



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



# **ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO EN EL PARQUE NACIONAL RÍO CLARILLO, REGIÓN METROPOLITANA, CHILE.**

**Memoria para optar al Título de Geólogo**

**Rocío Belén Moreno Parada**

**Profesora Patrocinante:** Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado

**Profesional Guía:** Dra. Sarah Leray

**Profesoras Comisión:** Msc. Liubow Nikolaivna González Martínez  
Dra. Javiera Paz Gerding González

**Concepción, 2023**

*“No es que las mujeres  
sean bienvenidas en la ciencia,  
es que nos necesitan  
en la ciencia.”*

*Teresa Paneque*

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Objetivos</b> .....	2
<b>1.1.1. Objetivo General</b> .....	2
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	2
<b>1.2. Ubicación y Accesos</b> .....	2
<b>1.3. Trabajos Anteriores</b> .....	4
<b>1.4. Agradecimientos</b> .....	5
<b>2. MARCO GEOLÓGICO</b> .....	6
<b>2.1. Generalidades</b> .....	6
<b>2.2. Unidades Geológicas</b> .....	6
<b>2.2.1. Rocas Estratificadas</b> .....	6
2.2.1.1. <i>Formación Abanico (Eoceno superior-Mioceno inferior)</i> .....	6
2.2.1.2. <i>Formación Farellones (Mioceno)</i> .....	8
<b>2.2.2. Rocas Intrusivas</b> .....	8
2.2.2.1. <i>Plutón La Obra (Mioceno Inferior)</i> .....	8
<b>2.2.3. Depósitos Fluviales y Aluviales</b> .....	9
<b>2.3. Geología Estructural</b> .....	9
<b>3. MARCO HIDROLÓGICO</b> .....	10
<b>3.1. Cuenca del Río Maipo</b> .....	10
<b>3.1.1. Subcuenca del Río Maipo Medio</b> .....	12
3.1.1.1. <i>Subsubcuenca del Río Clarillo</i> .....	12

<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	14
<b>4.1. Muestreo y Procedimientos Analíticos</b> .....	15
4.1.1. Litologías de Zonas de Alteración .....	15
4.1.2. Agua Superficial .....	15
<b>4.2. Caracterización Mineralógica de Zonas Alteradas</b> .....	16
<b>4.3. Caracterización Química de Aguas Superficiales</b> .....	17
<b>5. RESULTADOS</b> .....	18
<b>5.1. Mineralogía</b> .....	20
5.1.1. Descripción Mineralógica en Microscopio Óptico .....	20
5.1.2. Análisis Difracción de Rayos X (DRX) .....	22
<b>5.2. Agua Superficial</b> .....	23
5.2.1. Parámetros Físicoquímicos .....	23
5.2.2. Hidroquímica .....	30
5.2.2.1. Elementos Mayores .....	30
5.2.2.1. Elementos Menores y Traza .....	36
<b>5.3. Análisis Estadístico</b> .....	47
5.3.1. Estadística Univariable .....	47
5.3.1.1. Diagramas de Caja .....	47
5.3.2. Estadística Multivariable .....	49
5.3.2.1. Matriz de Correlación .....	49
5.3.2.2. Análisis de Componentes Principales (ACP) .....	51
<b>6. DISCUSIÓN</b> .....	53
<b>6.1. Variación de Parámetros Físicoquímicos</b> .....	53
6.1.1. Conductividad Eléctrica (CE) .....	53
6.1.2. Oxígeno Disuelto (OD) .....	55
6.1.3. pH .....	56



<b>6.2. Hidroquímica</b> .....	57
<b>6.2.1. Elementos Mayores</b> .....	57
<b>6.2.2. Elementos Menores y Traza</b> .....	60
6.2.2.1. <i>Factor 1</i> .....	60
6.2.2.2. <i>Factor 2</i> .....	62
6.2.2.3. <i>Factor 3</i> .....	63
6.2.2.4. <i>Factor 4</i> .....	63
<b>6.3. Procesos Hidrogeoquímicos</b> .....	64
<b>6.3.1. Interacción Agua-Roca</b> .....	64
<b>6.3.2. Mezcla de Aguas</b> .....	66
<b>6.4. Calidad de Aguas</b> .....	67
<b>6.4.1. Norma de calidad para agua potable (NCh 409/1)</b> .....	68
<b>6.4.2. Norma de calidad para agua de riego (NCh 1333)</b> .....	71
<b>7. CONCLUSIÓN</b> .....	74
<b>8. REFERENCIAS</b> .....	76
<b>ANEXOS</b> .....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. 1. Mapa de ubicación y accesos del área de estudio .....	3
2. 1. Mapa geológico del Parque Nacional Río Clarillo .....	7
3. 1. Cuenca del río Maipo y drenajes principales .....	11

3.	2.	Subsubcuenca del río Clarillo y drenajes principales .....	13
4.	1.	Metodología utilizada para los objetivos del estudio .....	14
5.	1.	Mapa de ubicación de puntos de monitoreo y muestreo .....	19
5.	2.	Difractograma de las muestras M-1 y M-2 .....	22
5.	3.	Mapa variación de conductividad eléctrica (CE) en cursos principales y afluentes .....	26
5.	4.	Mapa variación de oxígeno disuelto (OD) en cursos principales y afluentes .....	27
5.	5.	Mapa variación de pH en cursos principales y afluentes .....	28
5.	6.	Variación de los parámetros fisicoquímicos a lo largo de los ríos principales .....	29
5.	7.	Diagrama de Piper de las muestras de agua .....	32
5.	8.	Diagramas de Stiff modificado de las muestras de agua .....	35
5.	9.	Mapa variación de aluminio (Al) en cursos principales y afluentes .....	38
5.	10.	Mapa variación de arsénico (As) en cursos principales y afluentes .....	39
5.	11.	Mapa variación de boro (B) en cursos principales y afluentes .....	40
5.	12.	Mapa variación de cadmio (Cd) en cursos principales y afluentes .....	41
5.	13.	Mapa variación de litio (Li) en cursos principales y afluentes .....	42
5.	14.	Mapa variación de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) en cursos principales y afluentes .....	43
5.	15.	Mapa variación de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en cursos principales y afluentes .....	44
5.	16.	Mapa variación de vanadio (V) en cursos principales y afluentes .....	45
5.	17.	Diagrama de caja de parámetros fisicoquímicos, elementos mayores, menores y trazas .....	48
6.	1.	Mapa geológico con los puntos de muestreo de cursos superficiales y litológicos .....	54

6.	2.	Evolución de las muestras de agua a través del diagrama de Piper .....	59
6.	3.	Relación Ca vs SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> en meq/l .....	65
6.	4.	Mapa de ubicación de los puntos con valores de pH y/o As fuera de la norma NCh 409/1 .....	70
6.	5.	Mapa de ubicación de los puntos con valores de pH y/o SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> fuera de la norma NCh 1333 .....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
3. 1. Subcuencas de la cuenca del río Maipo .....	12
4. 1. Límite de detección (LD) de los elementos mayores, menores y traza .....	17
5. 1. Información sobre campañas de muestreo realizadas .....	18
5. 2. Mineralogía y alteración presente en la muestra M-1 .....	20
5. 3. Fases minerales y porcentajes presentes en muestra M-1 y M-2 .....	23
5. 4. Valores de parámetros fisicoquímicos a lo largo de los ríos principales y afluentes .....	25
5. 5. Valores de cationes y aniones a lo largo de los ríos principales y afluentes ....	31
5. 6. Familias catiónicas y aniónicas, así como facies hidrogeoquímicas de las muestras de agua .....	33
5. 7. Valores de elementos menores y traza a lo largo de los ríos principales y afluentes .....	37
5. 8. Matriz de correlación de Pearson de parámetros <i>in situ</i> y de laboratorio .....	50
5. 9. Valores propios de los datos estandarizados .....	51

5.	10.	Correlación entre variables y factores (ACP) .....	52
6.	1.	Puntos que sobrepasan el límite máximo de pH permitido en la norma NCh 409/1 .....	68
6.	2.	Puntos que sobrepasan el límite máximo de As permitido en la norma NCh 409/1 .....	69
6.	3.	Puntos que sobrepasan el límite máximo de pH permitido en la norma NCh 1333 .....	71
6.	4.	Puntos que sobrepasan el límite máximo de $\text{SO}_4^{2-}$ permitido en la norma NCh 1333 .....	72

## ÍNDICE DE FOTOMICROGRAFIAS

<b>Fotomicrografía</b>	<b>Página</b>
5. 1. Secciones transparentes de minerales M-1 .....	21

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo</b>	<b>Página</b>
1. Error (%) en el balance iónico de las muestras de agua .....	83
2. Resultados mediciones in situ de parámetros fisicoquímicos .....	85
3. Resultados mediciones cationes y aniones .....	88
4. Resultados mediciones elementos menores y traza .....	93
5. Gráficos y pruebas de normalidad .....	98

6. Muestras de agua que sobrepasan el límite máximo de pH permitido en la norma NCh 409/1 .....	100
7. Muestras de agua que sobrepasan el límite máximo de As permitido en la norma NCh 409/1 .....	100
8. Muestras de agua que sobrepasan el límite máximo de pH permitido en la norma NCh 1333 .....	101

## RESUMEN

El Parque Nacional Río Clarillo, ubicado en la región metropolitana, presenta un sistema hidrográfico conformado por el Cajón de Los Cipreses y Cajón de Los Lunes, cuya confluencia origina el río Clarillo. Estos cursos principales recorren rocas andesíticas y dacíticas de la Formación Abanico y Farellones, así como rocas graníticas del plutón La Obra, identificando una zona de alteración hidrotermal en la cabecera del Cajón de Los Cipreses, y características estructurales como pliegues, fallas y zonas fracturadas que facilitan la circulación de agua. Ahora, a pesar de que uno de los objetivos específicos para la creación del Parque Nacional es la protección de la cuenca del río Clarillo, no existen estudios sobre las variaciones químicas de los cursos de agua superficial, por lo que la presente memoria apunta a ser el primero de ellos, realizando una caracterización de la mineralogía de la zona de alteración, analizando los parámetros fisicoquímicos *in situ*, así como las características hidroquímicas y calidad de agua.

Respecto a la zona de alteración, se identifican principalmente minerales de cuarzo, muscovita y rutilo asociados a una alteración filica pervasiva que oblitera por completo la textura original de la roca. Además, la identificación de arcillas (illita y esmectita) se asocia a una alteración argílica intermedia desarrollada de manera incipiente. Posterior a dichas alteraciones, procesos de oxidación en el sector dieron lugar a hidróxido de hierro (goethita).

Al analizar los parámetros fisicoquímicos *in situ*, la conductividad eléctrica (CE) presenta una tendencia descendente, con mayores valores en las zonas altas de Los Cipreses y menores en el río Clarillo. En cambio, el pH presenta una tendencia ascendente con aguas ácidas en las zonas altas y neutras a alcalinas en el río Clarillo. Dichas tendencias son amortiguadas por acción de afluentes, los cuales aportan aguas prístinas normalizando los parámetros hasta la salida del Parque Nacional, pasando de aguas ácidas con altos iones disueltos a aguas alcalinas con bajos iones disueltos. Por otro lado, el oxígeno disuelto (OD) presenta una leve tendencia descendente causada por variaciones en la vegetación o la nulidad de ella, favoreciendo o no la oxigenación del agua.

Según la clasificación composicional de los ríos, se identifica un predominio de aguas sulfatadas-cálcicas en los cursos Los Cipreses y Clarillo, variando la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  desde elevados valores en las zonas altas de Los Cipreses, disminuyendo su concentración por el río Clarillo hasta la salida del Parque. Por otro lado, la mayoría de los afluentes presenta aguas bicarbonatadas-cálcicas, los cuales amortiguan los valores de los cursos principales, contribuyendo en la evolución del agua a lo largo del Parque Nacional. Siguiendo con la variación de los elementos mayores, menores y trazas, las fuentes del  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y Al provienen de alteración mineralógica; Li, B, Cd, V y As del fluido hidrotermal,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  del ciclo del nitrógeno; y  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  de la lluvia. Ahora, las variaciones locales observadas dependen de cambios litológicos, fisicoquímicos, aportes de aguas, movilización de elementos en por estructuras y contaminación antrópica. Respecto a los procesos que controlan la composición de las aguas superficiales, destaca la formación de una zona de drenaje ácido natural por oxidación de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), la cual origina las aguas sulfatadas ácidas con alta CE observadas en la cabecera del Cajón de Los Cipreses, además de la formación de goethita en el sector. Otro proceso importante es la mezcla de aguas provenientes de afluentes y por exfiltración desde otra cuenca. Respecto a la calidad del agua, los parámetros pH y As no cumplen con la norma chilena para agua potable (NCh 409) en casi la totalidad del Parque, y para agua de riego (NCh 1333) no la cumple el pH y  $\text{SO}_4^{2-}$  en Los Cipreses.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Parque Nacional Río Clarillo es parte de las 107 unidades del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) creada el 29 de enero de 1982, la cual comprende un área de 13.085 ha y presenta altitudes entre 850 m s.n.m. y 3.057 m s.n.m (Ministerio de Medio Ambiente, sf). Administrativamente está emplazada en la comuna de Pirque de la provincia Cordillera en la región Metropolitana de Santiago, siendo una de las 3 unidades SNASPE presentes en dicha región, junto con la Reserva Nacional Roblería del Cobre de Loncha y el Monumento Natural el Morado (Becerra, 2020).

El sistema hidrográfico que se encuentra en este Parque Nacional está conformado por dos cuencas mayores, Cajón de Los Cipreses y Cajón de Los Lunes, cuya confluencia a los 1.100 ms.n.m. origina el río Clarillo (CONAF, 1996). Este sistema hidrográfico está constituido además por numerosos riachuelos que fluyen a través de quebradas menores (Niemeyer *et al.*, 2002). El río Clarillo corresponde al principal río del Parque Nacional y es un afluente del río Maipo (Alarcon *et al.*, 2015), presentando una extensión de 8,6 km desde su origen hasta que sale del Parque (Niemeyer *et al.*, 2002).

Uno de los objetivos específicos para la creación del Parque Nacional Río Clarillo fue proteger la cuenca del río Clarillo, contribuyendo a la mantención de sus regímenes hídricos, como fuente de producción de agua para los procesos naturales y desarrollo humano sustentable (Ministerio de Bienes Nacionales, 2020). A pesar de esto, la mayor parte de las investigaciones realizadas en el Parque Nacional se centran en estudiar y caracterizar la diversidad de su flora y fauna (Niemeyer *et al.*, 2002). Además, en la actualidad no existen trabajos específicamente orientados a conocer las características hidrogeoquímicas del sector.

Teniendo en consideración estos antecedentes, la presente memoria de título apunta a ser el primer estudio hidrogeoquímico en el Parque Nacional Río Clarillo, la cual busca realizar una caracterización química de las fuentes de agua superficial, determinar las variaciones en los parámetros fisicoquímicos *in situ* y determinar la calidad del agua del Parque. Para ello se realiza un análisis de elementos mayores, menores y trazas, así como parámetros fisicoquímicos obtenidos en muestras a lo largo del río Clarillo, Cajón de Los Lunes, Cajón de Los Cipreses y afluentes.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo General**

Determinar el funcionamiento hidrogeoquímico de la cuenca del río Clarillo, específicamente en el Parque Nacional Río Clarillo, con un foco particular en el rol de la geología sobre las variaciones hidroquímicas y parámetros fisicoquímicos de las fuentes de agua superficial del Parque, correspondientes al río Clarillo, Cajón de Los Lunes, Cajón de Los Cipreses y riachuelos asociados.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar la mineralogía asociada a una zona de alteración hidrotermal observada en la cabecera del Cajón de Los Cipreses.
- Analizar e interpretar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos de las fuentes de agua superficial del Parque Nacional.
- Realizar una caracterización química de las distintas fuentes de agua superficial del Parque, considerando los ríos principales y sus afluentes.
- Relacionar los factores geológicos del Parque Nacional con las variaciones hidroquímicas y parámetros fisicoquímicos observados.
- Determinar la calidad química de las distintas fuentes de agua superficial del Parque Nacional y si presenta algún tipo de contaminación.

## **1.2. Ubicación y Accesos**

El Parque Nacional Río Clarillo se ubica en la comuna de Pirque, en la provincia Cordillera de la región Metropolitana, a 45 km al sureste de la ciudad de Santiago, entre los 33° 41' - 33° 51' S y 70° 24' - 70° 29' O (Figura 1.1). Para acceder al Parque Nacional, desde la localidad de Pirque, se debe avanzar por la ruta G-405 con orientación SE hasta el portal de acceso de la unidad, que es donde se ubica el control de ingreso de visitantes perteneciente a CONAF. Es posible entrar con vehículo particular al área protegida, ya que presenta estacionamientos con capacidad máxima de 200 vehículos en sectores aledaños a la caseta de CONAF.



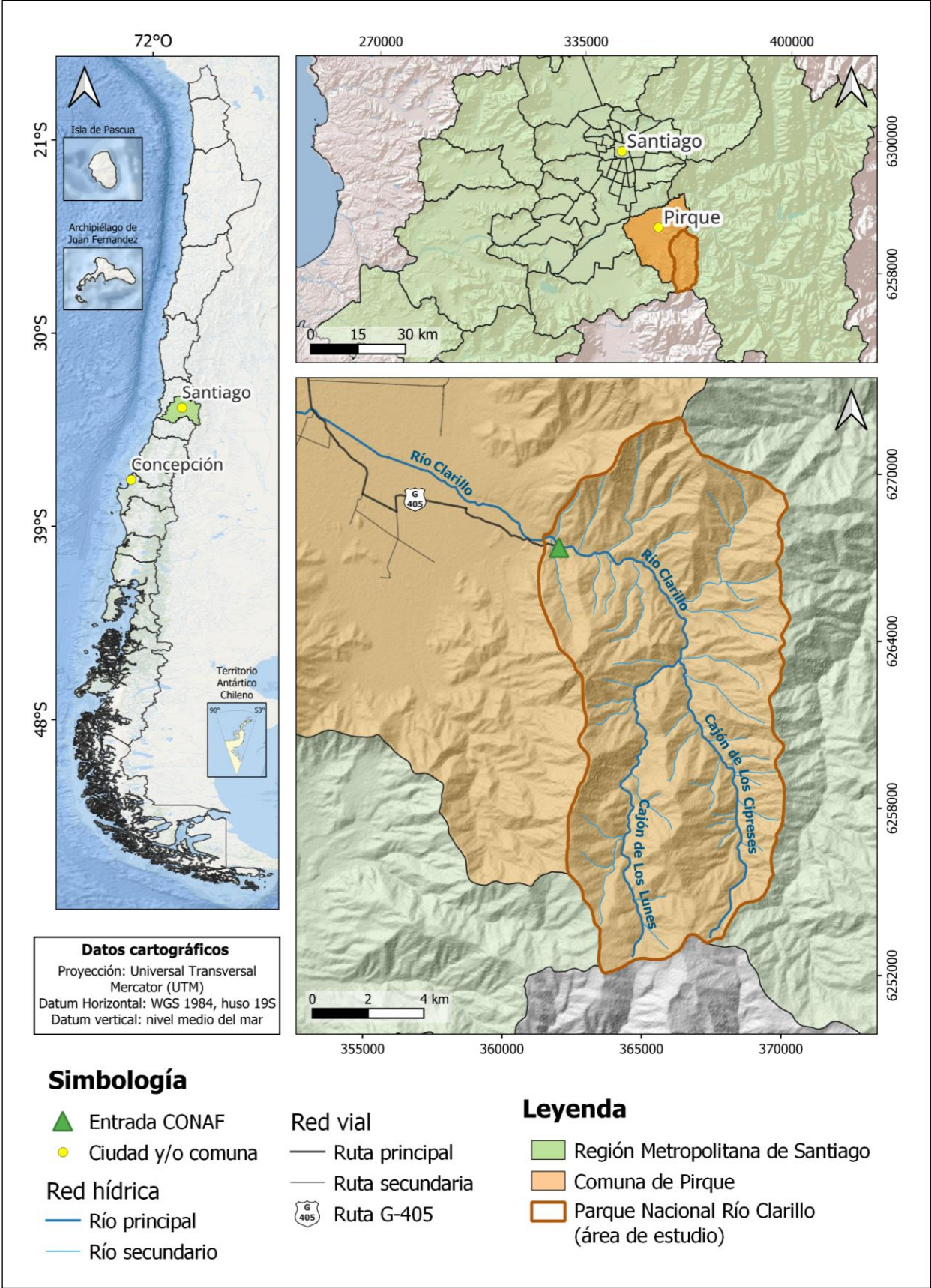


Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos del área de estudio.

### 1.3. Trabajos Anteriores

En CONAF (1996) se determina el plan de manejo de, en ese entonces, la Reserva Nacional Río Clarillo, donde se planifica su administración y gestión, así como implementación de programas técnicos, recreacionales y de interpretación ambiental. Posteriormente, en Ministerio de Bienes Nacionales (2020) se recategoriza la clasificación de “Reserva” a “Parque”, a modo de cumplir con los objetivos nacionales y regionales de conservación de la biodiversidad del sector.

A lo largo del tiempo se han realizado diversos estudios en el Parque Nacional Río Clarillo, los cuales se concentran en investigar sobre la flora y fauna. En Niemeyer *et al.* (2002) se realiza una compilación de estas investigaciones y cursos sobre flora y fauna, además del manejo del área silvestre protegida, donde predominan las publicaciones sobre insectos y plantas superiores. Además, provee una guía de campo ilustrada de la flora y fauna más frecuente del área.

A pesar de esta gran cantidad de publicaciones, los estudios acerca de geología, hidrología y/o hidrogeología en el Parque Nacional Río Clarillo son muy escasos, existiendo solo 3 publicaciones al respecto, las cuales fueron elaboradas recientemente:

En Alarcon *et al.* (2015) se realiza un modelamiento hidrológico de las cuencas Clarillo y Los Almendros, ambas dentro del Parque Nacional Río Clarillo, utilizando datos de cobertura y topografía obtenidos de MODIS MCD12Q1 y SRTM respectivamente.

Por un lado, en Becerra (2020) se estudia el escurrimiento superficial del Parque Nacional Río Clarillo. Para ello analiza los principales componentes hidrológicos (parámetros morfométricos, pendiente, exposición y cobertura vegetal) y su influencia en la temporalidad del escurrimiento superficial en 35 microcuencas del Parque Nacional.

Por último, en Marti *et al.* (2023) se busca estudiar y comprender los sistemas hidrogeológicos de montaña con el objetivo de obtener información sobre el papel que poseen las estructuras geológicas en dichos sistemas. Para ello se selecciona el Parque Nacional Río Clarillo como área de estudio y se sigue una metodología interdisciplinaria: mapeo geológico a múltiples escalas, estudios geofísicos y magnéticos, medición de caudales y cálculo de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Este estudio es de suma importancia, ya que es la única fuente de información a detalle sobre litologías y estructuras presentes en el Parque Nacional.

## 1.4. Agradecimientos

Primero agradecer al proyecto Fondecyt de Iniciación 11170380: “Evaluación de fuentes de agua subterránea en los acuíferos de roca cristalina” por el financiamiento de la presente memoria de título. También agradecer al Departamento de Geología de la Universidad de Concepción por el otorgamiento de fondos complementarios para la realización de análisis de laboratorio. Además, agradecer la participación de la Municipalidad de Pirque, Corporación Nacional Forestal (CONAF) de la región metropolitana y los guardaparques del Parque Nacional Río Clarillo.

Por otro lado, agradezco por su guía, apoyo y dedicación durante toda la elaboración de este trabajo a la Dra. Fernanda Álvarez Amado (profesora patrocinante) y la Dra. Sarah Leray (profesional guía), así como a Camila Poblete González y Luciano Muñoz por su buena disposición. Igualmente agradezco por su colaboración a la comisión revisora compuesta por la Msc. Liubow Nikolaivna González Martínez y la Dra. Javiera Paz Gerding González.

Doy gracias al personal del Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción por preparar y realizar los análisis mineralógicos y cortes transparentes, y al Laboratorio de Calidad del Agua de la Pontificia Universidad Católica de Chile por realizar los análisis químicos de las muestras de agua. Además, extendiendo mis agradecimientos a todos los docentes y funcionarios del Departamento Ciencias de la Tierra por entregarnos nuevos conocimientos y permitir labores como salidas a terreno, laboratorios y actividades administrativas.

Quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, especialmente a mi mamá y abuelos. También agradecer a mi segunda familia, mis amigos Victoria, Eduardo, Javier, Catalina H., Susana, Sebastián, Kevin, Yorch, Catalina R., Rubén y María Paz por estar conmigo durante toda mi etapa universitaria, así como a Javiera por convencerme de cambiarme de carrera. Además, agradezco a todas las compañeras y compañeros que, sin pedir nada a cambio, elaboraron apuntes y resúmenes de las distintas asignaturas y compartieron dicha información.

De igual modo, quiero agradecerme a mí, por mi dedicación y esfuerzo a lo largo de todo este proceso universitario, por seguir adelante durante las largas jornadas de estudio y entrenamientos, y principalmente por no nunca dejar de lado el deporte y mis pasiones.

Por último, agradecer a Alexandra por liberar el acceso a la ciencia.

## 2. MARCO GEOLÓGICO

### 2.1. Generalidades

Las unidades geológicas que se encuentran en el Parque Nacional Río Clarillo están constituidas por rocas sedimentarias y volcanosedimentarias pertenecientes a la Formación Abanico, rocas volcánicas y volcanoclásticas pertenecientes a la Formación Farellones, plutones del Mioceno Inferior-Medio de composición granodiorita, así como diversos depósitos fluviales y aluviales aledaños al río Clarillo y afluentes (SERNAGEOMIN, 2003). Además, en la cabecera del Cajón de Los Cipreses se identifica una zona de alteración hidrotermal argílica (Marti *et al.*, 2023).

Según recopilaciones de Marti *et al.* (2023), estas unidades han sido identificadas a escala regional en el área de estudio, pero no existe consenso sobre si los cuerpos rocosos aflorantes en la cuenca del río Clarillo deben ser asignados a estas unidades formales. Es por ello que subdividen las unidades volcánicas y sedimentarias por litologías, más que por formaciones. Estas unidades geológicas, así como las características estructurales y zonas de alteración del área de estudio, se pueden observar en la Figura 2.1.

### 2.2. Unidades Geológicas

#### 2.2.1. Rocas Estratificadas

##### 2.2.1.1. Formación Abanico (*Eoceno superior-Mioceno inferior*)

Definida por Aguirre (1960) en el cerro Abanico, ubicado al este de Santiago en la provincia de Aconcagua. Corresponde a una secuencia continental de rocas volcánicas y sedimentarias subordinadas con fuertes variaciones laterales de facies (Gana & Wall, 1997), la cual se encuentra intensamente plegada en afloramientos más al oeste, disminuyendo gradualmente la intensidad del plegamiento hacia el este (Charrier *et al.*, 2002).

Está constituida por depósitos volcanoclásticos y lavas ácidas a intermedias con intercalaciones sedimentarias (aluviales, fluviales y lacustres) dispuestas en forma de lentes (Charrier *et al.*, 2002).



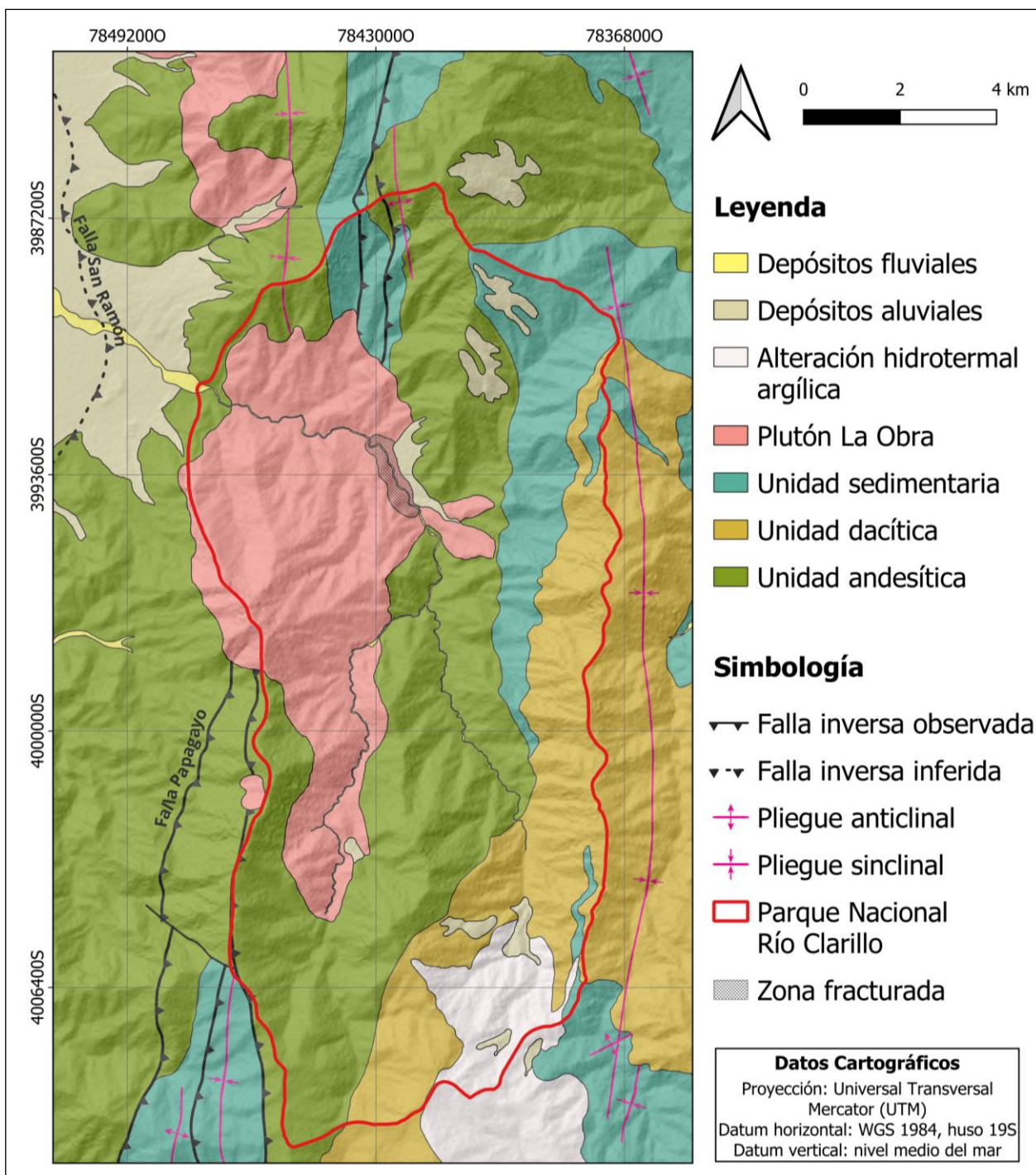


Figura 2.1: Mapa geológico del Parque Nacional Río Clarillo. Modificado de Marti *et al.* (2023).

Además, se encuentra intruida por diversos intrusivos hipabisales (stocks, diques y sills) que cortan esta secuencia, formando parte del mismo sistema magmático (Gana & Wall, 1997).

Según todas las determinaciones de edad faunísticas e isotópicas disponibles, es posible restringir la edad de la Formación Abanico en Eoceno superior-Mioceno inferior (Charrier *et al.*, 2002).

#### 2.2.1.2. Formación Farellones (Mioceno)

Definida por Klohn (1960) en la pista de esquí de Farellones, situada al este de Santiago. Corresponde a depósitos volcánicos y volcanoclásticos continentales, suavemente plegados, que constituyen una franja N-S ubicada en los andes centrales (Vergara *et al.*, 1988). Representan productos volcánicos de composición ácida provenientes de calderas, con intercalaciones lacustres, seguidas por coladas y domos generados en un sistema de estratovolcanes (Gana & Wall, 1997).

La Formación Farellones sobreyace de forma discordante a la Formación abanico en afloramientos ubicados más al oeste, con un menor grado de plegamiento que la Formación subyacente, volviéndose gradualmente paralela a la Formación Abanico en afloramientos ubicados más hacia el este (Charrier *et al.*, 2002).

Se puede dividir en un miembro inferior compuesto por rocas piroclásticas y volcanosedimentarias, y un miembro superior compuesto por flujos de lava andesítica, basáltica y localmente riolítica bien estratificadas (Vergara *et al.*, 1988, en Piquer *et al.*, 2017). Además, se encuentra intruida por varios cuerpos graníticos y subvolcánicos, algunos asociados a mineralización de Cu-Mo como los yacimientos en Los Pelambres y El Teniente (Vergara *et al.*, 1988).

Según dataciones de K/Ar la edad de la Formación Farellones corresponde al Mioceno, la cual estaría asociada a la actividad volcánica de ese periodo (Vergara *et al.*, 1988).

### 2.2.2. Rocas Intrusivas

#### 2.2.2.1. Plutón La Obra (Mioceno Inferior)

Corresponde a un complejo intrusivo granítico que intruye a las formaciones Abanico y Farellones, ubicado en gran parte del recorrido del río Clarillo en el área de estudio (Marti *et al.*, 2023), con edad de cristalización de 20,9-20,6 Ma correspondiente al Mioceno Inferior, medido mediante U-Pb en circones (Piquer *et al.*, 2021). Es posible identificar dos grandes dominios: en la zona centro-norte (La Obra y Papagayo) presenta una zonación vertical descrita por un techo diorítico y pulsos graníticos tipo sills, mientras que en la zona al sur del río Clarillo (Cerro Blanco) se

identifica un dominio homogéneo de composición granítica/granodiorítica generado por la extracción del fluido residual de la cámara profunda (Covarrubias, 2023).

Según Piquer *et al.* (2021), la principal litología del complejo intrusivo corresponde a granodiorita equigranular de grano medio a grueso, con abundante biotita, algunas cloritizada, y menor hornblenda, con enclaves de composición diorita. La segunda litología que predomina corresponde a monzonita de cuarzo rica en hornblenda con biotita en menor cantidad, ambos alterados a clorita con intensidad variable, además de minerales de cuarzo y feldespatos alcalinos con textura gráfica.

### **2.2.3. Depósitos Fluviales y Aluviales**

Corresponden a depósitos fluviales y aluviales del Plioceno al Holoceno ubicados en el valle fluvial principal del río Clarillo, así como en las quebradas tributarias (Marti *et al.*, 2023). A lo largo de la cuenca de Santiago, específicamente entre la desembocadura del valle del río Clarillo y la depresión central, la cubierta sedimentaria registra un aumento de espesor alcanzando hasta 500 m (González *et al.*, 2018; Yáñez *et al.*, 2015).

## **2.3. Geología Estructural**

Según Marti *et al.* (2023), las características estructurales del Parque Nacional Río Clarillo permiten el reconocimiento de 2 dominios estructurales distintos (Figura 2.1.):

El primero de ellos es un dominio occidental limitado por la traza principal de la falla San Ramón vergente al oeste y una falla inversa de dirección N-S denominada falla Papagayo. Este dominio muestra pliegues estrechos y fallas inversas menores, lo que genera estratos con buzamiento elevado.

El segundo dominio está ubicado al este de la falla de Papagayo y muestra pliegues con buzamientos bajos en sus flancos y un anticlinal vergente al oeste en las cimas de los cerros afectando las unidades andesíticas y sedimentarias. Directamente debajo del anticlinal se reconoce fallamiento y fracturamiento, afectando los afloramientos de rocas graníticas a lo largo del margen del río.

### **3. MARCO HIDROLÓGICO**

El Parque Nacional Río Clarillo, ubicado en la comuna de Pirque de la región Metropolitana, se encuentra situado dentro de la cuenca del río Clarillo, el cual corresponde al principal curso de agua que atraviesa gran parte del área protegida y constituye una subsubcuenca de la gran cuenca andina del río Maipo (Becerra, 2020). A continuación se detallan las principales características de la cuenca, subcuenca y subsubcuenca donde se involucra el área de estudio.

#### **3.1. Cuenca del Río Maipo**

La cuenca hidrográfica del río Maipo abarca casi la totalidad de la región Metropolitana y una pequeña parte de la región de Valparaíso y del Libertador General Bernardo O'Higgins, extendiéndose desde la cordillera de los Andes hasta el océano Pacífico, en la desembocadura del río Maipo (DGA, 2021). En la Figura 3.1 se observa la ubicación y drenajes de esta cuenca.

El río Maipo, principal curso natural de la cuenca, nace en el pie occidental del volcán Maipo, en una cota cercana a los 5.300 m s.n.m., siguiendo su curso a través del valle central hacia la desembocadura, con una longitud de 250 km y drenando una superficie total de 15.304 km<sup>2</sup>, donde en su trayecto se le unen los ríos Volcán, Yeso, Colorado, Clarillo, Mapocho, entre otros afluentes (DGA, 2021).

En esta cuenca se distinguen 3 regímenes hidrológicos: nival asociado a zonas de influencia de la cordillera de los Andes, con mayores caudales en los meses de deshielo; nivo-pluvial desarrollada principalmente en el valle central de la cuenca, presentando crecidas anuales en los meses de deshielo (estivales) y en los meses de invierno; y pluvial en cuencas ubicadas bajo la línea de nieve presentando crecidas solo en los meses de invierno ocasionadas por precipitaciones características (DGA, 2004).

La cuenca del río Maipo se subdivide en 5 subcuencas: río Maipo Alto, río Mapocho Alto, río Maipo Medio, río Mapocho Bajo y río Maipo Bajo, donde destaca la subcuenca del río Maipo Medio, ya que es ahí donde se ubica la subsubcuenca del río Clarillo, y por ende el Parque Nacional Río Clarillo (DGA, 2021). La ubicación de las subcuencas se observa en la Figura 3.1, mientras que sus características se muestran en la Tabla 3.1.



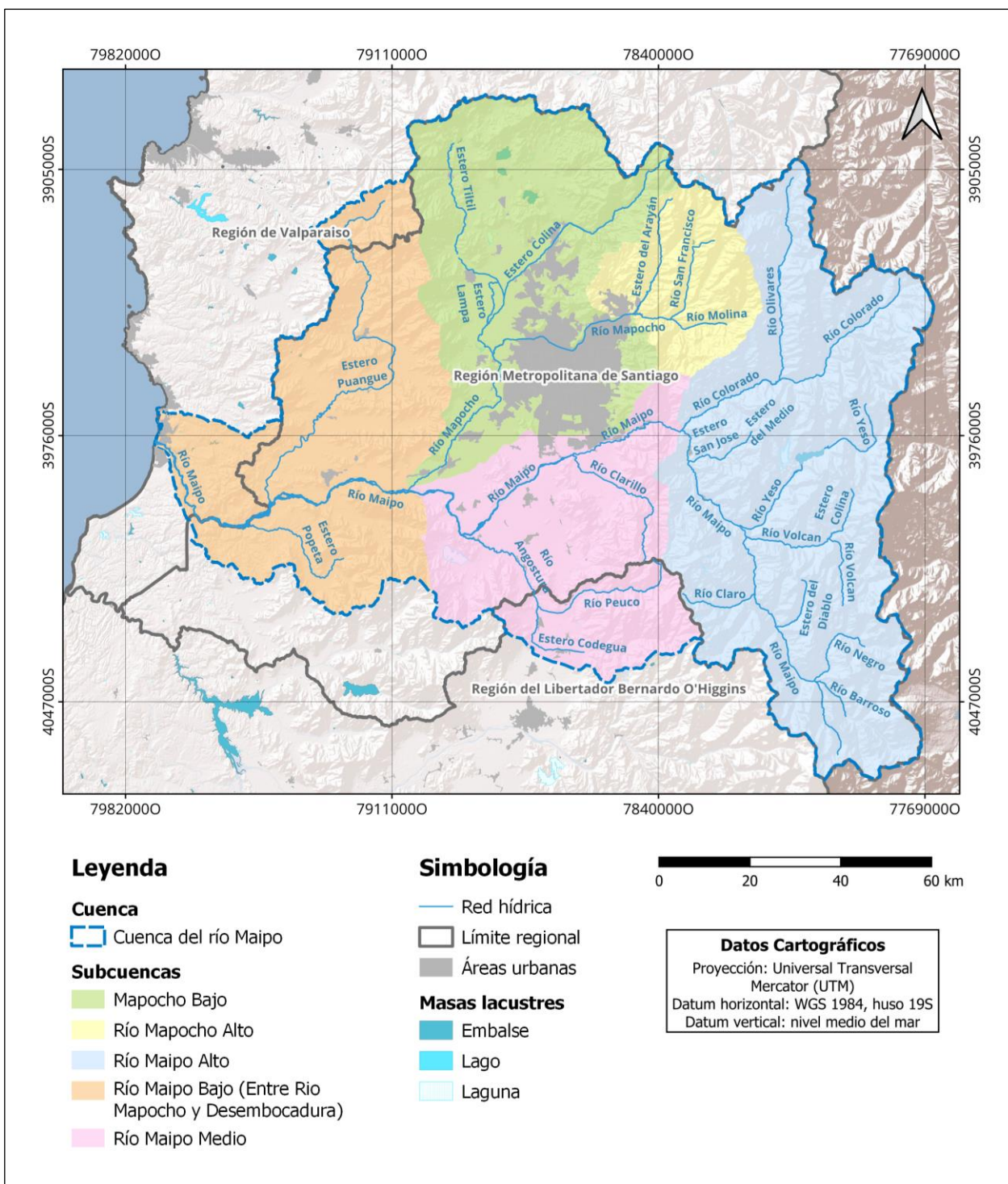


Figura 3.1: Cuenca del río Maipo y drenajes principales.

**Tabla 3.1: Subcuencas de la cuenca del río Maipo.** Modificado de DGA (2021).

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Región
Río Maipo Alto	4.859	Metropolitana
Río Mapocho Alto	1.022	Metropolitana
Río Maipo Medio	2.574	Metropolitana Libertador Bernardo O'Higgins
Río Mapocho Bajo	3.456	Metropolitana
Río Maipo Bajo (entre río Mapocho y desembocadura)	3.363	Metropolitana Valparaíso

### 3.1.1. Subcuenca Río Maipo Medio

Según DGA (2021), la subcuenca del río Maipo Medio abarca el área que drena el río Maipo desde su salida de la cordillera de los Andes, donde se une con el río Colorado, hasta el sector donde se une con el río Mapocho, abarcando un área de 2.574 km<sup>2</sup>. En esta subcuenca, el río Maipo recibe los afluentes del río Clarillo y del río Angostura, el cual se forma por la unión del río Peuco y el estero Codegua. Los recursos superficiales de los afluentes en la subcuenca del río Maipo Medio provienen del régimen pluvial, mostrando una oferta hídrica anual de 38 m<sup>3</sup>/s. En la Figura 3.1 se observa el área que cubre la subcuenca del río Maipo Medio y sus principales afluentes.

#### 3.2.1. Subsubcuenca del Río Clarillo

Según CONAF (1996), la subsubcuenca del río Clarillo nace como un valle andino cuyo río principal (río Clarillo) forma una hoya hidrográfica menor alimentada por una red de afluentes permanentes y temporales. El río Clarillo se forma a partir de la confluencia del Cajón de Los Cipreses y Cajón de Los Lunes a los 1.100 m s.n.m. dentro del Parque Nacional Río Clarillo. La ubicación de esta subsubcuenca, así como sus drenajes principales, se observa en la Figura 3.2.

La estacionalidad climática determina amplias oscilaciones en los caudales de los ríos, los que presentan un régimen mixto con alimentación pluvial en invierno (julio y agosto) y nival durante la primavera (noviembre y diciembre); además, entre enero a mayo los caudales son mínimos y su única fuente proviene de vertientes, alcanzando caudales de hasta 4 m<sup>3</sup>/s en diciembre y 2 m<sup>3</sup>/s en mayo (Becerra, 2020; Wegmann, 2016).

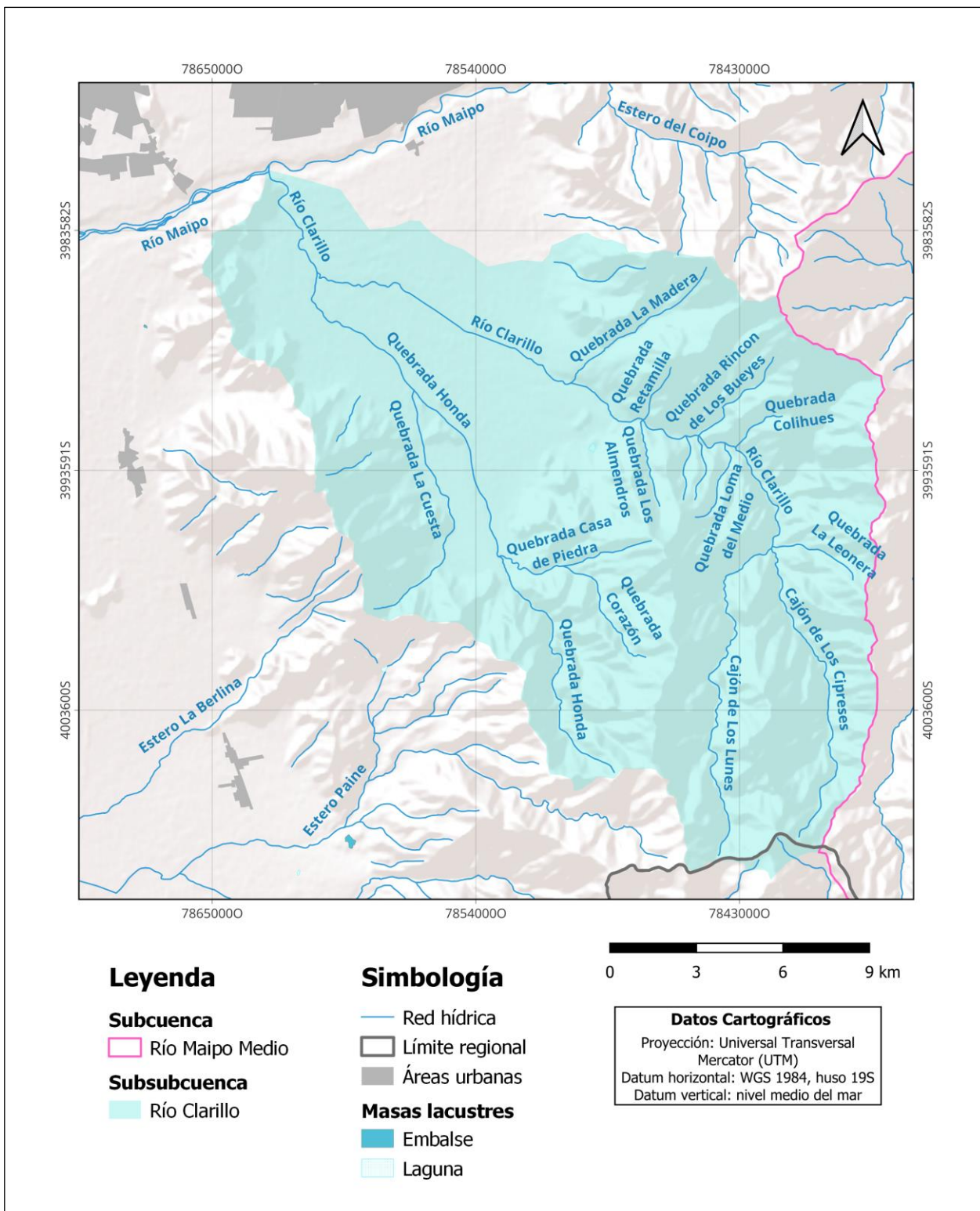


Figura 3.2: Subsubcuenca del río Clarillo y drenajes principales.

## 4. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo se distinguen las siguientes metodologías: muestreo y procedimientos analíticos, tanto para litologías alteradas como muestras de agua superficial; caracterización mineralógica de zonas de alteración; y caracterización química de aguas superficiales. Dichas metodologías buscan dar respuesta a los objetivos específicos planteados con anterioridad, y de esta forma, responder el objetivo general de la presente memoria de título. En la Figura 4.1 se observa el procedimiento de trabajo, específicamente las metodologías utilizadas y que objetivo específico buscan responder.

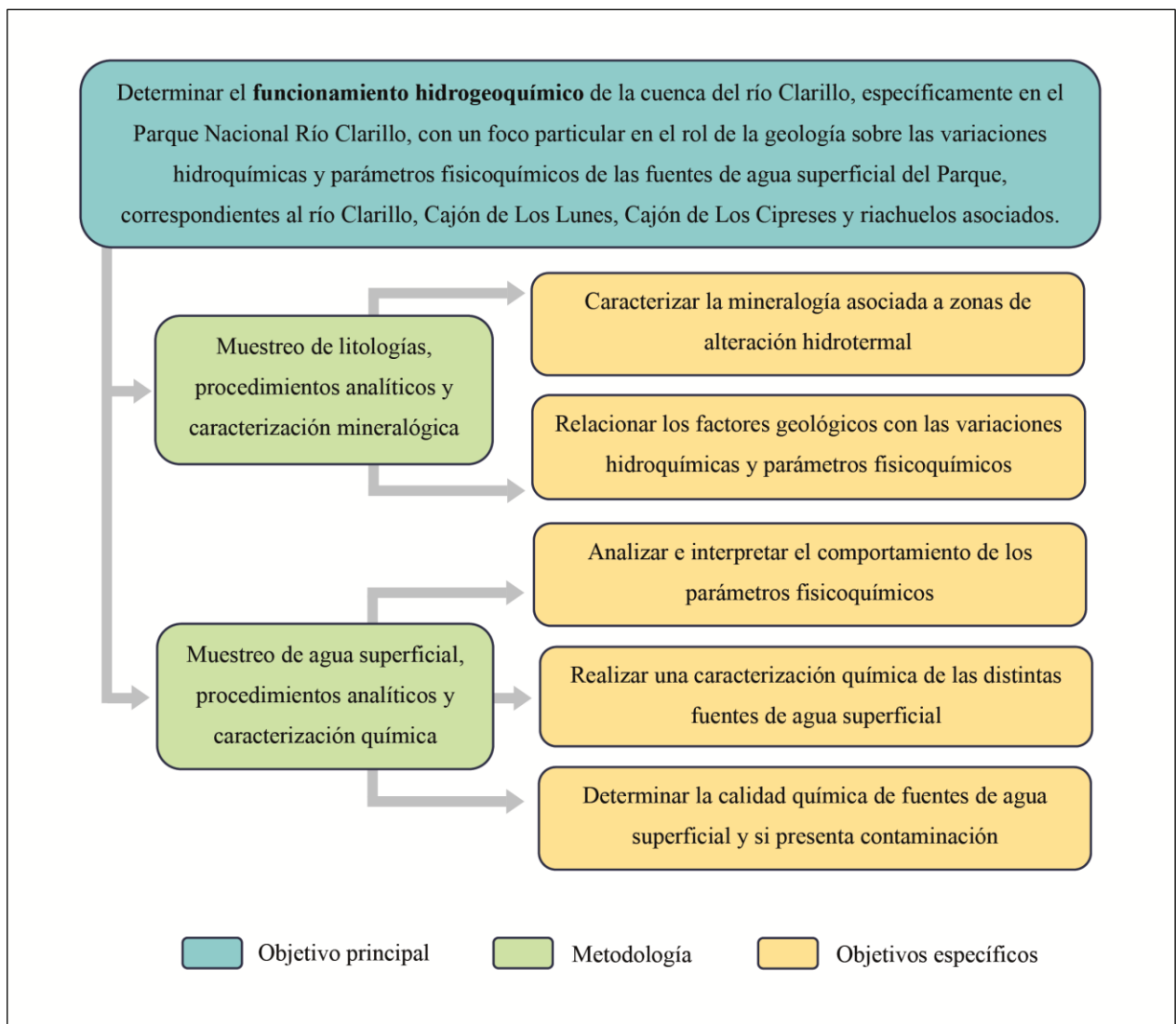


Figura 4.1: Metodología utilizada para los objetivos del estudio.

## **4.1. Muestreo y Procedimientos Analíticos**

### **4.1.1. Litologías de Zonas de Alteración**

Para el desarrollo del presente trabajo se seleccionaron 2 puntos asociados a zonas de alteración hidrotermal ubicados en la cabecera del Cajón de Los Cipreses, los cuales fueron estudiados durante una salida de terreno realizada en el mes de diciembre del año 2019. Se obtuvieron 2 muestras de roca alterada (M1 y M2) para su posterior análisis microscópico y de laboratorio.

Con fin de determinar de las fases minerales presentes, las muestras fueron enviadas al Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción, donde se elaboró un corte transparente a partir de la muestra M-1, y se analizaron ambas muestras mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX) en la roca total. De esta forma se busca tener una primera aproximación a la mineralogía característica del sector a través de la microscopía óptica, para luego realizar un estudio más detallado de la química mineral mediante DRX.

El corte transparente de la muestra M-1 fue revisado mediante un microscopio petrográfico binocular OPTIKA ubicado en las dependencias del Departamento de Geología de la Universidad de Concepción, donde se identificó la mineralogía de sección transparente y metálica.

Luego, las muestras fueron analizadas mediante DRX utilizando un equipo Bruker® D4 Endeavor, operado con radiación de Cu y filtro de radiación  $K\beta$  de Ni. Además, se realizó una identificación y semicuantificación automática (S-Q) de los minerales reconocidos mediante el software DIFFRACT EVA de Bruker® y la base de datos PDF-4/Minerals 2023 de ICDD®.

### **4.1.2. Agua Superficial**

Para el estudio de cursos de agua superficial se seleccionaron 40 puntos a lo largo de diversos ríos y quebradas dentro del Parque Nacional Río Clarillo, los cuales fueron monitoreados durante 9 campañas de terreno desarrolladas entre los años 2019 y 2020.

Cada muestra se identificó con un código asociados al número de campaña de muestreo y al punto monitoreado. Las coordenadas de los puntos, así como la altura de ellos, se obtuvieron con GPS.



En total se analizaron *in situ* los parámetros fisicoquímicos (temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y pH) de 116 muestras con un multiparámetro portátil Hach modelo HQ40D. Además, se tomaron 88 muestras de cursos superficiales para su posterior análisis de composición química (elementos mayores, menores y traza), las cuales se almacenaron en tubos de polipropileno modelo Falcon de 50 ml. Para el análisis de cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) las muestras fueron filtradas a  $0,2 \mu\text{m}$  y diluidas con agua milli-Q para obtener una conductividad de  $0,5 \text{ mS/cm}$ . En cambio, para los elementos traza (Al, As, B, Cd, Li y V) las muestras fueron filtradas a  $0,45 \mu\text{m}$  y acidificadas a  $\text{pH} < 2$  con ácido nítrico. Por último, para el análisis de alcalinidad, las muestras fueron únicamente filtradas a  $0,45 \mu\text{m}$ .

Los elementos mayores, menores y traza, así como la alcalinidad, se analizaron en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Pontificia Universidad Católica de Chile mediante diferentes equipos. Las concentraciones de cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) se determinaron en un Cromatógrafo Iónico marca Metrohm modelo 882 Compact IC plus, mientras que los elementos trazas (Al, As, B, Cd, Li y V) se determinaron en un espectrómetro de absorción atómica Perkin-Elmer modelo 7300. Por último, la alcalinidad se determinó mediante un titulador automático marca Metrohm modelo Titrino 794.

## 4.2. Caracterización Mineralógica de Zonas Alteradas

A partir de la descripción mineralógica mediante microscopía óptica y de los resultados de laboratorio (DRX, identificación y semicuantificación automática) se identificó las fases minerales presentes asociadas a la zona de alteración mapeada en Marti *et al.* (2023) ubicada en la cabecera del Cajón de Los Cipreses, correspondientes a minerales de secciones transparentes y mineralización metálica.

Los resultados se exponen mediante fotomicrografías, gráficos (difractogramas) y tablas que muestren las fases minerales presentes y, de esta forma, identificar asociaciones minerales y a qué tipo de alteración hidrotermal se les asocia. Dichas figuras fueron elaboradas y modificadas en el *software* Adobe Illustrator, mientras que las tablas se elaboraron en Microsoft Office Word.

### 4.3. Caracterización Química de Aguas Superficiales

A partir de los resultados de laboratorio se caracterizaron los cursos de agua superficial a través de diagramas de Piper y Stiff, los cuales fueron elaborados y modificados mediante el lenguaje de programación Python3 y los *softwares* Microsoft Office Excel, QGis y Above Illustrator. Además, se utilizaron análisis estadísticos (diagrama de caja, matriz de correlación de Pearson y análisis de componentes principales) para realizar asociaciones químicas y visualizar tendencias, los cuales fueron elaborados mediante el *software* XLSTAT para Excel.

Para la validación de los análisis químicos realizados, se verificó la electroneutralidad mediante el balance iónico, es decir, que la suma de cargas de los cationes sea igual a la suma de cargas de los aniones en cada solución. El error en el balance iónico se obtuvo a partir de la siguiente formula:

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

En general, el error admitido debe ser inferior al 15 % (Johnsson & Barringer, 1993; Senarathne et al., 2020), cuya variación depende de factores como la conductividad eléctrica (CE) y el pH (Custodio & Llamas, 1983), por lo que las muestras que presentaron un error mayor a este fueron eliminadas del registro. Cabe destacar que la gran mayoría de las muestras obtenidas se encontraban bajo el 10% de error, y en menor medida, bajo el 13%. El detalle para cada muestra se puede observar en el Anexo 1.

Para un correcto procesamiento de datos, las concentraciones de elementos mayores, menores y traza que se encontraban bajo el límite de detección fueron reemplazadas por la mitad del límite correspondiente. Siguiendo con ello y dependiendo del equipo utilizado, los límites de detección se pueden observar en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Límite de detección (LD) de los elementos mayores, menores y traza.**

Elemento	LD (ppm)	Elemento	LD (ppm)	Elemento	LD (ppm)	Elemento	LD (ppm)
Na <sup>+</sup>	0,154	Cl <sup>-</sup>	0,233	Al	0,010	Li	0,010
K <sup>+</sup>	0,207	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,009	As	0,006	V	0,010
Ca <sup>2+</sup>	0,211	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,063	B	0,010		
Mg <sup>2+</sup>	0,112	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,149	Cd	0,002		

## 5. RESULTADOS

Para identificar las fases minerales presentes en la zona de alteración hidrotermal ubicada en la cabecera del Cajón de Los Cipreses, se obtuvieron 2 muestras de rocas alteradas obtenidas durante una campaña de muestreo realizada el año 2019. Dichas muestras se analizaron mediante técnicas microscópicas y de laboratorio, donde se reconocieron minerales transparentes, mineralización metálica y la alteración hidrotermal asociada a dichos minerales.

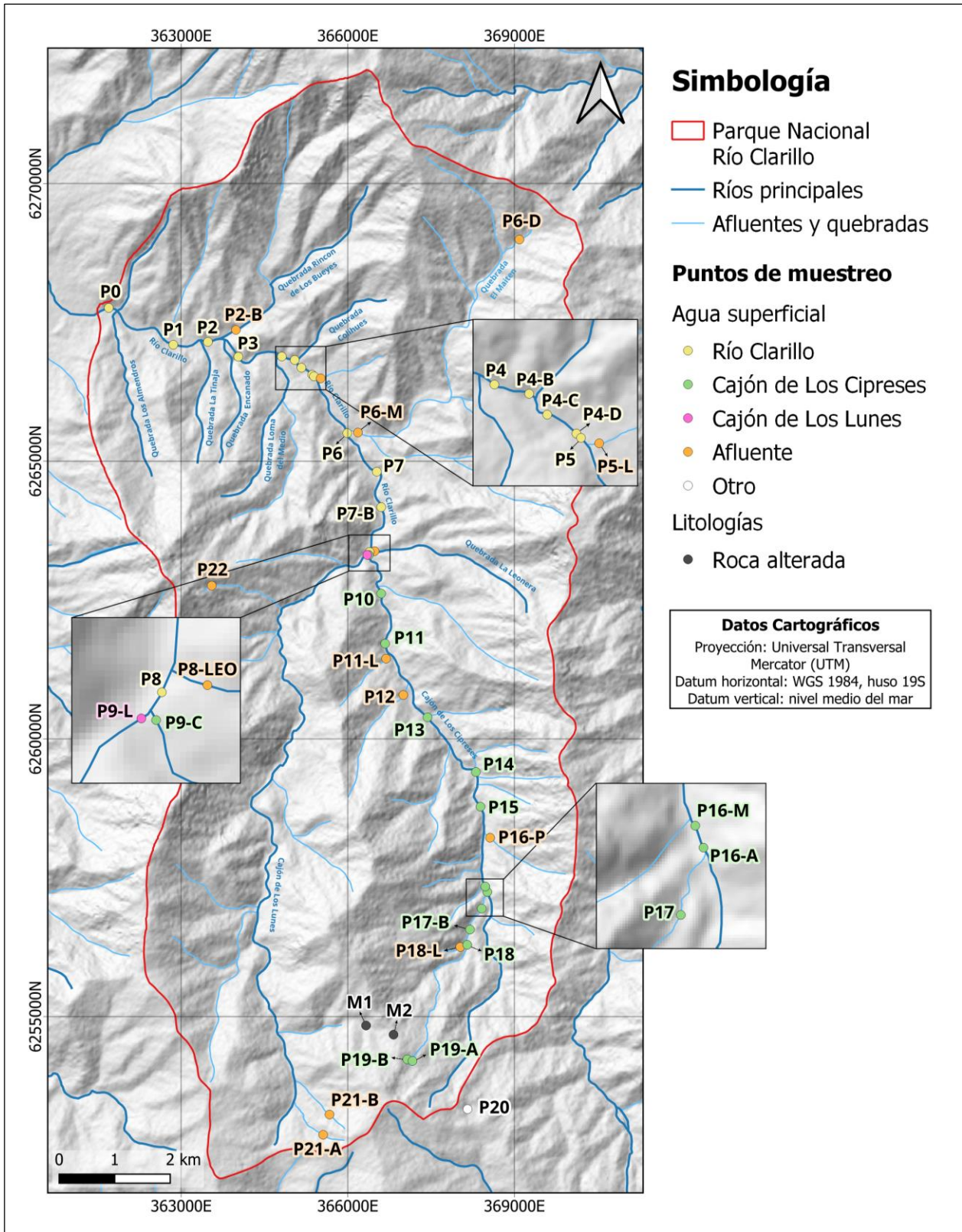
Además, para realizar una caracterización hidrogeoquímica de los cursos de agua superficial en el Parque Nacional Río Clarillo, se analizaron muestras de agua a través de sus parámetros fisicoquímico y concentración de elementos mayores, menores y trazas. Para ello, se estudiaron 40 puntos a lo largo de cursos de agua superficial en el Parque Nacional Río Clarillo, los cuales fueron monitoreados durante 9 campañas de terreno desarrolladas entre los años 2019 y 2020, donde se muestrearon varios puntos más de una vez.

El detalle de las campañas realizadas se observa en la Tabla 5.1, mientras que la ubicación de los puntos monitoreados, tanto de litología como de agua superficial, se observa en la Figura 5.1.

**Tabla 5.1: Información sobre las campañas de muestreo realizadas.**

<b>Código de la campaña</b>	<b>Fecha</b>	<b>Nº de puntos monitoreados</b>	<b>Tipo de muestra obtenida</b>
16	23 de marzo 2019	9	Agua
18	28 al 30 de marzo 2019	16	Agua
21	6 al 8 de mayo 2019	10	Agua
23	25 de mayo 2019	1	Agua
24	31 de mayo al 2 de junio 2019	13	Agua
30	6 al 10 de septiembre 2019	15	Agua
31	5 de octubre 2019	7	Agua
32	11 al 13 de enero 2020	16	Agua
33	Diciembre 2019	2	Roca
34	13 al 17 de marzo 2020	29	Agua





**Figura 5.1: Mapa de ubicación de puntos de monitoreo y muestreo.** En color amarillo, verde, rosado y naranja se observan los puntos de monitoreo y de donde se obtuvieron las muestras de agua superficial, mientras que en color negro los puntos de muestreo de litologías alteradas.

## 5.1. Mineralogía

Para realizar una caracterización mineralógica de la zona de alteración hidrotermal, se seleccionaron 2 puntos asociados a dicha alteración ubicados en la cabecera del Cajón de Los Cipreses, desde donde se obtuvieron las 2 muestras que fueron analizadas mediante análisis con microscopio petrográfico y DRX. Los resultados de dichos análisis se presentan a continuación.

### 5.1.1. Descripción Mineralógica en Microscopio Óptico

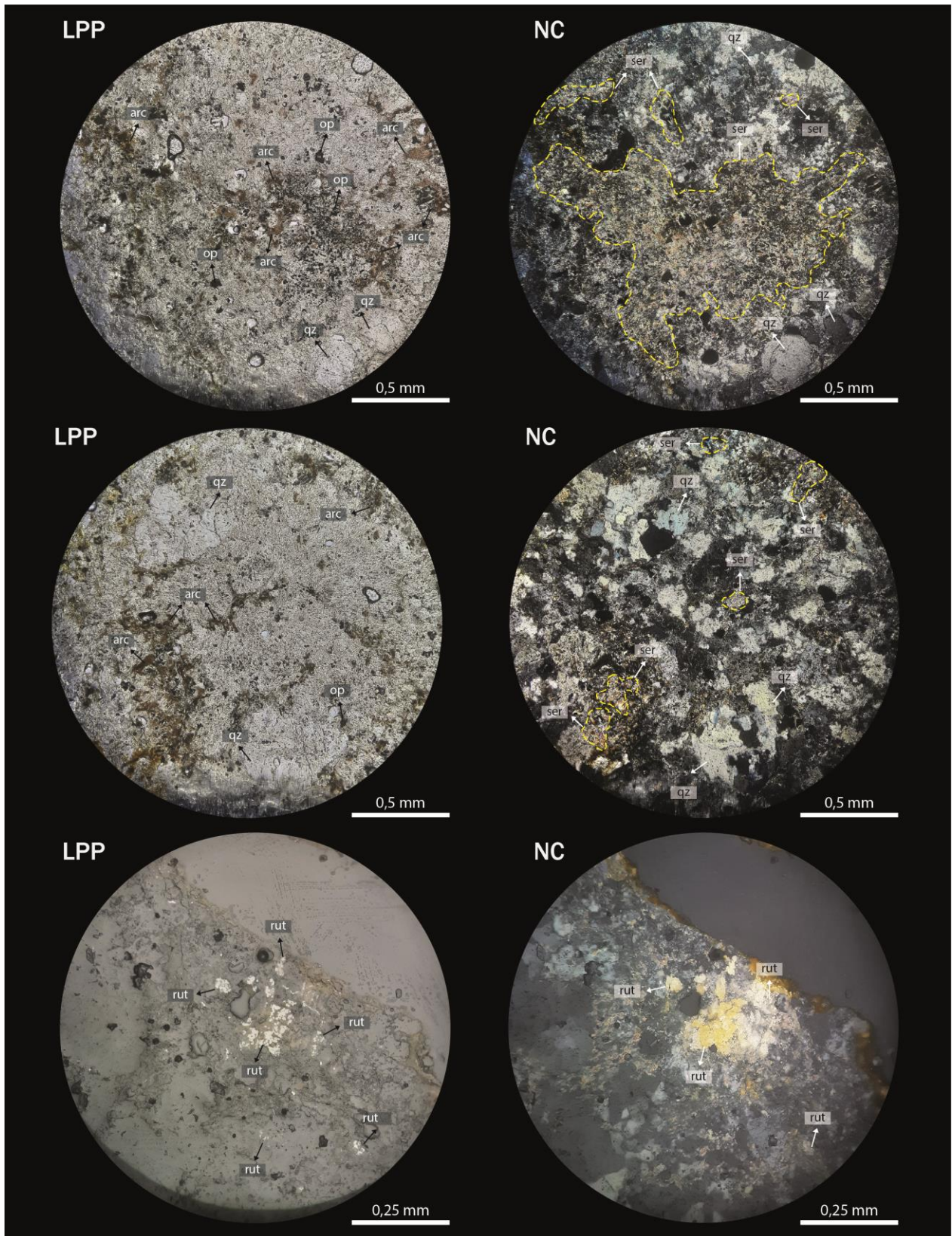
Se obtiene y describe microscópicamente la muestra M-1 utilizando un microscopio binocular Optika. Los minerales observados se muestran en la Tabla 5.2 y Fotomicrografía 5.1.

Las principales fases minerales identificadas corresponden a los minerales translucidos cuarzo y sericita, ambos de origen secundario y asociados a una alteración fílica o cuarzo-sericítica (T: 200°-250°C, pH: 5-6) desarrollada de manera pervasiva, la cual oblitera por completo la textura y mineralogía primaria de la roca original. En el caso del cuarzo, este se encuentra ampliamente distribuido en el corte transparente, con forma anhedral y en gran parte como agregado policristalino (puntos triples). En cambio, la sericita, agregado microcristalino de muscovita, se encuentra en menor cantidad en comparación al cuarzo dispuesta en forma de cúmulos. Además, a esta alteración fílica se le asocia la escasa mineralización metálica de rutilo dispuesta de forma diseminada. Por otro lado, se identifica en menor cantidad minerales de arcilla, también de origen secundario, asociados a una alteración argílica intermedia (T: <150°-250°C, pH: 3-5) desarrollada de manera incipiente. Al igual que la muscovita, los minerales de arcilla se encuentran dispuestos principalmente en cúmulos, aunque también se puede identificar de manera diseminada.

**Tabla 5.2: Mineralogía y alteración presente en la muestra M-1.** Se muestran los minerales identificados, el tipo de alteración a la cual estarían asociados y el grado en que se desarrolla la alteración.

Minerales	Tipo de mineral	Tipo de alteración	Grado de alteración
Cuarzo	Transparente	Fílica o cuarzo-sericítica	Pervasiva
Sericita	Transparente		
Rutilo	Opaco		
Arcillas	Transparente	Argílica intermedia	Incipiente



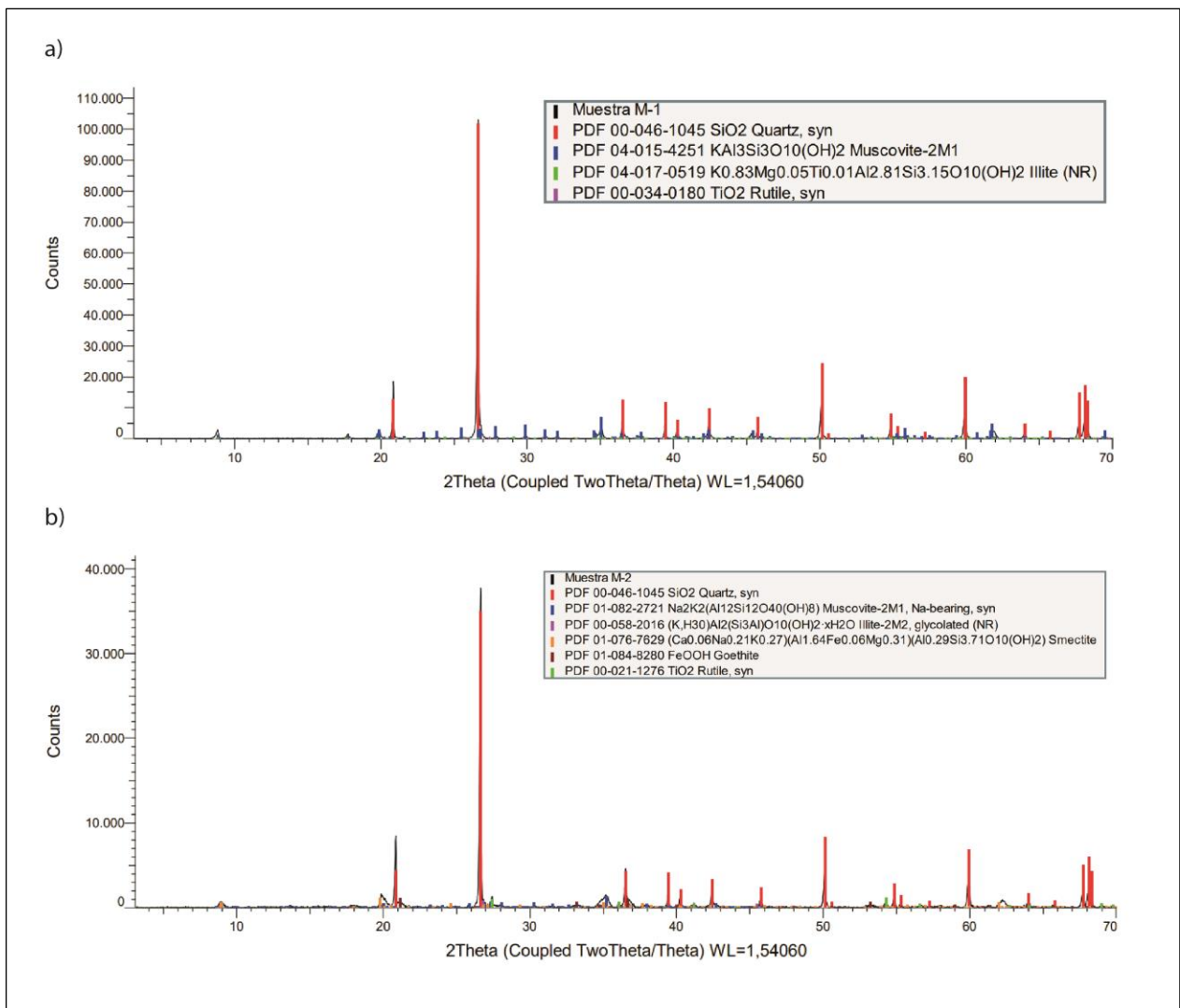


**Fotomicrografía 5.1:** Secciones transparentes de minerales M-1. LPP: luz polarizada plana, NC: nicoles cruzados, ser: sericita, qz: cuarzo, arc: arcilla, op: mineral opaco, rut: rutilo.

### 5.1.2. Análisis Difracción de Rayos X (DRX)

Con el fin de identificar las fases cristalinas de las 2 muestras obtenidas en zonas de alteración se utiliza el análisis por DRX para roca total. Los minerales identificados, así como sus porcentajes en cada muestra, se observan en la Figura 5.2 y Tabla 5.3.

Según Klein & Hurlbut (1997), la difracción de rayos X (DRX) es una técnica analítica que permite identificar fases minerales según su estructura cristalina. Consiste en un bombardeo de rayos X sobre una muestra pulverizada al azar y medir los ángulos de difracción de los rayos X según la ley de Bragg, los cuales son específicos para cada mineral permitiendo su identificación.



**Figura 5.2: Difractograma de las muestras M-1 y M-2.** Se observan la intensidad de los diferentes minerales. a) muestra M-1 se identifica cuarzo, muscovita, illita y rutilo. b) muestra M-2 se identifica cuarzo, muscovita, illita, esmectita, goethita y rutilo.

**Tabla 5.3: Fases minerales y porcentajes presentes en muestra M-1 y M-2.**

Muestra	Mineralogía semicuantitativa (%)					
	Cuarzo	Muscovita	Illita	Rutilo	Esmectita	Goethita
<b>M-1</b>	62,0	36,6	1,4	0,1	-	-
<b>M-2</b>	63,4	22,8	4,7	2,1	4,1	2,8

Al observar los resultados destaca que para ambas muestras los minerales predominantes son cuarzo y muscovita, correspondientes a casi la totalidad de la roca. Le sigue la presencia de arcillas detentándose 2 tipos: mientras que en la muestra M-1 solo se distingue illita, la muestra M-2 presenta tanto illita como esmectita en porcentajes similares. Por último, en la muestra M-1 se detecta rutilo en muy baja cantidad, mientras que en la muestra M-2 se presenta rutilo y goethita en porcentajes similares.

## 5.2. Agua Superficial

Para analizar las variaciones de parámetros fisicoquímicos y caracterizar hidrogeoquímicamente de los cursos de agua superficial en el Parque Nacional Río Clarillo, se seleccionaron 40 puntos a lo largo de ríos y quebradas ubicados en dicha área protegida y se analizaron mediante mediciones *in situ* y de laboratorio. Los resultados de los análisis se presentan a continuación.

### 5.2.1. Parámetros Fisicoquímicos

En total se midieron en 115 muestras parámetros fisicoquímicos *in situ* (temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y pH) a lo largo de los 40 puntos seleccionados observados en la Figura 5.1, donde se midió más de una vez en ciertos puntos asociado a campañas distintas. Los resultados de estas mediciones se observan en el Anexo 2.

Respecto a las mediciones *in situ*, el rango de temperatura ( $T^{\circ}$ ) varió entre los 5,8 y 27,7 °C dependiendo del mes y hora del muestreo. El rango de conductividad eléctrica (CE) vario entre 52,0 y 554,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un promedio de 250,8  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El rango de oxígeno disuelto (OD) se encuentra entre 1,61 y 10,79 mg/l, con un promedio de 8,51 mg/l. Por último, el rango de pH vario entre 3,06 y 9,05, con un promedio de 7,77.

Para observar y representar de mejor forma las variaciones y tendencias de pH, conductividad eléctrica (CE) y oxígeno disuelto (OD) registradas a lo largo de los cursos de agua, se obtuvieron los promedios en los puntos donde existía más de una medición. Para este análisis no se consideró la temperatura ya que, al ser todas muestras de aguas naturales superficiales, las variaciones de ella responden más al momento de la medición (mes y hora de muestreo) que a factores geológicos. Además, se consideró como flujos principales los ríos Los Cipreses y Clarillo, ya que concentran la mayor cantidad de mediciones. Para este caso, el Cajón de Los Lunes, al tener muy pocas muestras debido a la dificultad del acceso por la escarpada topografía, se considerará como afluente para la interpretación de los datos y tendencias.

En la Tabla 5.4 se observan los valores de parámetros fisicoquímicos utilizados para la representación de los datos, considerando los promedios en los puntos con más de una muestra. Además, en las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 se observan las variaciones de los parámetros fisicoquímicos (CE, OD y pH respectivamente) a lo largo de los ríos Los Cipreses y Clarillo, así como de los puntos donde se juntan con los diversos afluentes. Por último, en la Figura 5.6 se observa una comparación entre dichas variaciones a lo largo del perfil de los cursos principales, comenzando por la zona de mayor altura en la cabecera del Cajón de Los Cipreses (P19-A) hasta el sector de menor altura en la entrada del Parque Nacional (P0).

Respecto a la conductividad eléctrica (CE), tanto en la Figura 5.3 como en la Figura 5.6 se observa una tendencia ascendente desde la cabecera del Cajón de Los Cipreses en el punto P19-A hacia la junta con otro curso de agua en el punto P16-A, alcanzando su valor máximo de 554,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , seguido de una tendencia descendente general hasta la entrada del Parque Nacional en el punto P0. En el sector de la confluencia, se observa una clara diferencia entre el Cajón de Los Cipreses y el Cajón de Los Lunes, con valores de 403,5 y 121,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente, mientras que después de la confluencia, en el río Clarillo, se observa un valor de 274,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el cual muestra una tendencia relativamente estable hasta la salida del Parque.

En cuanto al oxígeno disuelto (OD), en las figuras 5.4 y 5.6 se observa una tendencia levemente ascendente, la cual se mantiene a lo largo de todo el curso de los ríos principales (Los Cipreses y Clarillo), con valores entre 6,42 y 9,60 mg/l. Cabe mencionar que el punto P19-B presenta un valor anómalo de 1,61 mg/l, el cual se sale de la tendencia observada y de los valores promedio.

Por último, respecto al pH medido, en las figuras 5.5 y 5.6 se observa una tendencia descendente local entre los puntos P19-A y P18 (6,31 y 4,03 respectivamente), para luego seguir con una tendencia ascendente a lo largo de los ríos principales, con valores que van desde ácidos en la cabecera del Cajón de Los Cipreses, seguido por neutros y levemente alcalinos, hasta alcalinos a lo largo del río Clarillo. Además, se observa que en la mayor parte de los riachuelos y quebradas que se unen a los ríos principales, estos presentan valores neutros a alcalinos, con excepción de los puntos P21-A y P21-B en la cabecera del Cajón de Los Lunes.

**Tabla 5.4: Valores de parámetros fisicoquímicos a lo largo de los ríos principales y afluentes.** Los valores corresponden a los promedios de las muestras medidas en dicho punto, con excepción de los puntos que presentan un asterisco (\*), ya que solo se obtuvo una muestra en dicho sector. Además, en color gris se destacan los cursos menores y quebradas asociadas a los ríos principales.

Punto	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	OD (mg/l)	pH	Punto	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	OD (mg/l)	pH
P19-A*	259,0	6,42	6,31	P9-L	121,1	8,28	8,00
P19-B*	247,0	1,61	6,98	P8	274,2	8,81	7,88
P18*	367,0	7,81	4,03	P8-LEO	171,3	9,14	8,36
P18-L*	187,6	7,76	7,96	P7-B*	286,0	9,60	7,60
P17-B*	348,0	8,72	5,52	P7	277,0	8,64	8,62
P17*	339,0	7,29	4,36	P6-D*	128,5	7,62	7,98
P16-A*	554,0	8,42	4,56	P6-M	223,6	8,85	8,09
P16-M*	478,0	8,39	4,77	P6	259,0	8,85	8,21
P16-P	184,2	7,84	7,99	P5-L	171,3	8,45	7,79
P15*	450,0	7,66	7,36	P5	257,0	8,60	8,33
P14	420,0	8,16	7,90	P4-D	256,0	8,69	8,15
P13	367,0	8,52	6,95	P4-C	247,0	8,51	8,60
P12	286,5	8,21	8,08	P4-B	248,0	8,90	8,57
P11-L*	158,5	8,53	8,01	P4	254,0	9,00	8,31
P11	353,0	8,25	7,14	P3	251,0	9,35	8,36
P10	353,0	8,31	7,21	P2-B	127,6	8,83	7,99
P9-C	403,5	8,42	7,88	P2	248,0	8,94	8,34
P21-A*	170,9	6,39	4,30	P1	245,0	8,76	8,18
P21-B*	139,6	3,36	3,06	P0	250,0	9,00	8,12
P22*	52,0	9,43	7,72				



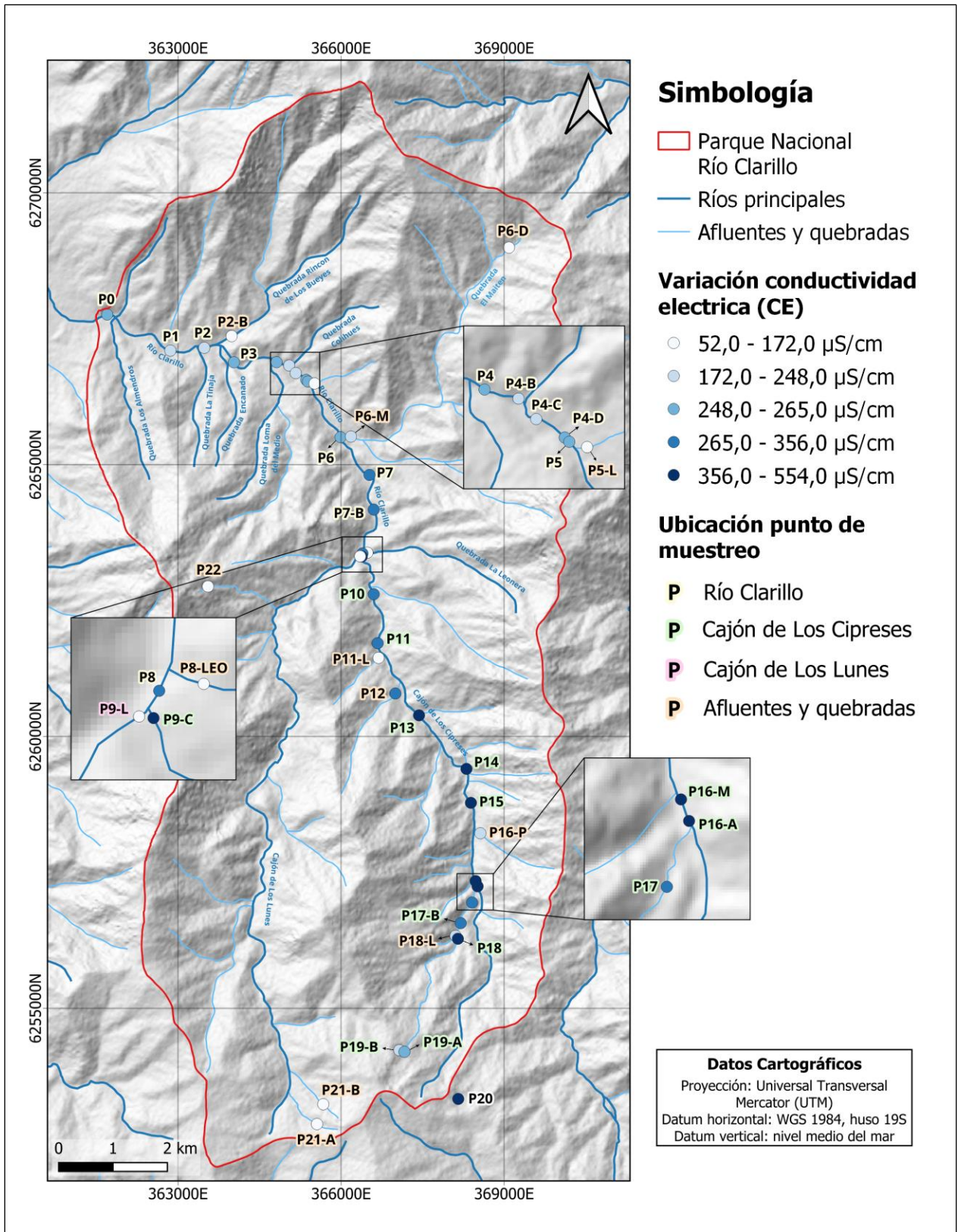


Figura 5.3: Mapa variación de conductividad eléctrica (CE) en cursos principales y afluentes.



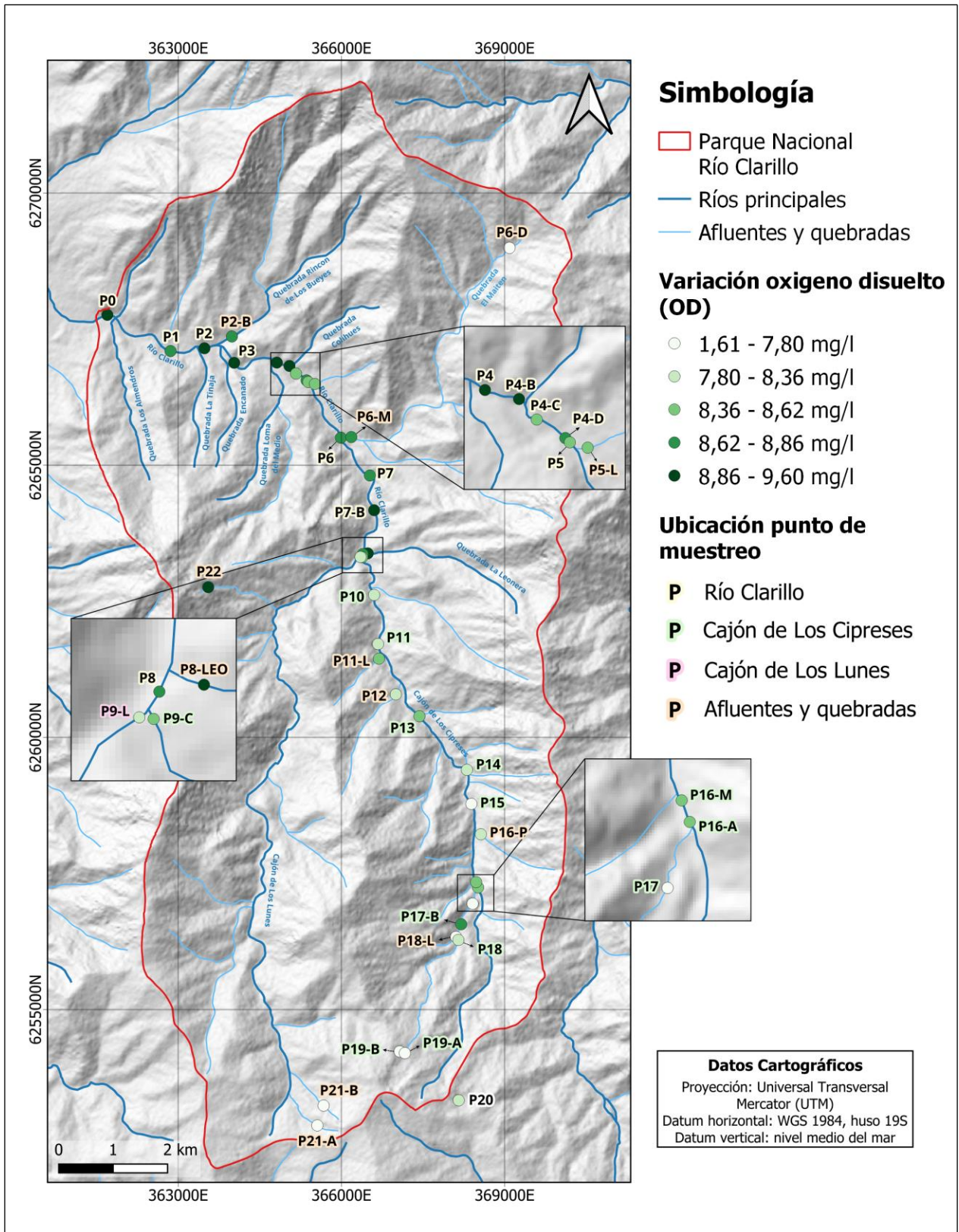


Figura 5.4: Mapa variación de oxígeno disuelto (OD) en cursos principales y afluentes.

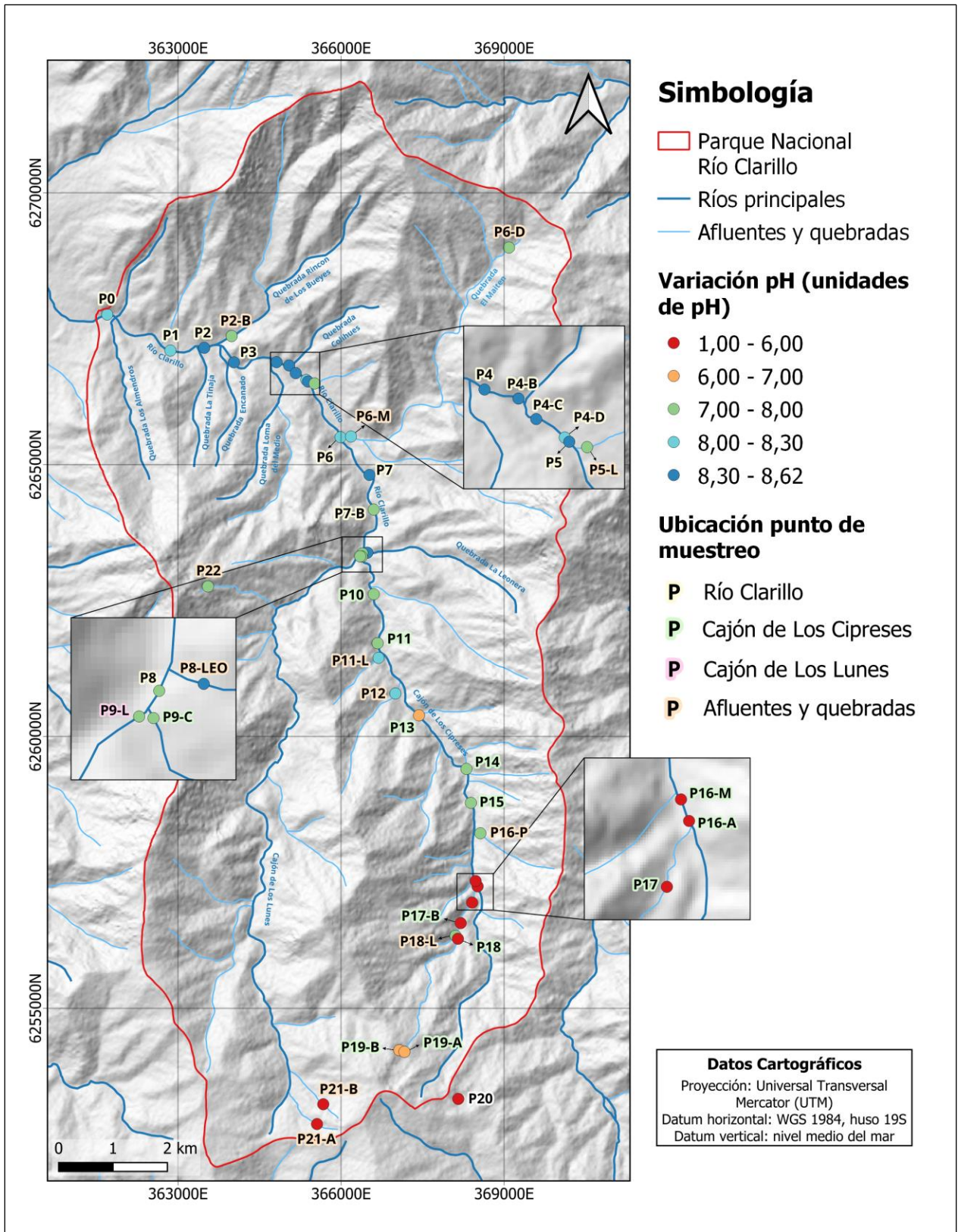
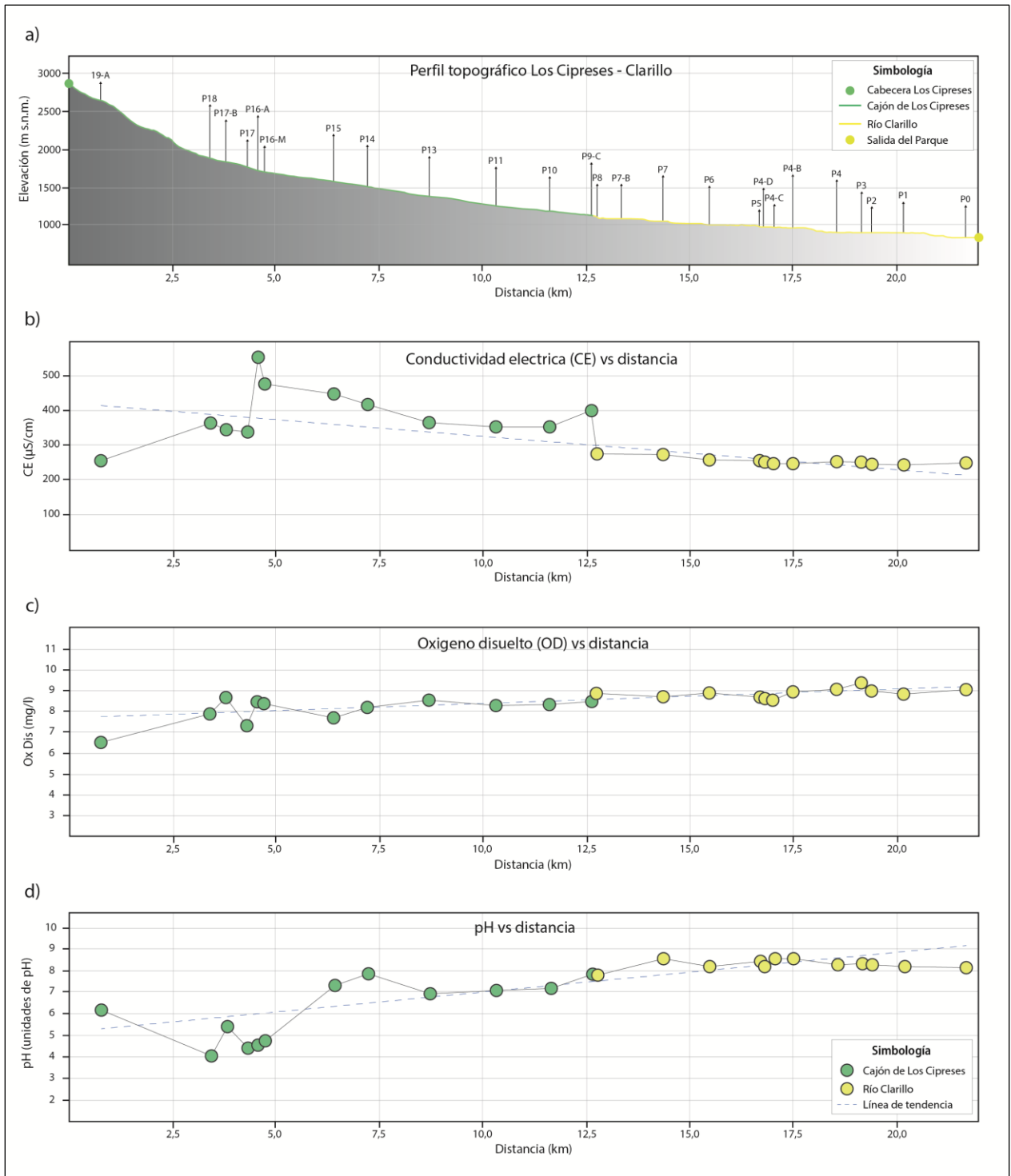


Figura 5.5: Mapa variación de pH en cursos principales y afluentes.





**Figura 5.6: Variación de los parámetros fisicoquímicos a lo largo de los ríos principales.** a) perfil topográfico a lo largo de los cursos principales (Los Cipreses y Clarillo). El inicio del perfil se ubica en la cabecera del Cajón de Los Cipreses (mayor altura) y avanza hacia la entrada del Parque Nacional (menor altura). b) gráfico variación de conductividad eléctrica (CE) en relación con la distancia (km). c) gráfico variación de oxígeno disuelto (OD) en relación con la distancia (km). d) gráfico variación de pH en relación con la distancia (km).

## 5.2.2. Hidroquímica

En total se obtuvieron 88 muestras de agua superficial a lo largo de los 40 puntos seleccionados observados en la Figura 5.1, donde se midieron en laboratorio concentraciones de elementos mayores (cationes y aniones), elementos menores y trazas. Los resultados se presentan a continuación.

### 5.2.2.1. Elementos Mayores

Corresponden a mediciones de aniones ( $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) presentes en las muestras de agua superficial con las mayores concentraciones medidas. Además, se incluyen los valores de alcalinidad total interpretados y representados como la suma de  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . Los resultados de estas mediciones se observan en el Anexo 3.

Respecto a los aniones, las concentraciones máximas y mínimas del ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) son de 2,637 y 0,117 ppm respectivamente, con un promedio de 0,955 ppm; las concentraciones máximas y mínimas del ion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) son de 290,724 y 2,755 ppm, con un promedio de 75,727 ppm; y las concentraciones máximas y mínimas de la suma los iones carbonato y bicarbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ ) son de 86,500 y 0,965 ppm respectivamente, con un promedio de 45,489 ppm.

Respecto a los cationes, las concentraciones máximas y mínimas del ion sodio ( $\text{Na}^+$ ) son de 13,888 y 3,826 ppm respectivamente, con un promedio de 9,070 ppm; las concentraciones máximas y mínimas del ion potasio ( $\text{K}^+$ ) son de 3,248 y 0,252 ppm respectivamente, con un promedio de 0,880 ppm; las concentraciones máximas y mínimas del ion calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) son de 73,670 y 4,076 ppm respectivamente, con un promedio de 32,200 ppm; y las concentraciones máximas y mínimas del ion magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) son 11,459 y 0,455 ppm respectivamente, con un promedio de 5,042 ppm.

Para observar y representar de mejor forma las variaciones de las concentraciones de aniones y cationes registradas a lo largo de los cursos de agua, se obtuvieron los promedios en los puntos donde existía más de una medición. Además, se consideró como flujos principales los ríos Los Cipreses y Clarillo por presentar la mayor cantidad de mediciones. Para el caso del Cajón de Los Lunes, este se considerará como afluente debido a la poca cantidad de muestras recolectadas. En la Tabla 5.5 se observan las concentraciones de aniones y cationes utilizados para la representación de datos, considerando los promedios en los puntos con más de una muestra.

**Tabla 5.5: Valores de cationes y aniones a lo largo de los ríos principales y afluentes.** Los valores corresponden a los promedios de las muestras medidas en dicho punto, con excepción de los puntos que presentan un asterisco (\*), ya que solo se obtuvo una muestra en dicho sector. Además, en color gris se destacan los cursos menores y quebradas asociadas a los ríos principales

Punto	Aniones (ppm)			CATIONES (ppm)			
	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
P19-B*	0,241	73,853	53,000	5,926	0,555	29,133	5,005
P18-L*	0,313	74,540	30,398	4,761	0,104	29,720	5,544
P17*	0,192	202,234	0,965	9,311	1,017	39,445	10,692
P16-P*	0,531	40,175	53,558	7,692	0,104	30,042	3,307
P15*	0,482	290,724	6,273	11,086	1,188	73,670	11,459
P14*	0,682	262,301	12,063	10,995	1,265	69,068	10,338
P13*	0,598	223,521	20,748	10,582	0,892	64,652	9,477
P11-L*	0,510	23,290	54,500	8,893	0,104	27,171	3,145
P11*	0,708	188,928	33,293	10,647	1,121	59,481	9,004
P10*	0,788	172,853	44,873	10,761	0,761	59,278	8,757
P9-C	1,101	177,715	29,000	9,963	0,843	56,836	8,533
P21-A	0,919	57,143	0,965	7,683	1,167	4,076	5,802
P22	0,951	2,755	32,500	3,826	0,575	11,856	2,718
P9-L	0,553	28,502	28,797	6,744	0,836	14,796	2,177
P8	1,079	100,837	30,623	8,318	0,825	35,692	5,194
P8-LEO	0,820	23,850	63,426	9,710	0,372	22,593	4,110
P7	0,788	91,996	41,978	9,142	0,837	35,779	5,715
P6-M	1,163	32,591	83,073	11,862	0,868	31,229	5,512
P6	0,822	84,063	39,535	9,130	0,774	34,567	5,952
P5-L	0,591	4,722	70,552	8,917	0,235	21,901	2,685
P5	0,845	78,227	49,798	9,253	0,863	32,865	5,401
P4-D	0,679	74,769	48,733	9,102	0,733	32,177	5,540
P4-C	1,392	75,530	42,219	9,339	1,587	31,955	5,284
P4-B	0,918	75,370	49,357	9,429	0,811	32,233	5,468
P4	1,054	81,623	42,778	9,244	0,865	32,784	4,860
P3	1,241	78,973	41,830	9,601	0,923	32,508	4,998
P2-B	0,738	3,373	55,860	6,515	0,490	16,650	1,960
P2	1,307	77,278	46,561	9,839	1,062	32,814	4,604
P1	1,521	84,337	47,044	9,905	0,905	32,152	4,489
P0	1,580	74,070	46,305	9,816	0,938	32,569	5,112



**Tabla 5.6: Familias catiónicas y aniónicas, así como facies hidrogeoquímicas de las muestras de agua.** En color gris se destacan los cursos menores y quebradas asociadas a los ríos principales.

Punto	Familia catiónica	Familia aniónica	Facies hidrogeoquímicas
P19-B	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P18-L	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P17	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P16-P	Cálcica	Bicarbonatada	Bicarbonatada - cálcica
P15	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P14	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P13	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P11-L	Cálcica	Bicarbonatada	Bicarbonatada - cálcica
P11	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P10	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P9-C	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P21-A	Mixta	Sulfatada	Sulfatada - mixta
P22	Cálcica	Bicarbonatada	Bicarbonatada - cálcica
P9-L	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P8	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P8-LEO	Cálcica	Bicarbonatada	Bicarbonatada - cálcica
P7	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P6-M	Cálcica	Bicarbonatada	Bicarbonatada - cálcica
P6	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P5-L	Cálcica	Bicarbonatada	Bicarbonatada - cálcica
P5	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P4-D	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P4-C	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P4-B	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P4	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P3	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P2-B	Cálcica	Bicarbonatada	Bicarbonatada - cálcica
P2	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P1	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica
P0	Cálcica	Sulfatada	Sulfatada - cálcica

Respecto a la clasificación de las fuentes de agua según su concentración relativa de cationes, existe un claro predominio del campo de aguas cálcicas para todas las muestras, con excepción de punto P21-A, la cual no presenta un ion dominante.

Según su concentración relativa de aniones, las muestras de agua obtenidas en el Cajón de Los Cipreses, Cajón de Los Lunes (P9-L) y el río Clarillo se encuentran en el campo de aguas sulfatadas, así como en las muestras obtenidas en los puntos P18-L y P21-A, los cuales se ubican en las cercanías de las cabeceras de Los Cipreses y Los Lunes. Por otro lado, los afluentes restantes se ubican en el campo de aguas bicarbonatadas.

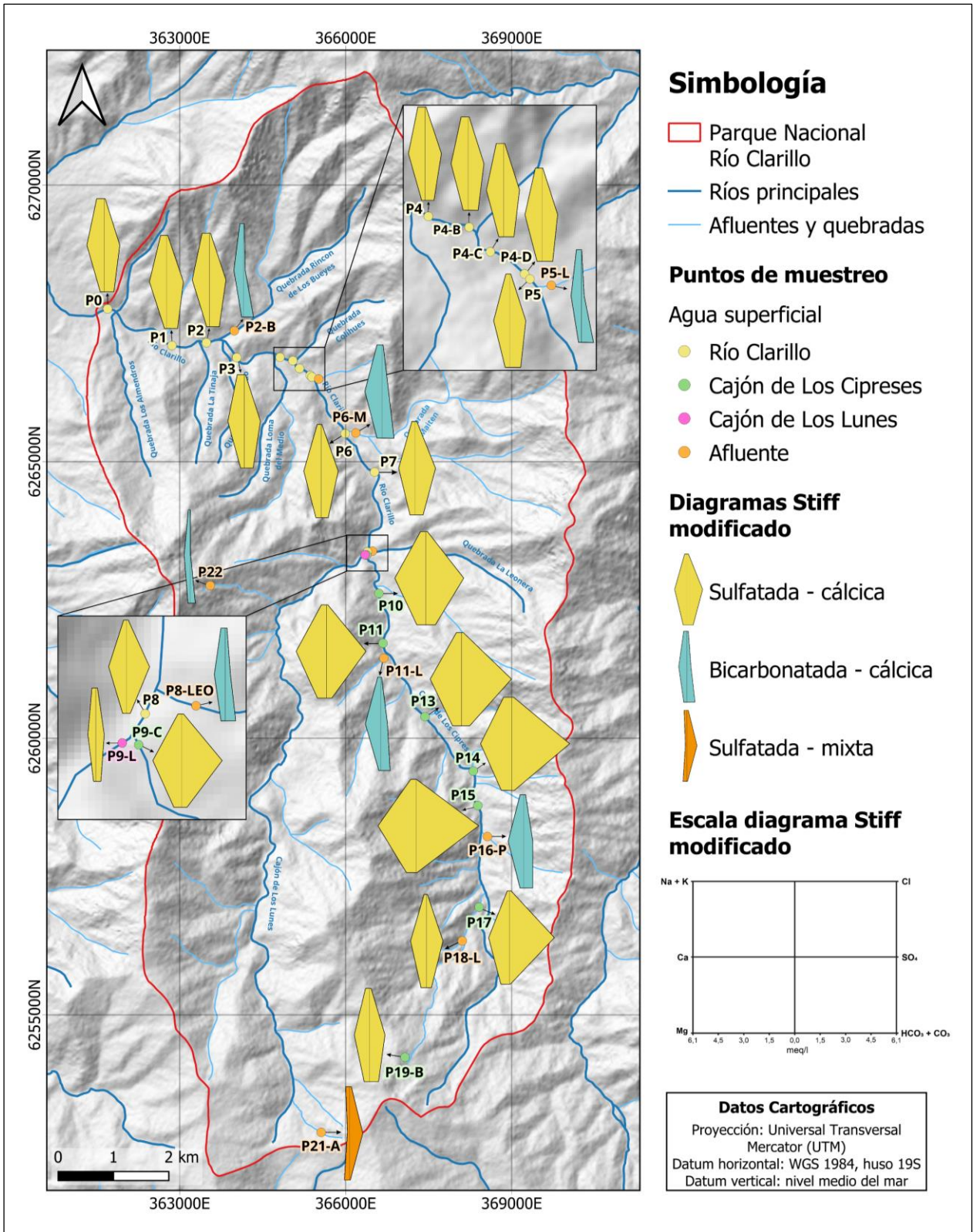
La proyección de las familias catiónicas y aniónicas en el diagrama romboidal de Piper indica un predominio de facies sulfatadas-cálcicas ( $\text{SO}_4^{2-}$  -  $\text{Ca}^{2+}$ ) en los cursos principales, así como en algunos afluentes (P9-L y P18-L). En cambio, en los afluentes y quebradas restantes predomina las facies bicarbonatadas-cálcicas ( $\text{HCO}_3^-$  -  $\text{Ca}^{2+}$ ), con una muestra (P21-A) en el campo de facie sulfatada-mixta ( $\text{SO}_4^{2-}$  - mixta).

Cabe mencionar que, aunque todas las muestras obtenidas en el Cajón de Los Cipreses y el río Clarillo se encuentran en el campo de facie sulfatada-cálcica, se observa una evolución desde zonas con elevadas concentraciones relativas de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el Cajón de Los Cipreses hacia zonas con menores concentraciones relativas de este ion en el río Clarillo, acercándose hacia el campo de aguas tipo bicarbonatada-cálcica (Figura 5.7).

Otra forma de representar la composición de las muestras de agua superficial a partir de sus elementos mayores es a través del diagrama modificado de Stiff (Stiff, 1951), los cuales permiten estudiar la variación química de las muestras medidas según su distribución espacial (Figura 5.8). Este diagrama consiste en un polígono formado a partir de 3 ejes horizontales dividido al centro por 1 eje vertical correspondiente al 0, donde en cada uno se representa un catión a la izquierda y un anión a la derecha en meq/l (Appelo & Postma, 2005).

Al observar los diagramas de Stiff es posible diferenciar 3 tipos de agua según su grado de mineralización: de menor a mayor se identifican los afluentes y quebradas, seguido de aguas pertenecientes al río Clarillo y, por último, las aguas del Cajón de Los Cipreses. Además, es posible observar que el principal ion que varía a lo largo de las muestras de aguas es el  $\text{SO}_4^{2-}$ . Esto se hace evidente al comparar la mineralización de los cursos principales (río Clarillo y Los Cipreses) ya que, aunque ambas son de tipo sulfatada-cálcica, la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  es mayor en las muestras obtenidas en el Cajón de Los Cipreses y disminuye en las aguas del río Clarillo.





**Figura 5.8: Diagramas de Stiff modificado de las muestras de agua.** Los colores de los diagramas hacen referencia a las facies hidrogeoquímicas de las muestras, siendo el color amarillo aguas  $SO_4^{2-} - Ca^{2+}$ , color celeste aguas  $HCO_3^- - Ca^{2+}$  y color naranja aguas  $SO_4^{2-} - mixtas$ .

### 5.2.2.2. Elementos Menores y Traza

Corresponden a mediciones de concentración de Al, As, B, Cd, Li,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y V presentes en las muestras de agua superficial medidas en concentraciones minoritarias y trazas. Los resultados de estas mediciones se observan en el Anexo 4.

Respecto a las mediciones, las concentraciones máximas y mínimas de aluminio (Al) son de 2,156 y 0,005 ppm respectivamente, con un promedio de 0,075 ppm; las concentraciones máximas y mínimas de arsénico (As) son de 0,035 y 0,003 ppm respectivamente, con un promedio de 0,011 ppm; las concentraciones máximas y mínimas del boro (B) son de 0,109 y 0,005 ppm respectivamente, con un promedio de 0,037 ppm; las concentraciones máximas y mínimas de cadmio (Cd) son de 0,006 y 0,001 ppm respectivamente, con un promedio de 0,003 ppm; las concentraciones máximas y mínimas de litio (Li) son de 0,018 y 0,005 ppm, con un promedio de 0,010 ppm; las concentraciones máximas y mínimas de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) son de 0,462 y 0,005 ppm, con un promedio de 0,105 ppm; las concentraciones máximas y mínimas de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) son de 0,382 y 0,032 ppm respectivamente, con un promedio de 0,098 ppm; y las concentraciones máximas y mínimas de vanadio (V) son de 0,067 y 0,005 ppm respectivamente, con un promedio de 0,018 ppm.

Para observar y representar de mejor forma las variaciones de las concentraciones de los elementos menores y traza registradas a lo largo de los cursos de agua, se obtuvieron los promedios en los puntos donde existía más de una medición. Además, se consideró como flujos principales los ríos Los Cipreses y Clarillo por presentar la mayor cantidad de mediciones. Para el caso del Cajón de Los Lunes, este se considerará como afluente debido a la poca cantidad de muestras recolectadas.

En la Tabla 5.7 se observan las concentraciones de los elementos menores y traza utilizados para la representación de datos, considerando los promedios en los puntos con más de una muestra. Además, en las figuras 5.9 a 5.16 se observan las variaciones de los elementos menores y traza (Al, As, B, Cd, Li,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y V respectivamente) a lo largo de los cursos principales (Los Cipreses y Clarillo) y afluentes.

**Tabla 5.7: Valores de elementos menores y traza a lo largo de los ríos principales y afluentes.** Los valores corresponden a los promedios de las muestras medidas en dicho punto, con excepción de los puntos que presentan un asterisco (\*), ya que solo se obtuvo una muestra en dicho sector. Además, en color gris se destacan los cursos menores y quebradas asociadas a los ríos principales

Punto	Elementos menores y traza (ppm)							
	Al	As	B	Cd	Li	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	V
P19-B*	0,024	0,027	0,022	0,002	0,010	0,187	0,032	0,005
P18-L*	0,232	0,011	0,011	0,005	0,015	0,257	0,032	0,036
P17*	2,156	0,010	0,023	0,006	0,018	0,308	0,032	0,064
P16-P*	0,033	0,013	0,032	0,006	0,014	0,005	0,032	0,022
P15*	0,047	0,012	0,060	0,006	0,017	0,462	0,032	0,067
P14*	0,042	0,011	0,066	0,006	0,016	0,421	0,194	0,061
P13*	0,042	0,012	0,068	0,005	0,016	0,267	0,068	0,057
P11-L*	0,011	0,003	0,016	0,002	0,012	0,019	0,321	0,005
P11*	0,063	0,012	0,071	0,006	0,015	0,249	0,032	0,055
P10*	0,041	0,011	0,078	0,005	0,015	0,251	0,122	0,054
P9-C	0,047	0,012	0,054	0,002	0,011	0,108	0,096	0,019
P21-A	1,613	0,014	0,005	0,002	0,010	0,093	0,089	0,005
P22	0,012	0,026	0,012	0,001	0,005	0,088	0,032	0,005
P9-L	0,015	0,012	0,015	0,003	0,009	0,054	0,126	0,009
P8	0,030	0,014	0,039	0,002	0,010	0,102	0,129	0,016
P8-LEO	0,020	0,007	0,036	0,003	0,008	0,113	0,070	0,015
P7	0,036	0,006	0,049	0,004	0,010	0,089	0,204	0,022
P6-M	0,023	0,013	0,031	0,002	0,008	0,052	0,087	0,015
P6	0,028	0,009	0,045	0,003	0,007	0,076	0,129	0,016
P5-L	0,015	0,006	0,013	0,002	0,010	0,017	0,112	0,009
P5	0,025	0,016	0,045	0,002	0,009	0,104	0,084	0,016
P4-D	0,201	0,022	0,053	0,003	0,010	0,105	0,102	0,026
P4-C	0,024	0,014	0,047	0,002	0,008	0,100	0,100	0,019
P4-B	0,009	0,007	0,034	0,001	0,005	0,101	0,065	0,027
P4	0,026	0,012	0,040	0,002	0,008	0,098	0,060	0,013
P3	0,027	0,010	0,039	0,002	0,009	0,096	0,068	0,013
P2-B	0,013	0,006	0,016	0,002	0,009	0,058	0,117	0,009
P2	0,039	0,008	0,045	0,003	0,010	0,124	0,101	0,013
P1	0,033	0,009	0,048	0,002	0,010	0,121	0,101	0,013
P0	0,024	0,008	0,050	0,002	0,009	0,123	0,091	0,013



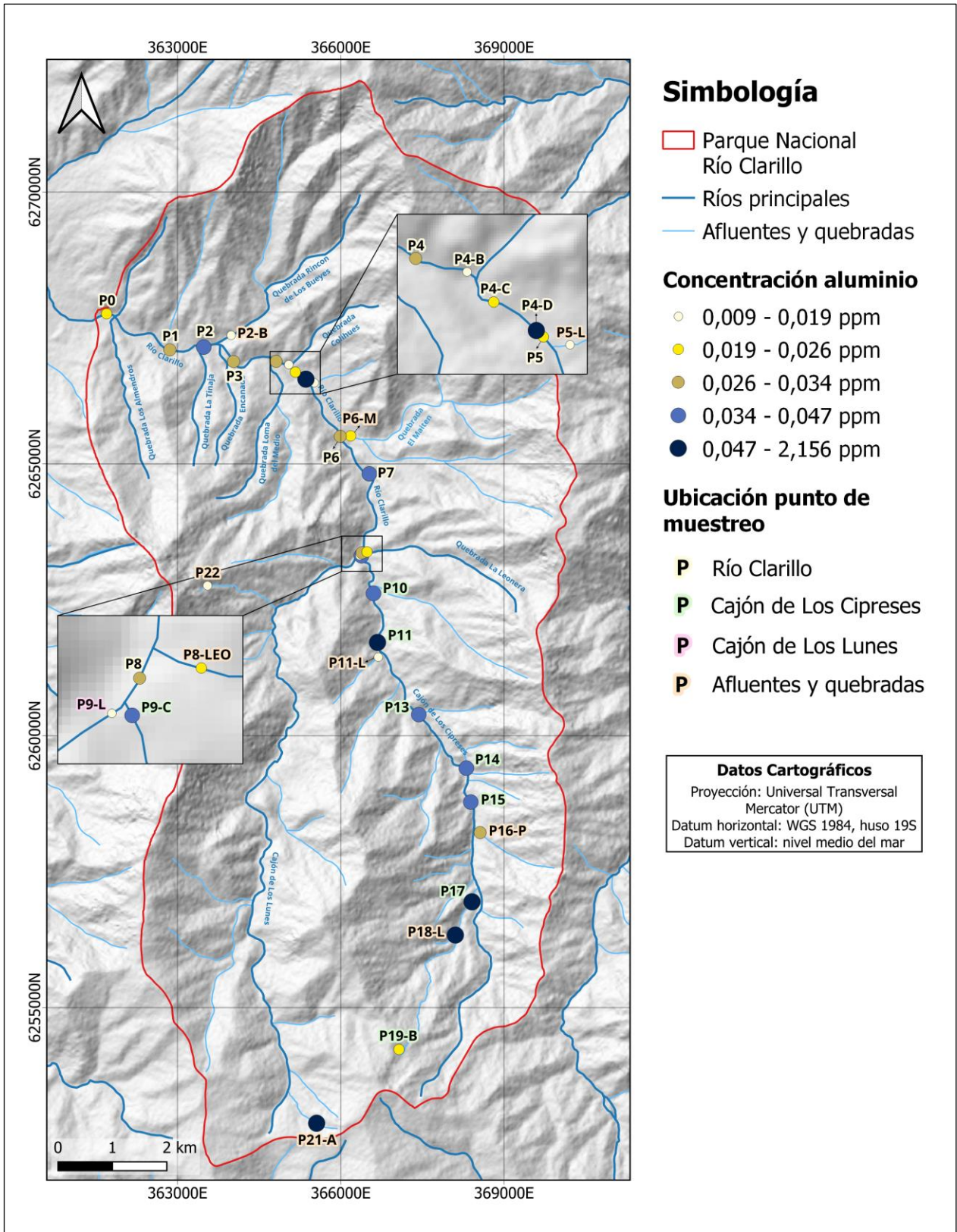


Figura 5.9: Mapa variación de aluminio (Al) en cursos principales y afluentes.

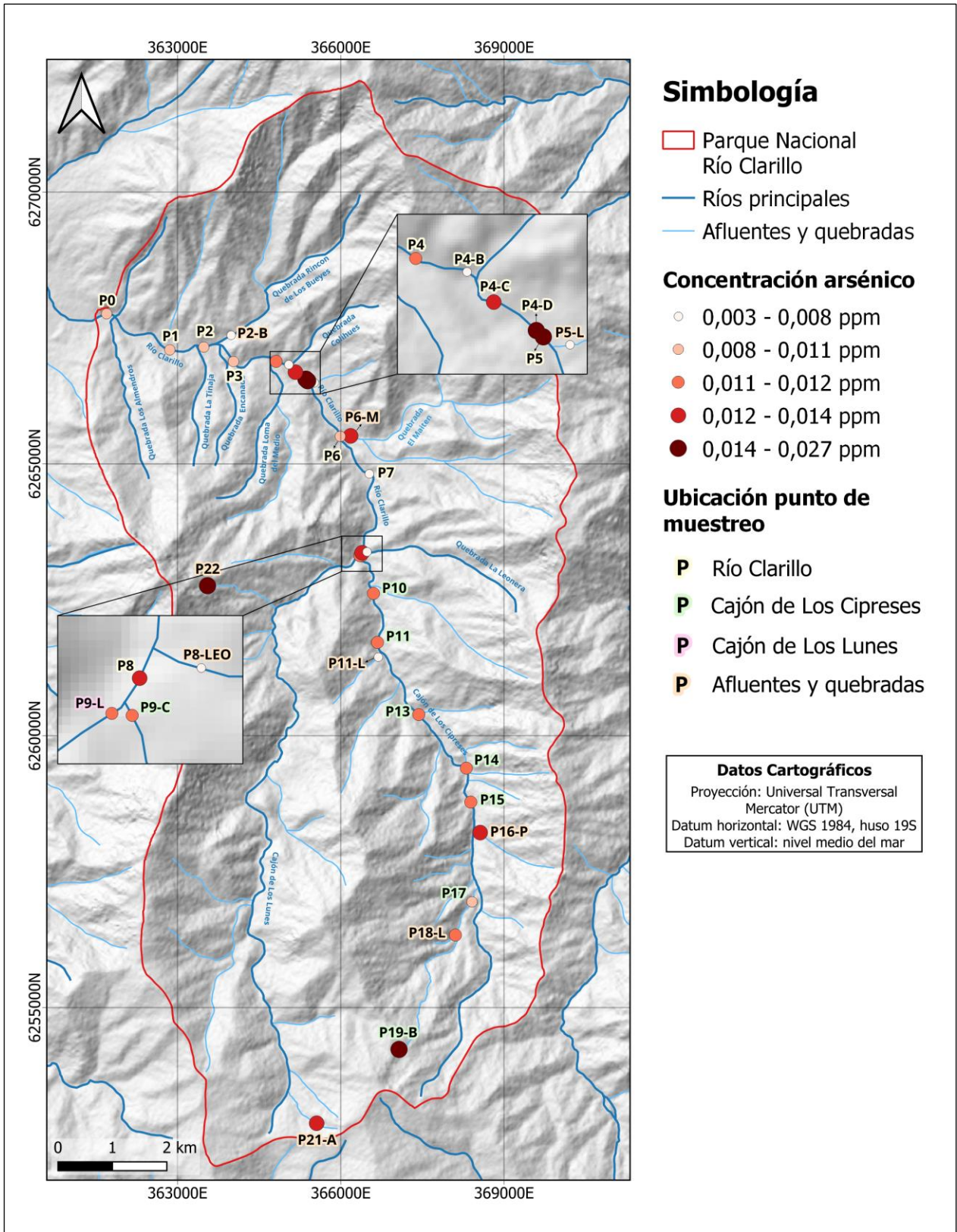


Figura 5.10: Mapa variación de arsénico (As) en cursos principales y afluentes.



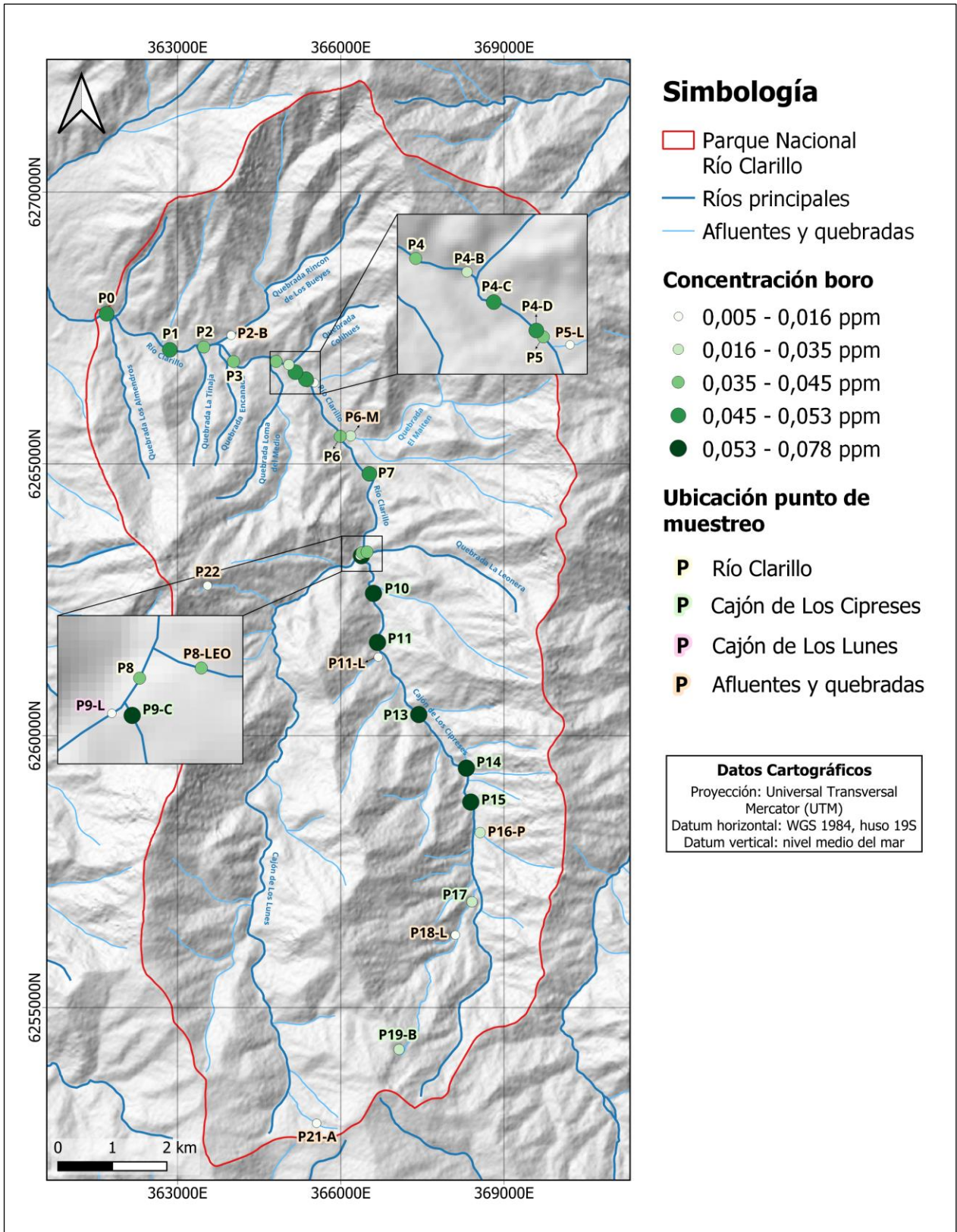


Figura 5.11: Mapa variación de boro (B) en cursos principales y afluentes.

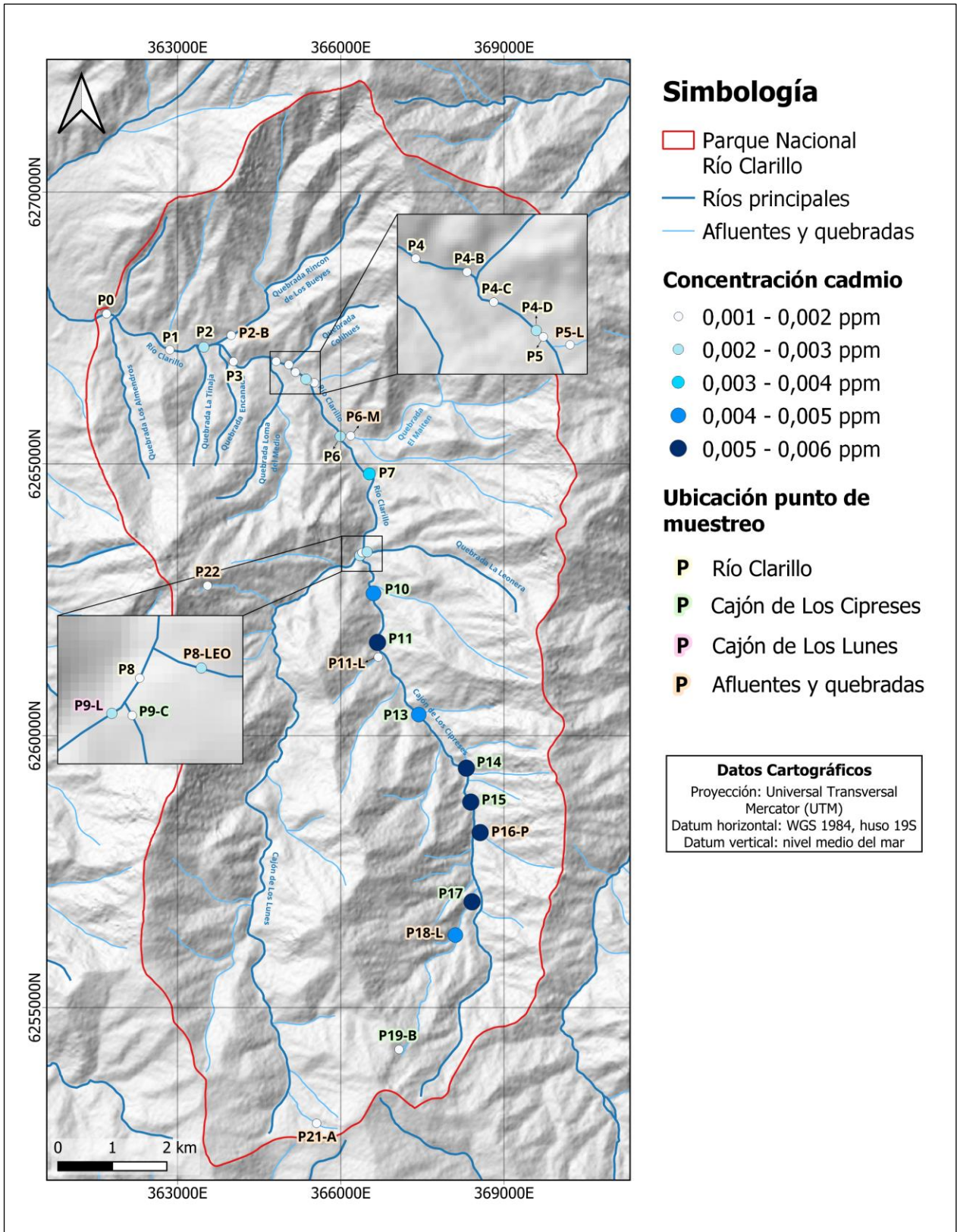


Figura 5.12: Mapa variación de cadmio (Cd) en cursos principales y afluentes.



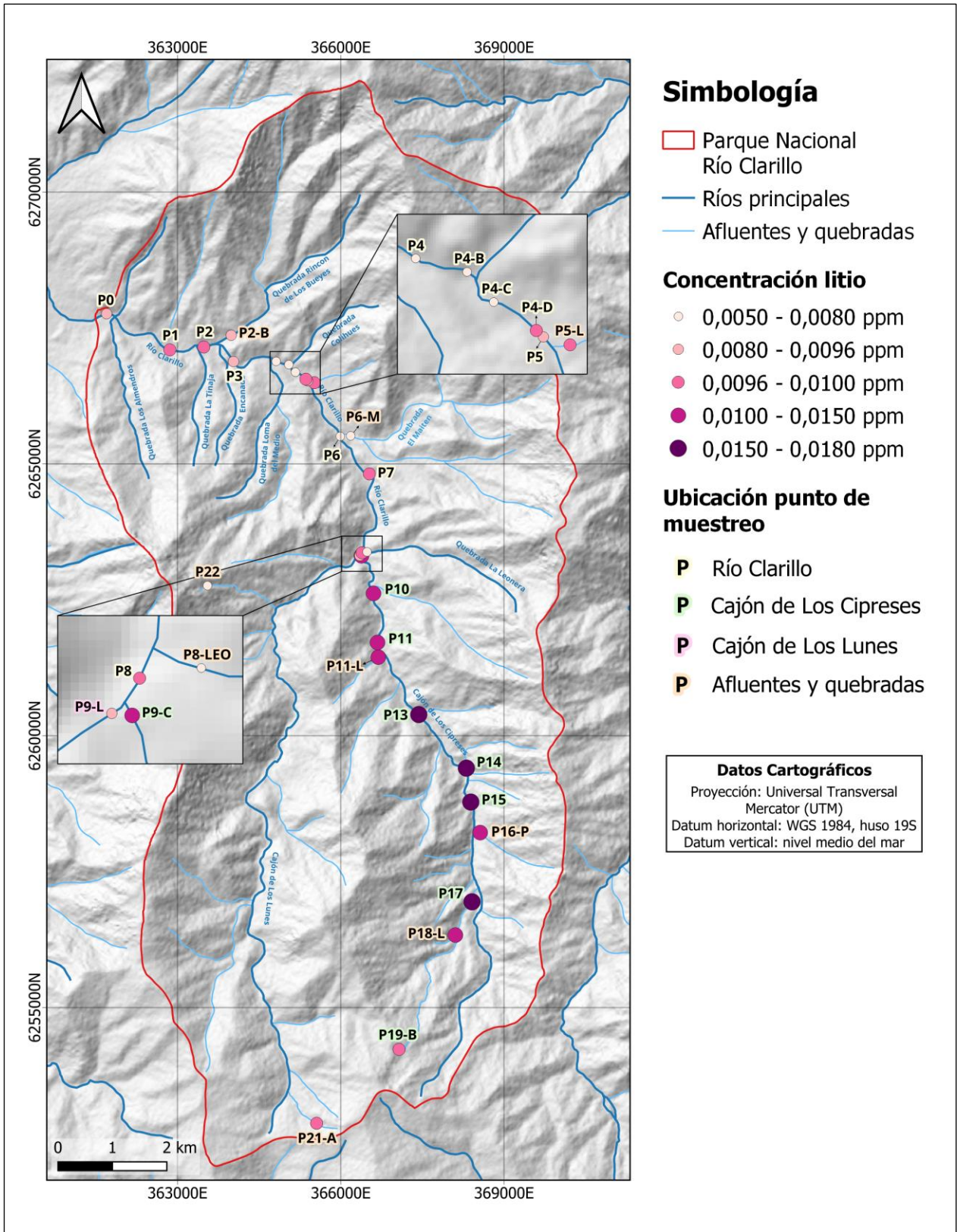


Figura 5.13: Mapa variación de litio (Li) en cursos principales y afluentes.

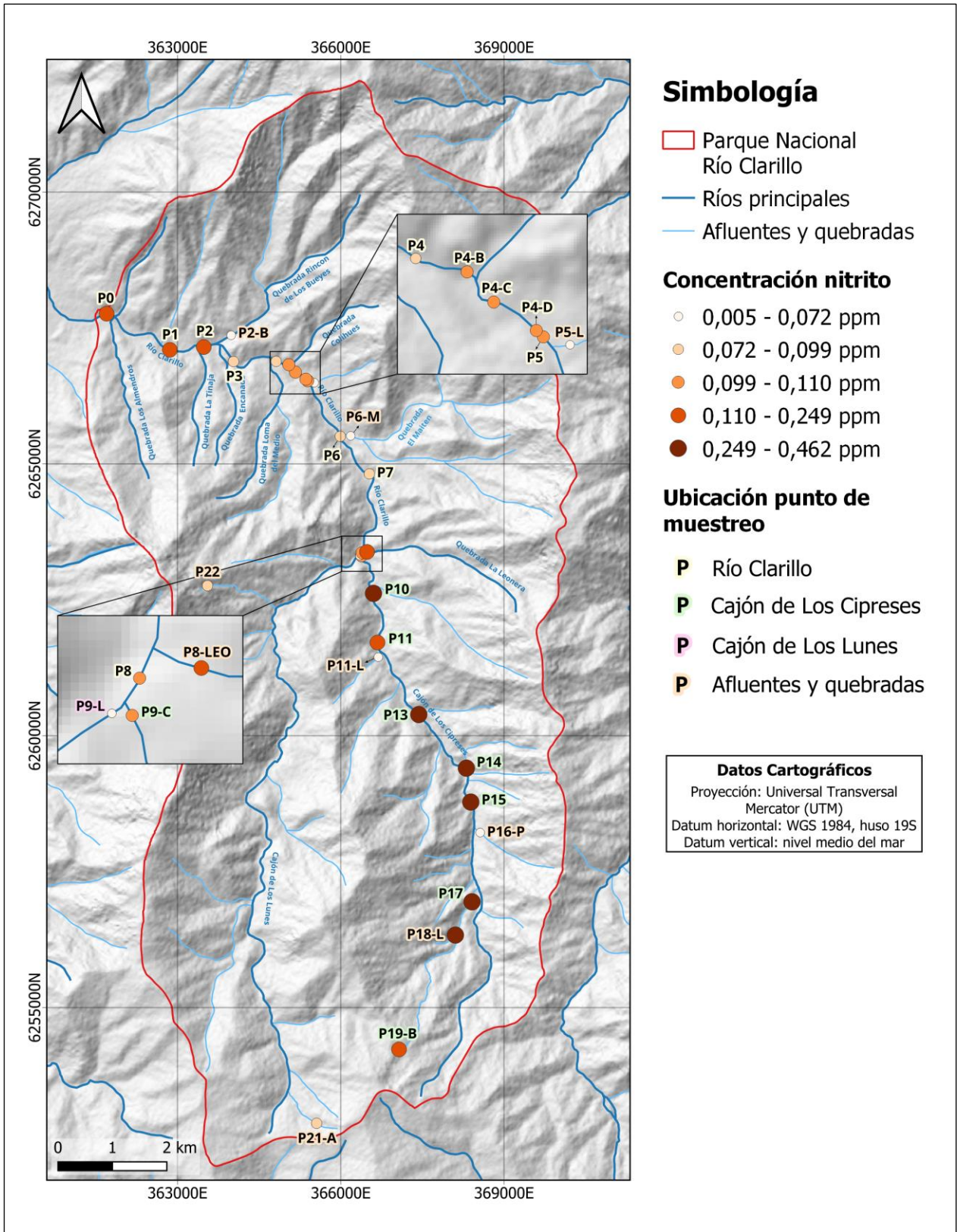


Figura 5.14: Mapa variación de nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) en cursos principales y afluentes.



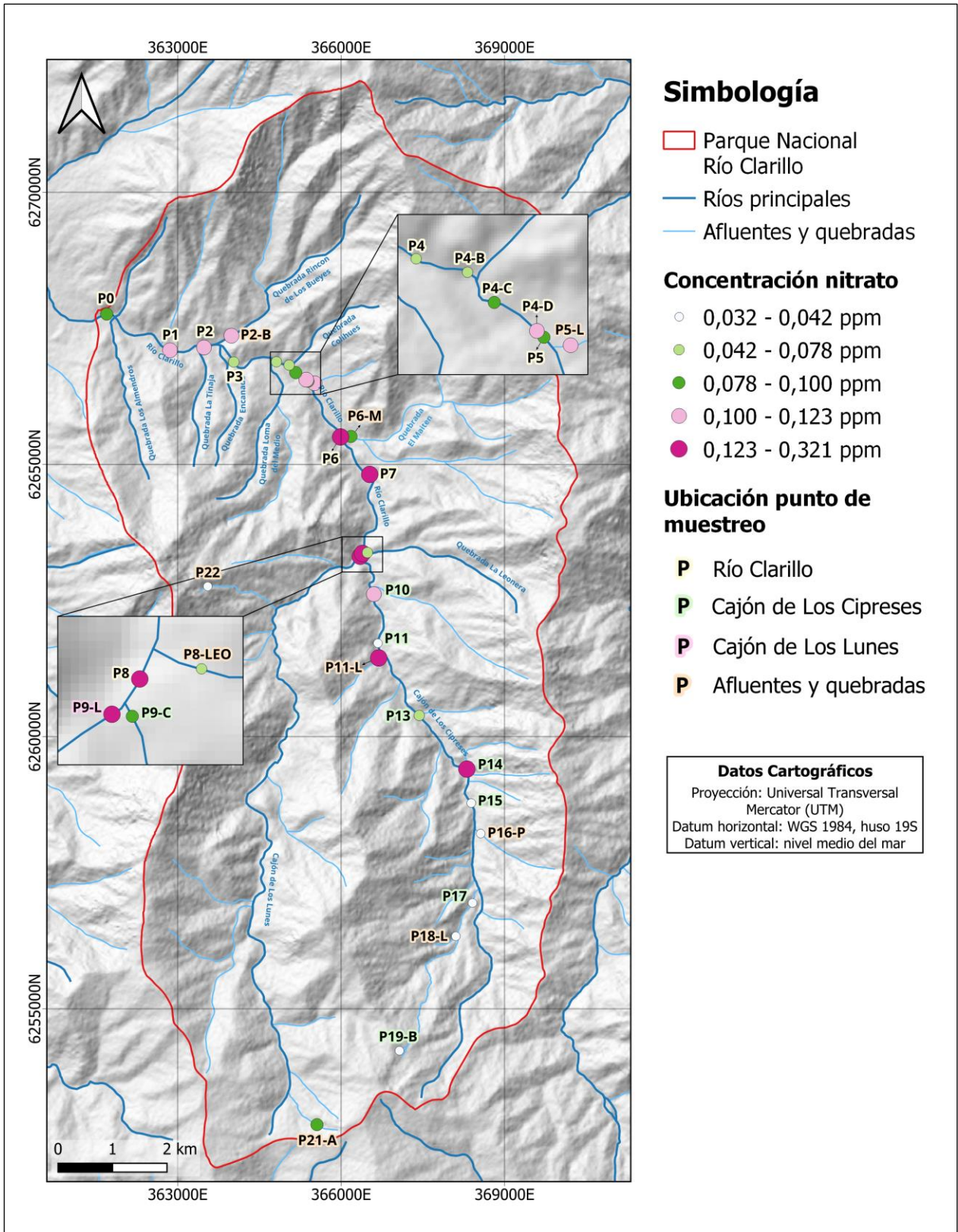


Figura 5.15: Mapa variación de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en cursos principales y afluentes.

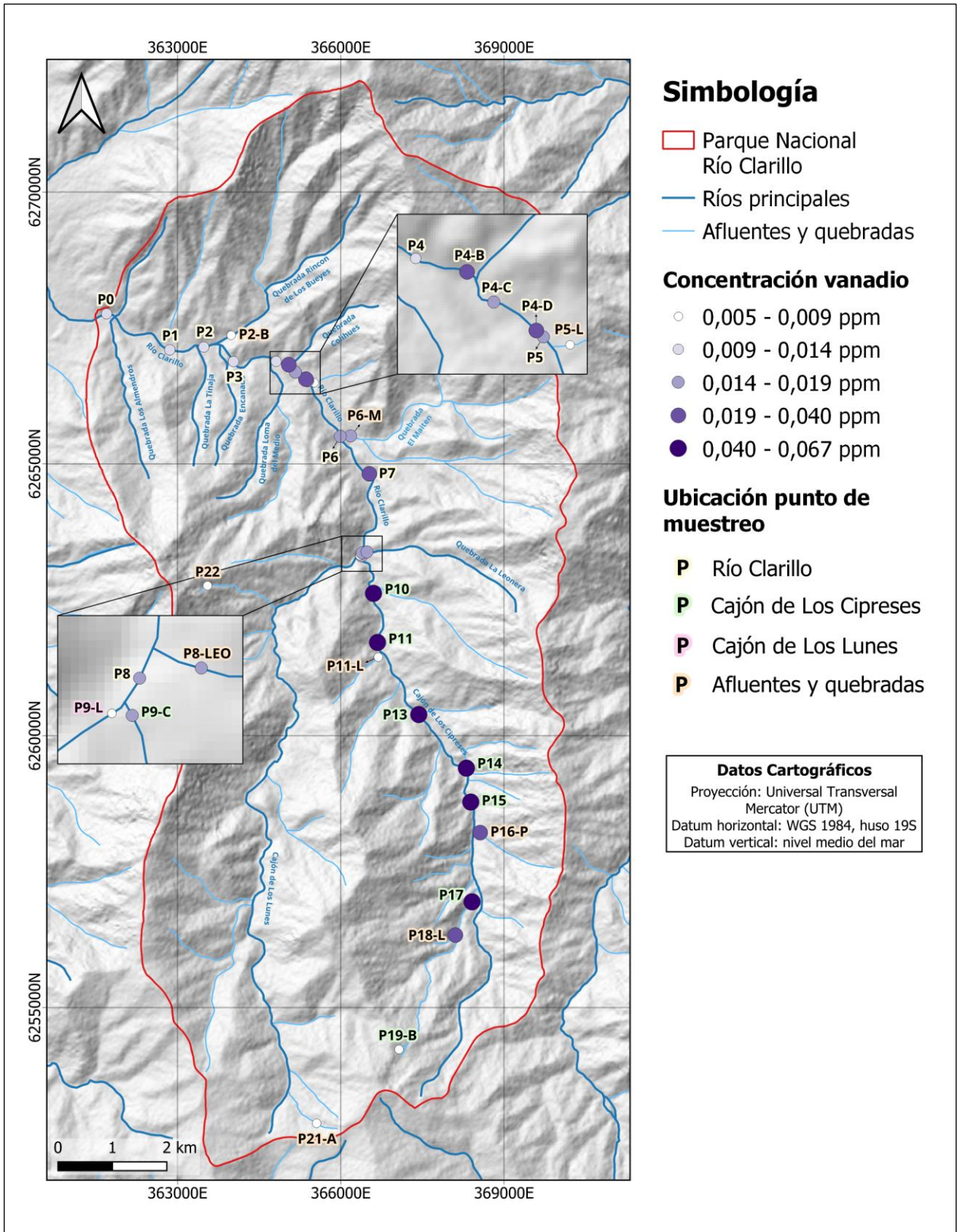


Figura 5.16: Mapa variación de vanadio (V) en cursos principales y afluentes.

Respecto a las variaciones de aluminio (Al) (Figura 5.9) no se observa una tendencia clara en los cursos principales. Aun así, las mayores concentraciones son identificadas en las muestras obtenidas en el Cajón de Los Cipreses y disminuyen en el río Clarillo, donde se encuentran las mayores fluctuaciones. Además, se distinguen algunas anomalías en puntos que no siguen una tendencia similar a las muestras vecinas, como lo son en los puntos P19-B (0,024 ppm), P21-A (1,613 ppm), P17 (2,156 ppm) y P4-D (0,201 ppm).

En cuanto a las variaciones de arsénico (As) (Figura 5.10), en las muestras obtenidas en el Cajón de Los Cipreses se observa una tendencia relativamente constante, disminuyendo de manera fluctuante en el río Clarillo hasta la salida del Parque. A lo largo de los cursos de agua se observan las mayores anomalías en los puntos P19-B (0,027 ppm), P22 (0,026 ppm), P5 (0,016 ppm) y P4-D (0,022 ppm).

Siguiendo con las variaciones de boro (B) (Figura 5.11) se observa una tendencia descendente en los cursos principales, con las mayores concentraciones en el Cajón de Los Cipreses, las cuales disminuyen en el río Clarillo. Además, los afluentes y quebradas a lo largo de todo el Parque Nacional registran las menores concentraciones de boro.

Respecto a las variaciones de cadmio (Cd) (Figura 5.12) se observa una tendencia descendente con mayores concentraciones en el Cajón de Los Cipreses, disminuyendo en el río Clarillo hasta la salida del Parque Nacional (P0).

Referente a las variaciones de litio (Li) (Figura 5.13) se observa una tendencia descendente con las mayores concentraciones registradas en el Cajón de Los Cipreses, disminuyendo en el río Clarillo con fluctuaciones observadas entre los puntos P5 y P0.

En cuanto a las variaciones de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) (Figura 5.14) se observan las mayores concentraciones en el Cajón de Los Cipreses, las cuales disminuyen hacia el río Clarillo, con variaciones locales entre los puntos P5 y P4-B, y entre los puntos P2 y P0.

Respecto a las variaciones de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Figura 5.15) no se observa una tendencia clara, con concentraciones menores en el Cajón de Los Cipreses y anomalías locales en los puntos P14 (0,194 ppm) y P11-L (0,321 ppm), siguiendo en el río Clarillo con concentraciones mayores entre los puntos P8 y P6, las cuales disminuyen hasta la salida del Parque Nacional (P0).

Por último, con respecto a las variaciones de vanadio (V) (Figura 5.16) se observa una tendencia descendente desde el Cajón de Los Cipreses, siguiendo por el río Clarillo hasta la salida del Parque Nacional. Además, los afluentes y quebradas a lo largo del Parque Nacional registran las menores concentraciones de vanadio en comparación a los cursos principales.

### 5.3. Análisis Estadístico

Se analizaron estadísticamente un total de 88 muestras de agua superficial obtenidas a lo largo de los 40 puntos observados en la Figura 5.1, los cuales incluyen mediciones de parámetros fisicoquímicos *in situ*, así como mediciones de elementos mayores, menores y traza. Para ello se consideraron las muestras analizadas en el capítulo de hidroquímica (Tabla 5.5 y Tabla 5.7) más los parámetros fisicoquímicos correspondientes a las muestras respectivas (Tabla 5.4). Los resultados se presentan a continuación.

#### 5.3.1. Estadística Univariable

##### 5.3.1.1. Diagramas de Caja

Los diagramas de caja o *boxplots* son es una herramienta gráfica utilizada para representar un conjunto de datos identificando los percentiles 25, 50 y 75, también llamados cuartil inferior (Q1), mediana (Q2) y cuartil superior (Q3) respectivamente, el rango intercuartílico ( $IQR = Q3 - Q1$ ) que cubre el 50% central de los datos, y los valores atípicos (Krzywinski y Altman, 2014).

En la Figura 5.17 se observan los *boxplots* de los parámetros diferenciados por la zona de muestreo (Cajón de Los Cipreses en verde, afluentes en naranja y río Clarillo en amarillo) y ordenados de mayor a menor concentración. Para lograr una mejor representación visual de los datos se elaboraron 3 diagramas para los parámetros fisicoquímicos (CE, OD y pH), y 4 diagramas para los elementos mayores, menores y traza según sus rangos de concentración.

Según los diagramas, la tendencia más observada sigue descensos y ascensos, con mayores concentraciones en Los Cipreses, menores en los afluentes y valores intermedios en el río Clarillo, las cuales fueron identificadas en los parámetros conductividad eléctrica (CE), sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), calcio ( $Ca^{2+}$ ), sodio ( $Na^+$ ), magnesio ( $Mg^{2+}$ ), potasio ( $K^+$ ), nitrito ( $NO_2^-$ ), boro (B) y vanadio (V).





**Figura 5.17:** Diagrama de caja de parámetros fisicoquímicos, elementos mayores, menores y trazas. En color verde se observan los valores medidos en el Cajón de Los Cipreses, en naranja los medidos en afluentes y quebradas, y en amarillo los medidos en el río Clarillo. Se utilizan distintas concentraciones en el eje vertical para mejorar la representación de los datos.



Luego le siguen las concentraciones ascendentes entre Los Cipreses, afluentes y Clarillo identificadas en los parámetros oxígeno disuelto (OD), pH, alcalinidad ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ) y cloruro ( $\text{Cl}^-$ ); y las concentraciones descendentes entre Los Cipreses, afluentes y Clarillo identificadas en aluminio (Al), litio (Li) y cadmio (Cd). Por último, las concentraciones en nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y arsénico (As) no siguen una tendencia clara.

### 5.3.2. Estadística Multivariable

La distribución de la mayoría de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones químicas no siguen una distribución normal, con excepción del  $\text{Cl}^-$ , alcalinidad ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ) y B, por lo que se transformaron logarítmicamente y se les aplicó una estandarización (Cloutier *et al.*, 2008). Dichas transformaciones son comunes en este tipo de análisis multivariado cuando los datos no siguen una distribución normal (Steinhorst & Williams, 1985; Schot & van der Wal, 1991; Güler *et al.*, 2002).

En el Anexo 5 se puede observar las pruebas de normalidad, así como gráficos que muestran el tipo de distribución de los datos. Con los datos ya transformados se a realizar el análisis multivariado.

#### 5.3.2.1. Matriz de Correlación de Pearson

Corresponde a un tipo de análisis factorial cuyo objetivo es cuantificar el grado de asociación lineal entre pares de variables de una base de datos mediante un número entre -1 y 1 llamado coeficiente de correlación de Pearson, siendo positivo cuando exista correlación directa entre ambas variables, negativo si la relación es inversa y 0 si no existe correlación (Reimann *et al.*, 2008). Si los coeficientes de correlación son mayores a 0,5 se considera una relación significativa, y si son mayores a 0,8 excelentes (Townley *et al.*, 1999). Sin embargo, estos coeficientes varían según el número de muestras analizadas, ya que, al incrementar su número, los valores absolutos del coeficiente de correlación tienden a disminuir (Reimann *et al.*, 2008).

En la Tabla 5.8 se observan los coeficientes de correlación de las variables analizadas, donde se determinó y resaltó en color verde las correlaciones altas (mayor a 0,70), en amarillo las correlaciones moderadas (entre 0,50 y 0,70) y en rojo las correlaciones inversas (menores a -0,50).

A partir de la matriz de correlación se observa que existe una moderada a alta relación entre la conductividad eléctrica (CE) y los parámetros  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , B, Cd, Li,  $\text{NO}_2^-$  y V. Además, algunos de estos parámetros también se correlacionan entre sí, como el  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  con los elementos B, Cd, Li,  $\text{NO}_2^-$  y V.

Siguiendo con las relaciones positivas, el pH se correlaciona moderadamente con la alcalinidad ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ), mientras que el  $\text{Na}^+$  se correlaciona moderadamente con los parámetros  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y B. También se distingue el  $\text{K}^+$  con una correlación moderada con el  $\text{NO}_2^-$ , y el  $\text{Ca}^{2+}$  con una correlación moderada a alta con los parámetros  $\text{Mg}^{2+}$ , B, Cd y V.

Con respecto a las relaciones positivas entre elementos traza se tienen correlaciones moderadas a altas entre B–Cd–V, Li–Cd–V y  $\text{NO}_2^-$ –V.

Por último, respecto a las relaciones inversas se distinguen correlaciones entre pH–Al, As– $\text{NO}_3^-$ , y la alcalinidad ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ) con los parámetros  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , Al y  $\text{NO}_2^-$ .

**Tabla 5.8: Matriz de correlación de Pearson de parámetros *in situ* y de laboratorio.** En verde se observan correlaciones mayores 0,7, amarillo entre 0,5 y 0,7 y rojos menores a -0,5 (inversas). En la tabla, CE es conductividad eléctrica, OD es oxígeno disuelto, Alc es alcalinidad ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ) y P.F. es parámetros fisicoquímicos.

		Parámetros fisicoquímicos			Elementos mayores						Elementos menores y trazas								
		CE	Ox Dis	pH	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	Alc	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	Al	As	B	Cd	Li	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	V
P.F.	CE	1,000																	
	Ox Dis	-0,073	1,000																
	pH	-0,086	0,298	1,000															
Elementos mayores	$\text{Cl}^-$	0,004	0,420	0,363	1,000														
	$\text{SO}_4^{2-}$	0,895	-0,104	-0,185	-0,009	1,000													
	Alc	-0,289	0,030	0,616	0,246	-0,509	1,000												
	$\text{Na}^+$	0,762	0,286	0,056	0,298	0,578	0,056	1,000											
	$\text{K}^+$	0,423	0,052	-0,168	0,444	0,447	-0,374	0,434	1,000										
	$\text{Ca}^{2+}$	0,780	0,077	0,310	-0,058	0,662	-0,055	0,571	0,173	1,000									
Elementos menores y trazas	$\text{Mg}^{2+}$	0,849	-0,068	-0,340	-0,083	0,883	-0,543	0,548	0,477	0,650	1,000								
	Al	0,274	-0,121	-0,812	-0,278	0,407	-0,622	0,015	0,150	-0,136	0,494	1,000							
	As	-0,028	-0,405	-0,176	-0,067	0,148	-0,232	-0,334	0,301	-0,058	0,206	0,243	1,000						
	B	0,755	0,204	0,239	0,250	0,697	-0,131	0,685	0,489	0,798	0,680	-0,067	0,073	1,000					
	Cd	0,615	0,041	-0,200	-0,419	0,613	-0,369	0,361	-0,035	0,592	0,597	0,436	-0,022	0,521	1,000				
	Li	0,573	-0,122	-0,382	-0,458	0,547	-0,439	0,307	-0,102	0,493	0,538	0,489	-0,063	0,361	0,872	1,000			
	$\text{NO}_2^-$	0,520	-0,151	-0,252	-0,047	0,613	-0,568	0,167	0,591	0,420	0,725	0,361	0,285	0,481	0,349	0,319	1,000		
	$\text{NO}_3^-$	0,037	0,322	0,292	0,291	-0,081	0,210	0,335	0,062	-0,040	-0,196	-0,280	-0,534	0,098	-0,174	-0,118	-0,230	1,000	
V	0,717	0,240	-0,078	-0,238	0,696	-0,391	0,482	0,238	0,758	0,764	0,314	0,035	0,687	0,816	0,609	0,553	-0,224	1,000	

### 5.3.2.2. Análisis de Componentes Principales (ACP)

Corresponde a una técnica de estadística multivariable cuyo objetivo es extraer la información más importante de una tabla de datos, reduciendo el número de variables y simplificando la descripción conjunta de datos, representándola como un conjunto de nuevas variables ortogonales denominadas componentes principales, mostrando el patrón de similitud de las observaciones y variables en forma de puntos y vectores en gráficos (Abdi & Williams, 2010).

Del conjunto de datos químicos estandarizados se obtuvo la tabla de valores propios (Tabla 5.9) donde se observa que en el factor 4 (F4) se explica el 80% de la varianza de los datos, por lo que con 4 componentes principales es posible representar la totalidad de los parámetros.

**Tabla 5.9: Valores propios de los datos estandarizados.** Se observa en color gris que con 4 factores se explica el 80% de la varianza de los datos.

Factor	Varianza explicada	Factor	Varianza explicada	Factor	Varianza explicada
F1	40,005 %	F7	91,891 %	F13	99,148 %
F2	59,426 %	F8	93,864 %	F14	99,434 %
F3	71,279 %	F9	95,580 %	F15	99,663 %
F4	80,009 %	F10	97,149 %	F16	99,858 %
F5	85,546 %	F11	98,062 %	F17	99,942 %
F6	89,276 %	F12	98,716 %	F18	100,000 %

En la Tabla 5.10 se observa la correlación entre los parámetros estudiados y el factor asociado, donde se determinó y resaltó en color verde las correlaciones altas (mayor a 0,70), en amarillo las correlaciones moderadas (entre 0,50 y 0,70) y en rojo las correlaciones inversas (menores a -0,50).

Se observa que el factor 1 está correlacionado de forma positiva con la CE,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , B, Cd, Li,  $\text{NO}_2^-$  y V, y correlacionado de forma negativa con la alcalinidad ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ). Por otro lado, el factor 2 está correlacionado de manera positiva con oxígeno disuelto, pH,  $\text{Cl}^-$ , alcalinidad ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ),  $\text{Na}^+$ , B y  $\text{NO}_3^-$ , y de forma negativa con el Al. Siguiendo con el factor 3, este se correlaciona de forma positiva con el  $\text{Cl}^-$  y  $\text{K}^+$ , y de forma negativa con el Cd y Li. Por último, el factor 4 se correlaciona positivamente con el As y negativamente con el  $\text{NO}_3^-$ .

**Tabla 5.10: Correlación entre variables y factores (ACP).** En verde se observan correlaciones mayores 0,7, amarillo entre 0,5 y 0,7 y rojos menores a -0,5 (inversas).

		<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>
<b>P.F.</b>	CE	0,899	0,245	-0,014	0,015
	OD	-0,014	0,529	-0,058	-0,453
	pH	-0,275	0,758	-0,114	0,459
<b>Elementos mayores</b>	Cl <sup>-</sup>	-0,140	0,608	0,594	-0,172
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,911	0,052	0,113	0,018
	Alcalinidad	-0,548	0,522	-0,221	0,311
	Na <sup>+</sup>	0,599	0,598	-0,003	-0,270
	K <sup>+</sup>	0,452	0,163	0,792	-0,122
	Ca <sup>2+</sup>	0,739	0,432	-0,235	0,371
	Mg <sup>2+</sup>	0,937	-0,054	0,156	0,007
<b>Elementos menores y traza</b>	Al	0,467	-0,662	0,062	-0,428
	As	0,130	-0,463	0,496	0,536
	B	0,758	0,515	0,109	0,189
	Cd	0,776	-0,113	-0,506	0,001
	Li	0,705	-0,249	-0,520	-0,114
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,702	-0,171	0,393	0,117
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,156	0,577	-0,063	-0,514
	V	0,867	0,082	-0,220	0,089

Al observar las correlaciones entre variables y factores (Tabla 5.10) se identifica que tanto los parámetros fisicoquímicos como los elementos mayores, menores y traza se correlacionan mínimo con 1 factor entre F1 y F4 (80% de la varianza), por lo que no sería necesario realizar un filtro en el número de variables utilizadas. Es por ello que al analizar las relaciones entre variables con la matriz de correlación de Pearson (Tabla 5.8) utilizando todos los datos disponibles daría resultados válidos y suficientes para explicar los procesos y comportamientos observados en los cursos superficiales del Parque Nacional Río Clarillo.

## 6. DISCUSIÓN

Luego de analizar las variaciones de los parámetros fisicoquímicos y de la composición química de las muestras de agua, en conjunto con el análisis estadístico y caracterización mineralógica de zonas alteradas, se logra dilucidar ciertos procesos presentes en el Parque Nacional Río Clarillo que estarían interviniendo en el sistema hidrogeoquímico y la calidad química de sus ríos. Además, para observar la influencia de la litología en las variaciones composicionales se elaboró la Figura 6.1. donde se observan los puntos de muestreo sobre el mapa geológico.

### 6.1. Variación de Parámetros Fisicoquímicos

#### 6.1.1. Conductividad Eléctrica (CE)

Se observa una tendencia general descendente en los ríos principales, con mayores valores en las muestras obtenidas en el Cajón de Los Cipreses, menores valores en los afluentes y valores intermedios en el río Clarillo.

La CE, la cual es una medida de la capacidad del agua para conducir electricidad, aumenta con el contenido de iones disueltos (Custodio & Llamas, 1983), los cuales presentan mayores concentraciones en casi la totalidad de las muestras de agua medidas en los sectores cercanos a la zona de alteración hidrotermal en la cabecera de Los Cipreses, lo cual explicaría que en esta zona se encuentren los mayores valores de CE. En cambio, los afluentes monitoreados no se encuentran en contacto directo con la zona mineralizada, por lo que sus valores son los menores registrados. Esto explicaría que, a medida que los afluentes se van uniendo a los cursos principales, el aporte de agua con bajos valores de CE van amortiguando los valores del curso principal, pasando de mediciones de 554,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en Los Cipreses (P16-A) hasta mediciones de 250,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el río Clarillo, en la caseta de CONAF (P0) cercano a la salida del área silvestre protegida.

Por otro lado, al analizar las mediciones de CE a detalle, localmente se observa una disminución entre los puntos P18 (367,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y P17 (339,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) seguido de aumento en el punto P16-A (554,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), siendo la mayor CE registrada. Esto se explica por el hecho que dichos puntos entregan información sobre cursos de agua distintos, ya que el punto P16 se encuentra después de la unión entre curso monitoreado (P18, P17-B y P17) y otro afluente, por lo que está registrando

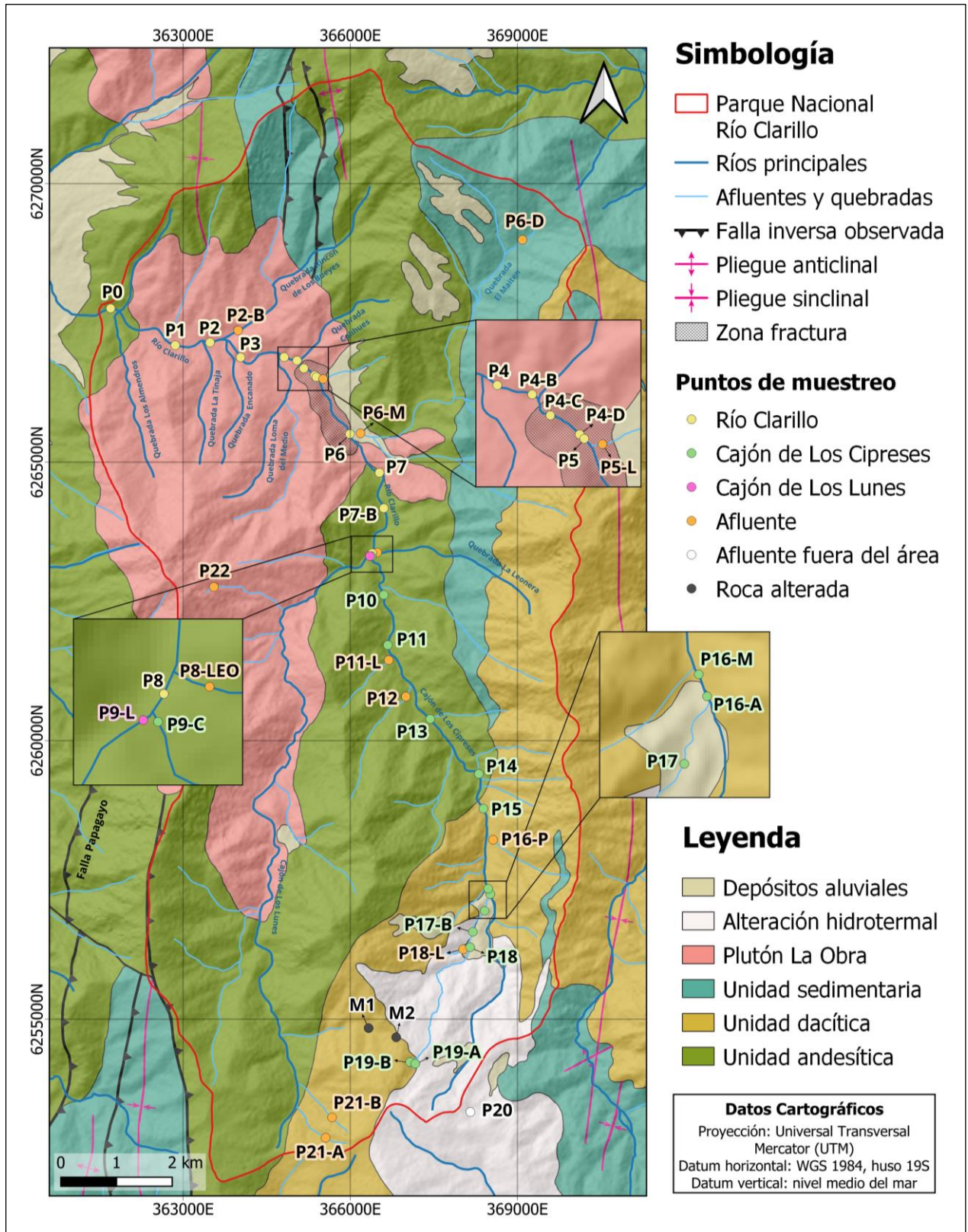


Figura 6.1: Mapa geológico con los puntos de muestreo de cursos superficiales y litológicos. Modificado de Marti *et al.* (2023).

información de este nuevo curso de agua que transportaría una mayor concentración de iones y, por ende, presenta una mayor CE.

Por último, los puntos P19-A y P19-B ubicados a mayor altura en la cabecera del Cajón de Los Cipreses presentan una mayor variación de CE al compararlo con los puntos cercanos (P17, P17-B y P18), con una medición más baja de la esperada en el sector (259,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 247,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente). Esto se debe a que dichos puntos corresponden a muestreos de agua en bofedales, mientras que el resto de los puntos se obtuvieron de ríos como tal. Cabe mencionar que gran parte del agua de los bofedales proviene de resurgencias de agua subterránea, por lo que podría tener una señal química distinta a los ríos circundantes.

### **6.1.2. Oxígeno disuelto (OD)**

Se observa una tendencia levemente ascendente en los ríos principales, con menores valores en las muestras obtenidas en el Cajón de Los Cipreses, aumentando en los afluentes y en el río Clarillo. Ahora bien, al observar el diagrama de caja de los afluentes se identifica una mayor variación de OD a lo largo del Parque Nacional, cuyos valores son similares a los puntos muestreados en los cursos principales cercanos, teniendo un comportamiento similar.

El OD, el cual es una medida de la cantidad de oxígeno en el agua, disminuye en presencia de sustancias oxidables como materia orgánica y en especial por acción biológica, con valores en orden de 10 mg/l en agua superficial (Custodio & Llamas, 1983). Respecto a las mediciones en el área de estudio, estos estarían dentro del rango para cursos de agua en contacto con el aire, por lo que su leve variación podría estar determinada por la presencia de vegetación, ya que los menores valores de OD se encuentran en las zonas altas del Parque con poca vegetación, mientras que los mayores valores están asociados a zonas con bosques y vegetación frondosa.

Por otro lado, en los puntos P19-A y P19-B ubicados a mayor altura en la cabecera del Cajón de Los Cipreses presentan un menor valor de OD de lo esperado (6,42 mg/l y 1,61 mg/l respectivamente), lo cual podría estar relacionado al origen del agua en el bofedal (agua subterránea con poco oxígeno), al tipo de vegetación presente y a la descomposición de materia orgánica. Además, en los puntos P21-A y P21-B ubicados en quebradas en el sector alto del Cajón de Los Lunes también presenta OD bajo lo esperado para agua superficial (6,39 mg/l y 3,36 mg/l respectivamente) los que podrían estar asociados a la vegetación del sector.



### 6.1.3. pH

Se observa una tendencia general ascendente en los ríos principales, pasando de pH ácido en las zonas altas del Cajón de Los Cipreses, neutro entre el sector medio de los ríos Los Cipreses y Clarillo, a levemente alcalino cercano a la salida del Parque Nacional. Además, los afluentes presentan valores entre neutros a levemente alcalinos a lo largo de todo el sector.

Al analizar los valores de pH en la cuenca del río Maipo, los cursos principales (río Maipo y Mapocho) presentan valores neutros a débilmente alcalinos (7,8-8,0), variando en zonas puntuales por factores naturales como drenaje ácido en zonas mineralizadas, o antrópicos como ganadería, minería, aguas servidas, entre otras (DGA, 2004). Para el caso de los cursos de agua del Parque Nacional, no existen factores antrópicos que justifiquen el pH ácido observado en la cabecera del Cajón de Los Cipreses, por lo que el agente que explicaría dicho descenso sería la influencia de la zona mineralizada asociada a alteración fílica y argílica intermedia. Dichas alteraciones se forman en condiciones de pH moderadamente ácidos (4,0 a 5,0) (Corbett & Leach, 1997), lo cual sumado a litologías y minerales que favorecen la lixiviación de metales observados en las rocas volcánicas miocenas de la cueca (DGA, 2004) darían lugar al descenso del pH observado, alcanzando valores de 4,03 (P18). En cambio, los afluentes monitoreados no se encuentran en contacto directo con la zona mineralizada, por lo que sus valores de pH son los esperados para cuenca (neutros a levemente alcalinos). Esto explicaría que, a medida que los afluentes se van uniendo a los cursos principales, el aporte de agua neutra a alcalina amortigua los valores ácidos de Los Cipreses, normalizando el pH hasta la salida del área silvestre protegida con valores alrededor de 8,00.

Por otro lado, en los puntos P19-A y P19-B asociados a agua de bofedales nuevamente muestran valores anómalos, los cuales no sigue la tendencia general de los cursos principales, con valores de pH de 6,31 y 6,98 respectivamente. Esto volvería a estar relacionado con el origen del agua, ya que, al no estar conectados directamente con la zona mineralizada, mantendrían una señal química más estable. Además, en los puntos P21-A y P21-B ubicados en quebradas en el sector alto del Cajón de Los Lunes también presenta pH ácido (4,30 y 3,06 respectivamente) los cuales igualmente estarían en contacto con la zona mineralizada y, por ende, con descenso del pH a causa de ello.

## 6.2. Hidroquímica

### 6.2.1. Elementos Mayores

Basados en las concentraciones de aniones ( $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ), así como de la alcalinidad ( $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ ), se puede identificar diferentes tipos de agua según el diagrama de Piper. En dicho diagrama se identifica como catión dominante el  $\text{Ca}^{2+}$ , mientras que el anión dominante es el  $\text{SO}_4^{2-}$ , el cual presenta variaciones a lo largo de los cursos principales y afluentes, siendo el ion preponderante a la hora de definir los tipos de agua.

Respecto a las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ , al analizar el diagrama de Piper y de Stiff se observa que, aunque este ion no presenta grandes variaciones a lo largo del Parque Nacional, las muestras obtenidas en el Cajón de Los Cipreses tienen valores mayores que las del río Clarillo, y ambas son mayores que en los afluentes, con excepción del punto P18-L (valores similares a Los Cipreses). Esta tendencia levemente descendente en los cursos principales, con concentraciones altas en los puntos cercanos a la zona mineralizada, podría indicar un aporte de  $\text{Ca}^{2+}$  proveniente de la alteración de minerales cálcicos muy comunes en las rocas volcánicas del sector, específicamente al proceso de sericitización de plagioclasa, dando lugar a la sericita observada en las muestras alteradas, liberando  $\text{Ca}^{2+}$  al medio. Luego, a medida que los afluentes se van uniendo a los cursos principales (Los Cipreses y Clarillo), el aporte de aguas con menores concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  van amortiguando levemente los valores del curso principal.

Acerca de las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$ , al analizar el diagrama de Piper y de Stiff se observa que las mayores concentraciones de este anión se encuentran en la zona alta del Cajón de Los cipreses, los cuales van disminuyendo a medida que se avanza río abajo, pasando por el río Clarillo hasta la salida del Parque Nacional. A pesar de que la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  va disminuyendo a lo largo de los cursos principales, todas las muestras de agua son del tipo sulfatada-cálcica. Por otro lado, al analizar la composición de los afluentes, todos corresponden a aguas tipo bicarbonatada-cálcica con la excepción de los puntos P18-L (sulfatada-cálcica) y P21-A (sulfatada-mixta) ubicados en las zonas altas de Cajón de Los Cipreses y Los Lunes respectivamente. Esto indicaría una relación entre las concentraciones del  $\text{SO}_4^{2-}$  y la zona de alteración hidrotermal (fílica y argílica intermedia), posiblemente a lixiviación de minerales sulfurados, ya que las muestras de agua cercanas al sector mineralizado presentan mayores concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Además, a medida que los afluentes se

van uniendo a los cursos principales, de igual forma que para el ion  $\text{Ca}^{2+}$ , el aporte de agua con menores valores de  $\text{SO}_4^{2-}$  van amortiguando las concentraciones del curso principal, disminuyendo los valores de este anión.

En cuanto al resto de iones estudiados, se observa que el  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  tienen una alta correlación con el  $\text{SO}_4^{2-}$  y el  $\text{Ca}^{2+}$ , siguiendo una tendencia descendente similar, con mayores valores en las zonas altas de Los Cipreses, disminuyendo a medida que los afluentes (con menores concentraciones) se unen a los cursos principales. Dichas variaciones ocurren en rango de concentraciones menor a las observadas en los iones principales ( $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ), los cuales estarían relacionado a alteraciones de los minerales de la roca original, principalmente plagioclasa, anfíbol y piroxenos.

Siguiendo con el  $\text{K}^+$ , este catión no tiene una buena correlación con los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , ya que no sigue la tendencia descendente observada en los cursos principales. De hecho, el  $\text{K}^+$  presenta una tendencia levemente descendente a lo largo del Cajón de Los Cipreses, seguido de un leve ascenso en las concentraciones a lo largo del río Clarillo. Este aumento en los valores de  $\text{K}^+$  en el río Clarillo no estaría relacionado a un aporte de los afluentes, ya que estos tienen menores concentraciones que el curso principal. Es por esto que el leve incremento de este catión podría estar relacionado con la presencia del plutón La Obra, específicamente proveniente de la alteración de minerales típicos de granitoides como feldespatos alcalinos (ortoclasa y microclina) y biotita.

Con respecto al anión  $\text{Cl}^-$ , este sigue una tendencia levemente ascendente en los cursos principales, sin mayor influencia de los afluentes ya que siguen un comportamiento similar, sin tener una correlación significativa con ningún otro de los elementos estudiados. Este anión tiende a permanecer en el agua, se considera como un ion conservativo, no tiende a reaccionar, no se oxida ni reduce en aguas naturales y su captación desde las rocas no suele ser importante, presentándose como impurezas (Hem, 1985). Es por esto que el ion  $\text{Cl}^-$  se relacionaría con la madures del agua cuyo su origen estaría asociado a la composición del agua lluvia, por lo que no se evidencia un control geológico en su origen y concentración.

Por último, respecto a la alcalinidad, el cual se interpreta como la suma de las concentraciones de  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , presenta una moderada correlación con el pH, identificando bajas concentraciones en las zonas altas del Cajón de Los Cipreses, aumentando los valores a medida que los afluentes (con mayores concentraciones) se van uniendo al curso principal, dando lugar a valores intermedios

en el río Clarillo. Dicho aumento de la alcalinidad ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ) a medida que los afluentes se unen a los ríos Los Cipreses y Clarillo es un reflejo del aporte de aguas prístinas sin contacto con la zona mineralizada a los cursos principales, evolucionando hacia el campo de aguas tipo bicarbonatada-cálcica, pero sin llegar a ellas (Figura 6.2).

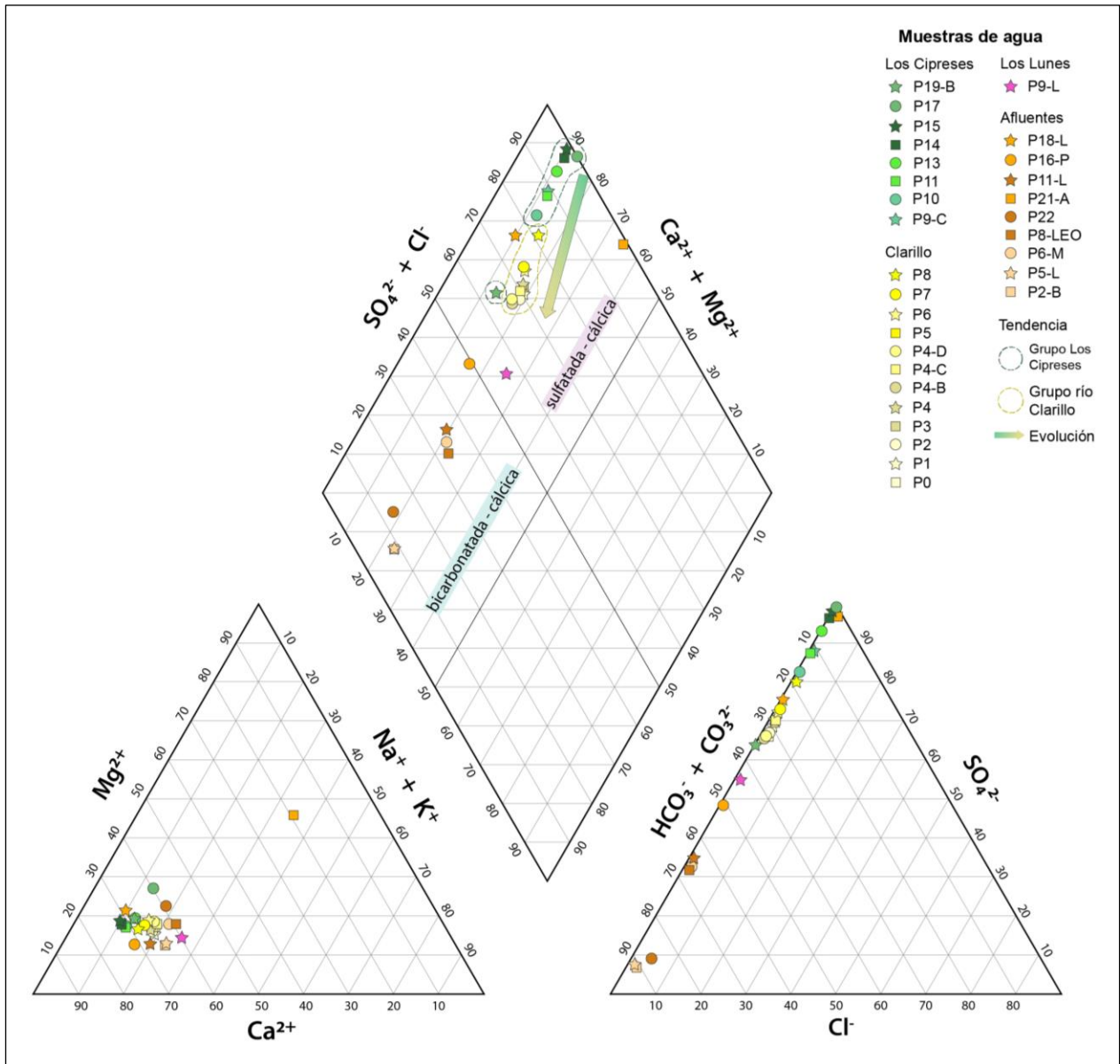


Figura 6.2: Evolución de las muestras de agua a través del diagrama de Piper.

### 6.2.2. Elementos menores y traza

Al analizar las correlaciones y factores entre los elementos menores y trazas observados en la matriz de Pearson y análisis de componentes principales (ACP), sumado al comportamiento observado en el Cajón de Los Cipreses, río Clarillo y afluentes identificados en los diagramas de caja y mapas de distribución, es posible agrupar ciertos elementos y analizarlos en conjunto, mientras que otros tienen comportamientos individuales.

#### 6.2.2.1. Factor 1

La gran mayoría de los elementos menores y trazas se encuentran en este factor, los que corresponden a B, Cd, Li,  $\text{NO}_2^-$  y V, además de algunos parámetros químicos (CE) y elementos mayores ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ). A partir de sus comportamientos a detalle es posible diferenciar subgrupos de elementos dentro de este factor: i) B-Cd-V, ii) Li, iii)  $\text{NO}_2^-$ .

Respecto al primer subgrupo B-Cd-V, presentan una correlación moderada-alta entre ellos y siguen una tendencia general similar, con mayores concentraciones en el Cajón de Los Cipreses, menores en los afluentes y valores intermedios en el río Clarillo. Debido a que el Cd y V son elementos de transición, su elevada correlación (0,816) se podría asociar a un comportamiento geoquímico similar, aunque al no ser vecinos en la tabla periódica (número atómico 48 y 23 respectivamente), podría ser por un origen común. En cambio, el B es un metaloide, por lo que su correlación moderada con el Cd (0,521) y V (0,687) no se podría relacionar a una afinidad geoquímica. Además, este grupo de elementos tiene una moderada a alta correlación con la CE y el  $\text{SO}_4^{2-}$ , por lo que su origen podría relacionarse más a una fuente en común, asociado al fluido mineralizador de la zona hidrotermal.

En cuanto al Li, este elemento se correlaciona bien con los del primer grupo (B-Cd-V), pero se observa un comportamiento levemente distinto en el río Clarillo, específicamente entre los puntos P5 y P0, por lo que se decidió estudiar por separado. Su moderada correlación con la CE y  $\text{SO}_4^{2-}$  podría indicar un origen común con los elementos del primer grupo, asociado a la zona de alteración hidrotermal, pero las fluctuaciones en sus concentraciones en el río Clarillo indicarían una influencia distinta, la cual no ocurre en los elementos del primer grupo. Entre los puntos P4-C y P4 se observa una disminución de la concentración de Li, en comparación a los puntos anteriores (P5 y P4), sin estar asociado a un aporte de agua desde un afluente, para luego aumentar levemente

hasta la salida del Parque Nacional (P0). Esta variación repentina en las concentraciones podría estar asociado a una dilución por aumento del caudal en la zona, o bien a un aporte de aguas prístinas con menores concentraciones de Li, lo cual se relacionaría a una exfiltración de agua desde otra cuenca como lo menciona Marti *et al.* (2023).

Siguiendo con el  $\text{NO}_2^-$ , este anión tiene una correlación baja con los del primer grupo (B-Cd-V) y un comportamiento distinto en el río Clarillo, con fluctuaciones locales observadas entre los puntos P4-B y P5, además de P0 y P2, por lo que también se decidió estudiar por separado. Para comprender el origen y evolución de dicho anión, es necesario estudiar como varía el nitrógeno y sus distintas formas en el Parque Nacional.

Los compuestos nitrogenados presentes en las aguas naturales están íntimamente relacionados al ciclo del nitrógeno, encontrándose en gran parte como nitrógeno gaseoso en la atmósfera, seguido en sus formas oxidadas ( $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ) en los suelos y sustancias orgánicas, así como compuestos minoritarios en las rocas (De Miguel-Fernandez & Vázquez-Taset, 2006). El nitrógeno puede manifestarse en forma de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NH}_4$ , y por procesos de oxidación, estas formas reducidas pueden transformarse en  $\text{NO}_2^-$  y finalmente en  $\text{NO}_3^-$  que es la forma más usual y estable (De Miguel, 1999, en De Miguel-Fernandez & Vázquez-Taset, 2006). De este modo, el ion  $\text{NO}_2^-$  puede estar presente en las aguas como consecuencia de la oxidación del  $\text{NH}_3$  o como resultado de la reducción microbiana de los  $\text{NO}_3^-$ , y su presencia debe considerarse como indicio de una posible contaminación antrópica reciente debido a su inestabilidad (De Miguel-Fernandez & Vázquez-Taset, 2006). Ahora, su moderada-alta correlación con la CE,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , siguiendo un comportamiento descendente similar a la de estos iones, podría indicar que dichas reacciones nitrificantes o desnitrificantes estarían ocurriendo preferentemente en la cabecera del Cajón de Los Cipreses asociado a la zona de alteración hidrotermal, ya que presenta mayores concentraciones de  $\text{NO}_2^-$  en dicho sector.

Ahora, el hecho de que las reacciones nitrificantes den lugar a  $\text{NO}_2^-$  se relacionaría con el bajo oxígeno disuelto (OD) del área, favoreciendo reacciones incompletas y dando lugar al anión menos estable del ciclo. Esto se comprueba al comparar el comportamiento del  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  en el Cajón de Los Cipreses, los cuales se relacionan de manera inversa, disminuyendo las concentraciones de  $\text{NO}_2^-$  y aumentando el  $\text{NO}_3^-$  a medida que aumenta el OD, dando lugar a la tendencia descendente del  $\text{NO}_2^-$  y ascendente del  $\text{NO}_3^-$  observada en las muestras obtenidas en Los Cipreses y sectores

altos del río Clarillo. Otro factor que podría estar influyendo en la formación preferente de  $\text{NO}_2^-$  en la zona alta del Cajón de Los Cipreses es la reducción del poco  $\text{NO}_3^-$  que se esté formando mediante la oxidación de componentes reducidos como pirita (Appelo & Postma, 2005), mineral que se encontraría en la zona de alteración hidrotermal.

Por otro lado, los aumentos localizados de concentración observados en el río Clarillo estarían indicando una influencia distinta en el área. Entre los puntos P4-B y P5 se observa un aumento de las concentraciones de  $\text{NO}_2^-$ , en comparación a los puntos anteriores (P6, P7, P8 y P9-C), sin estar asociado a un aporte de agua con elevada concentración desde un afluente, ya que el punto P5-L (afluente cercano) presenta bajas concentraciones de dicho anión, para luego disminuir levemente en los puntos posteriores (P3 y P4). Esta alza en las concentraciones podrá relacionarse a un aporte de aguas con mayores valores de  $\text{NO}_2^-$  asociado a la exfiltración de agua desde una cuenca vecina como lo menciona Marti *et al.* (2023), al igual que como pasa con el Li. En cambio, el nuevo aumento de concentración en los puntos P0, P1 y P2 debería estar asociado a otra fuente, ya que no sigue la tendencia descendente observada en los puntos anteriores (P3 y P4). Dicho aumento coincide en los sectores donde se encuentra la mayor infraestructura del Parque Nacional como zonas de *picnic*, baños, estacionamientos y balnearios. Debido a ello, este nuevo aumento en las concentraciones de  $\text{NO}_2^-$  se relacionaría a contaminación antrópica reciente favorecida por participación bacteriana, como por ejemplo en la descomposición de alimentos y basura de los sectores de merienda. Esto concuerda con el comportamiento inestable de este anión, siendo considerado como indicador de contaminación por vertido de residuos orgánicos (Hem, 1985).

#### 6.2.2.2. Factor 2

En este factor se observa la presencia de Al en correlación inversa alta (-0,812) con el pH, además de elementos con una baja correlación entre ellos, como el  $\text{NO}_3^-$  con el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y alcalinidad. Debido a esto se estudiará en dicho factor el Al como elemento individual y su relación con el pH.

El Al es un elemento muy común y abundante en rocas ígneas, formando parte de minerales como feldespatos, micas, anfíboles y arcillas, por lo que su concentración base en las muestras de agua estaría relacionado a alteración de estos minerales a lo largo del todo el Parque Nacional, tanto en las rocas graníticas del Plutón La Obra, como las rocas volcánicas andesíticas, dacíticas y en la zona de alteración hidrotermal asociadas a las formaciones Abanico y Farellones. La leve



fluctuación en las concentraciones de Al observadas en puntos determinados del área protegida se correlaciona inversamente con el pH, lo que indicaría que a menores valores de pH el Al se encuentra como ion disuelto más que como precipitado mineral, favoreciendo la liberación de este elemento en los procesos de alteración mineralógica.

#### 6.2.2.3. Factor 3

En este factor se encuentran los grupos Cd-Cl<sup>-</sup> y Li-Cl<sup>-</sup> correlacionados inversamente de forma baja a moderada (-0,419 y -0,458 respectivamente). Como se mencionó anteriormente en el Factor 1 y en el análisis del Cl<sup>-</sup> en el apartado de elementos mayores, el origen del Cd y Li estaría asociado al fluido hidrotermal mineralizante de la zona de alteración, mientras que el Cl<sup>-</sup> se relaciona al aporte de aguas prístinas de los afluentes que mantienen la señal química de aguas lluvias sin interacción con la zona mineralizada. Debido a esto, a medida que los afluentes se unen a los cursos principales, aumentaría la concentración de Cl<sup>-</sup> y se diluye la concentración de Cd y Li, por lo que siguen un comportamiento inverso. Además, como el Cl<sup>-</sup> es un elemento conservativo que no participa de reacciones, su variación no se debe a factores geológicos (como si se observa en el Li), por lo que la correlación es baja al igual que con otros elementos traza de origen hidrotermal.

#### 6.2.2.4. Factor 4

En este último factor se encuentra el grupo As-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> correlacionados moderadamente de forma inversa (-0,534), pero sin presentar una tendencia de distribución muy notoria con zonas anómalas determinadas en el Parque Nacional Río Clarillo, por lo que se estudiaran de forma separada.

Para el caso del As, este suele ser un constituyente de aguas termales, por lo que su concentración levemente fuera de las normas a lo largo de todo el Parque Nacional podría relacionarse al fluido hidrotermal mineralizante de la zona filica-argílica, sumado a una liberación de As durante eventos posteriores de oxidación de pirita (Hem, 1985; Lillo, 2008). Ahora, existen ciertas zonas con concentraciones anómalas de este ion, como en los puntos P4-D, P5, P22 y P19-B, los cuales deben tener un origen distinto. Al no existir industrias en el área de estudio de las cuales pudiera provenir estas concentraciones de As, su origen no debería ser antrópico, por lo que las anomalías en los puntos P4-D, P5 y P22 se podría relacionar a la presencia de las rocas graníticas del plutón La Obra (Bundschuh *et al.*, 2008), específicamente a la disolución de minerales con contenido de As como

biotita, anfíbol, pirita y óxidos de hierro (Lillo, 2008), esto sumado a estructuras que favorezcan la circulación de aguas en el sector (zona fracturada y falla Papagayo). Respecto a la anomalía del punto P19-B, esta se podría relacionar a la liberación de As desde materia orgánica típica de bofedales facilitado por la presencia de un ambiente reductor (Lillo, 2008).

Por último, el  $\text{NO}_3^-$  es una especie aniónica que se transporta fácilmente en el agua y es estable en una gama considerable de condiciones, su presencia podría ser indicativo de contaminación, pero esta se habría producido en un lugar o momento muy alejados del punto de muestreo (Hem, 1985). Como se menciona respecto al  $\text{NO}_2^-$ , la variación descendente del  $\text{NO}_3^-$  se relaciona con la disponibilidad de oxígeno disuelto (OD), aumentando sus concentraciones en zonas con mayor OD favoreciendo la oxidación completa del  $\text{NH}_3$  en  $\text{NO}_3^-$  y disminuyendo la disponibilidad de  $\text{NO}_2^-$ . Ahora, los aumentos de concentración de  $\text{NO}_3^-$  observados en el río Clarillo entre los puntos P0 y P2 se correlacionan positivamente con los aumentos de  $\text{NO}_2^-$ , los cuales se asocian a contaminación antrópica en las zonas de merienda y balneario del Parque, por lo que su origen sería el mismo. En cambio, entre los puntos P4-C y P5 se observa nuevamente una correlación positiva entre los compuestos nitrogenados, por lo que las alzas en las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en dicho sector se podrían asociar nuevamente a la exfiltración de agua mencionada en Marti *et al.* (2023), al igual que como ocurre con el  $\text{NO}_2^-$  pero de una forma menos concentrada y, por lo tanto, menos evidente.

### 6.3. Procesos Hidrogeoquímicos

#### 6.3.1. Interacción Agua-Roca

Al analizar las variaciones en la composición de las muestras de agua se evidencia una estrecha relación entre la CE y los iones dominantes ( $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ), con la zona de alteración hidrotermal fílica y argílica intermedia ubicada en el sector alto del Cajón de Los Cipreses, lo cual también estaría relacionado con un descenso del pH en la zona.

Para determinar los procesos de interacción agua-roca que ocurren en la zona de estudio, como disolución/precipitación, oxidación/reducción e intercambio iónico, se suele utilizar razones iónicas y, con ellas, determinar el origen de la composición química del agua (Elango & Kannan, 2007). Para ello se utiliza la relación iónica  $r\text{Ca}/r\text{SO}_4$  (Figura 6.3), donde se observa que dichos iones no siguen una relación 1:1, por lo que su origen no estaría relacionado a disolución de yeso

y/o anhidrita. Además, en la zona de estudio no se encuentran este tipo de litologías, siendo las más observadas andesitas y dacitas, por lo que el  $\text{SO}_4^{2-}$  no podría provenir de ellas.

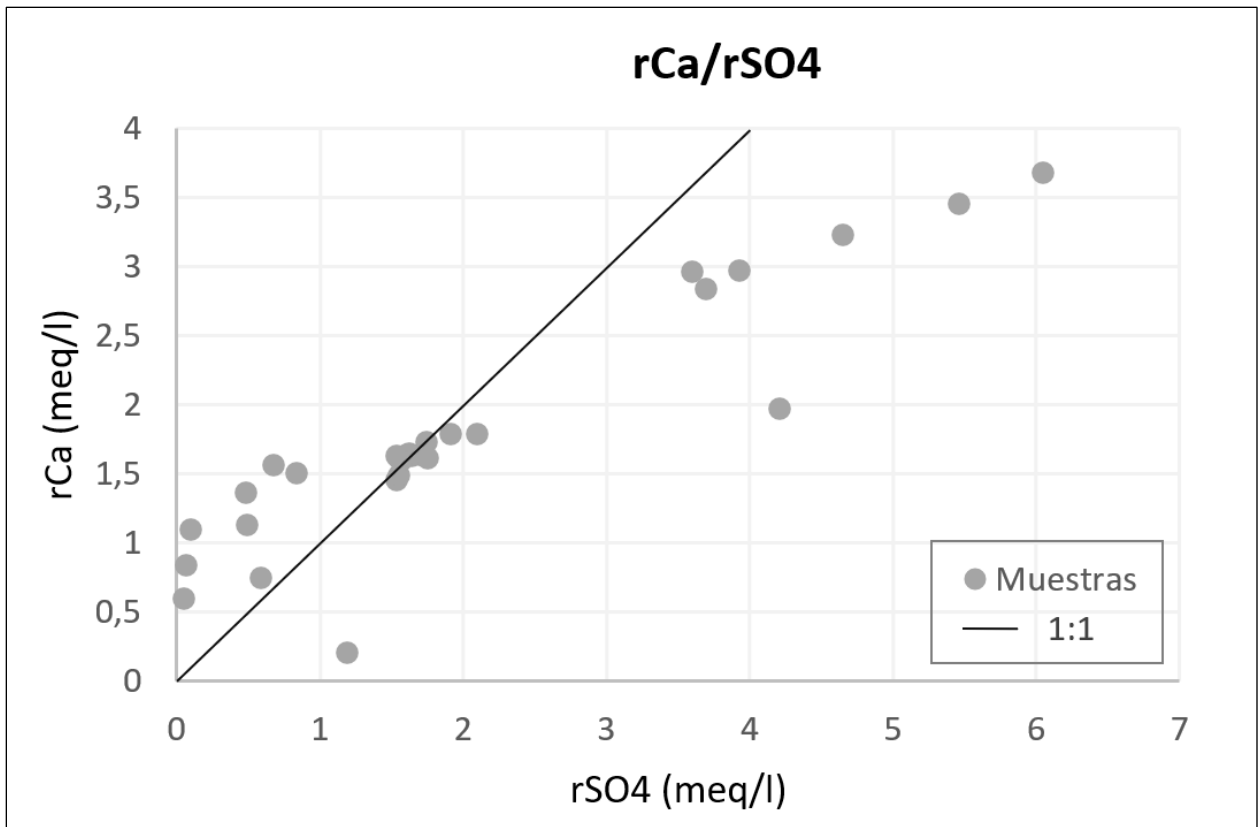


Figura 6.3: Relación Ca vs  $\text{SO}_4^{2-}$  en meq/l..

La presencia de alteración hidrotermal filica pervasiva, sumado a la identificación de aguas sulfatadas en los cursos principales y a la formación de hidróxidos de hierro (goethita) en la zona mineralizada, podrían indicar procesos de oxidación de sulfuros de hierro (pirita) en la zona alta del Cajón de Los Cipreses, aportando el azufre y hierro respectivo. Además, el  $\text{Ca}^{2+}$  provendría de la alteración de plagioclasas asociado a la alteración filica, dando lugar a la sericita y cuarzo secundario observado.

Ahora, en las muestras obtenidas de la zona de alteración hidrotermal no se logró observar pirita, pero sí pequeños espacios y vetas vacías, por lo que, de haber existido, se encontrarían completamente lixiviadas. Además, este mineral es muy común asociado a la alteración hidrotermal filica (Corbett & Leach, 1997), por lo que debería encontrarse en la zona mineralizada.

Cabe mencionar que, en las andesitas y dacitas aledañas al sector mineralizado, según datos de terreno no se identificó pirita, más si óxidos de hierro.

Respecto a estudios similares, en el trabajo de Treskow (2019) se estudió una cuenca cercana ubicada al norte del área de estudio, en el sector Campos de Ahumada en Los Andes, asociado a las mismas formaciones (Abanico y Farellones), franja metalogénica (Mioceno tardío- Plioceno temprano) y alteración hidrotermal (fílica y argílica intermedia). En dicho sector, la autora identificó pirita en rocas aledañas a la zona mineralizadas, así como *boxwork* y espacios vacíos en rocas de la zona alterada, modelando un escenario de drenaje ácido natural que explicaría concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y pH ácido presente. Otros autores también han identificado drenaje ácido natural en cuencas andinas vecinas, como Valenzuela (2019) y Navarrete (2020), estudiando el sector de Yerba Loca en Santiago, al norte de la cuenca del río Clarillo.

El drenaje ácido es el escurrimiento de soluciones ácidas sulfatadas resultado de la oxidación química y biológica de minerales sulfurados (principalmente pirita) y de la lixiviación de metales pesados asociados, las cuales ocurren de forma natural y se aceleran por aumento de la exposición de la roca al oxígeno y al agua, y por la acción catalizadora de algunas bacterias (Ministerio de Minería, 2002). Se produce en condiciones naturales (drenaje ácido de rocas) o por actividades mineras (drenaje ácido de minas), dando lugar a pH ácido en torno a 2-4, altas concentraciones de metales disueltos y liberando sulfato (Nordstrom, 1982; Nordstrom & Alpers, 1999). Ahora, debido a las condiciones geológicas e hidrológicas de Chile, puede haber numerosas zonas de drenaje ácido de roca que aún no han sido descubiertas (Ministerio de Minería, 2002).

### **6.3.2. Mezcla de Aguas**

Al analizar las variaciones de los parámetros fisicoquímicos, elementos mayores, menores y traza a lo largo del Parque Nacional Río Clarillo se identifican ciertos procesos referentes a mezcla de agua que cobran importancia en el sector: el primero asociado a la combinación de afluentes con los cursos principales (Los Cipreses y Clarillo) y el segundo asociado a una exfiltración de agua desde otra cuenca.

Respecto a la mezcla de aguas entre afluentes y cursos principales, este proceso cumple una función de suma importancia en la dilución de los componentes químicos concentrados a lo largo del área, contribuyendo a una normalización de los parámetros que, al estar asociados a la zona de alteración

hidrotermal y a procesos de drenaje ácido en la zona alta del Cajón de Los Cipreses, sus concentraciones se observan elevadas. Las mayores variaciones se identifican en los parámetros CE y pH, así como en el anión predominante  $\text{SO}_4^{2-}$ . De esta forma, las muestras de aguas sulfatadas con elevada CE y pH ácido van avanzando hacia muestras de agua con menores concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$ , menores iones disueltos, pH alcalinos, siguiendo una evolución desde aguas muy sulfatadas-cálcicas hacia la zona de aguas bicarbonatadas-cálcicas, pero sin entrar en ellas (Figura 6.1). Ahora, en la gran mayoría de los elementos mayores, menores y trazas también se observa esta dilución en las concentraciones, pero en un orden menor, como lo es para el caso del  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , B, Cd, V, Li,  $\text{NO}_2^-$  y As, cuyas variaciones puntuales, especialmente en el río Clarillo, se deben a procesos geológicos y/o contaminación. Además, se observa un efecto inverso en la mezcla de agua de afluentes, con un aumento en las concentraciones de  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  a medida que los afluentes aportan aguas prístinas sin contacto con la zona mineralizada, siendo importante en la evolución de aguas observada en la Figura 6.1.

Por último, al analizar las variaciones de los elementos menores y traza, se identifica una zona común donde ciertos elementos (Li,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ) tienen un comportamiento distinto al que han seguido a lo largo del Parque Nacional y no es posible de explicar por mezcla de agua proveniente desde afluentes o por acción antrópica. Dicha zona conocida como “la zona de carrizal” experimenta aumentos de caudales entre los puntos P4 y P5, los que según Marti *et al.* (2023) estarían relacionados a exfiltración de agua desde otra cuenca. Debido a esto, es posible afirmar que la composición del agua exfiltrada no es muy distinta a la del Parque Nacional, pero sí con menores concentraciones de Li y mayores de los compuestos nitrogenados.

#### **6.4. Calidad de Aguas**

Los distintos cursos de agua superficial del Parque Nacional Río Clarillo presentan un amplio rango composicional, los cuales varían a lo largo de los flujos principales (Cajón de Los Cipreses y río Clarillo) y sus afluentes. En Chile el organismo encargado de estudiar y preparar las normas técnicas de calidad de agua a nivel nacional es el Instituto Nacional de Normalización (INN), el cual elaboró la norma NCh 409/1 para agua potable y la norma NCh 1333 para agua de distintos usos (como agua de riego), determinando así las concentraciones máximas permitidas de parámetros fisicoquímicos e iones disueltos, entre otros factores.

En este trabajo se analizarán los resultados obtenidos de conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), pH y concentraciones de iones disueltos (Tabla 5.4, 5.5 y 5.7) respecto a estas normas, para así poder evaluar la calidad del agua de los cursos superficiales del Parque Nacional según dichos parámetros.

#### 6.4.1. Norma de calidad para agua potable (NCh 409/1)

El agua potable corresponde al tipo de agua que cumple con los requisitos microbiológicos, físicos, químicos y de desinfección establecidos en la norma NCh 409/1, que aseguran su inocuidad y aptitud para el consumo humano (INN, 2005). Al analizar los puntos a lo largo de los cursos superficiales en el Parque Nacional y comparar los valores obtenidos con los establecidos en la norma NCh 409/1, se identifican ciertas variables que se encuentran por sobre los límites máximos establecidos para agua potable, como es el caso del pH y As.

Respecto al pH, la norma chilena establece como límites valores entre 6,5 (mínimo) y 8,5 (máximo) para agua potable. Siguiendo con ello, en la Tabla 6.1 se observan los puntos que presentan valores sobre o bajo este límite de pH considerando los promedios en dichas zonas con más de un muestreo, mientras que en el Anexo 6 se observan todas las muestras que se encuentran fuera de la norma.

Al analizar dicha tabla y el anexo se observa que existen algunas muestras fuera de la norma en los puntos P1, P2, P3, P4, P5 y P6 obtenidas en las últimas campañas de muestreo (campaña 32 y 34 del 2020), pero que el promedio de todos los muestreos en dichos puntos si se encuentran en la norma. Debido a esto es necesario tener especial cuidado con estos puntos, ya que el pH podría haber seguido aumentando posterior a los últimos muestreos realizados.

**Tabla 6.1: Puntos que sobrepasan el límite máximo de pH permitido en la norma NCh 409/1.** Los valores corresponden a los promedios de las muestras medidas en dicho punto, con excepción de los que presentan un asterisco (\*), ya que solo se obtuvo una muestra en dicho sector. Además, en color gris se destacan los cursos menores y quebradas asociadas a los ríos principales.

Punto	pH	Punto	pH	Punto	pH
P4-B	8,57	P16-A*	4,56	P19-A*	6,31
P4-C	8,60	P17*	4,36	P20	4,47
P7	8,62	P17-B*	5,52	P21-A*	4,30
P16-M*	4,77	P18*	4,03	P21-B*	3,06



Respecto al As, la norma chilena establece como concentración máxima 0,01 mg/l para ser considerada como agua potable. Siguiendo con ello, en la Tabla 6.2 se observan los puntos que presentan valores sobre este límite de As considerando los promedios en dichas zonas con más de un muestreo, mientras que en el Anexo 7 se observan todas las muestras que se encuentran fuera de la norma.

**Tabla 6.2: Puntos que sobrepasan el límite máximo de As permitido en la norma NCh 409/1.** Los valores corresponden a los promedios de las muestras medidas en dicho punto, con excepción de los que presentan un asterisco (\*), ya que solo se obtuvo una muestra en dicho sector. Además, en color gris se destacan los cursos menores y quebradas asociadas a los ríos principales.

Punto	As (mg/l)	Punto	As (mg/l)	Punto	As (mg/l)
P4	0,012	P9-L	0,012	P15*	0,012
P4-C	0,014	P9-C	0,012	P16-P*	0,013
P4-D	0,022	P10*	0,011	P18-L*	0,011
P5	0,016	P11*	0,012	P19-B*	0,027
P6-M	0,013	P13*	0,012	P21-A	0,014
P8	0,014	P14*	0,011	P22	0,026

Al analizar dicha tabla y anexo se observa que existan algunas muestras fuera de la norma en los puntos P0, P1, P2, P2-B, P3, P4-B, P5-L y P6, pero que el promedio de todos los muestreos en dichos puntos si se encuentran en la norma. Debido a esto es necesario utilizar los resultados con precaución, ya que el aumento en la concentración de As podría haber seguido existiendo posterior a los últimos muestreos realizados. Ahora, a diferencia de lo que ocurre con el pH, las muestras alteradas del As se obtuvieron de diferentes campañas de muestreo, desde la número 18 a la 34, por lo que sus concentraciones por sobre el umbral permitido se ha mantenido en el tiempo.

En la Figura 6.4 se observa la ubicación de los puntos cuyos valores de pH y/o As no cumplen con norma NCh 409/1 para agua potable, por lo que no se recomienda consumir agua de estos sectores. Estos puntos se encuentran distribuidos principalmente a lo largo del Cajón de Los Cipreses y, en menor cantidad, en el sector medio-alto del río Clarillo. A pesar de ello se recomienda, de todas formas, no consumir agua a lo largo de todo este último cauce, ya que presenta varias muestras fuera de la norma que podrían seguir manteniéndose de este modo, pese a que el promedio obtenido en esos puntos cumpla con el reglamento.

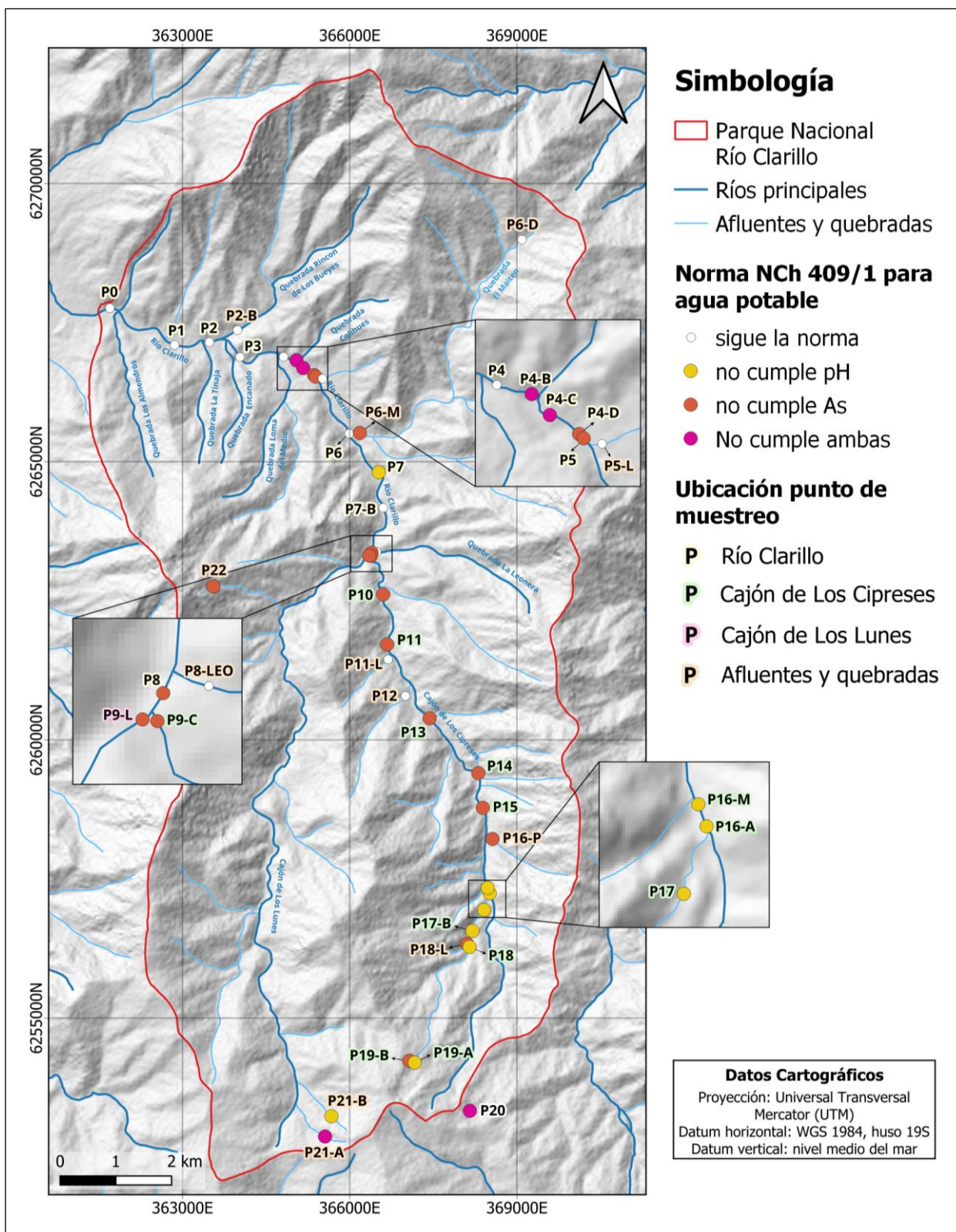


Figura 6.4: Mapa de ubicación de los puntos con valores de pH y/o As fuera de la norma NCh 409/1.

### 6.4.2. Norma de calidad para agua de riego (NCh 1333)

El agua de riego corresponde al tipo de agua que cumple con los requerimientos físicos, químicos y biológicos establecidos en la norma NCh 1333 para ser usada como agua de riego, los cuales buscan proteger y preservar la calidad de las aguas para dicho uso (INN, 1978). Al analizar los puntos a lo largo de los cursos superficiales en el Parque Nacional y comparar los valores obtenidos con los establecidos en la norma NCh 1333, se identifican ciertas variables que se encuentran por sobre los límites máximos establecidos para agua de riego, como es el caso del pH y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Respecto al pH, la norma chilena establece como límites valores entre 5,5 (mínimo) y 9,0 (máximo) para agua de riego. Siguiendo con ello, en la Tabla 6.3 se observan los puntos que presentan valores sobre o bajo este límite de pH considerando los promedios en dichas zonas con más de un muestreo, mientras que en el Anexo 8 se observan todas las muestras que se encuentran fuera de la norma.

**Tabla 6.3: Puntos que sobrepasan el límite máximo de pH permitido en la norma NCh 1333.** Los valores corresponden a los promedios de las muestras medidas en dicho punto, con excepción de los que presentan un asterisco (\*), ya que solo se obtuvo una muestra en dicho sector. Además, en color gris se destacan los cursos menores y quebradas asociadas a los ríos principales.

Punto	pH	Punto	pH
P16-M*	4,77	P18*	4,03
P16-A*	4,56	P21-A*	4,3
P17*	4,36	P21-B*	3,06

Al analizar dicha tabla y anexo se observa que existe una muestra fuera de la norma en el punto P3 obtenida durante la campaña 34 (última campaña de muestreo), pero que promedio de todas las muestras de dicho punto si se encuentran en la norma.

Respecto al  $\text{SO}_4^{2-}$ , la norma chilena establece como concentración máxima 250,00 mg/l para ser considerada como agua de riego. Siguiendo con ello, en la Tabla 6.4 se observan los puntos que presentan valores sobre este límite de  $\text{SO}_4^{2-}$  establecido. Cabe mencionar de dichos puntos presentan solo una muestra en el sector, por lo que se tratará de esa forma.

**Tabla 6.4: Puntos que sobrepasan el límite máximo de  $\text{SO}_4^{2-}$  permitido en la norma NCh 1333.**

Punto	Código	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	Punto	Código	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)
P14	HP34W14	262,301	P15	HP34W15	290,724

En la Figura 6.5 se observa la ubicación de los puntos cuyos valores de pH y/o  $\text{SO}_4^{2-}$  no cumplen con norma NCh 1333 para agua de riego, por lo que no se recomienda utilizar el agua de dichos sectores para ese uso. Estos puntos fuera de la norma se ubican en el Cajón de Los Cipreses, tanto para pH como para  $\text{SO}_4^{2-}$ , manteniéndose en los sectores altos del curso principal. Además, debido al análisis de muestras individuales obtenidas en el río Clarillo, se recomienda considerar el punto P3 como agua no apta para el riego, ya que dicho valor fuera de la norma podría seguir manteniéndose así, pese a que el promedio obtenido en ese punto cumpla con el reglamento. Esto podría ocurrir, ya que la muestra fuera de la norma se obtuvo de la última campaña de muestreo obtenida el 2020, por lo que podría haber seguido con dicho comportamiento.



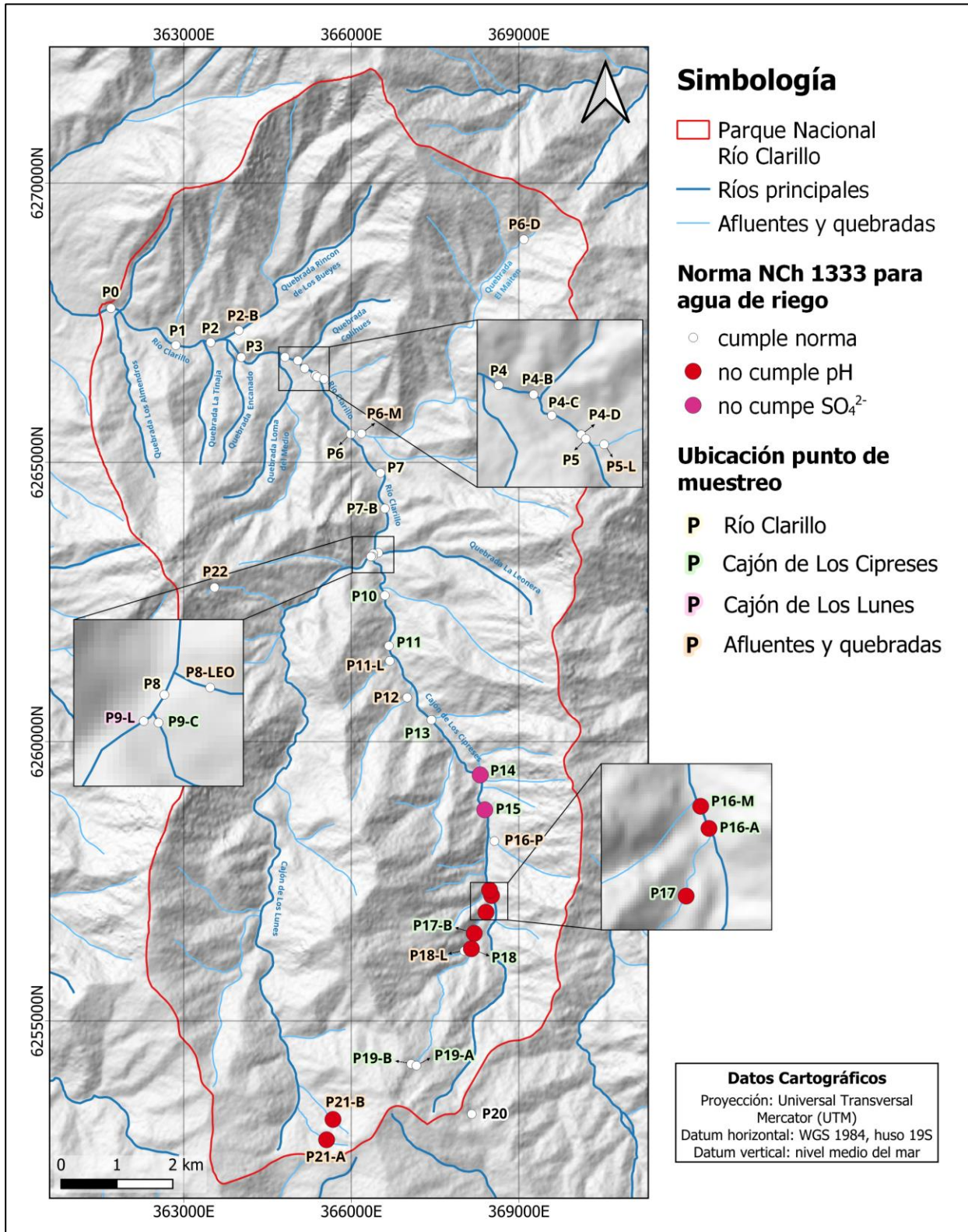


Figura 6.5: Mapa de ubicación de los puntos con valores de pH y/o  $\text{SO}_4^{2-}$  fuera de la norma NCh 1333.

## 7. CONCLUSIÓN

La elaboración de la presente memoria de título permitió realizar una caracterización mineralógica de una zona de alteración hidrotermal ubicada en el sector alto del Cajón de Los Cipreses, así como caracterizar las aguas superficiales del Parque Nacional Río Clarillo y, a través de dichos resultados, interpretar el rol de la geología en la variación en los parámetros fisicoquímicos y composición química de los cursos de agua.

De las muestras de rocas alteradas se identifican, principalmente, minerales de cuarzo y sericita distribuidos ampliamente en corte transparente, ambos de origen secundario y asociados a una alteración filica pervasiva, la cual oblitera por completo la textura original de la roca. Además, se asocia a dicha alteración la mineralización metálica de rutilo en bajo porcentaje. Por otro lado, la presencia de arcillas de origen secundario, específicamente de illita y esmectita, se asocia a una alteración argílica intermedia desarrollada de manera incipiente. Por último, la identificación de hidróxidos de hierro (goethita) en las muestras se asocia a eventos posteriores de oxidación.

Respecto a las variaciones de los parámetros fisicoquímicos *in situ*, la conductividad eléctrica (CE) siguió una tendencia descendente con mayores valores en la zona alta del Cajón de Los Cipreses, menores valores en los afluentes y valores intermedios en el río Clarillo. En cambio, el pH presentó una tendencia descendente, con valores que van desde ácidos en la cabecera del Cajón de Los Cipreses, seguido por neutros y levemente alcalinos, hasta alcalinos a lo largo del río Clarillo. Dicha variación está relacionada con la zona de alteración hidrotermal filica y argílica intermedia, la cual, mediante alteración mineralógica, aportes del fluido hidrotermal y procesos oxidantes posteriores, modifican los parámetros fisicoquímicos del río, aumentando los iones disueltos y acidificando el agua. Por otro lado, la tendencia levemente descendente del oxígeno disuelto (OD) se relaciona más a la presencia de vegetación en el sector, o a la falta de esta, favoreciendo o disminuyendo la oxigenación del agua en el curso superficial.

Según la clasificación composicional de las muestras de agua, se reconoce como facie hidrogeoquímica predominante las aguas sulfatadas-cálcicas identificadas a lo largo del Cajón de Los Cipreses y del río Clarillo, así como en afluentes cercanos a la zona mineralizada, evidenciando una evolución desde aguas con elevadas concentraciones relativas de  $\text{SO}_4^{2-}$  en las zonas altas de Los Cipreses hacia zonas con menores concentraciones relativas de este ion en el río Clarillo,



acercándose hacia el campo de aguas tipo bicarbonatada-cálcica. Por otro lado, la mayoría de los afluentes presentan aguas tipo bicarbonatada-cálcica, cumpliendo un rol importante en la evolución de las aguas de los cursos principales, amortiguando y normalizando los valores a medida.

Respecto a la variación de elementos mayores, menores y trazas, la principal fuente de ellos se asocia a la alteración de minerales pertenecientes a la roca original (feldespatos, biotita y anfíboles), así como de minerales formados en la zona hidrotermal (muscovita y arcillas), los cuales corresponden a los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Al}$ . Otra fuente de elementos proviene directamente del fluido hidrotermal, como es el caso de los iones  $\text{Li}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{V}$  y  $\text{As}$ . En cambio, los compuestos nitrogenados ( $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ) se originan de las reacciones oxidantes y reductoras del ciclo del nitrógeno. Por último, iones como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  reflejan de aguas prístinas asociado a la composición del agua lluvia. Ahora, las variaciones locales observadas en algunos de estos iones dependen de cambios litológicos, cambios en las condiciones fisicoquímicas del medio, aportes de aguas con concentraciones diferentes, movilización de elementos en por estructuras y contaminación antrópica.

Respecto a los procesos dominantes que ocurren en el Parque Nacional, la elevada concentración de sulfato en el sector aledaño a la zona mineralizada se asocia a la ocurrencia de drenaje ácido natural, el cual se produce por oxidación de pirita, mineral típico de alteraciones filicas, liberando y aportando el azufre en el medio. Además, durante este proceso se forman óxidos e hidróxidos de hierro, como los identificados en el estudio mineralógico (goetita), y se acidifica el agua por liberación de iones  $\text{H}^+$ . Esto sumado a la zona de alteración hidrotermal origina aguas sulfatadas ácidas con elevada CE en los sectores altos del Cajón de Los Cipreses. Otro proceso de suma importancia que ocurre en el sector es la mezcla de aguas, principalmente al efecto amortiguador que aportan los afluentes a la hora de unirse con los cursos principales, normalizando el pH, CE y las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el agua. Además, en la zona de Carrizal donde ocurre una exfiltración de agua desde otra cuenca (Marti *et al.*, 2023) se observa variaciones en las concentraciones de  $\text{Li}$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ , por lo que es posible afirmar que la composición de dicha agua es similar a la del Parque.

Por último, según la norma chilena de agua potable (NCh 409), se observan valores fuera de la norma en pH y As en casi la totalidad del área. Además, respecto a la norma para agua de riego (NCh 1333) se establece el pH y  $\text{SO}_4^{2-}$  fuera de la norma en sectores altos del río Los Cipreses.

## 8. REFERENCIAS

- ABDI, H. & WILLIAMS, L. 2010. Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. Vol. **2**: 433-459.
- AGUIRRE, L. 1960. Geología de los Andes de Chile Central: provincia de Aconcagua. *Instituto de investigaciones geológicas*. N° **9**: 1-75. Santiago.
- ALARCON, V.; ALCAYAGA, H.; & ÁLVAREZ, E. 2015. Hydrological modeling of an ungauged watershed in Southern Andes. *International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering*. Vol. **1702**, (1): 190003-1-190003-7. Atenas.
- APPELO, C. & POSTMA, D. 2005. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, Second Edition. A. A. Balkema: 634 pp. Rotterdam.
- BECERRA, N. 2020. Análisis de componentes hidrológicos y su influencia en el tipo de escurrimiento superficial en microcuencas de la reserva nacional río clarillo, comuna de Pirque, región metropolitana de Santiago. Memoria para optar al título de Geógrafo. Universidad de Chile, Escuela de Geografía (Inédito): 69 pp., Santiago.
- BUNDSCHUH, J.; PÉREZ-CARRERA, A. & LITTER, M. 2008. Distribución del arsénico en las regiones ibérica e iberoamericana. CYTED: 231 pp. Argentina.
- CHARRIER, R.; BAEZA, O.; ELGUETA, S.; FLYNN, J.; GANS, P.; KAY, S.; MUÑOZ, N.; WYSS, A. & ZURITA, E. 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33–36 SL). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **15**, (1): 117-139.
- 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*. Vol. **353**, (3-4): 294-313.
- CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF). 1996. Plan de manejo: Reserva Nacional Río Clarillo. Corporación Nacional Forestal. N° **24**: 1-115 pp. Santiago.

- CORBET, G. & LEACH, T. 1997. Southwest pacific rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization, Short Course Manual. *Workshop SME/SEG*. 318 pp.
- COVARRUBIAS, M. 2023. Emplazamiento del batolito La Obra en el límite occidental de la Cordillera Principal (Chile central, 33-34°s): estudio de anisotropía de susceptibilidad magnética. Memoria para optar al título de Geóloga. Universidad Mayor, Escuela de Geología (Inédito): 108 pp., Santiago.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M. 1983. Hidrología Subterránea, Tomo I. Omega, S. A.: 1157 pp. Barcelona.
- DE MIGUEL-FERNANDEZ, C. & VÁZQUEZ-TASET, Y. 2006. Origen de los nitratos (NO<sub>3</sub>) y nitritos (NO<sub>2</sub>) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*. Vol. **22**, (3): 1-9.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Maipo. CADE-IDEPE Consultores en Ingeniería: 201 pp.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2021. Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca del Maipo: informe final. SIT N° 471. Ingeniería y Consultoría en Aguas SPA (ICASS): 420 pp.
- ELANGO, L. & KANNAN, R. 2007. Rock–water interaction and its control on chemical composition of groundwater. Concepts and Applications in Environmental Geochemistry. D. Sarkar, R. Datta y R. Hannigan (editores). Elsevier Ltd: 229-243 pp.
- GANNA, P. & WALL, R. 1997. Evidencias geocronológicas 40Ar/40Ar y K-Ar de un hiatus Cretácico Superior-Eoceno en Chile Central (33-33°30'S). *Revista geológica de Chile*. Vol. **24**, (2): 145-163. Santiago.
- GONZÁLEZ, F.; MAKSYMOWICZ, A.; DÍAZ, D.; VILLEGAS, L.; LEIVA, M.; BLANCO, B.; VERA, E.; CONTRERAS, D.; CABRERA, D. & BONVALOT, S. 2018. Characterization of the depocenters and the basement structure, below the central Chile Andean Forearc: A 3D geophysical modelling in Santiago Basin area. *Basin Research*. Vol. **30**, (4): 799-815.

- GÜLER, C.; THYNE, G.; MCCRAY, J. & TURNER, A. 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*. Vol. **10**: 455-474.
- HEM, J. 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. United States Geological Survey Water - Supply: 263 pp. Alexandria.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN). 1978. Norma chilena oficial NCh1333: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. 9 pp. Santiago.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN). 2005. Norma chilena oficial NCh409/1: agua potable - parte 1 - requisitos. 9 pp. Santiago.
- JOHNSON, P. & BARRINGER, J. 1993. Water quality and hydrogeochemical processes in McDonalds Branch Basin, New Jersey Pinelands. United States Geological Survey Water – Resources: 111 pp. New Jersey.
- KLEIN, C. & HURLBUT, C. 1997. Manual de Mineralogía volumen 1: basado en la obra de J. D. Dana. Reverte: 392 pp. Barcelona.
- KLOHN, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, Colchagua y Curicó. *Instituto de Investigaciones Geológicas*. Nº **8**: 1-95. Santiago.
- KRZYWINSKI, M. & ALTMAN, N. 2014. Visualizing samples with box plots: Use box plots to illustrate the spread and differences of samples. *Nature Methods*. Vol. **11**, (2): 119-120.
- LILLO, J. 2008. Peligros geoquímicos: Arsénico de origen natural en las aguas. Grupo de Estudios de Minería y Medioambiente: 33 pp.
- MARTI, E.; LERAY, S.; VILLELA, D.; MARINGUE, J.; YÁÑEZ, G.; SALAZAR, E.; POBLETE, F.; JIMENEZ, J.; REYES, G.; POBLETE, G.; HUAMÁN, Z.; FIGUEROA, R.; ARAYA-VARGAS, J.; SANHUEZA, J.; MUÑOZ, M.; CHARRIER, R. & FERNÁNDEZ, G. 2023. Unravelling geological controls on groundwater flow and surface water-groundwater interaction in mountain systems: A multi-disciplinary approach. *Journal of Hydrology*. Vol. **623**: 1-14.

- MINISTERIO DE BIENES NACIONALES. 2020. Decreto 30 | re-categoriza parte de la reserva nacional río clarillo a parque nacional y crea el "parque nacional río clarillo", en la región metropolitana. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1153731>.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. sf. Parque Nacional "Río Clarillo". Sistema de información y monitoreo de biodiversidad. Recuperado de <https://simbio.mma.gob.cl/AreaProtegida/Details/1027#general>.
- MINISTERIO DE MINERIA. 2002. Guía metodológica sobre drenaje ácido en la industria minera. Subsecretaría de Economía. Consejo Nacional de Producción Limpia. 77 pp. Santiago.
- NAVARRETE, A. 2020. Control hidrológico y geoquímico en las variaciones espaciales y temporales del drenaje ácido de roca en cuencas andinas de alta montaña (Yerba Loca, Chile). Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias, mención Geología (Inédito): 47 pp. Santiago.
- NIEMEYER, H.; BUSTAMANTE, R.; SIMONETTI, J.; TEILLIER, S.; FUENTES-CONTRERAS, & E.; MELLA, J. 2002. Historia natural de la Reserva Nacional Río Clarillo: un espacio para aprender ecología. Impresos Socías: 1-152 pp. Santiago.
- NORDSTROM, D. (1982). Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. Acid sulfate weathering. J.A. Kittrick, D.S. Fanning y L.R. Hossner (editores). Soil Science Society of America, Inc: 37-63 pp. Michigan.
- NORDSTROM, D. & ALPERS, C. 1999. Geochemistry of acid mine waters. The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. G.S. Plumlee y M.J. Logsdon (editores). Society for Economic Geologists, Inc: 133-160 pp.
- PIPER, A. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union Transactions*. Vol. **25**: 914–928.
- PIQUER, J.; HOLLINGS, P.; RIVERA, O.; COOKE, D.; BAKER, M. & TESTA, F. 2017. Along-strike segmentation of the Abanico Basin, central Chile: New chronological, geochemical and structural constraints. *Lithos*. Vol. **268-271**: 174-197.

- PIQUER, J.; RIVERA, O.; YÁÑEZ, G. & OYARZÚN, N. 2021. The Piuquencillo fault system: a long-lived, Andean-transverse fault system and its relationship with magmatic and hydrothermal activity. *Solid Earth*. Vol. **12**, (1): 253-273.
- REIMANN, C.; FILZMOSE, P.; GARRETT, R. & DUTTER, R. 2008. Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R. John Wiley & Sons Ltd: 343 pp. Chichester.
- SCHOT, P. & VAN DER WAL, J. 1991. Human impact on regional groundwater composition through intervention in natural flow patterns and changes in land use. *Journal of Hydrology*. Vol. **134**, (1-4): 297-313. Amsterdam.
- SENARATHNE, S.; JAYAWARDANA, J.; EDIRISINGHE, E. & CHANDRAJITH, R. 2020. Influence of regional climatic on the hydrogeochemistry of a tropical river basin—a study from the Walawe river basin of Sri Lanka. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. **28**: 15701-15715 pp.
- SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN). 2003. Mapa geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación Geológica Digital. N° 4: 25 pp. Santiago.
- STEINHORST, R. & WILLIAMS, R. 1985. Discrimination of Groundwater Sources Using Cluster Analysis, MANOVA, Canonical Analysis and Discriminant Analysis. *Water Resources Research*. Vol. **21**, (8): 1149-1156.
- STIFF, H. 1951. The Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Patterns. *Petroleum Transactions*. Vol. **192**: 376-379.
- TOWNLEY, B.; MAKSAEV, V.; PALACIOS, C.; LAHSEN, A. & PARADA, M. 1999. Base and precious metals geochemistry of rock units of the mainland Aysén region, Chilean Patagonia. *Journal of Geochemical Exploration*. Vol. **68**: 21-46.
- TRESKOW, V. 2019. Drenaje ácido natural: el caso de Campos de Chumada, Chile central. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 134 pp. Santiago.



- VALENZUELA, M. 2019. Water quality in the upper Mapocho river basin (Santiago, Chile): implications for environmental management in the overlap between a natural protected area and the world's greatest known copper deposit. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas y Tesis para optar al Grado de Magister en Minería. Universidad de Chile, Departamento de ingeniería de Minas (Inédito): 81 pp. Santiago.
- VERGARA, M.; CHARRIER, R.; MUNIZAGA, F.; RIVANO, S.; SEPULVEDA, P.; THIELE, R. & DRAKE, R. 1988. Miocene volcanism in the central Chilean Andes (31 30' S–34 35' S). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 1, (2), 199-209.
- WEGMANN, A. 2016. Evolución del paisaje de la comuna de Pirque (1960-2014), región Metropolitana de Santiago (Chile). Tesis para optar al grado de Doctora. Universitat de Barcelona, Facultad de Geografía e Historia (Inédito): 171 pp., Santiago.
- YÁÑEZ, G.; MUÑOZ, M.; FLORES-AQUEVEQUE, V. & BOSCH, A. 2015. Gravity derived depth to basement in Santiago Basin, Chile: implications for its geological evolution, hydrogeology, low enthalpy geothermal, soil characterization and geo-hazards. *Andean Geology*. Vol. 42, (2):147-172.

**ANEXOS**

**Anexo 1: Error (%) en el balance iónico de las muestras de agua.** Se observa en color verde muestras con error menor al 10%, en amarillo entre 10% y 15%, y naranja errores sobre 15%, los cuales corresponden a muestra posteriormente eliminadas.

Punto	Código	Error (%)	Punto	Código	Error (%)	Punto	Código	Error (%)
P0	HP18W01	- 3,940	P3	HP18W05	1,274	P5	HP18W08-0	- 12,367
P0	HP24W00	3,175	P3	HP18W06	0,911	P5	HP31W05	2,0581
P0	HP30W00	- 0,876	P3	HP24W03	- 8,284	P5	HP32W05	- 2,902
P0	HP32W00	6,398	P3	HP30W03	0,737	P5	HP34W05	- 0,652
P0	HP34W00	- 11,777	P3	HP32W03	- 2,538	P5-L	HP18W08-1	11,445
P1	HP18W02	- 3,754	P3	HP34W03	- 2,567	P5-L	HP18W08-2	4,877
P1	HP24W01	- 11,441	P4	HP18W07	- 3,617	P5-L	HP18W08-3	3,965
P1	HP32W01	- 0,840	P4	HP24W04	- 9,691	P5-L	HP18W08-4	31,743
P1	HP34W01	- 13,978	P4	HP31W04	0,470	P5-L	HP30W05L	- 1,042
P2	HP18W03	- 0,702	P4	HP32W04	- 4,782	P5-L	HP31W05L	34,343
P2	HP24W02	- 10,491	P4	HP34W04	- 1,733	P5-L	HP32W05L	1,646
P2	HP32W02	- 2,924	P4-B	HP31W04B	- 6,903	P5-L	HP34W05L	3,29645
P2	HP34W02	- 1,632	P4-B	HP32W04B	- 2,974	P6	HP24W06	2,582
P2-B	HP24W02B	- 6,182	P4-B	HP34W04B	- 0,892	P6	HP30W06	- 0,502
P2-B	HP30W02B	1,311	P4-C	HP31W04C	2,056	P6	HP32W06	- 1,906
P2-B	HP32W02B	1,896	P4-C	HP32W04C	- 3,573	P6	HP34W06	- 1,743
P2-B	HP34W02B	4,059	P4-C	HP34W04C	- 2,210	P6-M	HP16W09	1,312
P2-B	HP18W04-2	5,534	P4-D	HP31W04D	- 4,618	P6-M	HP24W06L	4,993
P2-B	HP18W04-1	3,330	P4-D	HP34W04D	- 1,076	P6-M	HP30W06M	1,694

Continúa en la página 84

Continuación del Anexo 1.

<b>Punto</b>	<b>Código</b>	<b>Error (%)</b>	<b>Punto</b>	<b>Código</b>	<b>Error (%)</b>	<b>Punto</b>	<b>Código</b>	<b>Error (%)</b>
P6-M	HP32W06M	1,218	P9-L	HP30W08L	- 0,048	P16-P	HP34W16P	4,126
P6-M	HP34W06M	2,660	P9-L	HP32W08L	- 2,356	P16-M	HP34W16M	- 17,097
P6-D	HP21W10	34,156	P9-L	HP34W08L	1,862	P16-A	HP34W16A	- 18,709
P7	HP32W07	- 4,460	P9-C	HP16W06	3,853	P17	HP34W17	- 13,507
P7	HP34W07	- 0,442	P9-C	HP24W08C	- 10,954	P17-B	HP21W04	- 24,789
P7-B	HP24W07	- 21,018	P9-C	HP30W08C	- 5,218	P18	HP34W18	- 15,923
P8-LEO	HP24W08M	0,946	P9-C	HP32W08C	- 8,535	P18-L	HP34W18L	- 2,748
P8-LEO	HP30W08-LEO	- 2,938	P9-C	HP34W08C	- 4,246	P19-A	HP21W05	- 23,040
P8-LEO	HP34W08-LEO	6,183	P10	HP34W10	- 5,585	P19-B	HP21W08	- 11,385
P8	HP24W08	- 8,429	P11	HP34W11	- 5,551	P20	HP21W09	- 19,250
P8	HP30W08	- 2,164	P11-L	HP16W03	11,292	P21-A	HP21W06	- 6,380
P8	HP32W08	- 6,712	P12	HP16W04	21,460	P21-B	HP21W07	29,676
P8	HP34W08	- 2,508	P13	HP34W13	- 8,158	P22	HP23W01	10,727
P9-L	HP16W07	- 3,421	P14	HP34W14	- 10,738			
P9-L	HP24W08L	- 5,463	P15	HP34W15	- 11,483			

**Anexo 2: Resultados mediciones in situ de parámetros fisicoquímicos. Los resultados con guion (-) no se pudieron medir.**

Punto	Código	T (C°)	CE (µS/cm)	Ox Disuelto (mg/l)	pH	Punto	Código	T (C°)	CE (µS/cm)	Ox Disuelto (mg/l)	pH
P0	HP18W01	19,6	245,0	8,45	7,77	P2-B	HP34W02B	20,0	184,1	7,93	7,86
P0	HP24W00	11,9	244,0	9,32	8,32	P2-B	HP18W04-2	13,3	113,8	8,71	8,04
P0	HP30W00	12,0	291,0	9,31	8,29	P2-B	HP18W04-1	13,4	113,4	8,93	8,05
P0	HP31W00	6,7	279,0	10,73	8,09	P3	HP18W05	12,1	251,0	9,51	7,94
P0	HP32W00	24,0	227,0	7,07	7,81	P3	HP18W06	15,0	250,0	9,19	7,87
P0	HP34W00	17,0	212,8	9,10	8,43	P3	HP24W03	10,0	256,0	10,56	8,50
P1	HP18W02	21,0	241,0	7,95	7,85	P3	HP30W03	10,8	305,0	9,62	8,13
P1	HP24W01	11,7	242,0	9,66	8,16	P3	HP32W03	23,6	230,0	8,39	8,65
P1	HP30W01	10,3	295,0	9,67	8,03	P3	HP34W03	21,7	214,5	8,84	9,05
P1	HP32W01	27,5	228,0	7,54	8,61	P4	HP18W07	17,9	252,0	8,74	8,12
P1	HP34W01	18,5	219,0	8,98	8,26	P4	HP24W04	10,4	270,0	9,55	8,09
P2	HP18W03	19,0	248,0	7,78	7,68	P4	HP31W04	8,3	293,0	10,25	8,15
P2	HP24W02	7,9	254,0	10,79	8,16	P4	HP32W04	19,8	235,0	8,60	8,21
P2	HP30W02	12,8	294,0	9,55	8,16	P4	HP34W04	23,8	220,0	7,86	8,97
P2	HP32W02	27,7	228,0	7,75	8,86	P4-B	HP31W04B	9,3	286,0	9,88	9,00
P2	HP34W02	19,5	217,6	8,84	8,82	P4-B	HP32W04B	18,0	235,0	8,67	7,92
P2-B	HP24W02B	7,5	111,6	10,17	8,07	P4-B	HP34W04B	22,0	222,0	8,14	8,79
P2-B	HP30W02B	9,5	135,8	9,78	8,04	P4-C	HP31W04C	12,3	286,0	9,38	8,10
P2-B	HP32W02B	23,0	106,7	7,47	7,86	P4-C	HP32W04C	26,8	232,0	7,47	8,94

Continúa en la página 86

Continuación del Anexo 2.

Punto	Código	T (C°)	CE (µS/cm)	Ox Disuelto (mg/l)	pH	Punto	Código	T (C°)	CE (µS/cm)	Ox Disuelto (mg/l)	pH
P4-C	HP34W04C	21,0	223,0	8,67	8,76	P6	HP34W06	24,0	241,0	8,00	8,70
P4-D	HP31W04D	14,6	285,0	9,00	7,87	P6-M	HP16W09	17,5	212,3	8,92	8,14
P4-D	HP34W04D	18,0	227,0	8,37	8,42	P6-M	HP24W06L	10,2	216,9	9,54	8,39
P5	HP18W08-0	21,0	253,0	8,27	8,38	P6-M	HP30W06M	-	254,0	9,92	-
P5	HP30W05	12,3	281,0	9,59	8,28	P6-M	HP32W06M	20,0	218,0	7,77	7,73
P5	HP31W05	16,2	283,0	8,70	7,87	P6-M	HP34W06M	19,7	216,7	8,10	8,10
P5	HP32W05	24,0	237,0	7,89	8,79	P6-D	HP21W10	10,9	128,5	7,62	7,98
P5	HP34W05	15,5	232,0	8,57	8,32	P7	HP30W07	9,4	296,0	10,03	-
P5-L	HP18W08-1	16,7	149,7	7,20	7,52	P7	HP32W07	24,0	291,0	7,81	8,82
P5-L	HP18W08-2	-	142,3	-	7,33	P7	HP34W07	22,0	243,0	8,09	8,42
P5-L	HP18W08-3	-	145,1	-	7,19	P7-B	HP24W07	9,3	286,0	9,60	7,60
P5-L	HP18W08-4	-	127,0	-	-	P8-LEO	HP16W08	15,1	157,9	8,52	-
P5-L	HP30W05L	12,5	294,0	9,32	8,42	P8-LEO	HP24W08M	9,1	170,3	9,72	8,36
P5-L	HP31W05L	13,5	184,5	8,78	7,67	P8-LEO	HP30W08-LEO	8,3	203,2	9,92	8,37
P5-L	HP32W05L	17,9	123,6	8,27	7,97	P8-LEO	HP34W08-LEO	16,3	153,8	8,38	8,34
P5-L	HP34W05L	15,3	204,1	8,66	8,45	P8	HP18W09	-	254,0	-	-
P6	HP24W06	10,3	269,0	9,52	7,98	P8	HP24W08	9,2	293,0	9,56	7,34
P6	HP30W06	9,4	283,0	10,03	8,00	P8	HP30W08	13,1	308,0	8,79	7,96
P6	HP32W06	22,0	243,0	7,85	8,15	P8	HP32W08	16,0	262,0	8,51	7,85

Continúa en la página 87



Continuación del Anexo 2.

Punto	Código	T (C°)	CE (µS/cm)	Ox Disuelto (mg/l)	pH	Punto	Código	T (C°)	CE (µS/cm)	Ox Disuelto (mg/l)	pH
P8	HP34W08	18,0	254,0	8,36	8,35	P13	HP16W05	12,3	354,0	8,95	7,50
P9-L	HP16W07	17,8	107,2	7,07	8,04	P13	HP34W13	17,6	380,0	8,09	6,40
P9-L	HP18W09L	15,0	111,4	-	-	P14	HP21W02	12,6	420,0	8,67	8,14
P9-L	HP24W08L	9,5	126,5	9,53	7,59	P14	HP34W14	18,1	420,0	7,64	7,65
P9-L	HP30W08L	12,5	146,7	9,14	7,76	P15	HP34W15	17,9	450,0	7,66	7,36
P9-L	HP32W08L	19,5	119,5	7,17	8,19	P16-P	HP21W03	11,3	196,6	8,16	8,10
P9-L	HP34W08L	17,6	115,2	8,47	8,44	P16-P	HP34W16P	14,6	171,8	7,52	7,88
P9-C	HP16W06	18,9	343,0	7,97	8,14	P16-M	HP34W16M	11,7	478,0	8,39	4,77
P9-C	HP18W09C	12,1	373,0	-	-	P16-A	HP34W16A	12,0	554,0	8,42	4,56
P9-C	HP24W08C	8,9	437,0	9,61	6,84	P17	HP34W17	19,2	339,0	7,29	4,36
P9-C	HP30W08C	14,5	535,0	8,71	7,93	P17-B	HP21W04	8,3	348,0	8,72	5,52
P9-C	HP32W08C	21,0	376,0	7,13	8,09	P18	HP34W18	15,3	367,0	7,81	4,03
P9-C	HP34W08C	14,0	357,0	8,70	8,39	P18-L	HP34W18L	13,8	187,6	7,76	7,96
P10	HP16W01	11,4	354,0	9,26	7,77	P19-A	P21W05	10,5	259,0	6,42	6,31
P10	HP34W10	22,0	351,0	7,35	6,65	P19-B	H21W08	8,1	247,0	1,61	6,98
P11	HP16W02	11,3	350,0	9,26	7,69	P20	HP21W09	8,8	407,0	8,26	4,47
P11	HP34W11	21,5	355,0	7,24	6,59	P21-A	HP21W06	9,6	170,9	6,39	4,30
P11-L	HP16W03	13,1	158,5	8,53	8,01	P21-B	HP21W07	8,6	139,6	3,36	3,06
P12	HP16W04	13,4	172,0	7,36	8,12	P22	HP23W01	5,8	52,0	9,43	7,72
P12	HP21W01	11,2	401,0	9,06	8,03						

**Anexo 3: Resultados mediciones cationes y aniones.**

Punto	Código	Aniones (ppm)				Cationes (ppm)			
		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	
P0	HP18W01	1,222	68,846	50,180	9,339	0,919	31,190	4,779	
P0	HP24W00	1,857	75,351	41,500	9,376	1,091	33,370	6,040	
P0	HP30W00	0,948	59,365	39,000	8,652	0,756	26,768	4,560	
P0	HP32W00	1,992	69,046	50,180	11,001	1,083	39,334	4,817	
P0	HP34W00	1,880	97,744	50,663	10,712	0,839	32,181	5,363	
P1	HP18W02	1,170	73,560	47,768	9,329	0,835	32,233	4,931	
P1	HP24W01	1,678	82,061	47,768	9,131	0,764	32,282	2,690	
P1	HP32W01	1,344	72,056	44,878	10,439	1,093	30,714	5,023	
P1	HP34W01	1,891	109,672	47,768	10,719	0,928	33,379	5,311	
P2	HP18W03	1,375	74,684	47,768	9,790	1,235	33,244	5,239	
P2	HP24W02	1,303	82,862	45,355	8,942	0,969	33,291	2,909	
P2	HP32W02	1,213	74,173	45,355	10,260	1,253	31,065	4,898	
P2	HP34W02	1,337	77,391	47,768	10,362	0,792	33,655	5,371	
P2-B	HP24W02-B	0,893	3,568	54,500	6,053	0,104	15,481	0,455	
P2-B	HP30W02-B	0,905	3,249	52,000	5,634	0,493	15,514	2,255	
P2-B	HP32W02-B	0,631	2,990	59,348	7,375	0,738	16,375	2,340	
P2-B	HP34W02-B	0,450	3,875	60,313	7,526	0,104	18,236	2,499	
P2-B	HP18W04-2	0,516	3,267	54,500	54,500	6,236	0,448	17,421	
P2-B	HP18W04-1	1,032	3,286	54,500	54,500	6,265	1,051	16,871	

Continúa en la página 89

Continuación del Anexo 3.

Punto	Código	Aniones (ppm)			Cationes (ppm)			
		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
P3	HP18W05	1,174	78,521	37,500	9,378	0,904	33,849	5,096
P3	HP18W06	1,251	80,326	37,500	9,478	1,028	33,055	5,881
P3	HP24W03	1,692	88,970	45,838	9,485	1,014	34,438	3,196
P3	HP30W03	0,954	69,246	37,500	8,577	0,931	29,078	5,061
P3	HP32W03	1,285	76,619	45,838	10,174	0,819	31,257	5,115
P3	HP34W03	1,090	80,153	46,803	10,512	0,843	33,373	5,640
P4	HP18W07	1,235	82,009	47,285	9,257	0,836	34,574	5,343
P4	HP24W04	1,185	98,167	37,500	8,947	0,969	35,608	3,248
P4	HP31W04	0,855	67,599	35,500	7,977	0,721	28,096	5,147
P4	HP32W04	1,200	77,382	47,285	9,936	0,962	31,449	5,127
P4	HP34W04	0,794	82,957	46,320	10,105	0,838	34,195	5,435
P4-B	HP31W04-B	0,836	67,122	53,500	8,440	0,776	28,876	5,262
P4-B	HP32W04-B	1,112	77,005	48,733	9,806	0,789	33,122	5,558
P4-B	HP34W04-B	0,805	81,982	45,838	10,040	0,868	34,702	5,583
P4-C	HP31W04-C	0,789	67,191	34,500	8,176	0,693	28,795	5,156
P4-C	HP32W04-C	2,637	78,977	44,390	9,862	3,248	32,325	4,995
P4-C	HP34W04-C	0,751	80,422	47,768	9,978	0,819	34,744	5,701
P4-D	HP31W04-D	0,640	67,672	48,733	8,202	0,670	28,915	5,173
P4-D	HP34W04-D	0,718	81,865	48,733	10,002	0,796	35,438	5,906

Continúa en la página 90

Continuación del Anexo 3.

Punto	Código	Aniones (ppm)				Cationes (ppm)		
		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
P5	HP18W08-0	0,823	83,132	73,500	9,080	1,001	34,146	5,166
P5	HP31W05	0,731	67,916	34,500	8,097	0,787	28,573	5,014
P5	HP32W05	1,072	80,860	42,460	9,662	0,907	32,823	5,528
P5	HP34W05	0,755	80,999	48,733	10,173	0,755	35,918	5,896
P5-L	HP18W08-1	0,582	4,493	69,963	9,324	0,449	24,622	3,011
P5-L	HP18W08-2	0,626	4,779	69,963	8,927	0,104	22,754	2,766
P5-L	HP18W08-3	0,716	5,433	69,963	9,186	0,399	21,424	2,666
P5-L	HP30W05-L	0,646	4,337	73,500	8,641	0,252	20,880	2,603
P5-L	HP32W05-L	0,610	4,575	69,963	8,690	0,104	20,155	2,544
P5-L	HP34W05-L	0,364	4,715	69,963	8,734	0,104	21,573	2,520
P6	HP24W06	1,105	90,442	33,000	8,868	0,722	37,349	6,801
P6	HP30W06	0,789	79,557	32,500	7,757	0,814	31,237	5,544
P6	HP32W06	0,692	80,034	45,355	9,864	1,455	33,180	5,559
P6	HP34W06	0,702	86,217	47,285	10,029	0,104	36,500	5,904
P6-M	HP16W09	1,203	35,841	84,438	12,222	0,847	33,725	4,940
P6-M	HP24W06-L	1,299	24,680	86,500	10,351	0,768	31,328	6,002
P6-M	HP30W06-M	1,032	27,684	77,000	9,667	0,651	28,343	5,344
P6-M	HP32W06-M	1,392	36,633	82,990	13,184	0,841	30,217	5,634
P6-M	HP34W06-M	0,888	38,118	84,438	13,888	1,234	32,534	5,641

Continúa en la página 91

Continuación del Anexo 3.

Punto	Código	Aniones (ppm)				Cationes (ppm)			
		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	
P7	HP32W07	0,918	92,681	40,048	9,007	0,849	34,226	5,397	
P7	HP34W07	0,657	91,310	43,908	9,277	0,824	37,331	6,032	
P8-LEO	HP24W08-M	1,017	22,288	65,000	9,575	0,672	22,156	4,364	
P8-LEO	HP30W08-LEO	1,165	23,752	64,000	9,227	0,341	21,245	3,921	
P8-LEO	HP34W08-LEO	0,277	25,510	61,278	10,327	0,104	24,379	4,044	
P8	HP24W08	0,845	118,099	13,000	7,872	1,162	35,748	3,705	
P8	HP30W08	2,178	88,262	26,500	7,382	0,609	32,347	5,491	
P8	HP32W08	0,729	98,563	40,048	8,855	0,689	35,661	5,671	
P8	HP34W08	0,562	98,425	42,943	9,164	0,839	39,011	5,907	
P9-L	HP16W07	0,740	27,716	32,328	6,833	0,985	14,450	2,368	
P9-L	HP24W08-L	0,795	29,586	26,000	6,430	0,875	15,936	0,625	
P9-L	HP30W08-L	0,544	27,944	21,000	5,580	0,542	12,769	2,477	
P9-L	HP32W08-L	0,467	28,568	32,328	7,404	0,934	14,773	2,621	
P9-L	HP34W08-L	0,221	28,695	32,328	7,475	0,846	16,052	2,792	
P9-C	HP16W06	0,921	158,654	8,000	9,669	0,699	53,825	8,611	
P9-C	HP24W08-C	1,149	218,267	8,000	9,343	1,053	58,394	7,123	
P9-C	HP30W08-C	1,083	175,464	32,500	9,688	0,970	56,576	9,272	
P9-C	HP32W08-C	1,526	172,230	46,320	10,707	0,835	56,790	8,607	
P9-C	HP34W08-C	0,825	163,959	50,180	10,408	0,658	58,593	9,053	

Continúa en la página 92

Continuación del Anexo 3.

Punto	Código	Aniones (ppm)				Cationes (ppm)			
		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	
P10	HP34W10	0,788	172,853	44,873	10,761	0,761	59,278	8,757	
P11	HP34W11	0,708	188,928	33,293	10,647	1,121	59,481	9,004	
P11-L	HP16W03	0,510	23,290	54,500	8,893	0,104	27,171	3,145	
P13	HP34W13	0,598	223,521	20,748	10,582	0,892	64,652	9,477	
P14	HP34W14	0,682	262,301	12,063	10,995	1,265	69,068	10,338	
P15	HP34W15	0,482	290,724	6,273	11,086	1,188	73,670	11,459	
P16-P	HP34W16-P	0,531	40,175	53,558	7,692	0,104	30,042	3,307	
P17	HP34W17	0,192	202,234	0,965	9,311	1,017	39,445	10,692	
P18-L	HP34W18-L	0,313	74,540	30,398	4,761	0,104	29,720	5,544	
P19-B	HP21W08	0,241	73,853	53,000	5,926	0,555	29,133	5,005	
P21-A	HP21W06	0,919	57,143	0,965	7,683	1,167	4,076	5,802	
P22	HP23W01	0,951	2,755	32,500	3,826	0,575	11,856	2,718	



Anexo 4: Resultados mediciones elementos menores y traza.

Punto	Código	Elementos menores y traza (ppm)								
		Al	As	B	Cd	Li	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	V	
P0	HP18W01	0,026	0,011	0,027	0,002	0,012	0,037	0,032	0,005	
P0	HP24W00	0,023	0,003	0,027	0,002	0,005	0,222	0,032	0,005	
P0	HP30W00	0,012	0,012	0,045	0,001	0,005	0,005	0,065	0,014	
P0	HP32W00	0,018	0,003	0,044	0,002	0,010	0,005	0,113	0,005	
P0	HP34W00	0,043	0,011	0,109	0,005	0,015	0,348	0,212	0,035	
P1	HP18W02	0,032	0,013	0,022	0,002	0,012	0,005	0,084	0,005	
P1	HP24W01	0,037	0,003	0,028	0,001	0,005	0,144	0,032	0,005	
P1	HP32W01	0,025	0,006	0,044	0,001	0,010	0,005	0,032	0,005	
P1	HP34W01	0,038	0,012	0,099	0,006	0,015	0,328	0,257	0,035	
P2	HP18W03	0,032	0,014	0,019	0,002	0,012	0,005	0,032	0,005	
P2	HP24W02	0,041	0,003	0,033	0,002	0,005	0,160	0,032	0,005	
P2	HP32W02	0,040	0,003	0,041	0,001	0,010	0,005	0,107	0,005	
P2	HP34W02	0,042	0,010	0,088	0,005	0,015	0,324	0,233	0,036	
P2-B	HP24W02-B	0,022	0,003	0,005	0,001	0,005	0,196	0,032	0,005	
P2-B	HP30W02-B	0,005	0,008	0,015	0,001	0,005	0,078	0,382	0,015	
P2-B	HP32W02-B	0,005	0,003	0,005	0,001	0,005	0,005	0,032	0,005	
P2-B	HP34W02-B	0,023	0,012	0,060	0,006	0,015	0,005	0,150	0,017	
P2-B	HP18W04-2	0,012	0,006	0,005	0,002	0,012	0,029	0,032	0,005	
P2-B	HP18W04-1	0,012	0,003	0,005	0,002	0,012	0,033	0,073	0,005	

Continúa en la página 94

Continuación del Anexo 4.

Punto	Código	Elementos menores y traza (ppm)									
		Al	As	B	Cd	Li	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	V		
P3	HP18W05	0,025	0,016	0,027	0,002	0,012	0,014	0,032	0,005		
P3	HP18W06	0,028	0,010	0,021	0,002	0,012	0,005	0,079	0,005		
P3	HP24W03	0,042	0,010	0,030	0,003	0,005	0,149	0,032	0,011		
P3	HP30W03	0,010	0,010	0,036	0,001	0,005	0,078	0,032	0,015		
P3	HP32W03	0,026	0,003	0,036	0,001	0,005	0,039	0,032	0,005		
P3	HP34W03	0,032	0,012	0,084	0,006	0,016	0,290	0,198	0,036		
P4	HP18W07	0,023	0,003	0,019	0,002	0,012	0,035	0,080	0,005		
P4	HP24W04	0,040	0,020	0,030	0,002	0,005	0,163	0,065	0,005		
P4	HP31W04	0,017	0,025	0,035	0,001	0,005	0,005	0,032	0,015		
P4	HP32W04	0,016	0,003	0,036	0,001	0,005	0,036	0,091	0,005		
P4	HP34W04	0,036	0,010	0,080	0,006	0,014	0,253	0,032	0,037		
P4-B	HP31W04-B	0,010	0,014	0,032	0,001	0,005	0,005	0,032	0,014		
P4-B	HP32W04-B	0,012	0,003	0,034	0,002	0,005	0,018	0,068	0,005		
P4-B	HP34W04-B	0,005	0,003	0,037	0,001	0,005	0,280	0,095	0,063		
P4-C	HP31W04-C	0,005	0,021	0,029	0,001	0,005	0,005	0,032	0,016		
P4-C	HP32W04-C	0,033	0,009	0,033	0,001	0,005	0,035	0,118	0,005		
P4-C	HP34W04-C	0,034	0,012	0,078	0,005	0,014	0,260	0,151	0,037		
P4-D	HP31W04-D	0,355	0,035	0,030	0,001	0,005	0,005	0,032	0,015		
P4-D	HP34W04-D	0,047	0,009	0,075	0,006	0,015	0,204	0,171	0,038		

Continúa en la página 95

Continuación del Anexo 4.

Punto	Código	Elementos menores y traza (ppm)									
		Al	As	B	Cd	Li	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	V		
P5	HP18W08-0	0,033	0,012	0,024	0,002	0,012	0,032	0,032	0,005	0,005	
P5	HP31W05	0,005	0,035	0,029	0,001	0,005	0,197	0,102	0,016	0,016	
P5	HP32W05	0,032	0,003	0,033	0,001	0,005	0,029	0,087	0,005	0,005	
P5	HP34W05	0,031	0,013	0,094	0,006	0,014	0,159	0,113	0,039	0,039	
P5-L	HP18W08-1	0,015	0,003	0,005	0,002	0,012	0,005	0,032	0,005	0,005	
P5-L	HP18W08-2	0,016	0,003	0,005	0,002	0,012	0,005	0,032	0,005	0,005	
P5-L	HP18W08-3	0,010	0,003	0,005	0,002	0,012	0,021	0,143	0,005	0,005	
P5-L	HP30W05-L	0,005	0,014	0,013	0,001	0,005	0,046	0,315	0,017	0,017	
P5-L	HP32W05-L	0,021	0,003	0,005	0,001	0,005	0,021	0,118	0,005	0,005	
P5-L	HP34W05-L	0,025	0,011	0,044	0,006	0,015	0,005	0,032	0,018	0,018	
P6	HP24W06	0,056	0,013	0,032	0,002	0,005	0,014	0,032	0,005	0,005	
P6	HP30W06	0,005	0,009	0,033	0,001	0,005	0,119	0,151	0,014	0,014	
P6	HP32W06	0,016	0,003	0,031	0,002	0,005	0,005	0,032	0,005	0,005	
P6	HP34W06	0,033	0,011	0,085	0,006	0,014	0,165	0,299	0,039	0,039	
P6-M	HP16W09	0,022	0,010	0,020	0,002	0,012	0,020	0,070	0,005	0,005	
P6-M	HP24W06-L	0,034	0,012	0,020	0,002	0,005	0,176	0,032	0,011	0,011	
P6-M	HP30W06-M	0,005	0,022	0,019	0,001	0,005	0,056	0,190	0,015	0,015	
P6-M	HP32W06-M	0,018	0,003	0,025	0,001	0,005	0,005	0,109	0,005	0,005	
P6-M	HP34W06-M	0,036	0,016	0,070	0,005	0,014	0,005	0,032	0,037	0,037	

Continúa en la página 96

Continuación del Anexo 4.

Punto	Código	Elementos menores y traza (ppm)									
		Al	As	B	Cd	Li	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	V		
P7	HP32W07	0,036	0,003	0,028	0,003	0,005	0,024	0,090	0,005		
P7	HP34W07	0,037	0,010	0,069	0,006	0,014	0,154	0,318	0,039		
P8-LEO	HP24W08-M	0,016	0,009	0,031	0,002	0,005	0,234	0,032	0,005		
P8-LEO	HP30W08-LEO	0,015	0,003	0,027	0,001	0,005	0,099	0,110	0,016		
P8-LEO	HP34W08-LEO	0,028	0,010	0,049	0,006	0,014	0,005	0,069	0,025		
P8	HP24W08	0,072	0,018	0,030	0,002	0,005	0,146	0,109	0,005		
P8	HP30W08	0,005	0,023	0,030	0,001	0,005	0,081	0,272	0,014		
P8	HP32W08	0,005	0,003	0,027	0,001	0,013	0,060	0,032	0,005		
P8	HP34W08	0,037	0,011	0,069	0,005	0,015	0,122	0,103	0,042		
P9-L	HP16W07	0,005	0,003	0,011	0,002	0,011	0,053	0,063	0,005		
P9-L	HP24W08-L	0,019	0,003	0,005	0,002	0,005	0,064	0,032	0,005		
P9-L	HP30W08-L	0,005	0,026	0,012	0,001	0,005	0,095	0,186	0,014		
P9-L	HP32W08-L	0,017	0,016	0,005	0,002	0,012	0,005	0,142	0,005		
P9-L	HP34W08-L	0,027	0,010	0,041	0,006	0,014	0,051	0,205	0,018		
P9-C	HP16W06	0,057	0,003	0,045	0,002	0,013	0,027	0,032	0,005		
P9-C	HP24W08-C	0,104	0,014	0,045	0,002	0,010	0,185	0,208	0,013		
P9-C	HP30W08-C	0,011	0,029	0,051	0,001	0,005	0,132	0,089	0,016		
P9-C	HP32W08-C	0,022	0,003	0,047	0,001	0,013	0,024	0,080	0,005		
P9-C	HP34W08-C	0,041	0,010	0,080	0,006	0,015	0,173	0,072	0,055		

Continúa en la página 97

Continuación del Anexo 4.

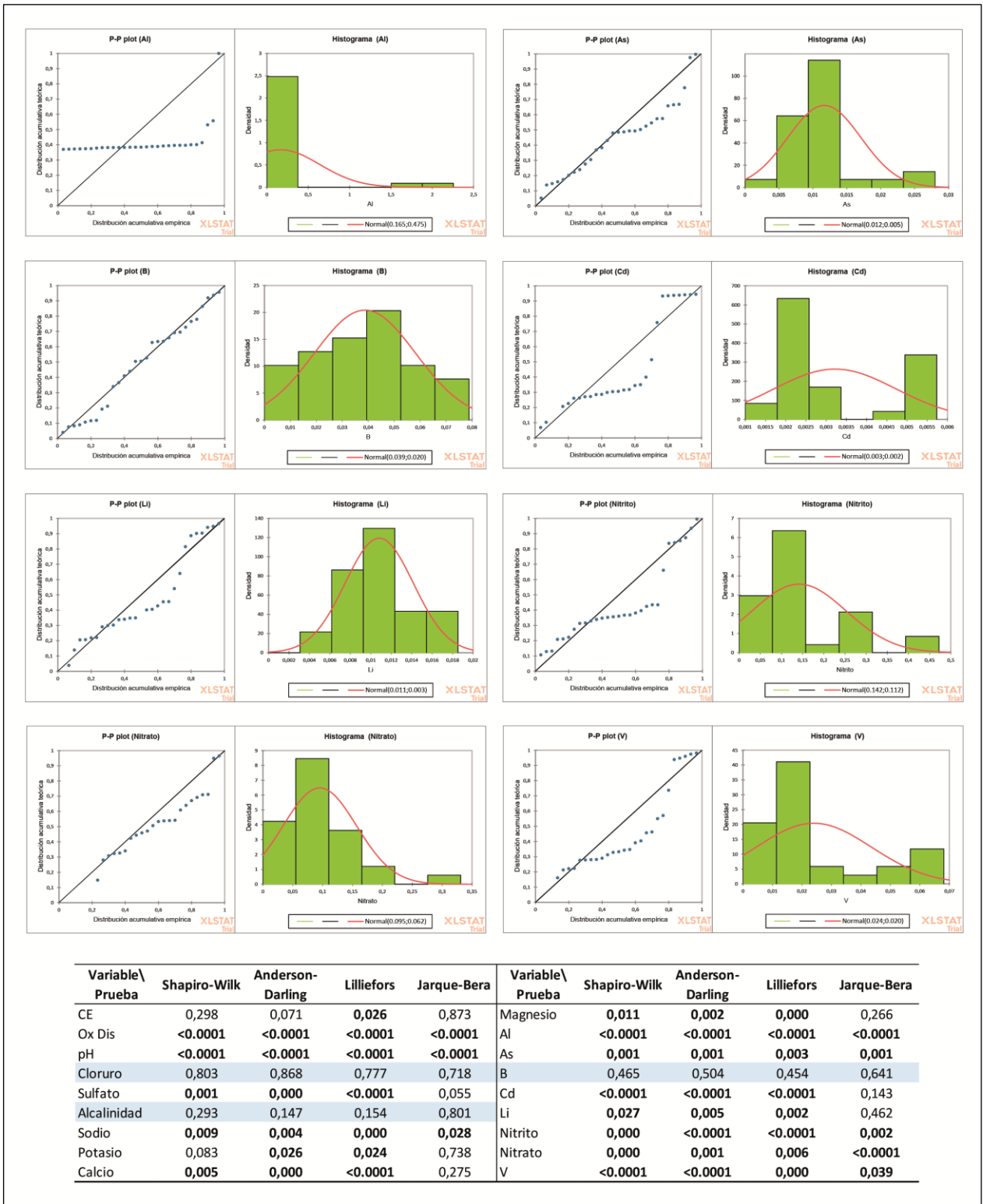
Punto	Código	Elementos menores y traza (ppm)									
		Al	As	B	Cd	Li	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	V		
P10	HP34W10	0,041	0,011	0,078	0,005	0,015	0,251	0,122	0,054		
P11	HP34W11	0,063	0,012	0,071	0,006	0,015	0,249	0,032	0,055		
P11-L	HP16W03	0,011	0,003	0,016	0,002	0,012	0,019	0,321	0,005		
P13	HP34W13	0,042	0,012	0,068	0,005	0,016	0,267	0,068	0,057		
P14	HP34W14	0,042	0,011	0,066	0,006	0,016	0,421	0,194	0,061		
P15	HP34W15	0,047	0,012	0,060	0,006	0,017	0,462	0,032	0,067		
P16-P	HP34W16-P	0,033	0,013	0,032	0,006	0,014	0,005	0,032	0,022		
P17	HP34W17	2,156	0,010	0,023	0,006	0,018	0,308	0,032	0,064		
P18-L	HP34W18-L	0,232	0,011	0,011	0,005	0,015	0,257	0,032	0,036		
P19-B	HP21W08	0,024	0,027	0,022	0,002	0,010	0,187	0,032	0,005		
P21-A	HP21W06	1,613	0,014	0,005	0,002	0,010	0,093	0,089	0,005		
P22	HP23W01	0,012	0,026	0,012	0,001	0,005	0,088	0,032	0,005		

Anexo 5: Gráficos y pruebas de normalidad.



Continua en la página 99

Continuación del Anexo 5.





**Anexo 6: Muestras de agua que sobrepasan el límite máximo de pH permitido en la norma NCh 409/1.** En color gris se destacan los cursos menores y quebradas asociadas a los ríos principales.

Punto	Código	pH	Punto	Código	pH	Punto	Código	pH
P1	HP32W01	8,61	P4-C	HP32W04C	8,94	P17	HP34W17	4,36
P2	HP32W02	8,86	P4-C	HP34W04C	8,76	P17-B	HP21W04	5,52
P2	HP34W02	8,82	P5	HP32W05	8,79	P18	HP34W18	4,03
P3	HP32W03	8,65	P6	HP34W06	8,70	P19-A	P21W05	6,31
P3	HP34W03	9,05	P7	HP32W07	8,82	P20	HP21W09	4,47
P4	HP34W04	8,97	P13	HP34W13	6,40	P21-A	HP21W06	4,30
P4-B	HP31W04B	9,00	P16-M	HP34W16M	4,77	P21-B	HP21W07	3,06
P4-B	HP34W04B	8,79	P16-A	HP34W16A	4,56			

**Anexo 7: Muestras de agua que sobrepasan el límite máximo de As permitido en la norma NCh 409/1.** En color gris se destacan los cursos menores y quebradas asociadas a los ríos principales.

Punto	Código	As (mg/l)	Punto	Código	As (mg/l)	Punto	Código	As (mg/l)
P0	HP18W01	0,011	P4-D	HP31W04-D	0,035	P9-L	HP30W08-L	0,026
P0	HP30W00	0,012	P5	HP18W08-0	0,012	P9-L	HP32W08-L	0,016
P0	HP34W00	0,011	P5	HP31W05	0,035	P9-C	HP24W08-C	0,014
P1	HP18W02	0,013	P5	HP34W05	0,013	P9-C	HP30W08-C	0,029
P1	HP34W01	0,012	P5-L	HP30W05-L	0,014	P10	HP34W10	0,011
P2	HP18W03	0,014	P5-L	HP34W05-L	0,011	P11	HP34W11	0,012
P2-B	HP34W02-B	0,012	P6	HP24W06	0,013	P13	HP34W13	0,012
P3	HP18W05	0,016	P6	HP34W06	0,011	P14	HP34W14	0,011
P3	HP34W03	0,012	P6-M	HP24W06-L	0,012	P15	HP34W15	0,012
P4	HP24W04	0,02	P6-M	HP30W06-M	0,022	P16-P	HP34W16-P	0,013
P4	HP31W04	0,025	P6-M	HP34W06-M	0,016	P18-L	HP34W18-L	0,011
P4-B	HP31W04-B	0,014	P8	HP24W08	0,018	P19-B	HP21W08	0,027
P4-C	HP31W04-C	0,021	P8	HP30W08	0,023	P21-A	HP21W06	0,014
P4-C	HP34W04-C	0,012	P8	HP34W08	0,011	P22	HP23W01	0,026

**Anexo 8: Muestras de agua que sobrepasan el límite máximo de pH permitido en la norma NCh 1333.** En color gris se destacan los cursos menores y quebradas asociadas a los ríos principales.

<b>Punto</b>	<b>Código</b>	<b>pH</b>	<b>Punto</b>	<b>Código</b>	<b>pH</b>
P3	HP34W03	9,05	P18	HP34W18	4,03
P16-M	HP34W16M	4,77	P21-A	HP21W06	4,3
P16-A	HP34W16A	4,56	P21-B	HP21W07	3,06
P17	HP34W17	4,36			