser cloruradas sódicas y poseer altas concentraciones en casi todos los elementos analizados. El resto forman una transición desde sulfatadas cálcicas a bicarbonatadas cálcicas, donde las 5 de la parte alta de la cuenca son más sulfatadas y poseen mayores concentraciones y anomalías de Al, Fe, Mn y otros elementos, mientras que las de la parte baja son más bicarbonatadas, con menores concentraciones y solo con un punto con anomalía de Zn.

La diferencia principal entre la parte alta y la parte baja de la cuenca es la geología, donde la parte Oeste es representada por la secuencia Cenozoica y la parte Este por la secuencia Mesozoica, el volcanismo actual y la Falla El Fierro que se encuentra en una zona de transtensión y favorece el ascenso de fluidos de mayor profundidad.

Finalmente, al comparar las muestras con la normativa chilena para agua potable, varias sobrepasan los valores límite de As, Cl, Fe, Hg y Mn, poniendo en riesgo a la población que se someta a su consumo de manera continua.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quiero agradecer a Linda, Jamie y Claudia, mi equipo de profesores guías. Su apoyo desde el primero minuto fue fundamental para el desarrollo de este trabajo. Gracias por el tiempo, los consejos y la dedicación. También quiero agradecer a Antonia y Hugo por su ayuda con el trabajo con los filtros y el SEM.

Segundo quiero agradecer a mis padres, los modelos a seguir que he tenido toda la vida. Su entrega y apoyo incondicional fue lo que me permitió convertirme en la persona que soy. Espero poder hacerlos sentir tan orgullosos como yo lo estoy de ustedes. Me mostraron el mundo y el rol que jugamos todos en él.

A mis hermanos Vanessa y Gonzalo, por la vida que nos tocó compartir. Siempre hemos sido el primer apoyo entre nosotros en las decisiones que hemos tenido para nuestras vidas.

A mis abuelos y mi abuela, que no me cabe duda que reza por mí todos los días.

A mis compañeros de u, José, por tu paciencia, amistad y todo el tiempo que compartimos juntos. Al Hippi, por todas discusiones sin final donde aprendimos más que en cualquier clase, al Nico, por los días de smash y pollo kfc, a la Tami, por las tamicosas, a Calipso, a Roca Juniors, por permitirme tocar la gloria, al Jason, Salva y Gonzu.

A los de toda la vida, los que me mostraron que se puede ser feliz todos los días, Guatón, Sapo, Cake, Sea, Perrito, Pelao, Fernando, Pulp, Guto.

Y por último a mis princesas, Tania, mi compañera, nos ha tocado difícil y hemos podido con todo, siempre el uno junto al otro. Eres la mujer más fuerte que conozco. Tenemos una vida por delante y un sinfín de sueños por cumplir. Contigo todo siempre va a ser más fácil. Y Josefina, no hay ninguna palabra para describirte, solo eres amor. Eres la luz de mi vida y la razón de todo. Doy vuelta el mundo por ti, mi hija, mi princesa, mi sonrisa, mi corazón.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Formulación del trabajo	1
1.2	Hipótesis	2
1.3	Objetivos	2
1.3.1	OBJETIVOS GENERAL	2
1.3.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
1.4	Metodología	3
1.4.1	Revisión de antecedentes	3
1.4.2	Recepción y procesamiento de las muestras	3
1.4.3	Análisis hidrogeoquímico	3
1.4.4	Análisis estadístico	4
1.4.5	Análisis de contaminantes	4
2	Antecedentes Generales	5
2.1	Ubicación y vías de accesos	5
2.2	Antecedentes de trabajos previos	6
2.3	Clima	7
2.4	Centros poblados y uso de suelo	8
2.5	Relieve	9
2.6	Geomorfología	10
2.6.1	Morfoestructuras principales	10
3	Marco Geológico e Hidrogeológico	12
3.1	Geología	12
3.1.1	Rocas estratificadas	12
3.1.2	Depósitos no consolidados	13
3.1.3	Rocas intrusivas	14
3.1.4	Estructuras	14
3.2	Hidrogeología	16
3.2.1	Hidrografía	16
3.2.2	Precipitaciones	18
3.2.3	Acuíferos	19
3.2.4	Red hidrométrica	19
4	Resultados	23
4.1	Hidrogeoquímica	23
4.1.1	Análisis químico de las aguas	24
4.1.2	Índices de saturación	39
4.1.3	Análisis de filtros de agua	40

4.2	Análisis Estadístico	46
4.2.1	Diagramas de caja y bigote	47
4.2.2	Análisis multivariante.....	49
4.3	Normativa Ambiental	54
4.3.1	N.Ch.409/1	54
4.3.2	N.Ch.1333	54
4.3.3	Otras normativas	55
4.4	Mapas de distribución de elementos.....	56
5	Discusiones.....	58
5.1	Geoquímica de las aguas	58
5.2	Consideraciones ambientales.....	62
6	Conclusiones	64
7	Bibliografía.....	65
8	Anexos.....	71
8.1	Anexo A. Resultados del análisis de las muestras de agua.....	72
	Anexo B. Matriz de correlaciones entre parámetros del análisis químico..	74
	Anexo C. Elementos analizados y descartados	75
	C1. Elementos Analizados	75
	C2. Elementos Descartados.....	76
	Anexo D. Instrumentación y Técnicas Utilizadas en Análisis Químico.....	77
	D1. Análisis de muestras de este estudio.	77
	D2. Análisis de la DGA en estación Bajo Los Briones	78
	Anexo E. Diagramas binarios para elementos mayores, menores y trazas	79
	Anexo F. Estadística	94
	F1. Diagramas de caja y bigote.....	94
	F2. Calculo de transformación clr (razón logarítmica centrada) para las muestras de agua ...	98
	Anexo G. Estaciones de Monitoreo de la DGA en el área de estudio.....	99
	Anexo H. Calidad de aguas superficial en Bajo Los Briones.....	100
	H1. Concentraciones medidas en las Estación Bajo Los Briones	100
	H2. Comparación con norma N.Ch.409	102
	H3. Comparacion con norma N.Ch.1333	103
	Anexo I. Comparación de Muestras con normativas de aguas	104
	I1. Norma N.Ch.409.....	104
	I2. Norma N.Ch.1333.....	105
	I3. Comparación de normas de Chile, EPA (USA), UE y Organización Mundial de la Salud (WHO)	106
	I4. Norma NPDWR de la EPA (USA)	108
	I5. Norma DWD de la UE	109
	I6. Norma para agua potable de la OMS	110

Anexo J. Mapas de distribución de los datos analizados 111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Áreas calculadas para cada uso de suelo en el área de estudio. Elaborado a partir de datos de CONAF (2013).	8
Tabla 3.1.Sub-subcuencas del área de estudio con sus áreas respectivas. Elaborado a partir de datos de la DGA (2005).	17
Tabla 3.2.Caudal del rio Tinguiririca en la estación de monitoreo Bajo Los Briones. Elaborado a partir de datos de la DGA entre 1980 y 2017.	21
Tabla 3.3. Caudal del rio Claro en la estación de monitoreo El Valle. Elaborado a partir de datos de la DGA entre 1980 y 2017.	22
Tabla 4.1. Ubicación de los puntos de muestreo y parámetros fisicoquímicos medidos.....	24
Tabla 4.2.Resultados del análisis químico para los elementos mayores y el respectivo balance iónico [1] calculado manualmente y [2] usando el software PHREEQC.	25
Tabla 4.3. Coeficiente de correlación de Spearman entre elementos mayores y parámetros fisicoquímicos. 28	
Tabla 4.4. Resultados del análisis químico de algunos elementos menores y traza. Tabla completa en Anexo A.	34
Tabla 4.5.Índice de saturación mineral de algunas fases en las aguas analizadas. Los valores positivos se marcan en color verde.....	40
Tabla 4.6. Datos estadístico básicos de las muestras de agua de la cuenca Tinguiririca Alto (N=12).	47
Tabla 4.7. Parámetros que sobrepasan el valor límite de la N.Ch.409 en alguna de las muestras.	54
Tabla 4.8. Parámetros que sobrepasan el valor límite de la N.Ch.1333 en alguna de las muestras.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Mapa de ubicación y accesos al área de estudio (Elaboración propia).	5
Figura 2.2. Precipitaciones media mensuales en las estaciones meteorológicas de la DGA en el área de estudio (Elaboración propia con datos de la DGA).	7
Figura 2.3 Uso de suelo en la subcuenca Tinguiririca Alto (Elaboración propia a partir de datos de la CONAF 2013).....	9
Figura 2.4.Principales unidades morfoestructurales de la zona central de Chile entre los 33° y 35°S. Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2003), y Tassara y Yañez (2003). Modificado de Fock (2005). 10	
Figura 3.1. Geología regional del área de estudio. Elaboración propia en base a mapa geológico de Chile 1:1000000 de Sernageomin (2003)	15
Figura 3.2.Mapa de la Cuenca Rapel y sus subcuencas. Elaboración a partir de datos de la DGA (2005).	16
Figura 3.3.Mapa de las sub-subcuencas de la subcuenca Tinguiririca Alto, con sus códigos BNA y sus principales ríos. Elaboración propia a partir de datos de la DGA (2005).	18
Figura 3.4. Mapa de isoyetas de la zona de estudio. Elaboración propia a partir de datos de la DGA.	19
Figura 4.1.Ubicación puntos de muestreo	23
Figura 4.2. Diagrama de Piper de las muestras de agua.....	26
Figura 4.3. Diagramas de Stiff en las ubicaciones de los puntos de muestreo. Se utiliza una escala de diferente para las muestras de aguas termales por sus altas concentraciones.	27
Figura 4.4. Diagramas binarios entre Na+K v/s Cl (en meq/l). A la izquierda se encuentra el grafico completo y a la derecha hay un acercamiento. En rojo se encuentran las muestras de aguas termales, en verde las aguas de vertiente y en azul las aguas superficiales. Línea naranja representa la relación 1:1.	28
Figura 4.5. Diagramas binarios para Ca, Mg y SO ₄ v/s Cl en meq/l.....	30
Figura 4.6. Diagrama binario de HCO ₃ v/s Cl en meq/l.	30
Figura 4.7.Diagramas binarios entre a) Ca-HCO ₃ v/s SO ₄ y b) Ca+Mg-SO ₄ v/s HCO ₃	31
Figura 4.8.Diagrama binario de cationes (Ca+Mg) v/s aniones (SO ₄ +HCO ₃)	32
Figura 4.9. Gráficos de Temperatura v/s aniones mayores.	33
Figura 4.10.Diagramas binarios de As, B, Ba y Li en µg/l v/s Cl (mg/l).	36
Figura 4.11. Diagramas binarios de Sr (arriba) y Ni (abajo) en µg/l v/s Cl (mg/l).	37
Figura 4.12. Diagramas binarios de Al, Fe y Cu en µg/l v/s Cl (mg/l).....	38
Figura 4.13. Diagrama binario de Zn (µg/l) v/s Cl (mg/l).	39
Figura 4.14. Ejemplos de metales vistos en el material filtrado de la muestra LD2 usando Microscopia SEM en modo BSED. A) La asociado con Ni formando clusters y B) Gran cumulo de sulfatos-óxidos de Cu y Ag.	42
Figura 4.15. Material filtrado de la muestra LD3 con microscopio en modo BSED. A) Oro nativo recubriendo cristal de cuarzo y B) cristales de óxidos de La-Ni-Mo.	42
Figura 4.16. Cristal de calcita en muestra de agua termal LD5 usando detector A) BSED y B) ETD.	43
Figura 4.17. Óxidos de Ni-Cu y Fe-Cu en filtro de muestra LD6 usando detector: A) BSED y B) ETD.	44
Figura 4.18. Material retenido en el filtro de la muestra LD7: A) Diatomeas vistas con detector ETD y B) Oro nativo visto con detector BSED.	45
Figura 4.19. Material obtenido de filtros de las muestras LD10 (A) y LD11 (B).	46
Figura 4.20. Diagramas de caja y bigotes para algunos elementos mayores y trazas.	49
Figura 4.21. Análisis de conglomerados para los puntos de muestreo considerando elementos mayores. ...	50
Figura 4.22. Análisis de conglomerados para elementos mayores, T° y pH (a) y algunos metales nocivos (b).	51
Figura 4.23.Gráficos de sedimentación para el análisis de componentes principales de: A) elementos mayores y B) aniones mayores y metales nocivos. Línea roja marca quiebre de pendiente.	52
Figura 4.24.Gráficos de análisis de componentes principales para: A) elementos mayores y B) aniones mayores y algunos metales trazas.....	53

Figura 5.1. Mapa (A) y perfil estructural (B) de la geología de los alrededores de las Termas del Flaco y del Volcán Tinguiririca. Tomado de Tapia et al. (2015) 61

1 INTRODUCCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL TRABAJO

La geoquímica es un área de la geología que tiene como propósito estudiar los elementos químicos en la Tierra bajo dos enfoques: su abundancia relativa y absoluta, y los factores que controlan su distribución y migración entre los distintos sistemas que componen el planeta (Hawkes y Webb, 1962).

En un sistema fluvial, el principal factor que controla la composición química y mineralógica de las aguas y sedimentos es la geología de la cuenca de drenaje, siendo también influyentes la topografía, el clima, la energía de transporte, la hidrodinámica del ambiente de depositación y factores antropogénicos como la actividad minera, industrial, agrícola y el grado de urbanización.

El grado de influencia de las actividades antropogénicas a lo largo de una cuenca de drenaje se puede analizar midiendo la concentración de elementos químicos en el agua y en sedimentos, e identificando anomalías geoquímicas espacial y temporalmente.

En la zona central de Chile, existen numerosos sistemas fluviales, donde se concentran variadas actividades antropogénicas. Sin embargo, uno de ellos, el valle del río Tinguiririca, en su parte más alta, hacia la cordillera, está casi completamente libre de actividades humanas a gran escala.

Este trabajo describe una línea de base geoquímica de la zona central de Chile mediante la medición y el análisis de las concentraciones de elementos químicos en muestras de agua de la parte más oriental de la cuenca del río Tinguiririca. El término *geochemical baseline* (“línea de base geoquímica”), es usado ampliamente en las regulaciones medioambientales. Fue introducido por el Programa de Correlación Geológica Internacional (Proyecto IGGP 360, Línea Base Geoquímica Global) a fin de crear una red internacional de bases de datos geoquímicos regionales y como insumo para el desarrollo de legislaciones medioambientales. Se utiliza para mostrar la variación natural de la concentración de un elemento en la superficie terrestre (Salminen & Tarvainen, 1997; Salminen & Gregorauskiene, 2000).

El desarrollo de una línea de base permite comparar los resultados con los de otros valles que si han tenido un desarrollo agrícola, minero o industrial mayor, y así identificar posibles zonas e contaminación, teniendo la restricción del tipo de material muestreado, y los métodos de análisis que se realizaron.

1.2 HIPÓTESIS

De acuerdo a lo planteado en la formulación del problema, la hipótesis principal es que al estar la parte oriental de la cuenca del río Tinguiririca casi completamente libre de actividades humanas, todas las anomalías geoquímicas pueden ser explicadas por factores naturales, principalmente por las variaciones geológicas en el área de estudio. Entonces, se deberían observar diferencias notables con otros valles cercanos, en las concentraciones de elemento críticos presentes en actividades industriales a gran escala, como elementos tóxicos provenientes de la industria minera.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVOS GENERAL

Establecer una línea de base geoquímica de la cuenca del río Tinguiririca en su parte oriental, mediante el análisis de muestras de agua y sedimentos en filtros, y determinar los factores y procesos que concentran las distintas especies químicas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar geoquímicamente el sistema fluvial en el área de estudio, usando muestras de agua y filtros de agua.
- Identificar anomalías geoquímicas y sus posibles causas.
- Obtener mapas de distribución para cada elemento químico estudiado.
- Comparar los resultados con del análisis geoquímico con las normas chilenas para aguas N.Ch.409 y N.Ch.1333.

1.4 METODOLOGÍA

1.4.1 Revisión de antecedentes

Corresponde a la recopilación de información geológica e hidrogeológica del área de estudio, siendo la principal fuente la Carta geológica de Chile 1:1.000.000 del SERNAGEOMIN y los reportes de calidad de aguas de la Dirección General de Aguas en las diferentes estaciones ubicadas en la zona de estudio. Además se compararon las normas de agua potable y riego de Chile (N.Ch.409 y N.Ch.1333) con las de Estados Unidos, Europa, y las directivas de la Organización Mundial de la Salud.

1.4.2 Recepción y procesamiento de las muestras

La campaña de terreno se desarrolló el verano del año 2017, obteniéndose 12 muestras de agua en distintos puntos de muestreo, 9 en cauces activos, 1 vertiente y 2 aguas termales. Se realizó un análisis químico en el laboratorio de Geoquímica de Fluidos y Geoquímica Isotópica del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), ubicado en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, con el cual se obtuvieron las concentraciones de aniones (Br^- , F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y HCO_3^-), cationes mayores (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) y elementos trazas.

De manera complementaria a las muestras de agua, se midieron in situ la T° , pH, y conductividad en el área muestreada, y se recolectó parte del material en suspensión por medio de filtros. Este fue analizado por medio de un microscopio electrónico de barrido, en el laboratorio de microscopía SEM del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

1.4.3 Análisis hidrogeoquímico

Consiste en el procesamiento e interpretación de la información obtenida de los análisis químicos y de microscopía. Se clasificaron las aguas y se determinó su calidad actual con la construcción de diagramas de Stiff, Piper y binarios, por medio del software *AquaChem*. Además, se estudió la distribución espacial de los parámetros fisicoquímicos (T° , pH, EC), y de las especies químicas obtenidas del análisis antes mencionado, mediante un análisis con GIS.

También se relacionó el resultado del análisis químico del agua, con el material transportado en suspensión obtenido de los filtros, para establecer la mineralogía presente, los procesos que llevan a la concentración de elementos en cada fase, identificar relación con el contexto geológico, y cuantificar la vulnerabilidad del sistema ante cambios de las variables fisicoquímicas, poniendo énfasis en los elementos contaminantes.

1.4.4 Análisis estadístico

Para buscar anomalías geoquímicas en el área de estudio, se realiza un análisis exploratorio de los datos, que permite ver la distribución estadística de los distintos parámetros medidos. En primera instancia se determinan los estadígrafos básicos, entre ellos están los valores máximos/mínimos, promedio, mediana y desviación estándar.

Después se buscan que datos son anómalos o "outliers" usando diagramas de caja y bigote o box-plot (Tukey, 1977). Este método genera además como resultado hasta un máximo de 5 clases para los datos de cada variable, lo que permite analizar su distribución geográfica asignando los valores a su ubicación mediante GIS.

De manera paralela se realiza un análisis multivariable o de conglomerados, usando el software *Statgraphics Centurion XVII*. Este consiste en un método jerárquico donde se pueden visualizar la semejanza relativa entre una muestra de datos. Los resultados se presentan en dendogramas, donde los datos analizados se van uniendo por medio de líneas verticales, siendo los que se interceptan a más corta distancia más similares entre sí.

1.4.5 Análisis de contaminantes

Se compararon los resultados del análisis químico de las aguas con los niveles de especies químicas permitidos por las normas chilenas N.Ch.409 para aguas potables, y N.Ch.1333 para aguas de riego. De manera complementaria se investigó sobre las normas de aguas en Estados Unidos y Europa, y se contrastaron con su contraparte chilena y las muestras de agua.

2 ANTECEDENTES GENERALES

2.1 UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESOS

La Cuenca Tinguiririca Alto corresponde a una subcuenca de la Cuenca Rapel y drena una superficie de 1843 [km²] en las Regiones del Libertador Bernardo O'Higgins y del Maule, específicamente en las provincias de Colchagua y Curicó, desde su nacimiento en la Cordillera de los Andes hasta su confluencia con el río Claro. Se encuentra aproximadamente entre las latitudes 34°35'0" y 35°0'0", y está inmersa en el flanco occidental cordillerano.

Se puede acceder desde Santiago por la Ruta 5 Sur, llegando en el kilómetro 142 a la ciudad de San Fernando. Desde allí se debe tomar la Av. Manuel Rodríguez hacia el este, que luego se conecta con la carretera I-45 que va hacia la localidad de Termas del Flaco. El camino se encuentra pavimentado en los primeros 17 km hasta Puente Negro, y luego continúa como camino de ripio por los siguientes 63 km.

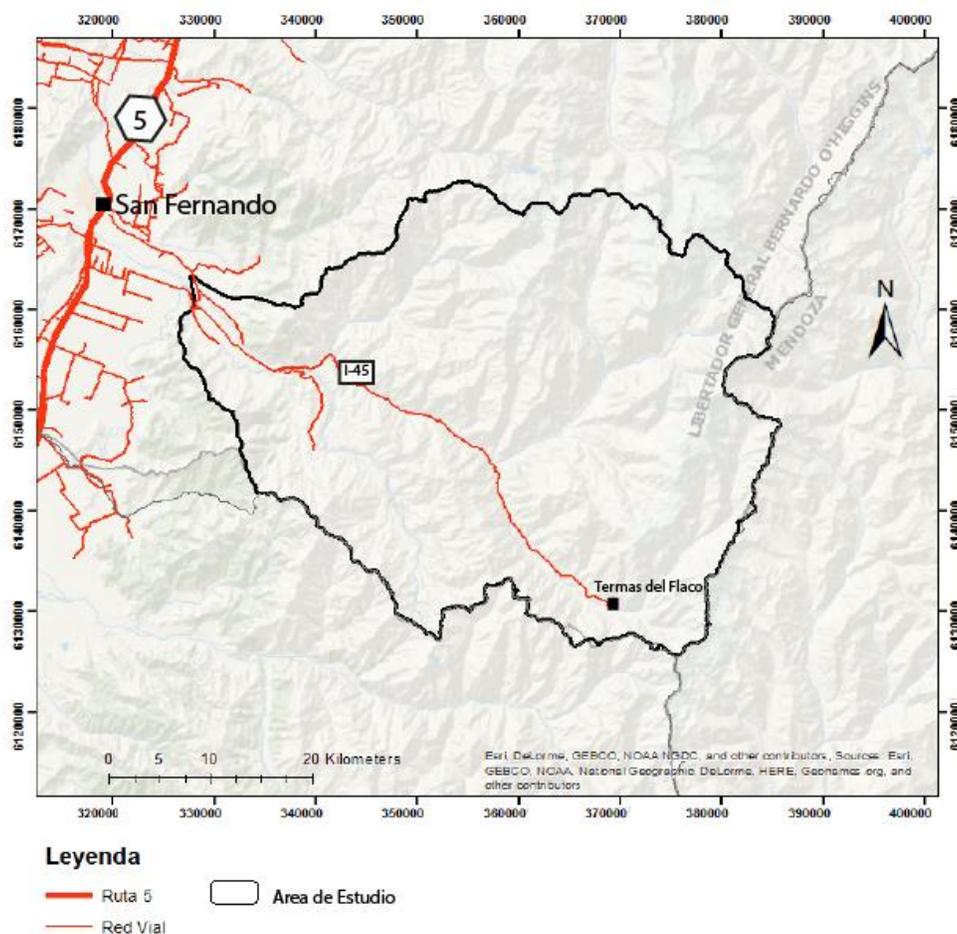


Figura 2.1. Mapa de ubicación y accesos al área de estudio (Elaboración propia).

2.2 ANTECEDENTES DE TRABAJOS PREVIOS

La DGA ha sido el organismo encargado de realizar la mayoría de los estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos en el río Tinguiririca.

En 2004 publican un informe titulado "Diagnostico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad" (DGA, 2004) donde caracterizan los distintos sistemas fluviales del país, entre ellos la cuenca del río Rapel. Se describe en detalle su contexto natural, las relaciones con sistemas humanos, el uso que se le da a las aguas a lo largo de la cuenca, y un análisis de la calidad de las aguas en base las estaciones de monitoreo que presenta el organismo en la zona.

En 2005 publican otro informe titulado "Evaluación de los Recursos Hídricos de la VI^a Región, Modelación Hidrogeológica de los valles de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca" (DGA, 2005), donde detallan el sistema hidrogeológico de la cuenca del río Tinguiririca en su parte más baja, describiendo el acuífero presente y los balances hídricos de acuerdo al uso del agua.

En un informe del SERNAGEOMIN, Lacassie (2008) describe la composición química y mineralógica de los sedimentos en la Cuenca del río Rapel, mediante un muestreo sistemático de los cauces activos y un análisis estadísticos por medio de redes neuronales artificiales. Basándose en la capacidad de la fracción fina del sedimento para transportar metales pesados y otras especies químicas, detalla la vulnerabilidad del sistema fluvial ante los cambios en la geología de la zona y las actividades humanas como la agricultura y la minería. Este estudio solo comprende la parte más baja del río Tinguiririca, hasta la ciudad de San Fernando.

El año 2015 se publica el informe "Diagnostico de la calidad de las aguas de la región Libertador Bernardo O'Higgins" (DGA, 2015) por parte del Departamento de Conservación y Protección de los Recursos Hídricos de la DGA, donde se analizó la vulnerabilidad de los acuíferos y el nivel de contaminación que estos tengan, por medio de un análisis en distintos pozos de la región. Los resultados mostraron una gran variabilidad de los datos en el río Tinguiririca, que fue muestreado solo en su parte baja, desde San Fernando hacia el Oeste, donde las aguas fueron identificadas como sulfatadas cálcicas y con niveles altos de nitratos, pero dentro de la norma N.Ch.409, y con un punto alto en Hierro y Zinc, sobre la norma.

El año 2017 la DGA publica un informe sobre la parte alta de la cuenca del río Tinguiririca, titulado "Estimación de la recarga en aguas subterráneas y Determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas altas de la Región del General Libertador Bernardo O'Higgins" (DGA, 2017), donde se compara la infiltración de aguas en las subcuencas cordilleranas debido a las precipitaciones con las demandas comprometidas aguas abajo. Se concluye al hacer un balance hídrico conservador que no es posible otorgar más derechos de aprovechamiento de agua.

2.3 CLIMA

En la zona central de Chile el clima es en general templado, con ligeras variaciones de acuerdo a su cercanía con el océano y a la altura geográfica.

Según la Clasificación de Köppen (1900), la cuenca del río Tinguiririca presenta un clima templado oceánico mediterráneo con verano seco (Csb), caracterizado por una estación seca prolongada, y un invierno con temperaturas extremas que incluso bajan de los cero grados. También parte del área de estudio se encuentra a gran altitud, por lo que su clima pasa a ser ET(s) según la Clasificación de Köppen (1900), que corresponde a clima de tundra con lluvia invernal.

Las temperatura medias anuales varían desde 13.4 °C en Los Briones, a 540 msnm, hasta 6.2°C en Termas del Flaco, que se encuentra a 2650 msnm, siendo fuertes los contrastes térmicos entre invierno y verano a medida que se está a menor altitud.(DGA 2004)

Las precipitaciones medias anuales en la estación de medición La Rufina, en la zona de estudio, marca 923.5 mm, pero con un importante déficit de hasta casi un 50% en los últimos años. (DGA 2011). Estas se concentran en los meses de invierno, concentrándose el 80% de las precipitaciones entre los meses de Mayo a Agosto.

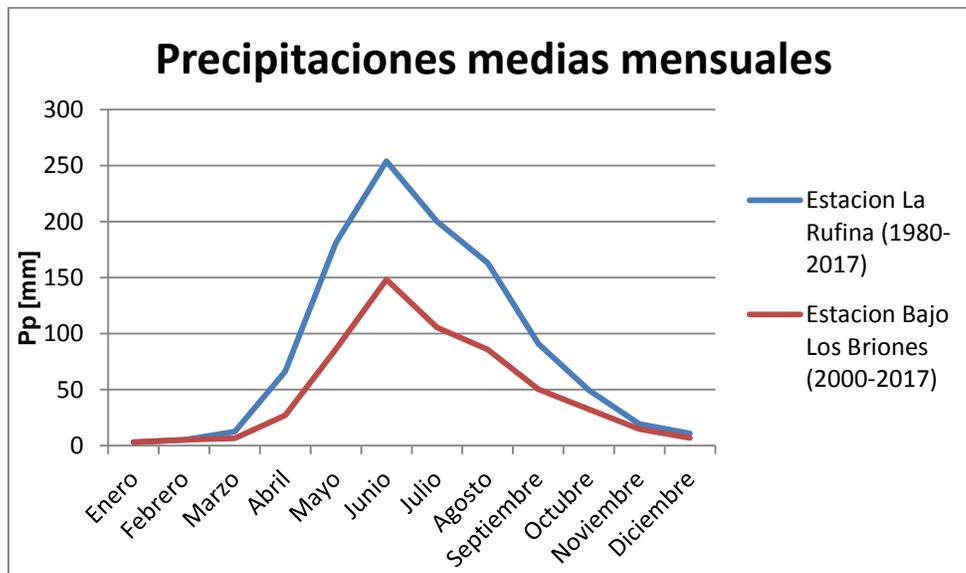


Figura 2.2. Precipitaciones media mensuales en las estaciones meteorológicas de la DGA en el área de estudio (Elaboración propia con datos de la DGA).

2.4 CENTROS POBLADOS Y USO DE SUELO

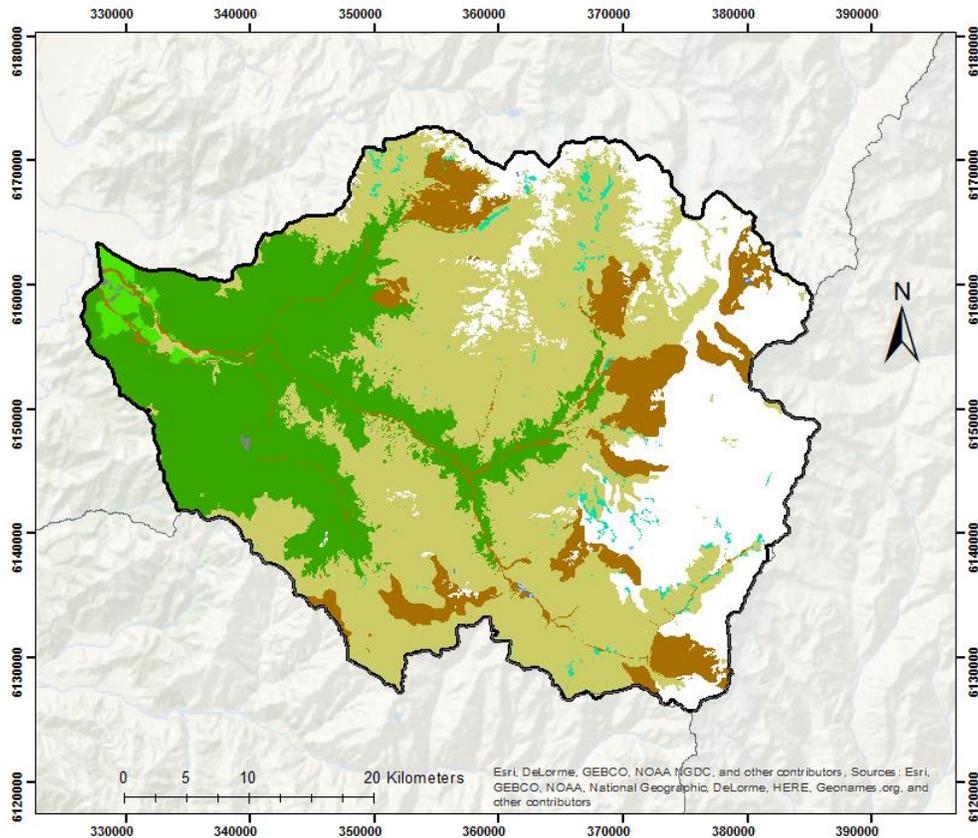
No existen grandes centros poblados en el valle del río Tinguiririca al Este de San Fernando, solo pequeños pueblos rurales que van decreciendo a medida que se entra a la zona cordillerana, con la excepción de la localidad de las Termas del Flaco, a 2650 msnm, que se ha desarrollado a partir del turismo que ofrecen las aguas termales de la zona. Otra actividad presente son las centrales hidroeléctricas de pasada La Confluencia y La Higuera. Así, la superficie urbanizada e industrializada representa menos del 0.1% del área total de la subcuenca Alto Tinguiririca, y el área destinada a la agricultura es tan solo cerca del 1% del total, concentrado en la parte del valle más cercana a la depresión central, donde aún presenta un ancho considerable (Conaf, 2013).

Por otro lado, al estar la subcuenca inmersa en la Cordillera de los Andes, cerca del 20% de la superficie corresponde a nieves eternas y glaciares, un 10% son terrenos en altura sin vegetación, un 40% del área son zonas de praderas y matorrales y un 20% son bosques en zonas más cercanas a los valles principales (Conaf, 2013).

Cerca del 1% del área total son humedales en los cauces principales de la red de drenaje, y el 0.05% son cuerpos de agua de alta montaña (Conaf, 2013).

Tabla 2.1. Áreas calculadas para cada uso de suelo en el área de estudio. Elaborado a partir de datos de CONAF (2013).

Uso del suelo	Área calculada [Km²]
Áreas sin vegetación	181.8
Urbano o industrial	1.53
Bosque	432.34
Cuerpos de Agua	0.74
Humedales	15.46
Nieves eternas y glaciares	396.36
Praderas o matorrales	792.18
Agrícola	20.64



Leyenda

Uso de Suelo

- Areas sin vegetacion
- Urbano o industrial
- Bosque
- Cuerpos de Agua
- Humedal
- Nieves eternas y glaciares
- Pradera o matorral
- Agricola

Figura 2.3 Uso de suelo en la subcuena Tinguiririca Alto (Elaboración propia a partir de datos de la CONAF 2013).

2.5 RELIEVE

La zona de estudio se encuentra enmarcada en la Cordillera de los Andes desde su borde occidental, por lo que el relieve en general es abrupto, con altas cumbres y valles angostos con pendientes que van decreciendo a medida que avanzan hacia el Oeste. Se destaca el complejo volcánico Tinguiririca, parte de la Zona Volcánica Sur Transicional (Stern et al., 2007), con más de 10 conos volcánicos de piroclastos y cuya última erupción data de 1917 (Arcos et al., 1988)

2.6 GEOMORFOLOGÍA

2.6.1 Morfoestructuras principales

En la zona central de Chile se distinguen varias unidades morfoestructurales dispuestas paralelas al borde continental con orientación NNE-SSO. A la latitud del área de estudio (~35°S) se pueden distinguir de oeste a este la Cordillera de la Costa, la Depresión Central y la Cordillera Principal.

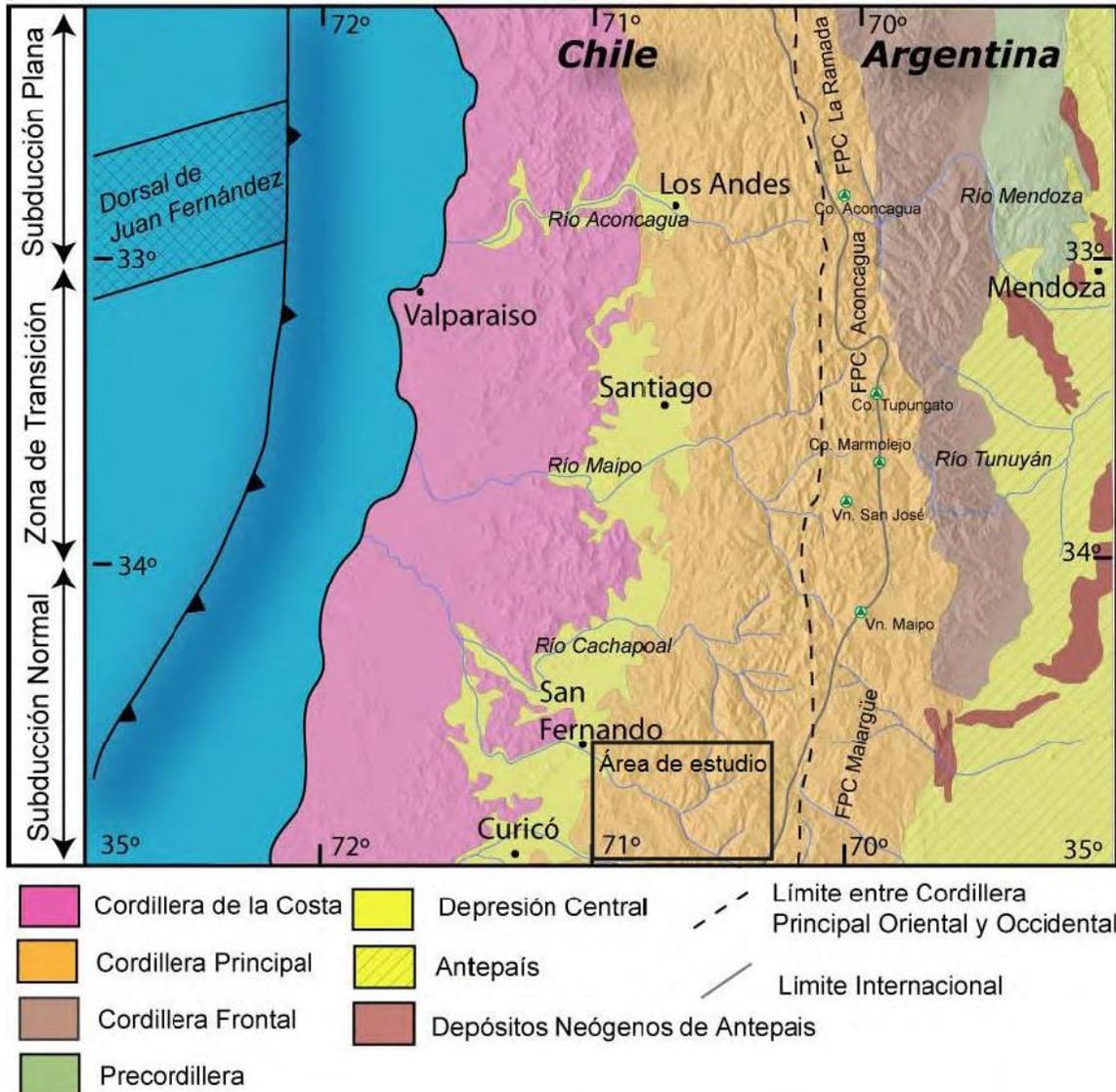


Figura 2.4. Principales unidades morfoestructurales de la zona central de Chile entre los 33° y 35°S. Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2003), y Tassara y Yañez (2003). Modificado de Fock (2005).

2.6.1.1 Cordillera de la Costa

La Cordillera de la Costa corresponde a un cordón montañoso cuya altura no sobrepasa los 2.200 m y se va a haciendo progresivamente más baja hacia el sur. Posee dos dominios principales, uno occidental con afloramientos de rocas

metamórficas del basamento paleozoico, e intrusivos carboníferos y jurásicos, y otro oriental con secuencias estratificadas del mesozoico intruidas por granitoides de edad Cretácico Temprano. (Wall *et al.*, 1999; Sellés y Gana, 2001)

2.6.1.2 Depresión Central

La Depresión Central corresponde al área entre dos altos topográficos: la Cordillera de la Costa al oeste y la Cordillera Principal al este. Es característico de la zona centro-sur de Chile entre los 33°S y los 40°S, y posee un relleno de depósitos fluviales, aluviales y volcánicos de edad Pleistoceno-Holoceno. (Thiele, 1980; Rauld, 2002).

2.6.1.3 Cordillera Principal

La Cordillera Principal corresponde a un cordón montañoso que se extiende desde los 33°S hasta los 46°S. Se puede dividir en dos franjas paralelas siendo la occidental compuesta por afloramientos de secuencias volcánicas y volcanosedimentarias de edad Cenozoica, intruidas por plutones de edad oligoceno hasta el presente, y la franja oriental dominada por afloramientos de secuencias sedimentarias mesozoicas, tanto continentales como marinas, y con intercalaciones volcánicas. La franja oriental se encuentra además fuertemente deformada, formando fajas plegadas y corridas. (Farías *et al.*, 2008)

En el área de estudio el límite entre ambas franjas está marcado por la Falla El Fierro, que es parte de un sistema de fallas que se extiende hacia el norte.

3 MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

3.1 GEOLOGÍA

3.1.1 Rocas estratificadas

Las rocas estratificadas del área de estudio corresponden a secuencias sedimentarias marinas y continentales de edad Mesozoico en el este, cubiertas por depósitos volcánicos y volcanoclásticos de edades Cretácico Tardío y Cenozoico hacia el oeste (Charrier *et al.* 2007).

3.1.1.1 Formación Rio Damas (Klohn, 1960)

Corresponde una secuencia sedimentaria continental de 3.000 m de espesor que aflora al este del área de estudio. Posee una característica coloración rojiza, y en su techo tiene un miembro volcanoclástico con lavas andesíticas y brechas volcánicas de 1.000 m de espesor (Charrier *et al.* 2007). Su contacto inferior no ha sido observado, y sobryace concordantemente a la Formación Baños del Flaco.

La edad asignada a esta formación es el Kimmeridgiano, por estar entre unidades fosilíferas marinas de edad Calloviana-Oxfordiana y Titoniana, respectivamente (Klohn, 1960; González y Vergara, 1962; Davidson, 1971).

3.1.1.2 Formación Baños del Flaco (Klohn, 1960)

Corresponde a una secuencia sedimentaria marina fosilífera, esencialmente calcárea de color blanco. Tiene un espesor de ~380 m con litologías que de base a techo son: una secuencia de areniscas verdes, seguida por una secuencia de calizas, areniscas calcáreas y margas que alternan con niveles finos de lutitas hacia el techo (Klohn, 1960; Arcos, 1987). Se presenta concordante en su base con la Formación Rio Damas, y subyace con una discordancia erosiva a la Unidad BRCU (Charrier *et al.*, 1996).

Lo niveles fosilíferos en esta formación poseen especies de ammonites que permiten otorgarle una edad Titoniano (Covacevich *et al.*, 1976), y a la vez la correlacionan con la Formación Lo Valdés que afloran más al norte, a la latitud de la ciudad de Santiago.

3.1.1.3 Unidad BRCU (Charrier *et al.*, 1996)

Corresponde a una unidad estratificada clástica continental de color café rojizo de ~300 m de espesor. Aflora en la localidad de Termas del Flaco, tanto en la ladera norte como en la ladera sur del valle del río Tinguiririca. Se compone de una brecha en su base, seguido de conglomerados y areniscas gruesas con intercalaciones de niveles más finos de areniscas y lutitas. Sobryace en discordancia erosiva a la Formación Baños del Flaco, y subyace en discordancia a la Formación Abanico.

Dataciones U-Pb en circones detríticos periten asignarle una edad de máxima depositación de 94 Ma (Tapia et al., 2015), lo que concuerda la edad de fósiles de dinosaurios encontrados en los miembros superiores, de edad Cretácico Medio a Tardío (Charrier et al., 1996).

3.1.1.4 Formación Abanico (Aguirre, 1960)

Corresponde a una secuencia volcanosedimentaria de 2.500 m de espesor, compuesta por lavas andesíticas y basálticas, tobas y depósitos piroclásticos intercalados con depósitos fluviales, aluviales y lacustres (Charrier et al., 2002). En la zona del río Tinguiririca se puede separar en dos secuencias de rocas estratificadas (Zapatta, 1995), donde la sucesión oriental posee restos de mamíferos fósiles.

Sobreyace en discordancia angular a la Unidad BRCU, y más al oeste subyace también en discordancia angular a la Formación Farellones (Charrier et al., 2002).

Se le asigna una edad Eoceno Medio-Oligoceno por presencia de fósiles y dataciones radiométricas (Charrier et al., 2002).

3.1.1.5 Formación Farellones (Klohn, 1960)

Corresponde a depósitos volcánicos de más de 2.000 m de espesor. Su composición es de lavas andesíticas a riolíticas, con intercalaciones volcanoclásticas y sedimentarias. Se presenta en discordancia angular tanto con la Formación Abanico que la subyace, como con el Volcanismo Cuaternario que lo sobreyace. (Charrier et al., 1996; Tapia et al., 2015)

Se le asigna una edad Mioceno a esta formación por dataciones radiométricas de K-Ar (Drake et al., 1976) y U-Pb (Fock, 2005).

3.1.1.6 Volcanismo Cuaternario

Se compone de los depósitos volcánicos modernos del Grupo Volcánico Tinguiririca y de los cerros Alto del Padre y volcán Sordo de Lucas. Su composición corresponde a andesitas basálticas y andesitas de olivino y piroxeno, ignimbritas andesíticas, brechas piroclásticas y tobas líticas (Charrier et al., 1996). El Volcanismo cuaternario sobreyace en forma discordante a las secuencias mesozoicas y cenozoicas de la región, que fueron previamente deformadas. (Charrier et al., 1996; Tapia et al., 2015),

3.1.2 Depósitos no consolidados

Esta unidad corresponde a los depósitos no consolidados en el área de estudio, los cuales se concentran en las cercanías del valle del río Tinguiririca, influenciados por este mismo y la topografía de la zona (SERNAGEOMIN, 2003).

3.1.2.1 Depósitos de avalancha volcánica

Corresponden a depósitos de avalanchas volcánicas ocasionadas por el colapso de edificios volcánicos (SERNAGEOMIN, 2003).

3.1.2.2 Depósitos fluviales (Qf)

Corresponden a gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos de la zona de estudio, y también de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación. Sus edades van del Pleistoceno a la actualidad (SERNAGEOMIN, 2003).

3.1.2.3 Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa (Q1)

Corresponden a abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvio-glaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos (SERNAGEOMIN, 2003).

3.1.3 Rocas intrusivas

En el área de estudio las rocas intrusivas se ven representadas por granodioritas, andesitas basálticas porfíricas y pórfidos andesíticos de edad Mioceno Inferior a Medio en la parte occidental de la Cordillera Principal (Contreras & Schilling, 2012), así como también por granodioritas y monzogranitos en la parte oriental de edad Mioceno Superior (SERNAGEOMIN, 2003).

La zona estudiada por Zapatta (1995), en los alrededores del río Tinguiririca, presenta afloramientos de rocas intrusivas que corresponden a filones, diques y pequeños stocks con un alto grado de alteración. Los divide en dos grupos, uno que intruye a la unidad BRCU de edad post-Cretácico Superior, y otro que intruye a la serie Terciaria de edad post-Mioceno Inferior.

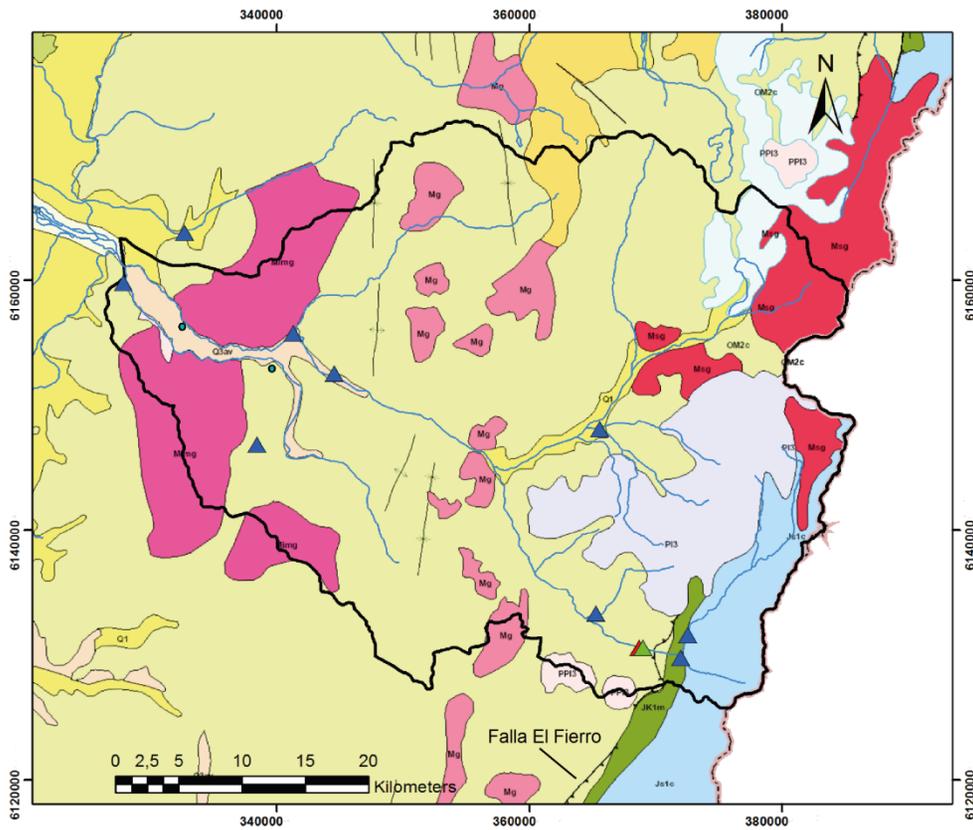
3.1.4 Estructuras

Las unidades que afloran en el área de estudio han sido deformadas por diversos procesos, característicos de la evolución del margen andino. Es así como la edad de una refleja los eventos del pasado.

Por un lado se tienen las unidades mesozoicas que forman la franja oriental de la Cordillera Principal, con un rumbo NNE y manteos entre 40°-50° hacia el oeste. Estas a su vez son la parte más occidental de la Faja Plegada y Corrida de Malargüe (Tapia et al., 2015).

Por otro lado se tienen las unidades cenozoicas en la parte occidental de la Cordillera Principal, con rumbo NNE y muy deformadas, donde se observan pliegues tanto sinclinales como anticlinales, de orientación N-S y vergencia de preferencia al este. (Farías et al., 2008; Tapia et al., 2015)

La estructura más importante en el área de estudio es la Falla El Fierro (Davidson, 1971), que se conoce a la altura de Santiago (~33°) como Falla El Diablo (Fock et al., 2005). Esta es una falla inversa, con rumbo NNE y un manteo de ~40° al oeste. Se puede observar en el valle del río Tinguiririca en la localidad de Termas del Flaco, donde cabalga la Formación Abanico y la Unidad BRCU sobre la Formación Baños del Flaco (Persico, 2016)



Simbología

- Falla Inversa
- Pliegue Anticlinal
- Pliegue Sinclinal
- Área de estudio

Era		Periodo	Secuencias Volcánicas y Sedimentarias	Rocas Intrusivas
Cenozoico	Cuaternario	Q1	Pleistoceno-Holoceno Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa, en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciales con intercalación de depósitos volcanoclasticos.	
		Qf	Pleistoceno-Holoceno Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los rios mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.	
		Q3av	Cuaternario Depósitos de avalancha volcánica, asociados a colapso parcial de edificios volcánicos. En la Cordillera Principal, regiones I a VI: avalanchas de Parinacota, Ollagüe, Socompa, Colón-Coya y Teno.	
Cenozoico	Neógeno	P13	Pleistoceno Secuencias lávicas y centros volcánicos básicos e intermedios; depósitos piroclásticos andesítico-basálticos. En la Cordillera Principal, regiones Metropolitana a X.	
		PPI3	Plioceno-Pleistoceno Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados. En la Cordillera Principal, regiones VII a X: formaciones Cola de Zorro y Malleco; en la Cordillera Patagónica, región XII: basaltos de Pail Aike; en las islas oceánicas: volcán Poike (Isla de Pascua), archipiélago Juan Fernández, isla Salas y Gómez; islas San Félix y San Ambrosio.	M3i Mioceno Superior (13-7 Ma) Granodioritas de hornblenda y biotita, en menor proporción monzogranitos, monzonitas cuarcíferas y monzodioritas. En la Cordillera Principal, regiones Metropolitana y VI: plutones La Gloria y San Gabriel.
Cenozoico	Paleógeno	M3i	Mioceno Inferior-Medio Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas. En la Cordillera Principal, regiones I a VIII: complejos volcánicos Doña Inés y Ojos de Maricunga; formaciones Cerro Las Tortolas y Farellones.	Mg Mioceno (18-6 Ma) Granodioritas, dioritas y tonalitas. En la Cordillera Principal, regiones VII a X; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: franja central del Batolito Norpatagónico y plutones orientales: plutones Liquiñe, San Lorenzo, Paso Las Llaves y Torres del Paine.
		OM2c	Oligoceno-Mioceno Secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epilásticas y piroclásticas. En la Cordillera Principal, regiones I a IX: formaciones Lupica, Escabroso, Abanico, Coya-Machali, Cura-Mallin (inferior).	Mimg Mioceno Inferior-Medio (22-16 Ma) Granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, monzonitas y dioritas de biotita y hornblenda. En Cordillera Principal, regiones V y Metropolitana: Plutón La Obra.
Mesozoico	Jurásico	JK1m	Jurásico Superior-Cretácico Inferior Secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformas: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas. En la Precordillera, región III: Formación Pedemales; en la Cordillera Principal, regiones Metropolitana y VI: formaciones Lo Valdés, Baños del Flaco; en las regiones XI a XII: Grupo Coihaique y formaciones La Paciencia, Erezcano, Zapata, Sutherland, Río Jackson, Vicuña y Yaghan.	
		Js1c	Jurásico Superior Secuencias sedimentarias continentales y transicionales, en parte lacustres: brechas sedimentarias, conglomerados y areniscas rojas con intercalación de tobas y niveles evaporíticos. En la Cordillera Principal, regiones Metropolitana y VI: formaciones Río Damas y Leñas-Espinoza.	

Figura 3.1. Geología regional del área de estudio. Elaboración propia en base a mapa geológico de Chile 1:1000000 de Sernageomin (2003)

3.2 HIDROGEOLOGÍA

3.2.1 Hidrografía

La cuenca de Tinguiririca Alto está definida por la DGA (código 0602) como una subcuenca de la cuenca Rapel (código 060). Su cauce principal es el río Tinguiririca, con una extensión de 228.185 m, y un caudal medio anual de 50,2 m³/s medido en la estación "Tinguiririca bajo Los Briones". Este nace en la Cordillera Principal casi en el límite de Chile con la Republica Argentina, y viaja en dirección NO hasta la ciudad de San Fernando, luego se torna al oeste hasta Santa Cruz, para finalmente girar hacia el norte y desembocar en el lago Rapel.

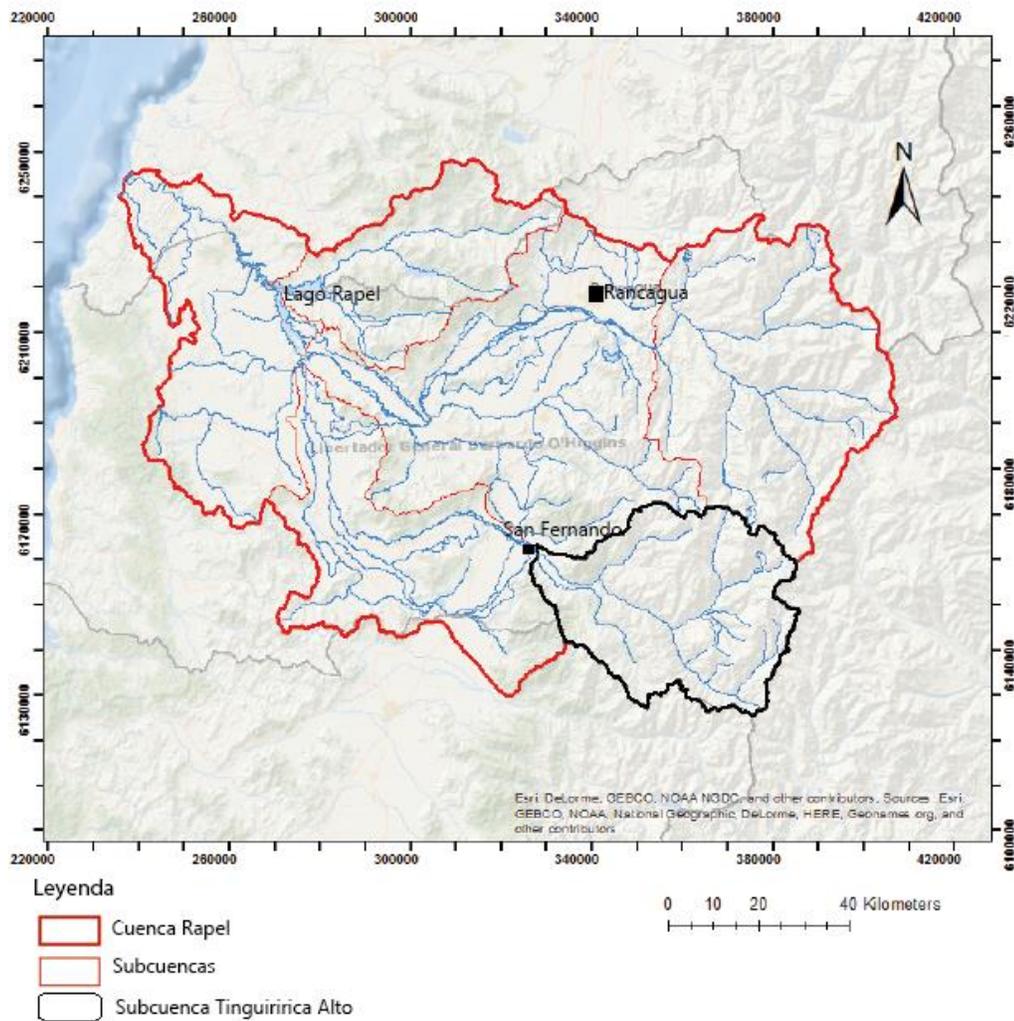
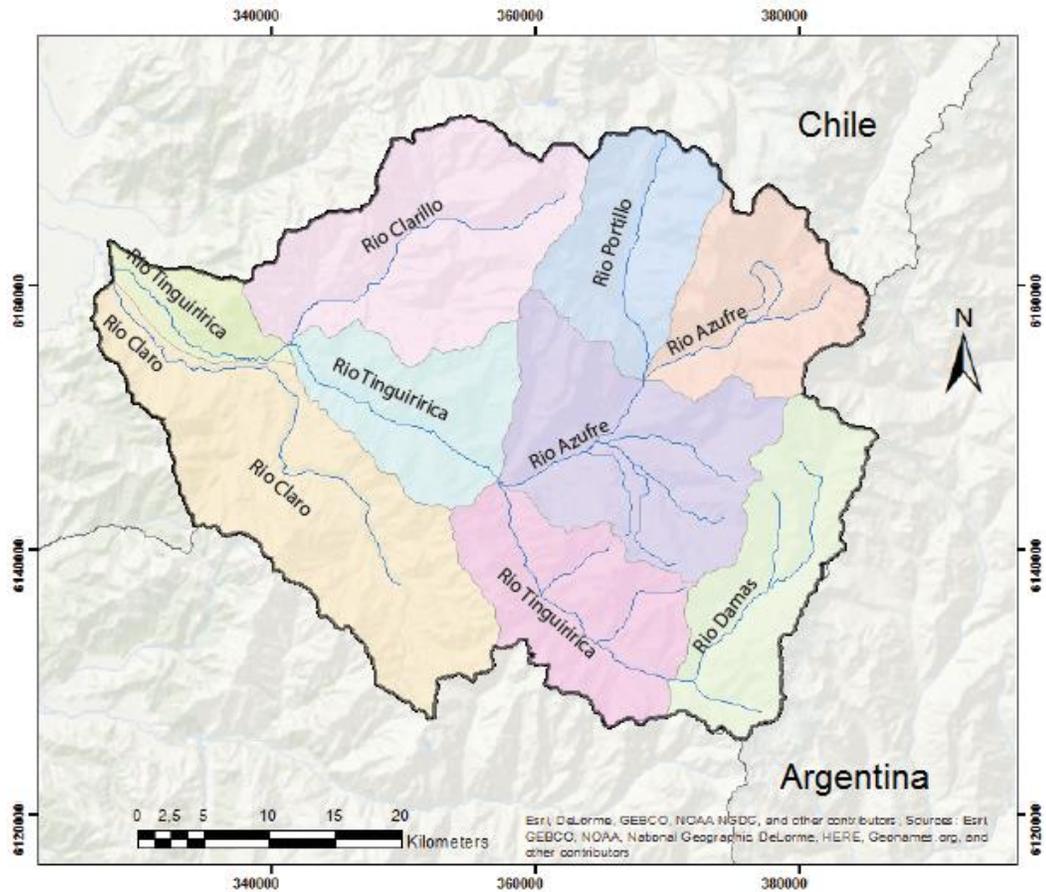


Figura 3.2. Mapa de la Cuenca Rapel y sus subcuencas. Elaboración a partir de datos de la DGA (2005).

Esta subcuenca está dividida a su vez en 9 sub-subcuencas, que componen la red de drenaje donde destacan los aportes de los ríos Damas, Azufre, Claro y Clarillo.

Tabla 3.1. Sub-subcuencas del área de estudio con sus áreas respectivas. Elaborado a partir de datos de la DGA (2005).

Sub-subcuenca	Código BNA	Área [km2]
Rio Tinguiririca hasta bajo junta Rio Las Damas	06020	187,22
Rio Tinguiririca entre rio Las Damas y rio Azufre	06021	193,51
Rio Portillo	06022	159,55
Rio Azufre hasta rio Portillo	06023	166,88
Rio Azufre entre rio Portillo y Rio Tinguiririca	06024	265,18
Rio Tinguiririca entre rio Azufre y rio Clarillo	06025	157,56
Rio Clarillo	06026	286,28
Rio Claro	06027	364,49
Rio Tinguiririca entre rio Clarillo y bajo junta rio Claro	06028	62,34



Leyenda

Sub-subcuencas

- Rio Tinguiririca hasta bajo junta Río Damas
- Rio Tinguiririca Entre Rio Las Damas y Rio delAzufre
- Rio Portillo
- Rio Azufre hasta Rio Portillo
- Rio Azufre entre Rio Portillo y Rio Tinguiririca
- Rio Tinguiririca entre Rio Azufre y Rio Clarillo
- Rio Clarillo
- Rio Claro
- Rio Tinguiririca Entre Rio Clarillo y Bajo Junta Rio Claro

Figura 3.3. Mapa de las sub-subcuencas de la subcuenca Tinguiririca Alto, con sus códigos BNA y sus principales ríos. Elaboración propia a partir de datos de la DGA (2005).

3.2.2 Precipitaciones

Las precipitaciones anuales en el área de estudio parten desde los 700 mm en la parte más baja de la cuenca, hasta los 2500 mm en los sectores más altos en el límite con Argentina. Se elabora un mapa de precipitaciones donde se puede ver cómo van aumentando las precipitaciones a medida que aumenta la altura, concentrándose las zonas de menor precipitación en los valles principales.

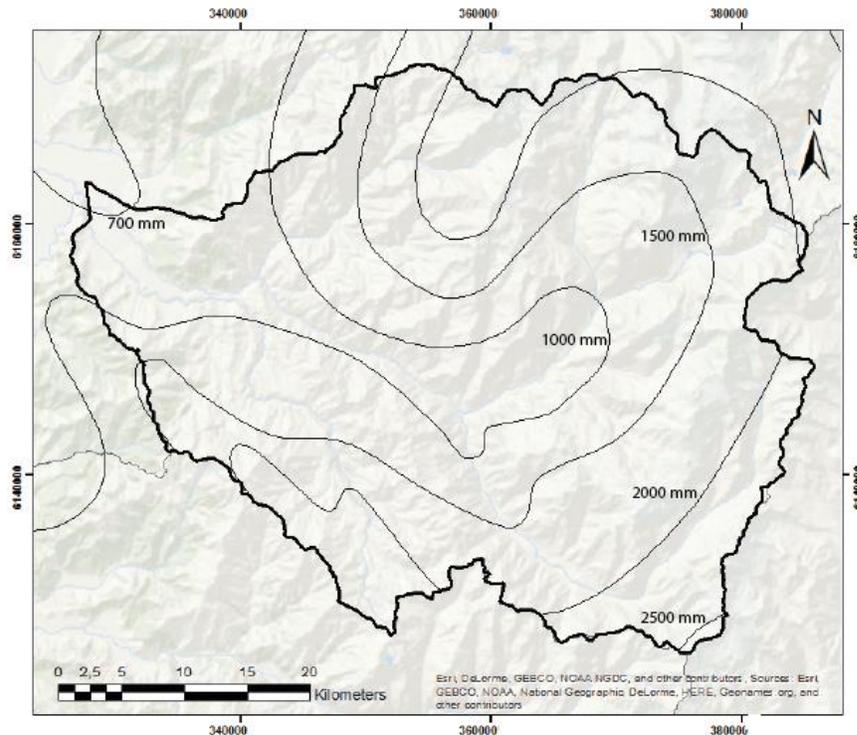


Figura 3.4. Mapa de isoyetas de la zona de estudio. Elaboración propia a partir de datos de la DGA.

3.2.3 Acuíferos

De acuerdo a la Mapa Hidrogeológica de Chile de Sernageomin (1986), la zona de estudio se encuentra rocas con muy baja permeabilidad y no constituyen un acuífero. Sin embargo, en un informe de aguas subterráneas de la VI Región realizado por la DGA (2015) se detallan la zona como de permeabilidad alta a media, basándose en información de la carta Hidrogeológica de la Región de Hauser (1990).

Según el informe sobre aguas subterráneas de la región hecho por la DGA (2005) las aguas de la subcuenca Tinguiririca Alto drenan hacia donde se encuentra el acuífero Tinguiririca, ya en el relleno sedimentario que conforma la depresión central. En esa zona el acuífero presenta una vulnerabilidad moderada a alta (Sernageomin, 2006) y medidas en pozos muestran que suele tener altos niveles de nitratos. El acuífero San Fernando es la parte más oriental del acuífero Tinguiririca, y que por lo tanto recibe las aguas directamente de la zona de estudio, está declarado como área de restricción desde el año 2011 (DGA, 2005).

3.2.4 Red hidrométrica

La DGA realiza periódicamente un monitoreo de parámetros meteorológicos, sedimentométricos, fluviométricos y de calidad del agua en las diversas cuencas a lo largo del país. En la subcuenca Tinguiririca Alto existen 5 estaciones de medición vigentes y sus reportes son continuamente publicados por el Sistema Nacional de Información de Aguas (SNIA). El detalle de estas se encuentra en el Anexo G y su ubicación en la figura 3.5.

Las mediciones fluviométricas constan de la toma de datos de caudal y altura limnigráfica varias veces al día. Esto se realiza en las estaciones “Rio Claro en El Valle” y “Rio Tinguiririca Bajo Los Briones”. Esta última también funciona como estación sedimentométrica, donde se evalúa diariamente la carga de sedimentos y el gasto.

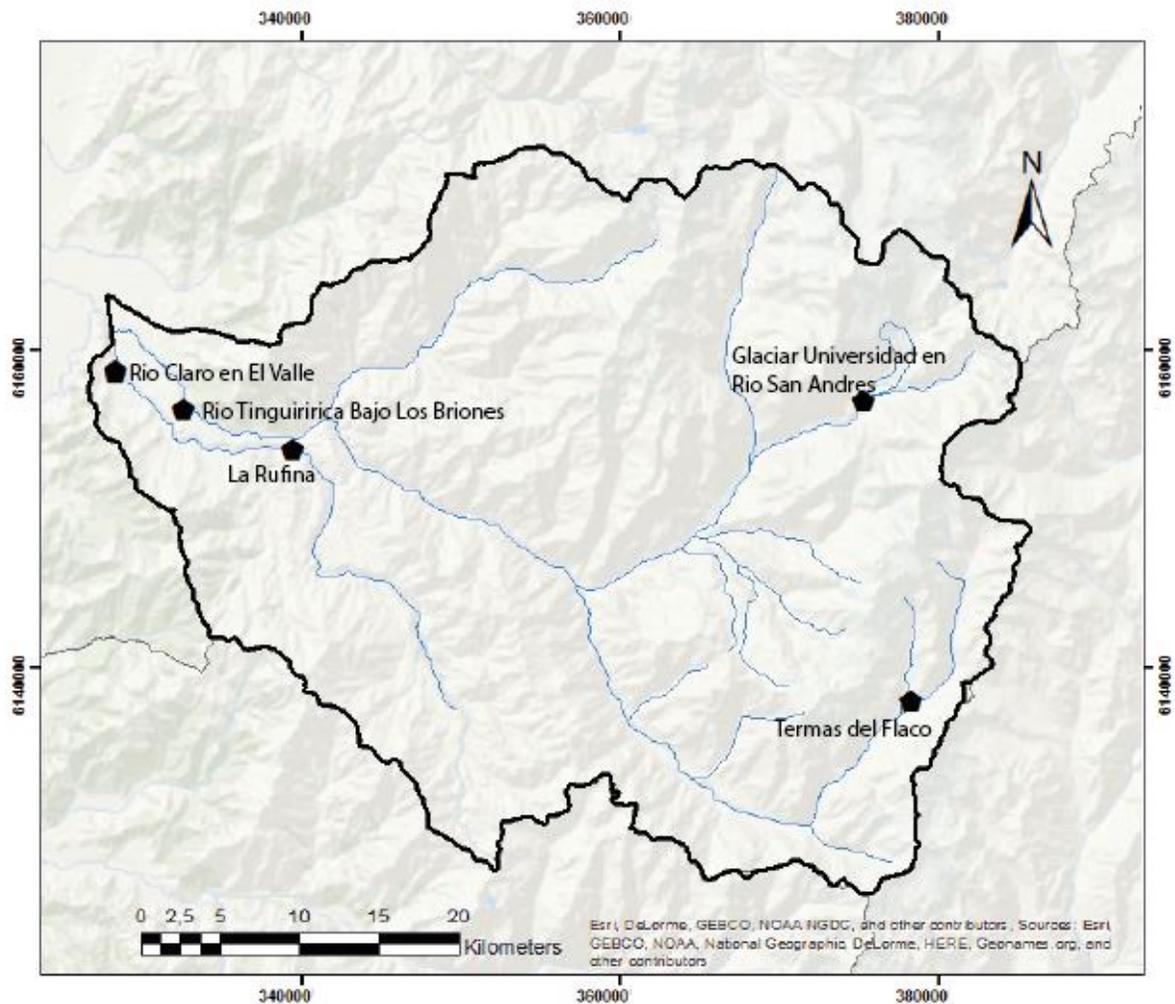


Figura 3.5. Mapa de las Estaciones de monitoreo de la DGA en la cuenca Tinguiririca Alto. Elaboración propia a partir de datos de la DGA.

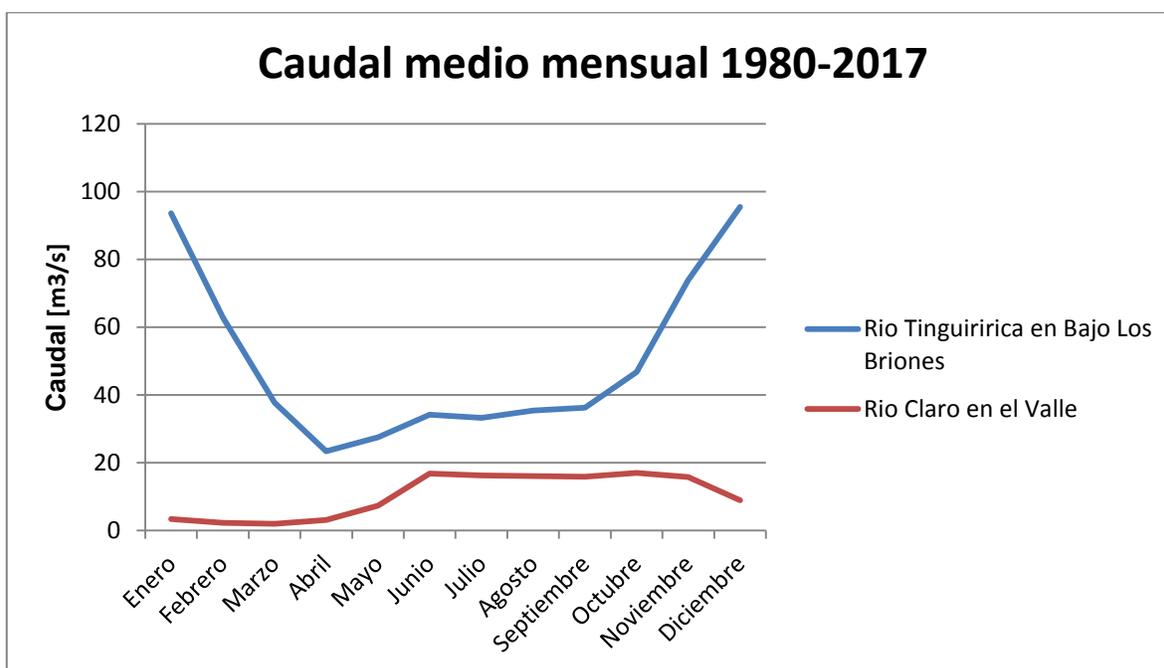


Figura 3.6. Caudales medios por mes de los ríos Tinguiririca y Claro entre 1980 y 2017. Elaboración propia a partir de datos de la DGA.

Los caudales medios mensuales en los ríos Tinguiririca y Claro muestran que la cuenca tiene un régimen mixto, siendo el primero principalmente de carácter nival, con los mayores caudales en verano entre los meses de Noviembre y Febrero producto del derretimiento de nieve y hielos glaciales en las partes altas del valle, y el segundo de carácter pluvial, con los mayores caudales entre Junio y Octubre, producto del invierno lluvioso que caracteriza la zona de estudio.

Tabla 3.2. Caudal del río Tinguiririca en la estación de monitoreo Bajo Los Briones. Elaborado a partir de datos de la DGA entre 1980 y 2017.

Caudal río Tinguiririca en Bajo Los Briones [m³/s]				
Mes	Promedio	Max.	Min.	Desv. Est.
Enero	93,6	205,8	45,5	33,5
Febrero	62,8	104,2	34,7	18,5
Marzo	37,7	71,3	23,7	11,1
Abril	23,3	53,3	10,7	9,1
Mayo	27,5	75,2	9,9	15,7
Junio	34,1	101,4	9,3	22,2
Julio	33,2	75,5	10,5	20,4
Agosto	35,4	115,6	10,9	22,7
Septiembre	36,2	81	12	15,3
Octubre	46,7	71,7	20,1	13,4
Noviembre	73,9	119	29,3	22,1
Diciembre	95,5	147	43,5	31,2

Tabla 3.3. Caudal del río Claro en la estación de monitoreo El Valle. Elaborado a partir de datos de la DGA entre 1980 y 2017.

Caudal río Claro en El Valle [m³/s]				
Mes	Promedio	Max.	Min.	Desv. Est.
Enero	3,3	11,8	0,37	2,9
Febrero	2,2	13,5	0,2	2,3
Marzo	1,9	20,4	0,3	3,2
Abril	3,1	18,4	0,4	3,9
Mayo	7,3	28,3	0,7	7,8
Junio	16,8	70,5	1	16,5
Julio	16,2	51	2,2	13,5
Agosto	16	60,5	0,9	12,5
Septiembre	15,8	41,5	2,6	8,4
Octubre	17	35,8	2,9	7,7
Noviembre	15,7	34,1	1	8,6
Diciembre	8,9	29,5	0,3	7,5

Las estaciones meteorológicas en la cuenca son “Río Tinguiririca Bajo Los Briones”, “Termas del Flaco”, “Glaciar Universidad en Río San Andrés” y “La Rufina”, donde se reportan continuamente las precipitaciones y la temperatura.

Además en la estación Bajo Los Briones se hacen reportes de la calidad de aguas superficiales 4 veces al año. En el Anexo H se detallan los reportes entre los años 2014-2017, con los elementos que son cuantificados y las variables fisicoquímicas que son medidas. Se ve que la conductividad específica de las muestras tiende a ser mayor en los meses de invierno, lo que se relaciona con la disminución de los caudales en esos meses observados en la figura 3.6 y la tabla 3.2.

En el Anexo H también se encuentra una comparación entre los reportes de calidad de aguas con las normas chilenas N.Ch.409 (INN, 2005) y N.Ch.1333 (INN, 1978), donde la totalidad de las muestras se encuentran excediendo los valores límites, ya sea por elementos metálicos pesados (Hg, Pb, Mn, As, Al, Fe principalmente) o por su pH. Cabe destacar que estos resultados no son concluyentes, ya que no se pudo efectuar el cálculo del error del balance iónico de las muestras para validarlas, por la falta de las concentraciones de bicarbonato (HCO_3^-), y porque la normativa exige un protocolo específico de muestreo y medición de los parámetros.

La zona de estudio no cuenta con pozos para realizar medición de niveles estáticos.

4 RESULTADOS

4.1 HIDROGEOQUÍMICA

Durante el verano del año 2017 se recolectaron 12 muestras de agua en distintos puntos de la cuenca Alto Tinguiririca (Figura 4.1). Estas corresponden en su mayoría a aguas superficiales, con excepción de las muestras LD4 y LD5 que fueron obtenidas de las piscinas termales en la localidad de Termas del Flaco, y la muestra LD10 que fue tomada de una vertiente en la misma localidad. Además la muestra LD3 fue obtenida del estero Antivero, el cual forma parte de la cuenca del río Cachapoal, pero que está conectado con el río Tinguiririca por medio de canales artificiales aguas abajo, cerca de la ciudad de San Fernando.

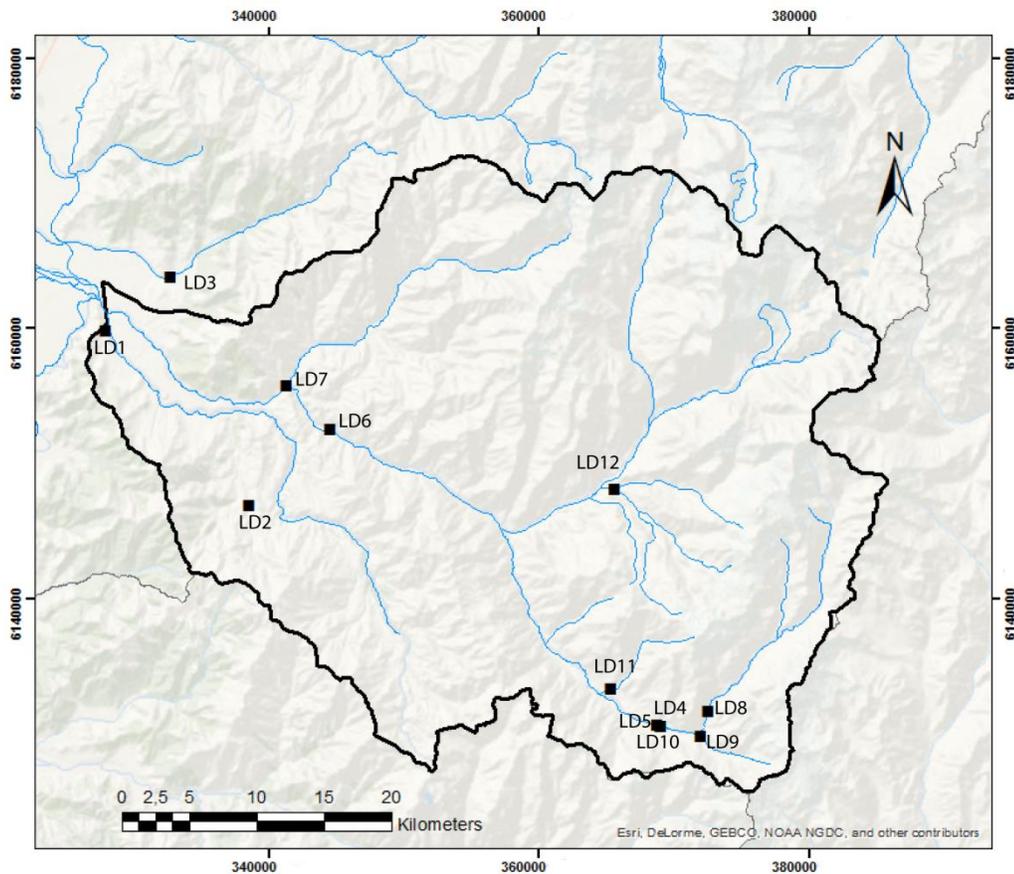


Figura 4.1. Ubicación puntos de muestreo

Los parámetros fisicoquímicos medidos in situ y el pH medido en laboratorio se sintetizan en la tabla 4.1. Las temperaturas registradas para las aguas superficiales son variables y están dentro del rango 12,7 – 21,9 °C, siendo menores a medida que aumenta la altura. Las muestras LD4 y LD5 contrastan notablemente con el resto al superar los 50°C, ya que fueron obtenidas en el punto donde afloran, para luego ser

usadas en las piscinas termales. De igual manera la muestra LD10 supera en gran medida la temperatura de las aguas superficiales de una altura similar, pero no llegan a los niveles de las muestras LD4 y LD5, a pesar de que afloran en la misma localidad.

El pH medido es en general neutro a levemente alcalino, con excepción de la muestra LD8 que presenta un pH ácido. La conductividad eléctrica es variable, entre 90 y 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para las muestras de agua superficial y entre 3000 y 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para las aguas termales. Los valores más altos se encuentran en la parte alta de la cuenca.

Tabla 4.1. Ubicación de los puntos de muestreo y parámetros fisicoquímicos medidos.

Ubicación	Código	UTM N	UTM E	Altura (m)	T (°C)	pH in situ	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Río Claro	LD1	6159818	327904	481	21,9	8,2	127,7
Estero Tumunan	LD2	6146870	338478	924	20,8	8,2	90,3
Estero Antivero	LD3	6163820	332732	548	20,5	7,9	124,3
Termas del Flaco	LD4	6130547	368990	1714	57,3	6,6	3770
Termas del Flaco	LD5	6130578	368677	1715	62,3	7,1	5010
Río Tinguiririca	LD6	6152522	344560	750	19,9	5,5	317
Río Clarillo	LD7	6155742	341318	693	21,1	8	131,7
Río Damas	LD8	6131596	372512	2008	15,5	4,8	236
Río Tinguiririca	LD9	6129759	371954	1844	12,7	7,8	779
Termas del Flaco	LD10	6130566	368974	1729	22,2	7,5	403
Arroyo del Guanaco	LD11	6133312	365281	1611	14,6	8	117,3
Río Azufre	LD12	6148104	365556	1457	16,5	7,6	210,1

4.1.1 Análisis químico de las aguas

4.1.1.1 Elementos mayores

Los resultados del análisis químico para elementos mayores se presenta en la Tabla 4.2 y el detalle de la instrumentación utilizada se encuentra en el Anexo A y D respectivamente. El catión más abundante en las aguas muestreadas es el Calcio, con la excepción de las muestras LD4 y LD5 que presentan mayores concentraciones de Sodio y considerablemente alto Potasio. Con respecto a los aniones, para la mayoría de las muestras el más abundante es el bicarbonato, seguido del sulfato y en las muestras termales predomina el cloruro. El nitrato fue solo detectado en tres de las muestras y el fosfato en ninguna.

La sílice presenta mayores concentraciones en las aguas termales, seguida de la muestra LD3 tomada en el estero Antivero. En las aguas superficiales de la cuenca se encuentra dentro del rango 6,6-19,2 mg/l.

El balance iónico calculado de las muestras tiene a ser alto en las aguas superficiales, pero no llega a superar el 10%. En las aguas termales LD4 y LD5 es menor al 1%, principalmente por los altos contenidos de Sodio y Cloruro. Al usar el software PHREEQC se obtiene un valor más fidedigno, y en general los resultados obtenidos son más cercanos al 0% de error, siendo la muestra LD9 la única que supera el 5%, con un error de 6,3%.

La muestra LD10 presenta valores de Sodio, Potasio, bicarbonato y cloruro mayores que las aguas superficiales, pero bastante menores que las aguas termales.

Las muestras LD8 y LD9 se encuentran en la parte más alta de la cuenca, y presentan características distintivas. En la Muestra LD8 no fue detectado el bicarbonato, y presenta valores relativamente altos de Calcio y sulfato (34,1 y 110 mg/l resp.). Por su parte, la muestra LD9 presenta los valores más altos de Calcio, Magnesio y sulfato (159, 5,62 y 341 mg/l resp.) en el área de estudio.

Tabla 4.2. Resultados del análisis químico para los elementos mayores y el respectivo balance iónico [1] calculado manualmente y [2] usando el software PHREEQC.

Muestra	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ⁺² (mg/l)	Mg ⁺² (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻² (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	B.I. (%) _[1]	B.I. (%) _[2]
LD1	5,1	0,85	18,2	2,65	0,83	13,1	56,7	< 0,1	14,8	5,5	-2,1
LD2	4,82	0,35	14,2	2,41	0,31	6,39	52,3	< 0,1	14,9	5,9	-2,7
LD3	8,14	0,35	18,5	3,47	0,82	10,1	71,2	< 0,1	23,4	5,7	-2,6
LD4	586	60,3	80,1	3,52	884	173	143,8	1,11	82,5	0,8	0,2
LD5	741	79,1	101	5,3	1186	163	156,4	< 0,1	104	0,5	0,1
LD6	11,6	1,77	35,2	4,33	9,2	60,9	45,3	< 0,1	15	7,9	4,8
LD7	3,93	0,42	18,9	1,75	0,62	16,4	43,8	< 0,1	8,7	8,1	1,3
LD8	3,1	1,2	34,1	3,89	0,445	110	< 1	0,09	9,3	-2,7	-0,9
LD9	11,2	0,86	159	5,62	4,15	341	39,8	< 0,1	6,6	6,1	6,3
LD10	21,9	2,77	53,2	3,76	41,3	23	125,4	< 0,1	15,6	3,7	-1,9
LD11	3,66	1,05	17,3	2,15	0,22	23,8	33,6	< 0,1	19,2	7,6	2,4
LD12	8,38	2,01	26,6	4,59	6,93	58,2	30,8	0,23	17,2	5,1	2,6

4.1.1.2 Clasificación de las aguas

La clasificación de las aguas muestreadas en este estudio se realiza mediante un Diagrama de Piper, el cual se obtiene graficando las proporciones en miliequivalentes de las concentraciones de cationes y aniones mayores en distintos triángulos y luego intersectándolos en un cuadrilátero. El diagrama de la figura 4.2 muestra las doce muestras de la tabla 4.2, distinguiendo 5 grupos principales de aguas. El más distintivo lo componen las muestras LD4 y LD5, que corresponden a aguas tipo clorurada sódica (grupo E). En las demás predomina el Calcio como catión principal, por lo que las diferencias son por la proporción de bicarbonato y sulfato. El grupo A lo componen las muestras LD8 y LD9, y son sulfatadas cálcicas, con muy baja participación de otros elementos. Al grupo B pertenecen las muestras LD6 y LD12, y son también sulfatadas cálcicas pero con mayor contenido de bicarbonato y Sodio-Potasio que las del grupo A. Las muestras LD10 y LD11 se agrupan en el grupo C y corresponden a aguas bicarbonatadas-sulfatadas cálcicas, sin embargo la muestra LD10 contiene un alto contenido de cloruro por ser un agua de vertiente. Finalmente las muestras LD1, LD2, LD3 y LD7 componen el grupo D, y se clasifican como bicarbonatadas cálcicas.

La figura 4.3 muestra los diagramas de Stiff en los puntos de muestreo. Estos diagramas separan los aniones a la derecha y los cationes a la izquierda, mostrando tres líneas horizontales de igual escala para visualizar cuales tienen mayor concentración. En forma descendente están el Na+K, Ca y Mg, y el Cl, SO₄, y HCO₃, todos con sus concentraciones en meq/l. Las distintas formas de las figuras permiten agrupar distintos tipos de aguas.

Se observa una variación de las formas al avanzar las aguas hacia el W. Los diagramas para las muestras LD6, LD7, LD8, LD9 y LD12 son de forma romboidal, predominando el Ca y el SO₄. Se destaca la muestra LD9 por las altísimas concentraciones de estos

parámetros que hacen que la figura se vea bastante más grande que las demás. La figura para la muestra LD10 tiene forma de flecha, presentando altas concentraciones de Ca, Na+K, y HCO₃, y evidenciando diferencias con las aguas superficiales. La muestra LD11 también tiene una forma distinta, principalmente por los bajos niveles de sulfato, que podrían tener relación con la ausencia de niveles evaporíticos de yeso en el área del arroyo del Guanaco, donde fue obtenida.

Las muestras LD1, LD2 y LD3 muestra una forma parecida a la muestra LD11, siendo las principales especies el Ca y el HCO₃. Al igual que la muestra LD11, fueron obtenidas en ríos y arroyos que no pasan por zonas con rocas evaporíticas, y que se encuentran en la parte Oeste del área de estudio.

Las muestras LD4 y LD5 presentan una forma de pirámide invertida, normalmente encontrada en aguas termales de alta salinidad.

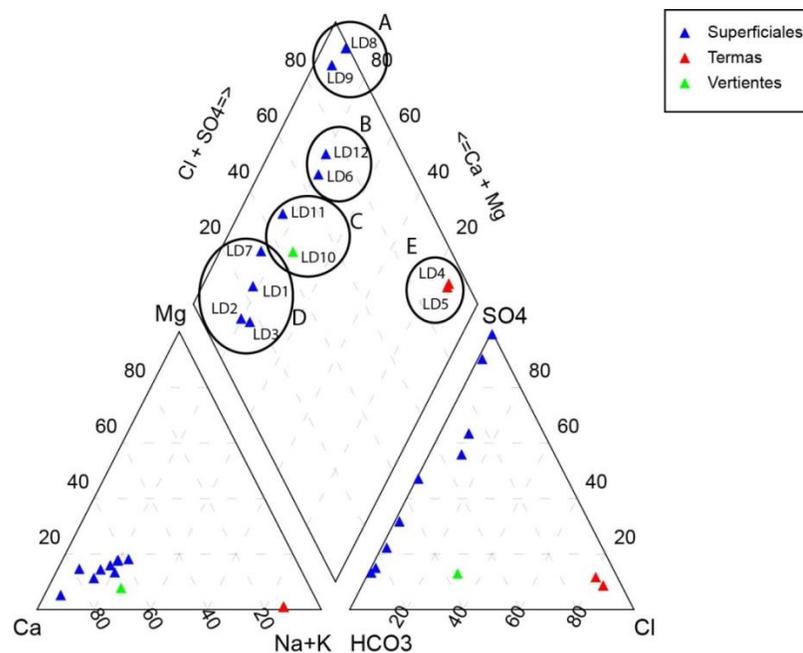


Figura 4.2. Diagrama de Piper de las muestras de agua.

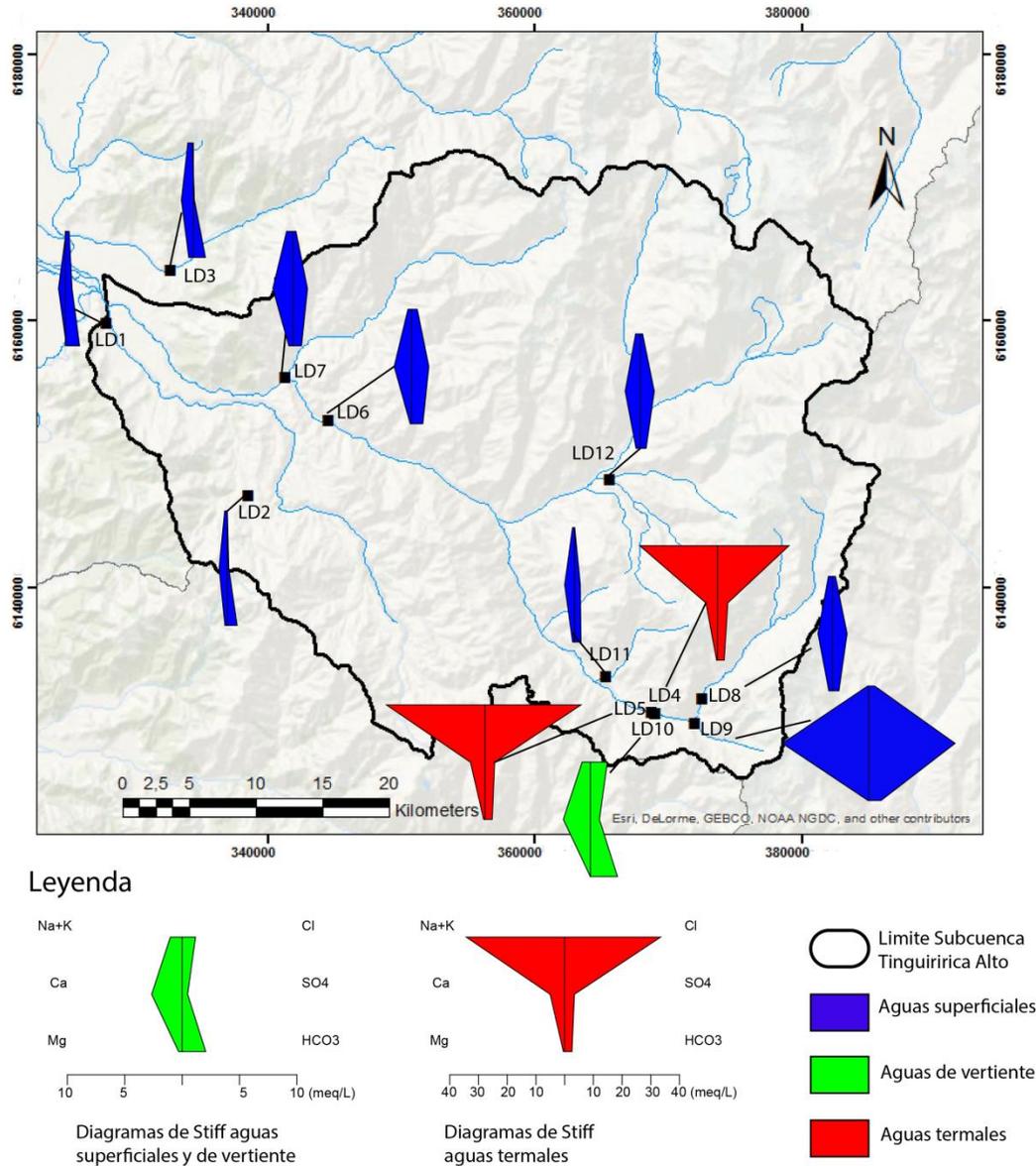


Figura 4.3. Diagramas de Stiff en las ubicaciones de los puntos de muestreo. Se utiliza una escala de diferente para las muestras de aguas termales por sus altas concentraciones.

4.1.1.3 Diagramas binarios y correlaciones para elementos mayores

Al comparar los elementos mayores y los parámetros fisicoquímicos medidos en terreno se puede distinguir un grupo principal, compuesto por Na, K, Cl, SiO₂, T° y CE, que tienen un coeficiente de correlación mayor al 0,95 entre ellos (tabla 4.3). Además, el bicarbonato se relaciona con los mismos elementos pero con coeficientes menores, dentro del rango 0,79-0,85.

Otro grupo está formado por el Ca, SO₄ y Mg, donde entre los dos primeros tiene un coeficiente de correlación de 0,94, y el Mg tiene 0,75 y 0,72 con los dos primeros respectivamente.

Tabla 4.3. Coeficiente de correlación de Spearman entre elementos mayores y parámetros fisicoquímicos.

	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	SiO ₂	T°	CE	pH
Ca ⁺²	1										
Mg ⁺²	0,75	1									
Na ⁺	0,46	0,34	1								
K ⁺	0,45	0,35	0,99	1							
Cl ⁻	0,46	0,35	0,99	0,99	1						
HCO ₃ ⁻	0,37	0,22	0,8	0,8	0,8	1					
SO ₄ ⁻²	0,94	0,72	0,39	0,38	0,38	0,15	1				
SiO ₂	0,37	0,31	0,98	0,98	0,98	0,81	0,29	1			
T°	0,35	0,23	0,98	0,97	0,97	0,85	0,25	0,97	1		
CE	0,55	0,42	0,99	0,99	0,99	0,79	0,47	0,97	0,96	1	
pH	-0,06	-0,35	-0,15	-0,15	-0,14	0,11	-0,2	-0,1	-0,11	-0,16	1

Se grafican los elementos y combinaciones entre ellos versus el Cl, ya que al ser este un elemento conservativo, su concentración en las aguas no se verá afectada por procesos de intercambio agua-roca. La totalidad de los gráficos se encuentran en el Anexo E.

El gráfico de Na+K muestra que casi la totalidad de las muestras se encuentra arriba de la línea 1:1, excepto LD10 que se encuentra debajo, y las muestras de aguas termales que se encuentran justo encima de la línea, es decir, consistentes con la disolución de halita. Las concentraciones de K son bajas, por lo que se suman al Na para evaluar el origen de ambos cationes. Los comportamientos son casi igual al Na por sí solo, con la excepción que las aguas termales ahora quedan ligeramente arriba de la línea 1:1. Esto muestra que hay un origen del Na y K aparte de la disolución de rocas evaporíticas para casi todas las muestras (figura 4.4).

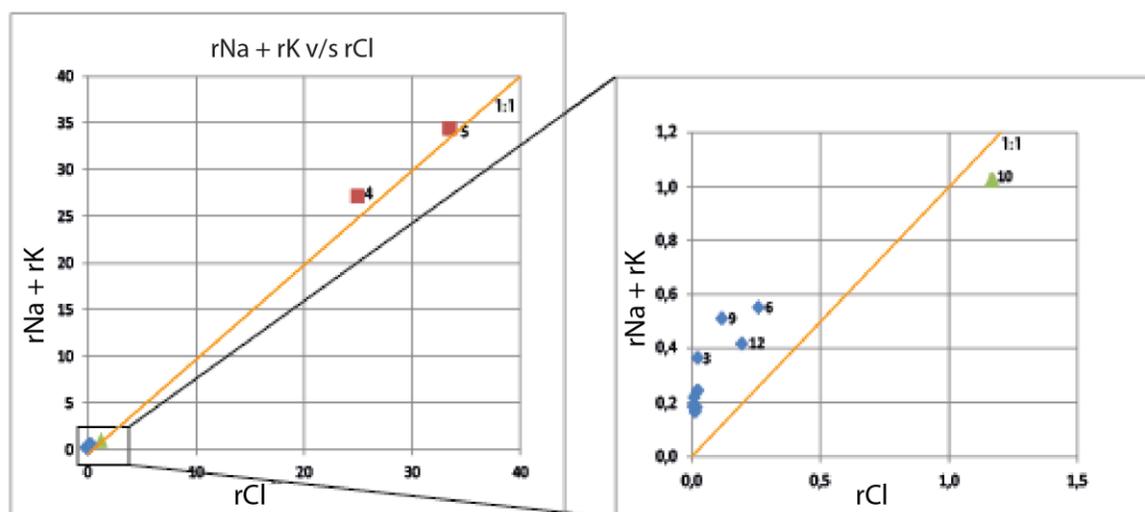
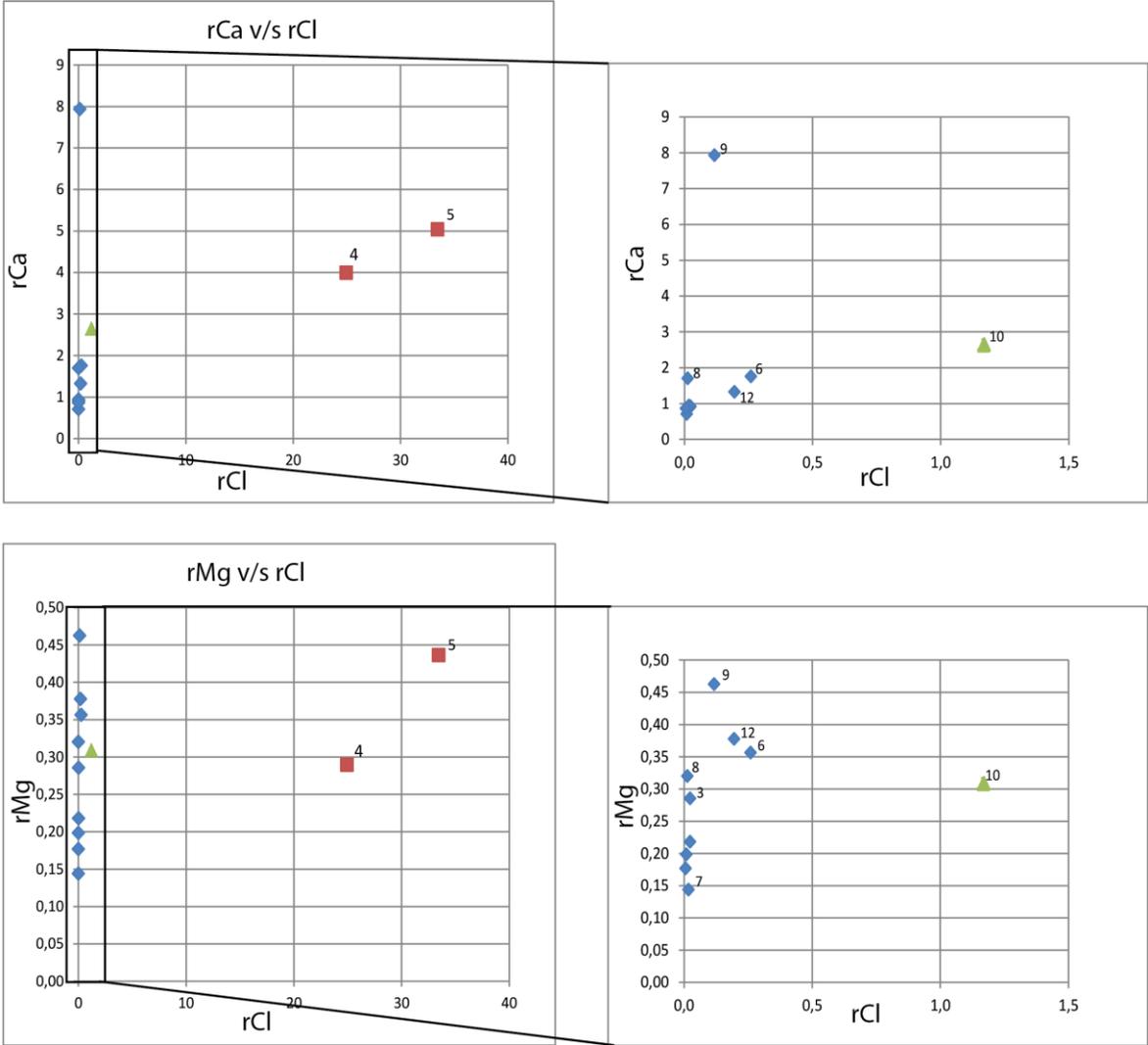


Figura 4.4. Diagramas binarios entre Na+K v/s Cl (en meq/l). A la izquierda se encuentra el gráfico completo y a la derecha hay un acercamiento. En rojo se encuentran las muestras de aguas termales, en verde las aguas de vertiente y en azul las aguas superficiales. Línea naranja representa la relación 1:1.

El Ca no presenta una buena correlación con el Cl. El gráfico de la figura 4.5 muestra una disminución del Calcio casi vertical, es decir, independiente de la cantidad de cloruro para las aguas superficiales, y una proporción distinta para las aguas termales.

Lo mismo ocurre para el Mg y SO₄, donde se destaca la muestra LD9 con las mayores concentraciones para los tres elementos. Esta relación similar indica que los procesos que concentran estas especies en el agua podrían ser los mismos.



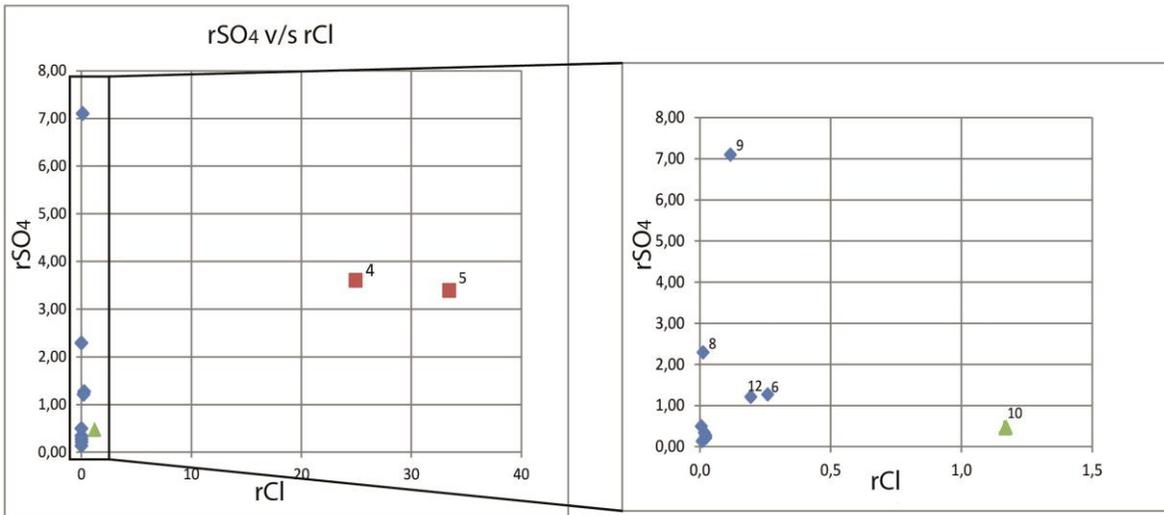


Figura 4.5. Diagramas binarios para Ca, Mg y SO₄ v/s Cl en meq/l.

El grafico de HCO₃ (Figura 4.6) muestra dos patrones principales. Uno es casi vertical, con la cantidad de bicarbonato independiente de la concentración de cloruro, y otro con cierta dependencia entre ellos, compuesto por las muestras 6, 10 y 12, además de las muestras termales.

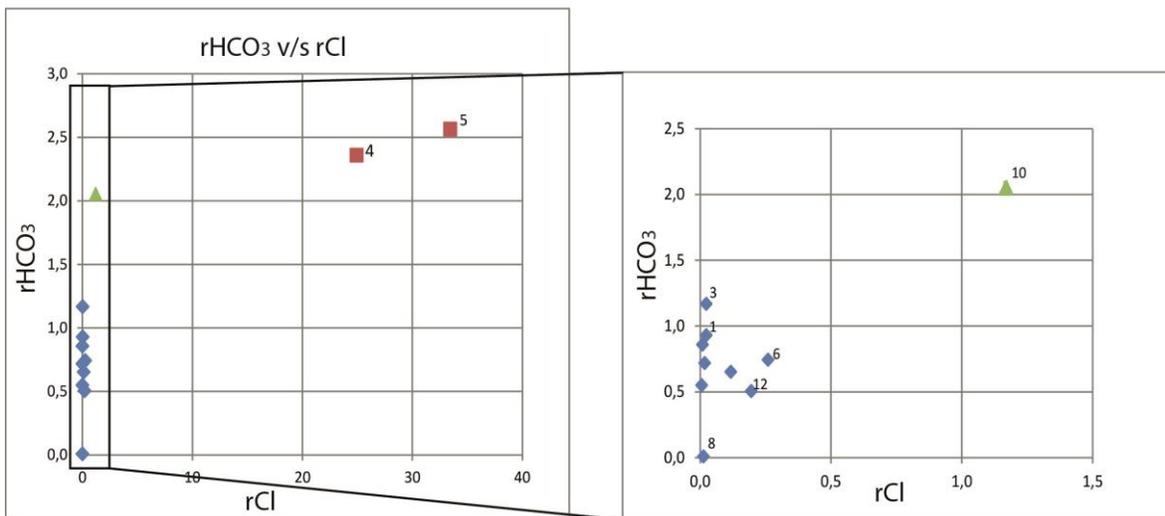


Figura 4.6. Diagrama binario de HCO₃ v/s Cl en meq/l.

Para interpretar procesos que ocurren en las aguas, se graficaron combinaciones entre Ca, Mg, HCO₃ y SO₄. El primer grafico considera la concentración de Ca menos el bicarbonato, graficado versus el sulfato (figura 4.7a). Esto pretende separar las proporciones de Ca que provienen de sulfatos (yeso), restando los que provengan de carbonatos (calcita principalmente). Se observa que la mayoría de las muestras queda ligeramente debajo de la línea 1:1, excepto las muestras termales 4 y 5, y la muestra 8 que quedan debajo, y las muestras 9 que queda ligeramente arriba. El exceso o déficit

de los cationes indica que estos participan en procesos distintos a la disolución de yeso en las muestras indicadas.

Al cambiar el orden de los aniones (figura 4.7b), se puede evaluar el origen de los cationes por la disolución de calcita. Del grafico se observa que la solo la mitad de las muestras quedan encima o muy próximas de la línea 1:1. Las muestras 3, 4, 5 y 8 quedan debajo de esta, y las muestras 6, 9 y 10 por arriba.

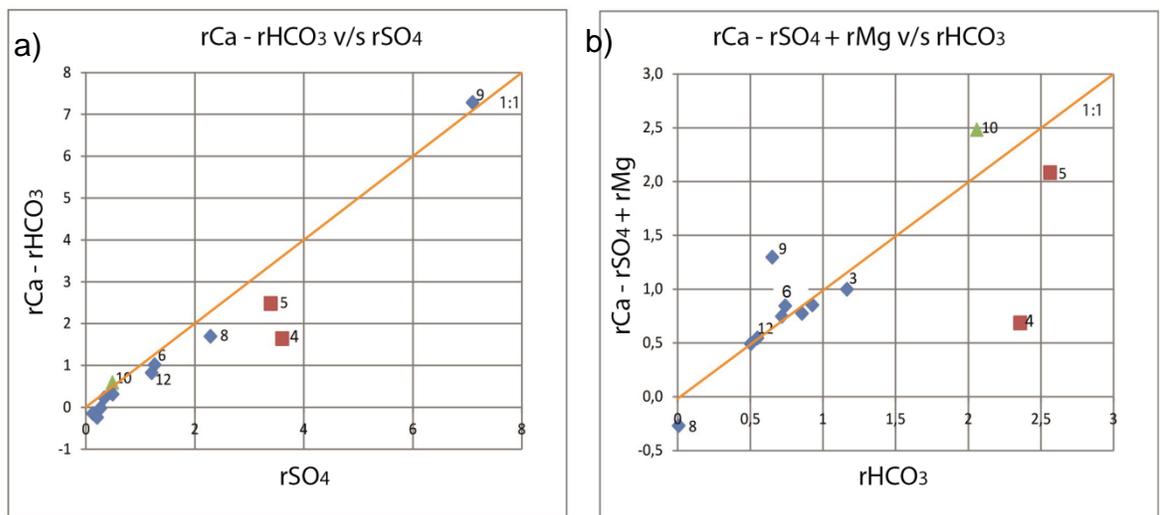


Figura 4.7. Diagramas binarios entre a) Ca-HCO₃ v/s SO₄ y b) Ca+Mg-SO₄ v/s HCO₃.

Para complementar ambos gráficos se creó un tercer diagrama de cationes (Ca y Mg) versus aniones (HCO₃ y SO₄), es decir, que integra las disoluciones de yeso y carbonatos (figura 4.8). La mayoría de las muestras esta sobre la línea 1:1 o muy próxima. Las muestras 4 y 5 están por debajo de esta y las muestras 9 y 10 por arriba.

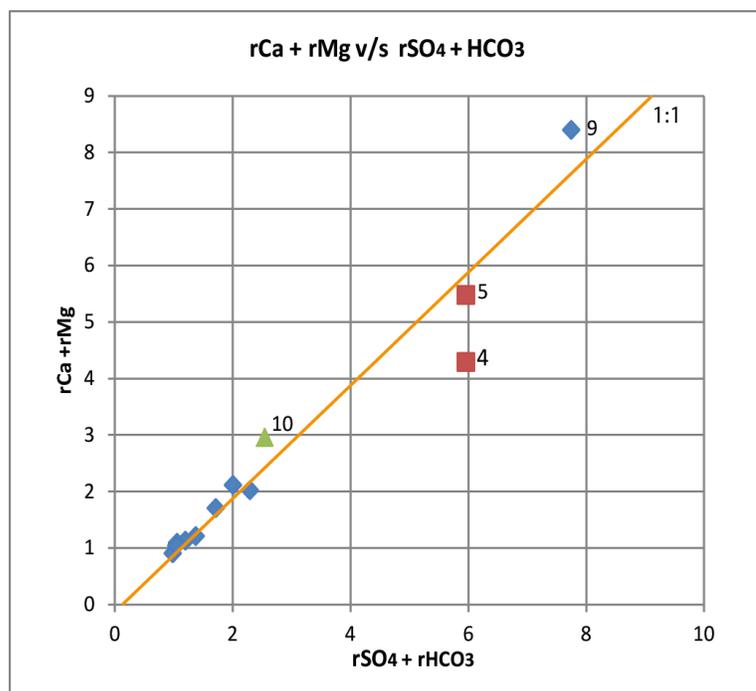


Figura 4.8. Diagrama binario de cationes (Ca+Mg) v/s aniones (SO₄+HCO₃)

Al comparar los distintos aniones con la T° de las muestras, se puede además determinar si hay influencia hidrotermal en las aguas de la cuenca, y por lo tanto, en el origen de algunas de las especies disueltas. El gráfico de la figura 4.9a, muestra la relación entre cloruro y T°, donde se observa que hay un grupo de muestras que tienden a aumentar su contenido de cloruro a mayor temperatura (muestras LD4, LD5, LD6, LD10, LD11 y LD12), mientras que las otras permanecen invariables. El bicarbonato y el sulfato en los gráficos de la figura 4.9 b y c, respectivamente, no muestran una relación clara y son más bien independientes de la temperatura. La sílice muestra una tendencia a aumentar sus concentraciones al aumentar la temperatura, ya sea en las muestras termales o en las de aguas superficiales (Figura 4.9d)

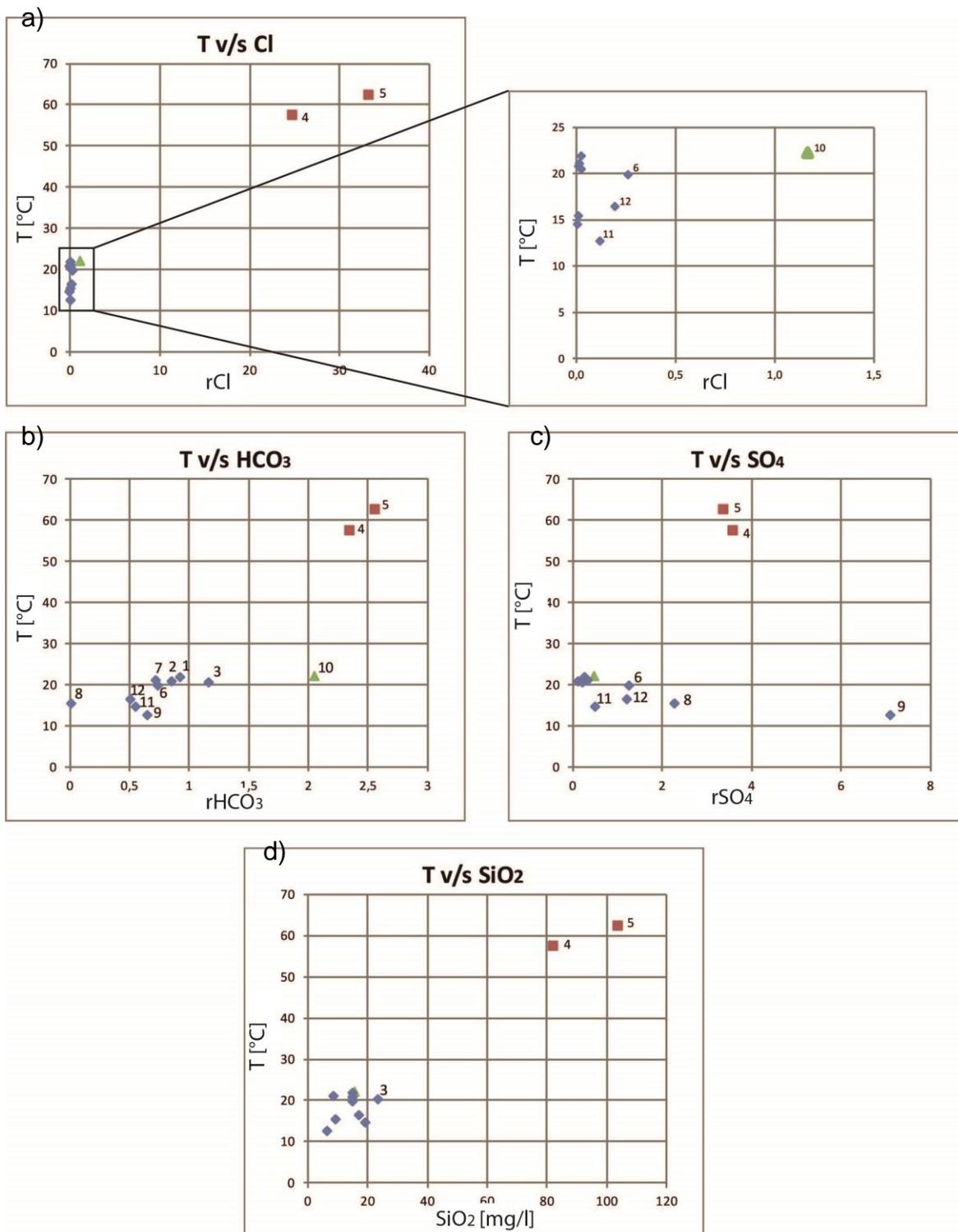


Figura 4.9. Gráficos de Temperatura v/s aniones mayores.

4.1.1.4 Elementos menores y trazas

Del análisis químico se obtuvieron las concentraciones de 28 metales menores y trazas, además del fluoruro, bromuro, carbonato y fosfato presente en las muestras de agua. El detalle de los resultados se presenta en el Anexo A al igual que la instrumentación utilizada en las mediciones. De estos parámetros, siete (CO_3^{-2} , Br^- , PO_4^{-3} , Ag, Be, Cr, Hg) más el nitrato (NO_3^{-2}) de los elementos mayores tienen más del 75% de las muestras bajo el límite de detección, por lo que quedan fuera del análisis estadístico (detalle en Anexo C).

Tabla 4.4. Resultados del análisis químico de algunos elementos menores y traza. Tabla completa en Anexo A.

Muestra	Al ($\mu\text{g/l}$)	As ($\mu\text{g/l}$)	B ($\mu\text{g/l}$)	Fe ($\mu\text{g/l}$)	Li ($\mu\text{g/l}$)	Mn ($\mu\text{g/l}$)	Sr ($\mu\text{g/l}$)	U ($\mu\text{g/l}$)	Zn ($\mu\text{g/l}$)
LD1	20,3	1,08	18,4	32	< 0,06	6,48	75,6	0,031	15,2
LD2	4,4	2,95	4,92	44	< 0,06	7,9	66,2	0,012	9,54
LD3	33	0,63	14,2	61	< 0,06	10,1	50,3	0,005	168
LD4	19,5	1765	7381	195	1991	148	1354	0,01	97,8
LD5	6,8	3092	10175	25	2645	202	1499	0,045	9,68
LD6	70,5	4,21	196	15	7,87	21,4	116	0,139	6,42
LD7	4,6	2,51	36,4	< 3	0,4	0,37	63,3	0,021	3,6
LD8	384	0,86	12,7	1441	2,15	436	105	0,098	65,9
LD9	21,2	2,31	135	15	8,62	3,37	768	0,101	10,6
LD10	13	52,2	454	11	74,6	2,14	137	0,096	12,4
LD11	33,5	2,92	16	23	1,5	3,03	147	0,06	22,2
LD12	85,9	2,64	236	51	5,79	67,2	95,9	0,144	14

Se puede ver que la mayoría de los elementos menores y traza presentan sus concentraciones más altas en las muestras de aguas termales LD4 y LD5, siempre mayores en la segunda. Esto ocurre principalmente a los elementos litófilos, como el B, Li, Sr (Tabla 4.4), además del Ba, Br, Cs, F, Rb, V y Zr. Las muestras de aguas termales también presentan las concentraciones más altas de la mayoría de los elementos calcófilos como As, Cu, Hg, Mo, Sb, Se, Sn y W. De los otros elementos, LD4 y LD5 tienen concentraciones altas pero no las mayores, indicando que los procesos principales que concentran esos elementos no están relacionados a las aguas termales.

La muestra LD10 presenta concentraciones mucho más bajas que las de aguas termales, pero esta enriquecida en los mismos elementos que estas, por sobre los niveles de las aguas superficiales. La muestra LD3 presenta las concentraciones más altas de Pb y Zn (0,45 y 168 $\mu\text{g/l}$), al igual que la segunda más alta de Sn (3,35 $\mu\text{g/l}$). Esta particularidad indica que en esa parte de la cuenca ocurren procesos que no ocurren en otros sectores. La muestra LD8 tiene la anomalía más grande de Fe de todas las muestras, de 1441 $\mu\text{g/l}$. Esto va acompañado de otras particularidades químicas, como la ausencia de bicarbonato, visto en la tabla 4.2, y las altas concentraciones de elementos siderófilos Cd, Co, Mn, Ni, Al y también de Cu.

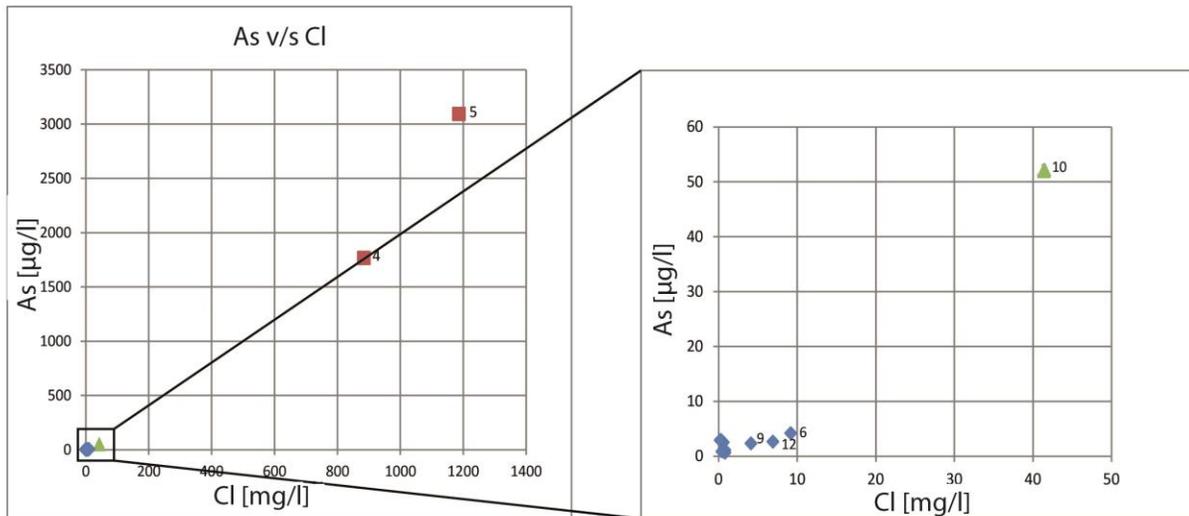
4.1.1.5 Diagramas binarios y correlaciones para elementos menores y traza.

Al observar la tabla de correlaciones del Anexo B de todos los elementos analizados, se pueden separar en grupos que posean un alto coeficiente de correlación entre ellos. El principal está formado por los elementos mayores Na, K, Cl y SiO_2 , sumados al As, B,

Ba, Cs, Li, Mo, Rb, Sb, Se, W y Zr, todos con coeficientes de correlación mayor a 0,96. Estos elementos traza corresponden en general a cationes incompatibles de gran tamaño. Este grupo tiene también una correlación menor con el HCO_3 , Cu, Sr y V.

Otro grupo lo conforman el Ca, SO_4 , Ni y Sr, que podrían estar asociados a la disolución de yeso, ya que el Sr tiende a reemplazar al Ca en los minerales que forma. Un tercero grupo está formado por el Al, Fe, Mn, Co y Cd, y un cuarto grupo lo conforman el Pb con el Zn.

Al igual que para los elementos mayores, se realizan gráficos binarios versus el cloruro para los elementos menores y traza (Anexo E). Las altas concentraciones de cloruro en las muestras de agua termal hacen difícil visualizar tendencias en las muestras de aguas superficiales, por lo que se hacen acercamientos a esta parte de los gráficos. Los elementos del primero grupo mencionado antes siguen patrones similares a los del Na y K (figuras 4.10). Tienen a aumentar sus concentraciones al aumentar la cantidad de cloruro en las aguas, sobre todo las muestras LD4, LD5 y LD10. Algunos sin embargo no siguen ese patrón, como por ejemplo el As (figura 4.10), Sb, Zr, que se mantiene casi constante en las muestras de aguas superficiales. Los elementos Ba (figura 4.10), Mo, U y V también difieren ya que las muestras LD6, LD8, LD9, LD11 y LD12 están enriquecidas en estos elementos.



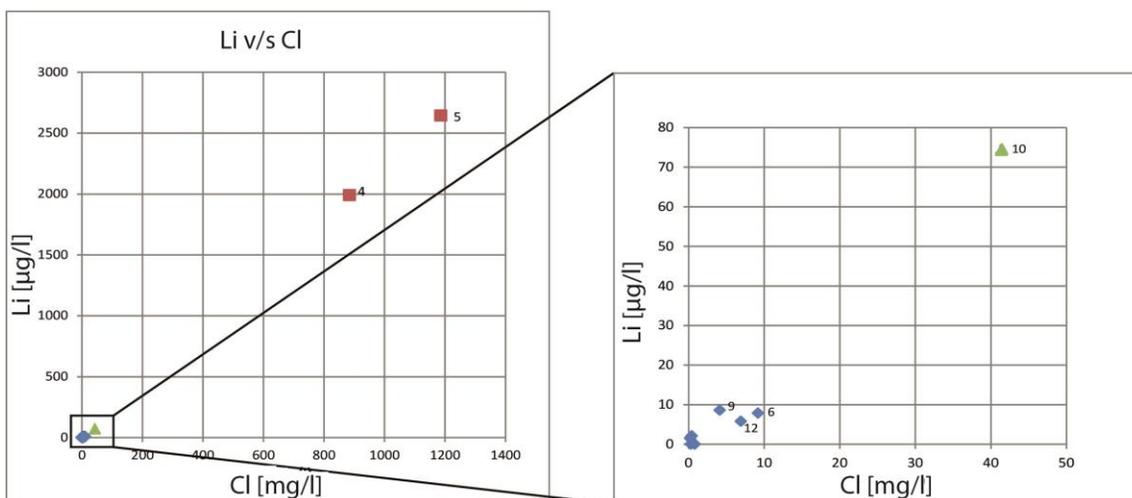
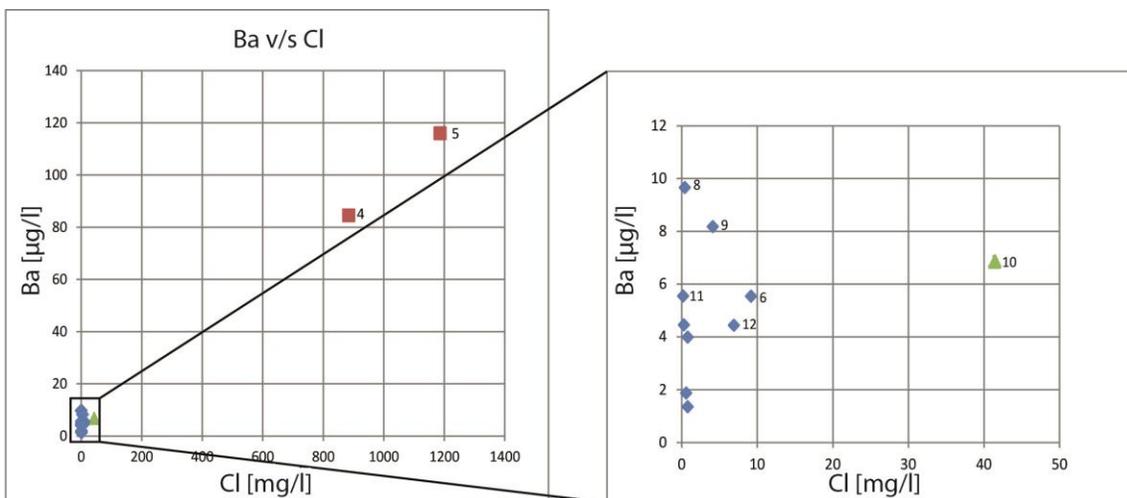
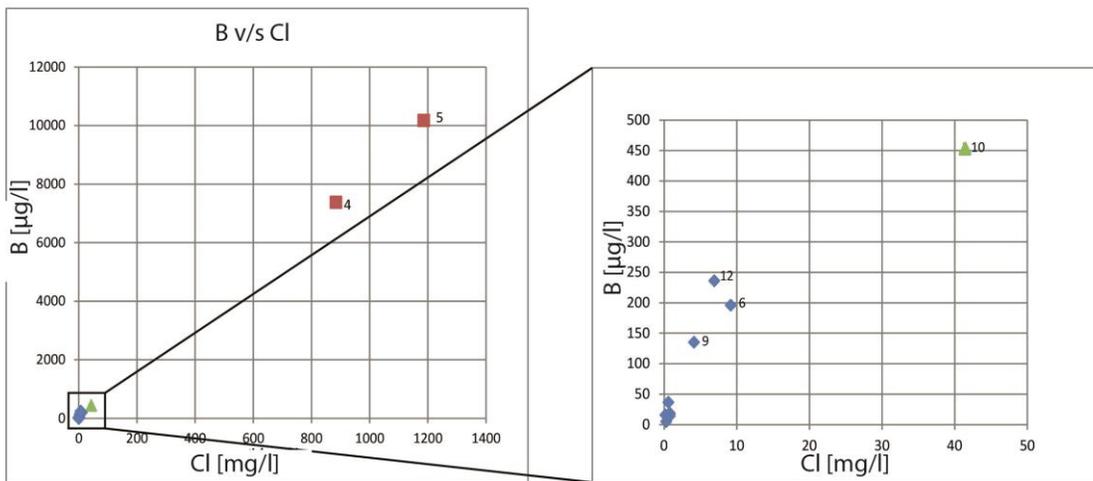


Figura 4.10. Diagramas binarios de As, B, Ba y Li en $\mu\text{g/l}$ v/s Cl (mg/l).

El Sr casi no varía su concentración en las muestras excepto en las aguas termales y la muestra LD9, que posee altos niveles, relacionados con las concentraciones de Ca

(Figura 4.11). Las concentraciones de Ni y Se tampoco estarían relacionados con la cantidad de cloruro en las aguas superficiales, sino que se presentan principalmente en las partes altas de la cuenca (muestras LD8 y LD9).

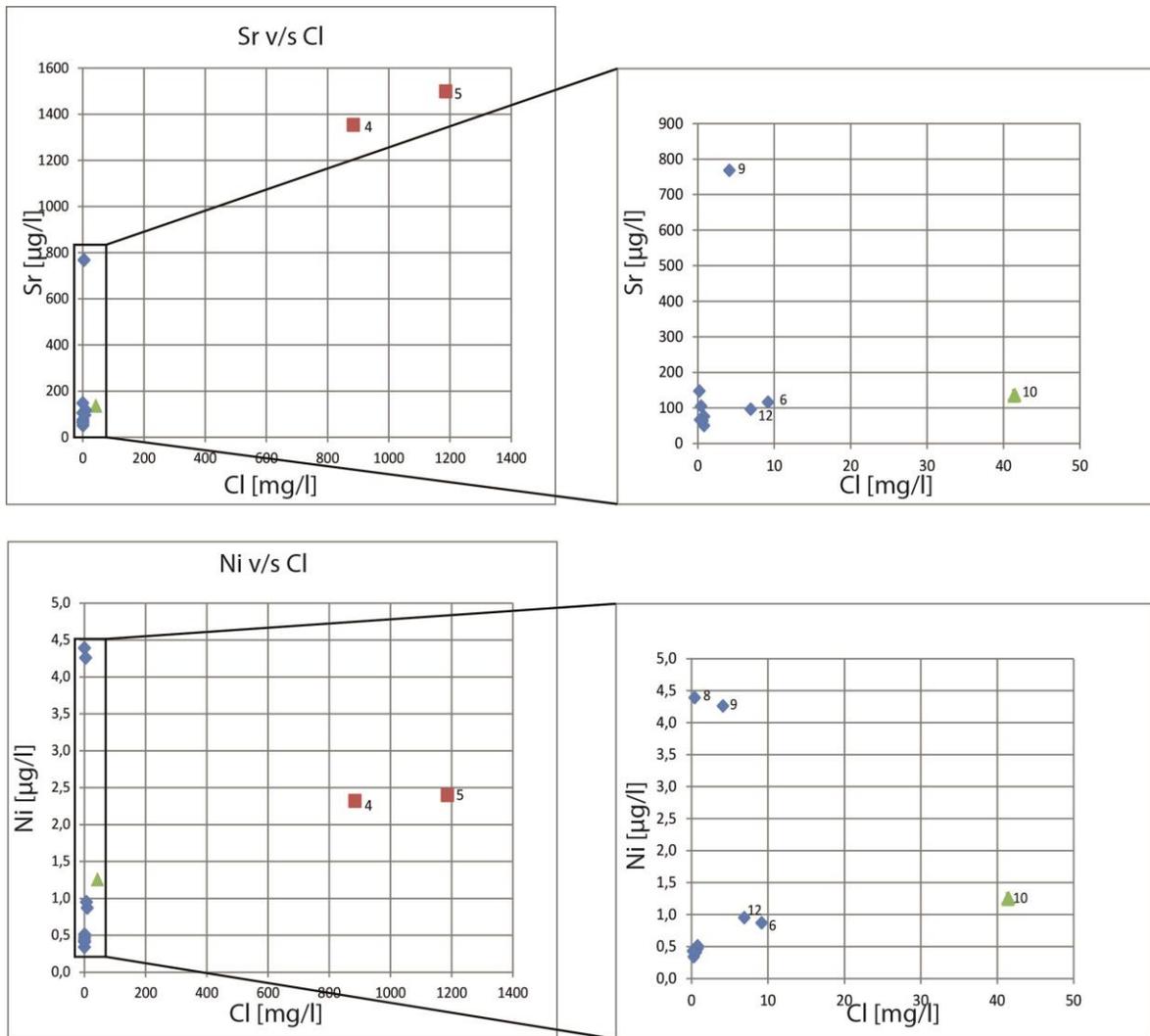


Figura 4.11. Diagramas binarios de Sr (arriba) y Ni (abajo) en µg/l v/s Cl (mg/l).

Los elementos del tercer grupo (Al, Cd, Co, Fe, Mn) no muestran una relación con la concentración de cloruro en las aguas, ya sean superficiales, de vertiente o termales (figuras 4.12). Presentan una alta concentración en la muestra 8, al igual que el Cu. Este último, a diferencia de los otros, si muestra una tendencia a aumentar su concentración con el cloruro en las aguas termales.

Los elementos del cuarto grupo (Pb y Zn) más el Sn, tiene un comportamiento similar a los del tercer grupo, sin relacionarse con el cloruro, pero presentan una anomalía en la muestra 3 (figura 4.13).

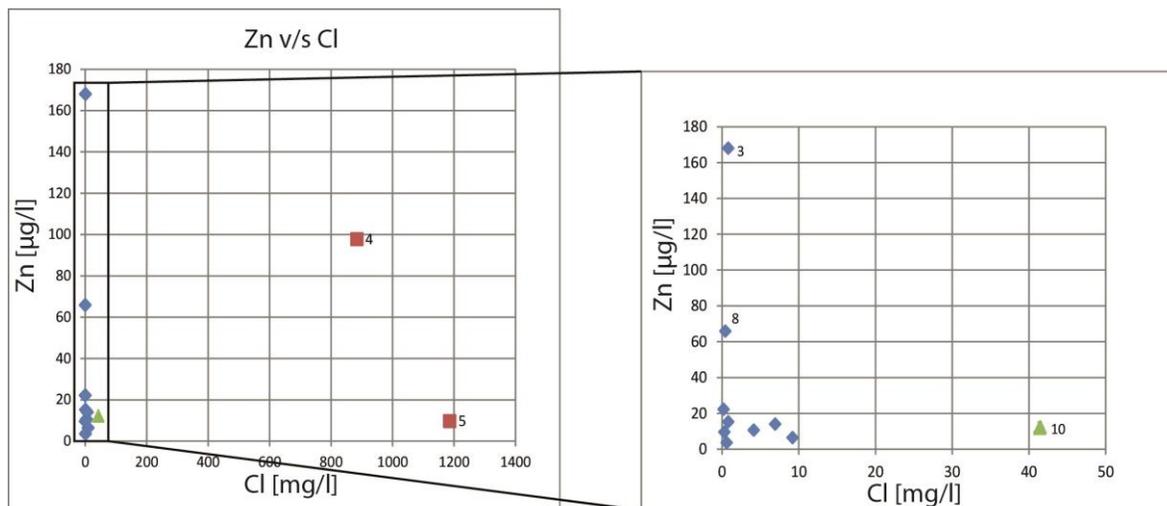


Figura 4.13. Diagrama binario de Zn ($\mu\text{g/l}$) v/s Cl (mg/l).

4.1.2 Índices de saturación

Para calcular los índices de saturación de algunos minerales en las aguas de la zona de estudio se utilizó el software PHREEQC con la base de datos llnl.dat, que se suele usar al tener bases de datos composicionales con información de parámetros fisicoquímicos. Se tomaron en cuenta los elementos mayores y algunos menores y traza (Al, As, B, Ba, F, Fe, Li, Sr, U y Zn). Además, considerando las características litológicas de la formación Baños del Flaco de la franja Mesozoica, que consiste de secuencias calcáreas y evaporíticas, se analizaron especialmente los elementos que podrían estar presentes: calcita (CaCO_3), anhidrita (CaSO_4), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), halita (NaCl) y silvita (KCl) (Branson, 1915; Boggs, 2006).

En la tabla 4.5 se muestran los resultados obtenidos del cálculo efectuado por el programa. Los valores negativos indican que el agua está subsaturada en dicho mineral, y en caso de entrar en contacto con él, tenderá a disolverlo. Lo opuesto ocurre con los valores positivos, que indican saturación y que el mineral en cuestión tenderá a precipitar. Valores muy cercanos a cero indican un equilibrio entre ambas fases (Gemici y Filiz, 2001).

La mayoría de los minerales se encuentra subsaturado en todas las muestras. De los principales minerales de secuencias calcáreas y evaporíticas, la calcita muestra solo un valor positivo, en la muestra LD5 que corresponde a agua termal. El aragonito muestra un valor positivo también en la misma muestra, pero muy cercano a cero, y la dolomita, anhidrita, yeso, silvita y halita no muestran valores positivos. La alunita presenta valores positivos en las muestras LD6 y LD8, que presentaban pH más ácidos. La calcedonia presenta tres valores positivos muy cercanos a cero (LD4, LD5 y LD12), y la gibbsita,

goethita, kaolinita y cuarzo presentan la mayoría de los índices de saturación mayores que cero.

Tabla 4.5. Índice de saturación mineral de algunas fases en las aguas analizadas. Los valores positivos se marcan en color verde.

Fase	Índices de Saturación (IS)											
	LD1	LD2	LD3	LD4	LD5	LD6	LD7	LD8	LD9	LD10	LD11	LD12
Alunita	-10,3	-13,05	-8,23	-3,51	-8,6	0,46	-10,98	0,91	-3,64	-5,97	-6,37	-2,18
Anhidrita	-3,08	-3,47	-3,19	-1,55	-1,48	-2,22	-2,96	-2	-1,08	-2,5	-2,84	-2,34
Aragonito	-0,27	-0,41	-0,48	-0,62	0,04	-2,85	-0,56	-5,17	-0,23	-0,21	-0,82	-1,09
Baritina	-1,6	-1,82	-2,17	-0,11	-0,09	-0,87	-1,82	-0,35	-0,17	-1,26	-1,07	-0,91
Calcita	-0,12	-0,26	-0,33	-0,5	0,16	-2,7	-0,42	-5,02	-0,08	-0,06	-0,67	-0,94
Calcedonia	-0,36	-0,34	-0,14	0,03	0,08	-0,32	-0,58	-0,47	-0,59	-0,33	-0,15	0,22
Dolomita	-0,77	-1	-1,1	-1,86	-0,47	-6,03	-1,57	-10,77	-1,43	-0,97	-2,05	-2,41
Fluorita	-4,15	-4,15	-3,84	-1,89	-1,64	-3,83	-4,4	-5,62	-2,66	-3,64	-4,33	-3,07
Gibbsita	0,36	-0,25	0,94	0,34	-0,78	0,7	-0,05	-0,04	1,22	0,83	1,15	1,85
Goethita	7,32	7,49	7,63	7,03	6,28	1,44	6,01	1,06	7,1	6,7	7,36	7,49
Yeso	-2,89	-3,24	-2,96	-1,5	-1,52	-1,98	-2,72	-1,75	-0,83	-2,27	-2,59	-2,09
Halita	-9,9	-10,35	-9,7	-5,01	-4,8	-8,51	-10,14	-10,39	-8,9	-7,6	-10,6	-8,76
Kaolinita	1,69	0,51	3,28	2,35	0,21	2,45	0,44	0,68	2,96	2,68	3,69	4,95
Magnesita	-1,2	-1,29	-1,32	-1,74	-0,95	-3,88	-1,71	-6,3	-1,9	-1,45	-1,91	-2,02
Cuarzo	0,08	0,1	0,3	0,36	0,4	0,12	-0,14	-0,01	-0,12	0,1	0,31	0,23
Silvita	-10,13	-10,93	-10,51	-5,68	-5,49	-8,77	-10,56	-10,2	-9,39	-7,95	-10,54	-8,79
Siderita	-3,34	-3,16	-2,27	-1,6	-3,52	-3,83	-4,32	-4,14	-2,53	-2,24	-2,8	-2

4.1.3 Análisis de filtros de agua

De manera complementaria al análisis químico de las muestras de agua, se separó el material particulado cargado en suspensión mayor a 0,45 μm por medio de filtros de fluoruro de polivinilideno hidrofílico (PVDF). Su composición química va a reflejar no solo la geología de la cuenca, sino que además el material fino tiene mayor capacidad para transportar metales trazas (Förstner and Wittmann, 1979; Horowitz, 1992). Esto permite ver a que fases minerales se adhieren los metales identificados en el análisis químico de las aguas, si están concentrados en niveles similares o están enriquecidos en alguna de las fases, y si se encuentran otros metales no vistos en el análisis anterior. Los sedimentos representan uno de los mayores peligros en una cuenca, dada su alta capacidad de retener metales nocivos para el medioambiente, y su alta fragilidad ante ligeros cambios de T°, pH o estado redox del agua. La especiación será finalmente la que controle tanto la movilidad de los metales como la capacidad de que sean bioacumulados.

Los filtros fueron analizados en el laboratorio SEM del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM) para observar las muestras, con un detector de electrones retrodispersados (backscattered electrons, BSE) para obtener la composición química de las especies.

El grupo de minerales más recurrente en los filtros vistos son los silicatos, lo que se condice con la geología principalmente volcánica y sedimentaria continental hallada en la zona de estudio. Dependiendo de las muestras, el contenido puede ser mayormente de cuarzo, feldespatos o silicatos más pequeños como micas o arcillas. Van acompañados por lo general de los cationes mayores Na, Ca, K y Mg, más Al y Fe.

También hay presencia de óxidos de Fe, con altos contenidos de Ti y menor V, Cr y Mg. Entre los otros grupos presentes se destacan los carbonatos en algunas muestras, sulfuros, fosfatos y metales en estado puro. La metodología consiste en metalizar los filtros de PVDF con carbono para obtener un mayor contraste de los minerales con elementos más pesados con el fondo del filtro, y así poder distinguirlos de mejor manera. Esto trae la consecuencia de que no se podrá cuantificar de correcta manera los minerales que contengan C o F.

LD1

El material retenido por el filtro consta principalmente de silicatos muy fracturados. Se distinguen algunos feldspatos potásicos y plagioclasas con contenidos variados de Ca y Na, así como arcillas, zircones y cuarzo. Se identifica también una muestra de un silicato de Th identificado como thorita. Los óxidos son principalmente de Fe con menor Ti, aunque también se encuentran algunos con $Ti > Fe$. En menor cantidad aparecen cristales aislados de apatito, baritina, sulfatos de Fe y Fe-Cu, y de halita.

Se destaca la presencia de numerosos cristales de óxidos de La con Mo, de hasta $20 \times 20 \mu m$ formando clústers numerosos que sobresalen en el filtro aislados del resto de los minerales. El La no formó parte del análisis químico realizado a las muestras de agua por lo que su identificación representa nueva información sobre la química de las aguas. Lo mismo ocurre con el Ti, Th y el apatito considerando los bajos niveles de fosfatos disueltos.

LD2

Esta muestra cuenta con una menor cantidad de cristales que la muestra LD1, pero en general de mayor tamaño. Predominan las plagioclasas con Ca y Al como cationes principales, y también silicatos ferromagnesianos que tienden a oxidarse. También se encuentran cristales aislados de magnetita y rutilo. Entre los metales más pesados se encuentran granos de oro de hasta $2 \mu m$, plata y mezcla de sulfuros y óxidos de Cu, predominando las especies oxidadas (figura 4.14B). En la mayoría de los puntos analizados el oxígeno están en una proporción casi 1:1 con el Cu, por lo que podrían corresponder a cristales de tenorita. En otros la mayor cantidad de azufre podría indicar la presencia de brocantita o antlerita. Estos minerales se encuentran juntos en amplios clústers o alineados. Separados de estos últimos hay algunos cristales donde el S es reemplazado parcialmente por Se, y el Cu por In.

En este filtro vuelven a aparecer los óxidos de La asociados con Ni, aislados del resto de los minerales y formando clústers claramente visibles (figura 4.14A). El hecho de que el metalizado con carbono implica que no se pueda detectar correctamente este elemento, puede suponer que el La está formando carbonatos como la bastnasita.

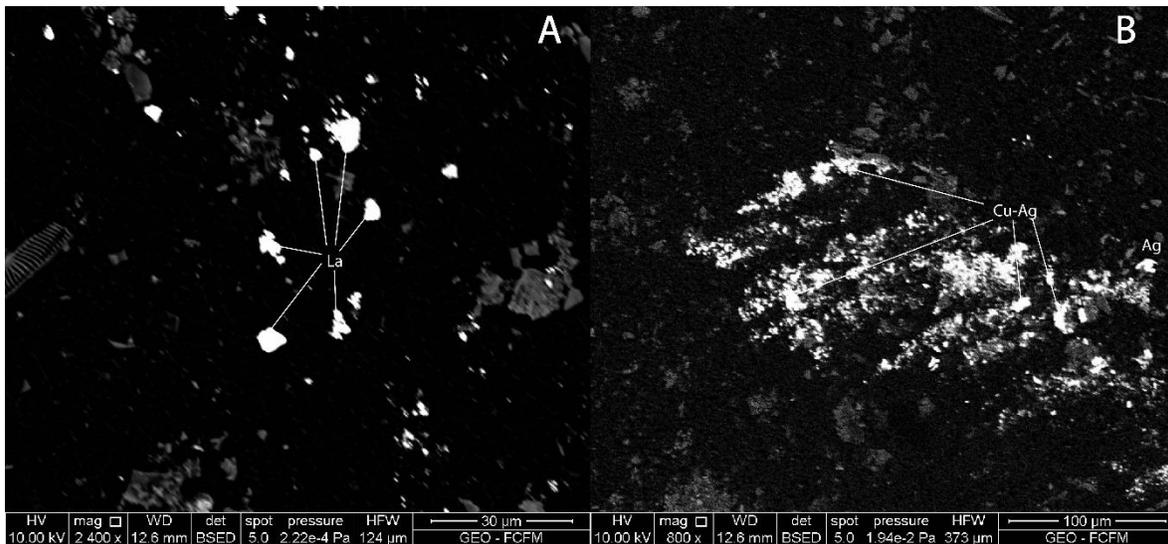


Figura 4.14. Ejemplos de metales vistos en el material filtrado de la muestra LD2 usando Microscopía SEM en modo BSED. A) La asociado con Ni formando clusters y B) Gran cumulo de sulfatos-óxidos de Cu y Ag.

LD3

Este filtro consta de pocos cristales, en su mayoría de cuarzo de grandes dimensiones (más de 50 μm de largo) y plagioclasas. Se destaca la presencia de cristales de oro de 20x20 μm aproximadamente, recubriendo algunos cristales de cuarzo (figura 4.15A), y óxidos de La-Ni-Mo de hasta 15 μm en una proporción 3:1:1, formando clústers de baja densidad y aislados del resto de los minerales (figura 4.15B).

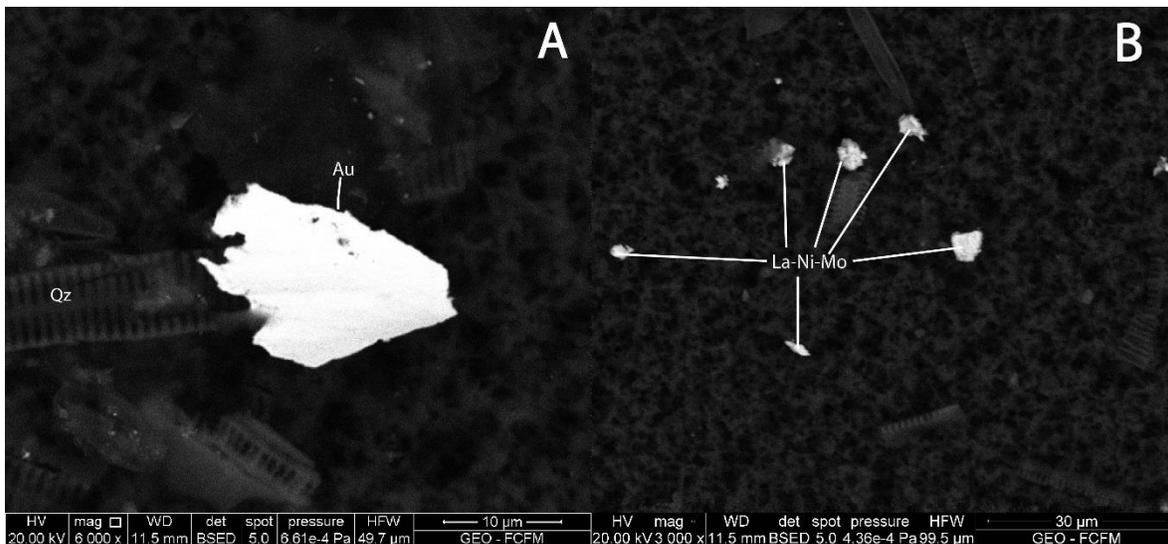


Figura 4.15. Material filtrado de la muestra LD3 con microscopio en modo BSED. A) Oro nativo recubriendo cristal de cuarzo y B) cristales de óxidos de La-Ni-Mo.

LD4

La muestra LD4 posee una muy alta densidad de cristales en el filtro, principalmente por ser aguas termales que traen contenido de las aguas subterráneas. La mayoría de los minerales presentes son silicatos, con altos contenidos de Al y Na, el cual puede

deberse por las incrustaciones de halita que se forman por la alta salinidad vista en el análisis químico de las aguas. Este mineral recubre todo el filtro con partículas menores a $5\ \mu\text{m}$, con formas redondeadas y colores brillantes que resaltan dentro del fondo del filtro. Se encuentran también silicatos con K, Ca, Mg y Fe, así como se infiere la presencia de calcita en cristales con más de un 90% de CaO, debido a que, al ser las muestras metalizadas con carbono, no se puede identificar de manera correcta este elemento. Los cristales de calcita presentes son de diversas formas y tamaños, desde redondeados hasta prismáticos hexagonales, y alcanzan grandes dimensiones de hasta $100\ \mu\text{m}$.

Algunos óxidos de Fe muestran altos contenidos de otros metales, destacándose el Ti, Mn y Zn. También se observa la presencia de As, aunque asociado a distintos minerales como la calcita, algunos silicatos y óxidos de Fe.

LD5

Este filtro muestra una gran similitud con el LD4, aunque parecen predominar los cristales de calcita por sobre los silicatos (figura 4.16). Se nota también la tendencia de la calcita a portar As, así como a formar sulfatos de Ca que podría corresponder a yeso o anhidrita, acompañado de baritina y scheelita. El Fe también forma escasos sulfuros que podrían corresponder a pirita, con As y Ni reemplazando al hierro.

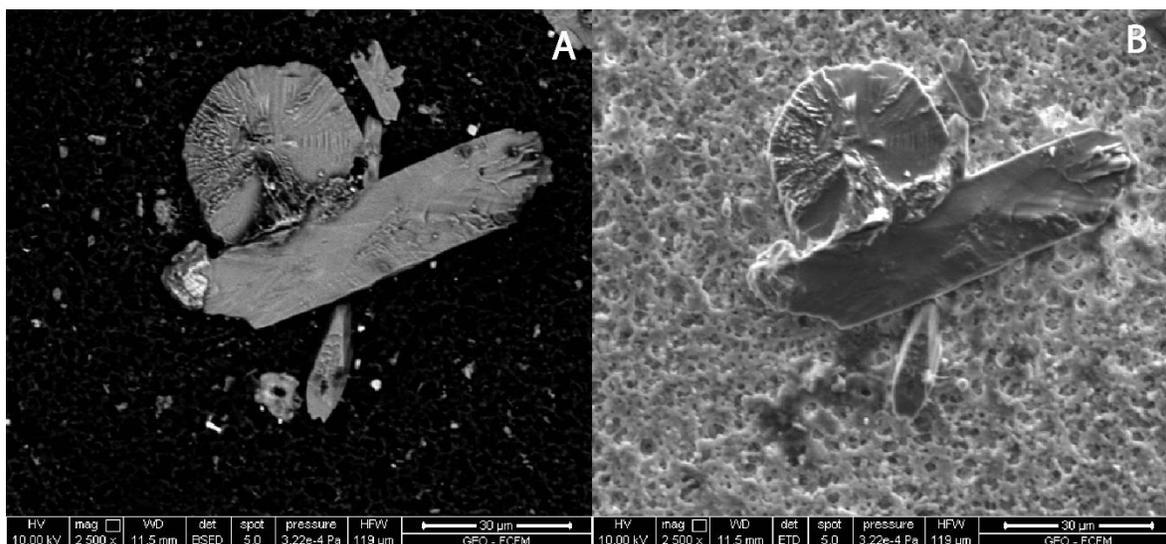


Figura 4.16. Cristal de calcita en muestra de agua termal LD5 usando detector A) BSED y B) ETD.

LD6

Al igual que la mayoría de las muestras, este filtro muestra un claro dominio de los silicatos. Están mezclados cuarzos y plagioclasas de hasta $30\ \mu\text{m}$ con material muy fino. También se encuentran silicatos ferromagnesianos con proporciones similares de Ca-Fe-Mg que podrían corresponder a anfíboles o piroxenos. Se observan cuerpos con formas ovaladas de hasta $50\ \mu\text{m}$ de largo y $10\ \mu\text{m}$ de ancho con alto porcentaje de sílice, que corresponde a diatomeas.

Hay numerosos cristales de óxidos de Fe, con menor Ni, Cu, Cr, Ti, Mn y V, óxidos de Ni > Fe, Cu (figura 4.17), así como también de titanita, rutilo, zircón y apatito. Se destaca la presencia de nitro o nitrato de potasio (KNO_3), y un mayor contenido de cristales de pirita con respecto a las otras muestras.

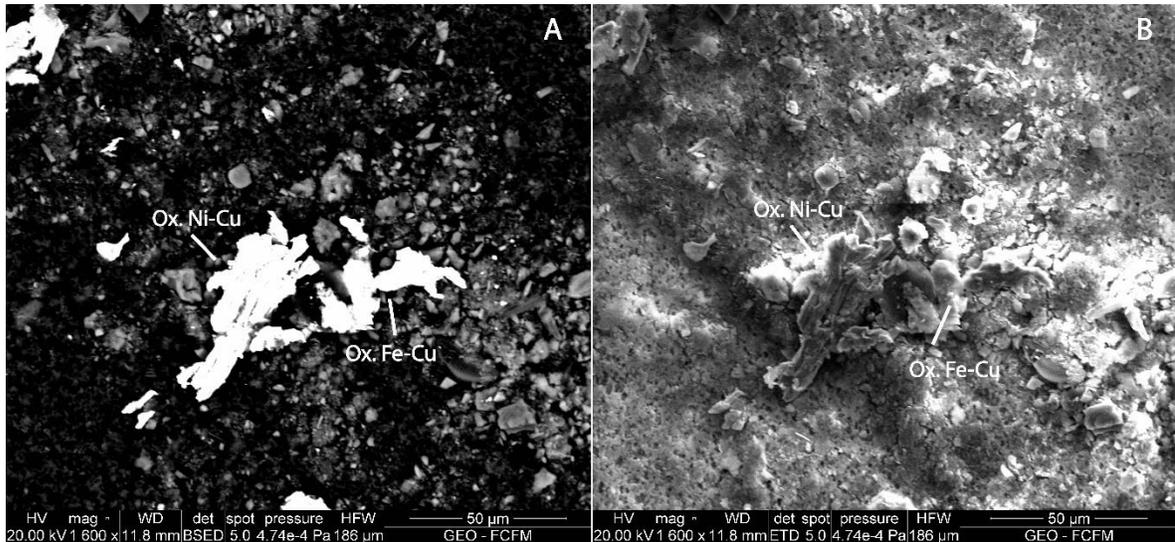


Figura 4.17. Óxidos de Ni-Cu y Fe-Cu en filtro de muestra LD6 usando detector: A) BSED y B) ETD.

LD7

Se nota un aumento en el contenido de diatomeas, llegando algunas a los 100 μm . Las formas varían más, entre redondeadas, ovaladas y tabulares (figura 4.18A). Los silicatos son similares a las muestras anteriores, predominando los cristales de cuarzo y plagioclasas Ca-Na y las arcillas finas con contenidos variados de Na-Ca-K-Fe y Mg. Las hematitas muestran contenidos variables de Mn, Cr, V, Zn y Ti, y hay presencia de ilmenita. Se encuentran cristales de pirita formando óxidos en su superficie. Entre el material presentes se encuentran también zircones, partículas de hierro metálico de origen antropogénico, y oro nativo de hasta 15 μm formando clústers (figura 18B).

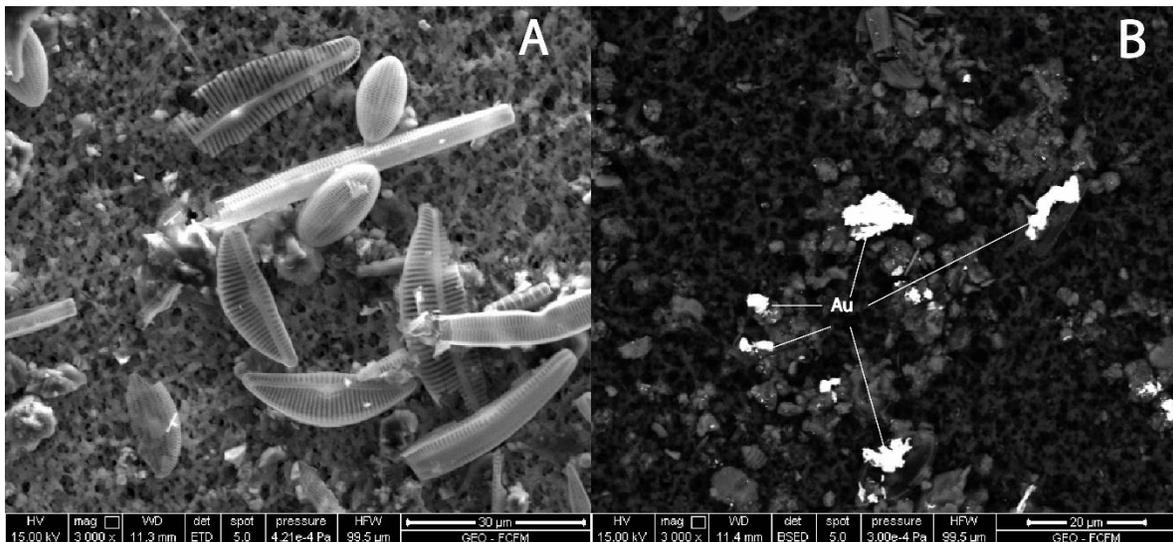


Figura 4.18. Material retenido en el filtro de la muestra LD7: A) Diatomeas vistas con detector ETD y B) Oro nativo visto con detector BSED.

LD9

Este filtro cuenta con una alta densidad de cristales. El grupo dominante son los silicatos, compuesto por plagioclasas Ca-Na, cuarzo, feldespato potásico y otros silicatos ferromagnesianos. Hay presencia de magnetita por sobre la hematita, ambas con alto contenido de Ti. También hay ilmenita, apatito y abundantes cristales de baritina.

LD10

La muestra LD10 cuenta con una alta densidad de cristales, al representar agua que proviene de una vertiente es consistente con la mayor carga que puede traer. El grupo predominante son los silicatos, con abundante curazo, plagioclasas y otros silicatos menos redondeados que en los otros filtros. También hay gran cantidad de cristales de baritina, magnetita, zircones

Destaca dentro de los cristales uno de monacita con $Ce > Nd > La$, y uno de thorita. Sobre algunos silicatos se presenta una mezcla de óxidos de Cu, Zn y Ni en similares proporciones, los cuales podrían corresponder las especies oxidadas directamente o a carbonatos, siendo malaquita y azurita para el Cu, smithsonita para el Zn, gaspeita para el Ni, y rosasita una mezcla de todos. Unos pocos cristales también contienen Pb como metal secundario (figura 4.19A).

LD11

La muestra LD11 tiene una alta densidad de cristales al igual que las otras muestras de la parte alta de la cuenca. El material está compuesto principalmente por silicatos, además de cristales de magnetita con trazas de Ti, baritina, apatito y óxidos de Cu y Zn de hasta 10 μm similares a los de la muestra LD10 (figura 4.19B).

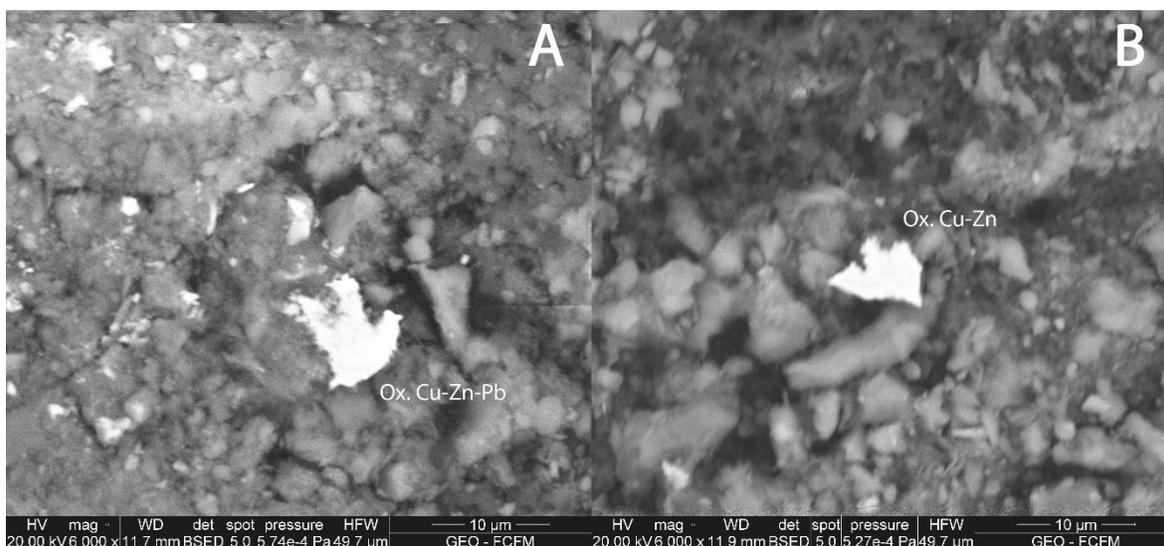


Figura 4.19. Material obtenido de filtros de las muestras LD10 (A) y LD11 (B).

LD12

Este filtro posee una alta densidad grandes por sobre los pequeños. No difiere mucho de los demás, predominando los silicatos y luego los óxidos de Fe. Se identifican también cristales de pirita de hasta 5 μm , apatito de hasta 10 μm euhedrales, titanita, óxidos de manganeso y zircones.

4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los elementos seleccionados para realizar un análisis estadístico se detallan en el Anexo C. El criterio usado para la determinación de estos fue que no superen el 75% de las muestras bajo el límite de cuantificación. En caso de que un elemento tenga muestras bajo el límite, su valor será cambiado por la mitad de este.

En la tabla 4.6 se detallan los estadígrafos básicos para las doce muestras de aguas, junto con los promedios mundiales (Gaillardet *et al.*, 2003). Los elementos As, Ni, Rb y Zn se encuentran enriquecidos en la cuenca con respecto a la media mundial, mientras que el Cd, Cs, Cu, Li y U se encuentran empobrecidos.

Algunos elementos poseen una alta variación, como el Na, Cl, SO_4 , Al, As, B, Cs, Fe, Li, Mn, Rb y Sr, todos con una desviación estándar mayor a 90 (Tabla 4.6). La mayoría de estos se debe a sus altas concentraciones en las aguas termales con respecto al resto de las muestras. El Ca es el catión mayor que posee la mayor desviación estándar (44), luego del Na, pero a diferencia de este, no se debe a las aguas termales (Tabla 4.6). Tomando en cuenta esto, los procesos que ocurren en las aguas a lo largo de la cuenca deben tener como participantes principalmente a estos elementos.

Se definen como valores anómalos aquellos donde se cumpla $Z \geq \bar{Z} + 2\sigma$, donde Z son las concentraciones de los elementos, \bar{Z} es la media, y σ la desviación estándar (STD). El límite se define como valor umbral y se entrega en la tabla 4.6. Al observar la tabla se nota que solo cuatro elementos no poseen valores anómalos en el área de

estudio, ya que solo cuatro valores umbrales son mayores al respectivo máximo encontrado (Mg, HCO₃, Ni, Sn y U).

Tabla 4.6. Datos estadístico básicos de las muestras de agua de la cuenca Tinguiririca Alto (N=12).

		Media	Mediana	Max	Min	STD	Valor Umbral	Media Mundial [1]
T	(°C)	18,5	20,2	22,2	12,7	3,4	-	
pH	(-)	7,3	7,7	8,2	4,8	1,1	-	
EC	(µS/cm)	943	223	5010	90,3	1642,6	-	
TDS	(mg/l)	475,7	133,6	2353,1	54,2	779,9	2035,5	
Na	(mg/l)	117,4	8,2	741	3,1	257,2	631,8	
K	(mg/l)	12,5	1,1	79,1	0,3	26,9	66,3	
Ca	(mg/l)	48	30,3	159	14,2	44,4	136,8	
Mg	(mg/l)	3,6	3,6	5,6	1,7	1,2	6	
Cl	(mg/l)	177,9	2,4	1186	0,2	405,6	989,1	
SO4	(mg/l)	83,2	41	341	6,3	100,2	283,6	
HCO3	(mg/l)	66,6	48,8	156,4	0,5	48,8	164,2	
Si	(mg/l)	12,9	7,15	48,6	3,09	14,65	42,2	
SiO2	(mg/l)	27,6	15,3	104	6,6	31,34	90,28	
F	(mg/l)	0,17	0,07	0,81	0,03	0,25	0,67	
Al	(µg/l)	58,05	20,75	384	4,4	105,77	269,59	
As	(µg/l)	410,77	2,78	3092	0,63	984,12	2379,01	0,6
B	(µg/l)	1556,63	85,7	10175	4,92	3427,86	8412,35	
Ba	(µg/l)	21,03	5,54	116	1,35	37,67	96,37	
Cd	(µg/l)	0,04	0,01	0,35	0,002	0,09	0,22	0,1
Co	(µg/l)	0,8	0,15	8,04	0,03	2,27	5,34	
Cs	(µg/l)	97,52	0,11	698	0,0005	228,83	555,18	0,01
Cu	(µg/l)	1,78	0,1	9,68	0,1	3,2	8,18	1,5
Fe	(µg/l)	159,54	28,5	1441	1,5	406,76	973,06	
Li	(µg/l)	394,75	3,97	2645	0,03	909,34	2213,43	3,2
Mn	(µg/l)	75,66	9	436	0,37	131,18	338,02	
Mo	(µg/l)	2,91	1,1	14,3	0,003	4,7	12,31	
Ni	(µg/l)	1,55	0,91	4,39	0,34	1,47	4,49	0,8
Pb	(µg/l)	0,1	0,004	0,45	0,004	0,14	0,38	0,1
Rb	(µg/l)	114,28	2,47	745	0,17	258,38	631,04	0,6
Sb	(µg/l)	7,56	0,09	55,4	0,004	17,74	43,04	
Se	(µg/l)	1,24	0,15	7,3	0,15	2,34	5,92	
Sn	(µg/l)	1,52	0,92	4,26	0,005	1,67	4,86	
Sr	(µg/l)	373,1	110,5	1499	50,3	530,03	1433,16	
U	(µg/l)	0,06	0,05	0,14	0,005	0,05	0,16	0,4
V	(µg/l)	3,72	1,3	15,8	0,1	4,87	13,46	
W	(µg/l)	0,99	0,06	7,86	0,005	2,37	5,73	
Zn	(µg/l)	36,27	13,2	168	3,6	50,23	136,73	0,6
Zr	(µg/l)	0,74	0,004	5,51	0,004	1,76	4,26	

[1] Trace elements in river Waters (Gaillardet et al., 2003)

4.2.1 Diagramas de caja y bigote

Para poder observar de manera visual las muestras e identificar valores anómalos, se realizaron diagramas de caja y bigote para todos los parámetros analizados. Estos diagramas muestran varias características estadísticas a la vez. La caja representa los datos entre el primer y el tercer cuartil, un línea vertical en medio de ella representa la mediana, y un signo “+” representa la media. Los valores más grandes y más pequeños de la muestra se representan con los bigotes, dos líneas que salen hacia adelante y hacia atrás de la caja. Los valores atípicos se representan como pequeños cuadrados aislados fuera del diagrama.

Al hacer el análisis con todas las muestras, se obtuvo que muchos de los elementos mayores y trazas tenían valores atípicos en las muestra de aguas termales y de

vertiente, ya que los procesos que allí ocurren son distintos u ocurren en una proporción distinta a los de las aguas superficiales, principalmente por las distintas condiciones fisicoquímicas, de presión y velocidad de circulación que tienen. Los resultados completos se encuentran en el Anexo F1.

Al analizar los cationes y aniones mayores, la Temperatura y el pH, las muestras de agua termal LD4 y LD5 representan claramente anomalías de Na, K, SiO₂, Cl, F y T°, al igual que en algunos elementos traza (As, B, Ba, Cs, Li, Mo, Rb, Sb, Se, Sr, W y Zr en ambas, Fe y Zn en LD4, y Cu y V en LD5). La mayoría de estos graficos se ven como angostas cajas apenas separadas de los bigotes, y a una gran distancia de los valores anómalos por la gran diferencia entre las concentraciones en las aguas superficiales y las aguas termales. Las concentraciones de Ca y SO₄ en la muestra LD9 también son anómalos, lo que podría deberse a una zona con fuerte influencia de disolución de yeso. Además ambos son el catión y el anión que más varían sus concentraciones en las aguas superficiales. El pH de las muestras LD6 y LD8 está por debajo de los valores normales, y podría influir en la disolución de fases minerales que son estables en otras aguas de la cuenca.

La muestra LD8 además posee valores anómalos en algunos elementos traza (Al, Cd, Co, Cu, Fe y Mn). Esta fue obtenida en la parte más alta de la cuenca, donde hay mayor variedad geológica, por la presencia de la franja mesozoica y el volcanismo actual. Por otro lado, la muestra LD3 posee una anomalía en la concentración de Zn, siendo esta una de las muestras de la parte baja de la cuenca. Al analizar el As, que es un elemento nocivo, se ve que no presenta anomalías en las aguas superficiales, y por lo tanto no hay una fuente contaminante particular en el área muestreada. La figura 4.20 a modo de ejemplo muestra algunos de los diagramas de caja de los elementos que presentan anomalías positivas (Al, As, Ca, Cl, Mn, SO₄, Zn) uno que presenta una anomalía negativa (pH) y otro que no presenta ninguna (HCO₃).

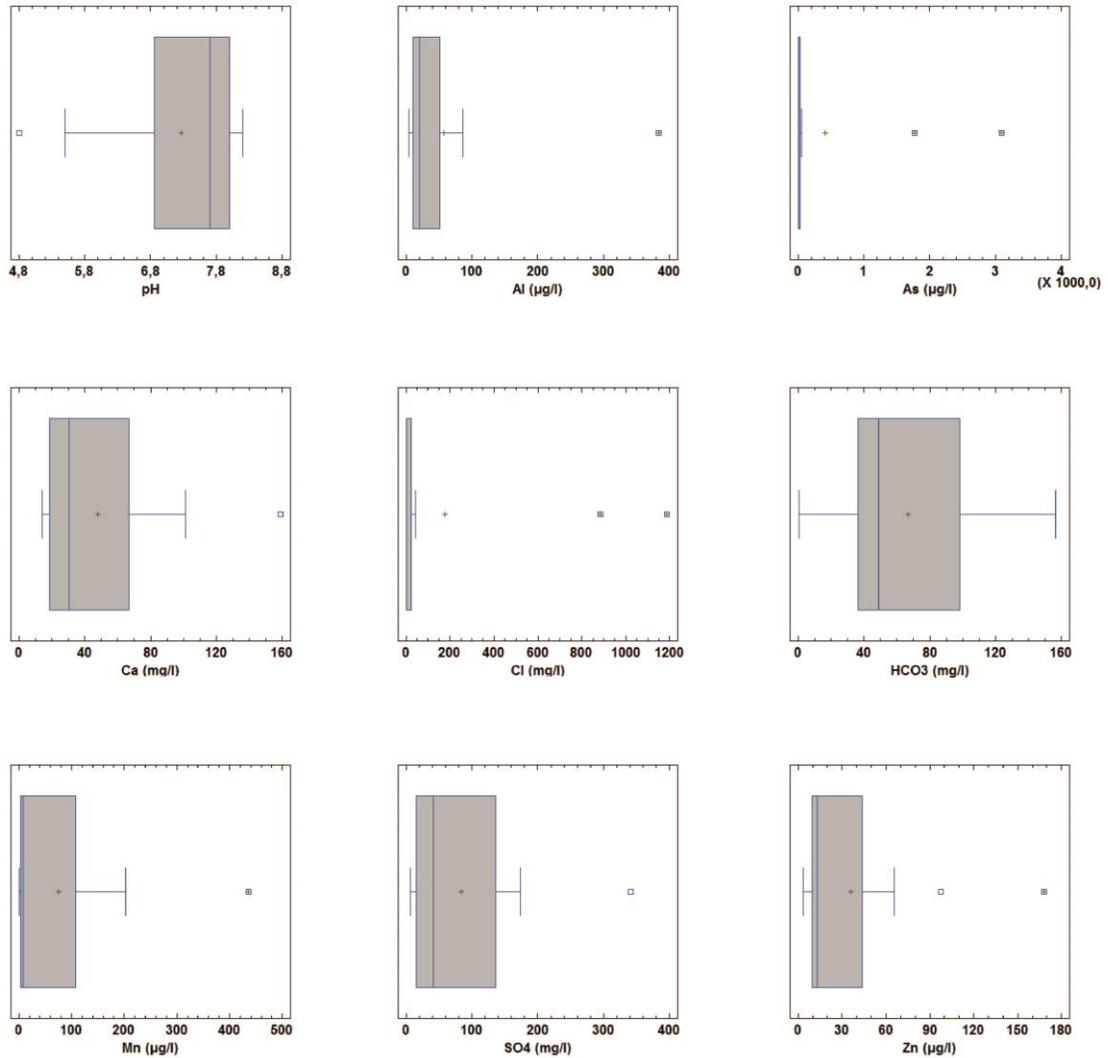


Figura 4.20. Diagramas de caja y bigotes para algunos elementos mayores y trazas.

4.2.2 Análisis multivariante

El análisis de datos composicionales (CoDa) definido por Aitchison (1986) permite conocer cómo se relacionan las distintas variables mediante distintos métodos que las comparan simultáneamente. Se emplearon dos métodos de análisis multivariable a las muestras obtenidas en la cuenca Tinguiririca Alto, el análisis de cluster jerárquico (ACJ) y el análisis de factores principales (AFP), también conocidos por sus siglas en inglés HCA y PCA respectivamente. Para ambos se realizó una conversión de coordenadas usando la transformación de razón logarítmica centrada (clr), que se basa en la media geométrica $g(\mathbf{x})$ de las muestras \mathbf{x}_i .

$$\text{clr}(\mathbf{x}) = \left(\ln \frac{x_i}{g(\mathbf{x})} \right)_{i=1, \dots, D}$$

$$g(\mathbf{x}) = \sqrt[D]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_D}$$

4.2.2.1 Análisis de clúster jerárquico (ACJ)

Este método permite identificar subgrupos o clusters entre las variables analizadas y es generalmente usado para la clasificación de datos hidrogeoquímicos (Cloutier *et al.*, 2008). Los resultados se ven representados como dendogramas, donde se agrupan primero los datos que son más parecidos entre sí, considerando las distintas variables utilizadas. Se analizó la relación entre los puntos de muestreo considerando los elementos mayores, pH y T y también lo mismo al revés. Para esto utilizo el software Statgraphics, usando el método de agrupamiento de Ward y la distancia la Euclidiana (equivalente a la distancia de Aitchison (Aitchison *et al.*, 2000)).

En la figura 4.21 se nota la relación entre los puntos de muestreo donde se pueden diferenciar tres grupos principales o clúster. El primero consiste en las muestras en general más occidentales (LD1, LD2 y LD3, más las muestras LD7 y LD11) y el segundo a las muestras más orientales (LD6, LD8, LD9, LD10 y LD12). El tercer grupo difiere más de los otros dos que estos entre sí, ya que corresponde al subgrupo de las aguas termales, correspondientes a las muestras LD4 y LD5.

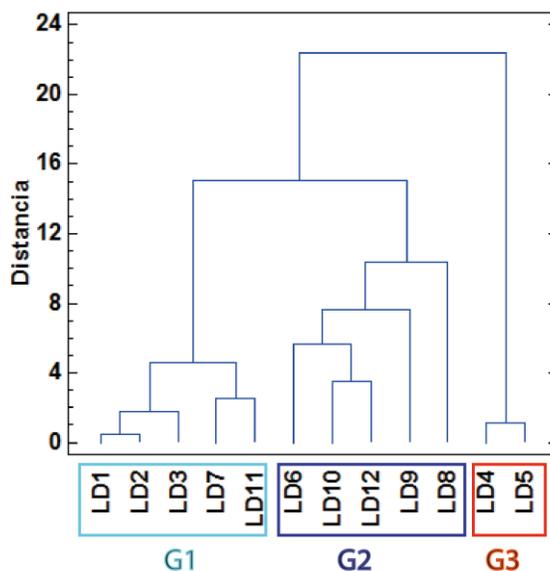


Figura 4.21. Análisis de conglomerados para los puntos de muestreo considerando elementos mayores.

Al analizar los elementos mayores entre sí, se obtienen los dendogramas de la figura 4.22A. Los parámetros más relacionados el uno con el otro son la T° con la sílice, el Ca con el Mg y el Na con el K, debido a la posibilidad de reemplazarse entre sí en estos dos últimos pares. De manera similar se realizan dendogramas con los aniones mayores y elementos traza nocivos que se presentan en altas concentraciones, como el Al, As, Fe, Li y Mn (figura 4.22B). La mayoría de estos se asocia con el sulfato, lo que puede ser relacionado con la presencia de sulfuros y procesos de lixiviación. Por otro lado, el Li y el As se relacionan mayormente con el cloruro, teniendo un origen distinto de los otros.

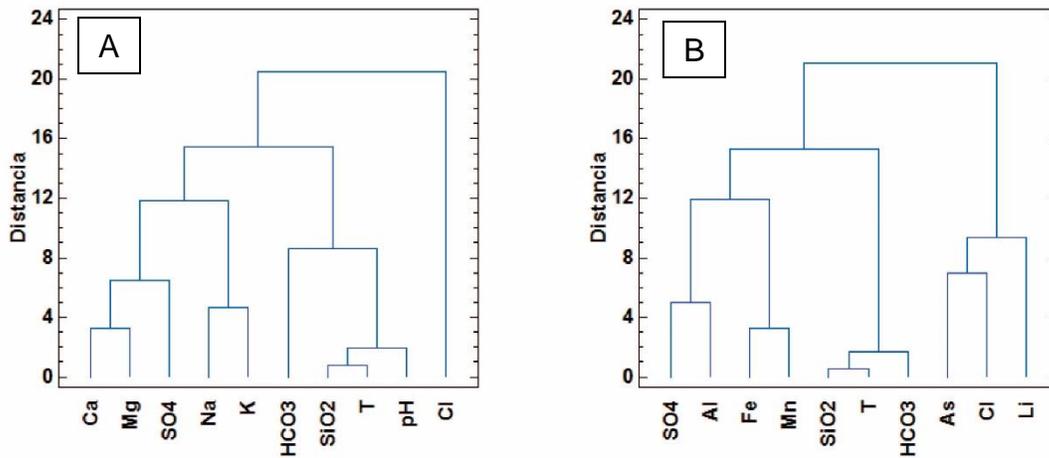


Figura 4.22. Análisis de conglomerados para elementos mayores, T° y pH (a) y algunos metales nocivos (b).

4.2.2.2 Análisis de componentes principales (PCA)

El análisis de componentes principales fue aplicado a mismos grupos de elementos que el realizado en el análisis jerárquico. El grupo A representa los elementos mayores, y el grupo B los aniones mayores más algunos metales traza (Al, As, B, Li, Mn). Esta metodología permite identificar procesos y relaciones comunes entre las variables y a la vez reducirlas para facilitar el análisis de proveniencia de las aguas y elementos nocivos. Al igual que en el análisis jerárquico las variables son comparadas mediante el cálculo de una transformación de razón logarítmica (clr).

Los resultados son gráficos en dos dimensiones donde los ejes representan los dos componentes principales. Para que los gráficos tengan sentido, la suma de ambos componentes principales debe ser alta, o también se puede analizar los gráficos de sedimentación (Blake et al, 2016). En la figura 4.23A se marca el cambio de pendiente luego del segundo componente, lo cual representa el 86,3% de la varianza de la clr calculada de los datos y por lo tanto la representación del grafico 2D será certera. La figura 4.23B marca el quiebre de la pendiente luego del tercer componente, pero entre los primeros dos representan el 79,1% de la varianza calculada, lo cual indica que la representación en 2D también tendrá sentido.

En la figura 4.24 se muestran dos diagramas de componentes principales, donde los ejes x e y corresponden entonces a los dos componentes principales con su respectivo porcentaje de la varianza total calculada.

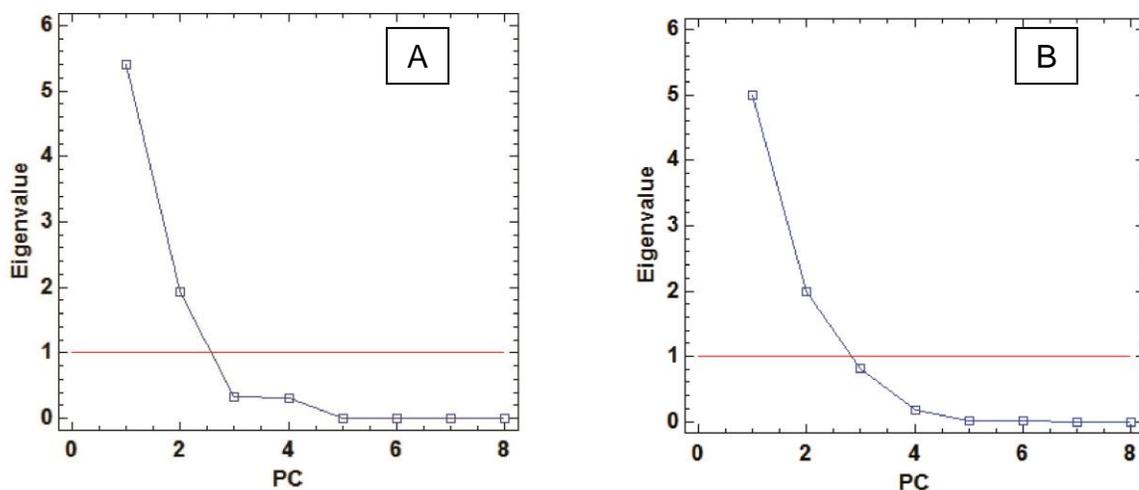


Figura 4.23. Gráficos de sedimentación para el análisis de componentes principales de: A) elementos mayores y B) aniones mayores y metales nocivos. Línea roja marca quiebre de pendiente.

La figura 4.24A muestra las mismas relaciones entre los puntos de muestreo vistas en el análisis jerárquico, siendo un grupo las muestras LD1, LD2, LD3, LD7 y LD11, otro las aguas termales LD4 y LD5. Sin embargo, el segundo grupo muestra claras diferencias, estando las muestras LD6, LD10 y LD12 al centro del gráfico, la muestra LD9 en la parte inferior central, y la muestra LD8 en la parte inferior izquierda. Los vectores de Cl, Na y K están alineados casi en la misma dirección, lo que muestra la relación entre ellos, y a la vez con las muestras de aguas termales.

La 4.24B separa las muestras de aguas termales en la parte derecha central del gráfico, y las otras hacia el centro-izquierda. Las muestras termales se encuentran alineadas con algunos metales trazas incluidos en este análisis, como el B, As y Li. La muestra LD8 se encuentra en la parte superior, alineada con el Al. Estos dos grupos forman vectores ortogonales, por lo que se puede asumir que representan procesos independientes el uno del otro (Blake et al, 2016). El primero lo identificaremos como α , y representa la interacción con aguas cloruradas cargadas con elementos altamente móviles (B, Li, Sr, etc). El segundo lo identificamos como β y corresponde a la lixiviación de minerales con altos contenidos de Fe y Al principalmente, así como también por otros elementos siderófilos.

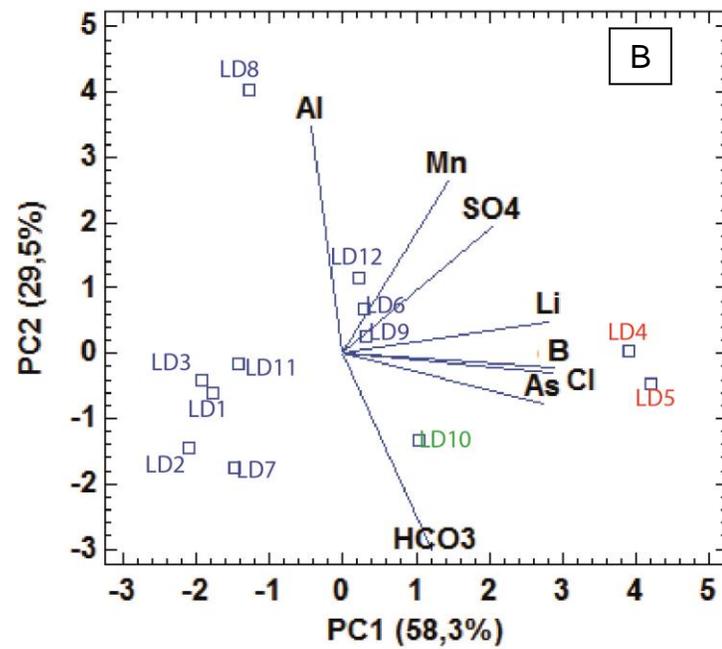
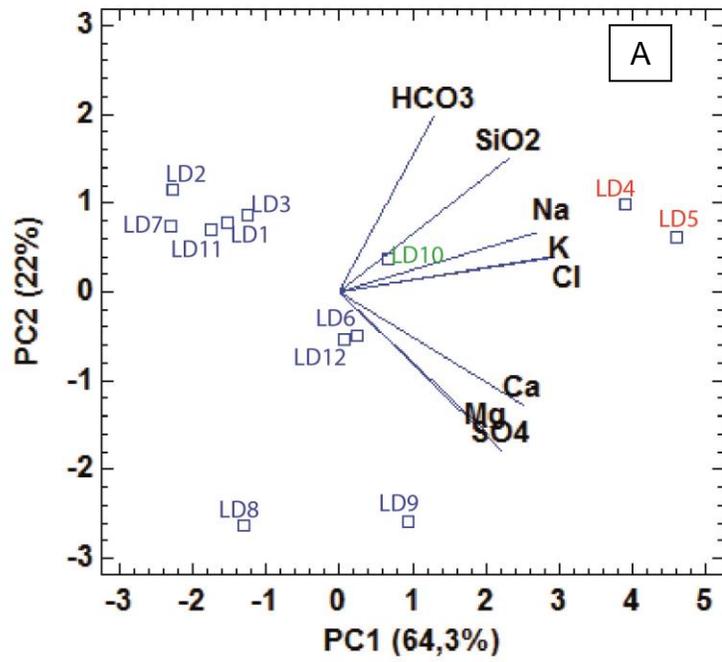


Figura 4.24. Gráficos de análisis de componentes principales para: A) elementos mayores y B) aniones mayores y algunos metales trazas.

4.3 NORMATIVA AMBIENTAL

4.3.1 N.Ch.409/1

Se comparan las 12 muestras de aguas obtenidas en la cuenca Tinguiririca Alto con las normativas vigentes en el país. La primera es la norma chilena N.Ch.409/1 del año 2005, que establece los requisitos que debe cumplir el agua potable en Chile. Para que esta tenga validez se deben cumplir la normativa de muestreo detallado en la norma chilena N.Ch 409/2 (INN, 2005), por lo que este estudio será de manera referencial. Se dividen los parámetros considerados en 5 tipos, siendo los útiles para este estudio los del tipo II: Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud, y los del tipo IV: Parámetros relativos a las características organolépticas. Dentro de estos hay 15 elementos considerados en este estudio, 8 esenciales (Cu, Cr, F, Fe, Mg, Mn, Se y Zn), 5 no esenciales (As, Cd, Hg, NO₃ y Pb), 2 organolépticos (Cl y SO₄) y el pH. Al realizar la comparación de las muestras (Anexo I.1), 5 sobrepasan los valores límite en uno o más parámetros. Las aguas termales de las muestras LD4 y LD5 claramente quedan fuera del rango, ya que duplican y triplican respectivamente el valor límite de Cl (400 mg/l). Lo mismo ocurre para el As, donde el límite es de 0,01 mg/l y los valores obtenidos del análisis son 1,7 y 3 mg/l respectivamente. Ambas también sobrepasan el límite de Mn, y la muestra LD5 el de Hg. La muestra LD10 al ser de vertiente también sobrepasa un límite, en este caso el de As (0,052 mg/l). La muestra LD8 supera largamente el límite de Fe permitido (0,3 mg/l), ya que alcanza una concentración de 1,4 mg/l. También sobrepasa el límite de Mn, y tiene un pH de 4,8, fuera del rango permitido (6,5 – 8,5). Finalmente, la muestra LD6 también está bajo el rango de pH al marcar 5,5.

Tabla 4.7. Parámetros que sobrepasan el valor límite de la N.Ch.409 en alguna de las muestras.

Parámetro	Límite Max.	Cantidad de muestras que sobrepasan el valor límite
pH	6,5-8,5	2 (LD6 (5,5) y LD8 (4,6))
As	0,01 mg/l	3 (LD4 (1,77), LD5 (3,09) y LD10 (0,05))
Cl	400 mg/l	2 (LD4 (884) y LD5 (1186))
Fe	0,3 mg/l	1 (LD8 (1,44))
Hg	0,001 mg/l	1 (LD5 (0,0014))
Mn	0,1 mg/l	3 (LD4 (0,14), LD5 (0,20) y LD8 (0,44))

4.3.2 N.Ch.1333

Junto a la norma para agua potable se comparan las muestras con la norma para aguas de riego N.Ch.1333 del año 1978 (INN, 1978). Esta considera 24 elementos además de pH. Se suman el % de Na (con respecto a los otros cationes mayores), Ag, Al, B, Ba, Be, Co, Li, Mo, Ni, U y V. Además se quita el NO₃ y el Mg. Los resultados se muestran en el Anexo I2.

En este caso son 4 las muestras que no cumplen con la normativa. Las aguas termales LD4 y LD5 nuevamente caen en este grupo, a pesar que algunos límites han cambiado, como por ejemplo el de As, que sube de 0,01 a 0,1 mg/l. Sin embargo esto no es suficiente ya que en ambas los valores son mayores a 1mg/l. El contenido de B también es superado, ya que de un máximo de 0,75 mg/l las muestras alcanzan 7 y 10 mg/l respectivamente. El límite de cloruro es más bajo por lo que nuevamente es superado, así como el porcentaje de Na, que llega a más de 80% en ambas de 35% como valor límite. El Hg no varía por lo que es superado por la muestra LD5, al igual que el Li y Mn por escaso margen. LD4 y LD5 también superan por poco el límite de Mo.

Las otras muestras son LD8, que queda fuera por el rango de pH, que aumenta de 5,5 a 9, y por el Mn, y la muestra LD9 que excede el límite de SO₄, (341 mg/l de 250 mg/l posibles).

Tabla 4.8. Parámetros que sobrepasan el valor límite de la N.Ch.1333 en alguna de las muestras.

Parámetro	Límite Max.	Cantidad de muestras que sobrepasan el valor límite
pH	5,5-9	1 (LD8 (4,8))
Na (%)	35%	2 (LD4 (81%) y LD5 (81%))
Cl	200 mg/l	2 (LD4 (884) y LD5 (1186))
SO₄	250 mg/l	1 (LD9 (341))
As	0,1 mg/l	2 (LD4 (1,77) y LD5 (3,09))
B	0,75 mg/l	2 (LD4 (7,38) y LD5 (10,18))
Hg	0,001 mg/l	1 (LD5 (0,0014))
Li	2,5 mg/l	1 (LD5 (2,66))
Mn	0,2 mg/l	2 (LD5 (0,20) y LD8 (0,43))
Mo	0,01 mg/l	2 (LD4 (0,011) y LD5 (0,014))

4.3.3 Otras normativas

De manera complementaria se comparó el rendimiento de las aguas de la cuenca con normativas de otros países. Para esto se tomó como referencia la “*National Primary Drinking Water Regulations*” de la EPA de Estados Unidos (EPA, 2009), La directiva para la calidad del agua destinada para el consumo humano (“*Council Directive; on the quality of wáter intenden for human consumption*”), de la Union Europea (UE, 1998), y la Guía para la calidad del agua potable (Guideline for Drinking-water Quality) de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011)

En el Anexo I3 se puede ver una tabla comparativa entre estas normas y las normas chilenas. En general son similares, aunque la chilena considera menos parámetros. La norma estadounidense es la más completa, pero varios de los elementos no están sujetos a un límite legal, ya que según indican no causan problemas a la salud, sino solo estéticos o cosméticos. La organización mundial de la salud también deja fuera varios parámetros que las otras normas consideran, ya que acorde a su determinación,

no hay suficiente información para generar un límite claro, o simplemente los elementos nocivos no se presentan en concentraciones dañinas en el agua potable, lo cual es contradictorio si se considera la contaminación artificial de sectores donde se obtiene agua potable.

Al comparar elemento por elemento, se ve que la norma chile N.Ch.409 permite mucho más Cl, SO₄, Cd, Mn y Pb (el doble en todos, excepto el Pb que permite 5 veces más que las otras), además de no considerar la Ag, Al, B, Be, Ba, Ni, Sb, Tl y U.

En la tabla del Anexo I4 se comparan las muestras con la normativa de la EPA de Estados Unidos. Los resultados son similares a la norma N.Ch.409, dejando sobre el límite a las muestras LD4, LD5 y LD10. En este caso también sobrepasan los valores de Sb, no considerado anteriormente. Las muestras LD6, LD8, LD9 y LD12 también sobrepasan algunos valores, pero solo de elementos fuera de una obligación legal de cumplir la norma, como el pH en LD6 y LD8, el Al, Fe y Mn en LD8, el SO₄ en LD9, el As el LD10 y el Mn el LD12.

La normativa europea contrastada con las muestras se encuentra en la tabla del Anexo I5, y deja fuera del límite a agua potable a las mismas 7 muestras que la norma de la EPA. En este caso quedan fuera del rango las muestras de aguas termales LD4 y LD5 por el contenido de Na y la Conductividad Eléctrica (3700 y 5000 μ S/cm para un máximo de 2500 μ S/cm), además del Cl, B, Mn y Sb, y el Hg para la muestra LD5.

Las muestras comparadas con los límites indicados por la Organización Mundial de la Salud se presentan en la tabla del Anexo I6, y se puede observar que sobrepasan los valores recomendados solo tres muestras. Las aguas termales LD4 y LD5 superan el máximo permitido de As, B y Sb, mientras que la muestra de vertiente LD10 supera el máximo de As.

4.4 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS

Los mapas de distribución geográfica de los parámetros analizados se entregan en conjunto en el Anexo J. Estos corresponden a 43 mapas del área de estudio que incluyen los parámetros fisicoquímicos analizados en terreno (pH, T° y EC), y los 40 elementos químicos analizados, incluyendo aquello con más de 75% de los datos bajo el límite de detección que no fueron sometidos al análisis estadístico.

Cada mapa separa los datos en 3 clases, usando un formato de semáforo (verde, amarillo y rojo). En caso de datos bajo el límite de detección, se creó una cuarta clase con un símbolo "X" para identificarlos en el mapa. La clase más baja o verde fue construida en base a los diagramas de caja de cada elemento y corresponde al 75% más bajo de cada muestra. La clase media o amarilla corresponde al 25% más alto de cada muestra, excluyendo datos de la clase más alta o roja, que quedarán definidos como aquellos que superen la normativa legal chilena para agua potable (INN, 2005), la guía de la OMS (WHO, 2011), la normativa de la EPA (EPA, 2009), la normativa de la UE (UE, 1998), o si representan anomalías en el área de estudio, en ese orden de prioridad. En caso de que existan un límite legal para algún elemento, pero este no sea

superado en ningún caso, la clase alta o roja podrá quedar ausente en ese mapa, apareciendo solo en la leyenda. También puede quedar descartada la clase media o amarilla en caso de que se fusione con la clase alta o roja.

Para la elaboración de los mapas de los parámetros fisicoquímicos en vez de una leyenda de semáforo se utilizó una sola con cambios de tamaño entre las 3 clases, construidas convenientemente de acuerdo con la distribución de los datos.

5 DISCUSIONES

5.1 GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de las doce muestras de agua de la cuenca río Tinguiririca Alto y sus respectivos filtros, se pueden establecer valores background y de anomalías locales para los elementos químicos disueltos. Así, como sugiere Gustavsson et al. (2012), la línea de base para cada elemento se entrega tanto como un rango de valores, donde se incluyen el máximo, el mínimo, la media, la mediana, la desviación estándar y los valores umbrales para las anomalías, como también a través de una representación de su distribución geográfica de los datos en el área de estudio. El hecho de que se hayan mezclado aguas superficiales, de vertiente y termales, proporciona una mayor variabilidad a las muestras, lo que queda demostrado por ejemplo en la comparación entre las medias y las medianas de las concentraciones de algunos elementos. En el caso del As, este posee una media de 410 $\mu\text{g/l}$ y una mediana de 2,78 $\mu\text{g/l}$, ya que las aguas termales superan los 1,5 mg/l, y las aguas superficiales apenas llegan a 52,2 $\mu\text{g/l}$.

De la totalidad de las muestras se puede distinguir tres grupos principales, basado en su caracterización geoquímica (figuras 4.2 y 4.3) y en el análisis multivariable:

- El primero son las muestras LD1, LD2, LD3, LD7 y LD11, las más occidentales, o que tienen solo influencia de la parte oeste de la Cordillera Principal (WPC), es decir, de la franja Cenozoica. Estas presentan aguas bicarbonatadas cálcicas, de baja conductividad, alta temperatura y pH levemente alcalino. Tienen concentraciones mayores de SiO_2 , Mn, Pb, Sn y V en comparación a las muestras de la parte este. Drenan el área cubierta por la formación Abanico, depósitos cuaternarios, la ingimbrita de Sierra Bellavista y las franjas intrusivas del Mioceno inferior y Mioceno. La única anomalía presente en esta área es la de Zn en la muestra LD3, que podría relacionarse con los cuerpos intrusivos de la franja del Mioceno Inferior, aunque no hay precedentes de minería de Zn ni de otro metal en los intrusivos de esa edad en la Cordillera Principal (Contreras & Schilling, 2012). El material transportado en suspensión contiene Oro nativo formando clústers, que podría tener un origen también en los cuerpos intrusivos del Mioceno inferior. En las muestras LD1, LD2 y LD3 se destaca la alta presencia de partículas de La asociado con Ni y Mo, Ag y óxidos de Cu.
- El segundo son las muestras LD6, LD8, LD9, LD10 y LD12, más orientales, y que drenan el área cubierta por la parte Este de la Cordillera Principal (EPC), es decir, la franja Mesozoica, además de los intrusivos del Mioceno Superior y el Volcanismo actual. Tienen una menor temperatura que el resto de las muestras, lo que puede deberse a la altura, pH neutro a ácido en algunas muestras (LD6 y LD8), una mayor conductividad y son sulfatada cálcicas a sulfatadas-bicarbonatadas cálcicas. Están enriquecidos en comparación con las muestras del primer grupo en casi todos los elementos analizados, presentando anomalías

de Al, Cd, Co, Cu, Fe y Mn en la muestra LD8 por la influencia de una zona de alteración en las cercanías del volcán Tinguiririca, y de Ca y SO₄ en la muestra LD9, debido probablemente a niveles evaporíticos de Yeso característicos de la Formación Rio Damas. El material transportado tiene menor carga de metales pesados que el grupo anterior, y solo destaca la mayor cantidad de sulfuros, principalmente pirita, y la muestra LD10 que cuenta con cristales de monacita-Ce con menor Nd y La, y de óxidos de Cu-Zn-Ni. Es relevante también la interacción que tienen las aguas superficiales de esta zona con aguas subterráneas, ya que el sistema de fallas El Fierro presenta numerosas manifestaciones termales al Oeste del Volcán Tinguiririca y en el valle del rio Tinguiririca en las Termas del Flaco, y estas aguas pueden traer una carga importante de metales trazas a la superficie.

- Las aguas termales LD4 y LD5 forman el tercer grupo y muestran diferencias importantes en la clasificación geoquímica de sus aguas. Son altamente salinas, tienen una muy alta T°, conductividad, pH neutro y presentan valores anómalos en las concentraciones de Na, K, SiO₂, Cl, F, As, B, Ba, Cs, Cu, Fe, Li, Mo, Rb, Sb, Se, Sr, V, W, Zn y Zr (En una o ambas muestras). Estos son en su mayoría metales móviles, excepto por el Zr, y con afinidades geoquímicas diversas (litófilos, calcófilos y siderófilos). Tienen una alta carga de cristales de halita y calcita, pero no destaca el contenido de metales pesados transportados en el material particulado. Su ocurrencia en superficie está directamente relacionada con la presencia de la Falla El Fierro.

La muestra LD10 a pesar de tener un origen subterráneo al igual que las muestras de agua termal, presenta notables diferencias con estas. Las concentraciones de la mayoría de los elementos mayores a pesar de ser más altas que las muestras de agua superficial, aún están muy lejos de los niveles en las aguas termales. Lo mismo ocurre con la temperatura, que es más alta que las aguas superficiales cercanas. Esto sugiere un origen subterráneo distinto para ambos grupos, a pesar de su cercanía espacial (Ambas fueron tomadas en el poblado de Termas del Flaco). Las muestras LD4, LD5 y LD10 tienen características similares a las descritas por Benavente (2015) para las aguas termales ubicadas en la franja Este de la Cordillera Principal (EPC). En ese estudio se sugiere que la química de los fluidos hidrotermales está controlada por la litología de la secuencia Mesozoica y por diversos procesos que podrían tener relación con las muestras de este trabajo. El primero ocurre en las cercanías de los volcanes activos, donde los acuíferos superficiales entran en contacto con gases ricos en CO₂(H₂S) y producen aguas dominadas por HCO₃⁻ y SO₄²⁻, que podrían corresponder a las muestra LD10. El segundo ocurre solo al Sur del Oroclino del Maipo, donde se genera un régimen transtensional que favorece el ascenso de calor y fluidos profundos, y que ese trabajo comprobó que el agua provenía de reservorios a temperaturas > 200 ° C y se caracterizaban por ser cloruradas sódicas, al igual que las muestras LD4 y LD5. Estas tendrían una importante contribución magmática, que llegaría hasta el 35% de la composición química e isotópica, y podría ser la responsable de las altas

concentraciones de elementos incompatibles. No descartan también la adición de salmueras ricas en Na-Cl.

Por otro lado, la figura 4.7 muestra que la muestra LD10 tiene un exceso de Ca con respecto a HCO_3^- y SO_4^{2-} , por lo que de haber una contribución de gases en esta muestra tendría que haber también una contribución de Ca aparte de la disolución de yeso y calizas o bien que ocurra precipitación de minerales carbonatados o sulfatados, como lo vistos en el filtro de la muestra LD10, que corresponden a carbonatos y/o sulfatos de Cu, Ni y Zn. Las muestras LD4 y LD5 muestran excesos de HCO_3^- y SO_4^{2-} con respecto al Ca y por lo tanto tendrían también una contribución importante de esto gases en las cercanías del volcán.

El análisis de componentes principales permitió identificar dos procesos denominados α y β que ocurren en la aguas de la cuenca, y que son los responsables de la mayoría de las anomalías que se pueden observar. Ambos ocurren en la parte Este de la Cordillera Principal, y son independientes el uno del otro. El primero, α , corresponde a la mezcla que tienen las agua infiltradas en la cordillera con los fluidos profundos de origen magmático con alta temperatura y alta carga de elemento móviles. Ocurre asociado a las falla profundas que levantan el borde oriental de la cuenca de Abanico, bajo el arco magmático actual. El segundo, β , ocurre por la lixiviación por exposición en superficie de áreas con alteración hidrotermal en las cercanía del volcán Tinguiririca. La presencia de sulfuros puede ser la responsable de generar el exceso de SO_4^{2-} visto en la figura 4.6, y por lo tanto, de generar el drenaje ácido que enriquece a la muestra LD8 en Al, Cd, Co, Cu, Fe y Mn. Así, la parte oriental de la cordillera de los Andes sería la responsable de elevar las concentraciones de metales tóxicos en el agua, por el efecto del volcanismo actual y las estructuras profundas en el borde de la cuenca de abanico. Esto afecta toda el área drenada en la parte alta de la cuenca, y también el cauce del río Tinguiririca hacia el Oeste, ya que los altos niveles de alguno metales persisten en la muestra LD6, y en la estación de medición de la DGA que se encuentra agua abajo.

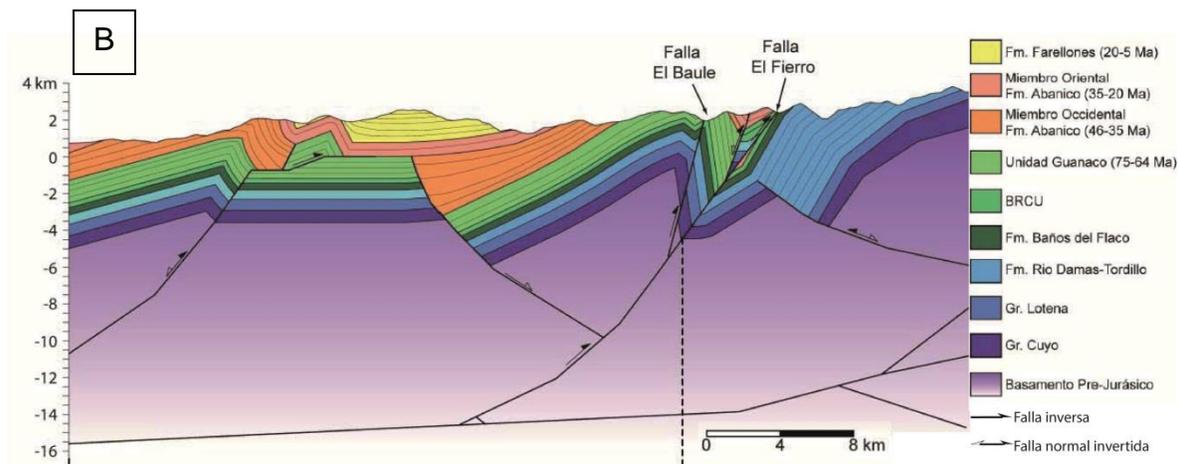
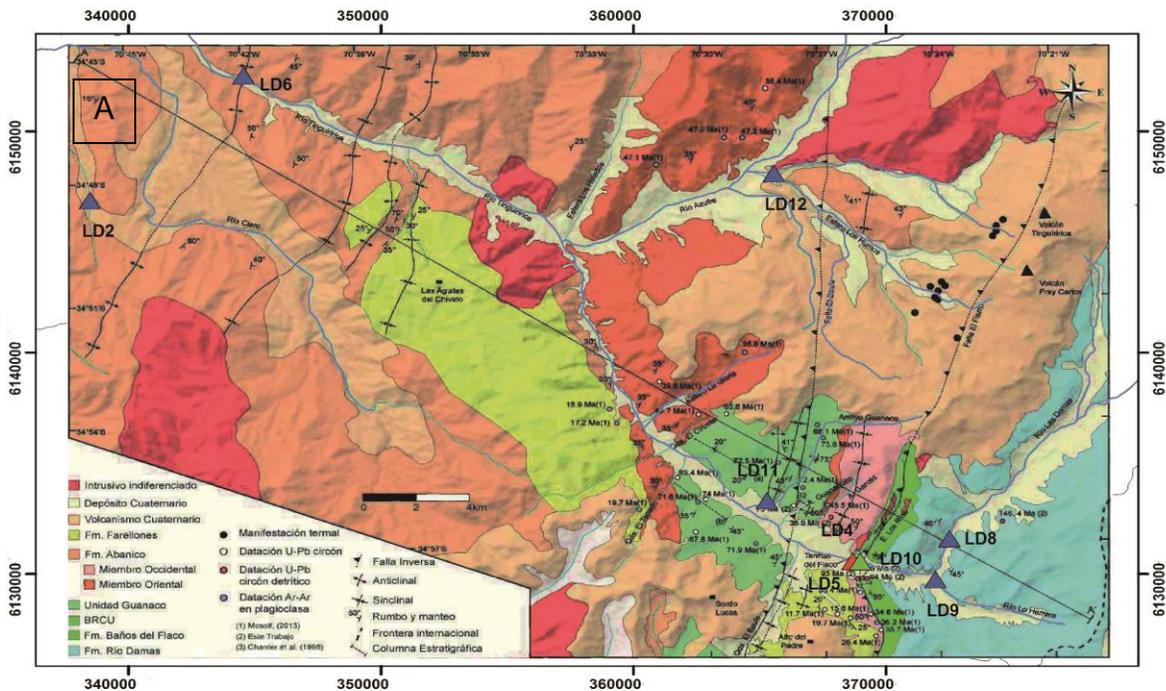


Figura 5.1. Mapa (A) y perfil estructural (B) de la geología de los alrededores de las Termas del Flaco y del Volcán Tinguiririca. Tomado de Tapia et al. (2015)

El mapa y el perfil de la figura 5.1 muestran en detalle la geología de la zona de Termas del Flaco y del volcán Tinguiririca. Las manifestaciones termales están relacionadas con la Falla El Fierro, al ser la estructura principal de la zona y la que alcanza mayor profundidad. El proceso α descrito entonces no estará restringido al poblado de Termas del Flaco, sino que podría ocurrir en cualquier parte a lo largo de la traza de la falla. Toma relevancia entonces el efecto que pueden tener las aguas profundas en la subcuenca del río Azufre, que drena el lado Oeste del volcán Tinguiririca, y también como afectan este afluente a la química del río Tinguiririca. Una toma de muestras

antes y después de la confluencia entre ambos ríos podría esclarecer el resultado que tienen en el material disuelto del río principal.

5.2 CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Al observar las mediciones de calidad del agua realizadas por la DGA en los últimos años en la estación bajo Los Briones, se ve que las mayores concentraciones de metales se alcanzan entre Abril y Agosto, que es el periodo del año con menor caudal medido en el río Tinguiririca (figura 3.5). Desde comienzos del 2014 hasta la fecha de este estudio, se habían realizado 12 reportes, donde en casi todos se sobrepasaban la normas chilenas de agua potable para As, Fe, Hg, Mn y Pb. Además, desde finales del año 2016 no se han dado más reportes de As y Hg, dos de los metales que más daño pueden causar (Anexo H).

Los eventos de remociones en masa de Febrero de 2017 no generaron un cambio significativo en la concentraciones de elementos en la estación Bajo Los Briones, y estos se mantuvieron dentro de los valores normales de los últimos años debido a los cambios de estación. Tomar muestras en otros puntos de la cuenca podría ayudar a ver si los sedimentos traídos de la laderas ayudaron a captar metales disueltos en el medio acuoso o bien si tendieron a liberarlos y a dejar expuestas nuevas áreas con alteración hidrotermal.

Las muestras tomadas para este trabajo también superaron las normas chilenas para agua potable, mostrando que los procesos que tienen lugar en la parte oriental elevan las concentraciones de algunos metales a niveles tóxicos para la salud humana. Este ocurre para el As, Fe, Hg y Mn, los cuales favorecidos por los procesos α y β llegan a niveles altísimos en partes puntuales de la cuenca, evidenciando una tendencia natural de las aguas a enriquecerse en esos elementos.

Esto toma mayor importancia al considerar que las muestras LD4 y LD5, están en contacto directo con la población al ser agua de piscinas termales, y estar en el poblado más grande de la parte alta de la cuenca. Las personas que están constantemente expuestas a estas aguas pueden estar ingiriendo As en cantidades tóxicas, donde los efectos negativos van desde enfermedades a la piel (Tondel, 1999; Rahman, 2001), cardiovasculares (Wang, 2007), neurológicas (Mukherjee, 2003), respiratorias (Milton, 2001), desórdenes reproductivos (Ahmad, 2001), diabetes mellitus (Rahman, 1998) y aumenta el riesgo de cáncer (Karimi Nezhad, 2010). Para evaluar los niveles de exposición habría que tomar muestras del agua consumida en Termas del Flaco y compararla con las muestras LD4, LD5 y LD10, para ver el origen que tiene y la carga metálica que posee. Los efectos en la población transitoria y turistas no debería ser importante al no tener una exposición prolongada a los contaminantes.

El B y Sb también se encuentran en niveles altos, pero no están regulados por la norma chilena de agua potable. Sin embargo, si son considerados por la OMS, la EPA y la UE que en el caso de las muestras LD4 y LD5 superan los valores límite de ambos. Los efectos del Boro han sido demostrados en ratas, conejos y perros, donde periodos cortos de exposición ocasionan lesiones testiculares (WHO, 2009). El Antimonio por

otro lado ocasiona daño principalmente por inhalación, causando daño en el tracto respiratorio que puede terminar en una rinitis, bronquitis o un edema o enfisema pulmonar (Winship, 1987), pero no se ha demostrado que cause daños por ingesta oral (WHO, 2003a). Es entonces en base a la incertidumbre y no a la certeza que se determina que estos elementos queden fuera de regulación en Chile, aun cuando el organismo principal a nivel mundial que se preocupa por la salud humana indica que deben tomarse en cuenta.

La subcuenca del rio Damas que abarca el borde Este del volcán Tinguiririca y fue muestreada en LD8, también representa un peligro por los altos niveles de Fe en el agua. A pesar de que no hay poblaciones en esta parte del área de estudio, sus aguas llegan directamente al rio Tinguiririca, por lo que habría que ver su efecto tomando muestras antes de después de la confluencia entre ambos ríos, al igual que para el rio Azufre. La OMS no determina un límite para el Fe en el agua ya que no considera determina que no se llegan a niveles tóxicos en el agua potable, que sería de 2 mg/l (WHO, 2003b).

6 CONCLUSIONES

La química de las aguas de un sistema fluvial de la zona central de Chile como es la cuenca Alto Tinguiririca es variada y responde a la diversidad geológica y estructural que allí se presenta. El factor de primer orden es la configuración de la Cordillera principal, dividida en WPC y EPC, teniendo claras diferencias las muestras de ambas zonas. También juega un rol principal la Falla el Fierro, que separa ambas franjas Mesozoica y Cenozoica, se alinea con el volcanismo actual y favorece el ascenso de fluidos profundos de alta temperatura y con alta carga metálica.

Los procesos principales que modifican las químicas de las aguas se denominaron α y β , y corresponden a la mezcla de aguas meteóricas con fluidos profundos de origen magmático y la lixiviación en zonas con alteración hidrotermal expuesta. Ambos son los responsables de la mayoría de las anomalías geoquímicas en el área de estudio y también de los elementos que sobrepasan los límites de la norma chilena para agua potable (N.Ch.409) en las distintas muestras obtenidas. Estos fenómenos son más bien puntuales y representan focos de contaminación natural de las aguas, donde su efecto en algunos casos perdura en el cauce principal que es el río Tinguiririca, como se ve en la muestra LD6 y en la estación de monitoreo de Bajo Los Briones.

Es difícil cuantificar el impacto que puedan tener los altos niveles de contaminantes en la parte baja del río Tinguiririca, más al Oeste de la Cordillera de los Andes. Las aguas que drenan la alta cordillera pasan por la Depresión Central en una zona caracterizada por la producción agrícola, y terminan en el lago Rapel, llevando consigo elementos tóxicos disueltos y sedimentos con carga metálica potencialmente dañina. Los altos niveles de metales tóxicos en el agua no aparecen en los sistemas fluviales de Chile exclusivamente por la actividad minera u otras actividades humanas, sino que los factores naturales también tienen un rol determinantes y deben ser monitoreados de igual manera.

Queda claro también que la población que se someta a una larga exposición a las aguas de la alta cordillera, como en el pueblo de Termas del Flaco, podrían estar permanentemente bebiendo aguas con niveles tóxicos de As, Hg o Mn, lo que puede traer efectos negativos a la salud a corto y largo plazo.

Se propone una toma de muestras más extensiva en la cuenca, que permita ver el efecto de los afluentes que podrían traer más cambios al río Tinguiririca, tomando mediciones antes y después de la confluencia entre ellos. También se propone extender la cantidad de metales a analizar, ya que en el material filtrado se encontraron partículas con cantidades interesantes de Oro, Lantano, Thorio, Titanio, Indio, entre otros. Además realizar un estudio geoquímico de los sedimentos en paralelo a las muestras de agua puede ayudar a ver no solo el daño actual que pueden causar las aguas, sino el potencial que tiene el sistema para captar y liberar nuevos metales, ante cambios en el ambiente que se pueden dar por la instalación de industrias en la cuenca o por la repetición de eventos como las remociones en masa de Febrero de 2017.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, L. (1960). *Geología de los Andes de Chile central (provincia de Aconcagua)*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Boletín 9, 70 pp.
- Ahmed, A. (2001).
An overview of arsenic removal technologies in Bangladesh and India.
- Aitchison, J. (1986). *The Statistical Analysis of Compositional Data*. Londres: Chapman and Hall Ltd.
- Aitchison, J., Barcelo-Vidal, C., Martín-Fernandez, J., & Pawlowsky-Glahn, V. (2000). Logratio analysis and compositional distance. *Math. Geol.* 32, 271-275.
- Arcos, J. (1987). *Geología del Cuadrángulo Termas del Flaco, Provincia de Colchagua, VI Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 122 p.* Santiago de Chile.
- Arcos, R., Charrier, R., & Munizaga, F. (1988). Volcanitas Cuaternarias en la hoya superior del Río Tinguiririca (34° 40' L.S. - 70°21' L.W.): Características geológicas, antecedentes geoquímicos y geocronológicos. *V Congreso Geológico Chileno. Tomo III*, p. 1254-1260.
- Benavente, O. (2015). *Origen y naturaleza de los fluidos en los sistemas volcanicos e hidrotermales activos de los Andes de Chile Central (32.5-36°S)*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Mencion Geología. Santiago: Universidad de Chile.
- Blake, S., Henry, T., Murray, J., Flood, R., Muller, M., Jones, A., y otros. (2016). Compositional multivariate statistical analysis of thermal groundwater provenance: A hydrogeochemical case study from Ireland. *Applied Geochemistry* 75, 171-188.
- Boggs, S. (2006). *Principles of sedimentology and stratigraphy*. Pearson Prentice Hall.
- Branson, E. B. (1915). Origin of thick gypsum and salt deposits. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 26, no 1, 231-242.
- Charrier, R., & Muñoz, N. (1994). Jurassic Cretaceous Palaeogeographic evolution of the Chilean Andes at 23–24 S latitude and 34–35 S latitude: A comparative analysis. En *Tectonics of the Southern Central Andes*. Springer Berlin Heidelberg, p. 233-242.
- Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Norell, M., Zapatta, F., y otros. (1996). *New evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Central Chile*. *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 9, p. 393–422. Santiago de Chile.

- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J. J., Gana, P., Kay, S., y otros. (2002). *Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S.L.)*. *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 15, p. 117-139.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. (2007). *Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile*, en: Moreno, T., Gibbons, W. Eds. *The Geology of Chile*. Geological Society, London, p. 21–114.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., & Savard, M. (2008). Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology* 353, 294–313.
- CONAF. (2013). (En línea). Consultado el 15 de Octubre en: <http://sit.conaf.cl/>. Santiago.
- Contreras, J., & Schilling, M. (2012). *Geología del área San Fernando-Curicó, Regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y del Maule*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, mapa escala 1:100000.
- Covacevich, V., Varela, J., & Vergara, M. (1976). *Estratigrafía y sedimentación de la Formación Baños del Flaco al sur del río Tinguiririca, Cordillera de los Andes, Provincia de Curicó, Chile*, en: 1° Congreso Geológico Chileno, Santiago, vol. 1, p. 191-211.
- Davidson, J. (1971). *Tectónica y paleogeografía de la Cordillera Principal en el área de la Nacientes del Teno Curicó, Chile*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 160 p. Santiago de Chile.
- DGA. (2004). *Diagnostico y clasificacion de los cursos y cuerpos de agua segun objetivos de calidad*. Santiago de Chile.
- DGA. (2005). *'Evaluación de los Recursos Hídricos de la VIa Región, Modelación Hidrogeológica de los valles de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca*. Santiago de Chile.
- DGA. (2011). *Pronosticos de disponibilidad de agua temporada de riego 2010-2011*. Santiago de Chile.
- DGA. (2015). *'Diagnostico de la calidad de las aguas de la región Libertador Bernardo O'Higgins*. Santiago de Chile.
- DGA. (2017). *Estimación de la recarga en aguas subterráneas y Determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas altas de la Región del General Libertador Bernardo O'Higgins*. Santiago de Chile.

- Drake, R., Curtis, G., & Vergara, M. (1976). *Potassium-argon dating of igneous activity in the Central Chilean Andes: Latitude 33° S. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 3, p. 285-295. Santiago de Chile.
- EPA. (2009). *National Primary Drinking Water Regulations*. Office of groundwater and drinking water.
- Fariás, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., y otros. (2008). *Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33°-35°S)*. Santiago de Chile: Tectonics, vol. 27, TC1005, 22 p.
- Fock, A. (2005). *Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias con Mención Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 179 p.*
- Förstner, U., & Wittman, G. (1979). Metal pollution in the aquatic environment.
- Gaillardet, J., Viers, J., & Dupré, B. (2003). Trace elements in river waters. *Geochemistry of Earth Surface Systems: From the Treatise on Geochemistry, Surface, Ground Water, Weathering, and Soils*, vol. 5, , 225-272.
- Gemici, U., & Filiz, S. (2001). Hydrochemistry of the Çeşme geothermal area in western Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal research*, vol. 110, 171-187.
- Giambiagi, L. e. (2003). Cenozoic deformation and tectonic style of the Andes, between 33 and 34 south latitude. Tectonics, vol. 22, no 4.
- González, O., & Vergara, M. (1962). *Reconocimiento Geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35° y 38° Latitud Sur. Publicaciones, N° 24, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 121 p.* Santiago de Chile.
- Gustavsson, N., Loukola-Ruskeeniemi, K., & Tenhola, M. (2012). Evaluation of geochemical background levels around sulfide mines – a new statistical procedure with beanplots. *Applied Geochemistry*, 240-249.
- Hauser. (1990). *Carta hidrogeológica de la VI región.* . SERNAGEOMIN.
- Hawkes, H., & Webb, J. (1962). Geochemistry in mineral exploration. *Harper & Row, Publisher, Incorporated. 49 East 33rd Street, New York.*
- Horowitz A.J., E. K. (1992). The effect of membrane filtration artifacts on dissolved trace element concentrations. *Water Research*, 753-763.
- INN, Instituto Nacional de Normalización. (1978). *Norma Chilena Oficial N.Ch.1333 Requisitos de calidad de agua para diferentes usos.* Santiago.
- INN, Instituto Nacional de Normalización. (2005). *Norma Chilena Oficial N.Ch.409/1 Agua potable - Parte 1 - Requisitos.* Santiago.

- Karim Nezhad, M. G. (2010). Spatial variability of Ss and Cd concentrations in relation to land use, parent material and soil properties in topsoils of Northern Ghorveh, Kurdistan Province, Iran. *World Appl Sci*.
- Klohn, C. (1960). *Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, Colchagua y Curicó*. Santiago de Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Boletín N°8, 95 p.
- Köppen, W. (1900). *Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt.*— *Geogr. Zeitschr.* 6, 593–611, 657–679.
- Lacassie, J. (2008). *Estudio mineralógico y geoquímico del sistema fluvial del río Rapel, VI Región, Chile*. Servicio. Santiago de Chile.
- Milton, A. e. (2001). Chronic arsenic poisoning and respiratory effects in Bangladesh. *Journal of occupational health*, vol. 43, no 3, 136-140.
- Mukherjee, S. e. (2003). Neuropathy in arsenic toxicity from groundwater arsenic contamination in West Bengal, India. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 38, no 1, 165-183.
- Palma, P. D. (2017). Gestión de los Recursos Hídricos Rol de Ministerio del Medio Ambiente. Charla para alumnos del curso Geoquímica Ambiental. Santiago de Chile.
- Persico, M. (2016). *La Unidad Guanaco en el valle del río Tinguiririca (34°55'S): Características estratigráficas y geoquímicas e implicancias tectónicas para el cretácico tardío en el margen andino*. Santiago de Chile: Memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 117 p.
- Rahman, M. e. (1998). Diabetes mellitus associated with arsenic exposure in Banglades. *American Journal of epidemiology*, vol. 148, no 2 , 198-203.
- Rahman, M. e. (2001). Chronic arsenic toxicity in Bangladesh and West Bengal, India—a review and commentary. . *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, vol. 39, no 7, 683-700.
- Rauld, R. (2002). *Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S)*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Geología, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 444 p. Santiago de Chile.
- Salminen, R., & Gregorauskiené, V. (2000). Considerations regarding the definition of a geochemical baseline of elements in the surficial materials in areas differing in basic geology . *Applied Geochemistry* 15, 647-653.
- Salminen, R., & Tarvainem, T. (1997). The problem of defining geochemical baselines. A case of selected elements and geological materials in Finland. *Journal of Geochemical Exploration* (60), 91-98.

- Sellés, D., & Gana, P. (2001). *Geología del área Talagante-San Francisco de Mostazal: Regiones Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins, Escala 1:100.000. SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N° 74. Santiago de Chile.*
- SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.*
- Sernageomin, S. N. (1986). *Mapa Hidrogeológico de Chile. Santiago.*
- Sernageomin, S. N. (2006). *Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad: Identificación de zonas críticas. Santiago.*
- Stern, C., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J., & Lara, L. (2007). Chilean volcanoes. En Moreno, T. & Gibbons, W. (eds.): *The Geology of Chile*, p. 143-178. The Geological Society, London.
- Tapia, F., Muñoz, M., Farías, M., Persico, M., & Arellano, P. (2015). *Hallazgo de estratos de edad Cretácico Tardío en el curso alto del río Tinguiririca (~34°55'S). Parte II: Implicancias Tectónicas, en: 14° Congreso Geológico Chileno, Actas digitales, La Serena, 4 p.*
- Tassara, A., & Yáñez, G. (2003). Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47 S). *Revista geológica de Chile, vol. 30, no 2, p. 159-186.*
- Thiele, R. (1980). *Geología de la Hoja de Santiago, Región Metropolitana, SERNAGEOMIN, Mapas geológicos N°8, escala 1:250.000, 51 p. Santiago.*
- Tondel, M. e. (1999). The relationship of arsenic levels in drinking water and the prevalence rate of skin lesions in Bangladesh. *Environmental Health Perspectives, vol. 107, no 9, 727.*
- Tukey, J. (1977). *Exploratory data analysis. Reading: Addison -Wesley.*
- UE. (1998). *COUNCIL DIRECTIVE 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. Official Journal of the European Communities.*
- Valenzuela, P. A. (2013). Los derechos de aprovechamiento de agua en Chile y su marco regulatorio. *Revista de Derecho, 1-14.*
- Wall, R., Sellés, D., & Gana, P. (1999). *Área Til Til-Santiago, Región Metropolitana. SERNAGEOMIN, Mapas geológicos N° 11, escala 1:100.000. Santiago de Chile.*
- Wang, C. e. (2007). A review of the epidemiologic literature on the role of environmental arsenic exposure and cardiovascular diseases. *Toxicology and applied pharmacology, vol. 222, no 3, 315-326.*

- WHO (World Health Organization). (2003a). *Antimony in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality*. Geneva: World Health Organization (WHO/SDE/WSH/03.04/74).
- WHO (World Health Organization). (2003b). *Iron in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality*. Geneva: World Health Organization (WHO/SDE/WSH/03.04/08).
- WHO (World Health Organization). (2009). *Boron in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality*. Geneva: World Health Organization (WHO/HSE/WSH/09.01/2).
- WHO (World Health Organization). (2011). *Guidelines for Drinking water Quality, Fourth Edition*. Ginebra, Suiza.
- Winship, K. (1987). Toxicity of antimony and its compounds. *Adv Drug React Acute Pois Rev*, 2, 67-90.
- Wittmann, U. F. (1979). *Metal pollution in the aquatic environment*. Berlin: Springer.
- Zapatta, F. (1995). *Nuevos antecedentes estratigráficos y estructura del área de Termas del Flaco, valle del río Tinguiririca, VI Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 122 p.* Santiago de Chile.

8 ANEXOS

Anexo A. Resultados del análisis de las muestras de agua

Muestra	UTM N (m)	UTM E (m)	Altura (m)	T (°C)	pH	pH Lab	EC (µS/cm)	TDS (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)
LD1	6159818	327904	481	21,9	8,2	7,6	127,7	68,6	5,1	0,85	18,2	2,65
LD2	6146870	338478	924	20,8	8,2	6,9	90,3	54,2	4,82	0,35	14,2	2,41
LD3	6163820	332732	548	20,5	7,9	8,3	124,3	76,4	8,14	0,35	18,5	3,47
LD4	6130547	368990	1714	57,3	6,6	7,2	3770	1858,2	586	60,3	80,1	3,52
LD5	6130578	368677	1715	62,3	7,1	7,5	5010	2353,1	741	79,1	101	5,3
LD6	6152522	344560	750	19,9	5,5	7,9	317	145,3	11,6	1,77	35,2	4,33
LD7	6155742	341318	693	21,1	8,0	7,7	131,7	63,5	3,93	0,42	18,9	1,75
LD8	6131596	372512	2008	15,5	4,8	4,0	236	153,1	3,1	1,2	34,1	3,89
LD9	6129759	371954	1844	12,7	7,8	7,7	779	541,4	11,2	0,86	159	5,62
LD10	6130566	368974	1729	22,2	7,5	7,8	403	207,6	21,9	2,77	53,2	3,76
LD11	6133312	365281	1611	14,6	8,0	7,7	117,3	64,7	3,66	1,05	17,3	2,15
LD12	6148104	365556	1457	16,5	7,6	7,5	210,1	121,9	8,38	2,01	26,6	4,59

Muestra	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	CO3 (mg/l)	NO3 (mg/l)	PO4 (mg/l)	F (mg/l)	Br (mg/l)	Si (mg/l)	SiO2 (mg/l)
LD1	0,83	13,1	56,7	n.d.	< 0,1	< 0,2	0,043	< 0,05	6,92	14,8
LD2	0,31	6,39	52,3	n.d.	< 0,1	< 0,2	0,047	< 0,05	6,97	14,9
LD3	0,82	10,1	71,2	n.d.	< 0,1	< 0,2	0,06	< 0,05	10,9	23,4
LD4	884	173	143,8	n.d.	1,11	< 0,2	0,62	1,46	38,6	82,5
LD5	1186	163	156,4	n.d.	< 0,1	< 0,2	0,81	1,63	48,6	104
LD6	9,2	60,9	45,3	n.d.	< 0,1	< 0,2	0,11	< 0,05	7,01	15
LD7	0,62	16,4	43,8	n.d.	< 0,1	< 0,2	0,031	< 0,05	4,07	8,7
LD8	0,445	110	< 1	n.d.	0,09	< 0,2	0,14	< 0,05	4,35	9,3
LD9	4,15	341	39,8	n.d.	< 0,1	< 0,2	0,093	< 0,05	3,09	6,6
LD10	41,3	23	125,4	n.d.	< 0,1	< 0,2	0,05	0,13	7,29	15,6
LD11	0,22	23,8	33,6	n.d.	< 0,1	< 0,2	0,032	< 0,05	8,98	19,2
LD12	6,93	58,2	30,8	n.d.	0,23	< 0,2	0,12	< 0,05	8,04	17,2

Muestra	Ag (µg/l)	Al (µg/l)	As (µg/l)	B (µg/l)	Ba (µg/l)	Be (µg/l)	Cd (µg/l)	Co (µg/l)	Cr (µg/l)	Cs (µg/l)	Cu (µg/l)	Fe (µg/l)	Hg (µg/l)	Li (µg/l)
LD1	< 0,003	20,3	1,08	18,4	3,99	< 0,01	0,02	0,083	< 0,07	0,033	< 0,2	32	< 0,004	< 0,06
LD2	< 0,003	4,4	2,95	4,92	4,45	< 0,01	< 0,004	0,049	< 0,07	0,016	< 0,2	44	< 0,004	< 0,06
LD3	< 0,003	33	0,63	14,2	1,35	< 0,01	0,011	0,077	< 0,07	< 0,001	< 0,2	61	< 0,004	< 0,06
LD4	< 0,003	19,5	1765	7381	84,5	< 0,01	0,036	0,19	< 0,07	450	4,54	195	0,194	1991
LD5	0,29	6,8	3092	10175	116	< 0,01	0,057	0,24	< 0,07	698	9,68	25	1,39	2645
LD6	< 0,003	70,5	4,21	196	5,54	< 0,01	0,012	0,22	< 0,07	0,296	< 0,2	15	< 0,004	7,87
LD7	< 0,003	4,6	2,51	36,4	1,87	< 0,01	< 0,004	0,037	< 0,07	0,014	< 0,2	< 3	< 0,004	0,4
LD8	< 0,003	384	0,86	12,7	9,66	0,14	0,35	8,04	< 0,07	0,096	6,08	1441	< 0,004	2,15
LD9	< 0,003	21,2	2,31	135	8,18	< 0,01	< 0,004	0,31	< 0,07	0,398	0,31	15	< 0,004	8,62
LD10	< 0,003	13	52,2	454	6,88	< 0,01	< 0,004	0,11	< 0,07	21,3	< 0,2	11	< 0,004	74,6
LD11	< 0,003	33,5	2,92	16	5,55	< 0,01	< 0,004	0,048	< 0,07	0,028	< 0,2	23	< 0,004	1,5
LD12	< 0,003	85,9	2,64	236	4,44	< 0,01	0,029	0,28	< 0,07	0,135	< 0,2	51	< 0,004	5,79

Muestra	Mn (µg/l)	Mo (µg/l)	Ni (µg/l)	Pb (µg/l)	Rb (µg/l)	Sb (µg/l)	Se (µg/l)	Sn (µg/l)	Sr (µg/l)	U (µg/l)	V (µg/l)	W (µg/l)	Zn (µg/l)	Zr (µg/l)
LD1	6,48	0,543	0,47	0,224	1,34	0,096	< 0,3	2,98	75,6	0,031	1,3	0,046	15,2	0,067
LD2	7,9	0,234	0,34	< 0,008	0,4	0,078	< 0,3	2,95	66,2	0,012	0,3	< 0,01	9,54	< 0,008
LD3	10,1	0,425	0,51	0,452	0,17	< 0,009	< 0,3	3,35	50,3	0,005	1,3	< 0,01	168	< 0,008
LD4	148	11,3	2,32	0,225	579	32,8	4,93	4,26	1354	0,01	10,4	3,46	97,8	3,27
LD5	202	14,3	2,4	< 0,008	745	55,4	7,3	2,88	1499	0,045	15,8	7,86	9,68	5,51
LD6	21,4	1,91	0,87	< 0,008	4,86	0,15	< 0,3	1,85	116	0,139	1,3	0,14	6,42	< 0,008
LD7	0,37	0,933	0,41	< 0,008	0,21	0,085	< 0,3	< 0,01	63,3	0,021	1,7	< 0,01	3,6	< 0,008
LD8	436	< 0,006	4,39	0,168	3,19	0,053	< 0,3	< 0,01	105	0,098	< 0,2	< 0,01	65,9	< 0,008
LD9	3,37	0,768	4,26	< 0,008	1,32	0,075	0,71	< 0,01	768	0,101	6,1	< 0,01	10,6	< 0,008
LD10	2,14	1,41	1,26	< 0,008	28,2	1,81	0,78	< 0,01	137	0,096	0,6	0,19	12,4	0,101
LD11	3,03	1,27	0,43	< 0,008	1,75	0,094	< 0,3	< 0,01	147	0,06	4,9	0,078	22,2	< 0,008
LD12	67,2	1,84	0,95	0,2	6,03	0,09	< 0,3	< 0,01	95,9	0,144	0,9	0,098	14	< 0,008

ANEXO B. MATRIZ DE CORRELACIONES ENTRE PARÁMETROS DEL ANÁLISIS QUÍMICO

	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	SiO ₂	T°	pH	F	Al	As	B	Ba	Cd	Co	Cs	Cu	Fe	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Se	Sn	Sr	U	V	W	Zn	Zr			
Ca	1																																					
Mg	0,75	1																																				
Na	0,46	0,34	1																																			
K	0,45	0,35	0,99	1																																		
Cl	0,46	0,35	0,99	0,99	1																																	
HCO ₃	0,37	0,22	0,80	0,80	0,80	1																																
SO ₄	0,94	0,72	0,39	0,38	0,38	0,15	1																															
SiO ₂	0,37	0,31	0,98	0,98	0,98	0,81	0,29	1																														
T°	0,35	0,23	0,98	0,97	0,97	0,85	0,25	0,97	1																													
pH	-0,06	-0,35	-0,15	-0,15	-0,14	0,11	-0,20	-0,1	-0,11	1																												
F	0,48	0,43	0,98	0,99	0,98	0,74	0,44	0,97	0,95	-0,25	1																											
Al	-0,14	0,14	-0,20	-0,19	-0,20	-0,51	0,06	-0,23	-0,26	-0,76	-0,09	1																										
As	0,45	0,37	0,98	0,98	0,99	0,78	0,37	0,97	0,95	-0,12	0,98	-0,19	1																									
B	0,46	0,36	0,99	0,99	0,99	0,80	0,38	0,98	0,97	-0,14	0,99	-0,20	0,99	1																								
Ba	0,48	0,38	0,99	0,99	0,99	0,78	0,41	0,98	0,96	-0,17	0,99	-0,16	0,99	0,99	1																							
Cd	-0,04	0,14	0,01	0,02	0,01	-0,31	0,12	-0,02	-0,04	-0,74	0,10	0,95	0,02	0,01	0,05	1																						
Co	-0,06	0,10	-0,12	-0,11	-0,12	-0,42	0,11	-0,17	-0,18	-0,72	-0,03	0,97	-0,11	-0,12	-0,07	0,98	1																					
Cs	0,46	0,36	0,99	0,99	0,99	0,80	0,37	0,98	0,96	-0,13	0,98	-0,20	0,99	0,99	0,99	0,01	-0,11	1																				
Cu	0,37	0,40	0,80	0,81	0,81	0,46	0,38	0,77	0,74	-0,48	0,85	0,34	0,83	0,81	0,84	0,55	0,43	0,83	1																			
Fe	-0,08	0,06	-0,07	-0,06	-0,07	-0,37	0,10	-0,11	-0,12	-0,72	0,01	0,96	-0,08	-0,08	-0,03	0,98	0,99	-0,07	0,45	1																		
Li	0,46	0,34	0,99	0,99	0,99	0,80	0,38	0,98	0,97	-0,14	0,98	-0,20	0,99	0,99	0,99	0,01	-0,12	0,99	0,81	-0,07	1																	
Mn	0,11	0,28	0,35	0,36	0,35	-0,03	0,26	0,31	0,29	-0,75	0,44	0,83	0,36	0,35	0,39	0,93	0,87	0,36	0,79	0,88	0,35	1																
Mo	0,45	0,36	0,99	0,99	0,99	0,80	0,37	0,98	0,97	-0,15	0,98	-0,23	0,98	0,99	0,98	-0,04	-0,17	0,98	0,77	-0,13	0,99	0,30	1															
Ni	0,72	0,64	0,25	0,25	0,25	-0,02	0,82	0,15	0,13	-0,54	0,34	0,56	0,24	0,25	0,30	0,63	0,63	0,25	0,55	0,61	0,25	0,67	0,21	1														
Pb	-0,26	-0,03	-0,02	-0,03	-0,03	-0,01	-0,17	0,04	0,02	0,00	-0,01	0,18	-0,07	-0,04	-0,06	0,16	0,12	-0,06	-0,02	0,19	-0,03	0,13	-0,06	-0,07	1													
Rb	0,45	0,34	0,99	0,99	0,99	0,81	0,38	0,98	0,98	-0,15	0,98	-0,20	0,98	0,99	0,99	0,01	-0,12	0,99	0,81	-0,07	0,99	0,36	0,99	0,25	-0,03	1												
Sb	0,46	0,37	0,98	0,99	0,99	0,79	0,37	0,98	0,96	-0,13	0,98	-0,20	0,99	0,99	0,99	0,02	-0,11	0,99	0,83	-0,08	0,99	0,36	0,98	0,24	-0,07	0,99	1											
Se	0,52	0,40	0,99	0,99	0,99	0,82	0,42	0,97	0,96	-0,12	0,98	-0,22	0,99	0,99	0,99	0,00	-0,13	0,99	0,81	-0,09	0,99	0,34	0,98	0,29	-0,08	0,99	0,99	1										
Sn	-0,02	-0,05	0,54	0,52	0,52	0,54	-0,05	0,59	0,63	0,06	0,50	-0,33	0,49	0,51	0,50	-0,19	-0,29	0,50	0,26	-0,20	0,53	-0,02	0,50	-0,21	0,44	0,53	0,49	0,48	1									
Sr	0,73	0,51	0,92	0,92	0,92	0,72	0,68	0,88	0,86	-0,11	0,92	-0,22	0,90	0,92	0,93	-0,02	-0,13	0,91	0,72	-0,09	0,92	0,29	0,91	0,47	-0,10	0,92	0,90	0,93	0,41	1								
U	0,17	0,56	-0,30	-0,28	-0,29	-0,36	0,21	-0,33	-0,39	-0,45	-0,20	0,38	-0,27	-0,27	-0,26	0,20	0,24	-0,28	-0,11	0,16	-0,30	0,12	-0,23	0,29	-0,29	-0,29	-0,27	-0,26	-0,63	-0,20	1							
V	0,64	0,41	0,92	0,92	0,92	0,69	0,57	0,9	0,84	0,00	0,90	-0,29	0,92	0,92	0,92	-0,10	-0,21	0,92	0,72	-0,19	0,92	0,21	0,92	0,32	-0,16	0,91	0,92	0,93	0,37	0,95	-0,23	1						
W	0,44	0,40	0,96	0,96	0,96	0,76	0,34	0,95	0,92	-0,11	0,96	-0,19	0,99	0,97	0,97	0,02	-0,11	0,98	0,84	-0,09	0,96	0,35	0,95	0,23	-0,11	0,96	0,99	0,97	0,45	0,87	-0,23	0,91	1					
Zn	-0,11	-0,03	0,11	0,09	0,09	0,13	-0,05	0,17	0,14	-0,12	0,10	0,18	0,04	0,08	0,07	0,2	0,17	0,06	0,10	0,25	0,09	0,21	0,05	0,06	0,85	0,10	0,04	0,05	0,46	0,05	-0,42	0,00	0,00	1				
Zr	0,45	0,37	0,98	0,99	0,99	0,79	0,37	0,98	0,96	-0,12	0,98	-0,20	0,99	0,99	0,99	0,02	-0,11	0,99	0,83	-0,08	0,99	0,36	0,98	0,24	-0,06	0,99	0,99	0,99	0,50	0,90	-0,28	0,92	0,99	0,05	1			

ANEXO C. ELEMENTOS ANALIZADOS Y DESCARTADOS

C1. Elementos Analizados

Elementos analizados	Límite de Detección (LOD)	Límite de Cuantificación (LOQ)	Datos bajo el límite de detección	Porcentaje del total
Na (mg/l)	0,094	-	0	0
K (mg/l)	0,044	-	0	0
Ca (mg/l)	0,014	-	0	0
Mg (mg/l)	0,001	-	0	0
Cl (mg/l)	0,03	-	0	0
SO ₄ (mg/l)	0,07	-	0	0
HCO ₃ (mg/l)	1	-	1	8,3
SiO ₂ (mg/l)	0,05	0,2	0	0
F (mg/l)	0,03	-	0	0
Al (µg/l)	0,06	0,2	0	0
As (µg/l)	0,02	0,06	0	0
B (µg/l)	0,07	0,25	0	0
Ba (µg/l)	0,01	0,02	0	0
Cd (µg/l)	0,001	0,004	5	41,6
Co (µg/l)	0,005	0,02	1	8,3
Cs (µg/l)	0,0004	0,001	0	0
Cu (µg/l)	0,05	0,2	8	66,6
Fe (µg/l)	1	3	0	0
Li (µg/l)	0,02	0,06	3	25
Mn (µg/l)	0,004	0,01	0	0
Mo (µg/l)	0,002	0,006	1	8,3
Ni (µg/l)	0,03	0,1	0	0
Pb (µg/l)	0,002	0,008	7	58,3
Rb (µg/l)	0,001	0,004	0	0
Sb (µg/l)	0,003	0,009	1	8,3
Se (µg/l)	0,08	0,3	8	66,6
Sn (µg/l)	0,004	0,01	6	50
Sr (µg/l)	0,001	0,004	0	0
U (µg/l)	0,0002	0,001	0	0
V (µg/l)	0,2	0,6	1	8,3
W (µg/l)	0,004	0,01	5	41,6
Zn (µg/l)	0,2	0,7	0	0
Zr (µg/l)	0,002	0,008	8	66,6

C2. Elementos Descartados

Elementos fuera del análisis	Límite de Detección (LOD)	Límite de Cuantificación (LOQ)	Datos bajo el límite de detección	Porcentaje del total
CO₃ (mg/l)	-	-	12	100
NO₃ (mg/l)	0,1	-	9	75
PO₄ (mg/l)	0,4	-	12	100
Br (mg/l)	0,05	-	9	75
Ag (µg/l)	0,001	0,003	11	91,6
Be (µg/l)	0,002	0,01	11	91,6
Cr (µg/l)	0,02	0,07	12	100
Hg (µg/l)	0,002	0,004	10	83,3

ANEXO D. INSTRUMENTACIÓN Y TÉCNICAS UTILIZADAS EN ANÁLISIS QUÍMICO

D1. Análisis de muestras de este estudio.

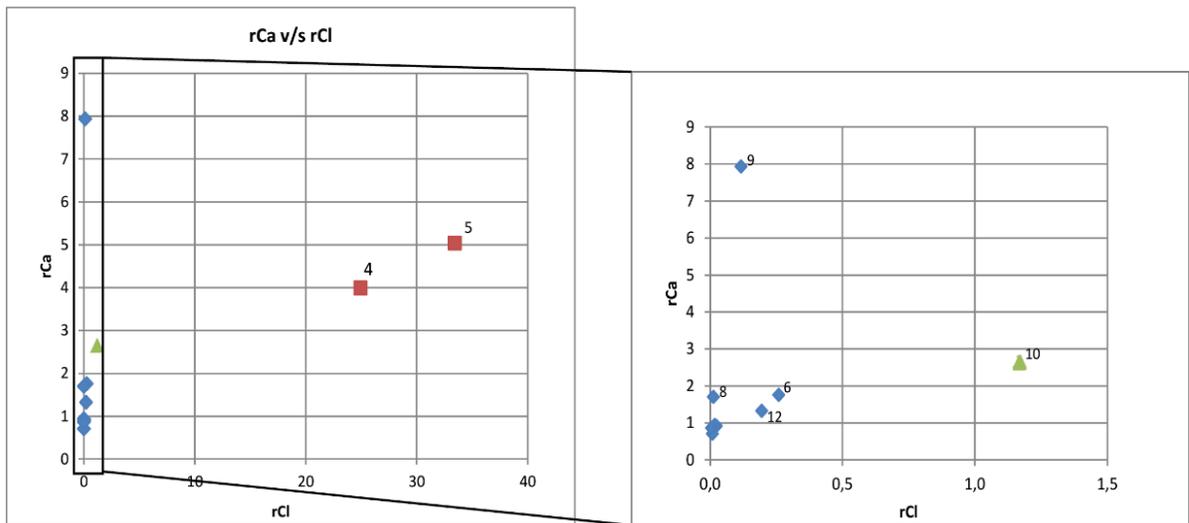
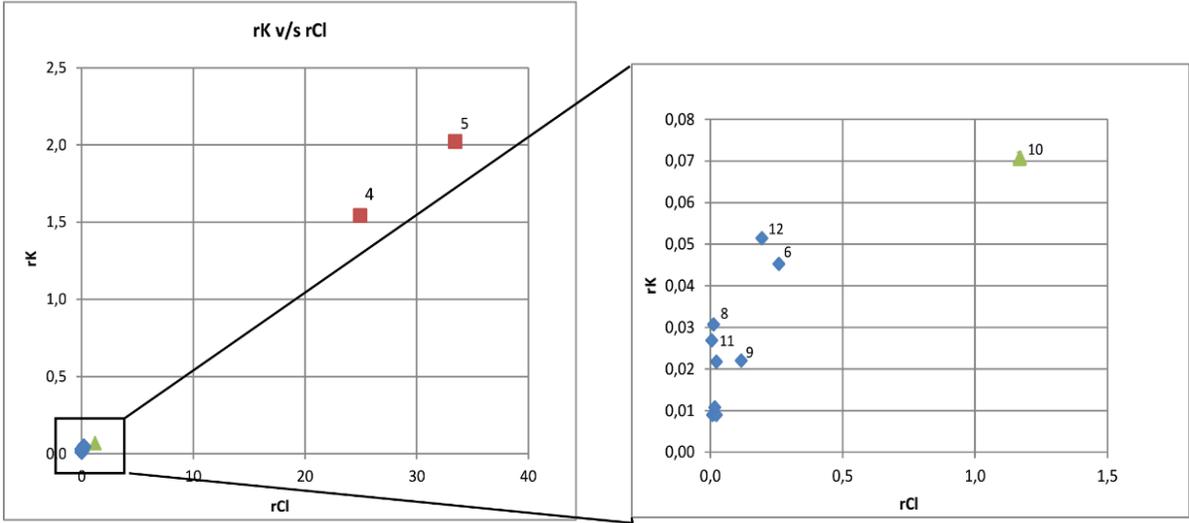
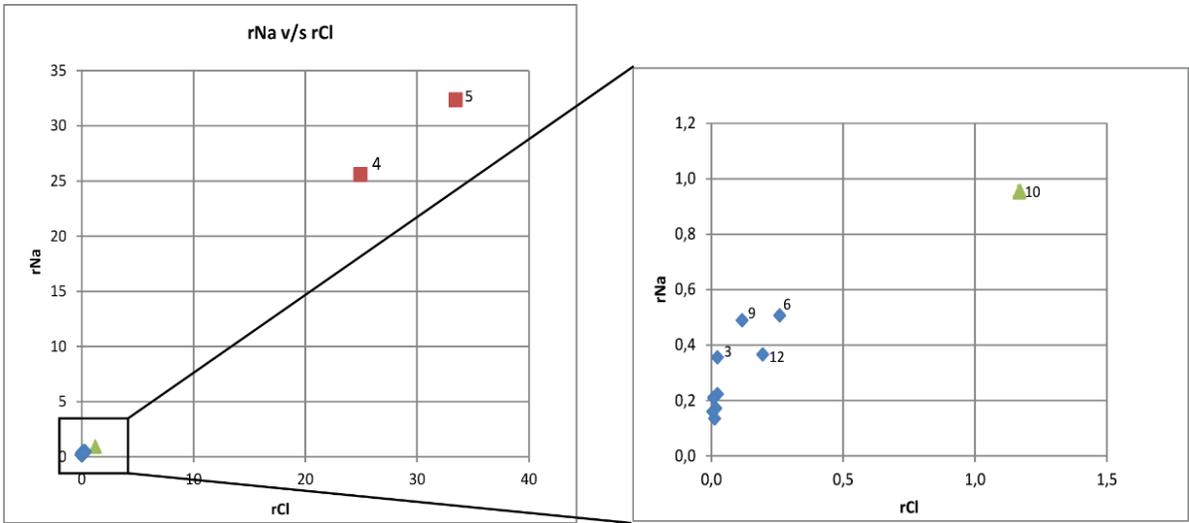
Instrumento	Parámetros medidos
Titulador automático Hanna HI-902C con electrodo de vidrio combinado, sensor de temperatura.	HCO ₃ , CO ₃ , pH, T°
Cromatógrafo Iónico 861 Advanced Compact IC Metrohm, columna Metrosep A Supp 5 - 250/4.0, pre-columna Metrosep RP 2 Guard/3.5, detector de conductividad.	Aniones (Cl, F, SO ₄ , Br, PO ₄ , NO ₃)
Espectrometría de Emisión Óptica con fuente de plasma de acoplamiento inductivo, ICP-OES, Perkin Elmer Precisely Optima 7300 V.	Cationes mayores (Na, K, Ca, Mg)
Espectrometría de masas cuadrupolo con fuente de plasma de acoplamiento inductivo y celda de colisión, Thermo Scientific ICP-MS Q iCAP Q.	Elementos menores y traza (Li, Be, B, Al, V, Cr, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, W, Hg, Pb, U)
Espectrofotómetro portátil para medición de sílice Hanna Instruments HI 96705.	Si, SiO ₂

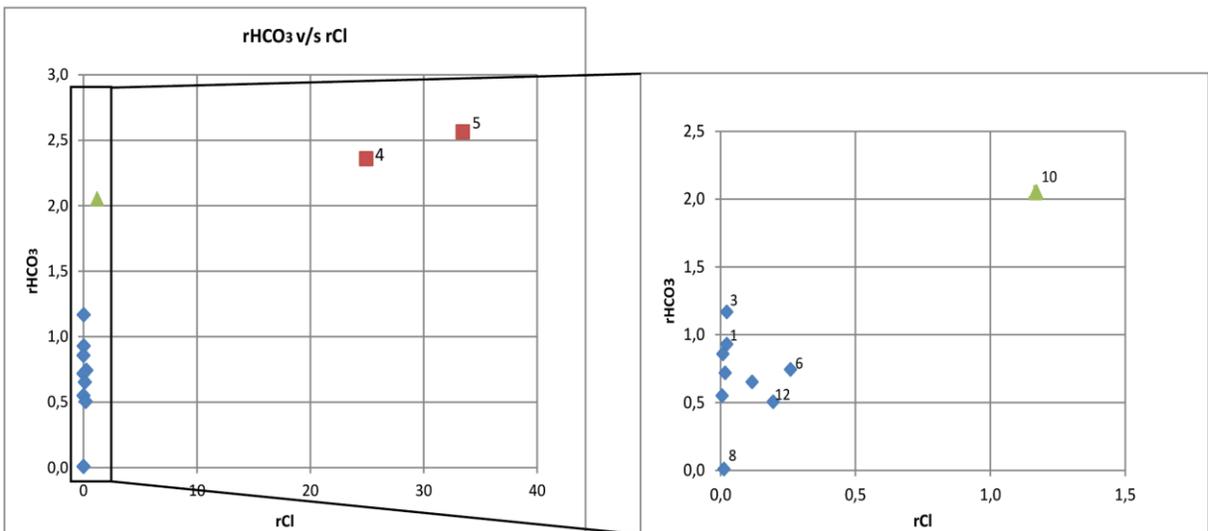
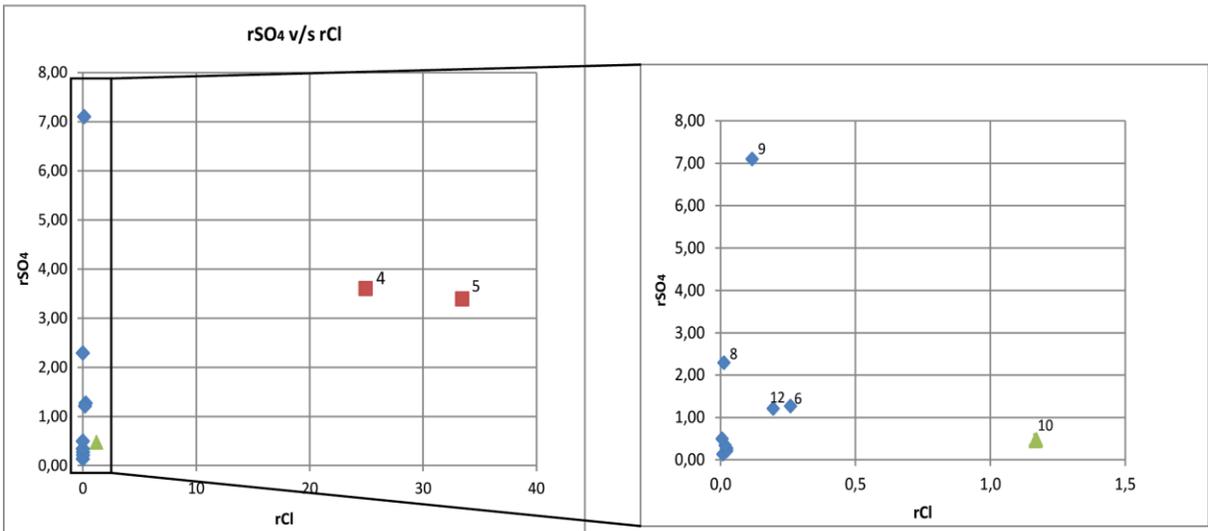
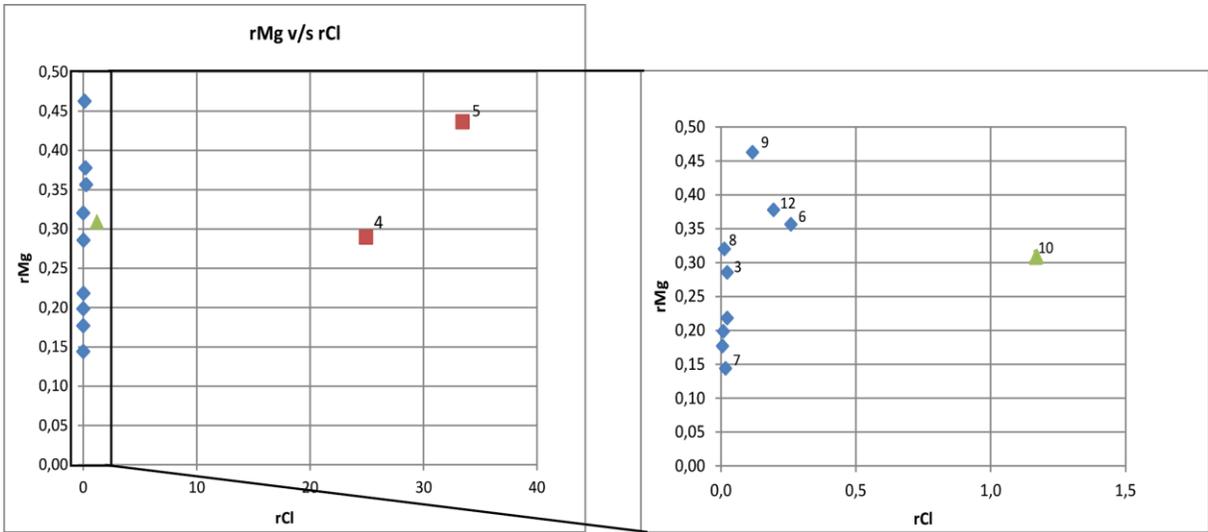
Nota: Instrumentos utilizados por el Laboratorio de Geoquímica de Fluidos del Departamento de Geología de la Universidad de Chile para medición de parámetros (Químico encargada: Verónica Rodríguez).

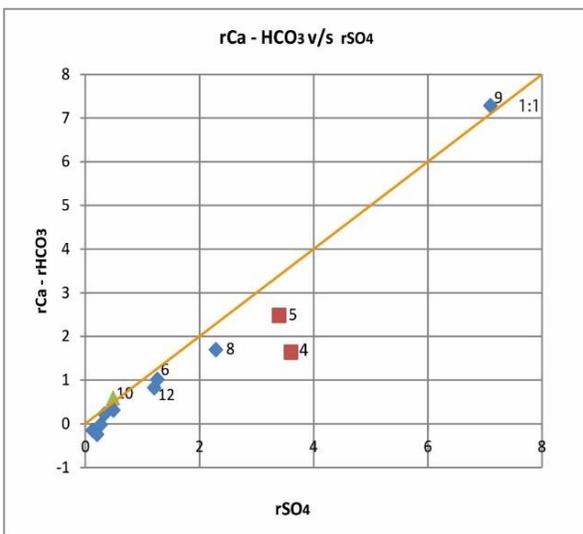
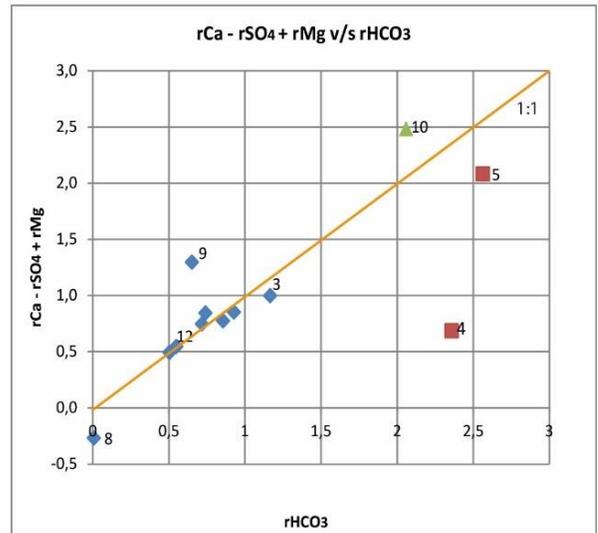
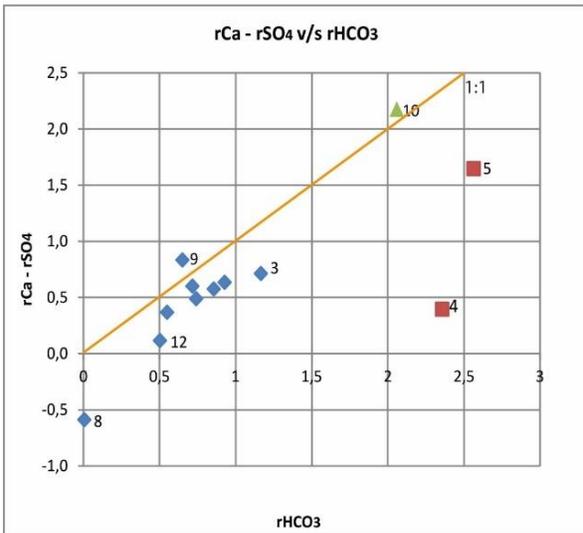
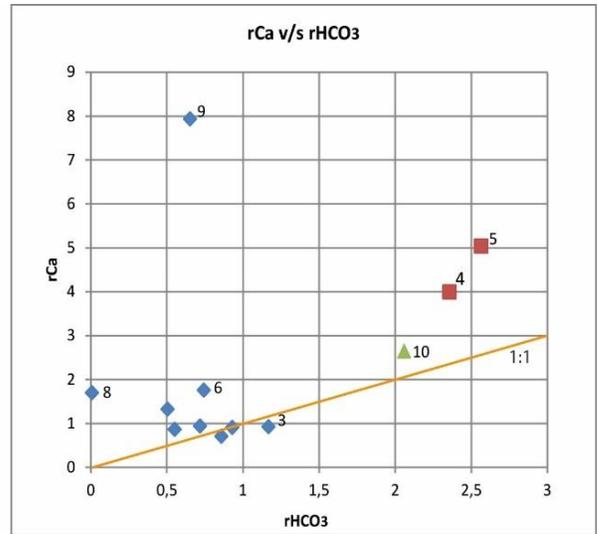
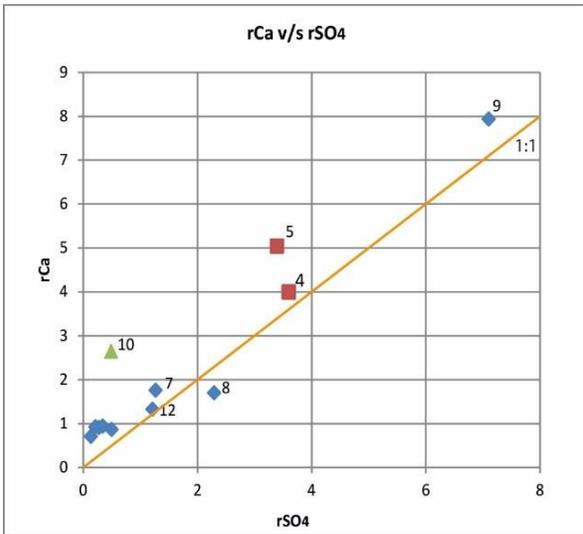
D2. Analisis de la DGA en estacion Bajo Los Briones

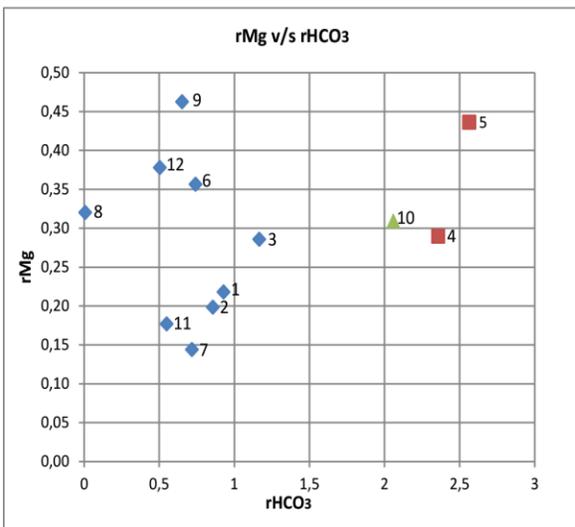
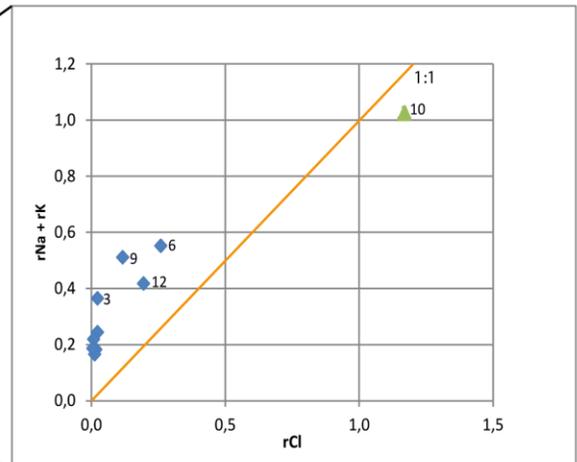
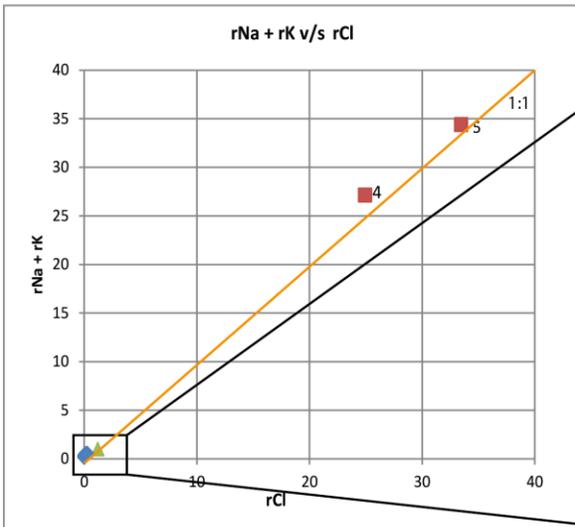
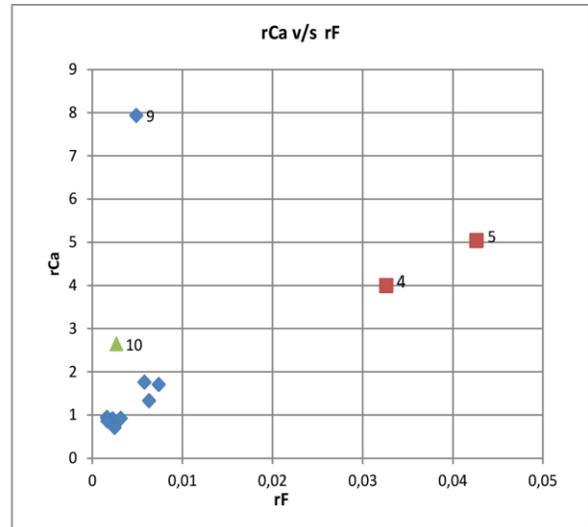
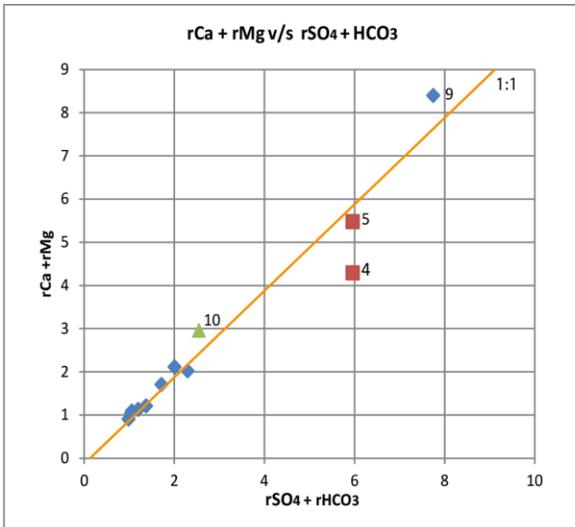
Parámetro	Técnica de medición
Temperatura	Termómetro
pH	Potenciométrico
Conductividad Específica	Conductivímetro
Sodio Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Potasio Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Calcio Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Magnesio Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Cloruro	Potenciométrico - Argentométrico - Titulación
Sulfato	Turbidimétrico
Nitrógeno de Nitrito y Nitrato	S.I.
Demanda Química de Oxígeno	Reflujo Dicromato de Potasio - Colorimetría
Oxígeno Disuelto	Yodométrico (Azida) - Titulación
Aluminio Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Arsénico Total	Manchas de bromuro de mercurio
Boro	Curcumin - Colorimetría
Cadmio Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Cobalto Total	S.I.
Cobre Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Cromo Total	Colorimetría
Fierro Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Manganeso Total	Colorimetría - Persulfato
Mercurio Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Molibdeno Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Níquel Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Plata Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Plomo Total	Espectrofotometría de absorción atómica
Selenio disuelto	Diaminobencidina
Zinc Total	Espectrofotometría de absorción atómica

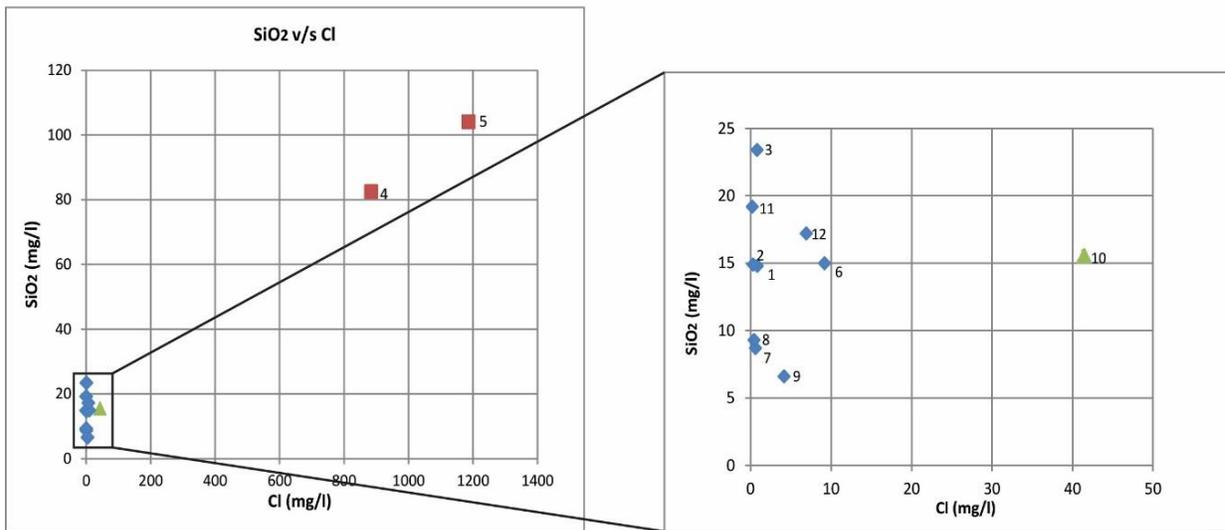
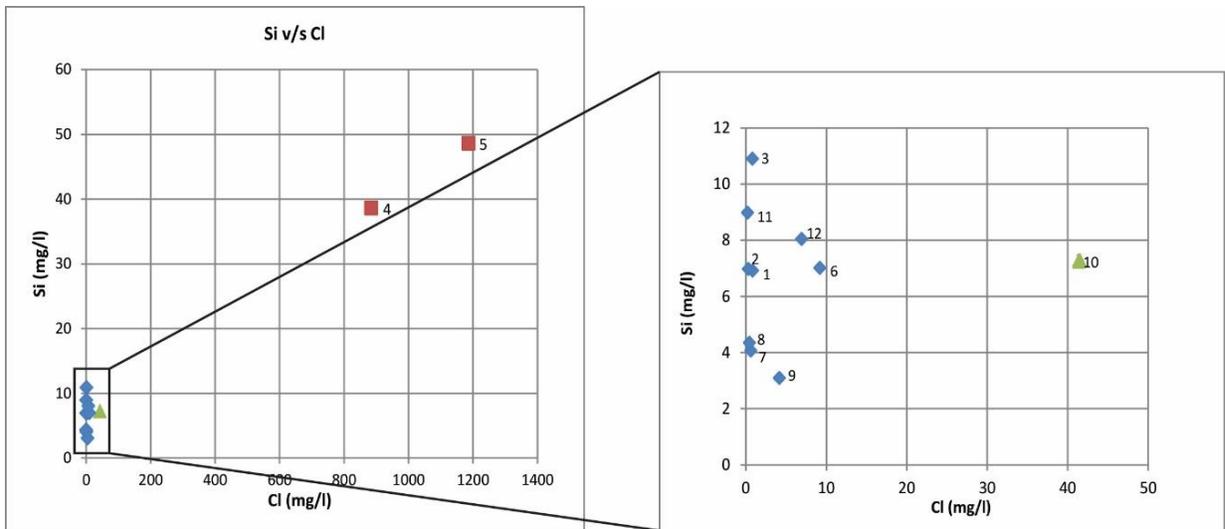
**ANEXO E. DIAGRAMAS BINARIOS PARA ELEMENTOS MAYORES,
MENORES Y TRAZAS**

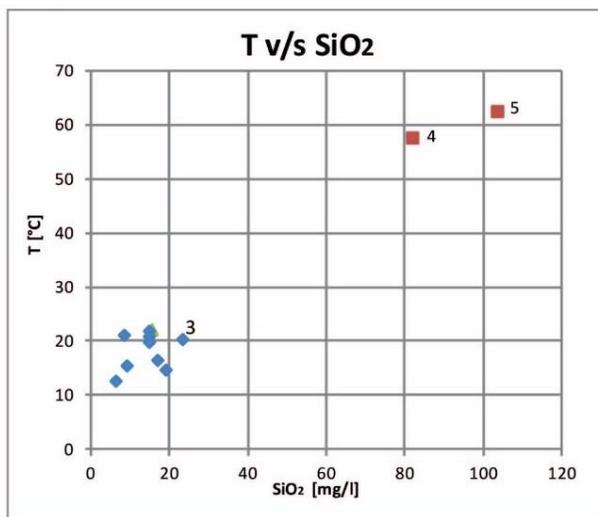
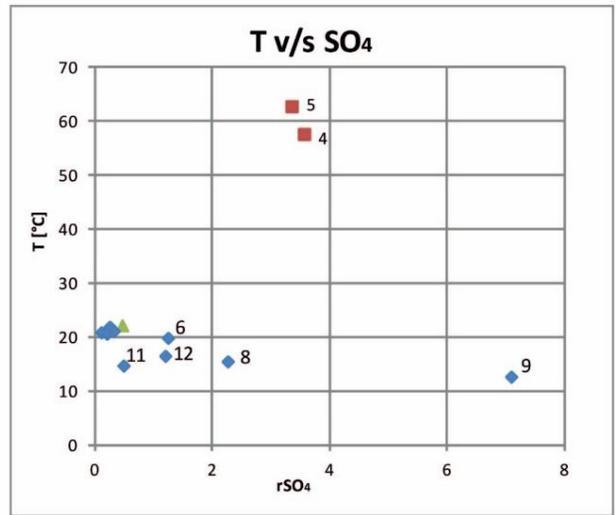
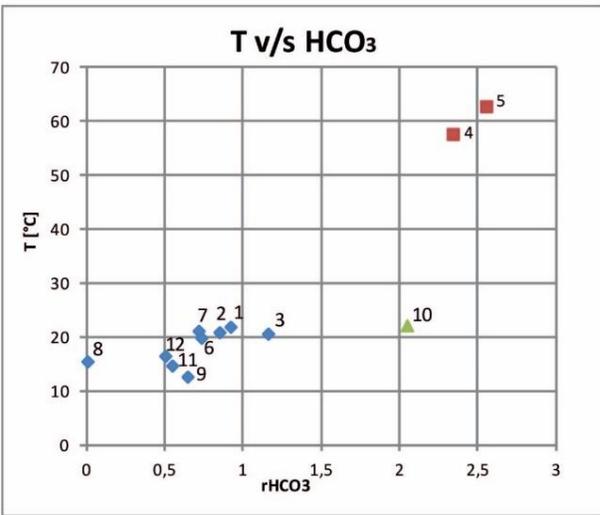
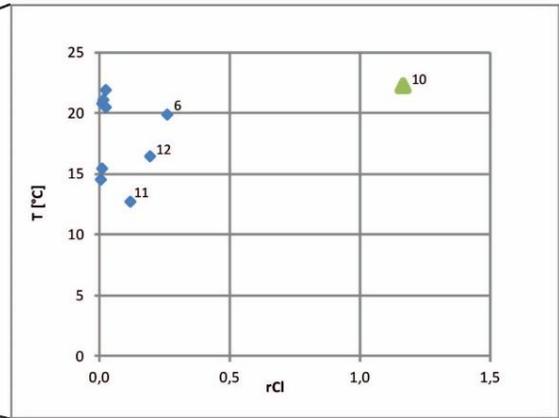
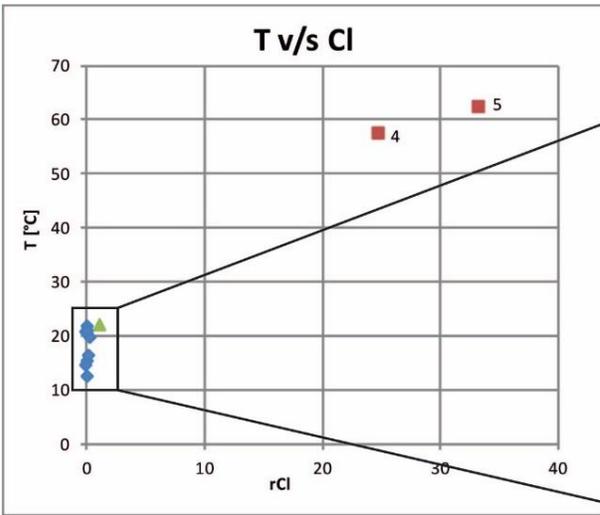


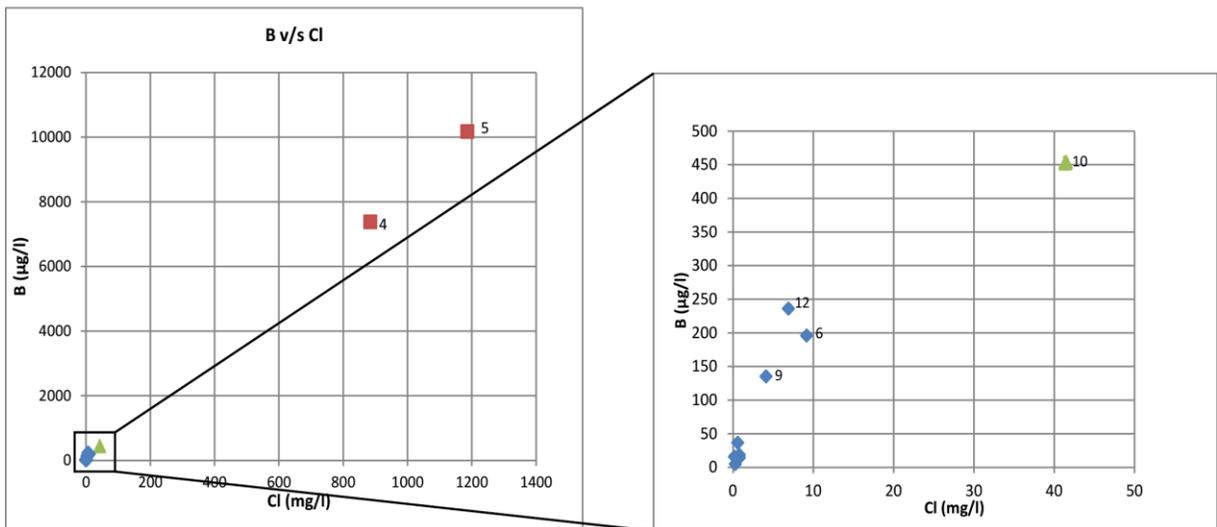
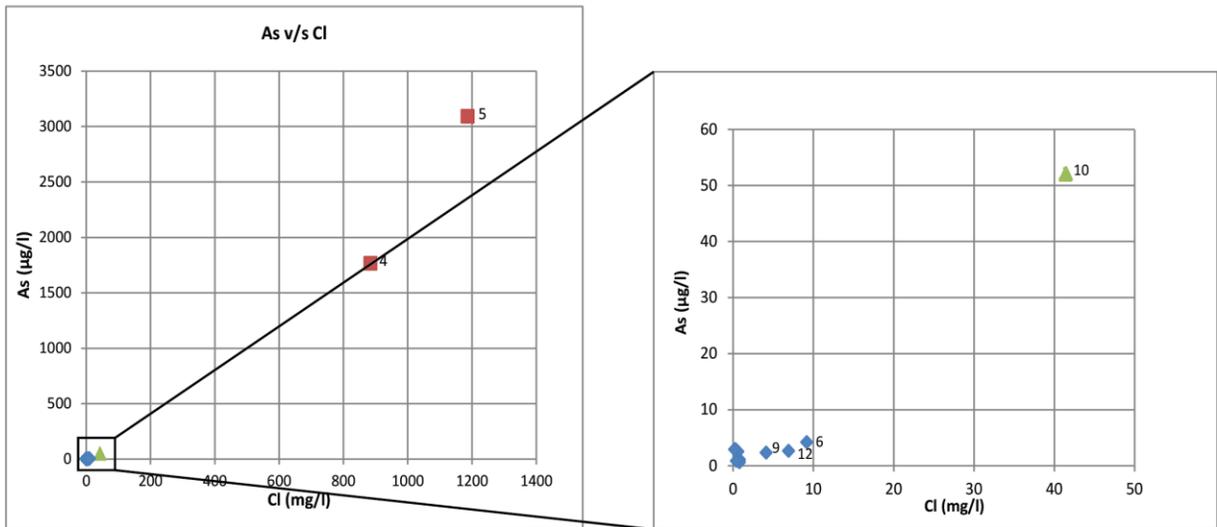
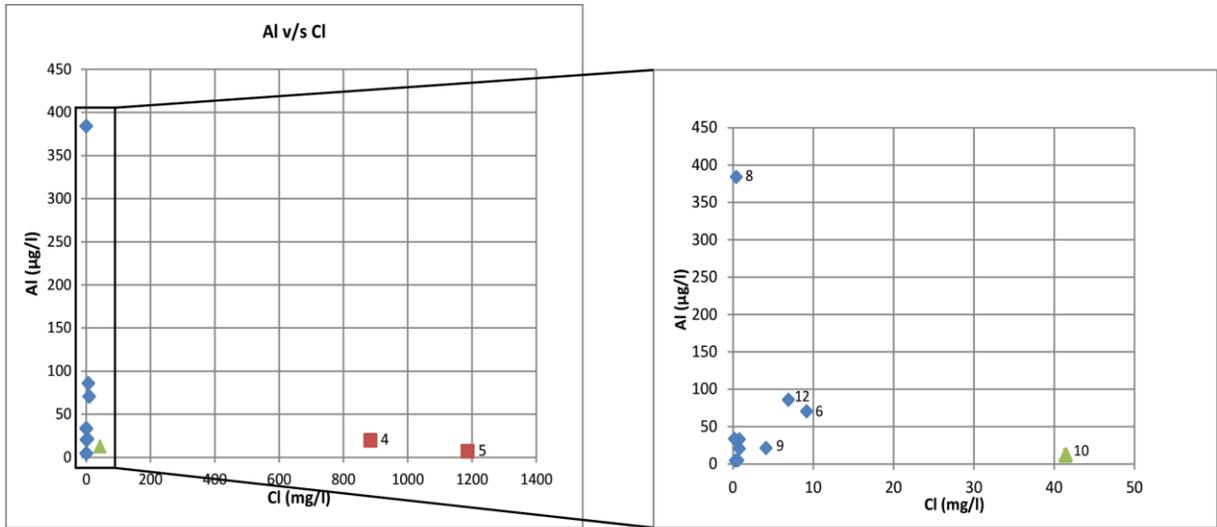


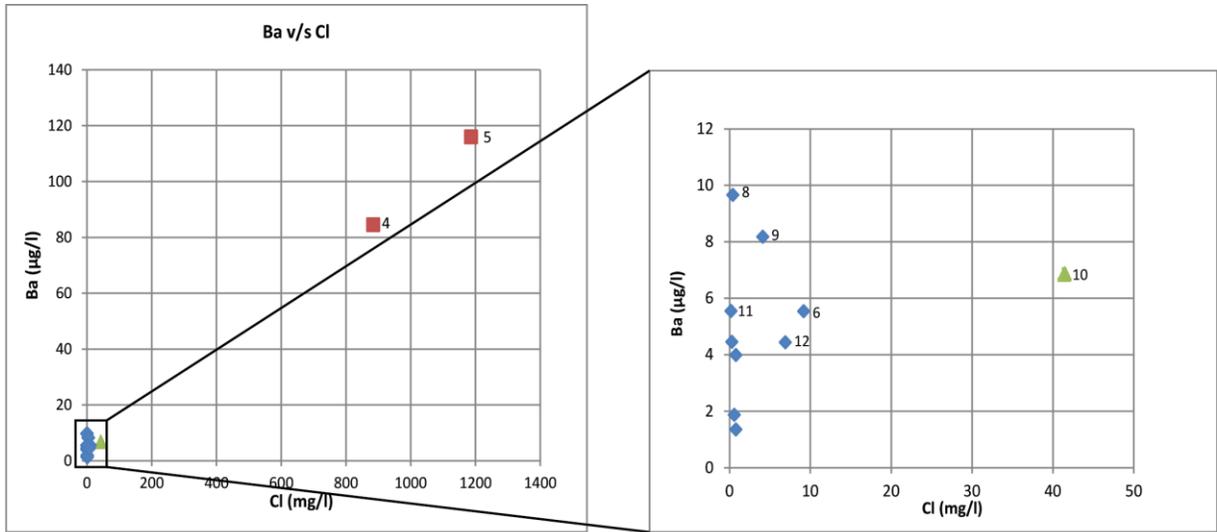


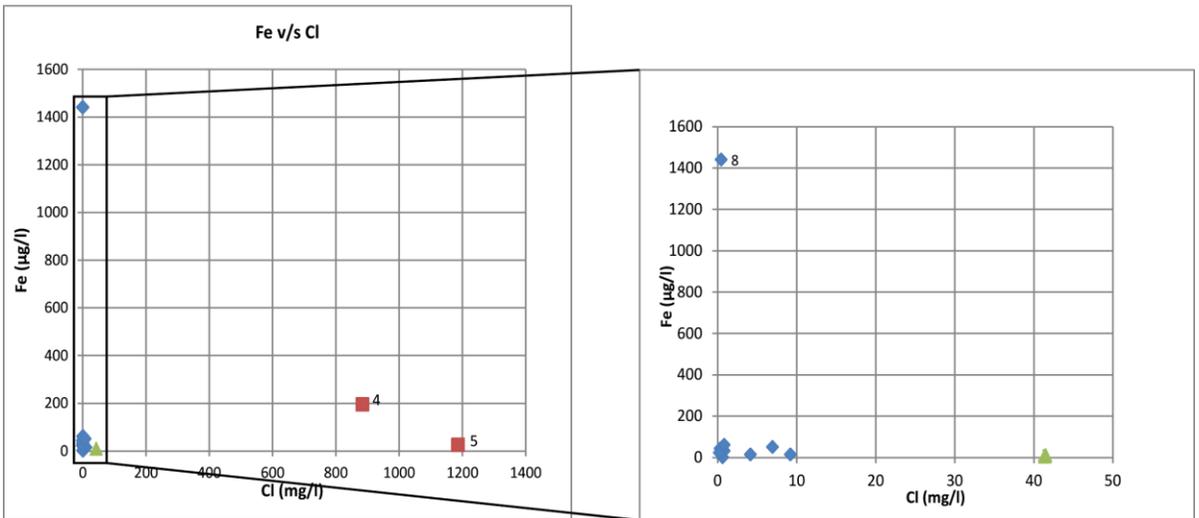
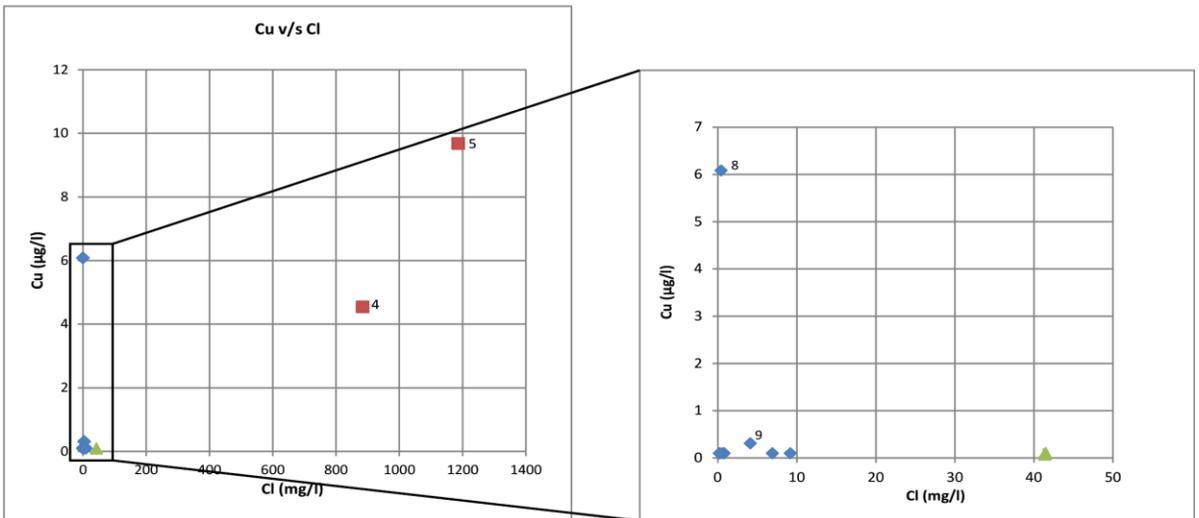
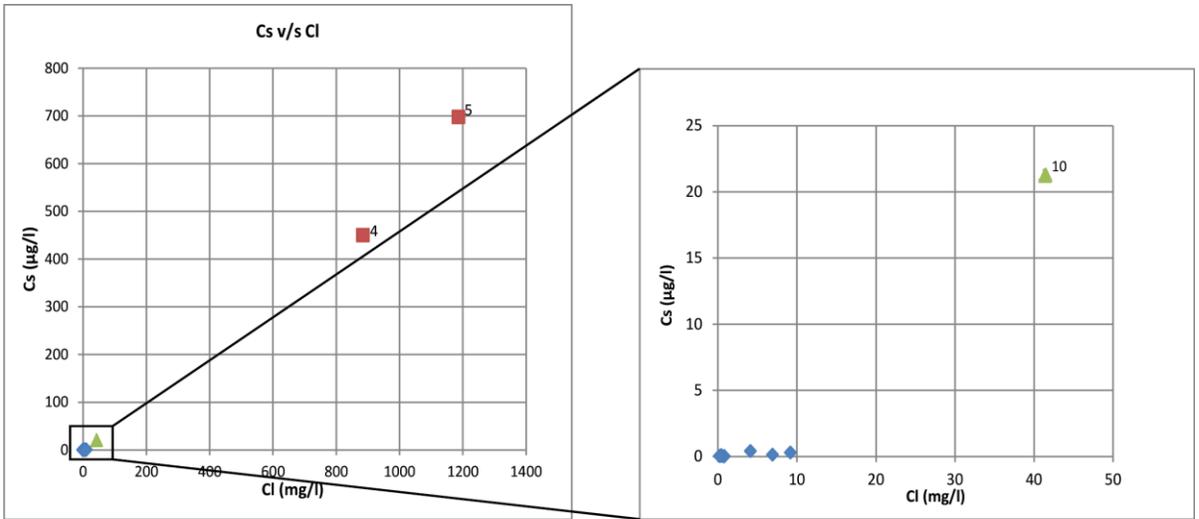


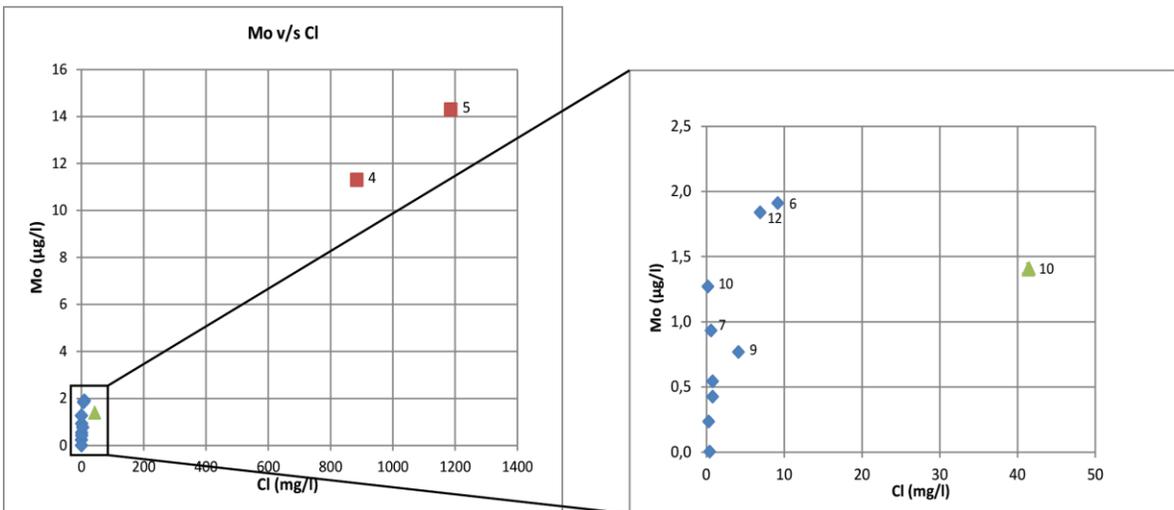
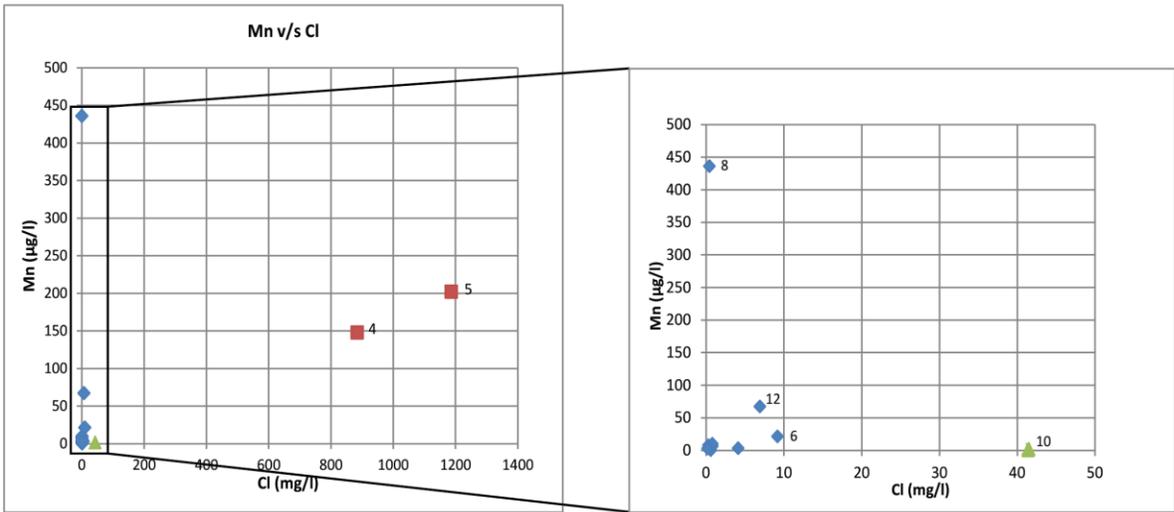
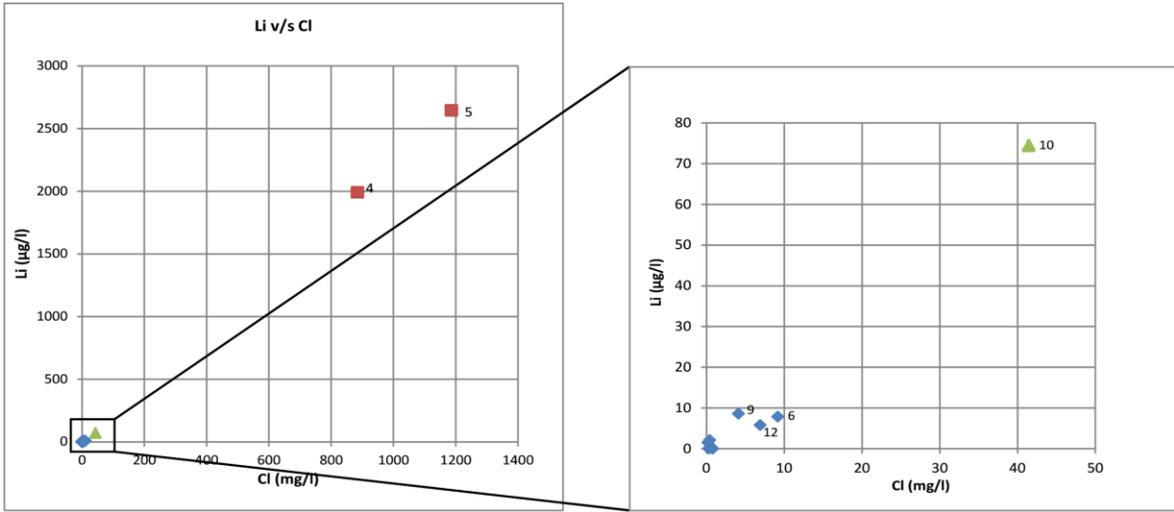


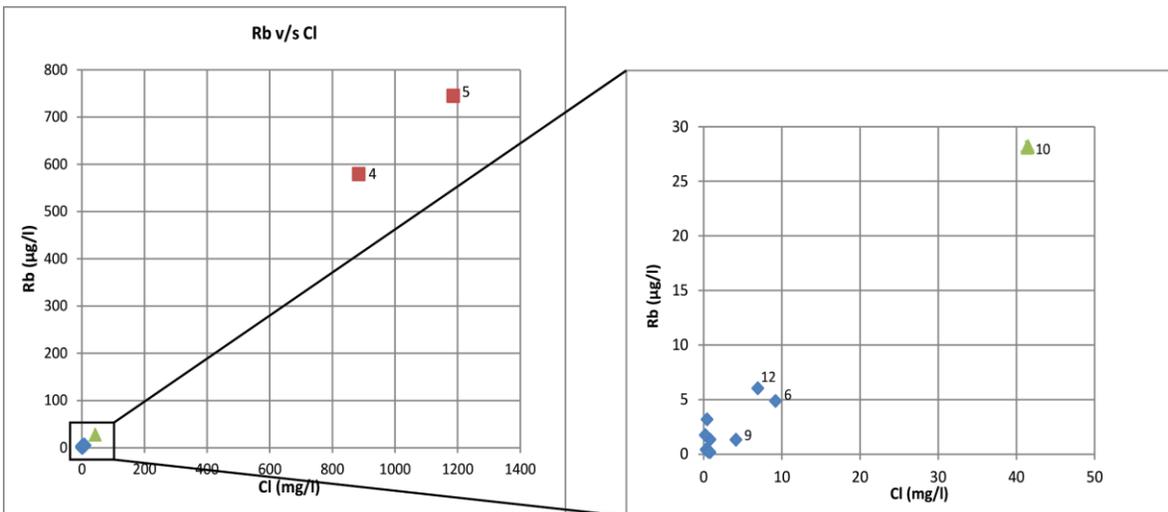
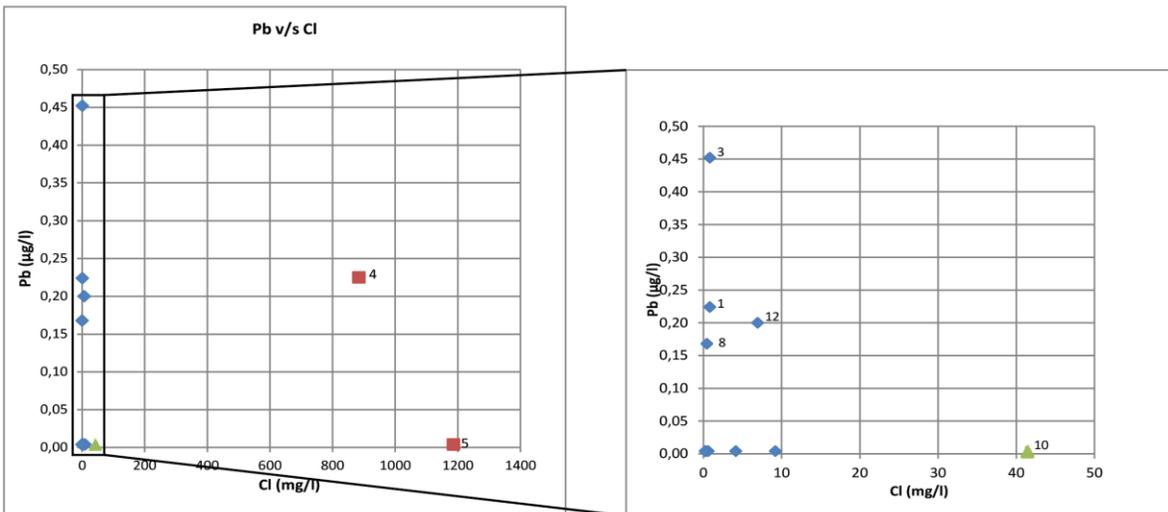
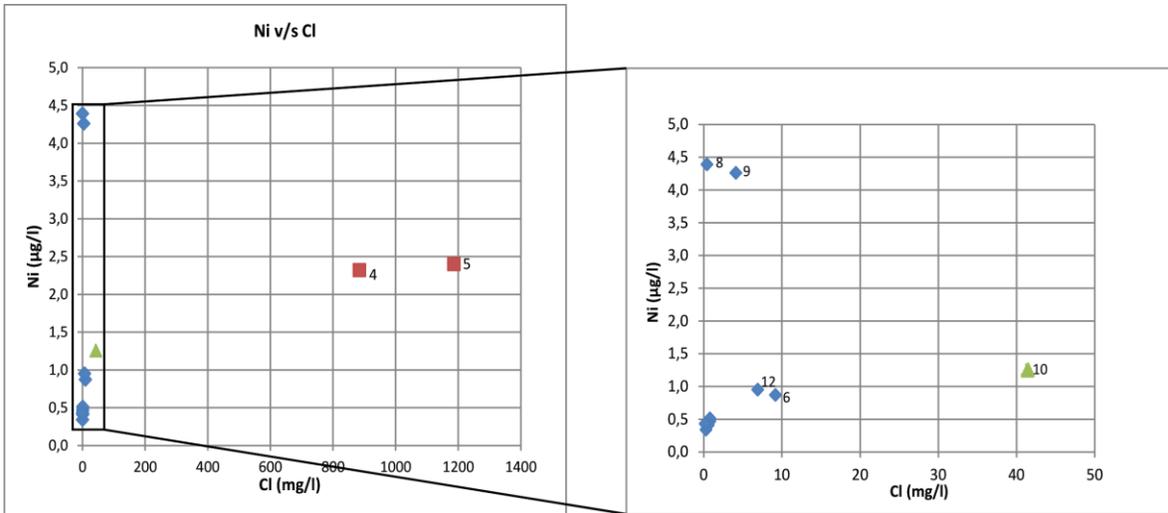


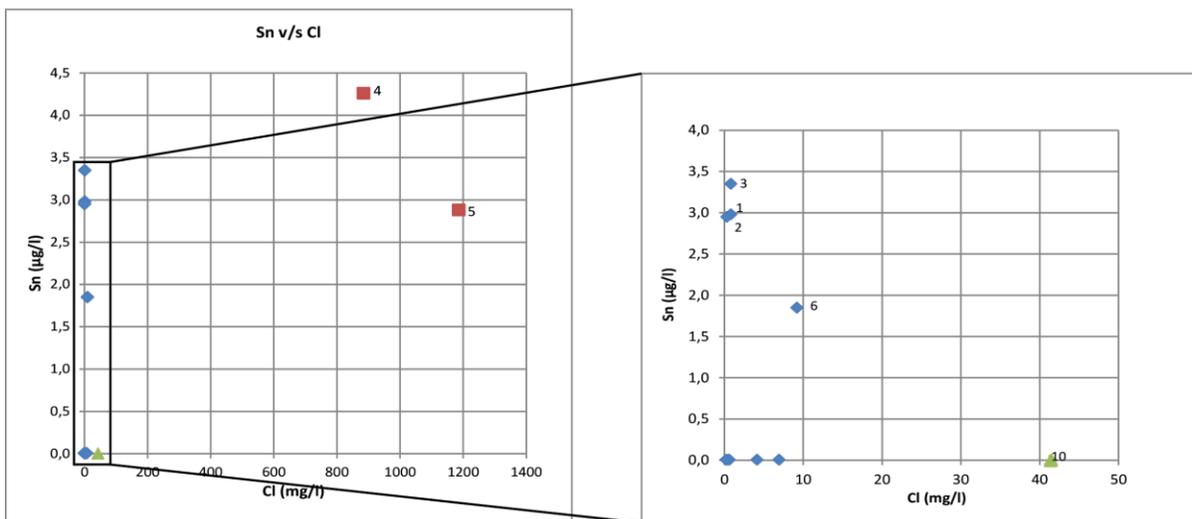
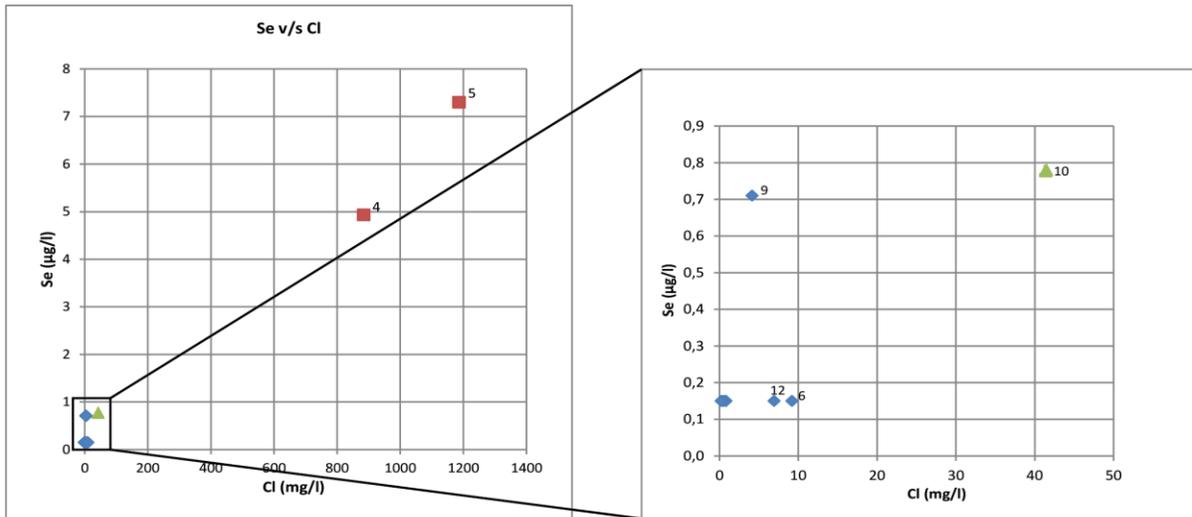
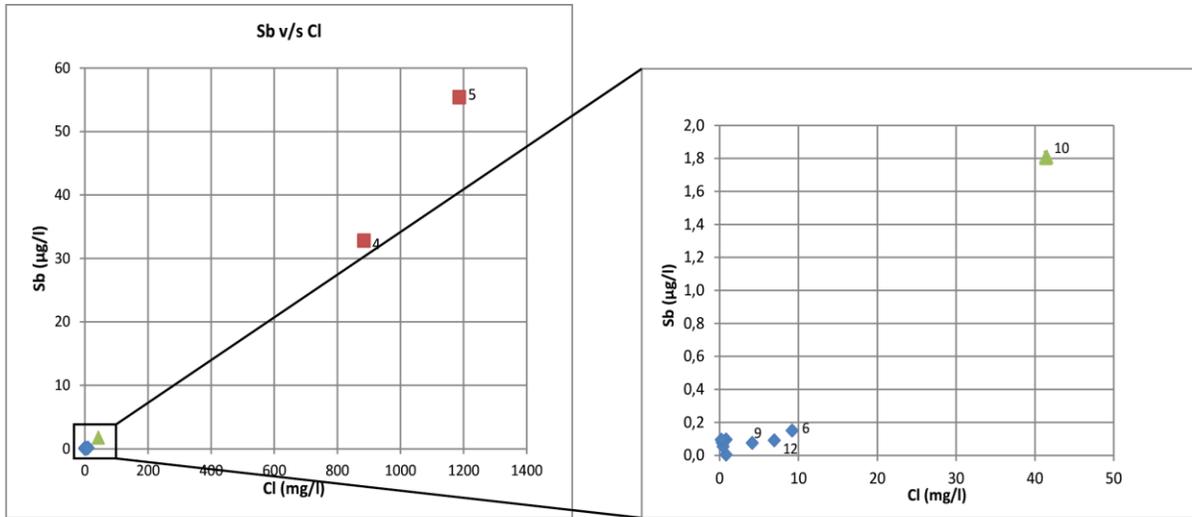


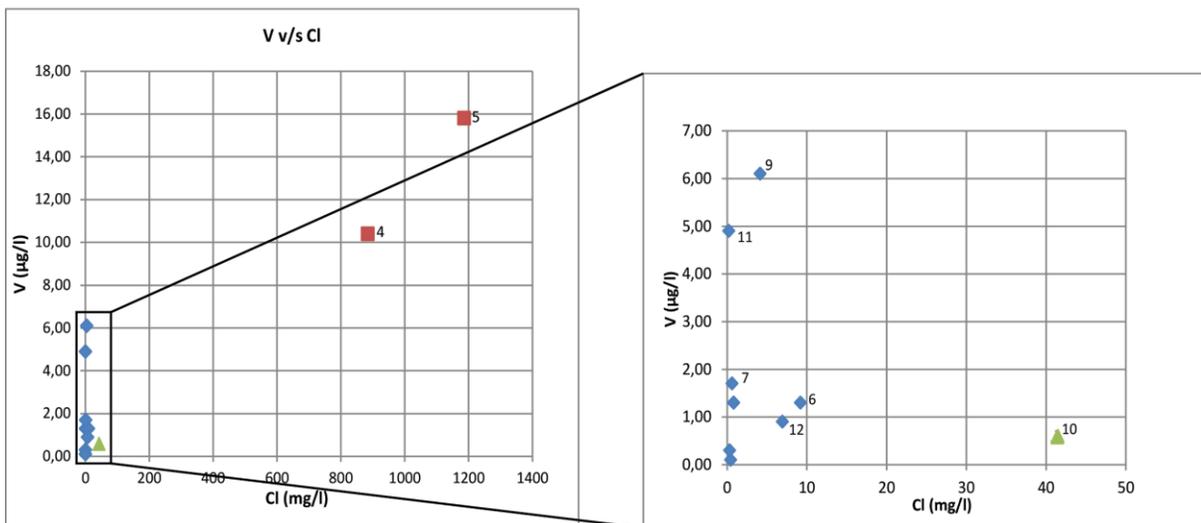
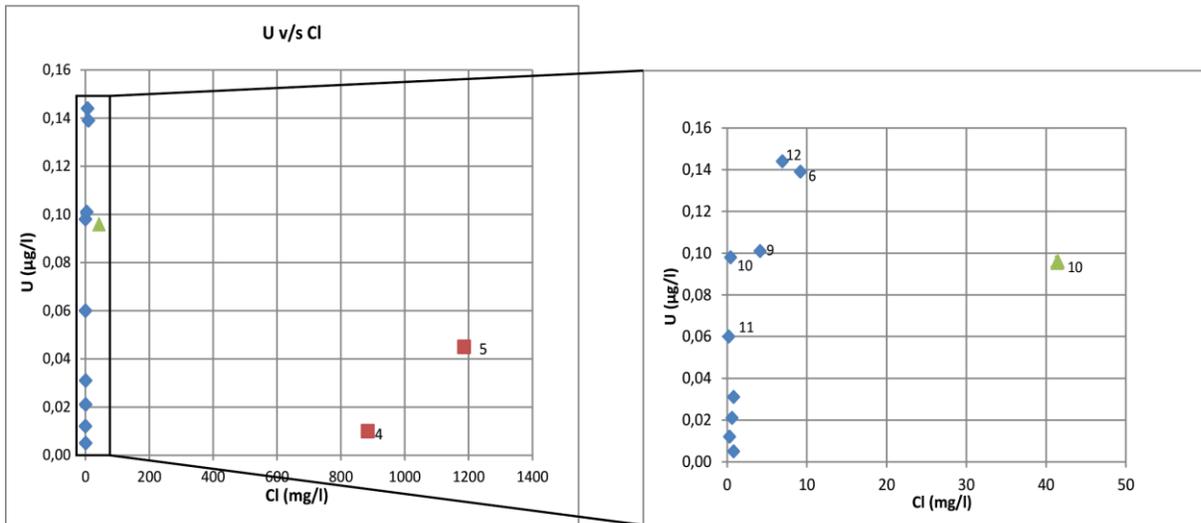
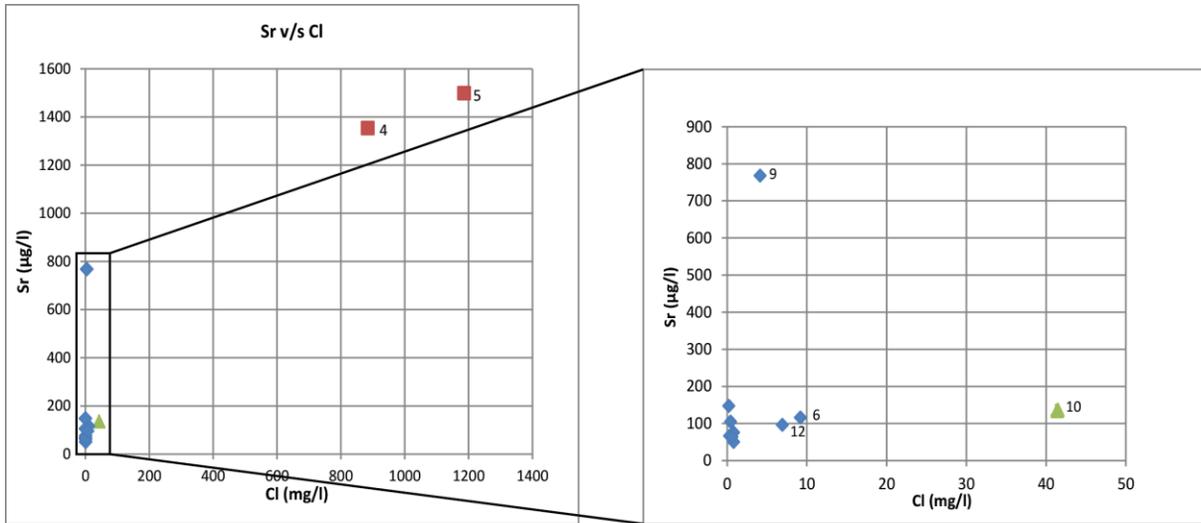


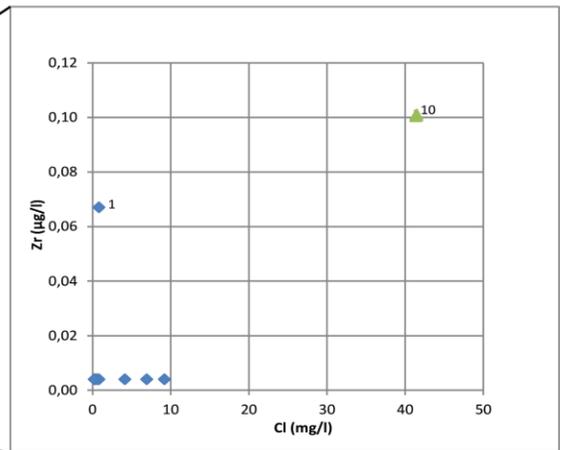
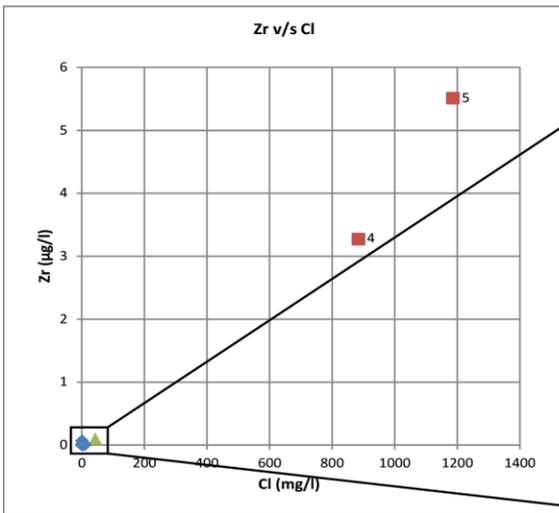
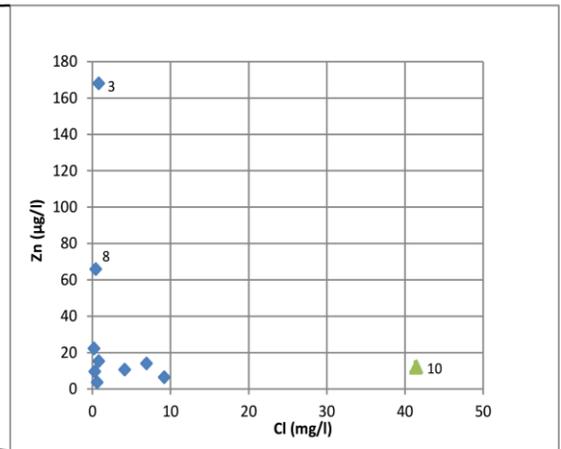
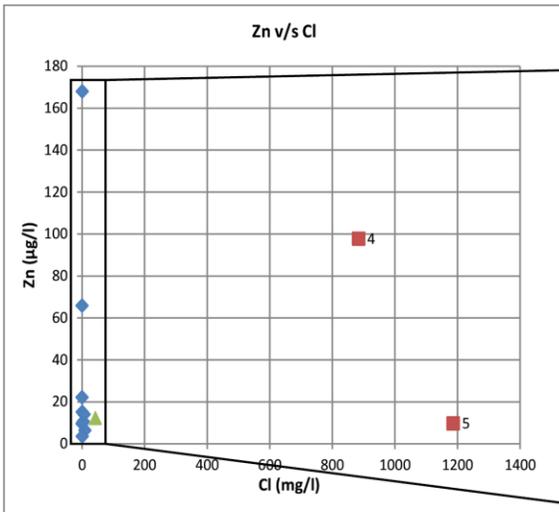
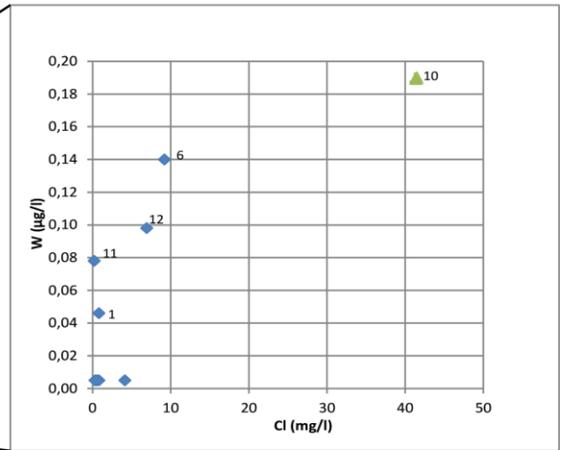
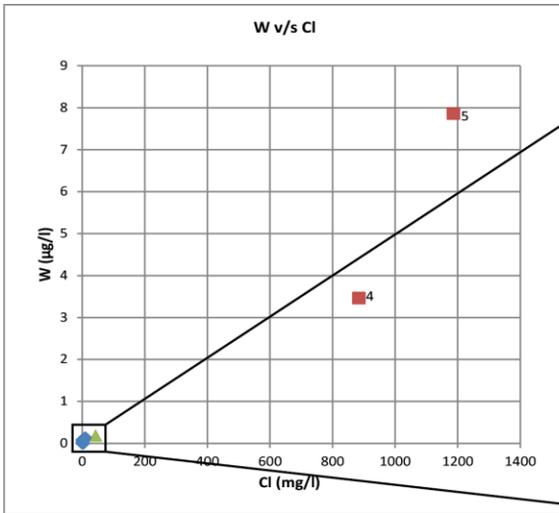






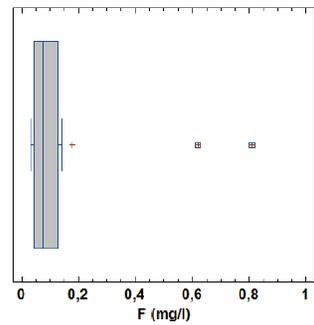
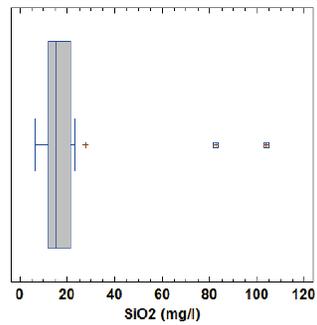
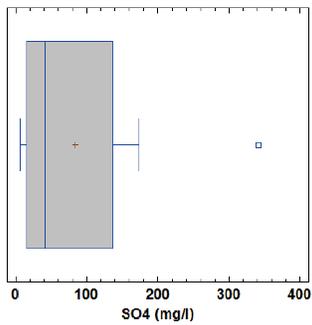
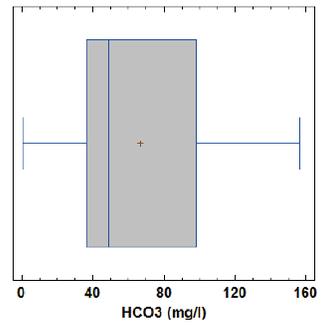
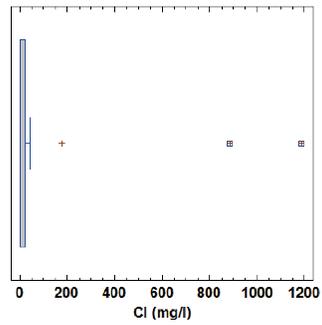
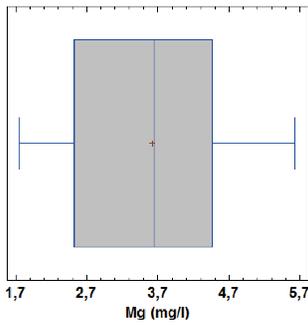
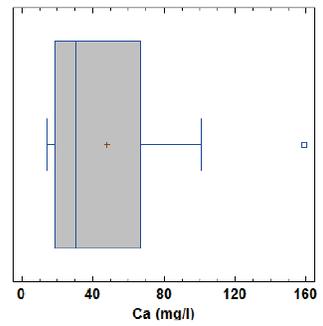
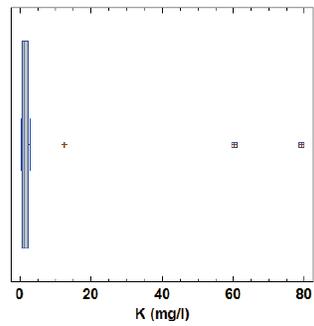
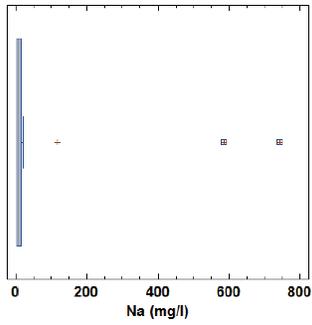
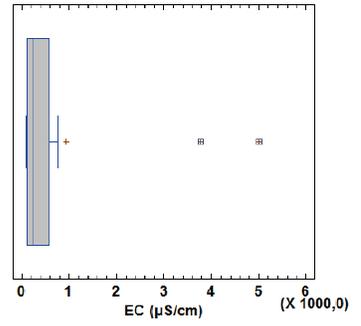
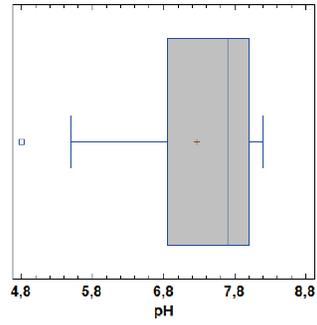
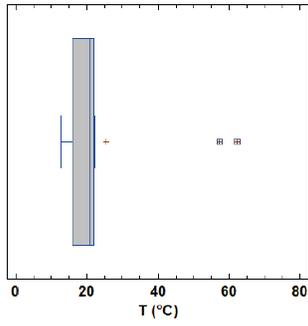


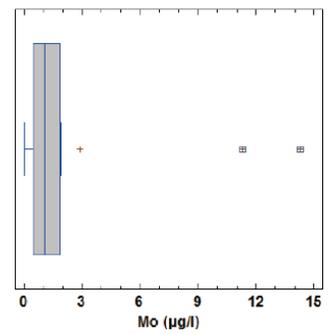
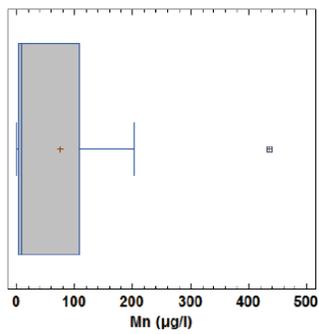
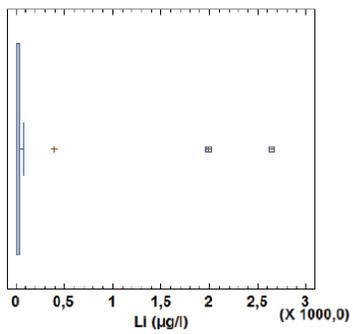
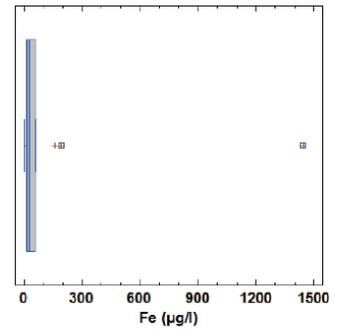
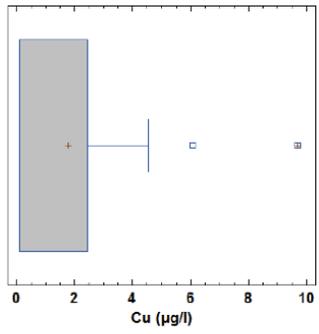
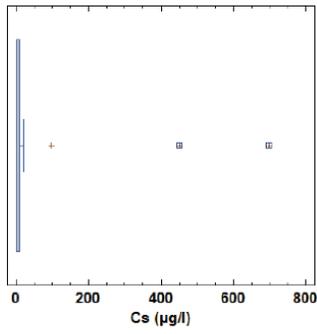
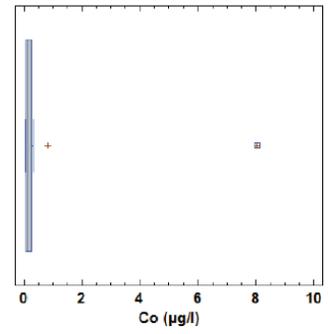
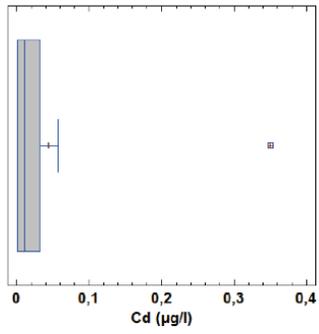
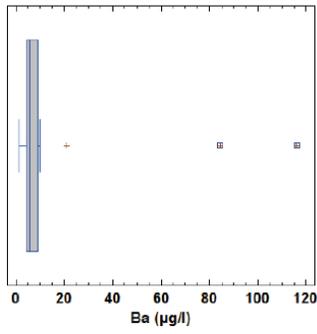
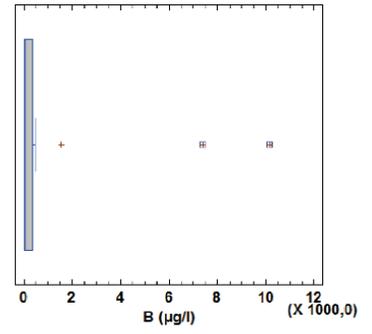
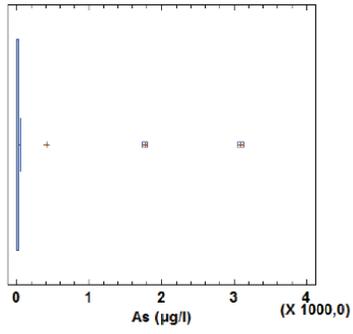
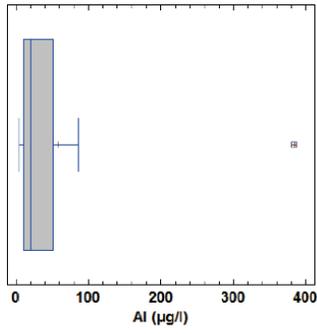


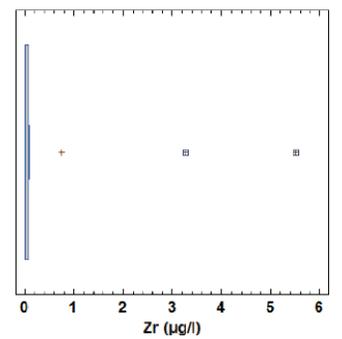
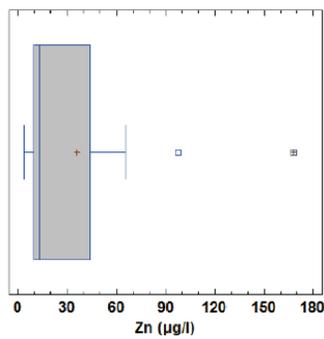
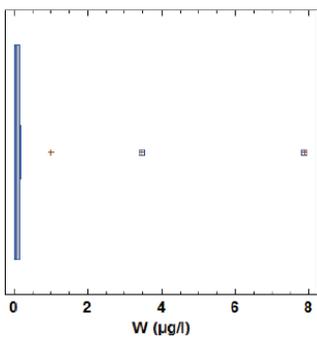
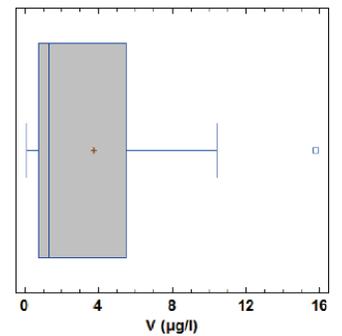
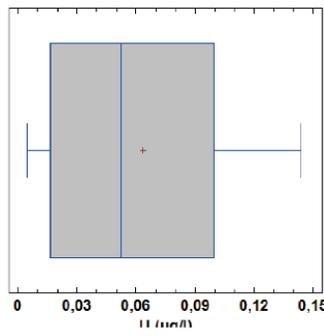
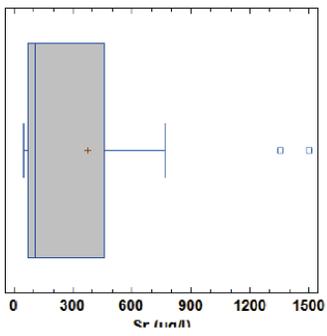
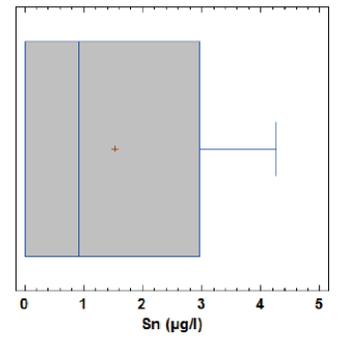
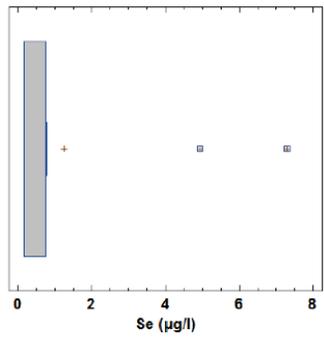
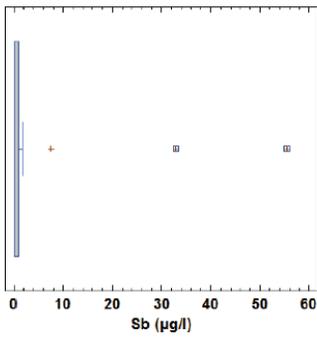
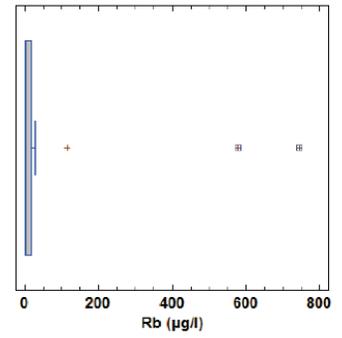
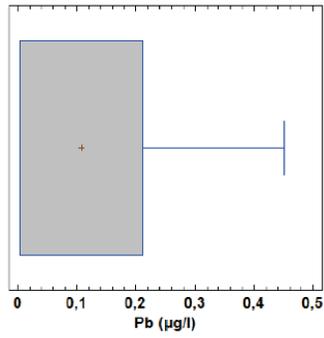
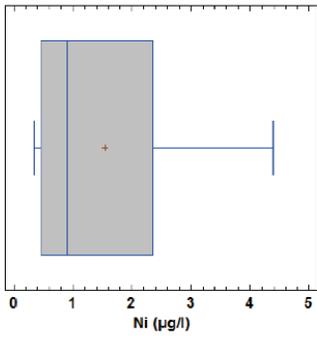


ANEXO F. ESTADÍSTICA

F1. Diagramas de caja y bigote







F2. Calculo de transformación clr (razón logarítmica centrada) para las muestras de agua

Muestra	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO3	SO4	SiO2	F	Al	As	B	Ba	Cd	Co	Cs	Cu
LD1	-0,65	-0,25	-1,05	-0,8	-1,75	0,31	-1,16	-0,23	-0,78	-0,17	-2,02	-1,75	-0,63	0,64	-0,69	-2,26	-1,13
LD2	-0,9	-0,34	-1,1	-1,69	-2,73	0,23	-1,87	-0,22	-0,7	-1,7	-1,02	-3,07	-0,52	-1,65	-1,21	-2,98	-1,13
LD3	-0,63	0,01	-0,58	-1,69	-1,76	0,54	-1,42	0,22	-0,45	0,31	-2,56	-2,01	-1,71	0,04	-0,76	-6,45	-1,13
LD4	0,82	0,02	3,69	3,45	5,21	1,24	1,42	1,48	1,87	-0,21	5,37	4,24	2,41	1,23	0,13	7,25	2,67
LD5	1,05	0,43	3,92	3,72	5,51	1,33	1,36	1,71	2,14	-1,26	5,93	4,56	2,73	1,69	0,37	7,69	3,43
LD6	0,004	0,23	-0,22	-0,07	0,65	0,09	0,37	-0,22	0,14	1,07	-0,66	0,61	-0,3	0,13	0,28	-0,07	-1,13
LD7	-0,61	-0,66	-1,31	-1,5	-2,04	0,05	-0,93	-0,76	-1,11	-1,65	-1,18	-1,06	-1,39	-1,65	-1,49	-3,12	-1,13
LD8	-0,02	0,12	-1,54	-0,46	-2,37	-4,41	0,96	-0,69	0,39	2,76	-2,25	-2,12	0,25	3,5	3,88	-1,19	2,97
LD9	1,51	0,49	-0,26	-0,79	-0,14	-0,03	2,09	-1,04	-0,01	-0,12	-1,26	0,24	0,08	-1,65	0,62	0,22	-0,004
LD10	0,41	0,09	0,4	0,37	2,15	1,11	-0,59	-0,18	-0,63	-0,61	1,85	1,45	-0,08	-1,65	-0,4	4,2	-1,13
LD11	-0,7	-0,46	-1,38	-0,59	-3,08	-0,2	-0,56	0,02	-1,08	0,32	-1,03	-1,89	-0,3	-1,65	-1,23	-2,42	-1,13
LD12	-0,27	0,29	-0,55	0,05	0,36	-0,29	0,33	-0,08	0,23	1,27	-1,13	0,79	-0,52	1,01	0,52	-0,85	-1,13

Muestra	Fe	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Se	Sn	Sr	U	V	W	Zn	Zr
LD1	-0,06	-4,79	-0,79	-0,43	-0,79	2,32	-1,18	-0,93	-0,88	3,19	-0,81	-0,26	-0,21	-0,18	-0,18	1,15
LD2	0,24	-4,79	-0,59	-1,27	-1,11	-1,7	-2,39	-1,14	-0,88	3,18	-0,94	-1,21	-1,67	-2,4	-0,65	-1,66
LD3	0,57	-4,79	-0,35	-0,67	-0,71	3,02	-3,24	-3,99	-0,88	3,31	-1,21	-2,09	-0,21	-2,4	2,21	-1,66
LD4	1,73	6,3	2,33	2,6	0,8	2,32	4,88	4,89	2,61	3,55	2,07	-1,4	1,86	4,13	1,67	5,04
LD5	-0,31	6,58	2,64	2,83	0,83	-1,7	5,13	5,41	3	3,16	2,17	0,1	2,28	4,95	-0,63	5,56
LD6	-0,82	0,77	0,39	0,82	-0,17	-1,7	0,1	-0,49	-0,88	2,72	-0,38	1,23	-0,21	0,93	-1,04	-1,66
LD7	-3,12	-2,2	-3,66	0,1	-0,92	-1,7	-3,03	-1,05	-0,88	-3,19	-0,98	-0,65	0,05	-2,4	-1,62	-1,66
LD8	3,73	-0,52	3,41	-5,63	1,44	2,03	-0,31	-1,53	-0,88	-3,19	-0,48	0,88	-2,77	-2,4	1,27	-1,66
LD9	-0,82	0,86	-1,45	-0,08	1,41	-1,7	-1,2	-1,18	0,67	-3,19	1,5	0,91	1,33	-2,4	-0,54	-1,66
LD10	-1,13	3,02	-1,9	0,52	0,19	-1,7	1,86	1,99	0,76	-3,19	-0,21	0,86	-0,98	1,23	-0,39	1,56
LD11	-0,39	-0,88	-1,55	0,41	-0,88	-1,7	-0,91	-0,95	-0,88	-3,19	-0,14	0,39	1,11	0,34	0,19	-1,66
LD12	0,39	0,46	1,54	0,78	-0,08	2,2	0,31	-1	-0,88	-3,19	-0,57	1,26	-0,57	0,57	-0,26	-1,66

ANEXO G. ESTACIONES DE MONITOREO DE LA DGA EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Estación	Código BNA de identificación de las estaciones	Cuenca	Subcuenca	Sub-subcuenca	UTM N (m)	UTM E (m)	Altura (m)	Tipo
Rio Tinguiririca Bajo Los Briones	06028001-0	060	0602	06028	6156581	332727	560	Fluviométrica Sedimentométrica Calidad de Aguas Meteorológica
Rio Claro en El Valle	06027001-5	060	0602	06027	6160046	328337	476	Fluviométrica
La Rufina	06027003-1	060	0602	06027	6154023	339617	743	Meteorológica
Termas del Flaco	06020001-7	060	0602	06020	6138164	378490	2650	Meteorológica
Glaciar Universidad en rio San Andrés	06023000-5	060	0602	06023	6157136	375542	2429	Meteorológica

ANEXO H. CALIDAD DE AGUAS SUPERFICIAL EN BAJO LOS BRIONES

H1. Concentraciones medidas en las Estación Bajo Los Briones

Fecha	T (°C)	pH	CE (mhos/cm)	Dda.Qca. de Ox.	O Diss.	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO4	N
06-03-2014	13,6	7,6	318	1	9,1	3,2	15,2	46,2	5,9	16,9	118,9	S.D.
04-07-2014	6,2	8,8	520	1	11,1	3,7	31,2	94,7	6,8	47,6		S.D.
12-11-2014	11,8	7,1	310	4,2	12	2,4	12	35,2	7,3	20,8	67,7	0,012
25-02-2015	15	7,8	311	S.D.	10,1	3,8	11,7	33,8	7	S.D.	85	S.D.
23-06-2015	9	8,2	397	2,8	S.D.	2,9	21,5	45,1	5,6	27,7	130,4	S.D.
24-11-2015	12,5	9,3	224	2	7	3,6	12,5	35,4	11,3	6,4	S.D.	0,652
26-01-2016	11,3	8,2	207	1	14,1	2,6	7,6	30,5	5,5	5,9	75,9	S.D.
27-04-2016	11	8,1	234	1	11,8	4,2	22,4	75,2	24,7	5,7	43,6	S.D.
04-08-2016	8	7,9	371	1	14,3	2,5	25,1	50,9	6,5	21,7	84,1	0,133
09-11-2016	13,1	6,1	158	1,7	11,3	1,9	7,3	26,6	5,1	4,8	36	S.D.
11-01-2017	14,8	7,7	200	1	8,4	2,4	8,3	24,1	4,4	7,7	77,8	0,194
04-04-2017	9,7	7,7	409	3	12,1	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	13,8	104	S.D.

Fecha	Al	As	B	Cd	Co	Cu	Cr	Fe t	Mn	Hg	Mo	Ni	Ag	Pb	Se	Zn
06-03-2014	2,64	0,009	1	0,004	0,01	0,03	0,009	2,9	0,23	0,002	S.D.	0,02	0,01	0,06	0,001	S.D.
04-07-2014	0,8	0,051	1	0,004	S.D.	0,02	0,009	0,8	0,07	0,002	S.D.	S.D.	0,01	0,06	0,001	S.D.
12-11-2014	8,46	0,015	1	0,01	0,04	0,02	0,05	4,6	0,25	0,002	0,05	0,05	0,01	0,07	0,001	0,01
25-02-2015	6,57	0,012	S.D.	0,01	0,04	0,03	0,05	6,4	0,19	0,002	0,07	0,05	0,01	0,07	0,001	0,02
23-06-2015	S.D.	0,01	1	0,01	0,04	0,02	S.D.	0,5	0,06	0,002	S.D.	0,05	0,01	0,07	0,001	0,01
24-11-2015	S.D.	0,013	1	0,01	0,04	0,02	S.D.	6,9	0,36	0,002	S.D.	0,05	0,01	0,07	0,001	0,03
26-01-2016	S.D.	0,01	1	0,01	0,04	0,02	S.D.	4,5	0,31	0,002	S.D.	0,05	0,01	0,07	0,001	0,02
27-04-2016	S.D.	0,012	S.D.	S.D.	S.D.	0,07	S.D.	30	1,49	S.D.	S.D.	0,05	S.D.	S.D.	S.D.	0,09
04-08-2016	S.D.	0,021	1	0,01	0,04	0,02	S.D.	3,2	0,28	0,002	S.D.	0,05	0,01	0,07	0,001	0,01
09-11-2016	S.D.	S.D.	1	0,01	0,04	0,01	S.D.	5,2	0,3	S.D.	S.D.	0,05	0,01	0,02	S.D.	0,01
11-01-2017	S.D.	S.D.	1	0,01	0,04	0,01	S.D.	2,3	0,14	S.D.	S.D.	0,05	0,01	0,02	S.D.	0,01
04-04-2017	S.D.	S.D.	1	0,01	S.D.	0,03	S.D.	11,8	0,69	S.D.	S.D.	0,03	0,01	0,02	S.D.	0,04

Fuente: DGA. Reportes de calidad de aguas superficiales río Tinguiririca en estación Bajo Los Briones, 2014-2017. Datos en mg/l. S.D.: Sin datos (Consultado en Noviembre de 2017)

H2. Comparación con norma N.Ch.409

	Limite N.Ch.409	06-03- 2014	04-07- 2014	12-11- 2014	25-02- 2015	23-06- 2015	24-11- 2015	26-01- 2016	27-04- 2016	04-08- 2016	09-11- 2016	11-01- 2017	04-04- 2017
pH	6,5-8,5	7,6	8,8	7,1	7,8	8,2	9,3	8,2	8,1	7,9	6,1	7,7	7,7
Mg (mg/l)	< 125	5,9	6,8	7,3	7	5,6	11,3	5,5	24,7	6,5	5,1	4,4	S.D.
Cl (mg/l)	< 400	16,9	47,6	20,8	S.D.	27,7	6,4	5,9	5,7	21,7	4,8	7,7	13,8
SO4 (mg/l)	< 500	118,9	S.D.	67,7	85	130,4	S.D.	75,9	43,6	84,1	36	77,8	104
NO3 (mg/l)	< 50	S.D.	S.D.	0,012	S.D.	S.D.	0,652	S.D.	S.D.	0,133	S.D.	0,194	S.D.
As (mg/l)	< 0,01	0,009	0,051	0,015	0,012	0,01	0,013	0,01	0,012	0,021	S.D.	S.D.	S.D.
Cd (mg/l)	< 0,01	0,004	0,004	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	S.D.	0,01	0,01	0,01	0,01
Cr (mg/l)	< 0,05	0,009	0,009	0,05	0,05	S.D.							
Cu (mg/l)	< 2	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,07	0,02	0,01	0,01	0,03
Fe (mg/l)	< 0,3	2,9	0,8	4,6	6,4	0,5	6,9	4,5	30	3,2	5,2	2,3	11,8
Hg (mg/l)	< 0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	S.D.	0,002	S.D.	S.D.	S.D.
Mn (mg/l)	< 0,1	0,23	0,07	0,25	0,19	0,06	0,36	0,31	1,49	0,28	0,3	0,14	0,69
Pb (mg/l)	< 0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	S.D.	0,07	0,02	0,02	0,02
Se (mg/l)	< 0,01	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	S.D.	0,001	S.D.	S.D.	S.D.
Zn (mg/l)	< 3	S.D.	S.D.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,09	0,01	0,01	0,01	0,04

Nota: Valores en rojo superan el límite dado por la norma, valores en amarillo igualan la norma.

H3. Comparacion con norma N.Ch.1333

	Limite N.Ch.1333	06-03- 2014	04-07- 2014	12-11- 2014	25-02- 2015	23-06- 2015	24-11- 2015	26-01- 2016	27-04- 2016	04-08- 2016	09-11- 2016	11-01- 2017	04-04- 2017
pH	5,5-9	7,6	8,8	7,1	7,8	8,2	9,3	8,2	8,1	7,9	6,1	7,7	7,7
Na (%)	< 35%	21,5	22,8	21,1	20,7	28,6	19,9	16,4	17,7	29,5	17,8	21,1	S.D.
Cl (mg/l)	< 200	16,9	47,6	20,8	S.D.	27,7	6,4	5,9	5,7	21,7	4,8	7,7	13,8
SO4 (mg/l)	< 250	118,9	S.D.	67,7	85	130,4	S.D.	75,9	43,6	84,1	36	77,8	104
Ag (mg/l)	< 0,2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	S.D.	0,01	0,01	0,01	0,01
Al (mg/l)	< 5	2,64	0,8	8,46	6,57	S.D.							
As (mg/l)	< 0,1	0,009	0,051	0,015	0,012	0,01	0,013	0,01	0,012	0,021	S.D.	S.D.	S.D.
B (mg/l)	< 0,75	1	1	1	S.D.	1	1	1	S.D.	1	1	1	1
Cd (mg/l)	< 0,01	0,004	0,004	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	S.D.	0,01	0,01	0,01	0,01
Cr (mg/l)	< 0,1	0,009	0,009	0,05	0,05	S.D.							
Co (mg/l)	< 0,05	0,01	S.D.	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	S.D.	0,04	0,04	0,04	S.D.
Cu (mg/l)	< 0,2	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,07	0,02	0,01	0,01	0,03
Fe (mg/l)	< 5	2,9	0,8	4,6	6,4	0,5	6,9	4,5	30	3,2	5,2	2,3	11,8
Hg (mg/l)	< 0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	S.D.	0,002	S.D.	S.D.	S.D.
Mn (mg/l)	< 0,2	0,23	0,07	0,25	0,19	0,06	0,36	0,31	1,49	0,28	0,3	0,14	0,69
Ni (mg/l)	< 0,2	0,02	S.D.	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03
Pb (mg/l)	< 5	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	S.D.	0,07	0,02	0,02	0,02
Se (mg/l)	< 0,02	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	S.D.	0,001	S.D.	S.D.	S.D.
Zn (mg/l)	< 2	S.D.	S.D.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,09	0,01	0,01	0,01	0,04

Nota: Valores en rojo superan el límite dado por la norma, valores en amarillo igualan la norma.

ANEXO I. COMPARACIÓN DE MUESTRAS CON NORMATIVAS DE AGUAS

I1. Norma N.Ch.409

	Apta	pH	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	F (mg/l)	As (mg/l)	Cd (mg/l)	Cr (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Hg (mg/l)	Mn (mg/l)	Pb (mg/l)	Se (mg/l)	Zn (mg/l)
N.Ch.409 - 2004		6,5-8,5	< 125	< 400	< 500	< 50	< 1,5	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 2	< 0,3	< 0,001	< 0,1	< 0,05	< 0,01	< 3
Muestras																	
LD1	Si	8,3	2,65	0,83	13,1	< 0,1	0,04	0,001	0,00002	< 0,00007	< 0,0002	0,032	< 0,000004	0,006	0,000224	< 0,0003	0,0152
LD2	Si	8,3	2,41	0,31	6,39	< 0,1	0,05	0,003	< 0,000004	< 0,00007	< 0,0002	0,044	< 0,000004	0,008	< 0,000008	< 0,0003	0,0095
LD3	Si	8,0	3,47	0,82	10,1	< 0,1	0,06	0,001	0,000011	< 0,00007	< 0,0002	0,061	< 0,000004	0,01	0,000452	< 0,0003	0,168
LD4	No	6,7	3,52	884	173	1,11	0,62	1,765	0,000036	< 0,00007	0,0045	0,195	0,000194	0,148	0,000225	0,0049	0,0978
LD5	No	7,2	5,3	1186	163	< 0,1	0,81	3,092	0,000057	< 0,00007	0,0097	0,025	0,00139	0,202	< 0,000008	0,0073	0,0097
LD6	No	5,5	4,33	9,2	60,9	< 0,1	0,11	0,004	0,000012	< 0,00007	< 0,0002	0,015	< 0,000004	0,021	< 0,000008	< 0,0003	0,0064
LD7	Si	8,0	1,75	0,62	16,4	< 0,1	0,03	0,003	< 0,000004	< 0,00007	< 0,0002	< 0,003	< 0,000004	0,0004	< 0,000008	< 0,0003	0,0036
LD8	No	4,8	3,89	0,45	110	0,09	0,14	0,001	0,00035	< 0,00007	0,0061	1,441	< 0,000004	0,436	0,000168	< 0,0003	0,0659
LD9	Si	7,9	5,62	4,15	341	< 0,1	0,09	0,002	< 0,000004	< 0,00007	0,0003	0,015	< 0,000004	0,003	< 0,000008	0,0007	0,0106
LD10	No	7,6	3,76	41,3	23	< 0,1	0,05	0,052	< 0,000004	< 0,00007	< 0,0002	0,011	< 0,000004	0,002	< 0,000008	0,0008	0,0124
LD11	Si	8,1	2,15	0,22	23,8	< 0,1	0,03	0,003	< 0,000004	< 0,00007	< 0,0002	0,023	< 0,000004	0,003	< 0,000008	< 0,0003	0,0222
LD12	Si	7,6	4,59	6,93	58,2	0,23	0,12	0,003	0,000029	< 0,00007	< 0,0002	0,051	< 0,000004	0,067	0,0002	< 0,0003	0,014

Nota: Valores en rojo superan el límite dado por la norma, valores en amarillo igualan la norma.

I2. Norma N.Ch.1333

	Apta	ph	Na (%)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	F (mg/l)	Ag (mg/l)	Al (mg/l)	As (mg/l)	B (mg/l)	Be (mg/l)	Ba (mg/l)	Cd (mg/l)	Cr (mg/l)
N.Ch.1333 - 1978		5,5-9	< 35%	< 200	< 250	< 1	< 0,2	< 5	< 0,1	< 0,75	< 0,1	< 4	< 0,01	< 0,1
Muestras														
LD1	Si	8,3	16,2	0,8	13,1	0,04	< 0,000003	0,02	0,001	0,02	< 0,00001	0,004	0,00002	< 0,00007
LD2	Si	8,3	18,7	0,31	6,4	0,05	< 0,000003	0,004	0,003	0,005	< 0,00001	0,004	< 0,000004	< 0,00007
LD3	Si	8,0	22,6	0,82	10,1	0,06	< 0,000003	0,033	0,001	0,01	< 0,00001	0,001	0,000011	< 0,00007
LD4	No	6,7	81,4	884	173	0,62	< 0,000003	0,02	1,765	7,38	< 0,00001	0,085	0,000036	< 0,00007
LD5	No	7,2	81,2	1186	163	0,81	0,00029	0,007	3,092	10,18	< 0,00001	0,116	0,000057	< 0,00007
LD6	Si	5,5	19	9,2	60,9	0,11	< 0,000003	0,071	0,004	0,2	< 0,00001	0,006	0,000012	< 0,00007
LD7	Si	8,0	13,5	0,62	16,4	0,03	< 0,000003	0,005	0,003	0,04	< 0,00001	0,002	< 0,000004	< 0,00007
LD8	No	4,8	6,2	0,45	110	0,14	< 0,000003	0,384	0,001	0,01	0,00014	0,01	0,00035	< 0,00007
LD9	No	7,9	5,5	4,15	341	0,09	< 0,000003	0,021	0,002	0,14	< 0,00001	0,008	< 0,000004	< 0,00007
LD10	Si	7,6	24	41,3	23	0,05	< 0,000003	0,013	0,052	0,45	< 0,00001	0,007	< 0,000004	< 0,00007
LD11	Si	8,1	13	0,22	23,8	0,03	< 0,000003	0,034	0,003	0,02	< 0,00001	0,006	< 0,000004	< 0,00007
LD12	Si	7,6	17,2	6,93	58,2	0,12	< 0,000003	0,086	0,003	0,24	< 0,00001	0,004	0,000029	< 0,00007

	Apta	Co (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Hg (mg/l)	Li (mg/l)	Mn (mg/l)	Mo (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)	Se (mg/l)	V (mg/l)	Zn (mg/l)
N.Ch.1333 - 1978		< 0,05	< 0,2	< 5	< 0,001	< 2,5	< 0,2	< 0,01	< 0,2	< 5	< 0,02	< 0,1	< 2
Muestras													
LD1	Si	0,00008	< 0,0002	0,032	< 0,000004	< 0,00006	0,006	0,0005	0,0005	0,000224	< 0,0003	0,0013	0,0152
LD2	Si	0,00005	< 0,0002	0,044	< 0,000004	< 0,00006	0,008	0,0002	0,0003	< 0,000008	< 0,0003	0,0003	0,0095
LD3	Si	0,00008	< 0,0002	0,061	< 0,000004	< 0,00006	0,01	0,0004	0,0005	0,000452	< 0,0003	0,0013	0,168
LD4	No	0,00019	0,0045	0,195	0,000194	1,991	0,148	0,0113	0,0023	0,000225	0,0049	0,0104	0,0978
LD5	No	0,00024	0,0097	0,025	0,00139	2,645	0,202	0,0143	0,0024	< 0,000008	0,0073	0,0158	0,0097
LD6	Si	0,00022	< 0,0002	0,015	< 0,000004	0,00787	0,021	0,0019	0,0009	< 0,000008	< 0,0003	0,0013	0,0064
LD7	Si	0,00004	< 0,0002	< 0,003	< 0,000004	0,0004	0,0004	0,0009	0,0004	< 0,000008	< 0,0003	0,0017	0,0036
LD8	No	0,00804	0,0061	1,441	< 0,000004	0,00215	0,436	< 0,000006	0,0044	0,000168	< 0,0003	< 0,0002	0,0659
LD9	No	0,00031	0,0003	0,015	< 0,000004	0,00862	0,003	0,0008	0,0043	< 0,000008	0,0007	0,0061	0,0106
LD10	Si	0,00011	< 0,0002	0,011	< 0,000004	0,0746	0,002	0,0014	0,0013	< 0,000008	0,0008	0,0006	0,0124
LD11	Si	0,00005	< 0,0002	0,023	< 0,000004	0,0015	0,003	0,0013	0,0004	< 0,000008	< 0,0003	0,0049	0,0222
LD12	Si	0,00028	< 0,0002	0,051	< 0,000004	0,00579	0,067	0,0018	0,001	0,0002	< 0,0003	0,0009	0,014

Nota: Valores en rojo superan el límite dado por la norma, valores en amarillo igualan la norma.

I3. Comparación de normas de Chile, EPA (USA), UE y Organización Mundial de la Salud (WHO)

Norma	N.Ch.409	N.Ch.1333	NPDWR (EPA, USA)	DWD (UE)	GDWQ (WHO)
pH	6,5-8,5	5,5-9	6.5-8.5 *	6.5-9.5	**
CE (µS/cm)	-	-	-	2500	-
TDS (mg/l)	1500	-	500*	-	**
Mg (mg/l)	125	-	-	-	-
Na (mg/l)	-	-	-	200	**
Cl (mg/l)	400	200	250*	250	**
SO4 (mg/l)	500	250	250*	250	**
NO3 (mg/l)	50	-	10	50	50
F (mg/l)	1,5	1	4 (2*)	1,5	-
Ag (µg/l)	-	200	100*	-	***
Al (µg/l)	-	5000	200*	200	****
As (µg/l)	10	100	10	10	10
B (µg/l)	-	750	-	1000	2400
Be (µg/l)	-	100	4	-	**
Ba (µg/l)	-	4000	2000	-	700
Cd (µg/l)	10	10	5	5	5
Cr (µg/l)	50	100	100	50	50
Co (µg/l)	-	50	-	-	-
Cu (µg/l)	2000	200	1300 (1000*)	2000	2000
Fe (µg/l)	300	5000	300*	200	**
Hg (µg/l)	1	1	2	1	6
Li (µg/l)	-	2500	-	-	-
Mn (µg/l)	100	200	50*	50	**
Mo (µg/l)	-	10	-	-	**
Ni (µg/l)	-	200	-	20	70
Pb (µg/l)	50	5000	15	10	10
Sb (µg/l)	-	-	6	5	20
Se (µg/l)	10	20	50	10	40
U (µg/l)	-	100	30	-	30
V (µg/l)	-	100	-	-	-
Zn (µg/l)	3000	2000	5000	-	**
TI (µg/l)	-	-	2	-	-

- No declarado.

* Regulaciones secundarias no obligatorias de la norma NPDWR de la EPA, para contaminantes que pueden ocasionar daño estético.

** No genera problemas de salud en los niveles encontrados en agua potable (WHO).

*** Datos disponibles inadecuados para permitir la derivación del valor de referencia basado en la salud (WHO).

**** Límite de 0,9 mg/l para considerar el agua potable, pero se debe mantener entre 0,1-0,2 mg/l para optimizar las plantas de tratamiento de agua (WHO).

I4. Norma NPDWR de la EPA (USA)

Norma	pH	TDS (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	F (mg/l)	Ag (µg/l)	Al (µg/l)	As (µg/l)	Be (µg/l)	Ba (µg/l)	Cd (µg/l)
NPDWR (EPA, USA)	6.5-8.5 *	< 500*	< 250*	< 250*	< 10	< 4 (2*)	< 100*	< 200*	< 10	< 4	< 2000	< 5
Muestras												
LD1	8,3	38,87	0,83	13,1	< 0,1	0,043	< 0,003	20,3	1,08	< 0,01	3,99	0,02
LD2	8,3	33,06	0,31	6,39	< 0,1	0,047	< 0,003	4,4	2,95	< 0,01	4,45	< 0,004
LD3	8,0	45,57	0,82	10,1	< 0,1	0,06	< 0,003	33	0,63	< 0,01	1,35	0,011
LD4	6,7	1788,36	884	173	1,11	0,62	< 0,003	19,5	1765	< 0,01	84,5	0,036
LD5	7,2	2255,68	1186	163	< 0,1	0,81	0,29	6,8	3092	< 0,01	116	0,057
LD6	5,5	106,9	9,2	60,9	< 0,1	0,11	< 0,003	70,5	4,21	< 0,01	5,54	0,012
LD7	8,0	36,73	0,62	16,4	< 0,1	0,031	< 0,003	4,6	2,51	< 0,01	1,87	< 0,004
LD8	4,8	124,92	0,445	110	0,09	0,14	< 0,003	384	0,86	0,14	9,66	0,35
LD9	7,9	368,42	4,15	341	< 0,1	0,093	< 0,003	21,2	2,31	< 0,01	8,18	< 0,004
LD10	7,6	116,79	41,3	23	< 0,1	0,05	< 0,003	13	52,2	< 0,01	6,88	< 0,004
LD11	8,1	44	0,22	23,8	< 0,1	0,032	< 0,003	33,5	2,92	< 0,01	5,55	< 0,004
LD12	7,6	97,45	6,93	58,2	0,23	0,12	< 0,003	85,9	2,64	< 0,01	4,44	0,029

Norma	Cr (µg/l)	Cu (µg/l)	Fe (µg/l)	Hg (µg/l)	Mn (µg/l)	Pb (µg/l)	Sb (µg/l)	Se (µg/l)	U (µg/l)	Zn (µg/l)	Tl (µg/l)
NPDWR (EPA, USA)	< 100	< 1300 (1000*)	< 300*	< 2	< 50*	< 15	< 6	< 50	< 30	< 5000	< 2
Muestras											
LD1	< 0,07	< 0,2	32	< 0,004	6,48	0,224	0,096	< 0,3	0,031	15,2	-
LD2	< 0,07	< 0,2	44	< 0,004	7,9	< 0,008	0,078	< 0,3	0,012	9,54	-
LD3	< 0,07	< 0,2	61	< 0,004	10,1	0,452	< 0,009	< 0,3	0,005	168	-
LD4	< 0,07	4,54	195	0,194	148	0,225	32,8	4,93	0,01	97,8	-
LD5	< 0,07	9,68	25	1,39	202	< 0,008	55,4	7,3	0,045	9,68	-
LD6	< 0,07	< 0,2	15	< 0,004	21,4	< 0,008	0,15	< 0,3	0,139	6,42	-
LD7	< 0,07	< 0,2	< 3	< 0,004	0,37	< 0,008	0,085	< 0,3	0,021	3,6	-
LD8	< 0,07	6,08	1441	< 0,004	436	0,168	0,053	< 0,3	0,098	65,9	-
LD9	< 0,07	0,31	15	< 0,004	3,37	< 0,008	0,075	0,71	0,101	10,6	-
LD10	< 0,07	< 0,2	11	< 0,004	2,14	< 0,008	1,81	0,78	0,096	12,4	-
LD11	< 0,07	< 0,2	23	< 0,004	3,03	< 0,008	0,094	< 0,3	0,06	22,2	-
LD12	< 0,07	< 0,2	51	< 0,004	67,2	0,2	0,09	< 0,3	0,144	14	-

Nota: * Regulaciones secundarias no obligatorias de la norma NPDWR de la EPA, para contaminantes que pueden ocasionar daño estético. Valores en rojo superan el límite dado por la norma

I5. Norma DWD de la UE

Norma	pH	CE (µS/cm)	Na (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	F (mg/l)	Al (µg/l)	As (µg/l)	B (µg/l)	Cd (µg/l)
DWD(UE)	6.5-9.5	< 2500	< 200	< 250	< 250	< 50	< 1,5	< 200	< 10	< 1000	< 5
Muestras											
LD1	8,3	127,7	5,1	0,83	13,1	< 0,1	0,043	20,3	1,08	18,4	0,02
LD2	8,3	90,3	4,82	0,31	6,39	< 0,1	0,047	4,4	2,95	4,92	< 0,004
LD3	8,0	124,3	8,14	0,82	10,1	< 0,1	0,06	33	0,63	14,2	0,011
LD4	6,7	3770	586	884	173	1,11	0,62	19,5	1765	7381	0,036
LD5	7,2	5010	741	1186	163	< 0,1	0,81	6,8	3092	10175	0,057
LD6	5,5	317	11,6	9,2	60,9	< 0,1	0,11	70,5	4,21	196	0,012
LD7	8,0	131,7	3,93	0,62	16,4	< 0,1	0,031	4,6	2,51	36,4	< 0,004
LD8	4,8	236	3,1	0,445	110	0,09	0,14	384	0,86	12,7	0,35
LD9	7,9	779	11,2	4,15	341	< 0,1	0,093	21,2	2,31	135	< 0,004
LD10	7,6	403	21,9	41,3	23	< 0,1	0,05	13	52,2	454	< 0,004
LD11	8,1	117,3	3,66	0,22	23,8	< 0,1	0,032	33,5	2,92	16	< 0,004
LD12	7,6	210,1	8,38	6,93	58,2	0,23	0,12	85,9	2,64	236	0,029

Norma	Cr (µg/l)	Cu (µg/l)	Fe (µg/l)	Hg (µg/l)	Mn (µg/l)	Ni (µg/l)	Pb (µg/l)	Sb (µg/l)	Se (µg/l)
DWD (UE)	< 50	< 2000	< 200	< 1	< 50	< 20	< 10	< 5	< 10
Muestras									
LD1	< 0,07	< 0,2	32	< 0,004	6,48	0,47	0,224	0,096	< 0,3
LD2	< 0,07	< 0,2	44	< 0,004	7,9	0,34	< 0,008	0,078	< 0,3
LD3	< 0,07	< 0,2	61	< 0,004	10,1	0,51	0,452	< 0,009	< 0,3
LD4	< 0,07	4,54	195	0,194	148	2,32	0,225	32,8	4,93
LD5	< 0,07	9,68	25	1,39	202	2,4	< 0,008	55,4	7,3
LD6	< 0,07	< 0,2	15	< 0,004	21,4	0,87	< 0,008	0,15	< 0,3
LD7	< 0,07	< 0,2	< 3	< 0,004	0,37	0,41	< 0,008	0,085	< 0,3
LD8	< 0,07	6,08	1441	< 0,004	436	4,39	0,168	0,053	< 0,3
LD9	< 0,07	0,31	15	< 0,004	3,37	4,26	< 0,008	0,075	0,71
LD10	< 0,07	< 0,2	11	< 0,004	2,14	1,26	< 0,008	1,81	0,78
LD11	< 0,07	< 0,2	23	< 0,004	3,03	0,43	< 0,008	0,094	< 0,3
LD12	< 0,07	< 0,2	51	< 0,004	67,2	0,95	0,2	0,09	< 0,3

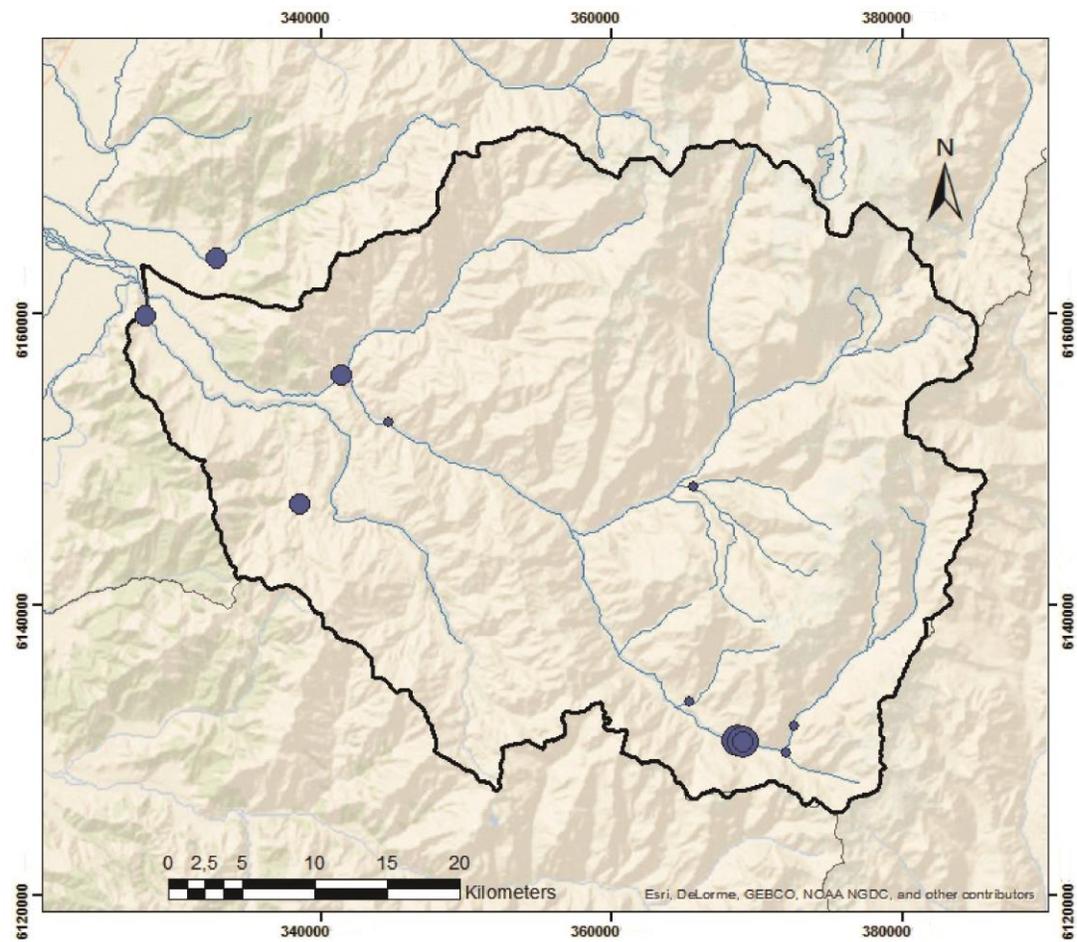
Nota: DWD= Drinking Water Directive. Valores en rojo superan el límite dado por la norma.

I6. Norma para agua potable de la OMS

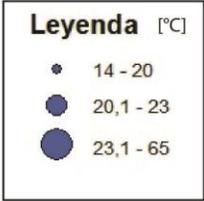
Norma	NO3 (mg/l)	As (µg/l)	B (µg/l)	Ba (µg/l)	Cd (µg/l)	Cr (µg/l)	Cu (µg/l)	Hg (µg/l)	Ni (µg/l)	Pb (µg/l)	Sb (µg/l)	Se (µg/l)	U (µg/l)
Guidelines for Drinking Water Quality (WHO)	< 50	< 10	< 2400	< 700	< 5	< 50	< 2000	< 6	< 70	< 10	< 20	< 40	< 30
Muestras													
LD1	< 0,1	1,08	18,4	3,99	0,02	< 0,07	< 0,2	< 0,004	0,47	0,224	0,096	< 0,3	0,031
LD2	< 0,1	2,95	4,92	4,45	< 0,004	< 0,07	< 0,2	< 0,004	0,34	< 0,008	0,078	< 0,3	0,012
LD3	< 0,1	0,63	14,2	1,35	0,011	< 0,07	< 0,2	< 0,004	0,51	0,452	< 0,009	< 0,3	0,005
LD4	1,11	1765	7381	84,5	0,036	< 0,07	4,54	0,194	2,32	0,225	32,8	4,93	0,01
LD5	< 0,1	3092	10175	116	0,057	< 0,07	9,68	1,39	2,4	< 0,008	55,4	7,3	0,045
LD6	< 0,1	4,21	196	5,54	0,012	< 0,07	< 0,2	< 0,004	0,87	< 0,008	0,15	< 0,3	0,139
LD7	< 0,1	2,51	36,4	1,87	< 0,004	< 0,07	< 0,2	< 0,004	0,41	< 0,008	0,085	< 0,3	0,021
LD8	0,09	0,86	12,7	9,66	0,35	< 0,07	6,08	< 0,004	4,39	0,168	0,053	< 0,3	0,098
LD9	< 0,1	2,31	135	8,18	< 0,004	< 0,07	0,31	< 0,004	4,26	< 0,008	0,075	0,71	0,101
LD10	< 0,1	52,2	454	6,88	< 0,004	< 0,07	< 0,2	< 0,004	1,26	< 0,008	1,81	0,78	0,096
LD11	< 0,1	2,92	16	5,55	< 0,004	< 0,07	< 0,2	< 0,004	0,43	< 0,008	0,094	< 0,3	0,06
LD12	0,23	2,64	236	4,44	0,029	< 0,07	< 0,2	< 0,004	0,95	0,2	0,09	< 0,3	0,144

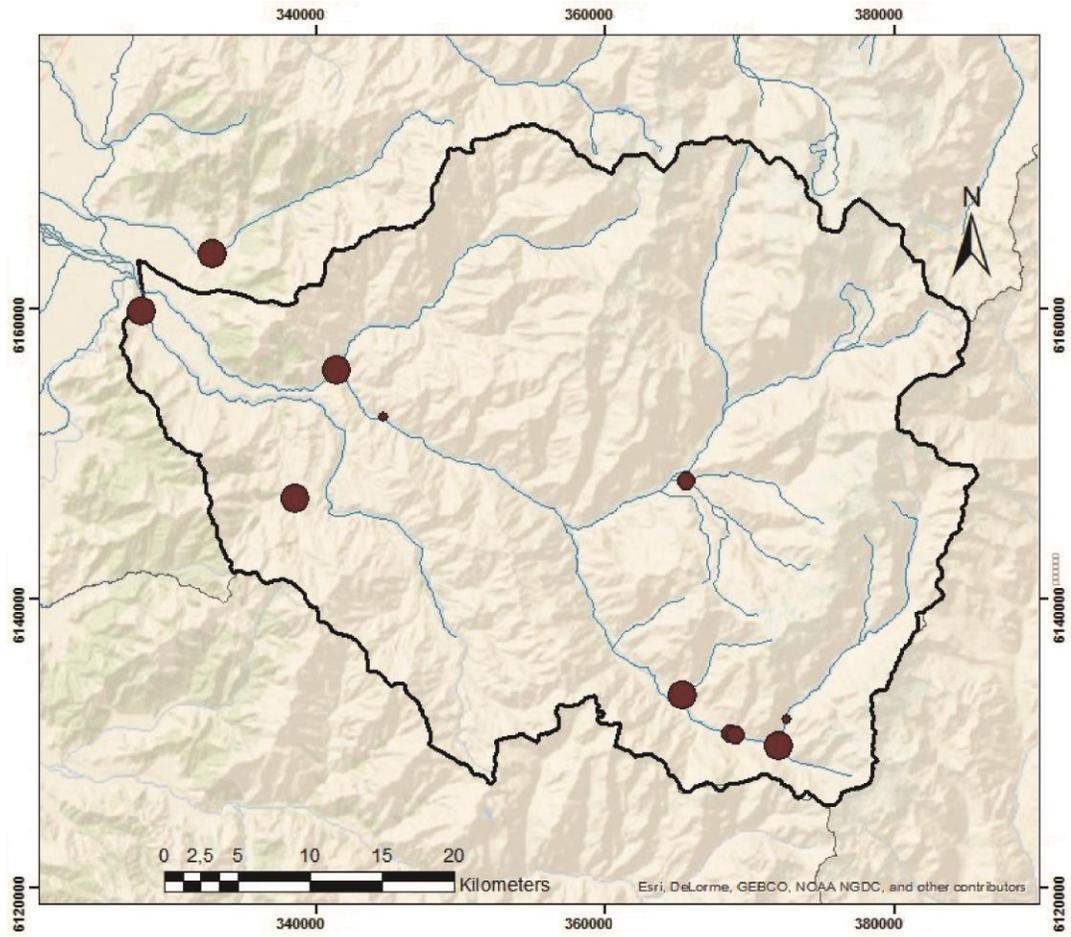
Nota: Valores en rojo superan el límite dado por la norma.

ANEXO J. MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS ANALIZADOS

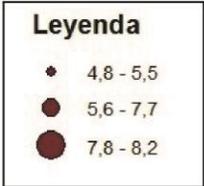


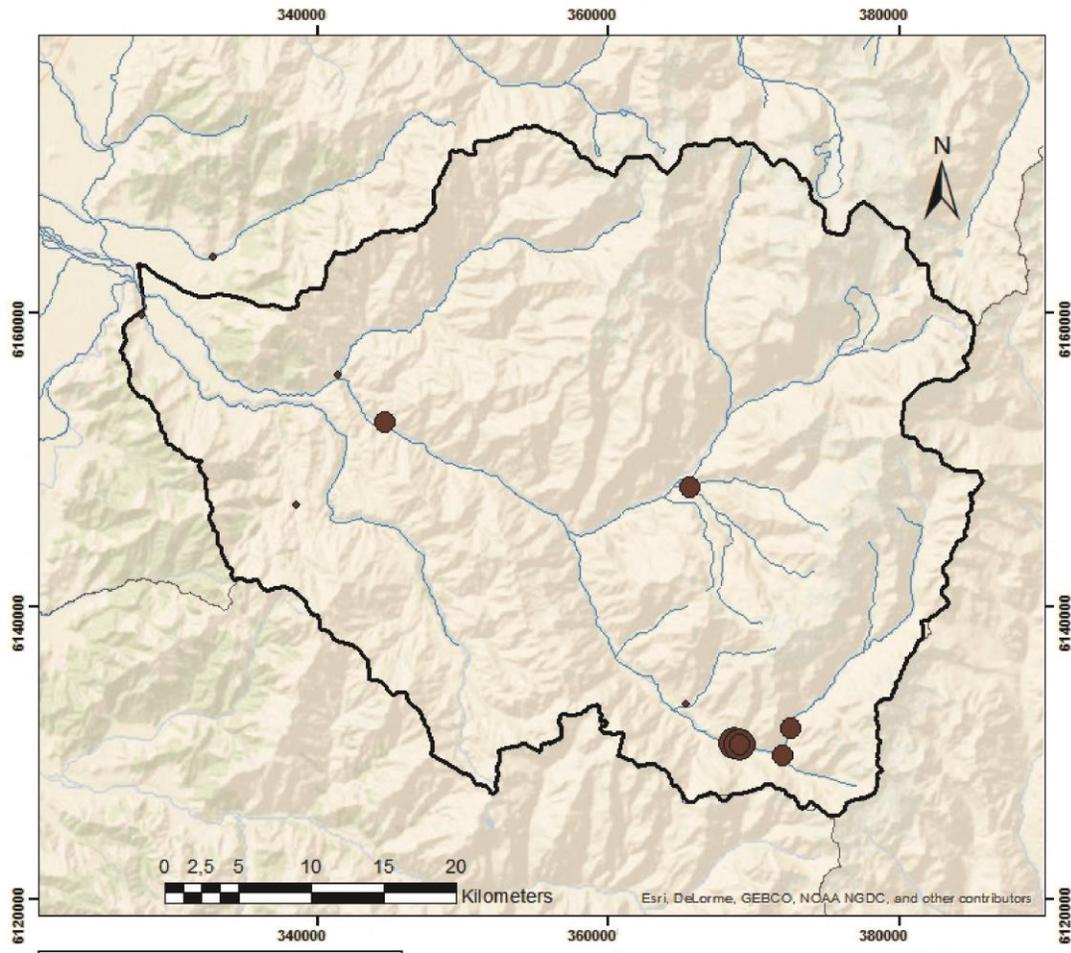
T° Temperatura





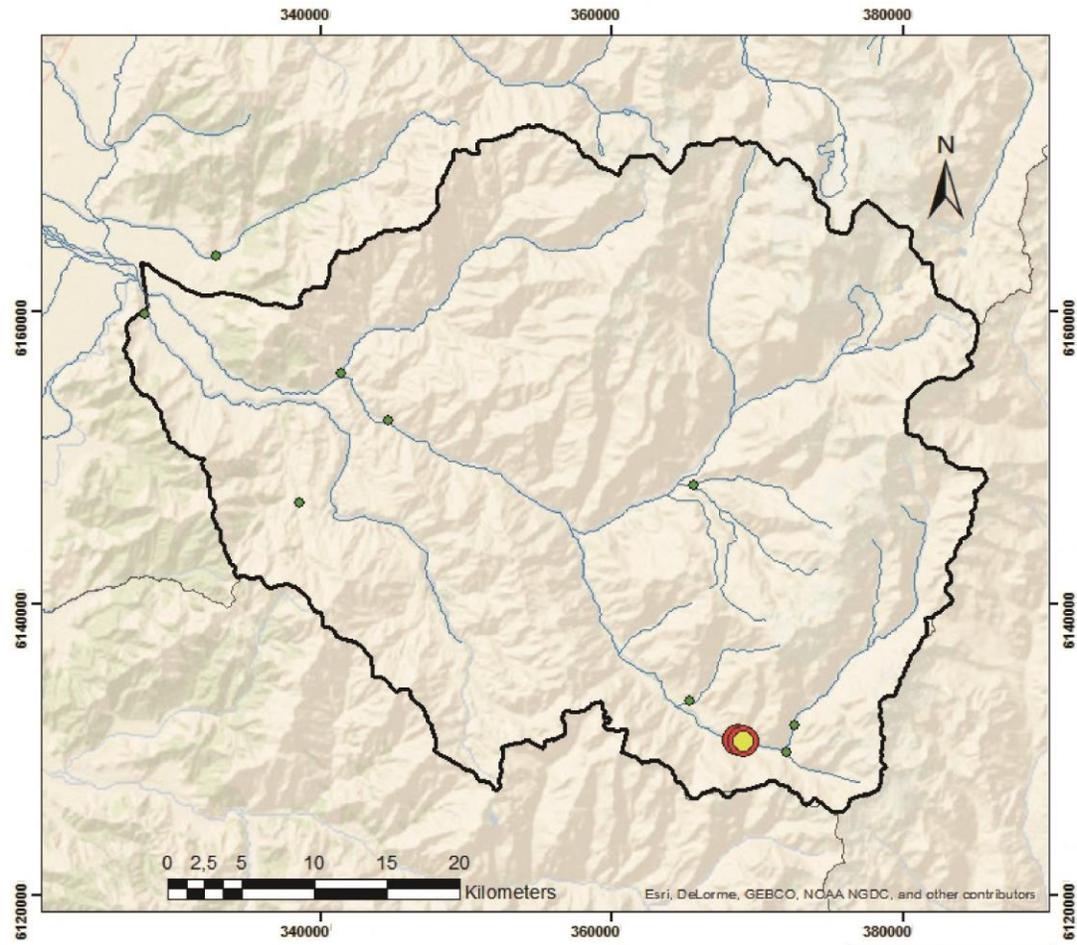
pH





EC Conductividad Eléctrica

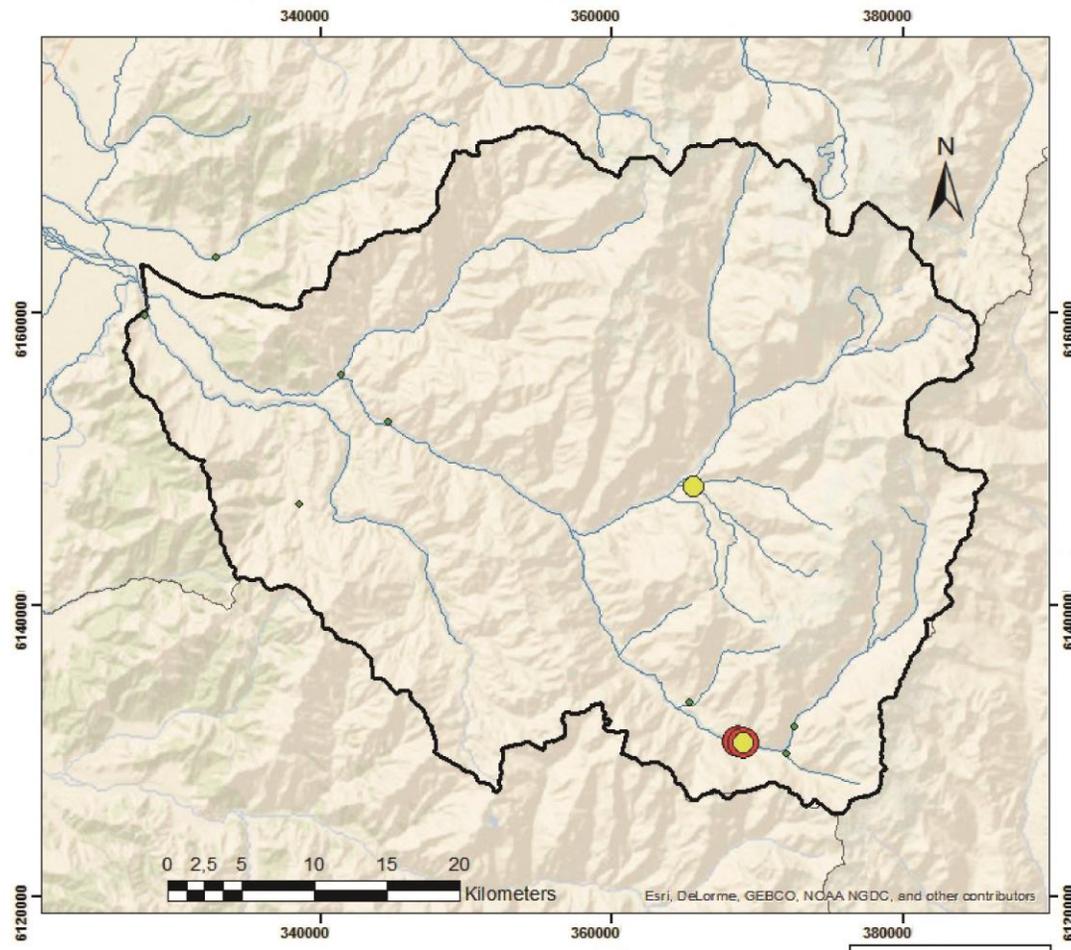
- Leyenda** [μS/cm]
- 90 - 200
 - 201 - 1000
 - 1001 - 5100



Na Sodio

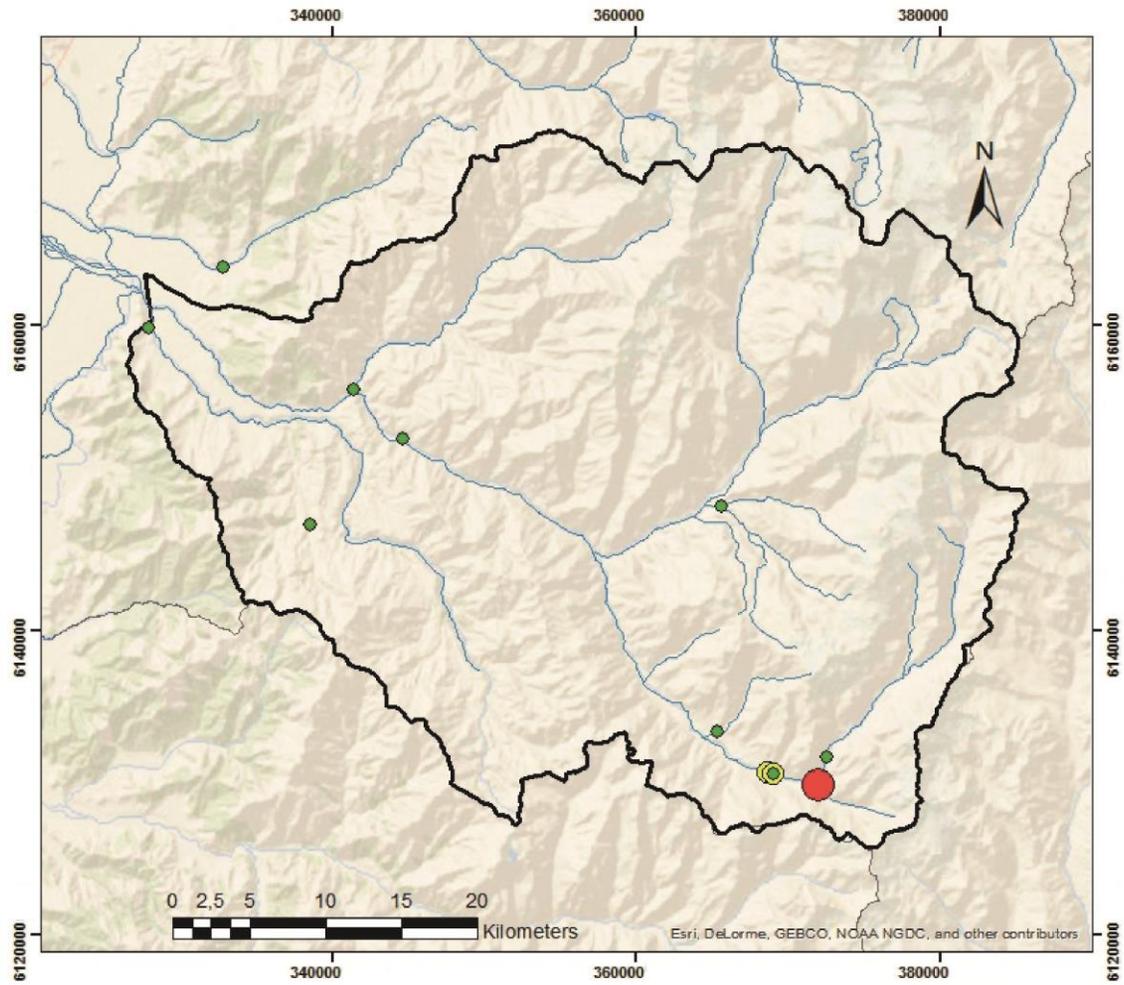
Leyenda [mg/L]

- 3,10 - 16,75
- 16,76 - 200
- 200,1 - 800

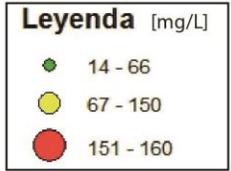


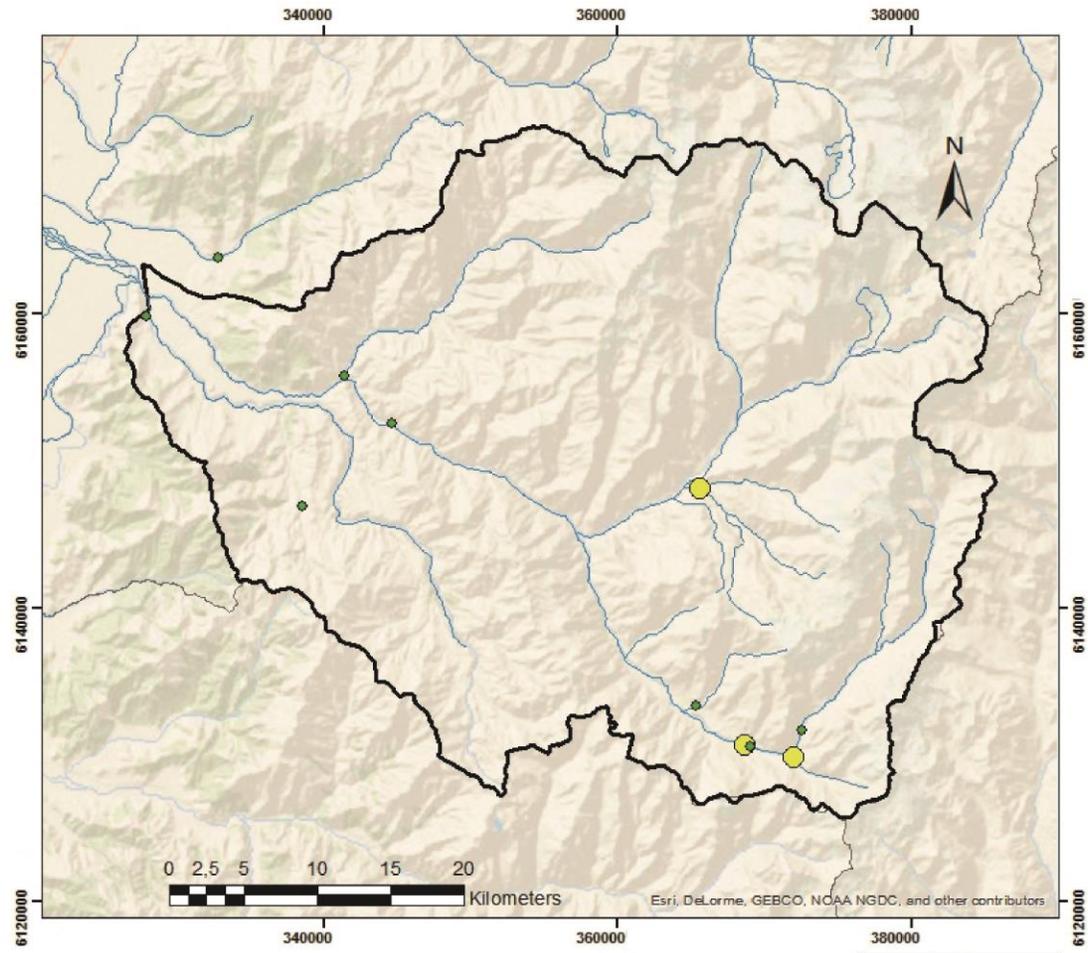
K Potasio

Leyenda [mg/L]	
•	0,35 - 2
●	2,1 - 3
●	3,1 - 80

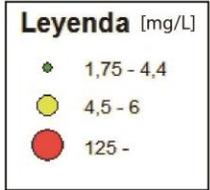


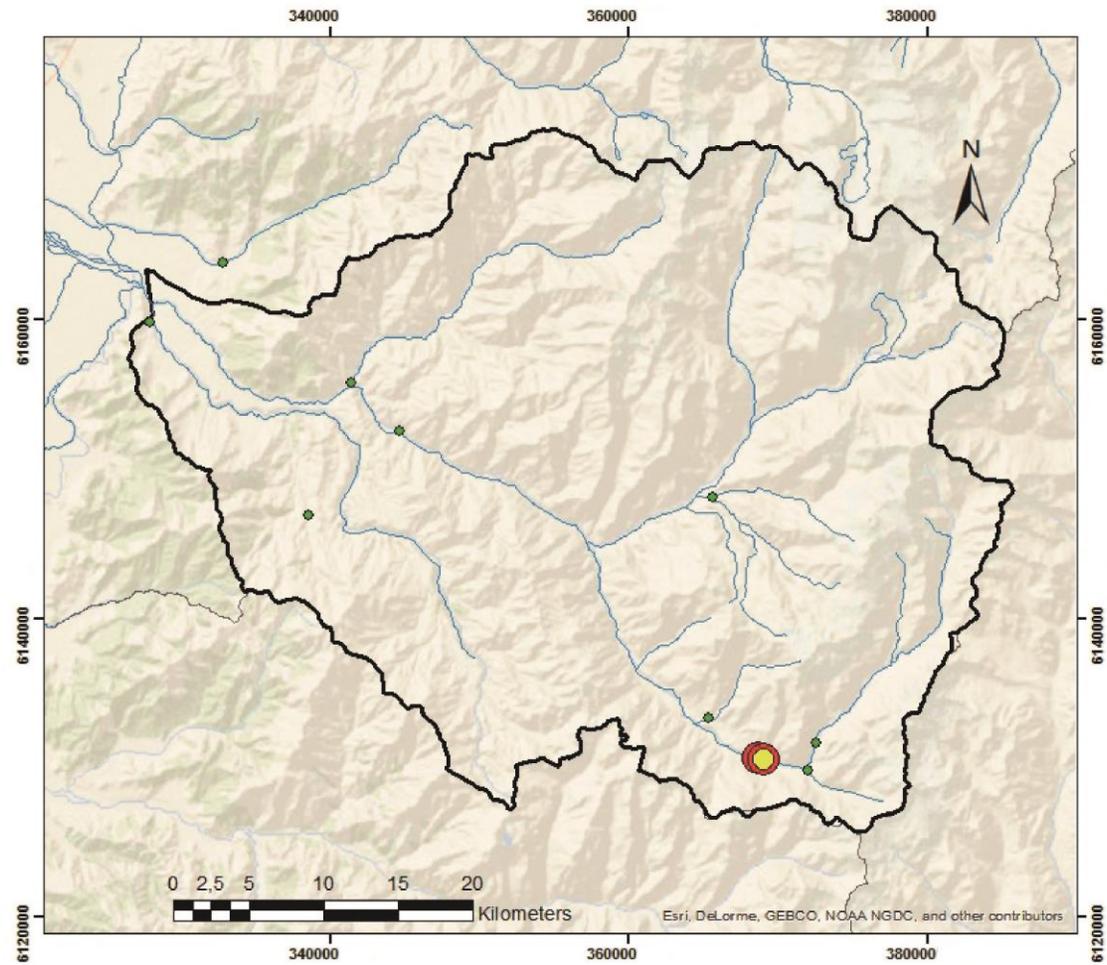
Ca Calcio



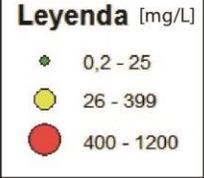


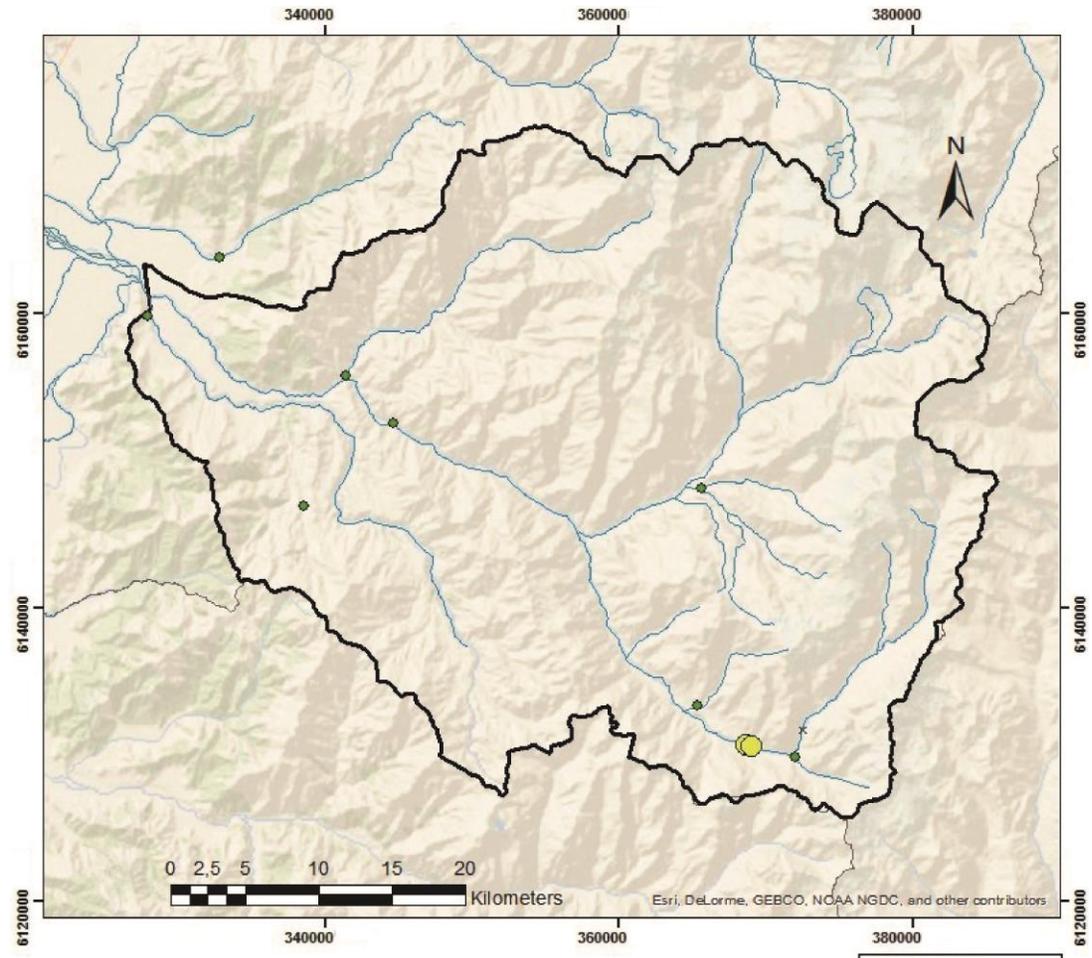
Mg Magnesio





Cl Cloruro

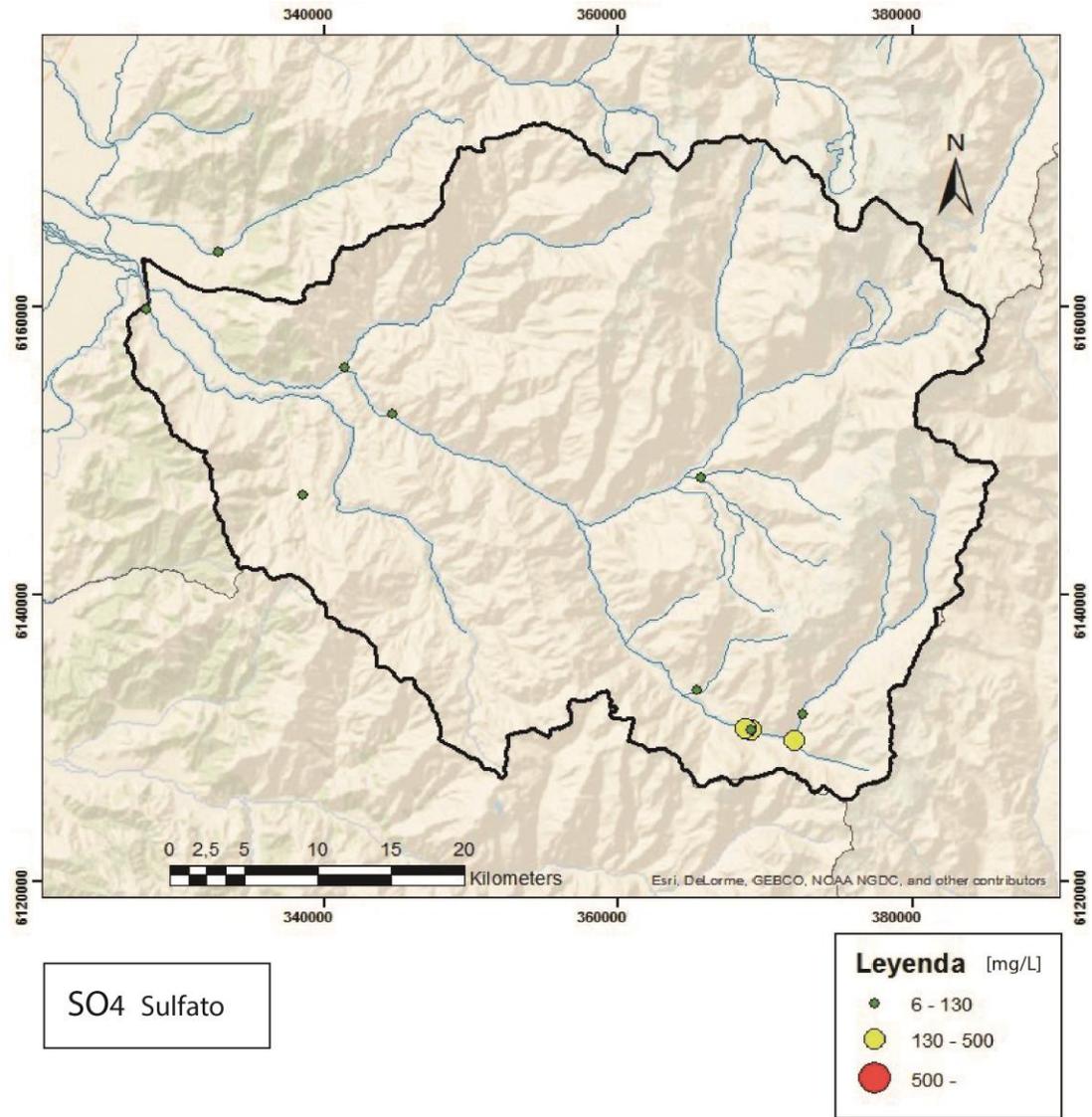


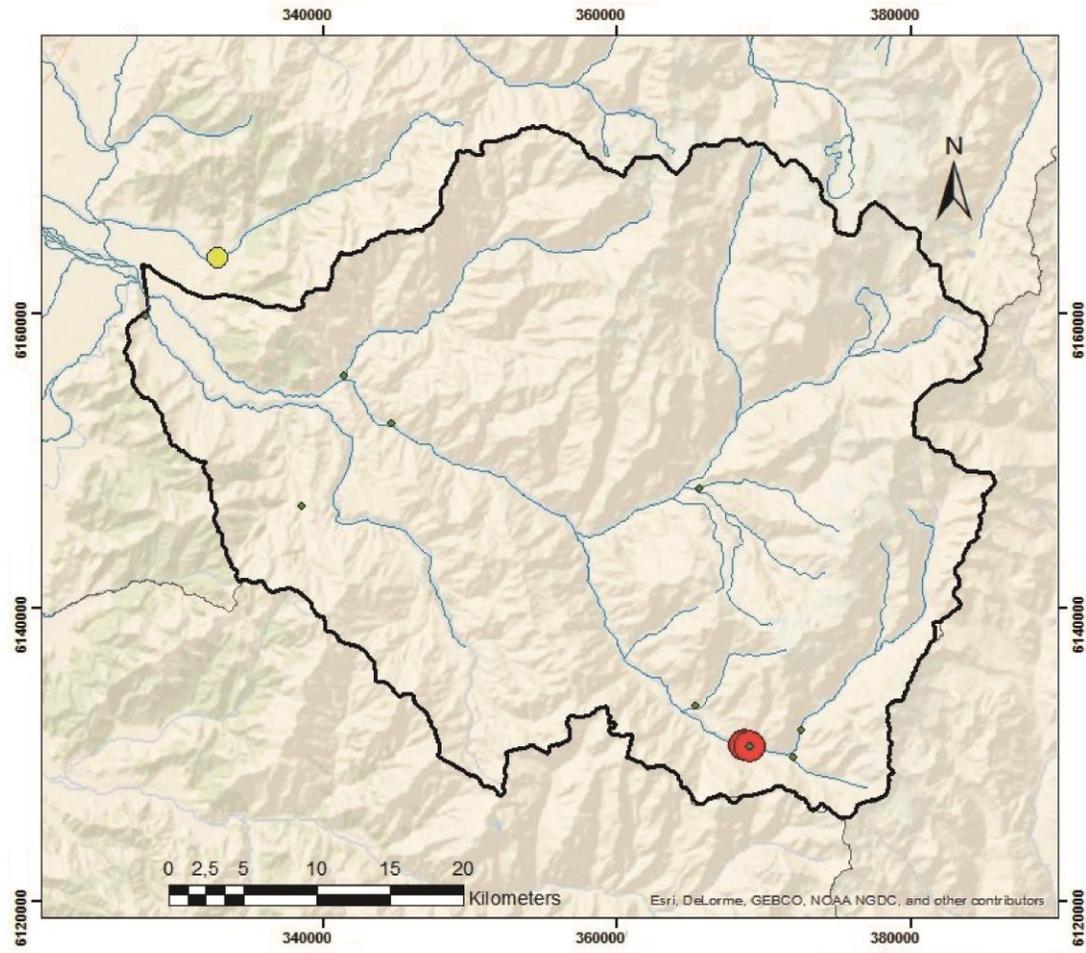


HCO₃ Bicarbonato

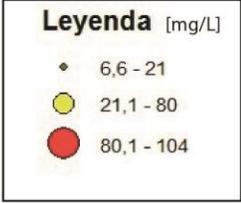
Leyenda [mg/L]

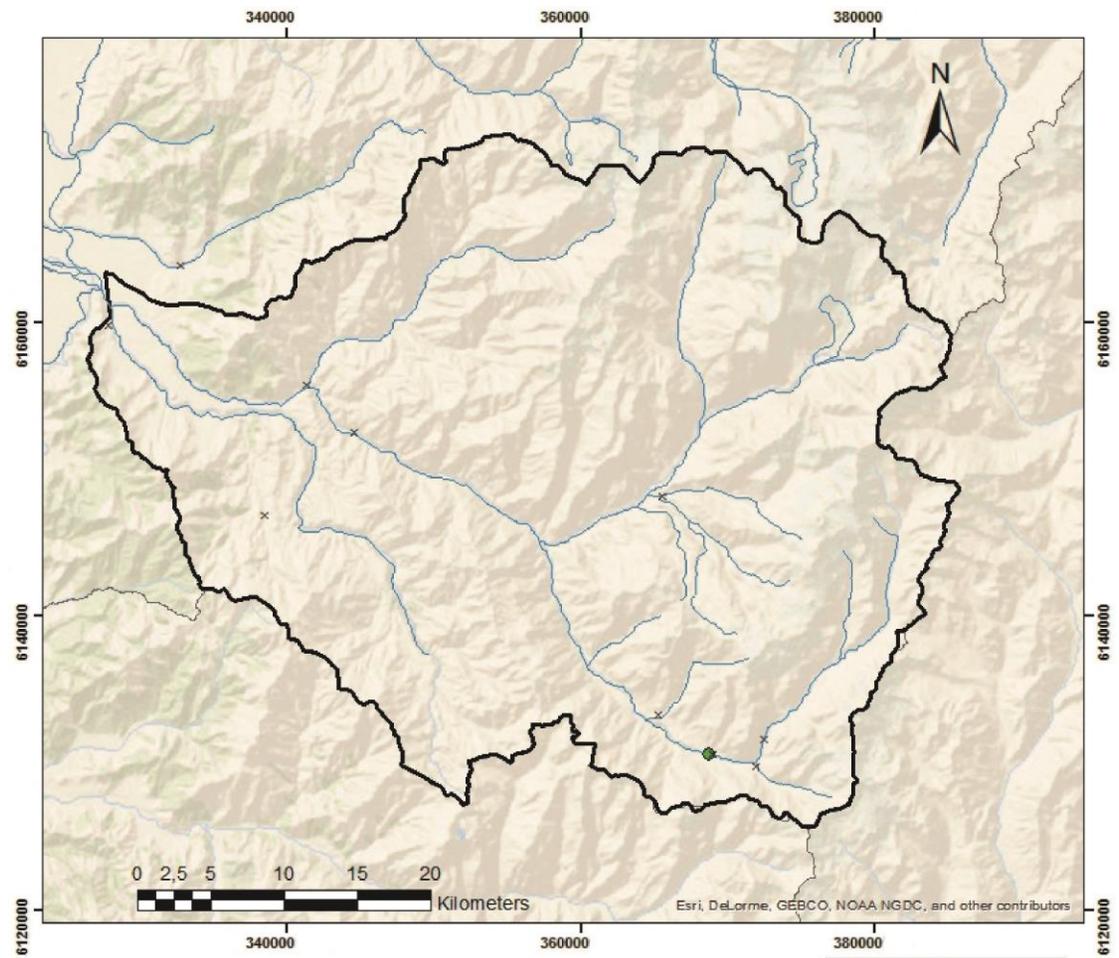
- × 0,5
- ◆ 1 - 100
- 101 - 160





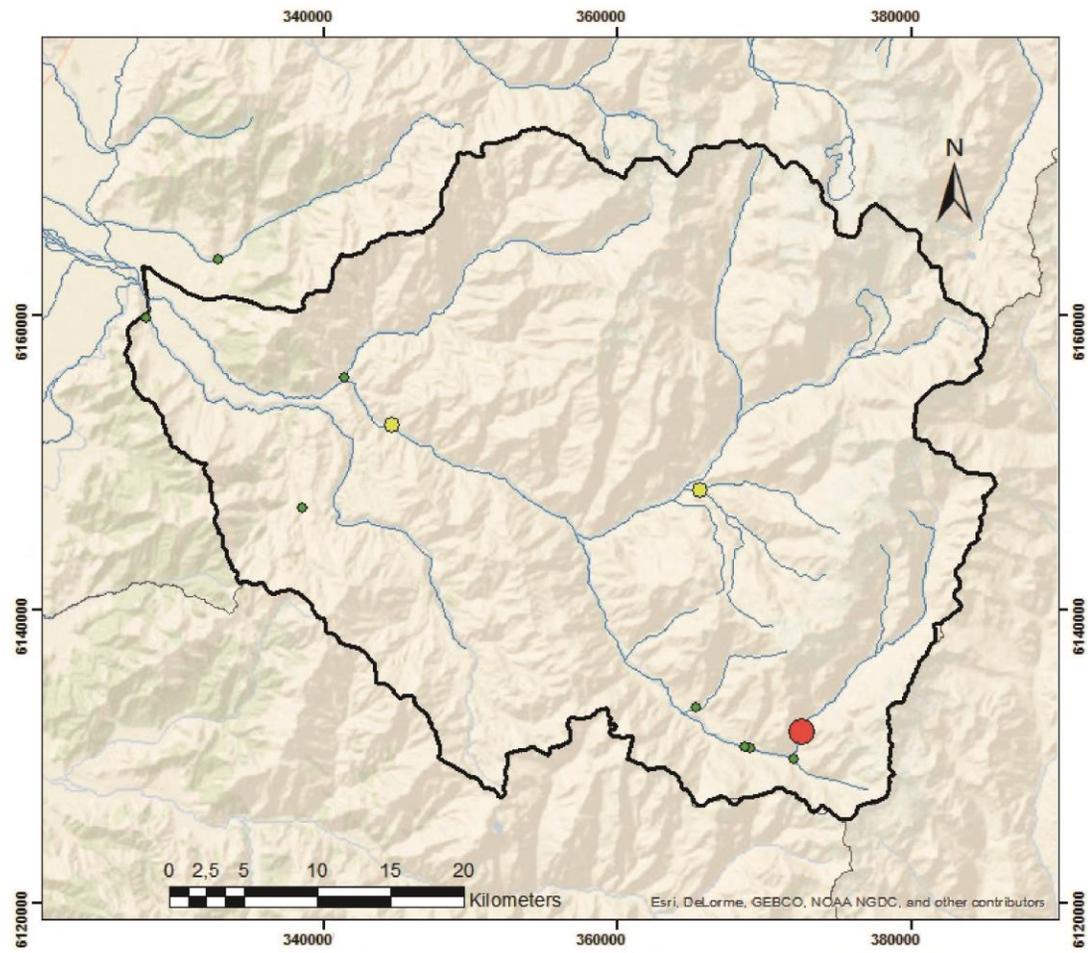
SiO₂ sílice



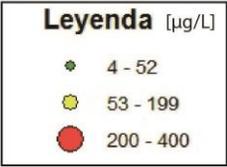


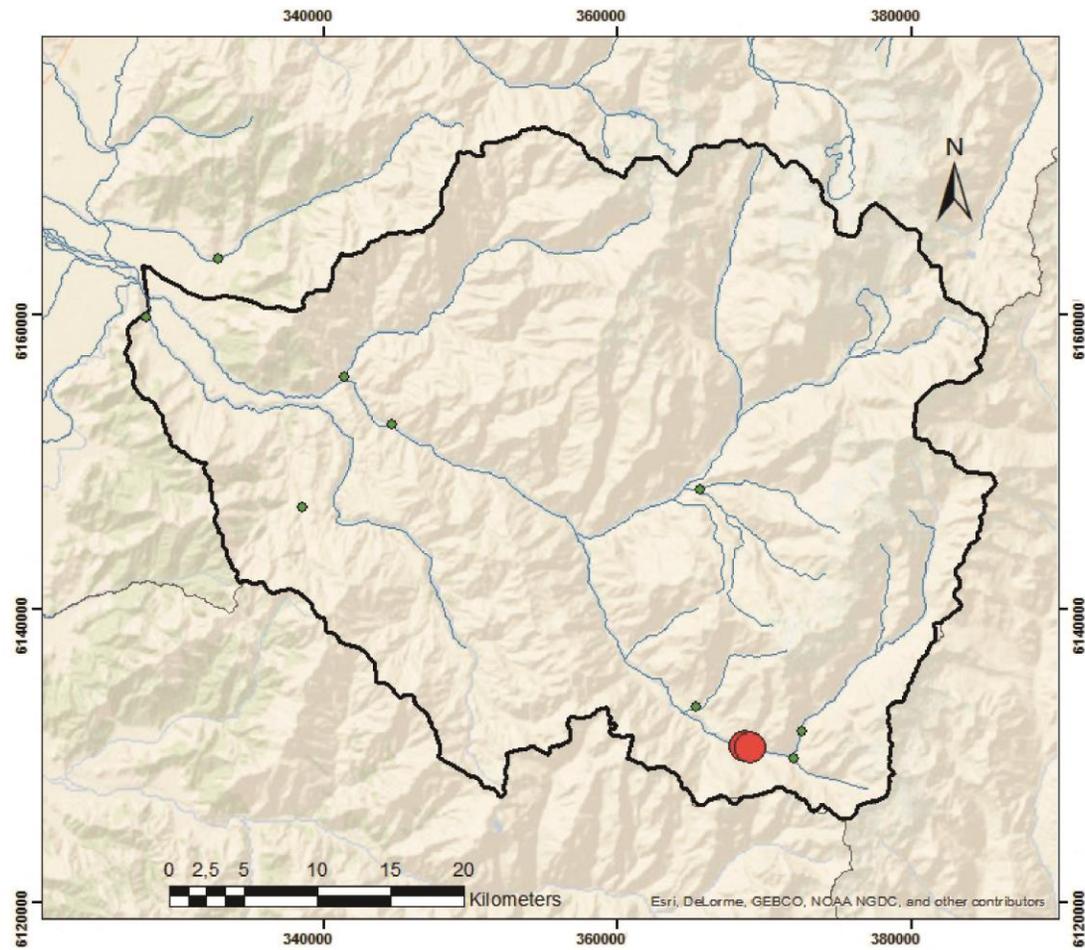
Ag Plata

Leyenda [µg/L]	
×	0,0015
●	0,003 - 0,3

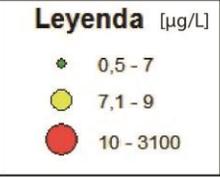


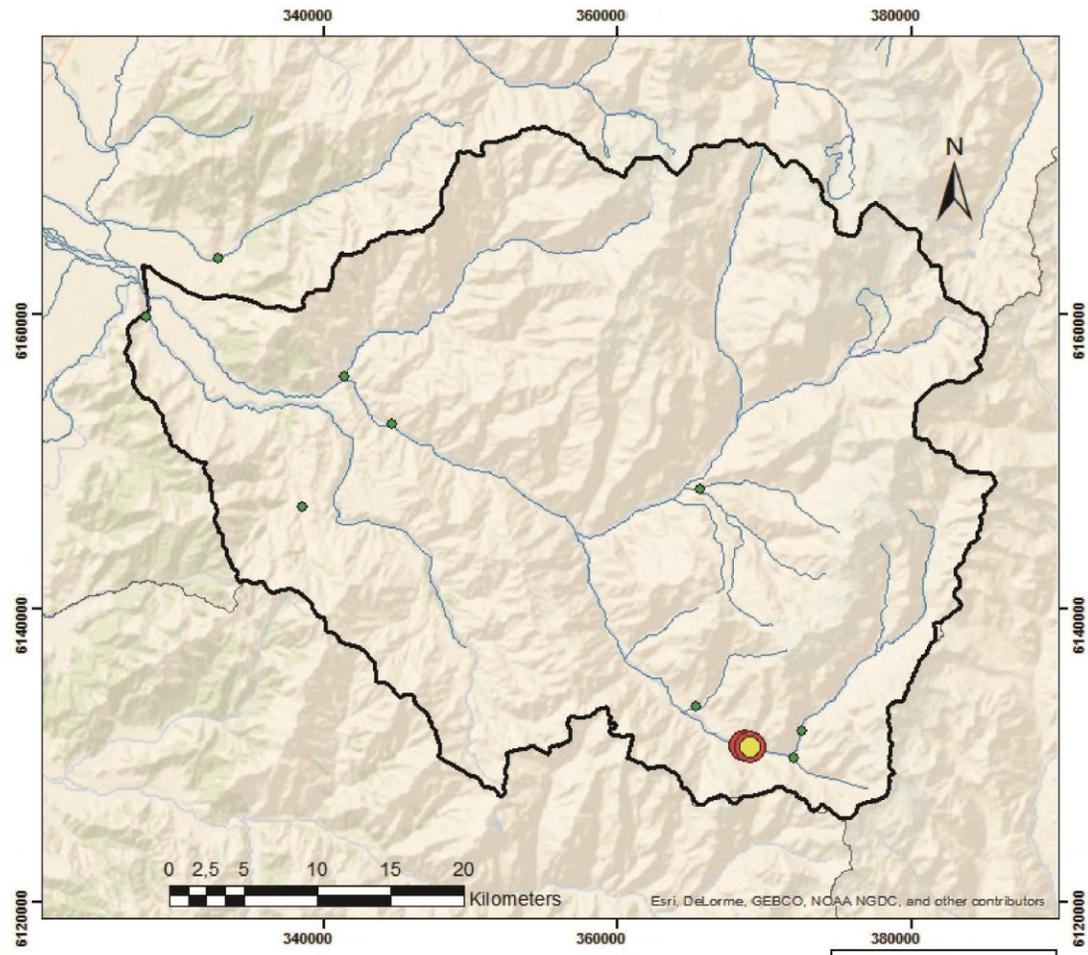
Al Aluminio



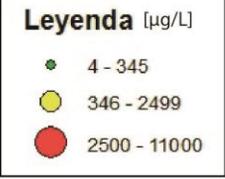


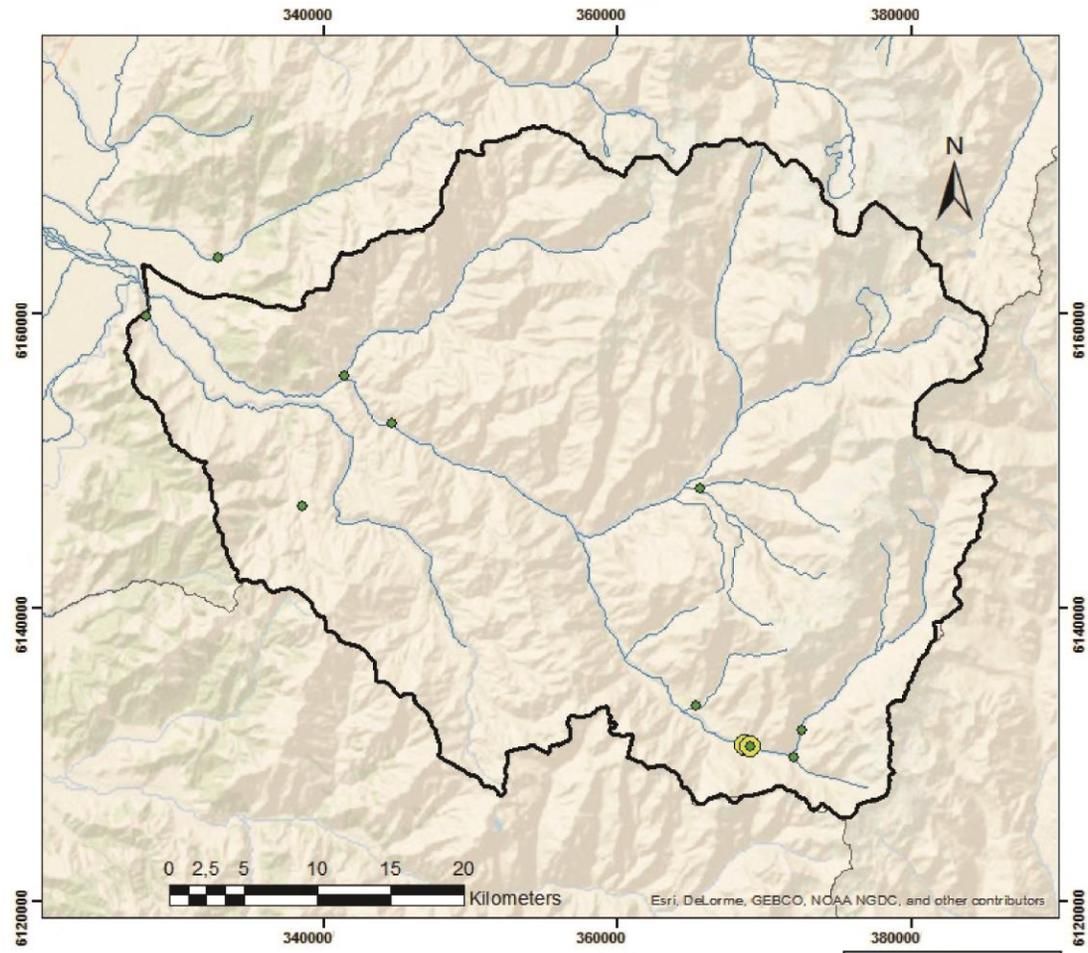
As Arsénico



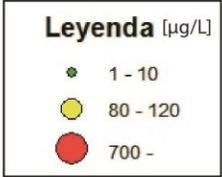


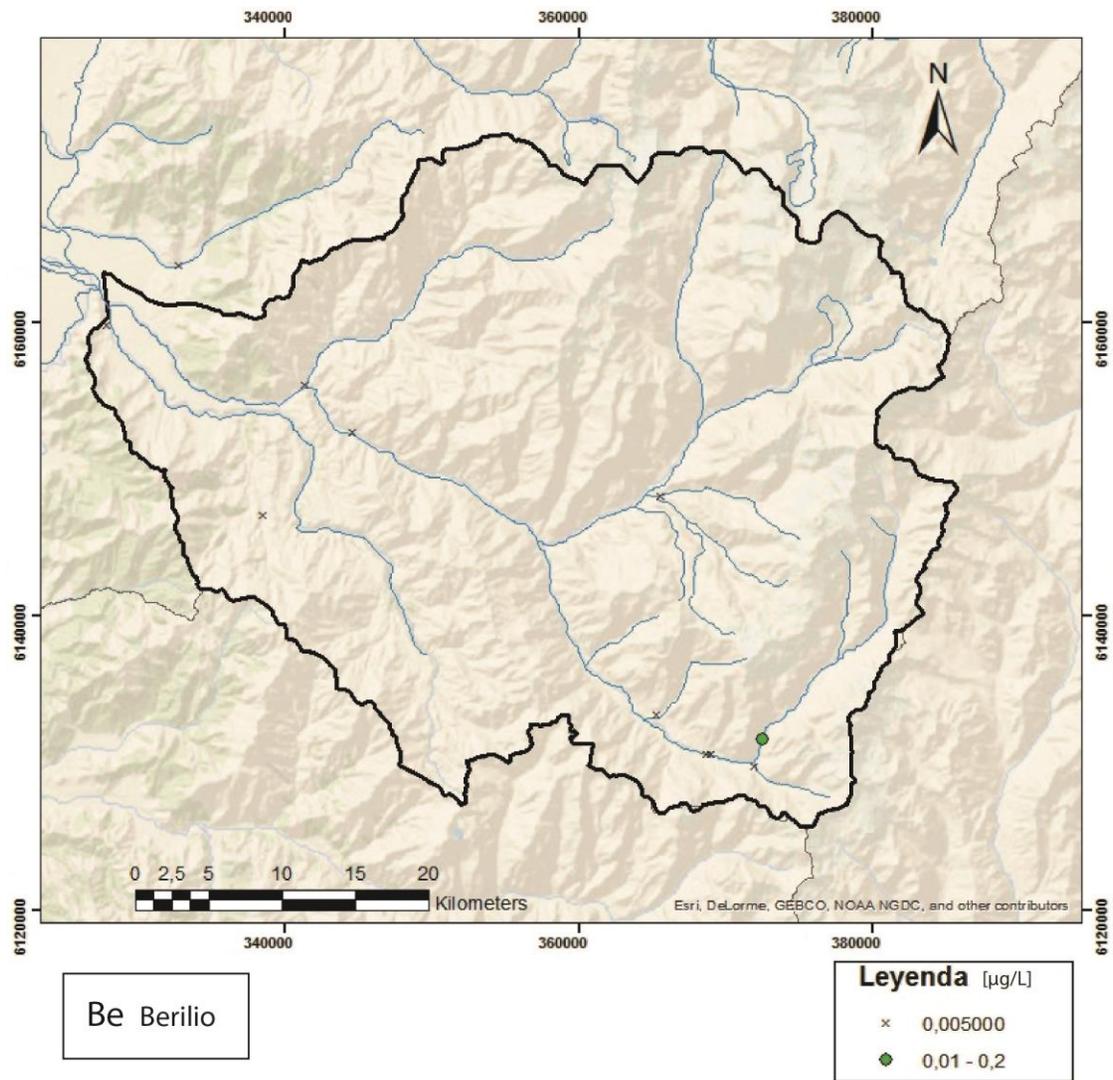
B Boro





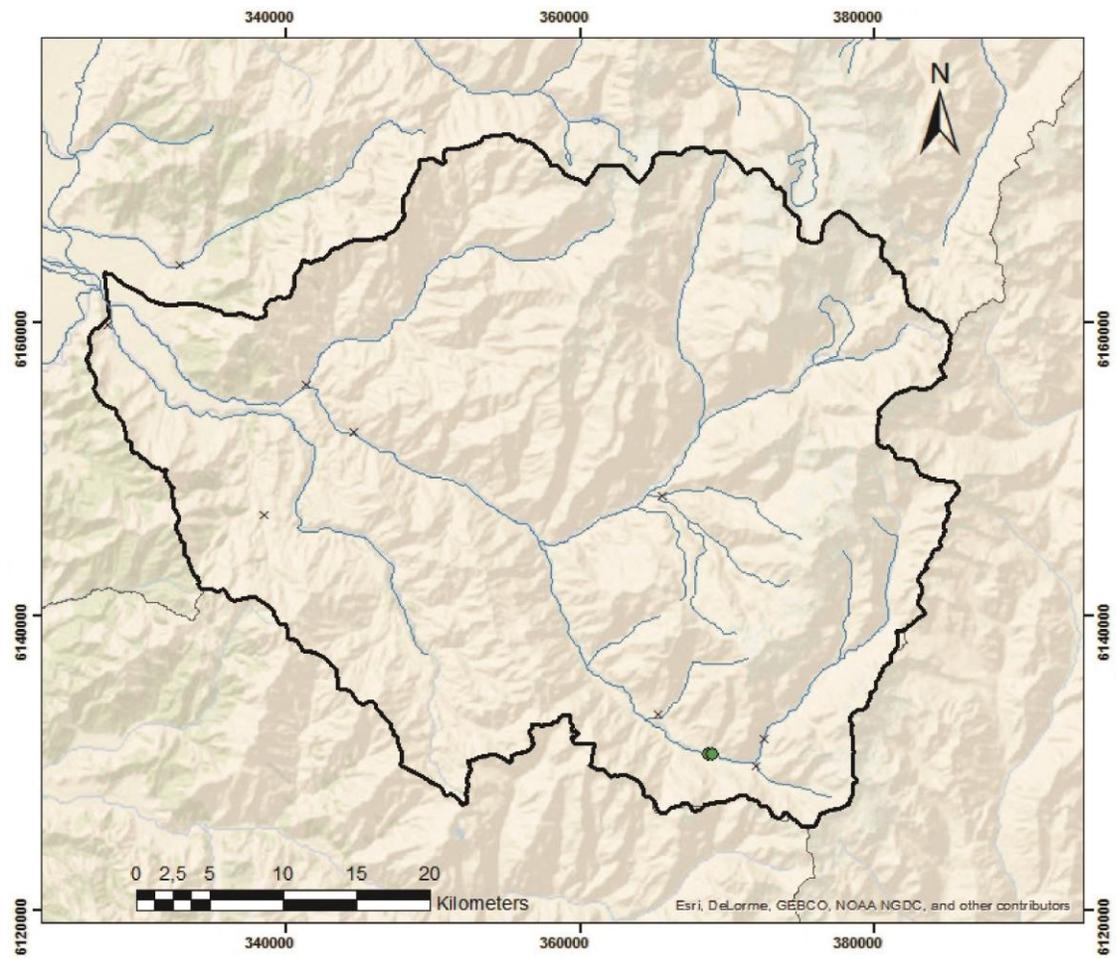
Ba Bario





Be Berilio

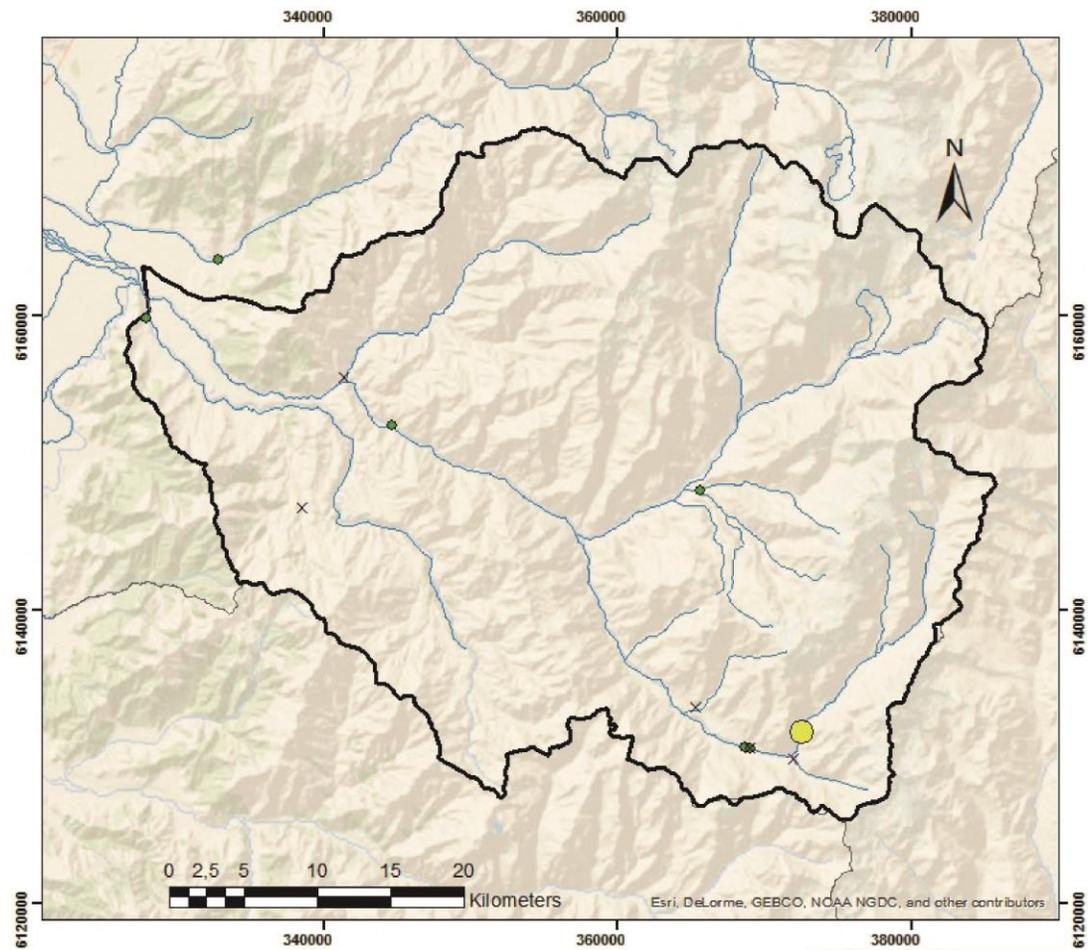
Leyenda [µg/L]	
×	0,005000
◆	0,01 - 0,2



Br Bromuro

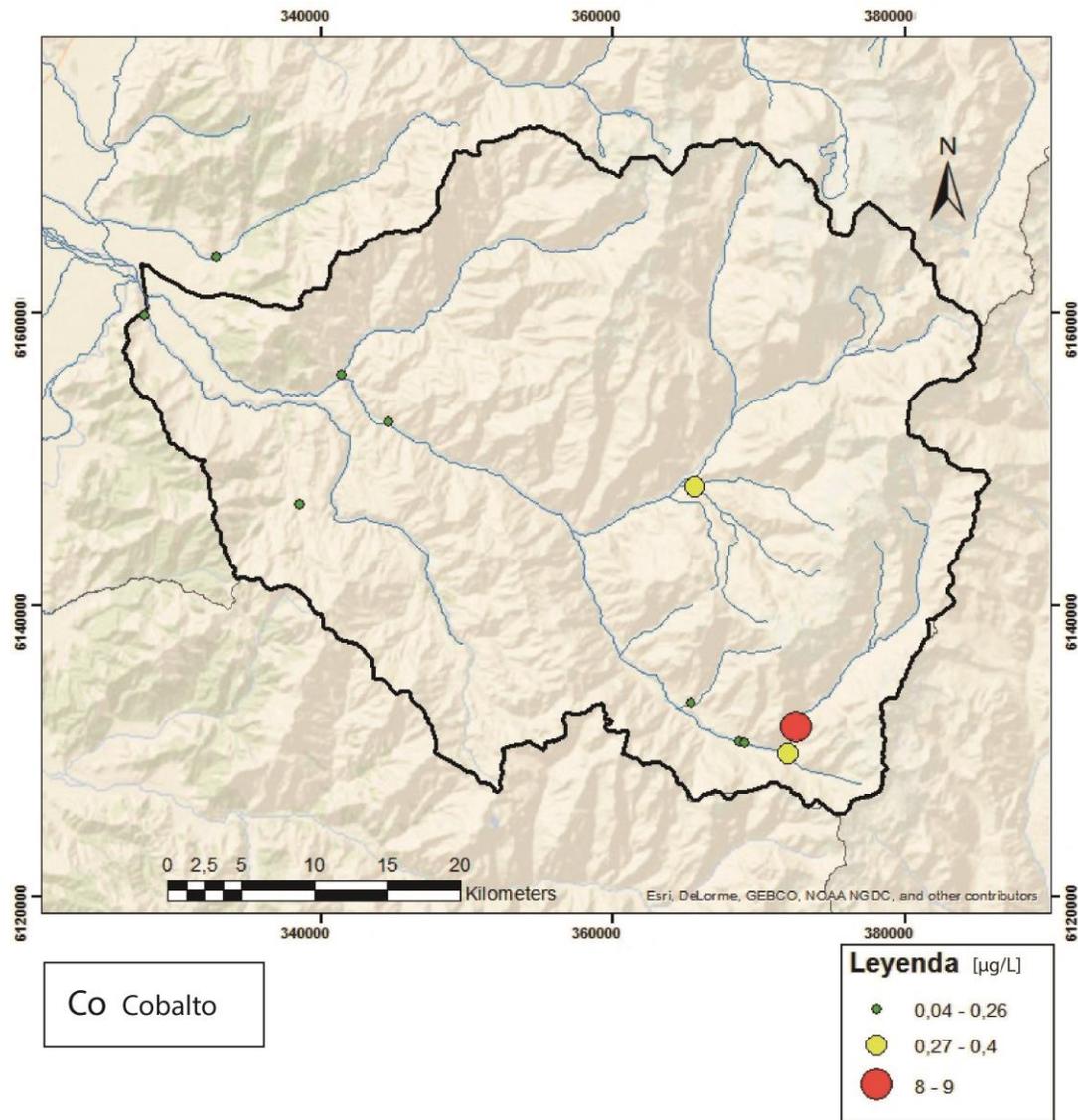
Leyenda [mg/L]

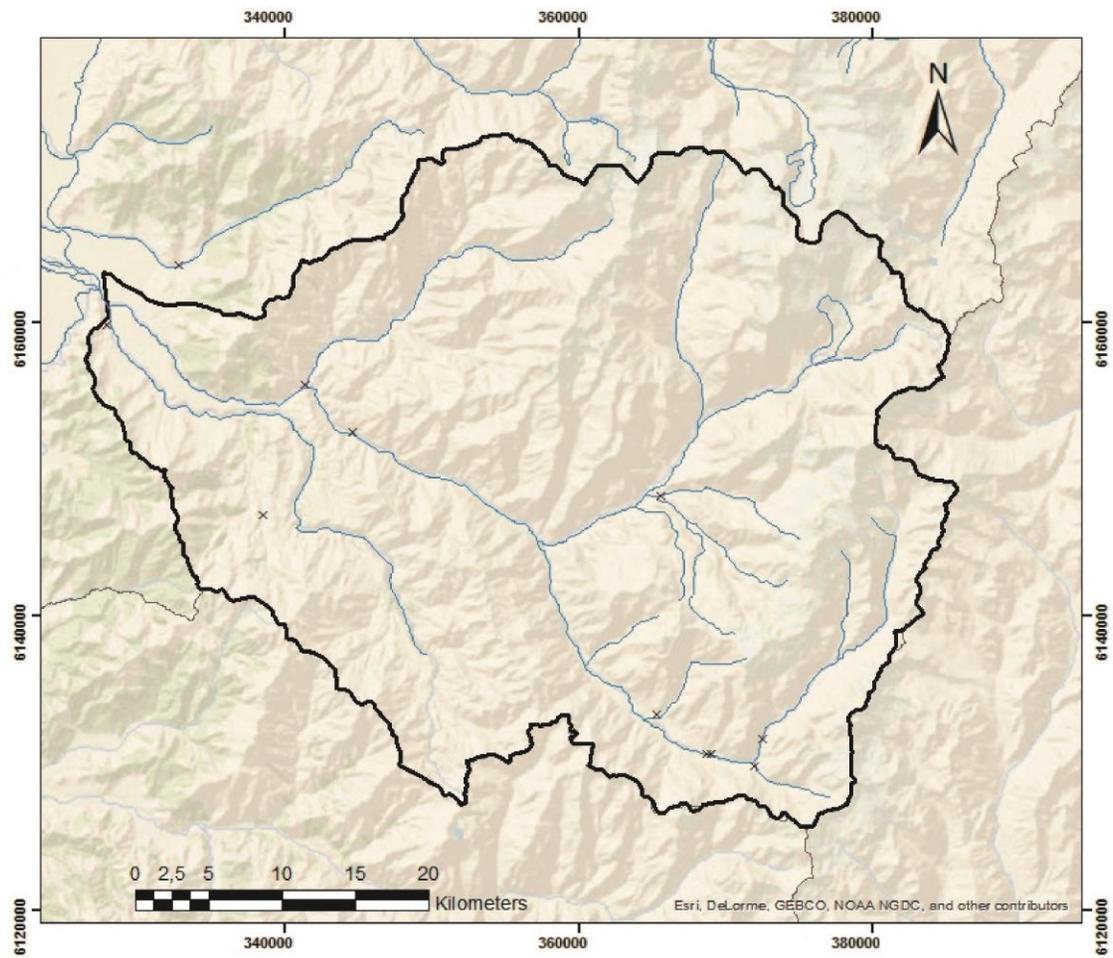
- × 0,025
- 0,05 - 2



Cd Cadmio

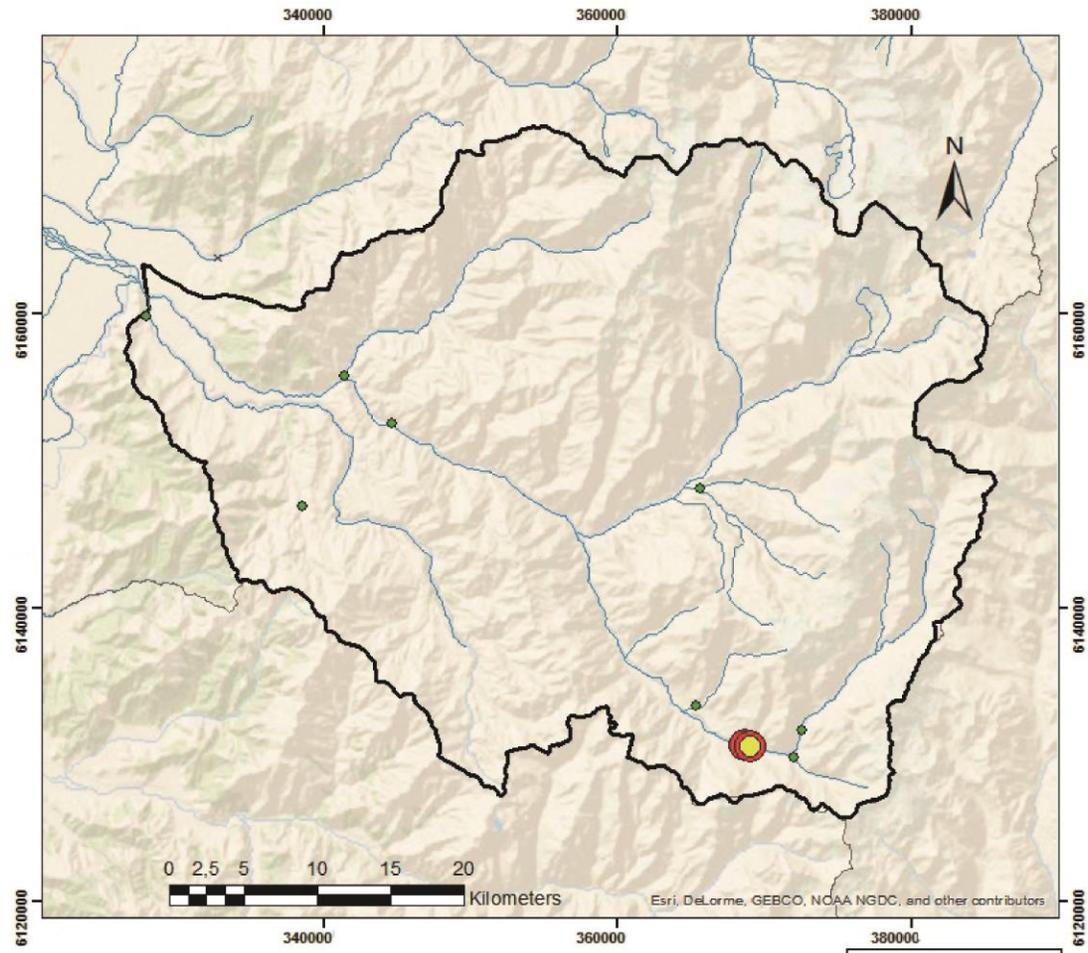
Leyenda [µg/L]	
×	0,002
•	0,004 - 0,3
●	0,31 - 0,4
●	10 -





Cr Cromo

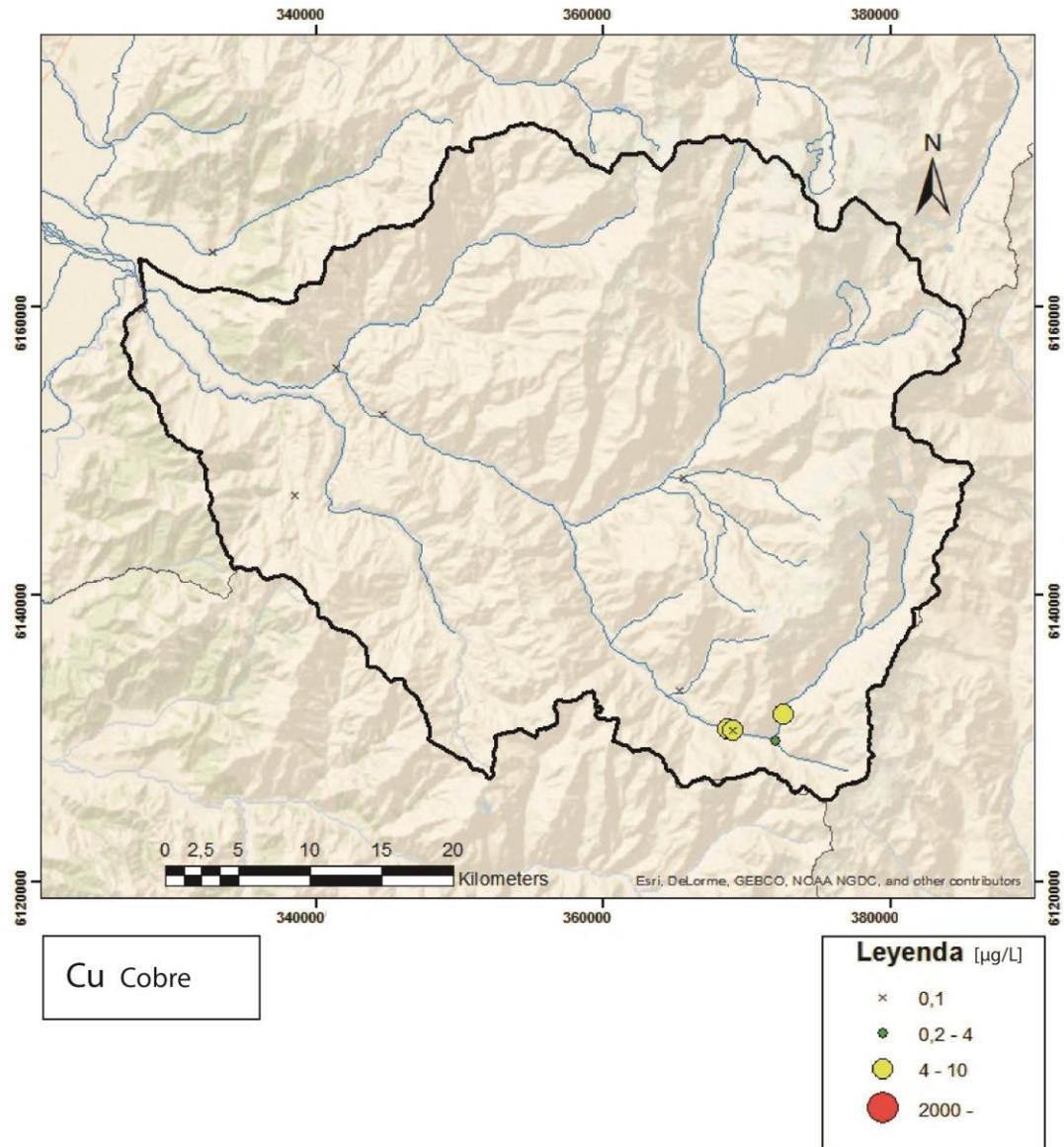
Leyenda [$\mu\text{g/L}$]
× 0,035

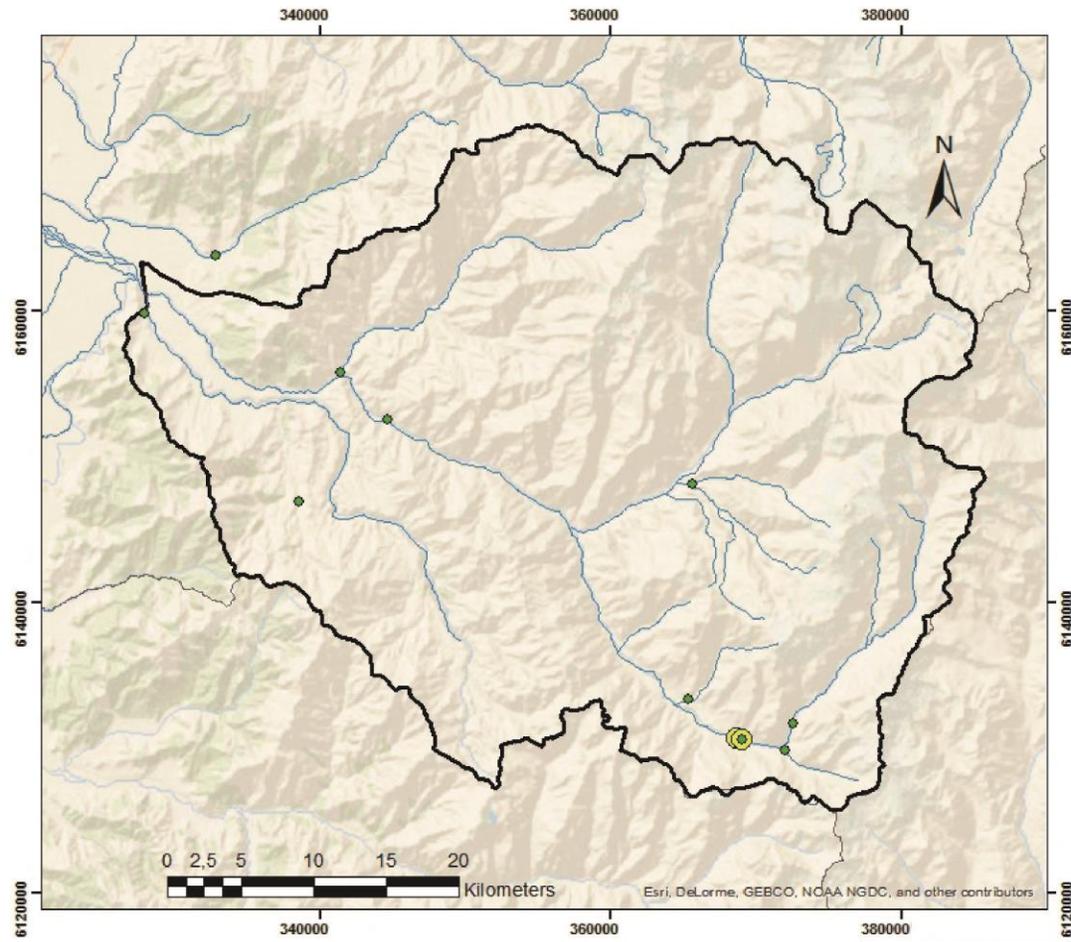


Cs Cesio

Leyenda [$\mu\text{g/L}$]

- × 0,0005
- ◆ 0,001 - 10
- 11 - 22
- 400 - 700

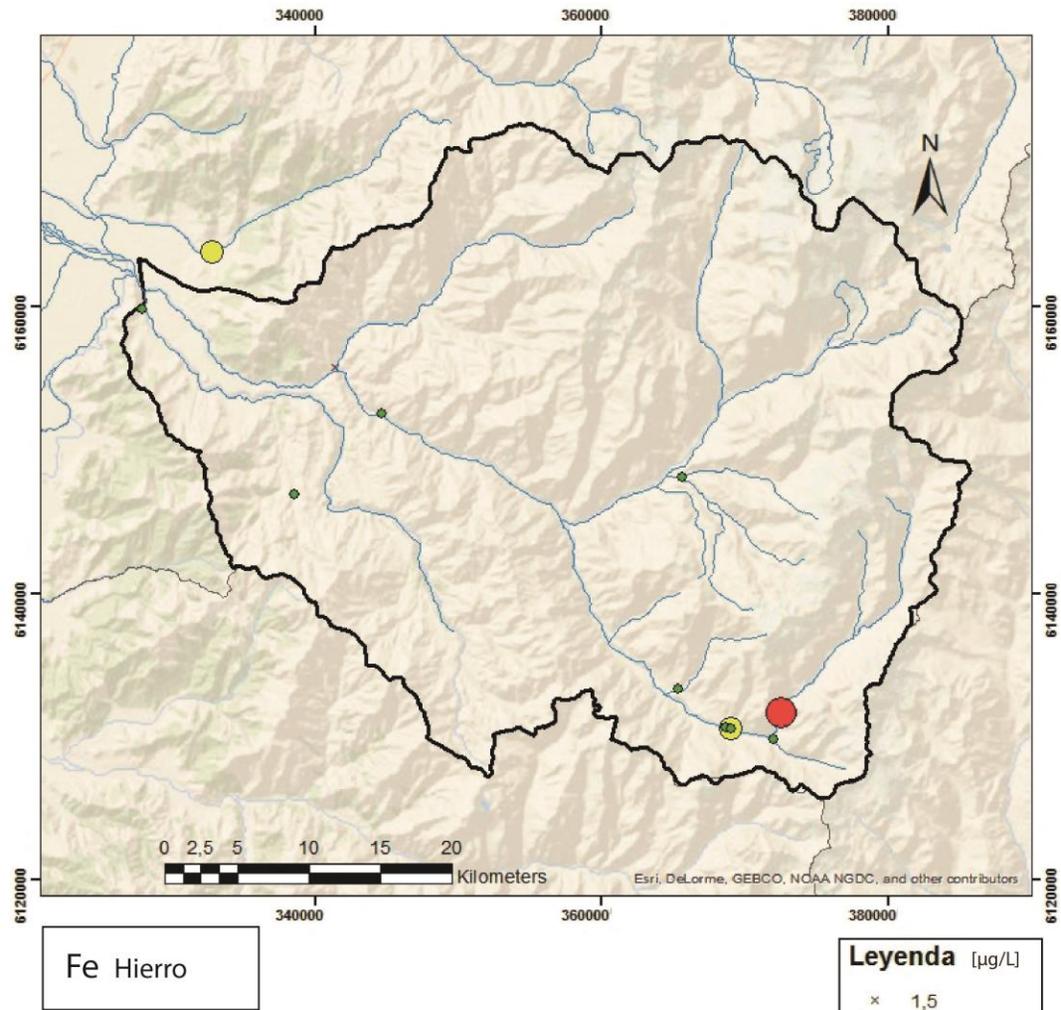


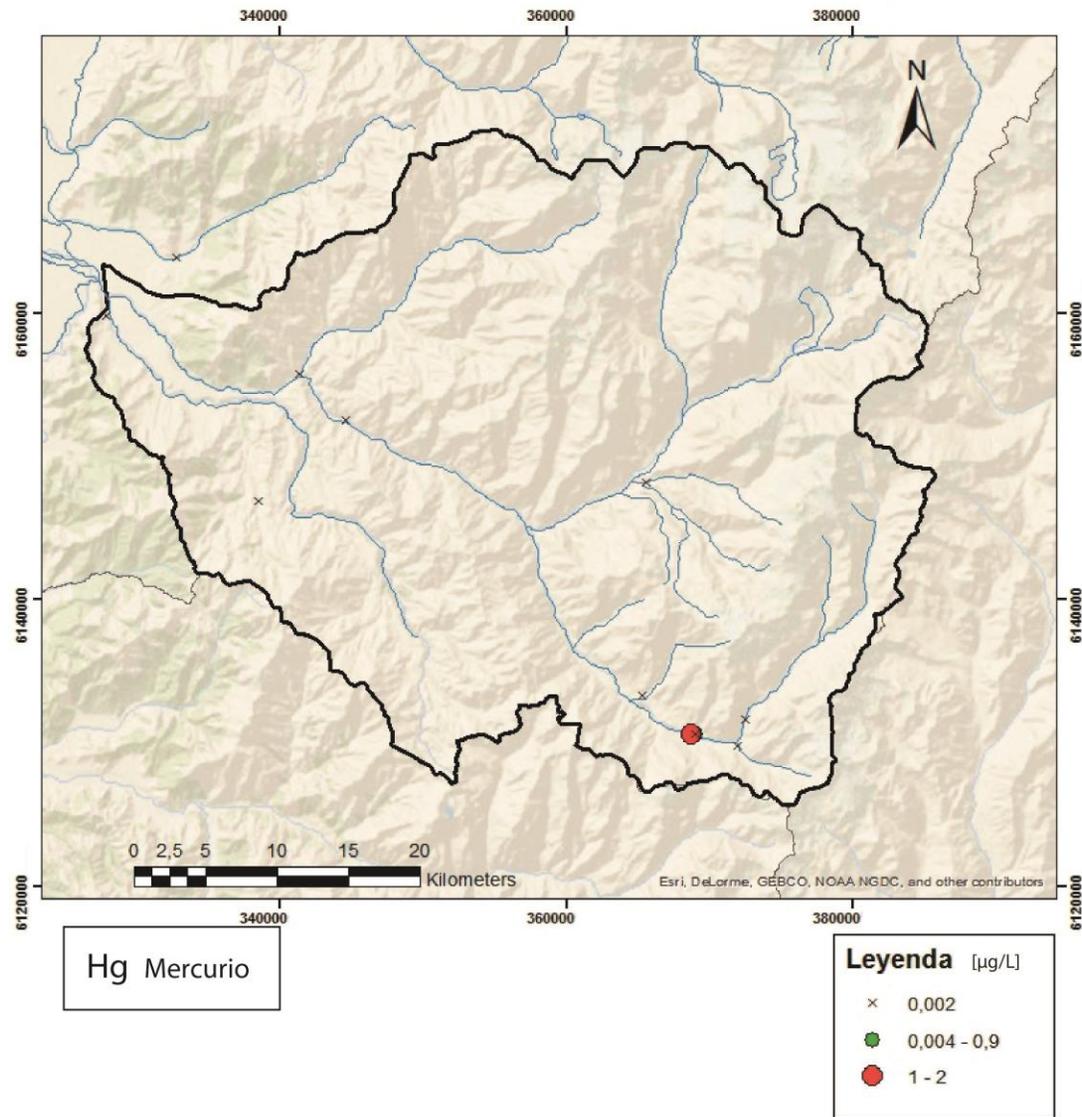


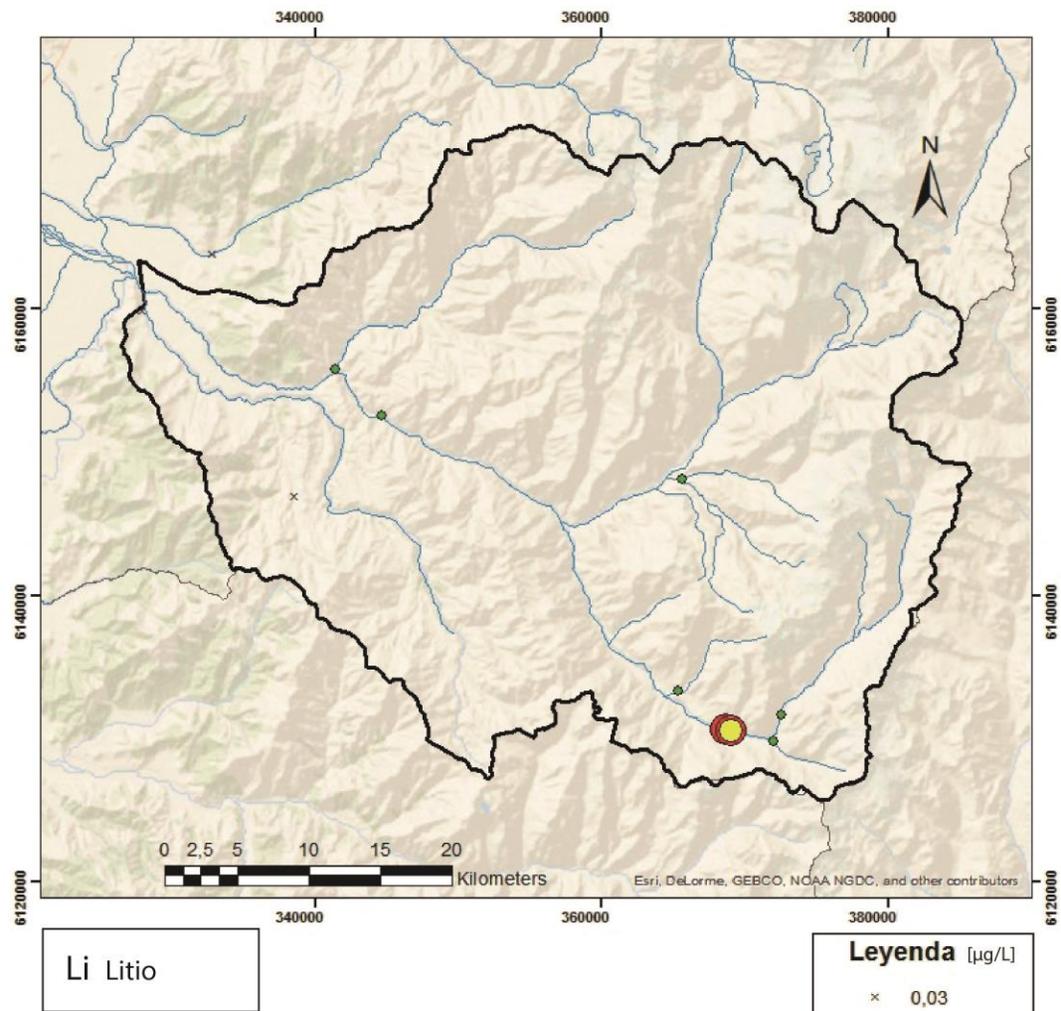
F Fluoruro

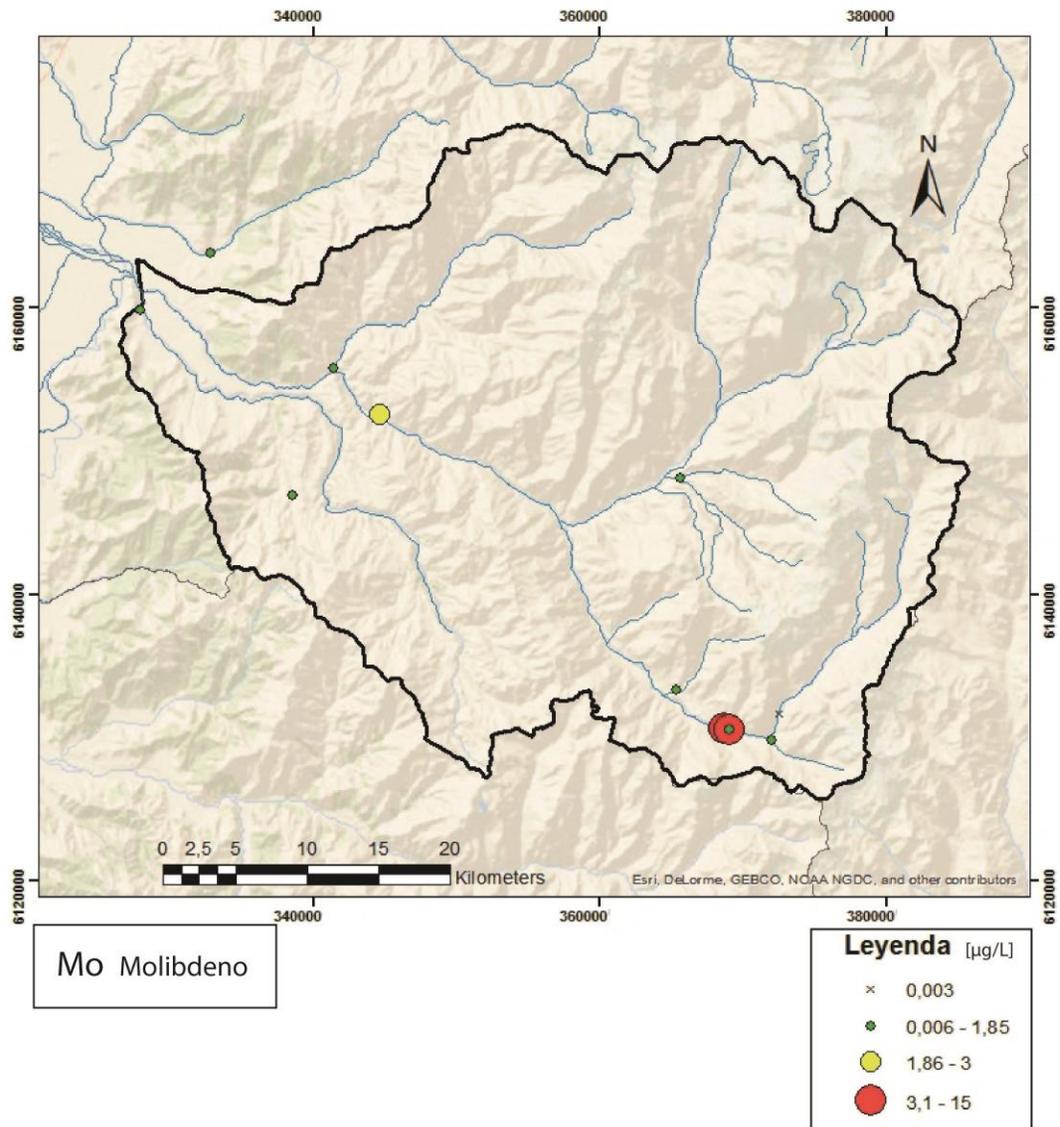
Leyenda [mg/L]

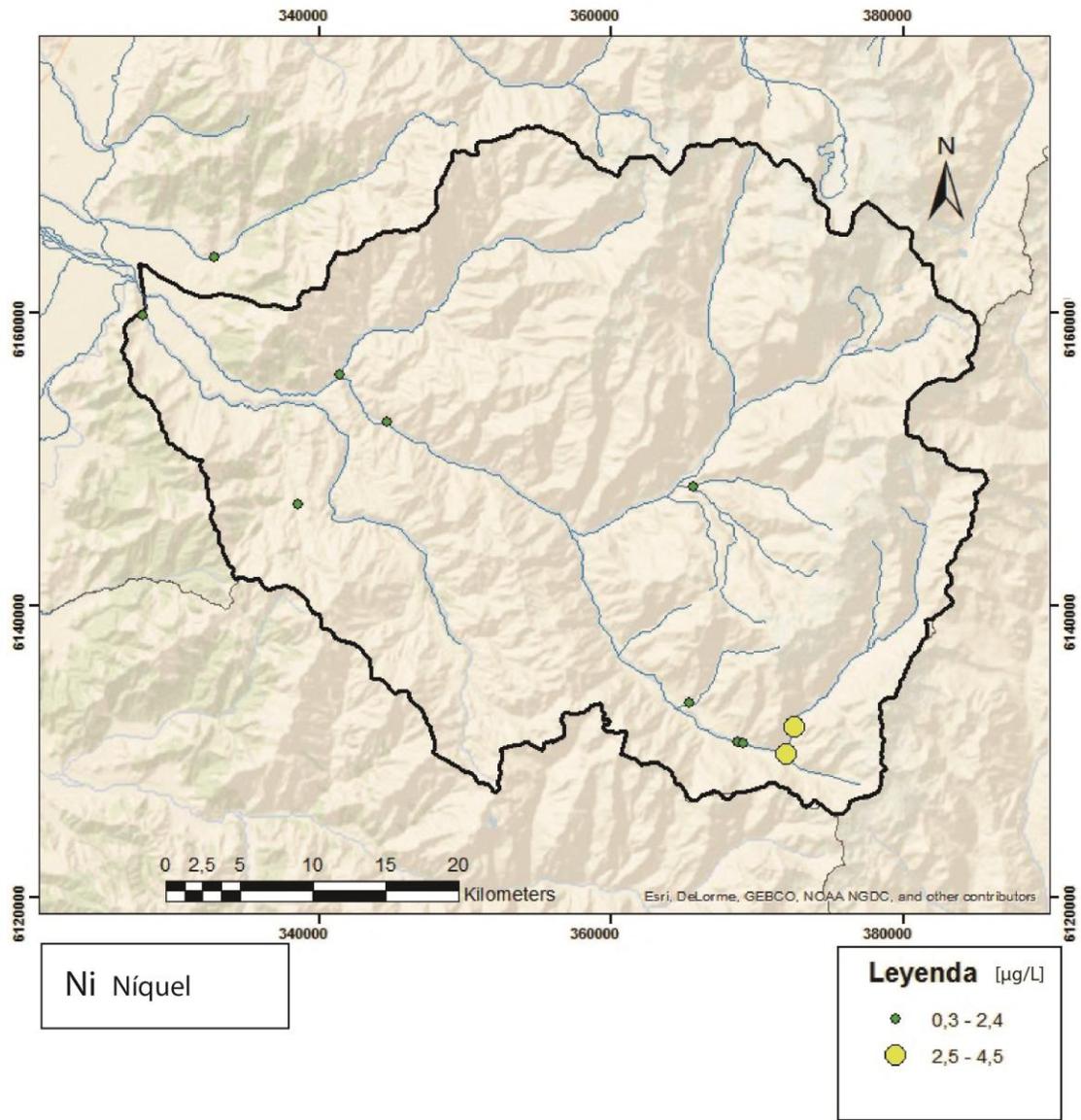
- 0,03 - 0,5
- 0,6 - 1
- 1,5

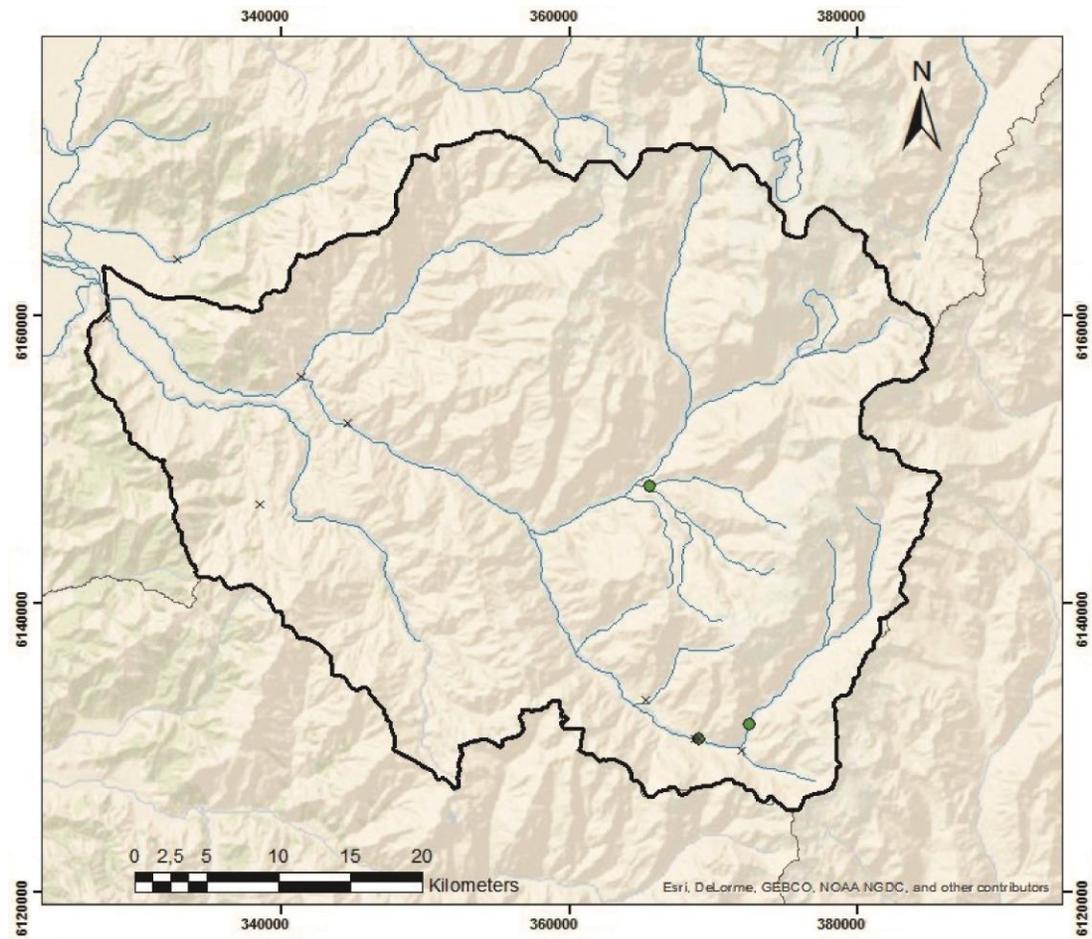




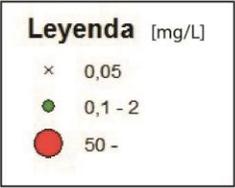


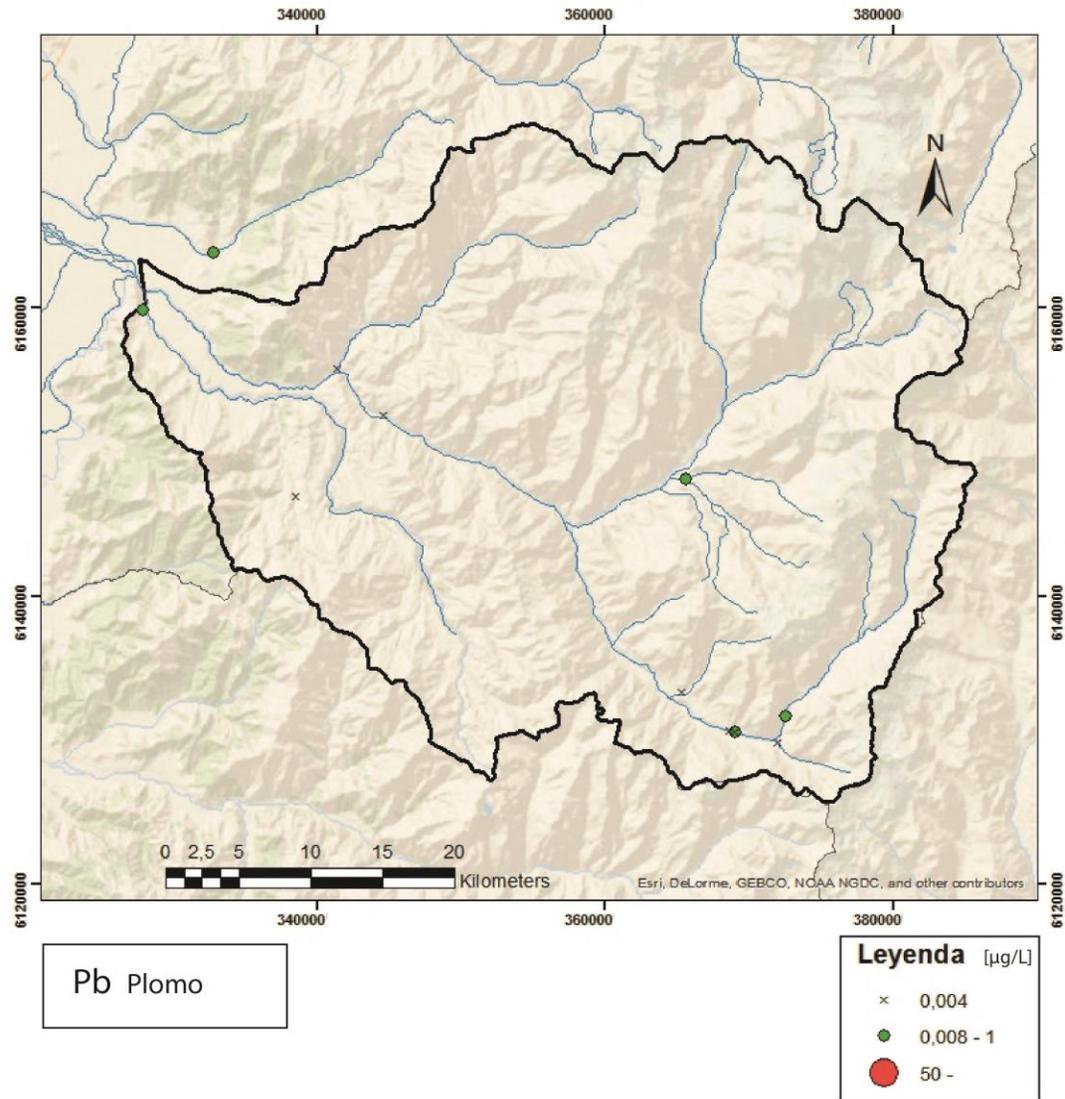


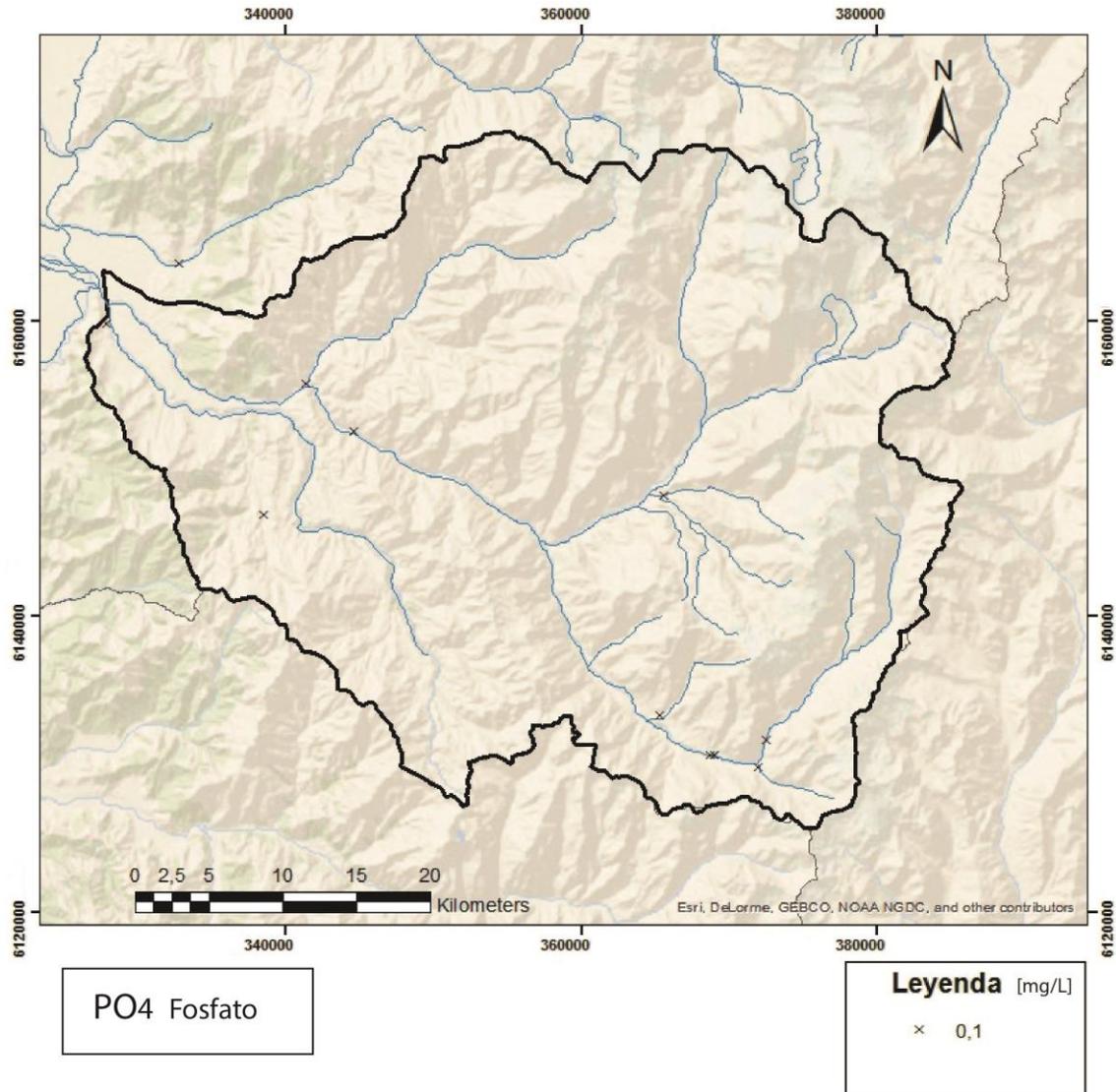


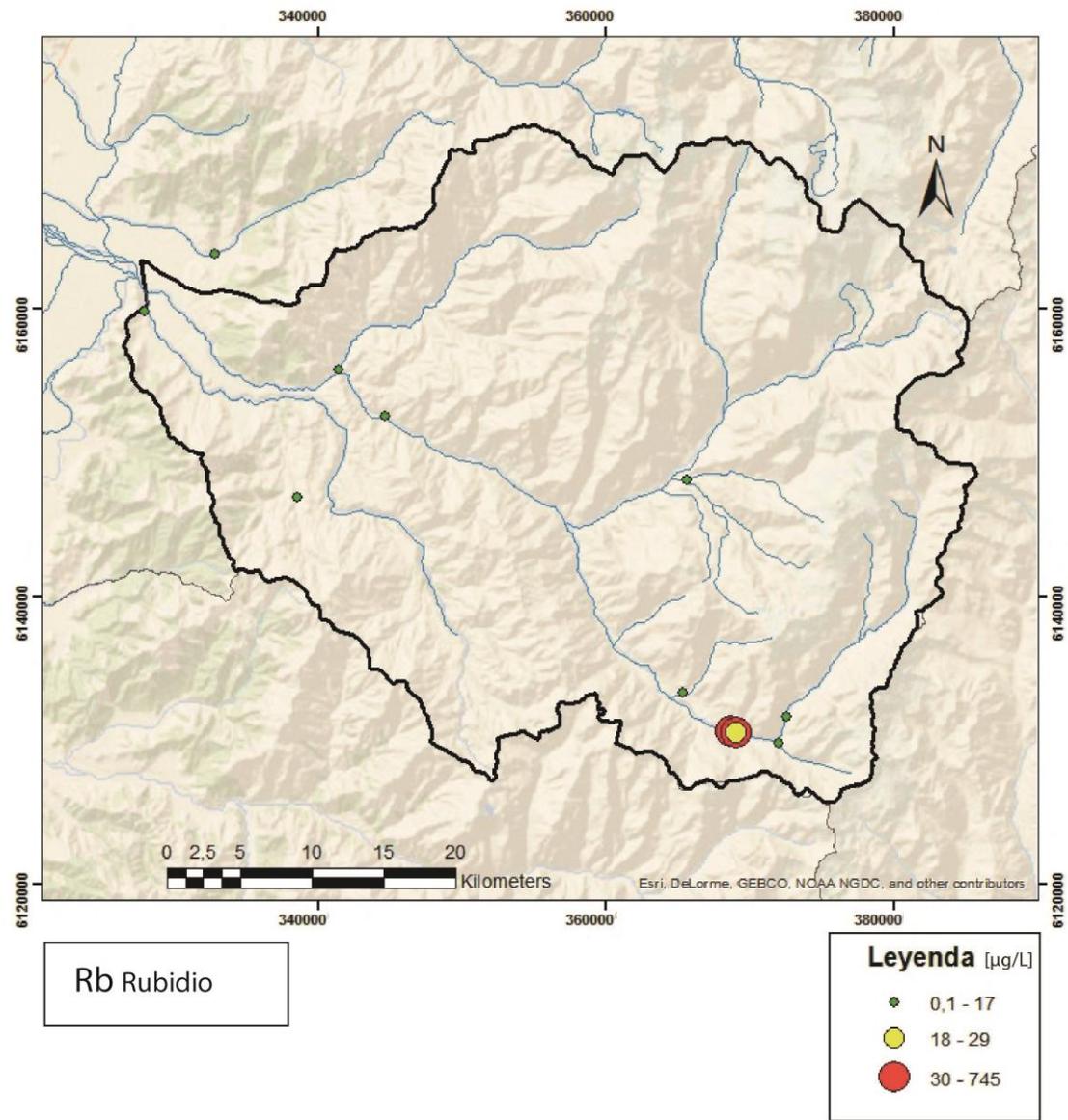


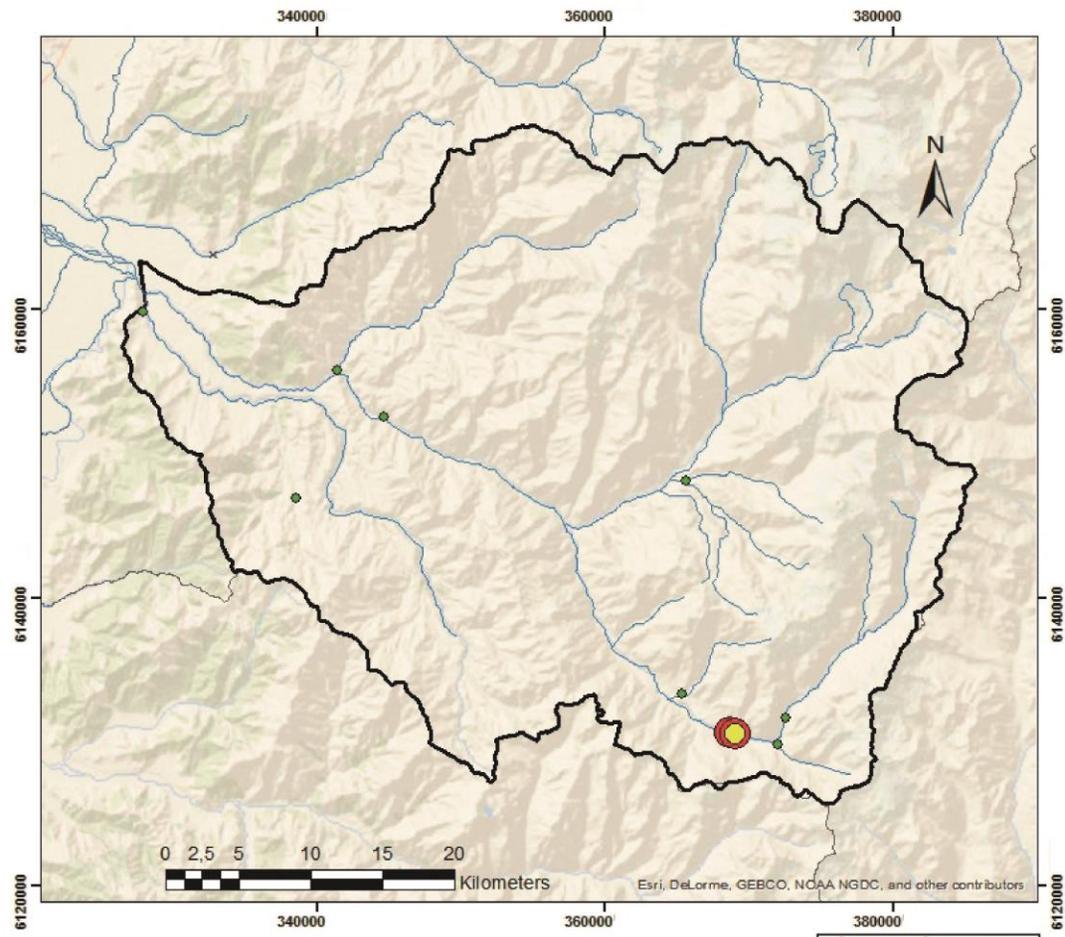
NO3 Nitrato



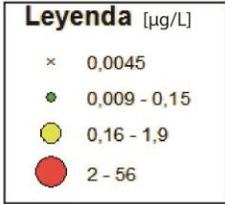


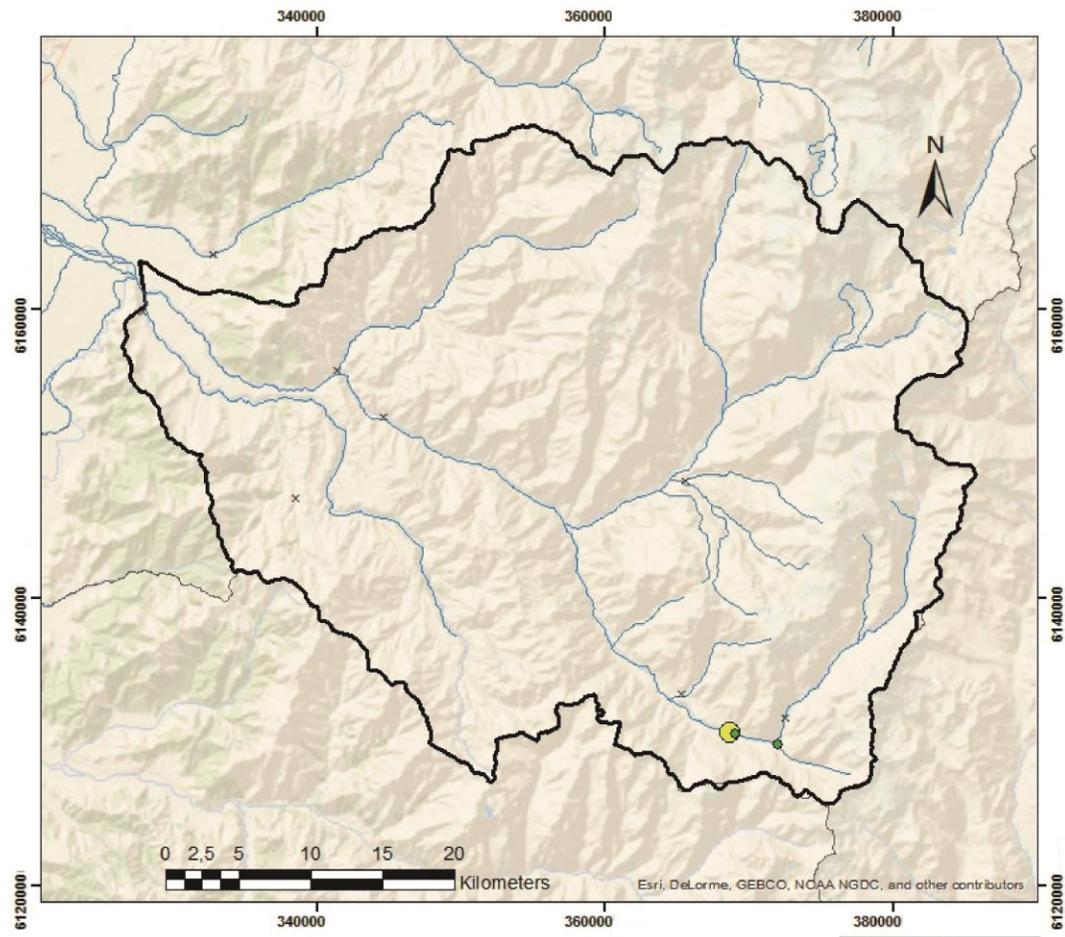






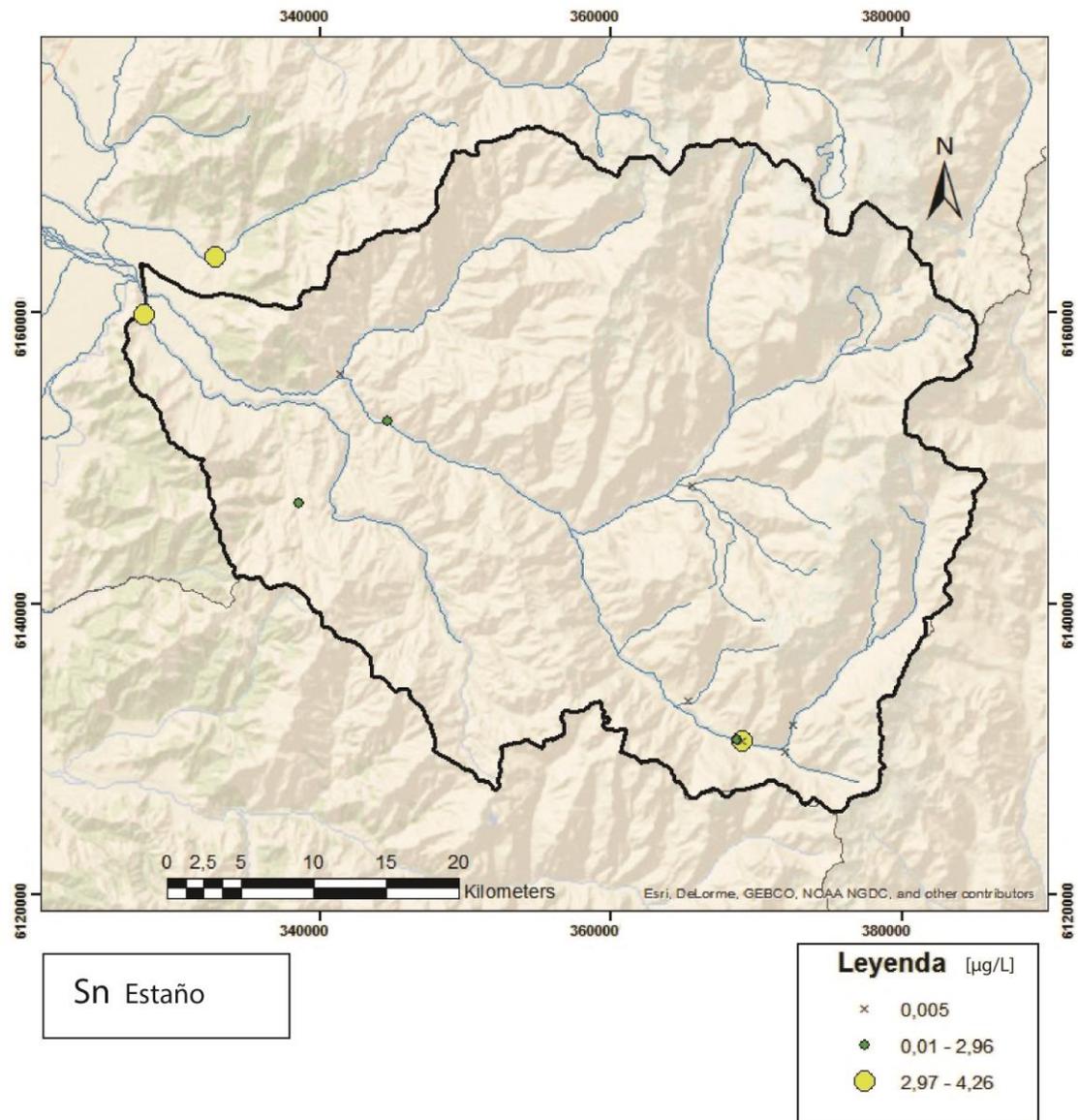
Sb Antimonio

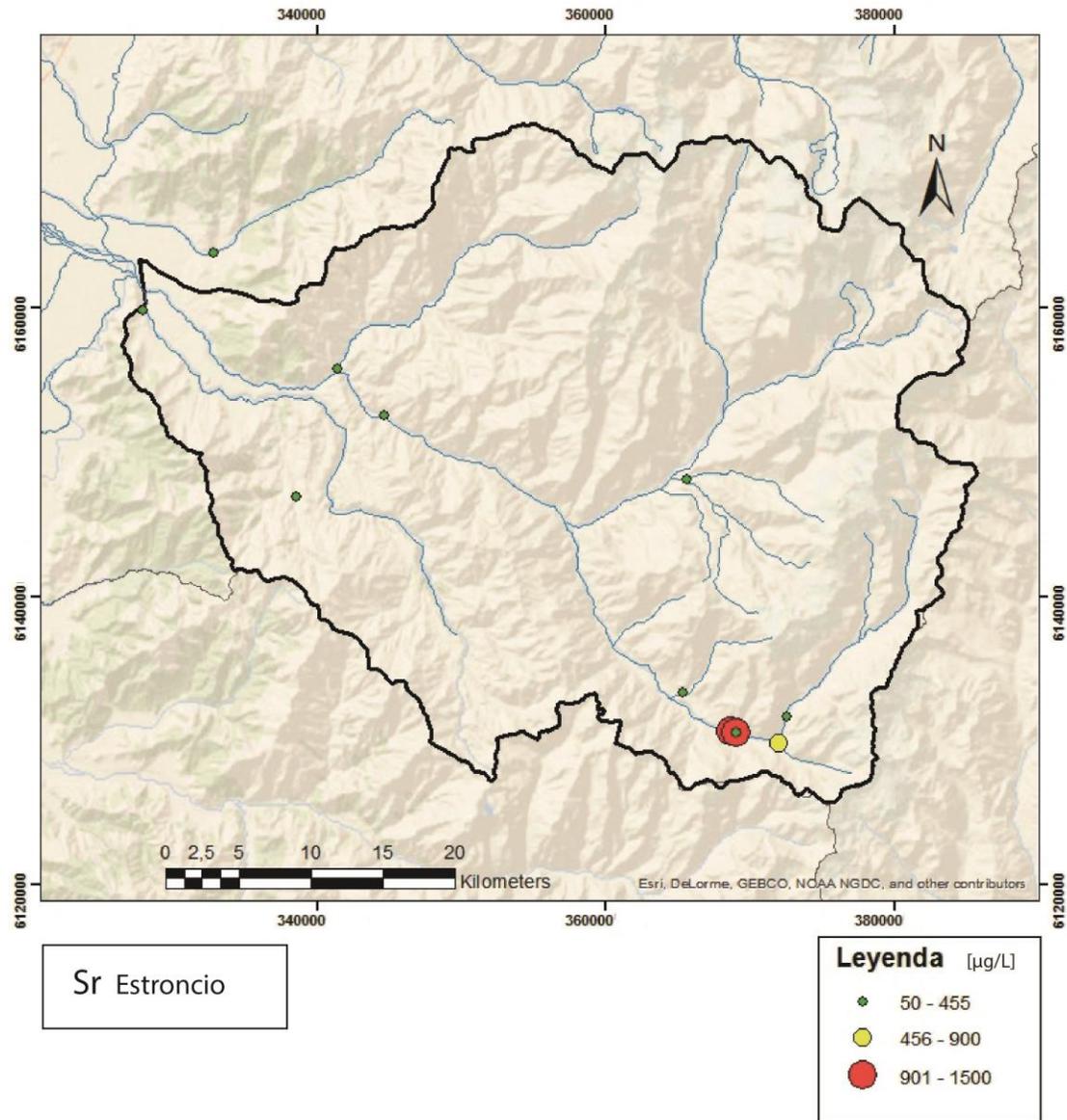


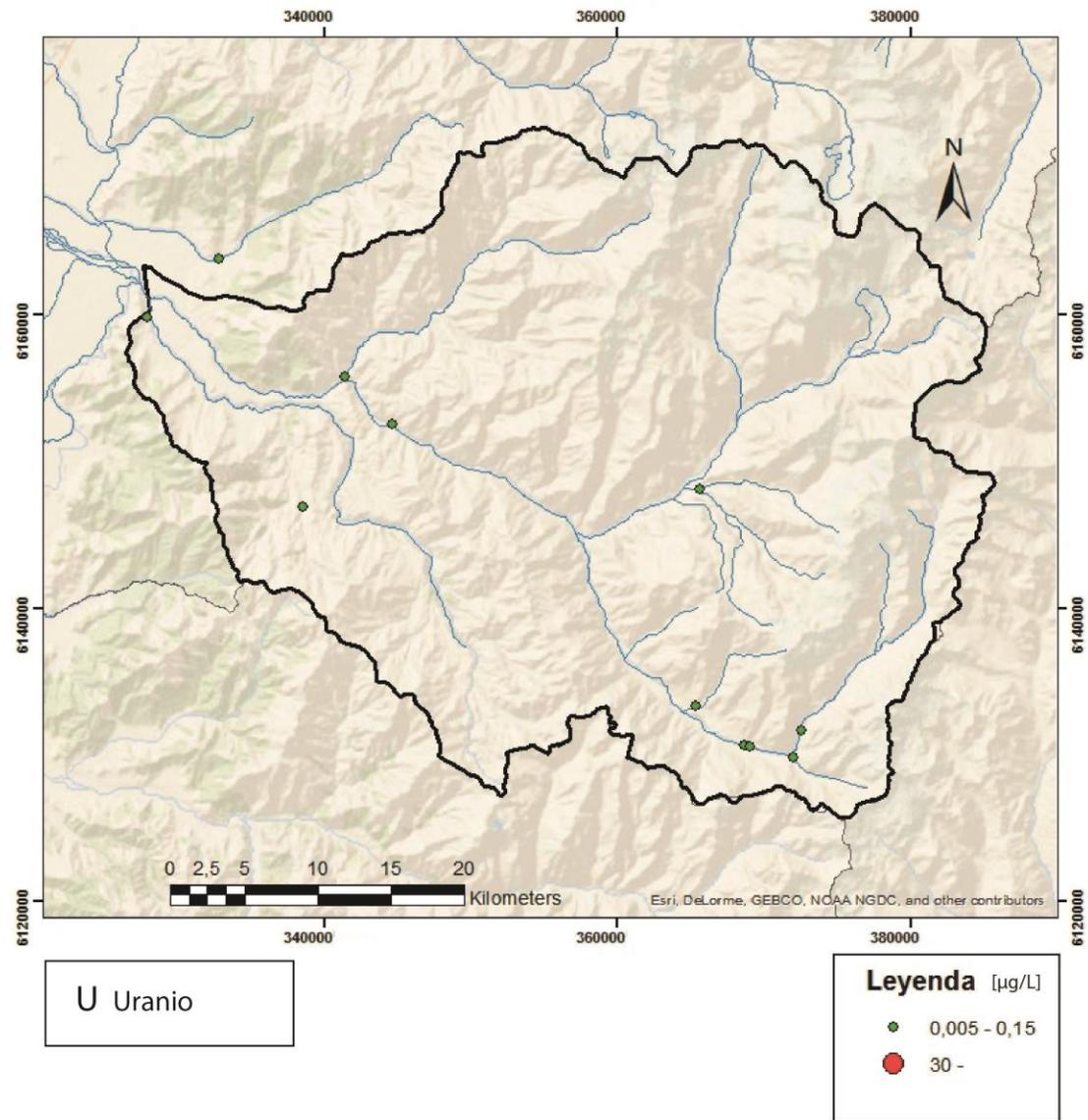


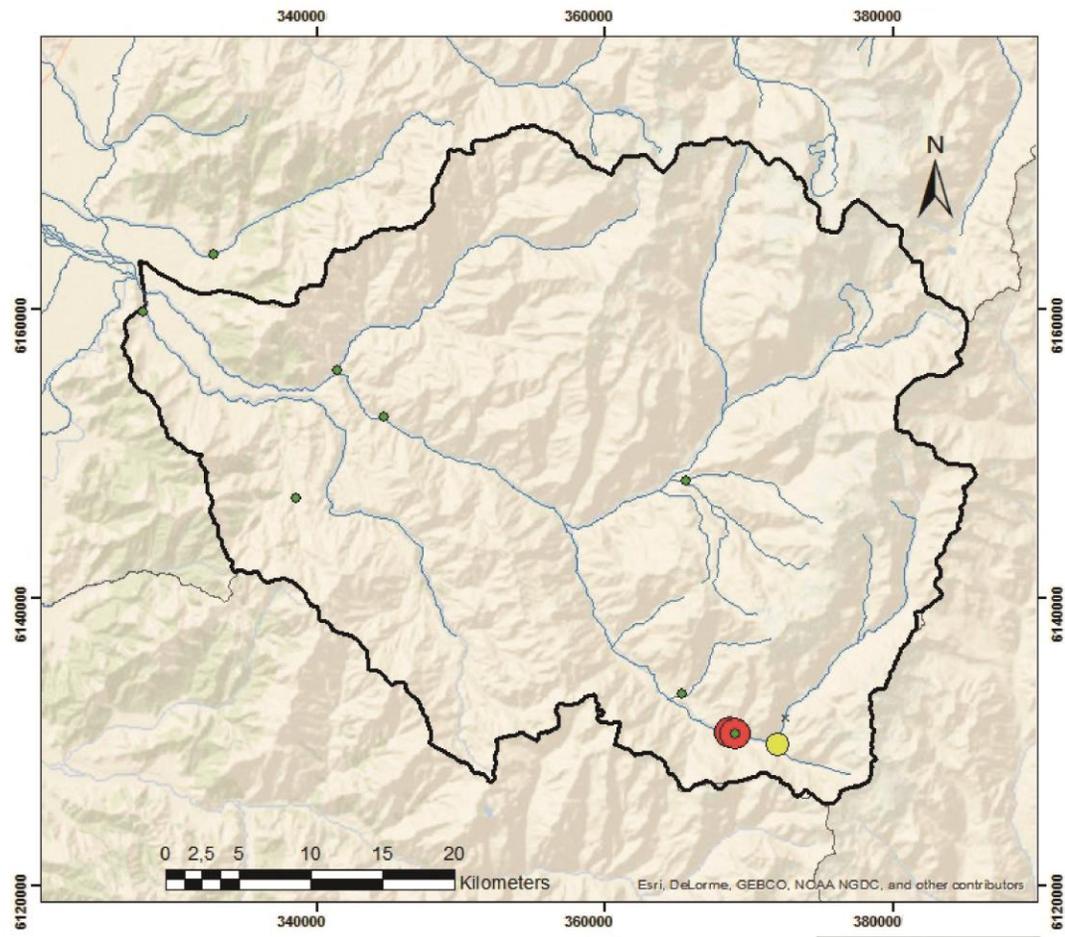
Se Selenio

Leyenda [µg/L]	
×	0,15
◆	0,3 - 6
●	7 - 10
●	10 -

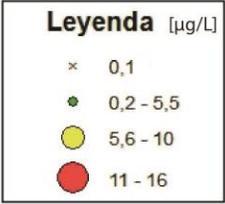


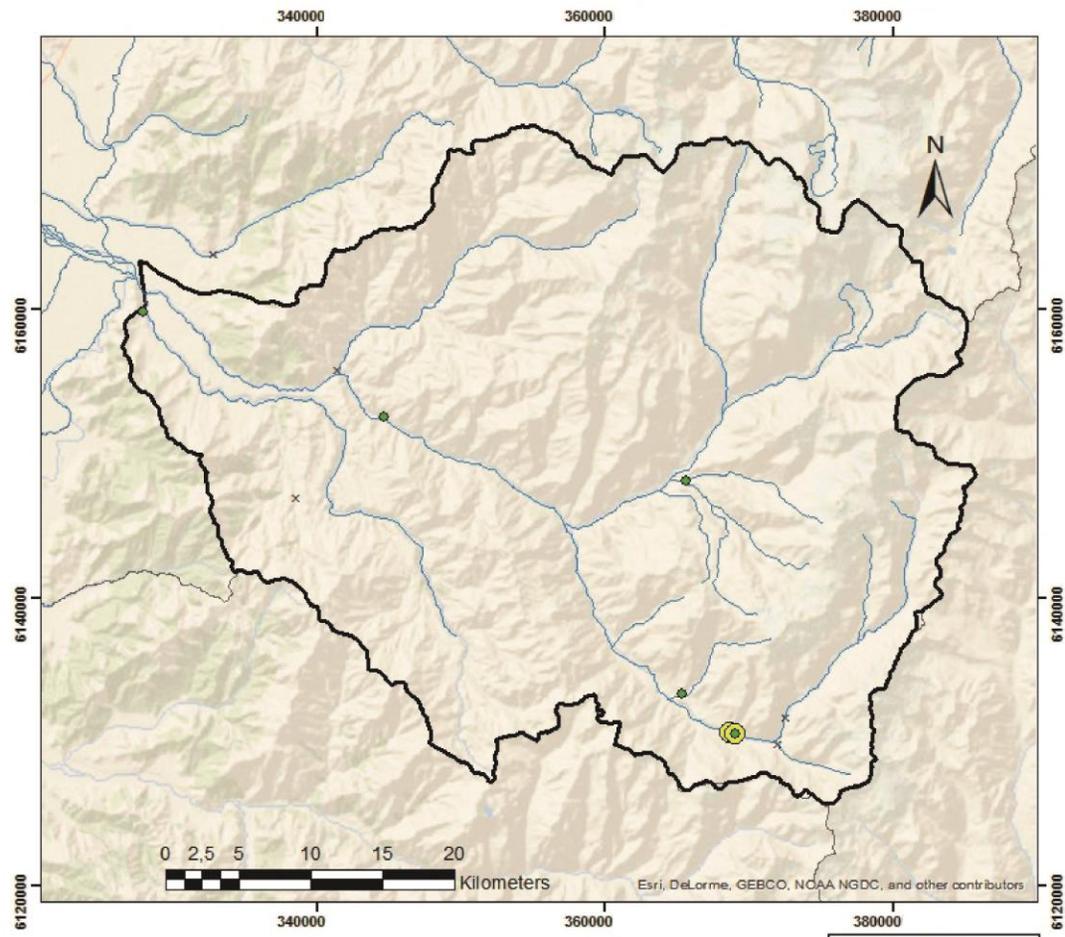






V Vanadio

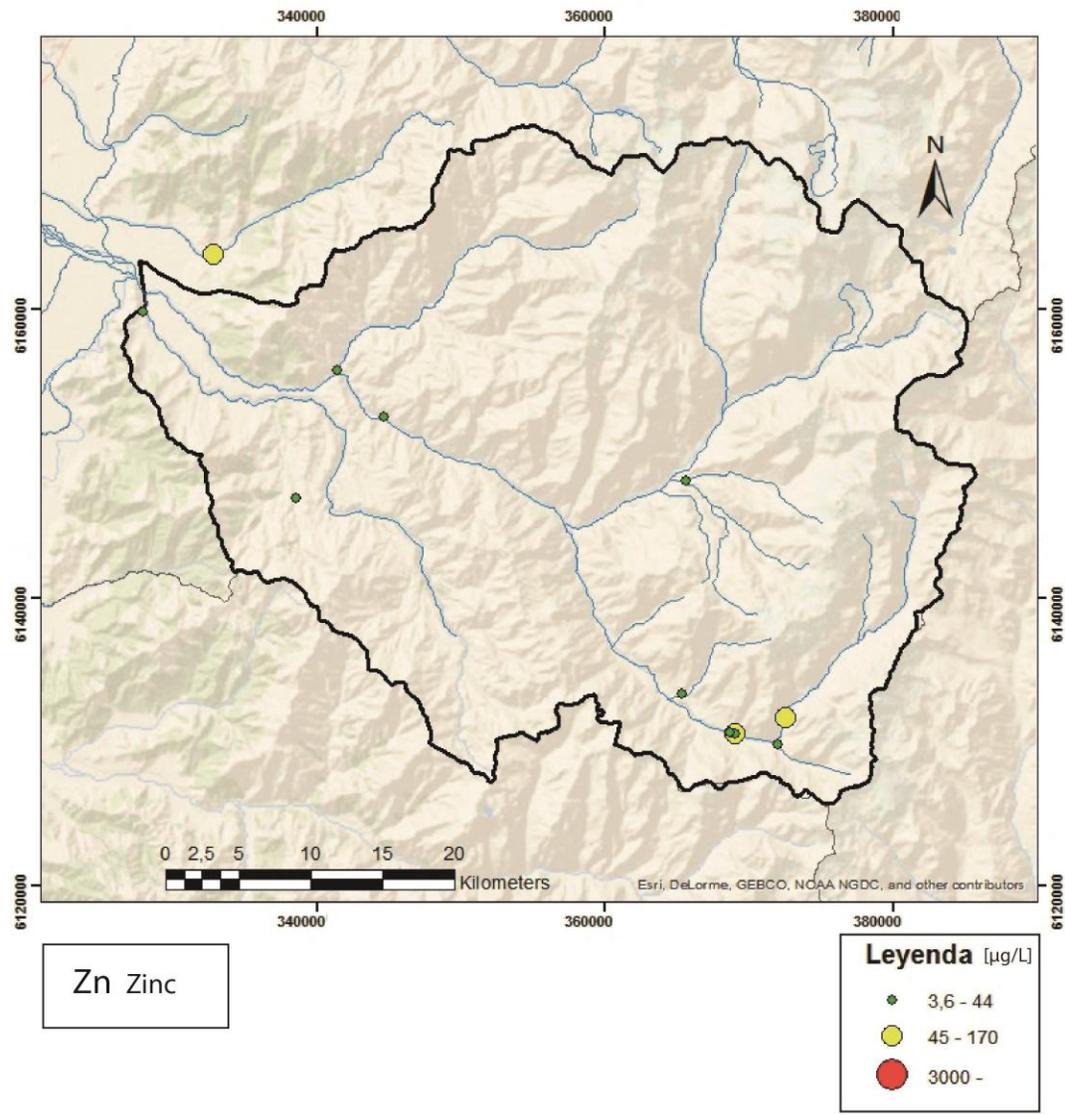


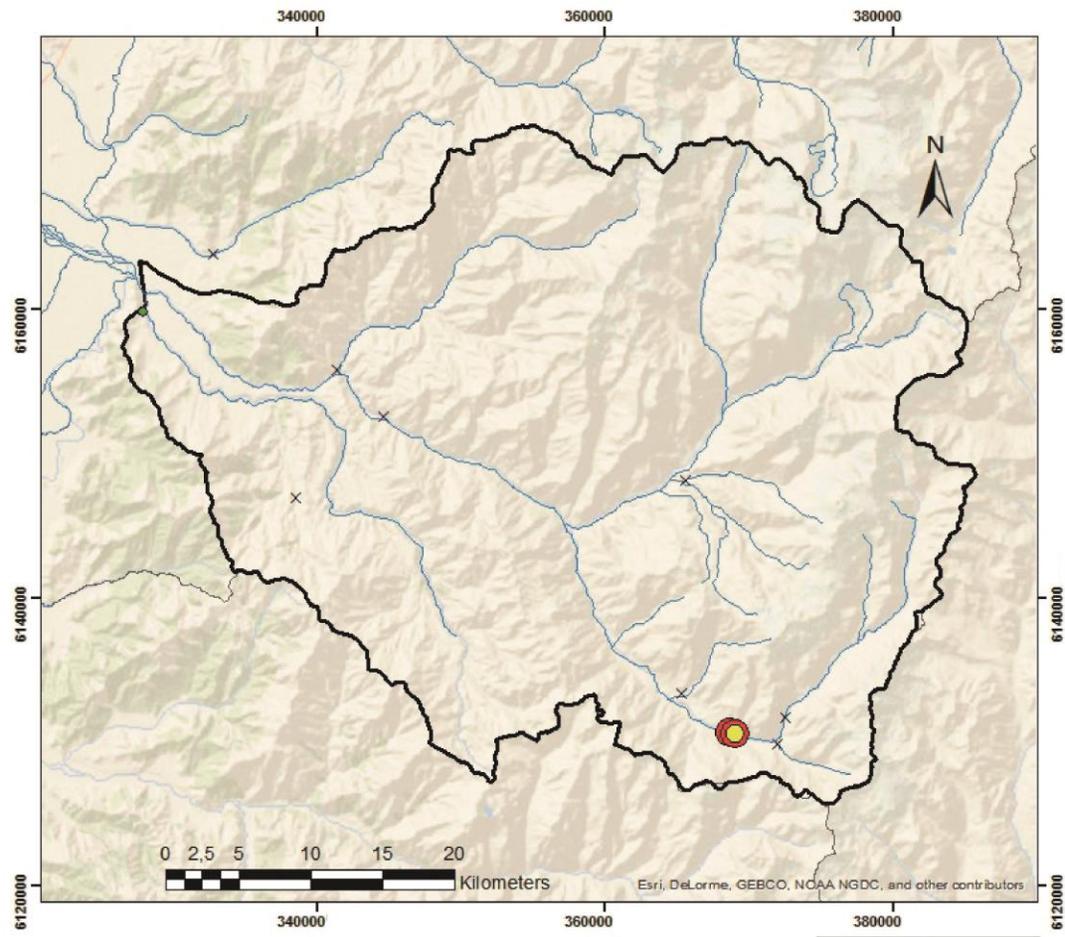


W Wolframio

Leyenda [µg/L]

- × 0,005
- 0,01 - 0,2
- 3 - 8





Zr Zirconio

Leyenda [µg/L]

- × 0,004
- ◆ 0,005 - 0,1
- 0,2 - 1,2
- 1,3 - 5,6