



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

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA GEOQUÍMICA DE LOS RÍOS EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

AGUSTIN IGNACIO SOTO MAASS

PROFESORA GUÍA:

Alida Pérez Fodich

PROFESOR CO-GUÍA:

Marco Pfeiffer Jakob

COMISIÓN:

Marcos Macchioli Grande

Este trabajo ha sido financiado por:
Fondecyt 11190029 y Fondecyt 11200656

SANTIAGO DE CHILE

2022

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA GEOQUÍMICA DE LOS RÍOS EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO

El estudio de la hidroquímica de los ríos es clave para entender los procesos que ocurren dentro de la Zona Crítica como lo es por ejemplo la meteorización química y la generación de solutos que determinan finalmente la calidad del agua. Este estudio aborda la variabilidad temporal y espacial de la geoquímica de la cuenca del Río Maipo (33-34°S) en los ríos Covarrubias, Molina, Mapocho, Maipo, Yeso, Volcán, Colorado y el Estero El Plomo entre los meses de agosto del 2021 a enero del 2022, los cuales fueron estudiados ya que no se encuentran afectados por drenaje ácido. Así, se ha analizado su composición hidroquímica mensual y trazadores geoquímicos como lo son los isótopos de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) y las razones Ge/Si para determinar la fuente de los solutos y estudiar procesos de meteorización química asociados a estos trazadores. Las concentraciones de los elementos mayores son un orden de magnitud de menores al comparar la subcuenca del río Mapocho con la cuenca principal del río Maipo en el sector del Cajón del Maipo. Junto con lo anterior, en el Maipo se tienen valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ que varían entre los 0.70589 a 0.70732‰, asociados a una mezcla en de fuentes para los solutos producto de la meteorización de rocas carbonáticas marinas del Jurásico Superior y rocas volcánicas e intrusivas de arco. En el caso del Mapocho, las razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ varían entre los 0.70371 a 0.70417‰, correspondientes con la meteorización de rocas volcánicas e intrusivas de arco. Las diferencias en las concentraciones de solutos y las asignaturas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre el río Maipo y el río Mapocho se atribuyen a los distintos tipos de litologías drenadas en ambos sectores: En el río Maipo la existen rocas carbonáticas y evaporíticas mesozoicas además de rocas ígneas cenozoicas; mientras que en el río Mapocho, las principales litologías corresponden a rocas ígneas cenozoicas. Esta diferencia condiciona la mayor carga de solutos en Maipo debido a los cinco órdenes de magnitud de diferencia entre las tasas de meteorización para evaporitas y rocas carbonáticas versus las rocas silíceas y la composición $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ más radiogénica en comparación con el Mapocho. Esta diferencia en las concentraciones de solutos y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ocurre a pesar de que las litologías carbonáticas y evaporíticas ocupan solo un $\approx 3.38\%$ del área total de la cuenca principal del Maipo. La variabilidad temporal de las concentraciones de solutos, las razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y Ge/Si durante el período estudio refleja el régimen hídrico del sector, presentando un patrón de dilución simple para la mayoría de los solutos. En ambos sectores las razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ se mantienen constantes a lo largo del período de estudio, determinando que las fuentes de erosión se mantienen constantes. En cuanto a las razones Ge/Si, para el Mapocho se tienen que estas varían entre 0.40 a 1.64 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) y en el caso del Maipo, las razones Ge/Si varían entre 0.68 a 11.73 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$). Los valores < 2.6 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) indican que la formación de arcillas como producto de la meteorización es el principal proceso que controla las concentraciones de Si y Ge en los solutos del Mapocho y los ríos Volcán (0.79 $\mu\text{mol}/\text{mol}$), Yeso (1.47 $\mu\text{mol}/\text{mol}$) y Colorado (1.8 $\mu\text{mol}/\text{mol}$) en el Maipo. Finalmente, los ríos Manzano, Toyo y las Melosas presentan valores anómalos (> 3.37 $\mu\text{mol}/\text{mol}$) asociados a otras fuentes ricas en Ge que alteran las razones Ge/Si por sobre el valor promedio de las litologías presentes (2.6 $\mu\text{mol}/\text{mol}$). Estas fuentes de Ge pueden atribuirse a descarga de manantiales hidrotermales o disolución de sulfuros. Sin embargo, al cabo de este estudio es imposible determinar esta fuente. A partir de los análisis hidroquímicos y de trazados analizados es posible concluir que la litología condiciona el contenido de solutos en las subcuencas del Maipo y el Mapocho, y que la meteorización incongruente con formación de arcillas es un proceso activo en toda la región.

*Para toda mi familia y amigxs
y para ti, mamá.*

Saludos

Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo a mis profes Alida, Marco y Marcos, y a los Fondecyt 11190029 y 11200656, por entregarme parte de su conocimiento y la buena disposición que han tenido a lo largo de todo el trabajo, que sin duda no habría logrado ser lo que es sin ustedes, además de todas esas campañas de terreno donde tuvimos la oportunidad de visitar todos los meses lugares tan bonitos de la región. También quiero agradecer a toda la gente del laboratorio de Antumapu, en particular a Aylin y Andrea quienes siempre respondieron mis dudas y me recibieron maravillosamente bien.

Ahora que estoy cerrando esta etapa y miro hacia atrás, estos 7 años han estado lleno de momentos y sobretodo de personas maravillosas. Partiendo por mis amigxs de plan común, que fueron las primeras personas que conocí en la universidad y bueno, hay un montón de historias que jamás voy a olvidar! Gracias Mendez, Barros, Wasete, Negro, Cami, Squella, Karl, Shago, Cote, Soto, Porter, Berni, Palo, Riveri y Sureño, de verdad los llevo en el cora y los quiero mucho, aguante los PDP!!! También agradecer al Rodrigo Mahaluf, gran amigo y que hemos compartido visiones de la vida muy bonitas y también gustos musicales. Agradecer al Pablo Rubio, amigazo que me enseñó cosas muy bonitas y tuvimos la oportunidad de conocer la maravillosa isla de Navarino juntos, en un viaje con el que todavía alucino y me pone la piel de gallina cada vez que lo recuerdo. Luego de eso vino la etapa en la que finalmente entre a geología y mi vida en la u cambio demasiado y con ello llegaron muchas personas que han dejado algo en mi. Partiendo por los cabros de la RAI en su tiempo, compartiendo la pasión por la montaña y el simple hecho de disfrutar lo maravilloso de la naturaleza, cuantas historias con el Jasson, el Mafi, el Salvi, el Vicen, grande cabros son lo máximo. Agradecer al Shaggy por todas esas risas y ese apañe, como cuando nos subimos al barco abandonado jajaja Gracias al Juanma, el Abuelo y la Caro Monsalve, que en el ultimo terreno que fuimos me sirvió para megaconfirmar las personas maravillosas que son y que me puedo sentir en total confianza con ustedes. Agradecer a la Javi González, porque eres una gran persona y me encanta tu forma de ver y vivir la vida. Gracias a todas las personas de mi generación, todos los terrenos que tuvimos, risas y anécdotas nunca faltaron. Agradecer a la Gabi Zelaya primero por todos esos trabajos que hicimos juntas y siempre dar cara, y segundo y más importante por confiar en mi, escucharme y aconsejarme cuando lo necesito. Gracias a la Yoyi, amiga eres maravillosa y estoy muy feliz de haberte conocido. Gracias a la Joaca, porque contigo he aprendido muchas cosas no solo de ti, si no también de mi mismo y eso significa demasiado para mi. Agradecer al Pino que siempre esta ahí para sacar una sonrisa y dar un abrazo, grande pinin. Agradecer al Mono, gran amigo con el que he compartido momentos que considero muy íntimos y he podido confiar ciegamente en ti. Agradecer a la Isa, que haz estado ahí para escucharme y eso lo valoro demasiado. Agradecer a la Ale Palma porque sin ti las cosas no serían lo mismo, con esa buena vibra y capacidad de hacer reír al resto. Gracias a la Coni Ulloa, eres una gran amiga y me generas mucha confianza y seguridad. Agradecer a la Pilarcita, que llegaste inesperadamente a mi vida y fue hermoso todo lo que hemos vivido, eres una mujer increíble. Agradecer a mis dos grandes amigos de la vida, Erick y Dani, por su confianza, por su cariño, por su apañe.

Quiero agradecer también a mi familia por siempre apoyarme y querer lo mejor para mí. Gracias abuela por tu sabiduría, por tu amor incondicional. Gracias tata, porque sé que siempre te haz preocupado para que nada me falte. Gracias Marco, eres un hermano maravilloso, me encanta la forma en que eres y estoy seguro que vas a tener mucho éxito en la vida. Gracias Pedro, por esas conversaciones de la vida que me orientan y que me dan otros puntos de vista. Gracias a mis tíos, por el cariño que me han entregado a lo largo de mi vida. Pero sobre todo gracias mamá, porque me haz entregado todo tu amor, con tu propia historia me haz enseñado a ser perseverante, ha atreverme a hacer nuevas cosas, a luchar por lo que quiero y por eso te admiro y siempre lo he hecho, te amo!!!

Por último agradecerme a mí porque no ha sido fácil, porque la vida me ha enseñado cosas más valiosas que lo netamente académico y siempre tengo la disposición de ser mejor de lo que era ayer, por toda esa fortaleza y resiliencia que tengo, por esa maravillosa conexión que tengo con la naturaleza y el deseo de conocer. Y sobretodo este último tiempo me agradezco por permitirme fallar, aprender, explorarme y hacerme responsable de mi mismo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Ubicación y Accesos	2
1.1.2. Clima y Régimen Hidrológico	5
1.1.3. Geología de la cuenca del Maipo	6
1.1.3.1. Rocas Estratificadas	6
Formación Río Colina	6
Formación Río Damas	7
Formación Lo Valdés	7
Formación Colimapu	7
Unidad Las Coloradas	7
Formación Abanico	8
Formación Farellones	8
Unidades del Cuaternario	8
1.2. Razones Ge/Si como trazados de procesos de meteorización	8
1.3. Razón isotópica de Sr ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr como trazador litológico	9
2. Metodología	11
2.1. Trabajo de Terreno	11
2.1.1. Toma de muestras	11
2.1.2. Medición de caudales y parámetros fisicoquímicos	11
2.2. Trabajo de laboratorio	12
2.2.1. Alcalinidad	12
2.2.2. Sulfato	12
2.2.3. Análisis de concentraciones de cationes mayores y elementos trazas	13
2.2.4. Análisis de razones isotópicas de estroncio (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr)	13
2.2.5. Análisis de concentraciones de Ge y razones Ge/Si	13
3. Resultados	16
3.1. Geoquímica de los ríos de las subcuencas del Maipo y Mapocho	16
3.1.1. Variabilidad temporal y espacial de los parámetros fisicoquímicos	16
3.1.2. Variabilidad temporal y espacial de los elementos mayores	20
3.1.3. Variabilidad temporal y espacial de los elementos traza	23
3.1.4. Variabilidad temporal y espacial de las razones Ge/Si	25
3.1.5. Variabilidad temporal y espacial de las razones isotópicas de estroncio (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr)	26
4. Discusiones	29
4.1. Variabilidad espacial y temporal de las concentraciones de elementos mayores	29

4.2. Variabilidad espacial y temporal de las razones Ge/Si	34
4.3. Variabilidad espacial y temporal de las razones isotópicas de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) .	38
4.4. Implicancias para la calidad del agua para su uso en la agricultura y consumo humano	41
5. Conclusiones	43
Bibliografía	44
Anexos	49
Anexo A. Datos fisicoquímicos y concentraciones de los ríos del sector del Maipo y del Mapocho	49
Anexo B. Normas Chilenas para el agua de riego y agua potable	56

Índice de Tablas

2.1.	Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo	12
3.1.	Tabla resumen con los valores de los parámetros fisicoquímicos para los sectores del Maipo y Mapocho. Se presentan los promedios, el número de muestras (n) y la desviación estándar (σ).	27
3.2.	Tabla resumen con las concentraciones de los elementos mayores, trazas, razones isotópicas de Sr y razones Ge/Si para los sectores del Maipo y Mapocho. Se presentan los promedios, el número de muestras (n) y la desviación estándar (σ).	28
A.1.	Parámetros fisicoquímicos para los ríos de la subcuenca del Maipo	50
A.2.	Parámetros fisicoquímicos para los ríos de la subcuenca del Mapocho	51
A.3.	Datos químicas de los ríos de la subcuenca del Maipo	52
A.4.	Datos químicas de los ríos de la subcuenca del Mapocho	53
A.5.	Concentraciones de los elementos traza para los ríos del sector del Cajón del Maipo .	54
A.6.	Concentraciones de los elementos traza para los ríos del sector del Mapocho	55
B.1.	Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego definido por la norma NCH1333	57
B.2.	Concentraciones máximas de elementos químicos en agua potable definido por la norma NCH1333	58

Índice de Figuras

1.1.	Mapa de la zona de estudio de la Cuenca del río Maipo. Se observan los puntos de muestreo: (1) El Manzano, (2) El Colorado, (3) El Toyo, (4) El Yeso, (5) Las Melosas, (6) El Volcan, (7) El Plomo, (8) Los Patos, (9) Los Almendros, (10) Covarrubias, (11) Río Molina y (12) Las Vertientes.	3
1.2.	Zoom a la zona de estudio presentada en la Figura 1. A la izquierda se observa el sector del Cajón del Maipo y a la derecha el de la subcuenca del Mapocho	4
1.3.	Caudal diario y anomalías de caudal para el río Maipo en la estación El Manzano de la DGA entre los años 2000 y 2020. La curva azul muestra el caudal y la curva anaranjada muestra la anomalía de caudal. Este gráfico fue creado a partir de la plataforma de datos climáticos CR2.	6
1.4.	Proceso de fraccionamiento del Ge respecto al Si en ambientes de meteorización. Extraído de Kurtz (2002).	9
2.1.	Diseño de la línea de hidruros utilizada para separar el Ge. La botella que contiene la muestra es conectada a la línea. Se tiene un flujo de Ar_2 que separa los hidruros de Ge de la solución, siendo transportado a un tubo en forma de U inmerso en NaCl, luego es llevado a un segundo tubo en forma de U con Ar_2 líquido, el cual congela los hidruros de Ge. Cuando se va a realizar la medición el tubo es calentado, derritiendo el hidruro. El gas pasa a través de un filtro de NaOH que remueve el vapor de agua remanente y es enviado al ICP-MS. Extraído de Kurtz (2000).	14
3.1.	Variabilidad temporal para los parámetros fisicoquímicos en el sector del Cajón del Maipo. Los cuadrados corresponden a las mediciones realizadas en el Volcán, los círculos en el Yeso, los triángulos en las Melosas, las equis al Manzano, los asteriscos al Toyo, las estrellas al Colorado y los rombos al Plomo.	18
3.2.	Variabilidad temporal para los parámetros fisicoquímicos en el sector del río Mapocho. Los cuadrados azules corresponden a las mediciones realizadas en el Covarrubias, los círculos azules a MPC1, los triángulos azules a MPC2.	19
3.3.	Variabilidad temporal para el caudal. En (A) se observan los puntos Covarrubias, MPC1 y MPC2, mientras que en (B) solo el Manzano. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.	20
3.4.	Variabilidad temporal para los elementos mayores en el sector del Cajón del Maipo. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.	22
3.5.	Variabilidad temporal para los elementos mayores en el sector del río Mapocho. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2 y las estrellas azules corresponden a las vertientes.	23
3.6.	Variabilidad temporal para los elementos traza en el sector del Cajón del Maipo. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.	24
3.7.	Variabilidad temporal para los elementos traza en el sector del Mapocho. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.	25

3.8.	Variabilidad temporal para las razones Ge/Si en el sector del Cajón del Maipo y río Mapocho. En la imagen (A) se observa la variabilidad para los ríos del Maipo y en (B) los del Mapocho. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.	26
3.9.	Variabilidad temporal para las razones isotópicas de Sr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en el sector del Cajón del Maipo y río Mapocho. Las líneas horizontales representadas corresponden a las razones aproximadas para las formaciones Lo Valdés, Río Colina, Abanico y Farellones. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.	27
4.1.	Diagramas de mezcla utilizando razones elementales normalizadas al Na. Los campos definidos para rocas evaporíticas, silicatadas y carbonáticas son los propuestos por Gaillardet et al., 1999. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2. La elipse roja corresponde al extremo composicional asociado a las rocas miocenas de Abanico y Farellones	30
4.2.	Diagrama de correlación entre el Sr y el Ca propuesto por Gaillardet (1999), en donde las rocas carbonáticas se ubican en la esquina superior derecha con altas razones Ca/Na y Sr/Na en comparación a las rocas evaporíticas y silicatadas, quienes se ubican en la esquina inferior izquierda con bajas razones Ca/Na y Sr/Na. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.	31
4.3.	Relaciones de concentración de los elementos mayores versus descarga para el punto el Manzano, Río Maipo. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.	33
4.4.	Relaciones de concentración de los elementos mayores versus descarga para los puntos del sector del Mapocho. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.	34
4.5.	Razones Ge/Si v/s 1/Si para los ríos del Maipo y Mapocho. En A) se observan todos los ríos, mientras que en B) se consideran aquellos con una razón Ge/Si menor a 2 $\mu\text{mol}/\text{mol}$. La recta representada corresponde a la realizada por Froelich et al (1992) a partir de las concentraciones de Ge y Si para los ríos no contaminados de diversas partes del mundo. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.	35
4.6.	Relación entre el Ge y Ge/Si en función del SO_4 para los ríos de ambas subcuencas. En B) y D) se observa lo mismo que en A) y C), respectivamente, pero para aquellos ríos con una razón Ge/Si mayor a 2. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.	36
4.7.	Relaciones de concentración del Ge, Si y Ge/Si versus descarga para el punto el Manzano, Río Maipo. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.	37
4.8.	Relaciones de concentración del Ge, Si y Ge/Si versus descarga para el punto el sector del Mapocho. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.	38
4.9.	Razones isotópicas de estroncio en función de las razones 1/Sr, Sr/Na, Ca/Na y Ca/Sr para los ríos de las subcuencas del Mapocho y del Maipo. Las líneas horizontales representadas corresponden a las razones aproximadas para las formaciones Lo Valdés, Río Colina, Abanico y Farellones. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.	40

4.10.	Relaciones de concentración del Sr y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus descarga para el punto el Manzano, Rio Maipo. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.	40
4.11.	Relaciones de concentración del Sr y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus descarga para el sector del Mapocho. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.	41

Capítulo 1

Introducción

El estudio de la composición química de los ríos permite estudiar el origen y destino de los nutrientes originados durante la interacción entre los distintos subsistemas que componen la zona crítica, tales como la geósfera, hidrósfera, biósfera y atmósfera. Estos procesos comprenden desde la meteorización química y la erosión de los continentes por efecto del agua de lluvia hasta la escorrentía superficial junto con los gases atmosféricos (Gaillardet et al., 1999; Stallard, 1985). Además, permite estudiar el origen y destino de los nutrientes provenientes de las rocas, los cuales son transportados por los ríos hacia los diversos ecosistemas hasta el océano (Cotrim da Cunha et al., 2007). Las interacciones entre la vegetación, el suelo y el agua también influyen en la composición hidrogeoquímica de las aguas superficiales (Dosskey et al., 2016). En particular a partir de la hidrogeoquímica es posible determinar las fuentes de erosión, calcular tasas de denudación física y química, trazar los caminos mediante los cuales circula el agua, e incluso determinar la cantidad de CO₂ consumido a partir de la meteorización de las rocas silicatadas (Kurtz et al., 2011; Negrel et al., 1993; Gaillardet et al., 1999). Este proceso es responsable de moderar a una escala geológica las fluctuaciones en la temperatura global a partir del consumo de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera (Viers et al., 2013). La meteorización de los silicatos ocurre a partir de la hidrólisis de los minerales primarios (e.g. hidrólisis de ortosa $2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 9\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 4\text{Si}(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+ + 2\text{HCO}_3^-$) en contacto con el agua y el CO₂ atmosférico y del suelo, produciendo cationes y bicarbonato en solución junto con minerales secundarios como las arcillas (Depetris et al., 2014). Por lo tanto, una de las maneras de investigar y cuantificar los flujos de elementos y nutrientes producidos por la meteorización química de los continentes es a partir de la composición hidrogeoquímica de la escorrentía superficial.

Los procesos de meteorización química se han estudiado utilizando diferentes herramientas geoquímicas: 1) Utilizando la composición geoquímica de aniones y cationes mayores en combinación con los caudales anuales desde una cuenca es posible determinar los flujos totales de solutos exportados a escala de una cuenca o a escala regional (Louvrat & Allegre, 1997; Meybeck, 1983; Millot et al., 2003; Schopka et al., 2011; Torres et al., 2016). Además, al determinar el origen de estos solutos (e.g. meteorización versus precipitación atmosférica) es factible cuantificar la cantidad de CO₂ atmosférico consumido por la meteorización (Gaillardet et al., 1999; Kump et al., 2000; Moquet et al., 2011; Viers et al., 2013; Xu & Liu, 2010). 2) El uso de trazadores isotópicos como los isótopos de estroncio (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) permite determinar el origen de los solutos producidos a partir de la meteorización de rocas de distintas composiciones (e.g. Gaillardet et al., 1999; Negrel et al., 1993). Esto se debe a que la razón ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr permite discriminar entre rocas ígneas de distintas composiciones (félsicas o máficas), rocas de origen marino (como calizas o lutitas) y rocas de ba-

samento (Banner, 2004; McArthur et al., 2020). 3) El uso de otros trazadores, como las razones Ge/Si permite identificar reacciones geoquímicas como la precipitación y disolución de arcillas durante la meteorización (Mortlock & Froelich, 1987; Kurtz et al., 2002; Lugolobi et al., 2010; Amejeras-Mariño et al., 2018; Meek et al., 2018). Las razones Ge/Si también permiten identificar la presencia de descarga desde fuentes hidrotermales (Arnorsson, 1984; Evans et al., 2004b; Gaspard et al., 2021), o la disolución de sulfuros de Cu y Fe (e.g. pirita, calcopirita; Bernstein, 1985; Scribner et al., 2006). Las razones Ge/Si en combinación con datos de caudales mensuales e instantáneos también se ha utilizado como trazador de los flujos subterráneos que aportan al caudal total de los ríos (Kurtz et al., 2011). Pocas investigaciones que involucran al germanio como trazador han sido desarrolladas en ambientes de subducción y/o en climas mediterráneos, por lo cual a nivel global aun existen interrogantes acerca de su comportamiento en distintos contextos geológicos.

Existe un número importante de estudios que han evaluado la hidrogeoquímica de algunos de los afluentes de la cuenca del río Maipo, los cuales se han enfocado principalmente en entender los procesos de contaminación por drenaje ácido natural y antropogénico asociado a los yacimientos de pórfidos de Cu presentes en la zona y las actividades mineras de extracción asociadas (e.g. Correa-Burrows et al., 2021; Valenzuela-Díaz et al., 2020; Viers et al., 2019). Sin embargo, para entender el funcionamiento de los solutos aportados por la meteorización de esta cuenca es necesario determinar su origen litológico estudiando cuencas no afectadas por drenaje ácido. Además es necesario determinar las posibles reacciones geoquímicas principales asociadas a la meteorización utilizando trazadores como el Ge/Si. En base a lo anterior, no existen estudios que aborden la hidrogeoquímica desde una perspectiva ajena al drenaje ácido y que apunten a entender acerca de los procesos de meteorización química y su dinámica, y es más, tan solo dos estudios han reportado valores para las razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y Ge/Si (Fiege et al., 2009; R. A. Mortlock & Froelich, 1987), por lo cual es importante dar a conocer nuevos y valiosos datos para estudiar en mayor profundidad la cuenca.

Las rocas de la cuenca del río Maipo son diversas en su origen, pues existen rocas volcánicas, ígneas y sedimentarias. Por ende, se espera que exista una variabilidad espacial y temporal de la geoquímica de los arroyos y ríos afluentes dentro de la misma cuenca determinada por la presencia de rocas volcanoclásticas e ígneas en la subcuenca del río Mapocho, mientras que en el sector del Cajón del Maipo se tiene además la presencia de rocas sedimentarias de origen marino y continental. Además, a partir del uso de trazadores como el Ge/Si, puede ser posible identificar las reacciones asociadas a la formación de arcillas durante la meteorización a lo largo de la cuenca del Maipo, aprovechando la variabilidad estacional del régimen hidrológico. En este estudio se investigó la variabilidad temporal y espacial de la geoquímica de la cuenca del río Maipo, entre los meses de agosto del 2021 a enero del 2022, en los sectores cordilleranos del cajón del Maipo y la subcuenca del río Mapocho, determinando la hidrogeoquímica mensual, las razones de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y las razones Ge/Si de los tributarios de la cuenca del río Maipo para identificar la fuente de los solutos y analizar procesos de meteorización asociados a estos trazadores geoquímicos.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Ubicación y Accesos

La cuenca del río Maipo se emplaza en la zona central de Chile, extendiéndose desde la frontera con Argentina hasta su desembocadura al sur de San Antonio. Esta posee un área total de 15.304

km², abarcando la totalidad de la región Metropolitana y sectores de las regiones de Valparaíso y de O'Higgins. Su principal afluente corresponde al homónimo de la cuenca, el río Maipo, el cual recibe aportes de los ríos Volcán, Yeso y Colorado en el sector del Cajón del Maipo, y del río Mapocho en la cuenca de Santiago. Las áreas de estudio están representadas en la figura 1.1, las cuales corresponden al sector del Cajón del Maipo y la subcuenca del río Mapocho en el sector de Farellones.

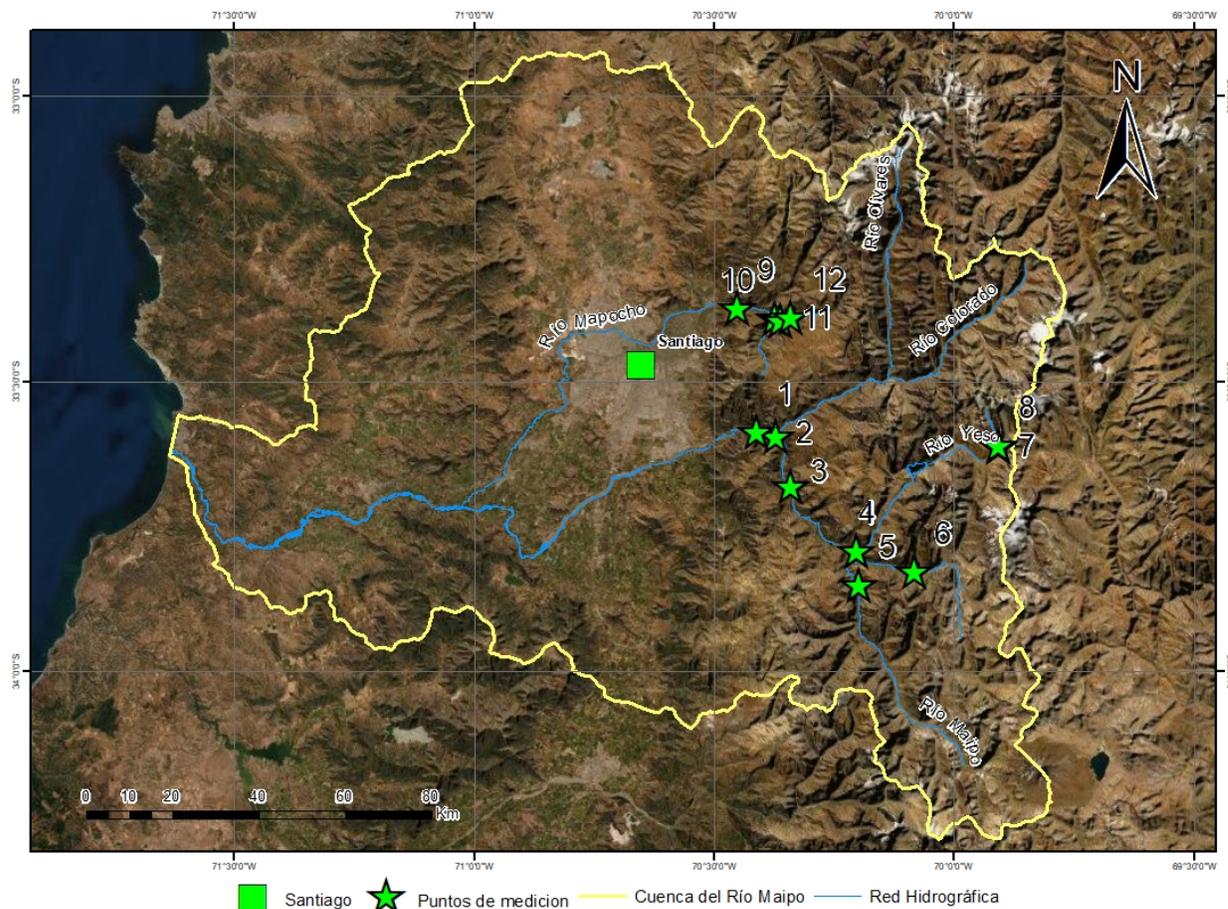


Figura 1.1: Mapa de la zona de estudio de la Cuenca del río Maipo. Se observan los puntos de muestreo: (1) El Manzano, (2) El Colorado, (3) El Toyo, (4) El Yeso, (5) Las Melosas, (6) El Volcan, (7) El Plomo, (8) Los Patos, (9) Los Almendros, (10) Covarrubias, (11) Río Molina y (12) Las Vertientes.

Para acceder a la zona del Cajón del Maipo (Figuras 1.1, 1.2) se debe tomar la ruta G-25 Camino al Volcán en dirección hacia la comuna de San José de Maipo. A partir de esta ruta es posible acceder a los puntos de muestreo de El Manzano, El Toyo, El Colorado y El Volcán, mientras que para llegar a los puntos de El Yeso, El Plomo y Estero Los Patos se debe tomar la bifurcación por la ruta G-455 Camino Embalse El Yeso. Por último, para dirigirse hacia el punto Las Melosas es necesario tomar la ruta G-465 Camino Las Melosas. Para ingresar a la zona de la subcuenca del río Mapocho (Figuras 1.1, 1.2) es necesario ingresar por la ruta G-21 Camino a Farellones. El primer punto se encuentra ubicado justo antes del puente Ñilhue, mientras que para acceder a los otros dos puntos se debe continuar por la misma ruta hasta el kilómetro 10.9, donde se debe ingresar a un camino privado por aproximadamente 5 Km hasta el centro de eventos Antawayá.

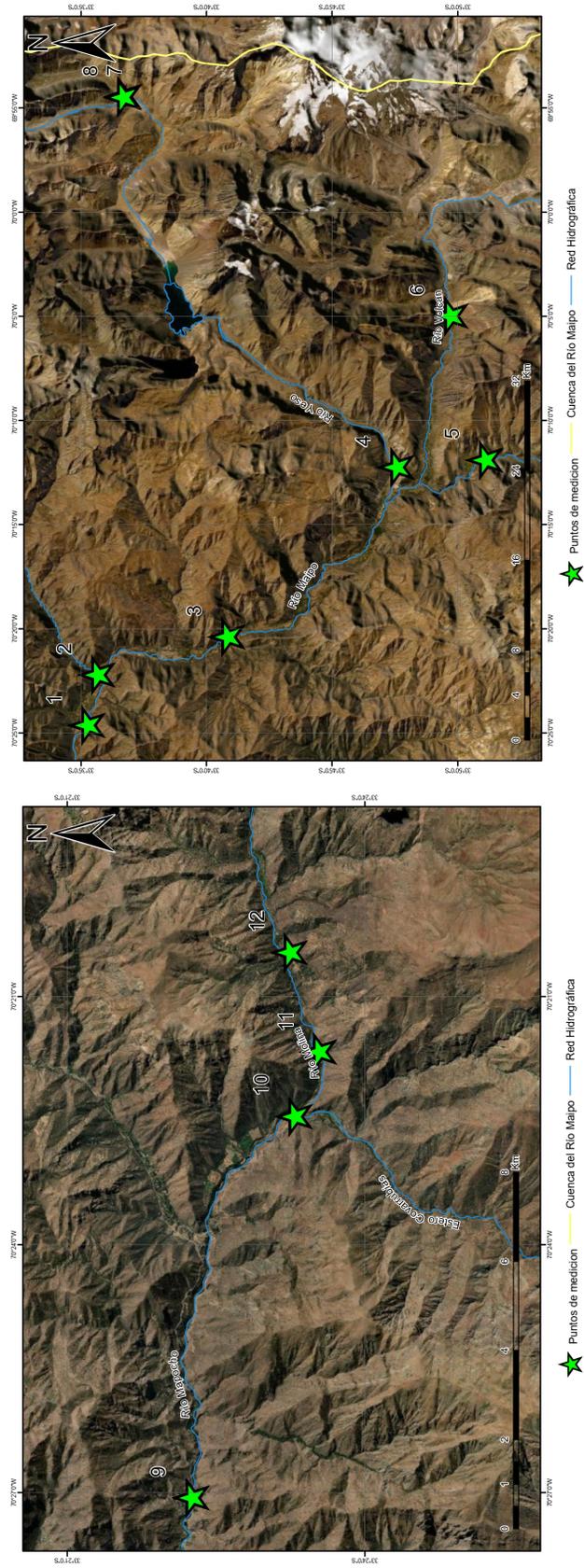


Figura 1.2: Zoom a la zona de estudio presentada en la Figura 1. A la izquierda se observa el sector del Cajón del Maipo y a la derecha el de la subcuenca del Mapocho

1.1.2. Clima y Régimen Hidrológico

Dentro de la cuenca se pueden encontrar dos tipos de climas, por un lado está el Templado Mediterráneo que se manifiesta prácticamente en toda el área y se caracteriza por una estación seca prolongada con máximas que superan los 30°C en algunos sectores y un invierno bien marcado con temperaturas mínimas que caen incluso bajo o cercanas los 0°C, mientras que por el otro lado está el clima Frío de Altura que se localiza por sobre los 3000 m.s.n.m, y se distingue por temperaturas menores de 0°C y precipitaciones sólidas que permiten la acumulación de nieve y hielo (DGA, 2004). Los montos de precipitación varían dentro de la cuenca, en los sectores de Santiago se registran valores entorno a los 300 (mm/año) por lo menos hasta el año 2004, mientras que en sectores más cordilleranos como San José de Maipo se alcanzan sumas cercanas a los 500 (mm/año). En ambos casos las precipitaciones se suelen concentrar durante los meses de invierno (DGA, 2004). Durante dicha estación, las precipitaciones sólidas suelen ocurrir por sobre los 1500 m.s.n.m. (Meza, 2005).

En cuanto a los regímenes hidrológicos, se pueden identificar el nival, nivo-pluvial y pluvial. El régimen nival se desarrolla en la Cordillera de los Andes y los mayores caudales se generan durante los meses de deshielo que comienza en octubre y finaliza en marzo aproximadamente. El régimen nivo-pluvial presenta una importante componente nival y una menor, pero no despreciable, componente pluvial, por lo cual se pueden identificar dos períodos de mayor caudal correspondientes a los períodos estivales de deshielo y otro en los meses de invierno influenciado por las lluvias. Por último, el régimen pluvial rige en aquellas cuencas que nacen bajo la línea de nieves (DGA, 2004). Según los mismos datos de la Dirección General de Aguas (DGA), para el río Maipo en la estación El Manzano los caudales promedios mensuales para los años 2020 y 2021 varían entre 24 y 96 (m³/s) para los meses de invierno y verano respectivamente, mientras que para el río Mapocho en la estación Los Almendros estos valores varían entre 0.9 a 3.3 (m³/s). El balance hídrico de la DGA de 1987 estimó una evapotranspiración anual de 200-500 mm para la zona, mientras que (Meza, 2005) reporta valores mensuales entre 159 mm y 16 mm para el verano e invierno, respectivamente. Una actualización del balance hídrico realizado el año 2017 estima valores de evapotranspiración de aproximadamente 250 (mm/año) para el período entre 1980 y 2015, implicando que entre un 50 a un 80 % del agua se pierde por evapotranspiración (DGA, 2017)

Los efectos del cambio climático también se dejan ver en la cuenca del río Maipo. En la zona central de Chile se ha registrado un largo período de sequía entre el 2010 y 2020, llamada Megasequía, con un déficit sostenido de precipitaciones entre un 20-40%. Este es el evento de sequía más prolongado que se ha registrado y se encuentra probablemente dentro de los cinco períodos secos más largos dentro del último milenio (Garreaud et al., 2020). La disminución en las precipitaciones junto con el aumento de la temperatura han traído consigo una disminución generalizada de la cobertura de nieve desde el año 2010, la cual se acentúa en el año 2016 (Hernández et al., 2021). Los glaciares ubicados en la cordillera también han sufrido una merma ligada a las disminuciones de cobertura de nieve. Algunos estudios indican que desde 1955 ha existido una tendencia decreciente en el balance de masa glaciar, la cual se ha incrementado justamente a partir del 2010 (Ayala et al., 2020; Farías-Barahona et al., 2020). Ambos eventos podrían tener una influencia directa en los regímenes hídricos de las cuencas de la zona central, pues al tener una menor fuente de producción de agua y cambios en las temperaturas que modifican la elevación de la línea de nieve se esperaría una reducción en la acumulación de nieve y un prematuro derretimiento de esta misma, repercutiendo en los volúmenes de escorrentía durante primavera y verano (Hernández et al., 2021; Vicuña

et al., 2021). Dichos cambios también se ven reflejados en el caudal de los ríos, en la figura 1.3 se aprecia como el caudal del río Maipo en el sector del Manzano ha mantenido una tendencia a la baja respecto al promedio histórico durante los últimos 20 años.

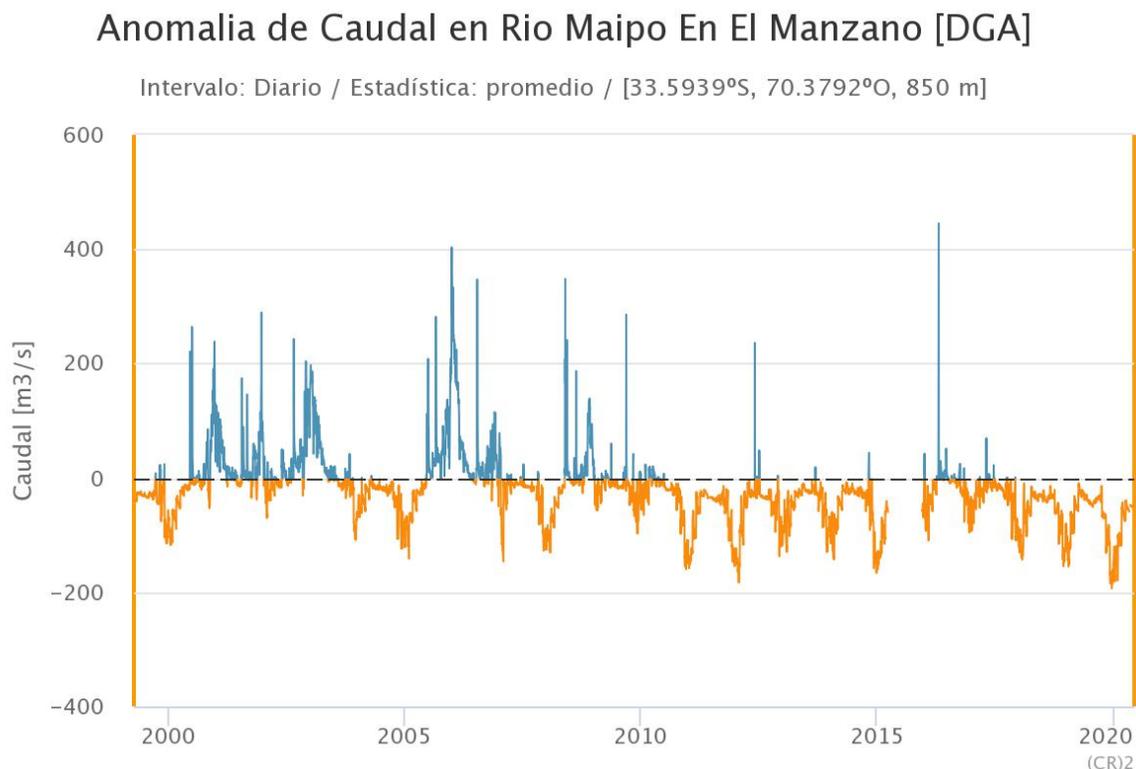


Figura 1.3: Caudal diario y anomalías de caudal para el río Maipo en la estación El Manzano de la DGA entre los años 2000 y 2020. La curva azul muestra el caudal y la curva anaranjada muestra la anomalía de caudal. Este gráfico fue creado a partir de la plataforma de datos climáticos CR2.

1.1.3. Geología de la cuenca del Maipo

En esta sección se describen las principales formaciones estratificadas, cuerpos intrusivos y depósitos sedimentarios que afloran en la Cordillera de Los Andes en la cuenca del Maipo. Además se presenta la composición isotópica del Sr para dichas formaciones estratificadas y los cuerpos intrusivos.

1.1.3.1. Rocas Estratificadas

Formación Río Colina

Esta unidad fue definida por González (1963) en el valle del río Colina y está compuesta por sedimentitas que presentan una secuencia de calizas y lutitas calcáreas, lutitas fisibles finamente estratificadas, areniscas, conglomerados y potentes lentes de yeso. Además existen intercalaciones con rocas volcánicas andesíticas (Thiele & Cubillos, 1980). Esta formación aflora en el sector más oriental de la cordillera en el límite fronterizo con Argentina. Posee una base desconocida y su techo corresponde al contacto concordante con la Formación Río Damas. Se le ha asignado una edad oxfordiana para los niveles superiores mediante la fauna encontrada en dicha formación, mientras que para los niveles inferiores se sugiere una posible edad caloviana. El estudio realizado por

González, 2022 reporta valores isotópicos de la razón de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ correspondientes a 0.7059594 para las rocas carbonáticas y para las rocas bituminosas valores de 0.707151 y 0.709618. Los valores más elevados, correspondientes a las rocas bituminosas, se han interpretado como resultado de una posible alteración hidrotermal con cantidades considerables de carbonatos secundarios.

Formación Río Damas

Definida por Klohn (1960) en el valle del río Damas, como un complejo de sedimentos clásticos, finos y gruesos correspondientes a conglomerados, brechas conglomerádicas e intercalaciones potentes de areniscas y limolitas. También es posible observar intercalaciones de abundantes niveles de rocas volcánicas andesíticas (Thiele & Cubillos, 1980). Esta formación aflora en el sector oriental inmediatamente al oeste de la Formación Río Colina dispuesta como dos franjas subparalelas de dirección norte. Posee una base concordante con esta última y un techo concordante con la Formación Lo Valdés. Posee una edad kimmeridgiana basada en las relaciones de contacto con las capas que sobre y subyacen esta formación. Los valores isotópicos de Sr reportados por González, 2022 tienen un promedio 0.705236 ± 0.00049 , este valor se asocia a una fuente magmática evolucionada o enriquecida.

Formación Lo Valdés

Definida en el valle del río Volcán por González (1963) como un conjunto de calizas, calcilitas, lutitas y areniscas calcáreas, conglomerados, brechas y niveles lenticulares interestratificadas de yeso hacia el techo (Thiele & Cubillos, 1980). Se distribuye a lo largo de la zona fronteriza en franjas continuas de dirección N-S desde el sur del río Volcán hasta sectores argentinos. Su base es concordante con la Formación Río Damas y su techo lo es con la Formación Colimapu. Debido a la gran cantidad de fósiles se le ha asignado una cronología que va desde el Tithoniano hasta el Hauteriviano. González (2022) reporta valores de las razones isotópicas de Sr de 0.707191 ± 0.00014 , el cual es coincidente con las firmas isotópicas de Sr oceánicas de ese período geológico que varían entre 0.7070 y 0.7074 (McArthur et al., 2020), siendo una formación estrictamente marina.

Formación Colimapu

Fue definida por Klohn (1960) en la quebrada homónima inmediatamente al sur de la Hoja de Santiago, como un conjunto sedimentario compuesto por areniscas, conglomerados de matriz arenosa, lutitas con niveles de rocas piroclásticas aéreas y algunas lavas andesíticas y calizas, en capas lateralmente discontinuas (Thiele & Cubillos, 1980). Los estratos se distribuyen a lo largo de una franja de dirección norte desde el sur del río Volcán hasta más allá del norte del río Colorado. Su base es concordante con la Formación Lo Valdés y su techo sería concordante con la Unidad Las Coloradas (Mardones, 2019). La edad asignada a esta formación es entre el Hauteriviano hasta el Albiano. Las razones isotópicas para esta formación corresponden a 0.703841 ± 0.00004 , siendo indistinguible entre la firma isotópica de Sr ígnea y la sedimentaria, además de ser muy parecida los valores para las formaciones Abanico y Farellones (González, 2022).

Unidad Las Coloradas

Mardones (2019) define esta unidad en la ladera sur del valle del río Volcán, cercano a Baños Morales. Consiste en un conjunto de rocas sedimentarias, entre ellas areniscas conglomerádicas, cuarcíferas, fosilíferas y fangolitas. Existen algunas intercalaciones de lavas y calizas. Se dispone en una orientación N-S aproximadamente, hacia el norte del río Yeso y al sur del río Volcán. Su base sería concordante con la Formación Colimapu y paraconcordante con Abanico. Estudios de circones detríticos sugieren una edad de 73.8 ± 4.2 Ma, situándola en el Cretácico Superior.

Formación Abanico

Esta unidad fue definida en primera instancia por Muñoz Cristi, pero luego fue oficialmente aceptada cuando Aguirre (1960) la definió en la provincia de Aconcagua compuesta por tobas y brechas volcánicas con intercalaciones de lavas y sedimentitas clásticas (Thiele & Cubillos, 1980). Su distribución es bastante amplia en la Hoja de Santiago, extendiéndose al norte y al sur de esta. Su base es paraconcordante con Las Coloradas y su techo se caracteriza por una discordancia angular con la Formación Farellones. Su edad se restringe en entre fines del Cretácico hasta el Oligoceno. La recopilación hecha por González, 2022 presenta una razón isotópica de Sr promedio de 0.70368 ± 0.00021 , la cual es interpretada como una fuente magmática extraída directamente del manto, o con una muy baja contaminación cortical.

Formación Farellones

Muñoz Cristi le dio el nombre a esta formación, pero fue definida por Klohn (1963) como una potente unidad constituida por sedimentitas clásticas como areniscas, conglomerados y lutitas, lavas andesíticas, riolíticas y basálticas y rocas piroclásticas. Su distribución se ubica a lo largo de una franja N-S en gran parte de la Hoja de Santiago, con posiciones horizontales a subhorizontales. Su base se caracteriza por estar en discordancia angular con la Formación Abanico y el techo en algunas partes corresponde a la actual superficie de erosión y en otras es levemente discordante a la Formación Colorado- La Parva, que consiste en un grupo de pórfidos riolíticos, domos y cuellos, asociados con flujos de lava, tobas y brechas (Thiele & Cubillos, 1980). La edad propuesta para esta formación corresponde el Mioceno. La razón isotópica de Sr promedio tiene un valor de $0.70376 \pm 0.00039\%$, basado en la recopilación de González, (2022) quien además interpreta que esta razón está directamente relacionada con el contexto tectonomagmático durante su formación, donde existía un marco extensivo que se alternaba con períodos compresivos resultando en un debilitamiento y adelgazamiento de la corteza por lo que los magmas que conformaron a estas rocas poseían menos Sr radiogénico por venir directamente del manto.

Unidades del Cuaternario

Esta unidad puede dividirse en 2. La primera la Unidad Volcánica Antigua de edad pleistocena asociada a volcanes extintos formados principalmente por coladas andesíticas y traquiandesíticas, distribuyéndose en el sector fronterizo donde destacan el volcán Tupungato, Cerro Marmolejo, entre otros. La segunda unidad denominada como Unidad Volcánica Nueva de edad Holocena que corresponde a los volcanes que han presentado actividad en tiempos históricos, presentando coladas andesíticas con intercalaciones menores de brechas y piroclastos. Esta última unidad se ubica en sectores como el volcán Tupungatito y el volcán San José. Los valores isotópicos de Sr reportados por González, 2022 para esta unidad son en promedio de 0.70497 ± 0.00093 , y sus valores están influenciados por una a contaminación magmática en la base de la corteza o a un enriquecimiento de la fuente del manto ligado a erosión por subducción.

1.2. Razones Ge/Si como trazados de procesos de meteorización

El germanio (Ge) es un elemento siderófilo del grupo IV de la tabla periódica y se considera traza tanto en el manto como en la corteza, con concentraciones de 1 y 1.3 ppm, respectivamente. Posee dos estados de oxidación, el 2+ y 4+, siendo el último el más abundante en condiciones superficiales con un radio iónico de 0.39 \AA (W. M. White, 2018). El Ge y el Si (radio iónico = 0.26 \AA) poseen una configuración electrónica de la capa externa idéntica, resultando en un comportamiento

geoquímico bastante parecido entre ambos elementos llegando incluso algunos autores a describir al Ge como un isótopo extremadamente estable de Si (Froelich et al., 1992). Las similitudes mencionadas junto con el hecho de que el largo de los enlaces tetrahédricos Ge-O (1.75Å) y Si-O (1.64Å) sean parecidos permiten al Ge sustituir fácilmente al Si en la estructura cristalina de los silicatos (Kurtz et al., 2011).

El comportamiento del Ge y Si en ambientes de meteorización parece ser sistemático, y es que al ocurrir una meteorización incongruente de los silicatos primarios existe un fraccionamiento entre estos dos elementos (Kurtz et al., 2002). Lo anterior se ilustra en la figura 1.4, donde se considera que las rocas silicatadas poseen una razón Ge/Si promedio de 1.5 ($\mu\text{mol/mol}$) y al producirse la meteorización incongruente se generan arcillas secundarias que se enriquecen en Ge resultando con razones Ge/Si mayores al material parental (3.75 ($\mu\text{mol/mol}$)), mientras que los fluidos residuales se empobrecen en Ge y tienen bajas razones Ge/Si (0.35). En base a lo anterior, se espera que las razones Ge/Si en los ríos reflejen dos componentes de mezcla asociados a el agua residual de la meteorización (bajas razones Ge/Si) y a la disolución de las arcillas secundarias (altas razones Ge/Si), aunque es necesario tener presente que razones muy elevadas no pueden ser explicadas mediante este mecanismo e implican la presencia de otras fuentes ricas en Ge. Este proceso es fundamental para utilizar la razón Ge/Si como un trazador de procesos de meteorización, como lo es entender el ciclo del Si, determinar intensidades de meteorización o trazar flujos de agua, tal como se ha mencionado previamente (Kurtz et al., 2002, 2011; Lugolobi et al., 2010; Murnane & Stallard, 1990).

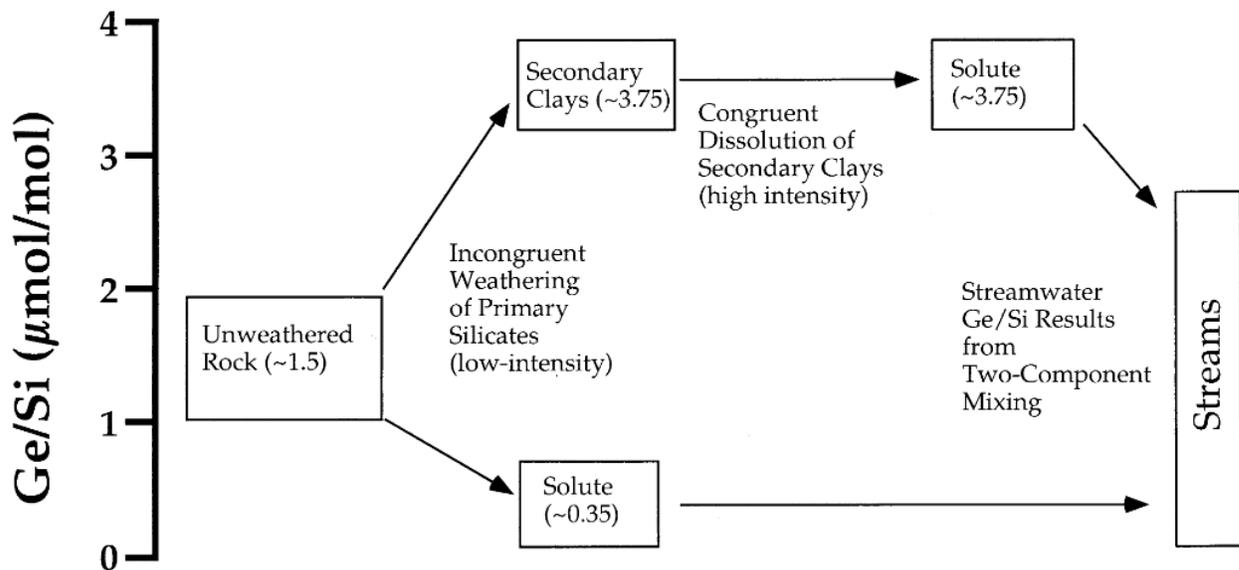


Figura 1.4: Proceso de fraccionamiento del Ge respecto al Si en ambientes de meteorización. Extraído de Kurtz (2002).

1.3. Razón isotópica de Sr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ como trazador litológico

El estroncio (Sr) es un elemento alcalinotérreo del grupo IIA de la tabla periódica, con concentraciones en la corteza de 320 ppm, su estado de oxidación de es 2^+ y posee un radio iónico de 1.26 Å (W. M. White, 2018). Tiene un comportamiento litófilo y moderadamente incompatible en las fases mantélicas, por lo cual está enriquecido en la corteza respecto al manto. Además,

reemplaza fácilmente al Ca^{2+} debido a su similar carga y radio iónico (radio iónico = 1.12 Å), siendo entonces común encontrarlo en aquellos minerales compuestos de Ca como la plagioclasa, calcita, yeso, entre otros (W. M. White, 2018). Existen cuatro isótopos naturales de Sr, los cuales son el ^{84}Sr con un abundancia de 0.56 %, el ^{86}Sr con una abundancia de 9.78 %, el ^{87}Sr con un abundancia de 7.04 % y el ^{84}Sr con un abundancia de 82.53 %, siendo el ^{87}Sr el único que es de una naturaleza radiogénica, el cual es producto de la desintegración del ^{87}Rb (Capo et al., 1998).

Los isótopos radiogénicos pueden ser utilizados como trazadores geoquímicos y el Sr no es la excepción. Por ejemplo el sistema isotópico Rb-Sr permite la datación de rocas ígneas, teniendo que las rocas más antiguas poseen mayores razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ que las rocas más jóvenes que tienen la misma razón inicial de Rb/Sr, o permite correlacionar rocas marinas en base a que la composición isotópica de Sr en los océanos es homogénea (Dickin, A. P, 2018) y por ende al producirse la sedimentación y posterior diagénesis las rocas heredaran dicha razón de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, la cual ha sido documentada para el Fanerozoico (McArthur et al., 2020). Entonces conociendo las razones de las fuentes litológicas, se pueden estudiar procesos de meteorización química y la formación de suelos, la proveniencia y movilidad de los cationes o algunos ciclos biogeoquímicos (Capo et al., 1998).

Capítulo 2

Metodología

2.1. Trabajo de Terreno

2.1.1. Toma de muestras

El trabajo de terreno consistió en realizar muestreos mensuales de agua entre los meses de agosto del 2021 y febrero del 2022 en doce puntos de la cuenca del río Maipo. Estos puntos abarcan gran parte del sector cordillerano de la hoya hidrográfica y no están tan influenciados por efectos antrópicos. Estos puntos están representados en las Figuras 1.1 y 1.2, y corresponden a: (1) El Manzano, (2) El Colorado, (3) El Toyo, (4) El Yeso, (5) Las Melosas, (6) El Volcán, (7) El Plomo, (8) Los Patos, (9) Los Almendros, (10) Covarrubias, (11) Río Molina y (12) Las Vertientes (Coordenadas en tabla 2.1). Se recolectaron aproximadamente 500 ml de agua, distribuidos en cuatro alícuotas de 125 ml para distintos análisis químicos: aniones, cationes y trazas, reserva y alcalinidad. Todas las muestras fueron filtradas a un tamaño 0.22 μm utilizando filtros de jeringa de acetato de celulosa o poliétersulfona, excepto aquellas para alcalinidad. Las muestras para cationes y elementos trazas y la botella de reserva se acidificaron a un $\text{pH} < 2$ con 1.25 ml de HNO_3 a concentración 4 M y de calidad Merck Suprapur o equivalente. Una vez obtenidas las muestras, estas se sellaban con parafilm y se mantenían refrigeradas en un cooler. También se midieron parámetros fisicoquímicos como la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica (C y SPC), el potencial de óxido reducción (ORP) y sólidos disueltos totales (TDS) utilizando el multiparámetro Hanna HI98194.

2.1.2. Medición de caudales y parámetros fisicoquímicos

Para poder estudiar la relación entre la concentración de algunos elementos versus la descarga se realizó la medición del caudal. Los puntos de el Manzano y MPC1 están ubicados estaciones fluviométricas de la DGA por lo cual se podía acceder a los datos de caudal mediante la página web. Algunos puntos, como las Melosas, a pesar de estar ubicados en estaciones fluviométricas de dicho institución no poseían disponibilidad de datos para las fechas de muestreo. En los lugares donde no existía ninguna estación y era posible realizar una medición, como lo fue en MPC2 y Covarrubias, se midió el caudal in situ. El procedimiento consistió en colocar una huincha de medir de forma perpendicular al cauce e ir realizando mediciones de velocidad (m^3/s) y la profundidad generalmente cada 50 cm, o en casos de esteros menores cada 10-20 cm.

Tabla 2.1: Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo

ID	Latitud	Longitud
Manzano	33°35' 11.87"	70°24' 39.02"
Colorado	33°35' 36.12"	70°22' 13.54"
Toyo	33°40' 46.67"	70°20' 23.16"
Yeso	33°47' 31.05"	70°12' 14.97"
Melosas	33°51' 2.47"	70°11' 54.16"
Volcan	33°49' 39.54"	70°04' 59.68"
Plomo	33°36' 38.68"	69°54' 27.10"
Los Patos	33°36' 39.26"	69°54' 29.67"
MPC1	33°22' 14.44"	70°27' 03.73"
MPC2	33°23' 31.52"	70°21' 40.11"
Covarrubias	33°23' 16.64"	70°22' 27.03"
Vertientes	33°23' 14.03"	70°20' 28.21"

2.2. Trabajo de laboratorio

2.2.1. Alcalinidad

Para medir la alcalinidad se tomó una alícuota de 40 ml de la muestra, incluyendo 2 blancos de laboratorio, y se midió el pH inicial con un medidor de pH Hanna HI3221. Utilizando una pipeta se agregaron, dependiendo de la muestra, entre 0.1 a 3.5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 0.01 M hasta alcanzar un pH 8,3 y 4,5 para determinar las concentraciones de carbonato y bicarbonato, respectivamente. En ambos casos se registró la cantidad de ácido gastado en la titulación y se obtuvieron las concentraciones de carbonato y bicarbonato mediante las siguientes ecuaciones:

$$CO_3^{-2}(mmol/L) = \frac{v_1 * M * 4000}{A} \quad (2.1)$$

$$HCO_3^{-}(mmol/L) = \frac{(v_2 - 2v_1 - b) * M * 2000}{A} \quad (2.2)$$

Donde v_1 corresponde al volumen en ml de H_2SO_4 utilizado para titular hasta un pH 8.3, v_2 es similar a v_1 pero en este caso para alcanzar un pH 4.5, b es el volumen promedio en ml de H_2SO_4 utilizado para titular los blancos, M es la concentración molar de H_2SO_4 (0.01 M) y A es la alícuota en ml de cada muestra (40 ml).

2.2.2. Sulfato

Para medir el anión sulfato se transfirió 1 ml de la muestra a un matraz aforado de 50 ml y se diluyó con agua clase 1 hasta un volumen de 25 ml. Adicionalmente se tomaron alícuotas de 25 ml de la serie de estándares de sulfatos destinados para la calibración de la curva de sulfatos. A cada matraz se le agregó 1,2 ml de NH_3 2,5 mol/L y 5 ml de $BaCrO_4$, dejando reposar las muestras al menos 3 horas. Una vez transcurrido ese tiempo, se le agregó 1 ml de amoníaco 2,5 mol/L y se filtró utilizando papel filtro con un tamaño de poro menor o igual a 3 μm . Finalmente, se midió la absorbancia en el espectrofotómetro SHIMADZU UV-1289 y se obtuvo la concentración de

sulfatos en ppm.

2.2.3. Análisis de concentraciones de cationes mayores y elementos trazas

Las muestras de cationes fueron analizadas usando un espectroscopio de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES; AMETEK SpectroBlue) en el Laboratorio de Geoquímica de la Universidad de Cornell. Los elementos analizados fueron Ca, Mg, Mn, Na, Si, Sr y S, con estándares en los rangos de 0.01 hasta 100 ppm. Las muestras que presentaron rangos por sobre la curva de calibración de los estándares se diluyeron volumétricamente en HNO₃ al 2 % por un factor de 10 para así poder obtener una medición más precisa. El análisis de los elementos traza se realizó en el Centro para Espectrometría de Masa Elemental de la Universidad de Carolina del Sur en un Espectrómetro de Masas por Plasma Inductivamente Acoplado de Alta Resolución (HR-ICP-MS; Element 2). En total se midió la concentración de 47 elementos, entre ellos Rb, Sr, Al y Fe. En este caso se utilizó el material de referencia canadiense SLRS-6 como estándar en concentraciones desde los 1 ppb hasta 1 ppm.

2.2.4. Análisis de razones isotópicas de estroncio (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)

Todos los análisis se llevaron a cabo en el Centro para Espectrometría de Masa Elemental de la Universidad de Carolina del Sur siguiendo las técnicas estándar para el laboratorio (Béguelin et al., 2017; Frisby et al., 2016). La metodología consistió en tomar una alícuota de las muestras para proporcionar al menos 400 ng de Sr para ser evaporada en recipientes de teflón previamente lavados y luego fue redisoluelta en HNO₃ al 2 %. Posteriormente la muestra se monta en columnas cromatográficas de perfluoroalcoxi (PFA) que contienen la resina de intercambio iónico Dowex 50WX8 para poder retener los cationes y descartar el resto de los elementos, mediante la elución con 2.5N HCl. El siguiente paso fue aislar el Sr utilizando la resina Eichrom Sr-spec usando HNO₃. Las razones ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr fueron determinadas en un Espectrómetro de Masas por Plasma Inductivamente Acoplado con Multicolector (MC-ICP MS) modelo Neptune (Thermo) usando un sistema de introducción APEX (Elemental Scientific) con un nebulizador autoaspirante de 100 µl de teflón (Savillex). Las mediciones fueron corregidas para el fraccionamiento instrumental de masa usando la razón ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr= 0.1194, y la interferencia del krypton en el ⁸⁶Sr fue corregida en línea usando ⁸³Kr/⁸⁶Kr=0.66474. La precisión fue monitoreada cada tres muestras, utilizando el estándar NIST SRM987 que posee un valor promedio de ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710324±0.000008 (2 desviaciones estándar, n=8). Todas las razones isotópicas de Sr fueron reportadas relativas a ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr= 0.710248, correspondiente al estándar NIST SRM987. El material de referencia de agua SLRS-6 fue ejecutado en 0.712090 ± 0.000007. Todos los blancos de Sr del laboratorio fueron de 31 pg. Los blancos de terreno fueron de 134 pg y 1224 pg. Evidentemente este último blanco de terreno muestra un valor elevado, pero incluso si este es considerado en el análisis, no es relevante para las muestras ya que poseen concentraciones mayores a 400 ng de Sr.

2.2.5. Análisis de concentraciones de Ge y razones Ge/Si

Los análisis de las concentraciones de germanio fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Geoquímica de la Universidad de Cornell utilizando un espectrómetro de masa por plasma acoplado por inducción (ICP-MS) de sector magnético modelo Element 2 (Thermo) en combinación con las técnicas de generación de hidruros (HG) y dilución isotópica (ID). Esta técnica (ID-HG-ICP-MS) fue desarrollada por Mortlock y Froelich (1996) y permite mejorar los límites de detección del Ge hasta cerca de 400 fg y una precisión de 2-3 % RSD, siendo posible determinar concentraciones de Ge en ríos diluidos (Kurtz, 2000). Otra ventaja es que mediante este método es posible eliminar

todos los compuestos que provoquen interferencias a la hora de realizar la medición, como por ejemplo el $^{56}\text{Fe}^{16}\text{O}$.

El principio de la generación de hidruros y la dilución isotópica consiste en que una muestra enriquecida en germanio, término conocido como spike en inglés, es reducida por NaBH_4 a hidruro de germanio (GeH_4), un gas volátil, y separado de la solución utilizando un flujo de gas inerte. Este compuesto es atrapado criogénicamente, y luego es introducido en el ICP-MS (Ver figura 2.1). Esto produce una gran señal transiente en la cual la razón $^{70}\text{Ge}/^{74}\text{Ge}$ es medida. Las limitaciones de este método yacen en las incertezas de las abundancias naturales de Ge, la calibración del enriquecimiento isotópico y las determinaciones de las razones individuales para cada muestra enriquecida. En términos prácticos, la gran limitación corresponde a las concentraciones de los blancos, del orden de los picogramos de Ge, y el volumen disponible. (Kurtz, 2000). El procedimiento consistió en calcular la cantidad aproximada de spike necesario para las muestras a partir de la concentración de Si, determinando una concentración de 2 pmol/g. En botellas de polietileno de alta densidad (HDPE) Nalgene de 30 ml lavadas en ácido se mezcló el spike con las muestras y se diluyeron con QD H_2O a un total aproximado de 10 ml, dejándolas reposar por al menos una noche antes del análisis. El ICP-MS se prepara para el análisis de generación de hidruro desconectando la cámara de pulverización quitando el codo de cuarzo y conectando la línea de hidruro directamente a la antorcha.

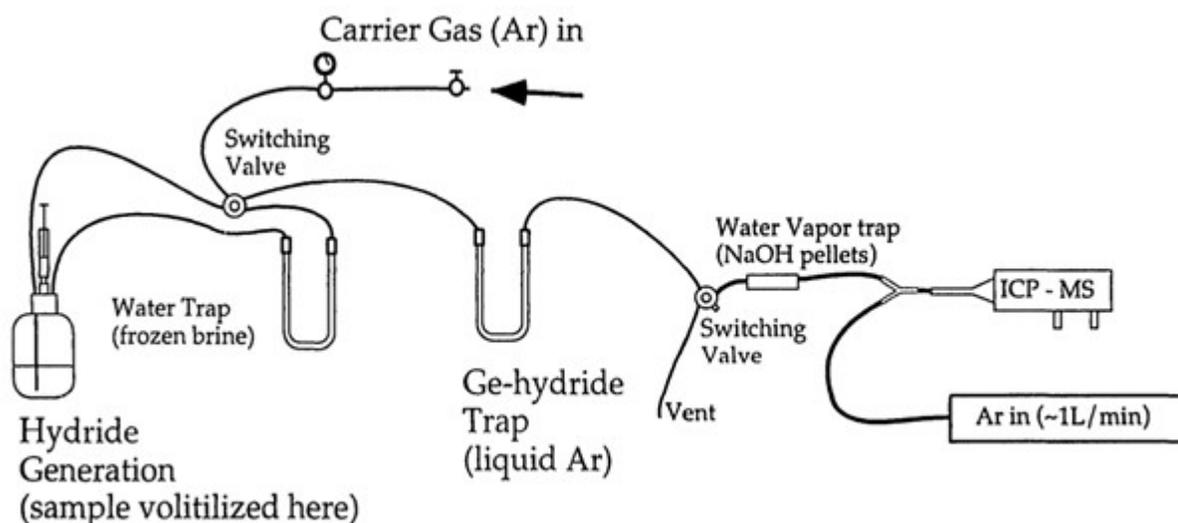


Figura 2.1: Diseño de la línea de hidruros utilizada para separar el Ge. La botella que contiene la muestra es conectada a la línea. Se tiene un flujo de Ar_2 que separa los hidruros de Ge de la solución, siendo transportado a un tubo en forma de U inmerso en NaCl , luego es llevado a un segundo tubo en forma de U con Ar_2 líquido, el cual congela los hidruros de Ge. Cuando se va a realizar la medición el tubo es calentado, derritiendo el hidruro. El gas pasa a través de un filtro de NaOH que remueve el vapor de agua remanente y es enviado al ICP-MS. Extraído de Kurtz (2000).

Para la medición se utilizó un blanco de ácido nítrico, un check estándar de 100 ppt de Ge y una curva de calibración que considera las concentraciones de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 ppt de

Ge. Entonces primero se midió un blanco y un check estándar para corroborar que todo estuviera funcionando bien, luego se configuró la curva de calibración y se volvió a medir un blanco y un check. El orden de medición fue que cada 4 muestras se medía un blanco y un check para realizar las correcciones posteriores. Se aplicaron correcciones por el blanco y el sesgo instrumental. El blanco al mantener una señal estable a lo largo de las mediciones posibilitó la corrección utilizando solo el promedio de las intensidades para el ^{70}Ge , ^{72}Ge y ^{74}Ge . Esta corrección fue aplicada tanto a las muestras como a los check estándar. Se calculó el promedio de las razones $^{70}\text{Ge}/^{74}\text{Ge}$ y $^{72}\text{Ge}/^{74}\text{Ge}$ para los check estándar y se filtraron los datos hasta obtener una desviación estándar relativa de 2.69% y 1%, correspondientemente. El promedio natural de la razón $^{70}\text{Ge}/^{74}\text{Ge}$ en la naturaleza es de 0.5620 y el de los check estándar de 0.5067, mientras que el $^{72}\text{Ge}/^{74}\text{Ge}$ natural es de 0.7515 y los check de 0.7280. Con dichos valores se obtuvo el sesgo instrumental por unidad de masa atómica, siendo de -2.46% y -1.56% para las razones 70/74 y 72/74 respectivamente, y se aplicó a cada muestra la corrección. Ya corregidas, las concentraciones de Ge fueron calculadas a partir de la ecuación de la recta de la curva de calibración. En el caso de la dilución isotópica, una vez corregidas todas las muestras se calculó la cantidad de solución enriquecedora agregado a cada una, y considerando ese valor junto con la abundancia del ^{74}Ge (0.0061) y la razón 70/74 (161.39) del spike, la abundancia natural del ^{74}Ge (0.3652) y las razones naturales 70/72 y 70/74 se calculó la cantidad total de Ge presente. Los valores obtenidos con este método son los que se utilizaron finalmente para este escrito.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Geoquímica de los ríos de las subcuencas del Maipo y Mapocho

En total se obtuvieron 54 muestras desde agosto del 2021 hasta enero del 2022. En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan el resumen de los parámetros fisicoquímicos y geoquímicos para las subcuencas del Maipo y del Mapocho. En las tablas A.1, A.2, A.3 y A.4 en la sección de anexos está la información compilada para los seis meses de muestreo para cada río. Los datos faltantes para algunas fechas se deben a fallas de la sonda multiparámetro para medición en terreno.

3.1.1. Variabilidad temporal y espacial de los parámetros fisicoquímicos

El pH en el sector del Cajón del Maipo varía entre 6.9 a 9 con un promedio de 7.6 (n=15, siendo n el total de muestras), en donde los mayores valores se encuentran en el río Yeso con un pH medio de 7.9 (n=2), mientras que los menores se encuentran en el sector del río Volcán promediando un pH de 7 (n=3), y siendo el máximo pH (9) registrado en el mes de diciembre en el Toyo y el mínimo (6.9) en el Volcán durante el mismo mes. La temperatura oscila entre los 6.4 a 17.6°C, con un promedio de 10.8°C (n=15) (Figura 3.1B). Los mayores valores en promedio se encuentran en el río Yeso con 15.8°C (n=2), mientras que El Plomo presenta la mínima temperatura con 6.4°C para el mes de diciembre y el máximo registrado (17.6°C) ocurrió durante diciembre en el Yeso (Figura 3.1A). La conductividad específica (SPC) varía entre los 897 a 2110 (µS/cm), con un promedio de 1358.4 (µS/cm) (n=15), localizándose las mediciones más altas en promedio en las Melosas con 1829 (µS/cm) (n=3) y en tanto las menores en el Yeso con 1011.5 (µS/cm) (n=2), el máximo se registro en las Melosas (2110 (µS/cm)) durante octubre, y el mínimo ocurrió en el Yeso (897 (µS/cm)) durante noviembre (Figura 3.1C) . Los sólidos disueltos totales (SDT) varían entre los 583 a 1371 (mg/l), con un promedio de 900.9 (mg/l) (n=15), en donde las Melosas presenta los valores más altos con una media de 1189 (mg/l) (n=3) y el Colorado los valores más bajos con 716 (mg/l) (n=2), siendo el mayor valor fue medido en las Melosas en el mes de octubre (1371 mg/l) y el menor en el Colorado en noviembre (583 mg/l) (Figura 3.1D).

Para la zona del río Mapocho el pH varía entre 6.3 a 9.1 promediando 8 (n=11), siendo el Covarrubias el que posee en promedio los máximos valores con 8.74 (n=4) y lo contrario ocurre en MPC1 con una media de 7.38 (n=4), donde el máximo pH se midió en diciembre y enero en el río Covarrubias (pH 9.1), mientras que el mínimo fue en MPC1 (pH 6.3) para el mes de noviem-

bre (Figura 3.2A) . La temperatura varía desde los 5.3 a 22.5°C promediando 12.8 °C (n=11), el Covarrubias es el río más cálido con una media de 15.7°C (n=4) y el más gélido es el MPC1 con un promedio de 10.1°C (n=4), en donde la temperatura más alta ocurrió en el Covarrubias durante diciembre (22.5°C) y la menor en MPC1 en octubre (5.3°C) (Figura 3.2B) . La SPC toma valores entre 135.8 a 385.5 ($\mu\text{S/cm}$) promediando 213.5 ($\mu\text{S/cm}$) (n=11) y presenta las mismas tendencias que los parámetros anteriores, siendo MPC1 con una media de 305.2 ($\mu\text{S/cm}$) (n=4) el río con mayores valores y al contrario el Covarrubias el que presenta los menores valores con un promedio de 152.9 ($\mu\text{S/cm}$) (n=4), teniendo que el máximo fue en MPC1 en enero (385.5 ($\mu\text{S/cm}$)) y el mínimo en el Covarrubias en noviembre (135.8 ($\mu\text{S/cm}$)) (Figura 3.2C). Los SDT oscilan entre los 88.2 a 205.6 (mg/l) y un promedio de 138,6 (mg/l) (n=11), la mayor carga de STD se encuentra en MPC1 con una media de 198 (mg/l) (n=4) y la menor en el Covarrubias promediando 99.4 (mg/l) (n=4), teniendo que el mayor registro ocurrió en enero en MPC1 (205.6 mg/l) y el menor en el Covarrubias durante octubre (88.2 mg/l) (Figura 3.2D).

En cuanto a los caudales, solo se presentan los resultados para el Covarrubias, MPC1, MPC2 y el Manzano (Figura 3.3). En el sector del Mapocho los valores van entre los 0.04 a 2.58 (m^3/s), con un promedio de 0.89 (m^3/s) (n=17),teniendo que en invierno el promedio es de 0.49 (m^3/s) y en verano de 0.74 (m^3/s) y los mayores caudales ocurren en MPC1 con un promedio de 1.58 (m^3/s) (n=6) y los menores en el río Covarrubias con 0.12 (m^3/s) (n=5) como media, siendo el mayor caudal registrado (2.58 (m^3/s)) en el mes de septiembre en MPC1, mientras que el menor (0.04 (m^3/s)) fue en el Covarrubias durante diciembre (Figura 3.3A). Respecto al Manzano , sus valores van entre 25.68 a 71.98 (m^3/s) y un promedio de 52.9 (m^3/s) (n=5), siendo el mínimo alcanzado durante el mes de agosto y el máximo en noviembre (Figura 3.3B).

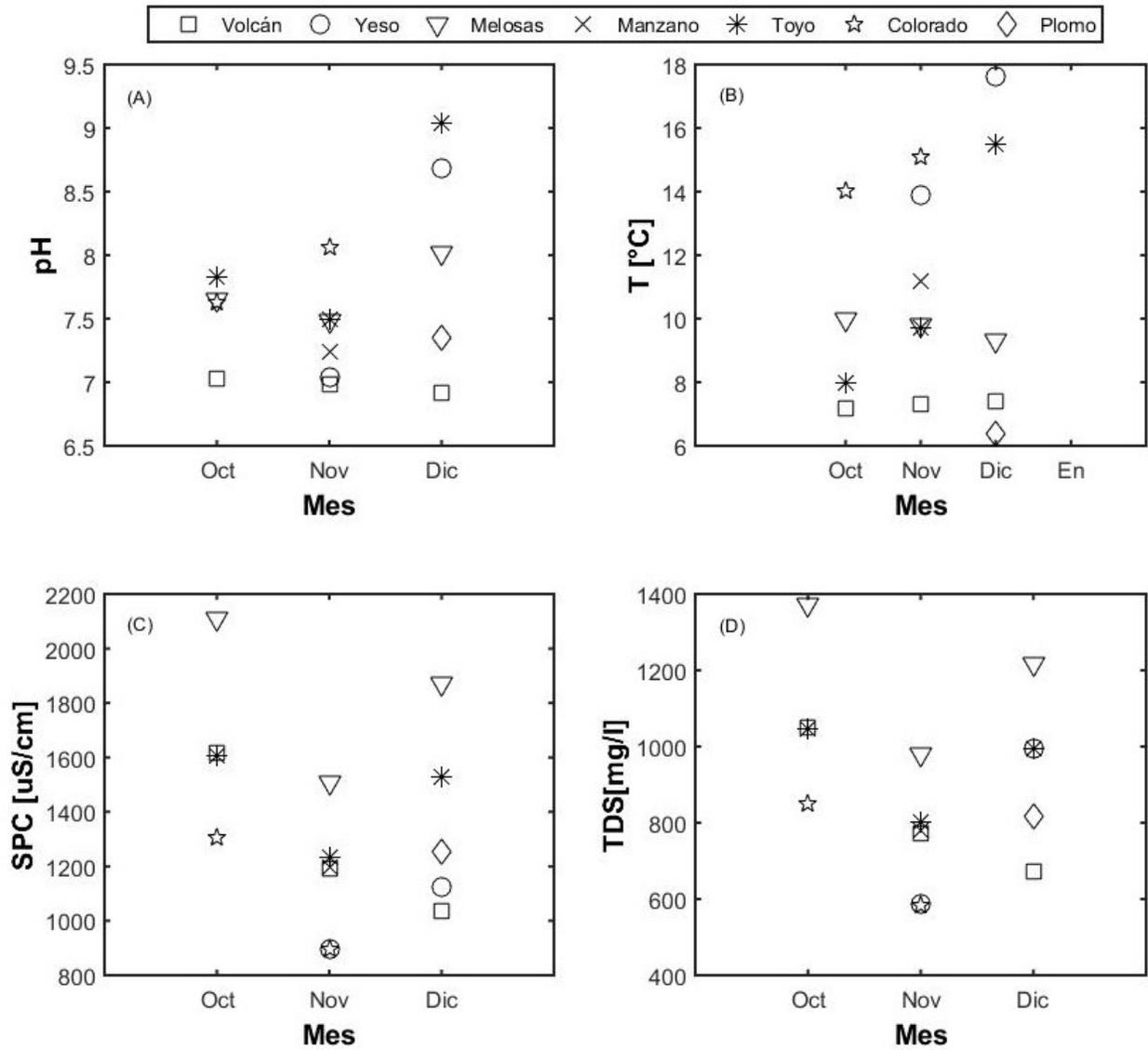


Figura 3.1: Variabilidad temporal para los parámetros fisicoquímicos en el sector del Cajón del Maipo. Los cuadrados corresponden a las mediciones realizadas en el Volcán, los círculos en el Yeso, los triángulos en las Melosas, las equis al Manzano, los asteriscos al Toyo, las estrellas al Colorado y los rombos al Plomo.

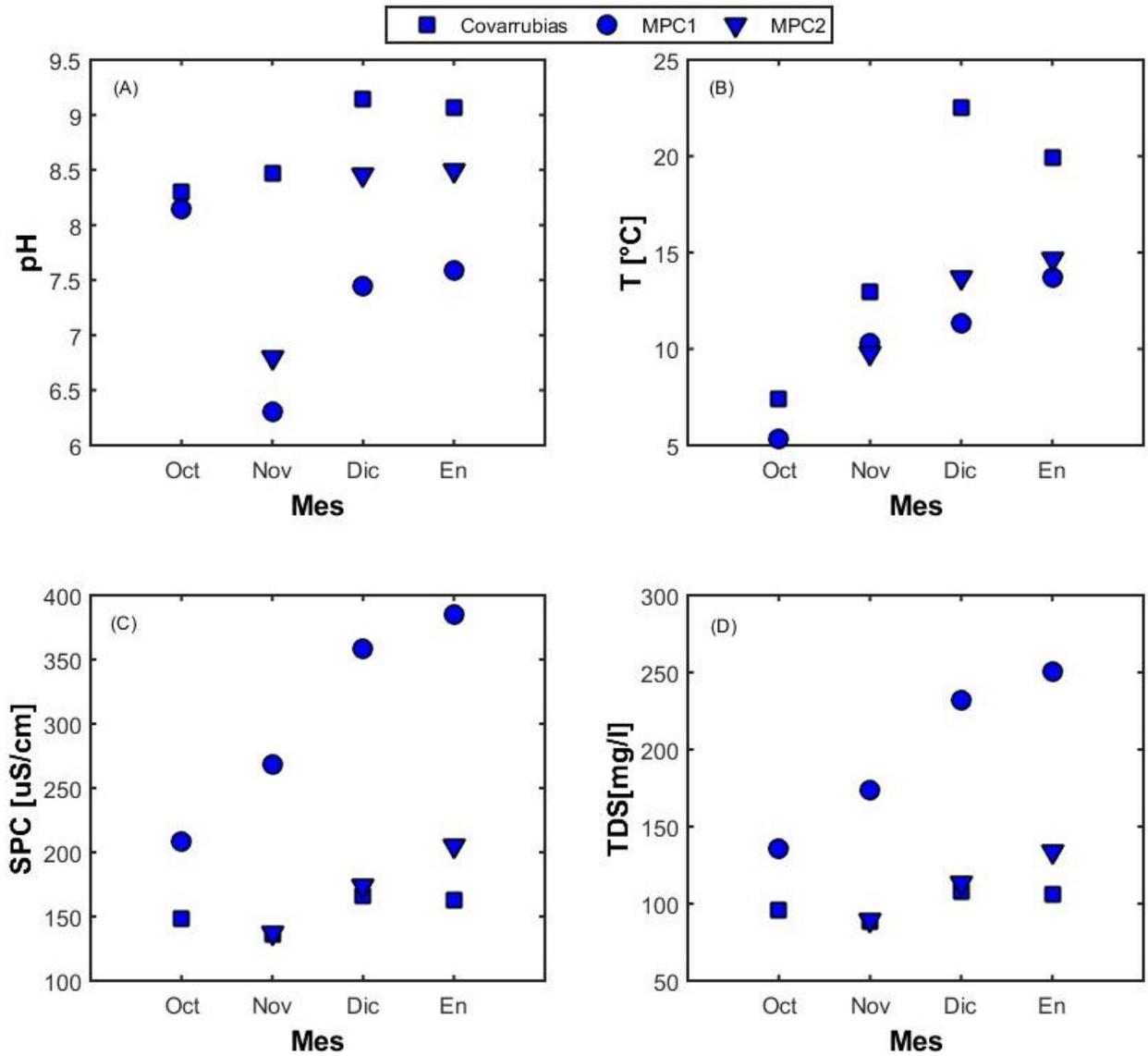


Figura 3.2: Variabilidad temporal para los parámetros fisicoquímicos en el sector del río Mapocho. Los cuadrados azules corresponden a las mediciones realizadas en el Covarrubias, los círculos azules a MPC1, los triángulos azules a MPC2.

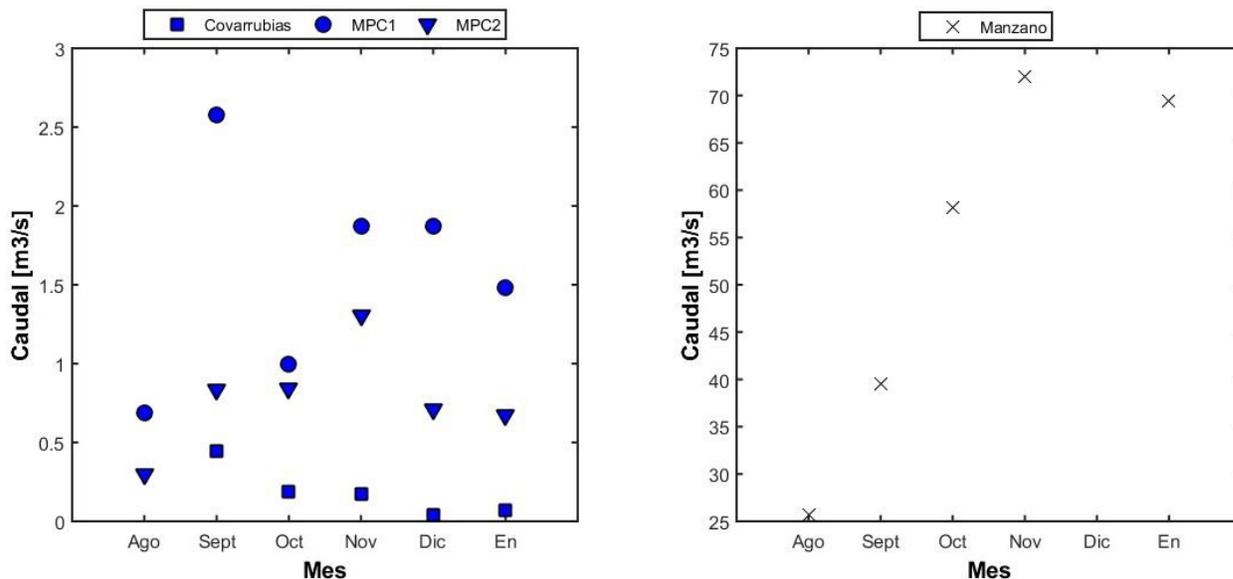


Figura 3.3: Variabilidad temporal para el caudal. En (A) se observan los puntos Covarrubias, MPC1 y MPC2, mientras que en (B) solo el Manzano. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.

3.1.2. Variabilidad temporal y espacial de los elementos mayores

Para el sector del Cajón del Maipo se tiene que las concentraciones de Ca varían entre 98.7 a 257.5 (mg/l) con un promedio de 158.9 (mg/l) (n=35), registrando un valor promedio para invierno (agosto) de 162.5 (mg/l) (n=6) y en el verano (enero) desciende a 157.1 (mg/l) (n=5) (Figura 3.4A). Las mayores concentraciones se encuentran en el estero el Plomo con valores promedio de 244.9 (mg/l) (n=2) y los menores en tanto están en el sector del Colorado con un promedio de 134.5 (mg/l) (n=4), y en particular el máximo valor corresponde al Plomo el mes de agosto (257.5 mg/l) y el menor en el Colorado en noviembre (98.7 mg/l). Los valores de Na varían entre 3.23 a 256.5 (mg/l) promediando 98.5 (mg/l) (n=35), durante el invierno se tienen concentraciones de 152.7 (mg/l) (n=6) y para el verano de 117.2 (mg/l) (n=5) (Figura 3.4C). Los máximos valores localizados en el sector de las Melosas con una media de 149.8 (mg/l) (n=6) y los mínimos en el sector del Plomo con valores promedio de 7.25 (mg/l) (n=2), siendo el máximo registrado 256.5 (mg/l) durante el mes de agosto en el Toyo, mientras que el mínimo corresponde a 3.23 (mg/l) en el Plomo para el mes de diciembre. El Mg varía desde los 8.1 a 30.1 (mg/l) con una media de 17.7 (mg/l) (n=35), con promedios para el verano de 17 (mg/l) (n=5) y para el invierno de 22 (mg/l) (n=6) (Figura 3.4B). Destacan el sector del Plomo donde se encuentran en promedio los valores más altos con 28.1 (mg/l) (n=2), al contrario las concentraciones más bajas en las Melosas con una media de 13.2 (mg/l) (n=6). No obstante el valor más alto fue medido en agosto en el Colorado (30.1 mg/l) y el más bajo se registró en el Volcán para el mes de diciembre (8.1 mg/l). Las concentraciones de SO₄ oscilan entre los 164 y 661 (mg/l) con un promedio de 357.1 (mg/l) (n=35), la media para invierno es de 343.5 (mg/l) (n=6) mientras que para verano aumenta a 347.2 (mg/l) (n=5) (Figura 3.4D). El río Plomo destaca con las mayores concentraciones con un promedio de 442.5 (n=2), mientras que el río las Melosas se caracteriza por los valores mínimos con un promedio de 295.3 (mg/l) (n=6). La máxima concentración de Mg se obtuvo en el estero El Plomo durante el mes de diciembre con 661 (mg/l) y el valor mínimo fue en las Melosas durante agosto y septiembre con 161 (mg/l). Por ultimo el HCO₃ fluctúan entre los 79.3 a 198.2 (mg/l) con una media de 113.5 (mg/l) (n=35), en verano las cifras son en promedio de 124.8 (mg/l) (n=5) y en tanto en invierno este valor asciende a

135.5 (mg/l) (n=6) (Figura 3.4E). El río Volcán posee las mayores concentraciones de bicarbonato con un promedio de 156.3 (mg/l) (n=6), mientras que el río Yeso registra el mínimo, con un promedio de 98.1 (mg/l) (n=6). La máxima concentración de bicarbonato corresponde a 198.2 (mg/l) en Agosto en el río Volcán y la mínima en octubre en el río Yeso con 79.3 mg/l.

Para el sector del río Mapocho las concentraciones de Ca van desde los 11.5 a 56.5 (mg/l) promediando 26.4 (mg/l) (n=19), en invierno se registraron 39.8 (mg/l) (n=2) como media y para verano este valor corresponde a 36.7 (mg/l) (n=3) (Figura 3.5A). El punto MPC1 presenta las mayores concentraciones de Ca con un promedio de 40 (mg/l) (n=6); por el contrario, las menores concentraciones de Ca son de 16 (mg/l) (n=5) en el río Covarrubias. El valor más alto de Ca se registró en enero en MPC1 con 56.5 (mg/l) y la menor en las Vertientes durante septiembre con 11.5 (mg/l). Respecto al Mg, sus concentraciones van desde los 0.6 a 7.3 (mg/l) con una media de 3.1 (mg/l) (n=19), para invierno se tiene una concentración promedio de 4.7 (mg/l) (n=2) y para el verano de 3.9 (mg/l) (n=3) (Figura 3.5B). MPC1 muestra las mayores concentraciones promedio de Mg con 5.2 (mg/l) (n=6), donde en particular durante diciembre en MPC1 se registro la concentración más alta (7.3 mg/l). En tanto en MPC2 se encuentra el promedio mínimo para el Mg con 1.8 (mg/l) (n=6). Por otro lado, el Na varía entre los 1.5 a 33.2 (mg/l) y un promedio de 11.8 (mg/l) (n=19), las fluctuaciones promedio entre invierno y verano corresponden a 10.7 (n=2) y 8.1 (mg/l) (n=3) respectivamente (Figura 3.5C). Las menores concentraciones de Na promedio fue de 6.9 (mg/l) (n=6) en el punto MPC2, con la menor medición durante noviembre con 1.5 (mg/l) en MPC2. Las mayores concentraciones corresponden a las Vertientes con 33.2 (mg/l). En cuanto a las concentraciones de SO_4 estas van desde los 2 a 238 (mg/l) y un promedio de 68.6 (mg/l) (n=19), y durante invierno los valores promedio son de 113.5 (mg/l) (n=2) y en verano de 58 (mg/l) (n=3) (Figura 3.5D). Se tiene que MPC1 posee las mayores concentraciones medias de SO_4 con 95.4 (mg/l) (n=6), no obstante el máximo registrado fue en octubre en el río Covarrubias (238 mg/l). En tanto, sin incluir nuevamente a las Vertientes, las menores concentraciones están en MPC2 con 49.33 (mg/l) (n=6) y el mínimo en septiembre en las Vertientes (2 mg/l). Finalmente, el HCO_3 va desde los 9.1 a 158.6 (mg/l) con un promedio de 56.7 (mg/l) (n=19), en invierno y verano se observan valores promedio de 67.4 (n=2) y 34.1 (mg/l) (n=3) (Figura 3.5F). Las mayores concentraciones promedio de bicarbonato se encuentran en las Vertientes con 123.5 (mg/l) (n=2), y en septiembre en las Vertientes se obtiene la mayor concentración (158.6 mg/l). Las menores concentraciones promedio están en MPC1 con 39.9 (mg/l) (n=6), siendo durante el mes de diciembre en MPC1 donde se midió la menor concentración de HCO_3 (9.1 mg/l).

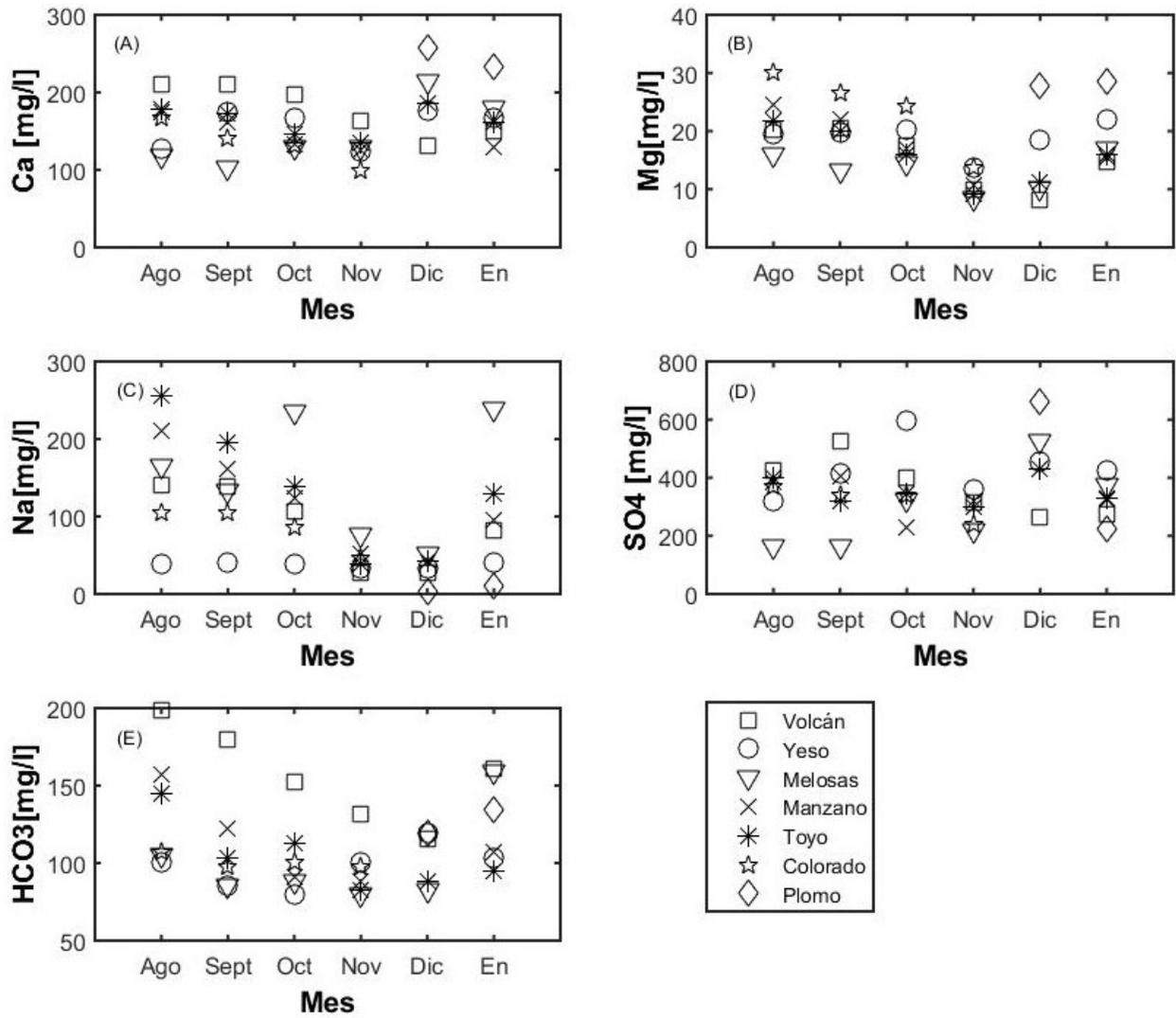


Figura 3.4: Variabilidad temporal para los elementos mayores en el sector del Cañón del Maipo. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.

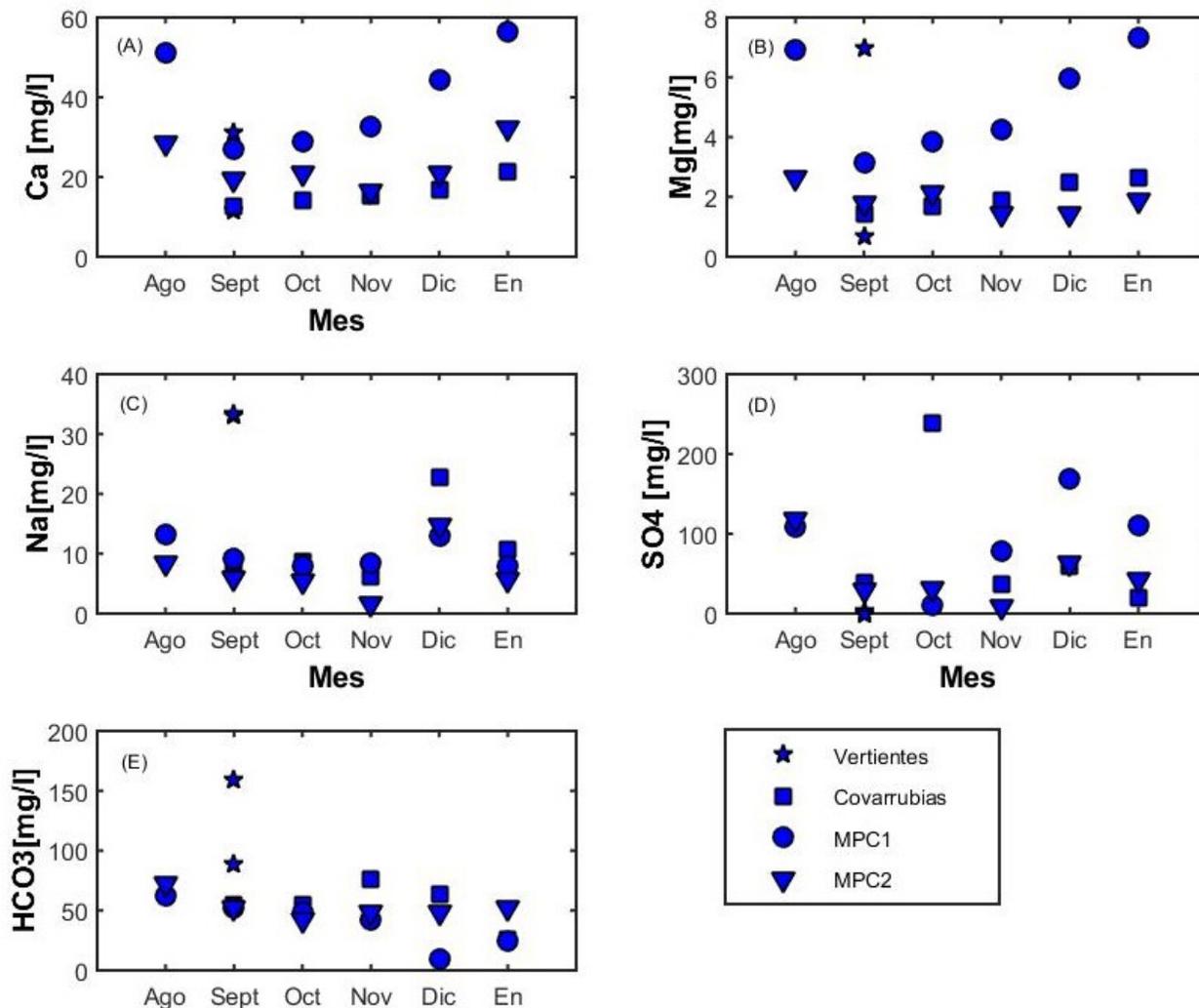


Figura 3.5: Variabilidad temporal para los elementos mayores en el sector del río Mapocho. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2 y las estrellas azules corresponden a las vertientes.

3.1.3. Variabilidad temporal y espacial de los elementos traza

Las concentraciones de Si en el sector del Cajón del Maipo varían entre 2.9 a 8.6 (mg/l) y una media de 5.1 (mg/l) (n=23), en verano las cifras promedian un total de 4.04 (mg/l) (n=5) mientras que para el invierno corresponden a 6.03 (mg/l) (n=6) (Figura 3.6A). El río Volcán presenta las mayores concentraciones de Si en promedio a lo largo de todo el período con 7.5 (mg/l) (n=4), y la mayor en agosto en el Volcán (8.6 mg/l). El río Yeso presenta las menores concentraciones de Si, con un promedio de 3.2 (mg/l) (n=4), y la menor concentración de Si corresponde al mes de septiembre en el Yeso (2.9 mg/l). En cuanto al Ge, se tiene que sus concentraciones varían entre 158 y 1707 (pmol/l) promediando 643 (pmol/l) (n=23), en invierno y verano se tienen concentraciones promedio de 652 (n=6) y 517 (n=4) (pmol/l) respectivamente (Figura 3.6B). Las Melosas presenta la concentración promedio más alta de Ge a lo largo de los meses con 1120 (pmol/l) (n=4) y ocurriendo la concentración máxima durante enero en las Melosas (1707 (pmol/l)). Por el contrario, el río Yeso presenta la menor concentración de Ge con 172 (pmol/l) (n=4), con el menor valor medido en octubre (158 (pmol/l)). El Sr oscila entre 0.9 y 2.6 (mg/l) con un promedio de 1.4 (mg/l)

(n=28), en invierno las cifras alcanzan en promedio 1.6 (mg/l) (n=6) y en verano desciende a 1.5 (mg/l) (n=5) (Figura 3.6C). Destaca el Colorado al presentar el mayor promedio de Sr en todo el período de muestreo con 1.6 (mg/l) (n=4), sin embargo, la mayor concentración de Sr se registró en el estero El Plomo durante diciembre (2.6 mg/l). En tanto las Melosas se observa la menor media de Sr con 1.1 (mg/l) (n=4), registrándose la mínima concentración de Sr (0.9 mg/l) en septiembre.

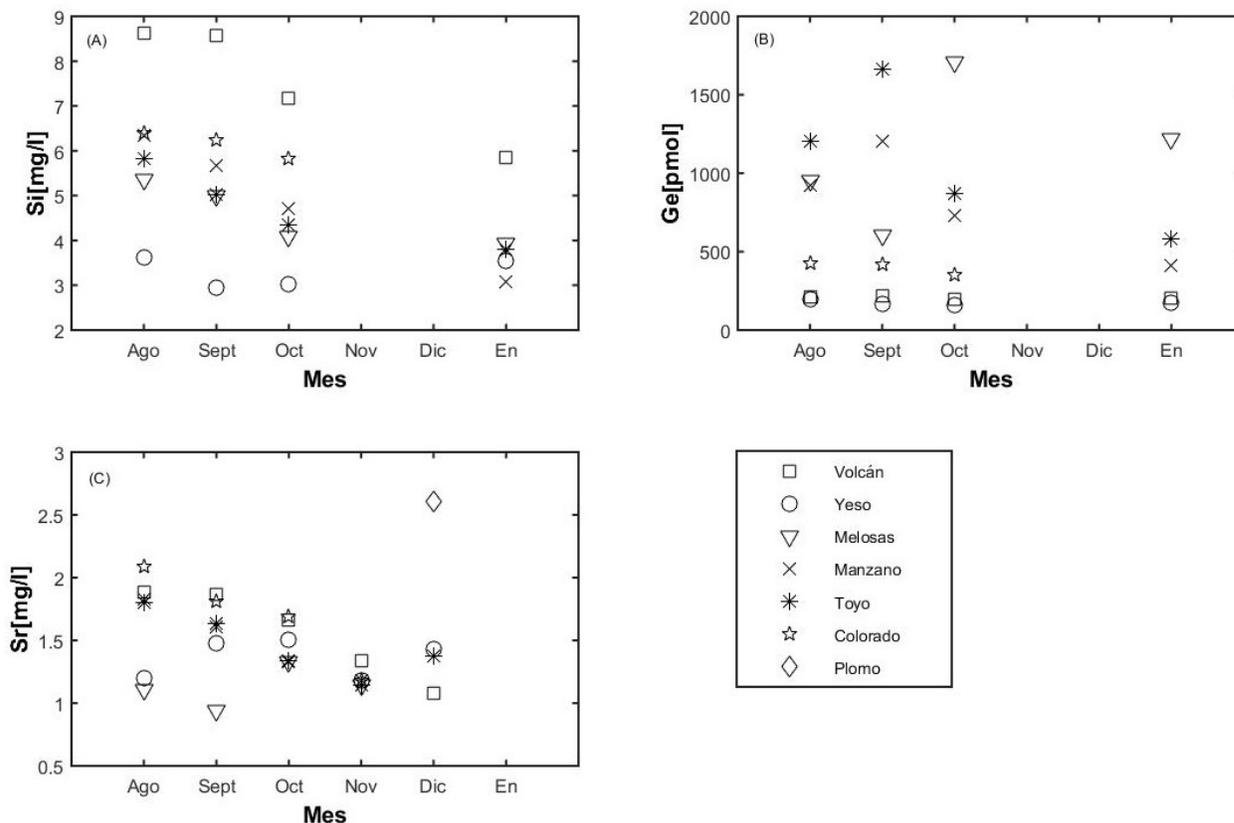


Figura 3.6: Variabilidad temporal para los elementos traza en el sector del Cajón del Maipo. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.

La situación en el sector del Mapocho se caracteriza por variaciones entre 3.4 a 8.8 (mg/l) de Si con un promedio de 5.8 (mg/l) (n=12), en invierno la media corresponde a 5.9 (mg/l) (n=2) y en verano a 4.1 (mg/l) (n=3) (Figura 3.7A). Destacan las mayores concentraciones de Si en las Vertientes con promedio de 8.61 (mg/l) (n=2). Por el contrario, en el punto MPC2 se observa una concentración de Si media de 4.7 (mg/l) (n=4), teniendo que el mínimo de Si se registró durante enero en MPC2 (3.4 mg/l). Para el Ge los valores fluctúan entre 68 a 518 (pmol/l) promediando 140 (pmol/l) (n=12), para invierno y verano las concentraciones medias corresponden a 94 (n=2) y 79 (n=3) (pmol/l) respectivamente (Figura 3.7B). Las Vertientes destacan por poseer la mayor concentración promedio de Ge para el período de muestreo con 351 (pmol/l) (n=2). MPC2 registra las menores concentraciones promedio de Ge con 78 (pmol/l) (n=4), siendo el mínimo en enero en el río Covarrubias (68 pmol/l). Finalmente las concentraciones de Sr van desde los 0.02 a 0.21 (mg/l) con un promedio de 0.09 (mg/l) (n=16), en invierno el promedio corresponde a 0.15 (mg/l) (n=2) y en verano a 0.10 (mg/l) (n=3) (Figura 3.7C). El punto MPC1 posee las mayores concentraciones promedio de Sr a lo largo del período con 0.14 (mg/l) (n=5), mientras que el río Covarrubias posee las menores concentraciones de Sr promedio con 0.02 (mg/l) (n=4), registrándose durante agosto,

octubre y noviembre en el río Covarrubias presentaa las mínima concentración de Sr (0.02 mg/l) .

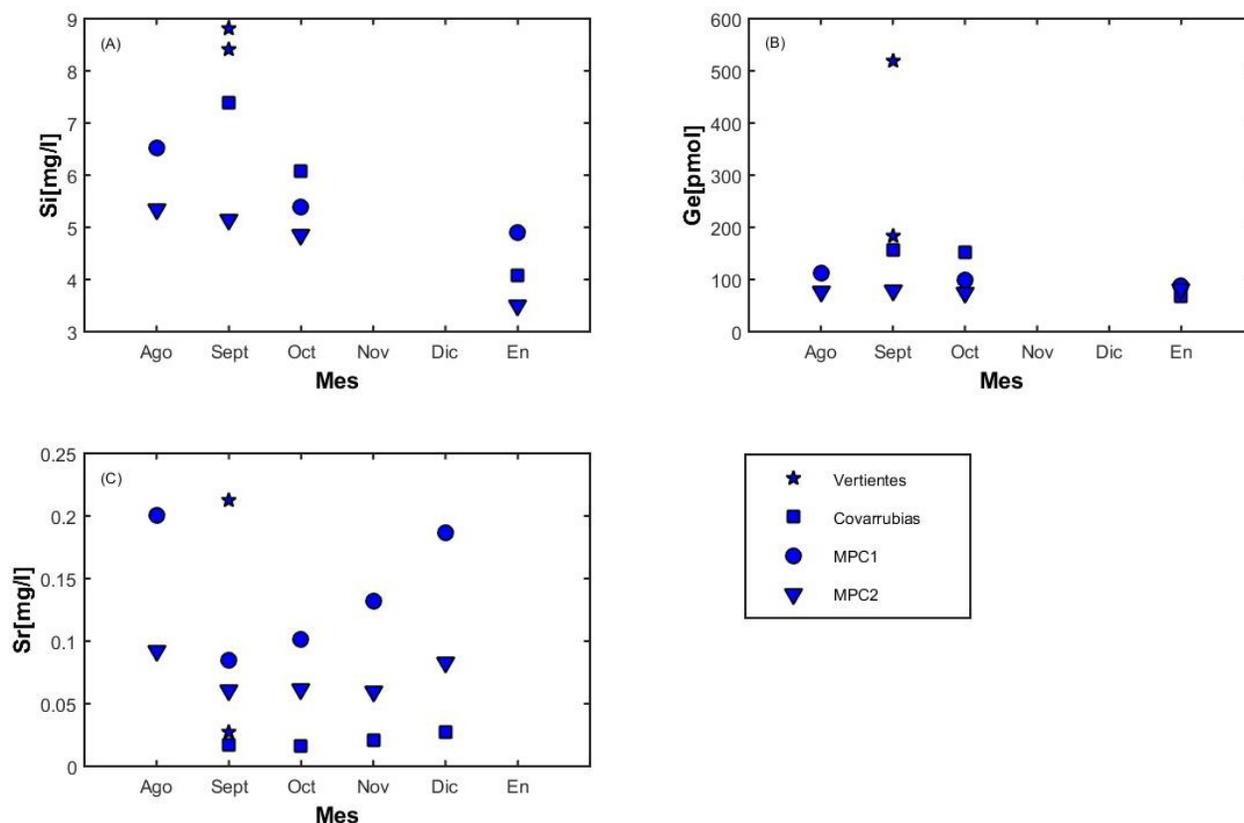


Figura 3.7: Variabilidad temporal para los elementos traza en el sector del Mapocho. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.

3.1.4. Variabilidad temporal y espacial de las razones Ge/Si

Las razones de Ge/Si en el Cajón del Maipo van en un rango entre 0.68 y 11.73 ($\mu\text{mol/mol}$) con un promedio de 3.73 ($n=23$), en invierno el promedio corresponde a 3.72 ($\mu\text{mol/mol}$) ($n=6$) mientras que en verano el valor sube a 3.80 ($\mu\text{mol/mol}$) ($n=5$) (Figura 3.8). El sector de las Melosas presenta las mayores razones Ge/Si con cifras promedio de 7.19 ($\mu\text{mol/mol}$) ($n=4$) durante todo el período de muestreo, el mayor valor fue medido en octubre en las Melosas (11.73 $\mu\text{mol/mol}$). En cambio, el Volcán presenta la menor razón Ge/Si, con una media de 0.79 ($\mu\text{mol/mol}$) ($n=4$), donde el menor valor registrado fue durante agosto en el río Volcán (0.68 $\mu\text{mol/mol}$). Es importante destacar que se puede realizar una distinción entre dos grupos en función de las razones Ge/Si: (1) los ríos que poseen una razón Ge/Si mayor a 2 $\mu\text{mol/mol}$, que incluye las Melosas, el Toyo y el Manzano. (2) El segundo grupo corresponde a la razones Ge/Si menores a 2 $\mu\text{mol/mol}$, donde se encuentran el Yeso, el Volcán y el Colorado (Figura 3.8B).

Para el caso del Mapocho, las razones Ge/Si varían entre 0.40 y 1.64 ($\mu\text{mol/mol}$) y un promedio de 0.62 ($n=12$), en invierno y verano las cifras promedian un total de 0.44 ($n=2$) y 0.54 ($n=3$) ($\mu\text{mol/mol}$) respectivamente (Figura 3.8). El promedio Ge/Si más alto se encuentra en las Vertientes con una razón de 1.13 ($\mu\text{mol/mol}$) ($n=2$), mientras que la razón media más baja se localiza en el punto MPC2 con un valor de 0.48 ($\mu\text{mol/mol}$) ($n=4$). La razón Ge/Si máxima se midió en el mes de septiembre en las Vertientes (1.64 $\mu\text{mol/mol}$) y el mínimo en MPC2 durante el mes de agosto (0.40

$\mu\text{mol/mol}$).

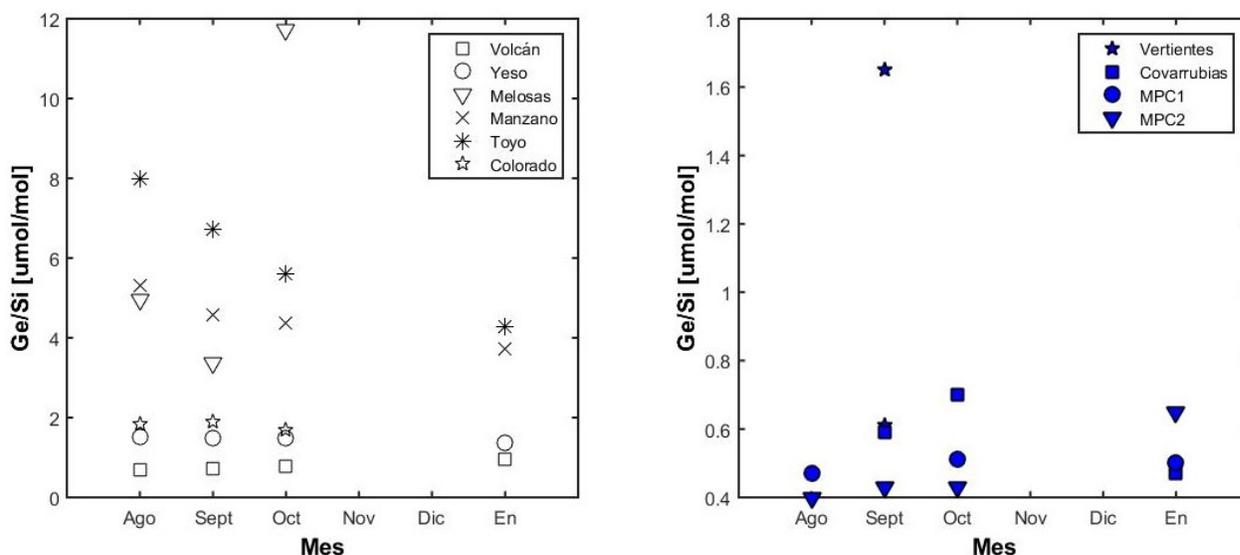


Figura 3.8: Variabilidad temporal para las razones Ge/Si en el sector del Cajón del Maipo y río Mapocho. En la imagen (A) se observa la variabilidad para los ríos del Maipo y en (B) los del Mapocho. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.

3.1.5. Variabilidad temporal y espacial de las razones isotópicas de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

En el Cajón del Maipo las razones isotópicas de Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) poseen un rango entre 0.70589 a 0.70732 ‰ con un promedio de 0.70653‰ (n=29), las razones para invierno y verano corresponden en promedio a 0.70635 (n=6) y 0.70687 (n=5) ‰ respectivamente (Figura 3.9). El Colorado presenta el valor más radiogénico con un promedio de 0.70662‰ (n=4), y al contrario las Melosas tiene una media de 0.70622 (n=4), siendo el valor $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ más bajo en comparación al resto de los ríos. La razón menos radiogénica se midió en septiembre en las Melosas (0.70589‰) y la más radiogénica se registró en el Plomo en el mes de enero (0.70732‰).

Para el sector del río Mapocho las razones isotópicas de Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) fluctúan entre 0.70371 y 0.70417 ‰, con una media de 0.70397‰ (n=16), siendo el valor promedio de la razón para invierno de 0.70396 (n=2) y para verano de 0.70404‰ (n=3) (Figura 3.9). Las Vertientes poseen la menor razón isotópica promedio con una cifra de 0.70374‰ (n=2). El punto MPC1 en tanto posee la mayor razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ media de 0.70410‰ (n=5). El máximo registrado ocurrió en diciembre en MPC1 (0.70417‰), mientras que la mínima $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ se obtuvo en las Vertientes para el mes de septiembre (0.70371‰).

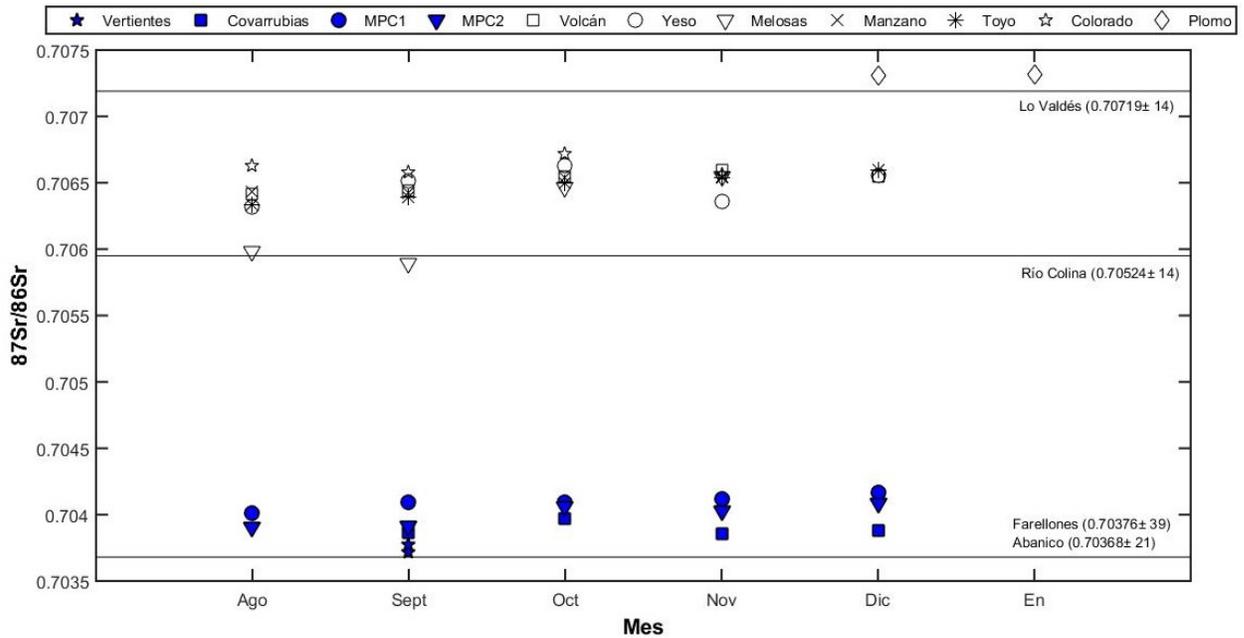


Figura 3.9: Variabilidad temporal para las razones isotópicas de Sr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en el sector del Cajón del Maipo y río Mapocho. Las líneas horizontales representadas corresponden a las razones aproximadas para las formaciones Lo Valdés, Río Colina, Abanico y Farellones. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1: Tabla resumen con los valores de los parámetros fisicoquímicos para los sectores del Maipo y Mapocho. Se presentan los promedios, el número de muestras (n) y la desviación estándar (σ).

	Maipo			Mapocho		
	Promedio	n	σ	Promedio	n	σ
pH	7.60	15	0.61	8.02	11	0.89
T [°C]	10.83	15	3.54	12.87	11	5.03
SPC [uS/cm]	1358.40	15	345.73	213.59	11	87.39
C [uS/cm]	1003.20	15	248.74	163.35	11	66.91
TDS [mg/l]	900.93	15	221.71	138.69	11	56.66
ORP [mV]	188.28	11	121.54	238.02	10	107.97
Caudal (m3/s)	52.90	5	19.89	0.89	17	0.72

Tabla 3.2: Tabla resumen con las concentraciones de los elementos mayores, trazas, razones isotópicas de Sr y razones Ge/Si para los sectores del Maipo y Mapocho. Se presentan los promedios, el número de muestras (n) y la desviación estándar (σ).

	Maipo			Mapocho		
	Promedio	n	σ	Promedio	n	σ
Ca (mg/L)	159.96	35	36.40	26.42	19	12.81
Mg (mg/L)	17.69	35	5.86	3.18	19	2.11
Na (mg/L)	98.41	35	69.81	11.80	19	8.73
HCO₃ (mg/L)	113.56	35	30.22	56.79	19	30.72
SO₄ (mg/L)	357.17	35	109.80	68.65	19	63.40
Si (mg/L)	5.17	23	1.62	5.87	12	1.65
Ge (pmol/L)	643.10	23	489.03	140.87	12	124.93
Sr (mg/L)	1.49	28	0.37	0.09	16	0.07
⁸⁷Sr/⁸⁶Sr	0.70653	29	0.00	0.70397	16	0.00
Ge/Si (umol/mol)	3.73	23	2.95	0.62	12	0.34

Capítulo 4

Discusiones

4.1. Variabilidad espacial y temporal de las concentraciones de elementos mayores

A modo general, es notoria la diferencia de las concentraciones de elementos mayores entre el sector del Cajón del Maipo y el sector del Mapocho. Esta diferencia es de uno a dos órdenes de magnitud, siendo mayores las concentraciones medidas en el Maipo. Esto aplica para todos los elementos mayores, con excepción del Si, el cual presenta concentraciones mayores en el Mapocho. Es posible sugerir que la existencia de distintos tipos de litologías en ambos sectores es el factor controla la diferencia en las concentraciones de elementos mayores en cada zona. La diferencia más importante corresponde a la presencia de secuencias carbonáticas y evaporíticas en el Maipo, las cuales están ausentes en la subcuenca del Mapocho. La diferencia en la tasa de disolución rocas ígneas versus rocas carbonáticas es de hasta 5 órdenes de magnitud. Por ejemplo, las tasas de disolución para las plagioclasas varía entre 4×10^{-17} a 1.5×10^{-12} (mol/m²/s), mientras que para los carbonatos se sugieren valores entre 5.2×10^{-7} a 10×10^{-6} (mol/m²/s) (Levenson et al., 2015; A. F. White & Buss, 2013). Por lo tanto, la diferencia en la tasa de disolución de las distintas litologías permite explicar las variaciones entre las concentraciones de Ca, Mg, HCO₃, Si y Sr entre ambos sectores. Es posible explicar de la misma manera la diferencia en las concentraciones de sulfato. Pues en el sector del Maipo se encuentran secuencias evaporíticas ricas en yeso (CaSO₄), el cual posee una tasa de disolución del orden de 10^{-4} (mol/m²/s) (Jeschke et al., 2001). Meybeck (2003) señala que la presencia de minerales altamente reactivos como las evaporitas o los carbonatos pueden determinar la química del agua, lo que sería consistente con lo anterior. Destacar que del total del área de la cuenca del Río Maipo (15.304 km²), las rocas evaporíticas o carbonáticas solo ocupan un total aproximado de 507 km², es decir tan solo un 3.38% del área de la cuenca. Los altos valores de Na en el Maipo no pueden ser explicados a partir por la disolución de las secuencias evaporíticas, pues no se han reportado secuencias ricas en halita. En cambio, hay que recordar que en el sector del Maipo también se encuentran litologías que no son necesariamente carbonáticas, si no que incluso existe la presencia de algunos niveles volcánicos, las cuales podrían ser la fuente de Na en las plagioclasas. El hecho de que las concentraciones de Si no posean grandes diferencias entre cada subcuenca sugiere que las rocas silicatadas también están siendo meteorizadas en el Maipo, aportando sílice a la carga de solutos en cada río o arroyo. Sin embargo, la predominancia de rocas silíceas en la subcuenca del Mapocho, permite explicar las mayores concentraciones de Si.

Para determinar, al menos de manera cualitativa, la proveniencia de los distintos elementos que componen la química de las aguas se realizan los diagramas de mezcla (Figura 4.1) propuestos por

Gaillardet et al. (1999). Estos consisten graficar las razones elementales normalizadas al Na (Ca/Na, Mg/Na, HCO₃/Na), las cuales se caracterizan por ser un parámetro intensivo, para determinar la contribución de las distintas fuentes litológicas. En este caso las rocas son agrupadas como carbonatos, silicatos y evaporitas. En la Figura 4.1 se puede observar que en el Cajón del Maipo las fuentes representan una mezcla de todo el rango composicional incluyendo rocas silicatadas, evaporíticas y carbonatadas. En el sector del Mapocho los ríos no caen dentro del campo definido para los silicatos según Gaillardet et al. (1999), en particular las razones Ca/Na difieren con las muestras de esta investigación. En dicho estudio también se menciona que las rocas silicatadas pueden poseer razones Ca/Na mayores debido a tres razones: Debido a que las rocas en cuestión poseen razones Ca/Na mayores al del promedio de la corteza (0.6); la presencia de silicatos ricos en Ca que son preferencialmente disueltos (e.g. anortita versus albita); la presencia de calcita diseminada. A partir de la recopilación de González (2022) y sus referencias asociadas, se calcularon las razones Ca/Na para las rocas volcánicas miocenas (formaciones Abanico-Farellones) y las rocas intrusivas del cuaternario, obteniendo razones Ca/Na de 3.2 y 3.3, respectivamente. Dichos valores son ampliamente superiores al promedio de la corteza presentado por Gaillardet et al. (1999). Por lo tanto, se puede proponer que la razón Ca/Na \approx 3 en el sector del Mapocho (Ver figura 4.1). De esta forma, el diagrama de mezcla efectivamente representaría que la fuente de los solutos en el Mapocho corresponde exclusivamente a rocas silicatadas. En la figura 4.2 se observa la relación entre las razones elementales normalizadas del Na de Sr y Ca. Se observa una correlación positiva entre ambas razones, debido al similar comportamiento geoquímico del Ca y Sr. Gaillardet et al. (1999) indican que esta correlación sustenta el argumento de que existen procesos de mezcla entre la meteorización de rocas carbonáticas (altas razones Ca/Na y Sr/Na) y la meteorización de rocas silicatadas o evaporíticas (bajas razones Ca/Na y Sr/Na). Esto refuerza la idea de que en el Maipo existe una mezcla entre rocas evaporíticas, silíceas y carbonáticas, mientras que en el Mapocho, la fuente de solutos corresponde solamente a rocas silíceas.

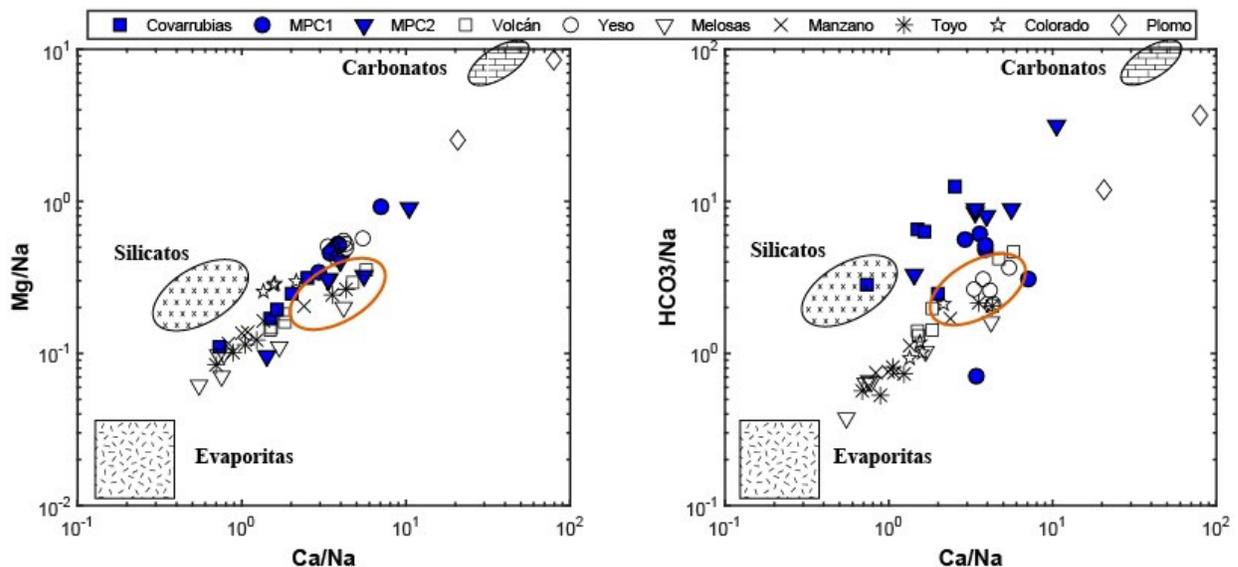


Figura 4.1: Diagramas de mezcla utilizando razones elementales normalizadas al Na. Los campos definidos para rocas evaporíticas, silicatadas y carbonáticas son los propuestos por Gaillardet et al., 1999. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2. La elipse roja corresponde al extremo composicional asociado a las rocas miocenas de Abanico y Farellones

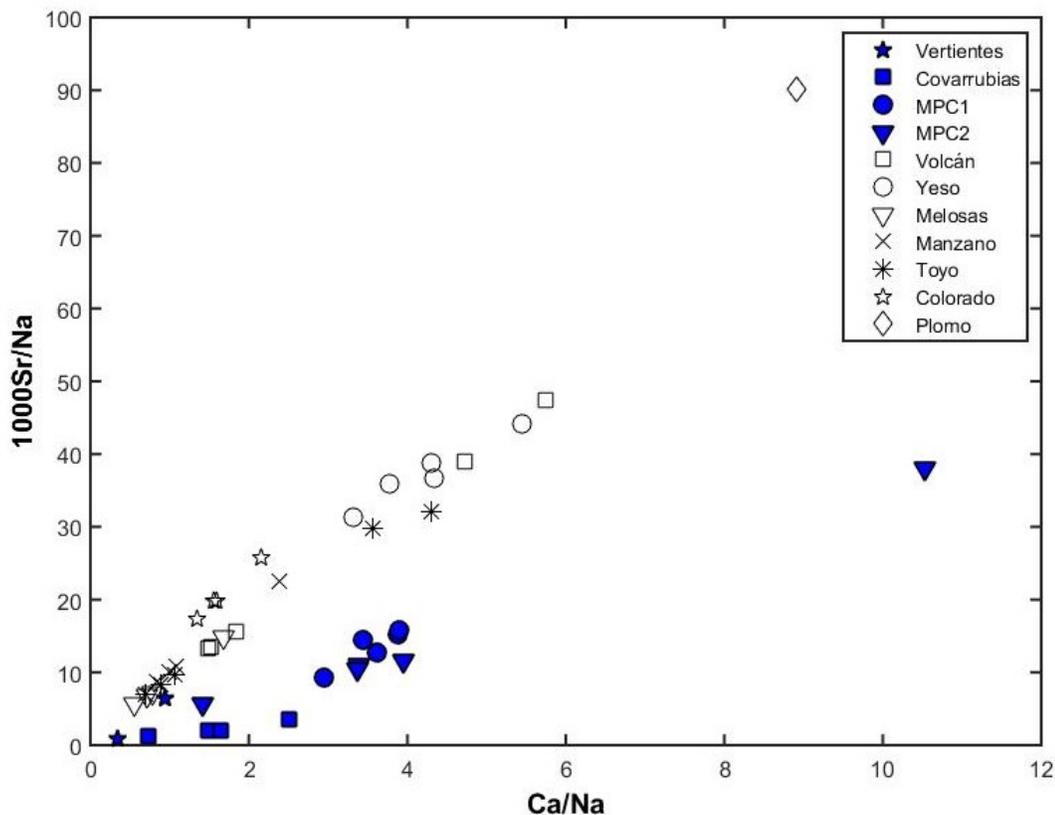


Figura 4.2: Diagrama de correlación entre el Sr y el Ca propuesto por Gaillardet (1999), en donde las rocas carbonáticas se ubican en la esquina superior derecha con altas razones Ca/Na y Sr/Na en comparación a las rocas evaporíticas y silicatadas, quienes se ubican en la esquina inferior izquierda con bajas razones Ca/Na y Sr/Na. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.

Es importante considerar que existen fuentes adicionales de solutos que no pueden ser cuantificadas o detectadas con la información disponible. Meybeck (2003) indica que la fuente de algunos elementos puede estar fuertemente influenciada por la presencia de pirita, debido a su oxidación y subsecuente formación de ácido sulfúrico; o por fuentes hidrotermales que descargan sus solutos a ríos y arroyos de manera directa o subterránea. En la carta geológica de Santiago se ha documentado la presencia de yacimientos de tipo pórfido de Cu y epitermales de Au ubicados en la franja metalífera del Neógeno, en los distritos mineros Andina-Disputada y El Volcán. La mineralización de mena en este tipo de depósitos consiste principalmente en sulfuros, entre ellos la pirita, calcopirita y bornita. La oxidación de estos sulfuros genera drenaje ácido que disuelve las rocas, en particular carbonatos, y liberar cationes como el Ca y Mg. Adicionalmente, las fuentes hidrotermales también podrían aportar solutos a ríos o arroyos. Evans et al (2004b) determinó que estas fuentes aportan el 25% de la alcalinidad observada en el río Nayarani durante el flujo base. La presencia de manifestaciones hidrotermales en el Cajón del Maipo ha sido bien documentada, y en total se han descrito 10 manifestaciones termales del tipo manantiales y piscinas burbujeantes, con temperaturas que van desde los 9.1 a 51.3 °C (Benavente et al., 2016). Entre estas se encuentran los Baños Morales, Las Termas del Plomo, Baños Colina en el sector del Cajón del Maipo. Estos mismos autores han planteado la pregunta sobre cuál es la contribución que poseen estas en la química del agua de los arroyos que descargan en el Maipo.

Respecto a la variabilidad temporal de las concentraciones de solutos, ambas cuencas deben tratarse de manera separada nuevamente. Para el sector del Cajón del Maipo solo se poseen datos de caudal para el punto del Manzano, aunque este debería ser representativo de un comportamiento general de esta subcuenca dado a que se ubica en el sector más bajo de esta. En la figura 4.3 se observan las relaciones de concentración-descarga para todos los elementos mayores. Al realizar una regresión lineal para cada uno de los elementos mayores se obtienen rectas con pendiente negativa. Esto significa que a mayor caudal las concentraciones de los elementos disminuyen, o bien siguen un patrón de dilución simple (Godsey et al., 2009, 2019). En base a lo anterior, y teniendo en cuenta el régimen hídrico del sector, las mayores concentraciones se deberían alcanzar entre los meses de menor caudal, agosto en este caso, y las menores en los meses de mayor caudal asociado al período de deshielo en noviembre y diciembre. En el caso del sector del Mapocho ocurren situaciones diferentes. Para el caso del Ca, Mg y Na (figura 4.4) se observan pendientes negativas, lo cual indica un patrón de dilución simple para todos los casos. A pesar de lo anterior, y teniendo en cuenta los datos de caudal de los ríos del sector del Mapocho (figura 1.3), las mayores concentraciones para los puntos MPC1 y MPC2 estarían relacionadas con el período de menor caudal (agosto) y las menores asociadas al deshielo y mayor caudal observado en noviembre-diciembre. Los cationes mayores en el sector del Covarrubias mantiene el patrón de dilución (Figura 4.4), sin embargo, las menores concentraciones se deberían alcanzar en septiembre y las mayores en diciembre-enero, puesto que la subcuenca que drena este río sigue un régimen pluvial de descarga. De esta manera, los mayores caudales se observan entre agosto y septiembre, mientras que en el verano los aportes son netamente de flujo de base. Para el caso del SO_4 en el MPC1 existe una pendiente positiva de la recta, lo cual dice que a mayor caudal existen mayores concentraciones lo que sugiere una activación de otras fuentes de solutos (Godsey et al., 2019). Mientras que en MPC2 se observa un patrón de dilución simple. Para el Covarrubias se tiene una pendiente positiva de la recta, pero su coeficiente de determinación R^2 es muy bajo. Para el HCO_3 se tiene que tanto el MPC1 como el MPC2 presentan patrones de dilución simple, mientras que el Covarrubias presenta una pendiente positiva, pero nuevamente se observa una alta dispersión en los datos (Figura 4.4).

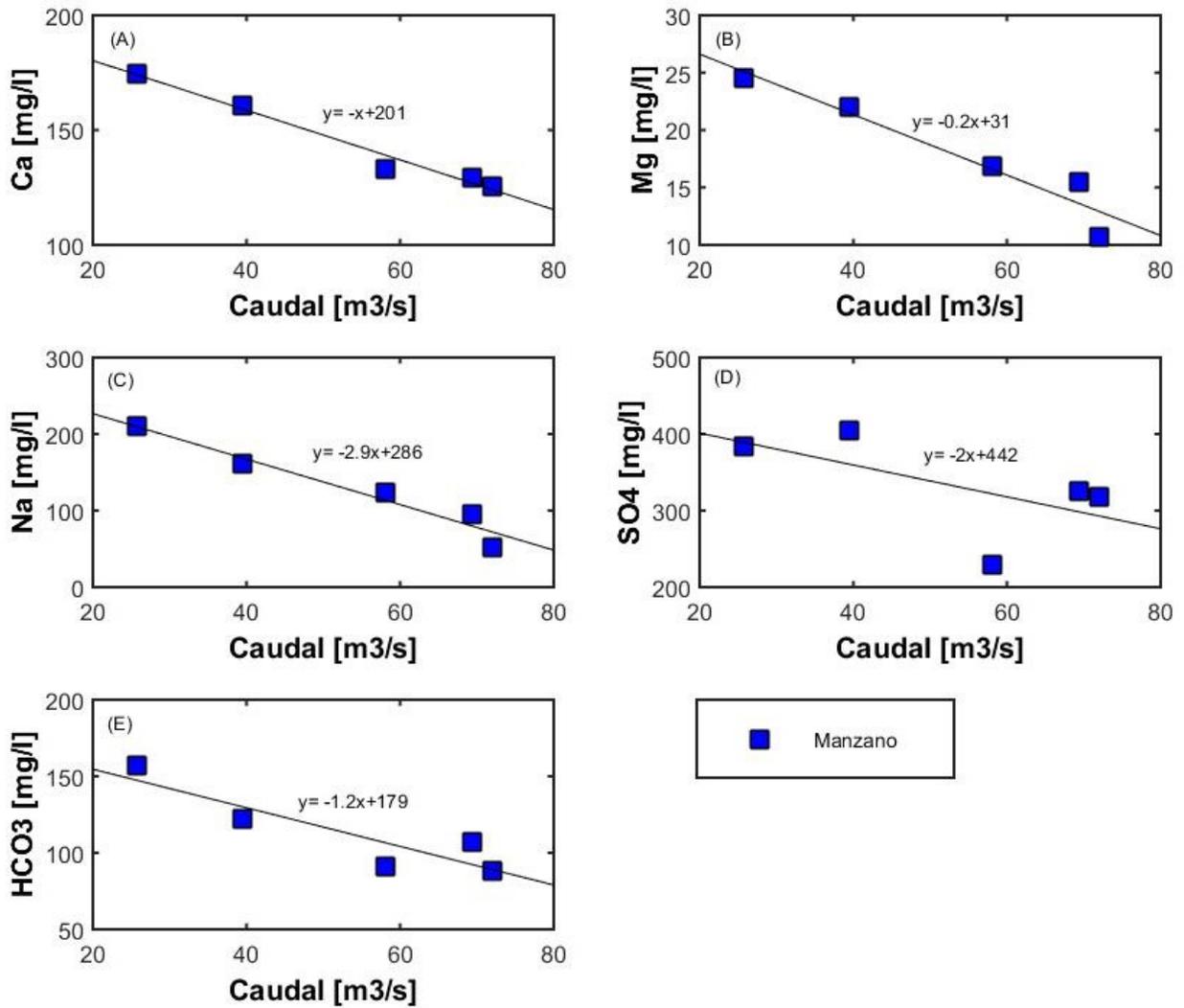


Figura 4.3: Relaciones de concentración de los elementos mayores versus descarga para el punto el Manzano, Rio Maipo. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.

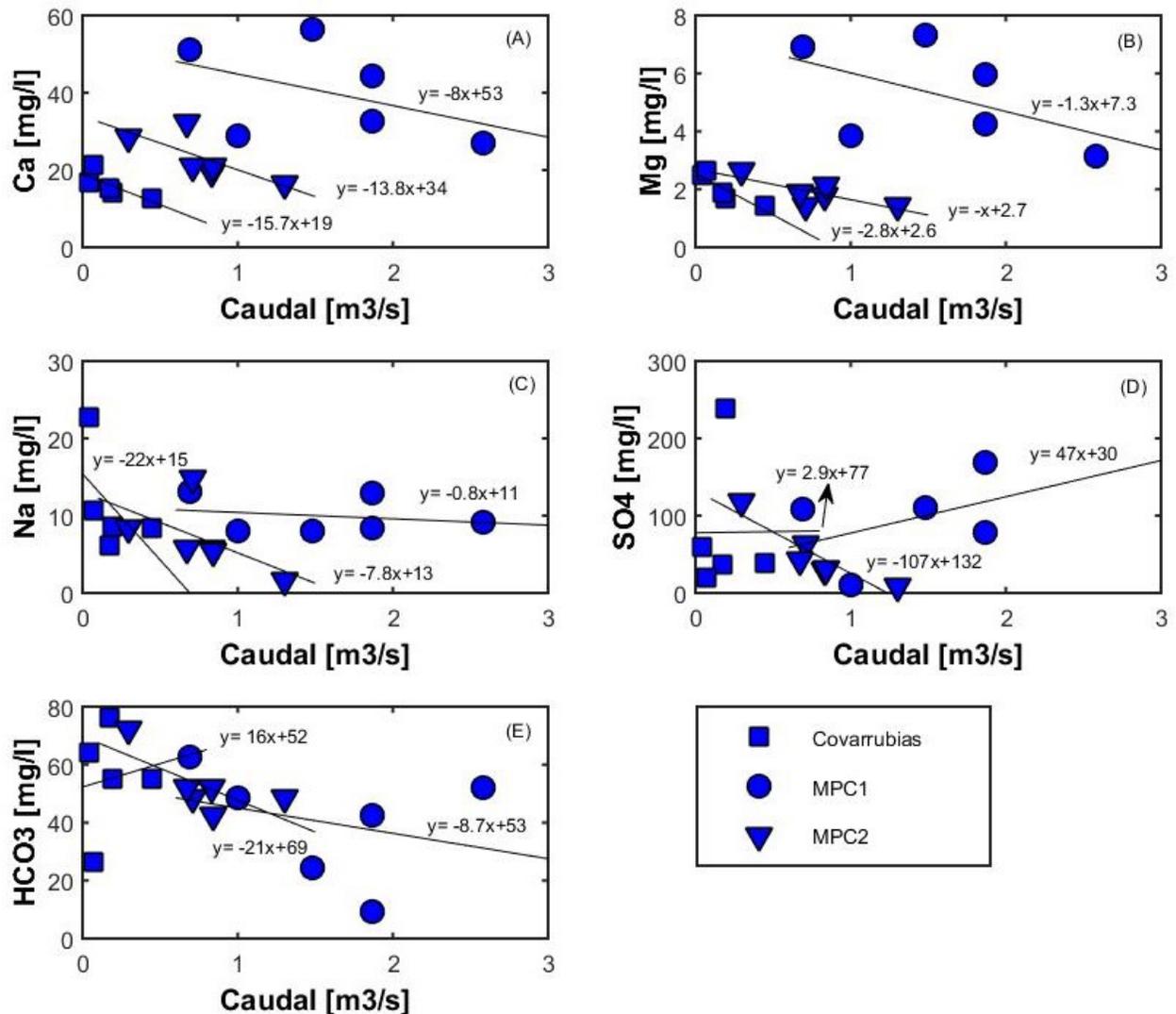


Figura 4.4: Relaciones de concentración de los elementos mayores versus descarga para los puntos del sector del Mapocho. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.

4.2. Variabilidad espacial y temporal de las razones Ge/Si

Existen diferencias en los valores de las razones Ge/Si para ambas zonas de estudio (Figura 4.5). Se tiene que para el sector del Mapocho todas las razones Ge/Si son menores o igual a 0.70 ($\mu\text{mol/mol}$) en los distintos arroyos. Este valor es menor al valor de las rocas ígneas de los Andes de $2.26 \mu\text{mol/mol}$ (Baronas et al., 2018). En el Cajón del Maipo existe una mayor variabilidad espacial de las razones Ge/Si. Los ríos Volcán, Yeso y el Colorado se pueden agrupar en base a que sus razones menores a las rocas ígneas de los Andes ($2.26 \mu\text{mol/mol}$), e incluso menores que para rocas sedimentarias (e.g. lutitas) donde se han reportado razones de $2.8 \mu\text{mol/mol}$ (Baronas et al., 2018). El último grupo corresponde a las Melosas, Manzano y Toyo, donde las cifras oscilan entre 3.37 a $11.73 \mu\text{mol/mol}$, superando los valores asociados a las rocas mencionadas previamente. A modo general se podrían agrupar los datos en dos grupos: (1) MPC1, MPC2, Covarrubias, Volcán, Yeso y Colorado ($\text{Ge/Si} < 2 \mu\text{mol/mol}$) y (2) Melosas, Manzano y Toyo ($2 < \text{Ge/Si} < 12 \mu\text{mol/mol}$).

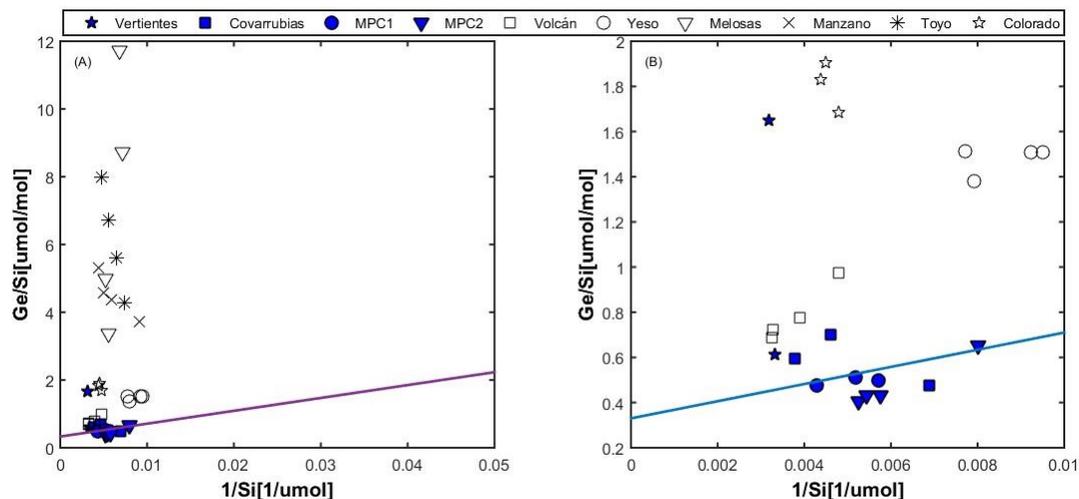


Figura 4.5: Razones Ge/Si v/s $1/Si$ para los ríos del Maipo y Mapocho. En A) se observan todos los ríos, mientras que en B) se consideran aquellos con una razón Ge/Si menor a $2 \mu\text{mol/mol}$. La recta representada corresponde a la realizada por Froelich et al (1992) a partir de las concentraciones de Ge y Si para los ríos no contaminados de diversas partes del mundo. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.

A pesar de que las razones Ge/Si varían entre los distintos tipos de silicatos primarios (Bernstein, 1985), y por lo tanto, es esperable que parte de esta variabilidad se refleje durante la disolución o meteorización congruente de las rocas, la variación de las razones Ge/Si entre la fase fluida y los minerales secundarios como las arcillas es producto de la partición preferencial del Ge por sobre el Si (Kurtz et al., 2002). En el caso de que la meteorización de los silicatos primarios sea congruente, es decir, no se forman (o se disuelven también) arcilla secundarias, no debiera observarse partición para Ge/Si entre la fase sólida y la fluida (Kurtz et al., 2002). En base a lo anterior, y considerando los valores de las rocas reportados por Baronas (2018), se puede afirmar que todos los ríos del grupo (1) están drenando subcuencas en donde dominan los procesos de meteorización incongruente, donde el Ge se fracciona en las arcillas producidas a partir de la meteorización de las rocas silicatadas, dejando entonces razones Ge/Si menores a las de las rocas en la fase fluida (Kurtz, 2000; Kurtz et al., 2002; Lugolobi et al., 2010; Murnane & Stallard, 1990).

A diferencia de los ríos que presentan razones de Ge/Si menores $2 \mu\text{mol/mol}$, las elevadas razones Ge/Si en las Melosas, Manzano y Toyo no pueden ser explicadas solo como producto de la meteorización de rocas silicatadas (considerando la razón Ge/Si de las rocas silicatadas de los Andes, $2.26 \mu\text{mol/mol}$). A pesar de que existen rocas de composición máfica con altas razones Ge/Si como lo puede ser la diorita con una razón de $9.29 \mu\text{mol/mol}$ (He et al., 2019), no se tiene el conocimiento de afloramientos importantes de dicha litología en la zona de estudio. Los minerales sulfurados como la esfalerita, calcopirita y pirita, se encuentran enriquecidos en Ge (e.g. Bernstein, 1985; Höll et al., 2007) y podrían ser una fuente adicional de Ge. En la cuenca del Maipo se encuentran depósitos de tipo pórfidos de Cu (e.g. Los Bronces, El Teniente) y epitermales (e.g. Santa Rita, Famatina Baja), cuya mineralización consiste en sulfuros como la calcopirita, pirita, molibdenita para los tipo pórfidos y esfalerita, enargita, bornita para el caso de los epitermales (Thiele & Cubillos, 1980). Por lo tanto, es posible que su oxidación esté asociada con una mayor concentración de Ge. También los ríos del sector del Cajón del Maipo posean influencia de manifestaciones hidrotermales que ocurren en la superficie y la subsuperficie. En diversos estudios se han documen-

tado razones de Ge/Si que pueden llegar a ser muy superiores a las de las rocas de la corteza, las cuales reflejan el aporte de solutos producto de la descarga desde sistemas geotermales (Evans et al., 2004; Evans & Derry, 2002; Han et al., 2015). Dicha podría encontrarse aguas arriba del punto ubicado en el sector de las Melosas, ya que sería este río donde se observaron las mayores razones de Ge/Si, y que tributa a los sectores del Manzano y Toyo. En particular, Benavente et al., (2016) reporta una fuente hidrotermal ubicada río arriba en las Melosas llamada Puente de Tierra 1, la cual podría ser efectivamente la fuente de Ge. En caso de que la oxidación de sulfuros corresponda al mayor aporte de Ge se esperaría ver alguna correlación entre el Ge o la razón Ge/Si con el SO_4 . En la figura 4.6 se observan la razón Ge/Si y el Ge en comparación al SO_4 , donde para los ríos en cuestión (Figura 4.6B y D) pero no es posible establecer un patrón evidente. En las Melosas pareciera ser que existe una relación directamente proporcional entre la razón Ge/Si y el Ge con el SO_4 . Debido a que durante este estudio no se investigaron las fuentes termales documentadas por Benavente et al. (2015) no es posible distinguir el origen de las altas concentraciones de Ge y razones Ge/Si en el sector del Maipo.

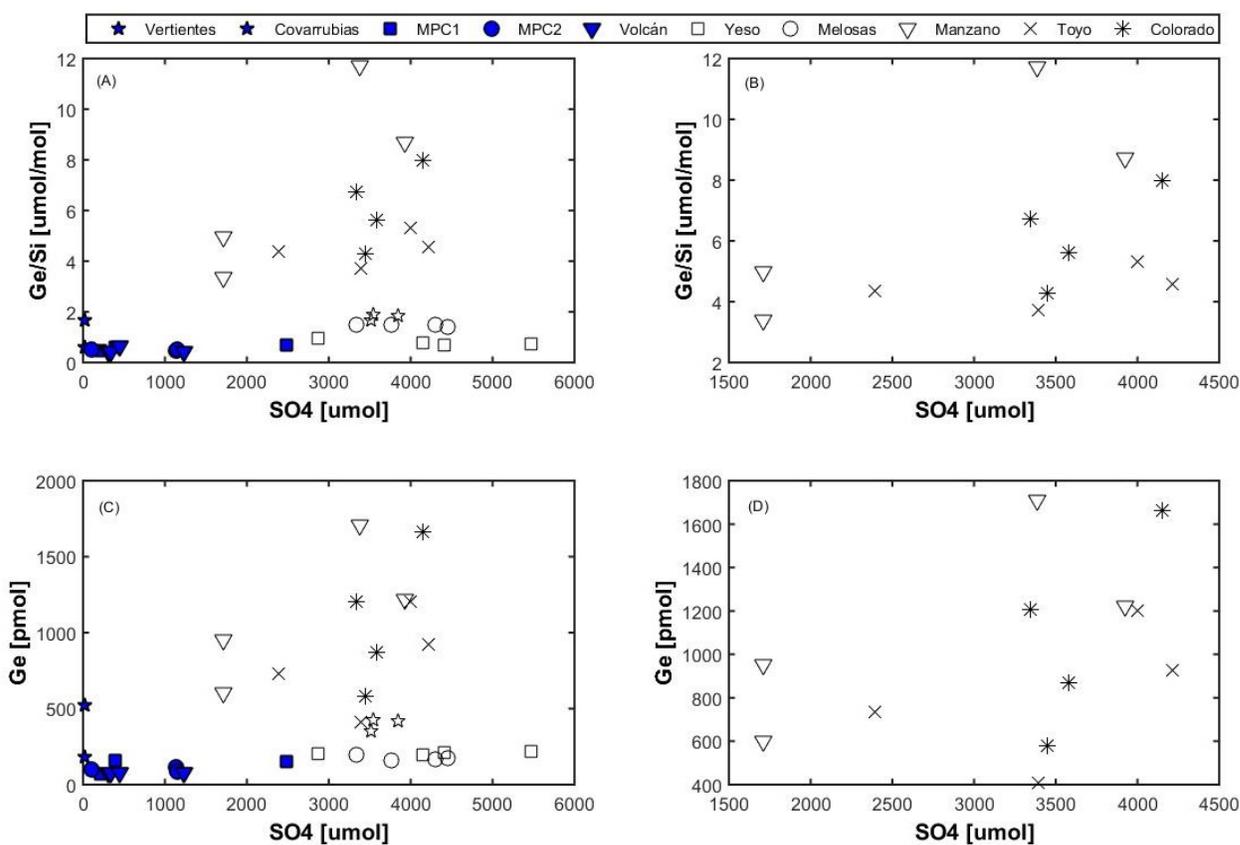


Figura 4.6: Relación entre el Ge y Ge/Si en función del SO_4 para los ríos de ambas subcuencas. En B) y D) se observa lo mismo que en A) y C), respectivamente, pero para aquellos ríos con una razón Ge/Si mayor a 2. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.

En cuanto a la variabilidad temporal, para los ríos del grupo (1) se observan comportamientos estables para la gran mayoría de los casos en base a la figura 3.8. Si bien no se posee información del caudal en los ríos del sector del Maipo, en base al régimen hidrológico y el comportamiento observado en la figura 3.8, debería esperarse un comportamiento de dilución simple. En el caso de los ríos del grupo (2), solo se poseen los datos para el Manzano de la figura 4.7, donde se observa

la relación concentración-descarga para el Ge, Si y Ge/Si. En todos los casos existen pendientes negativas indicando dilución para Ge y Si. También, las razones Ge/Si disminuyen al aumento de caudal, gobernadas por la fuerte dilución del Ge (Figura 3.8. Para el sector del Mapocho existen diferentes comportamientos, incluyendo dilución y también aumento de la concentración correlacionada con el aumento de caudal (figura 4.8). Para el Covarrubias en todos los casos la pendiente es positiva, lo que indica que cuando existe un aumento de caudal se están activando nuevas fuentes que aportan Si y Ge. La alta pendiente para el Ge en el Covarrubias explica el aumento de las razones Ge/Si (Godsey et al., 2019). Kurtz et al., (2011) observaron que en eventos de tormenta (i.e. aumento de caudal) el agua interactúa con el agua de poro en los suelos, liberando Ge y Si retenido en la superficie de los minerales del suelo, o por la disolución de arcillas como la caolinita. En el caso del punto MPC1 tanto el Ge y el Si presentan un comportamiento de dilución simple, pero la razón Ge/Si aumenta levemente con el caudal debido que Ge disminuye en menor medida que el Si. Para el caso del punto MPC2 el Ge se observa un comportamiento quimioestático para el Ge, mientras que el Si presenta una leve disminución en su concentración a medida que aumenta el caudal, resultando en que la razón Ge/Si aumente a medida que el caudal es mayor.

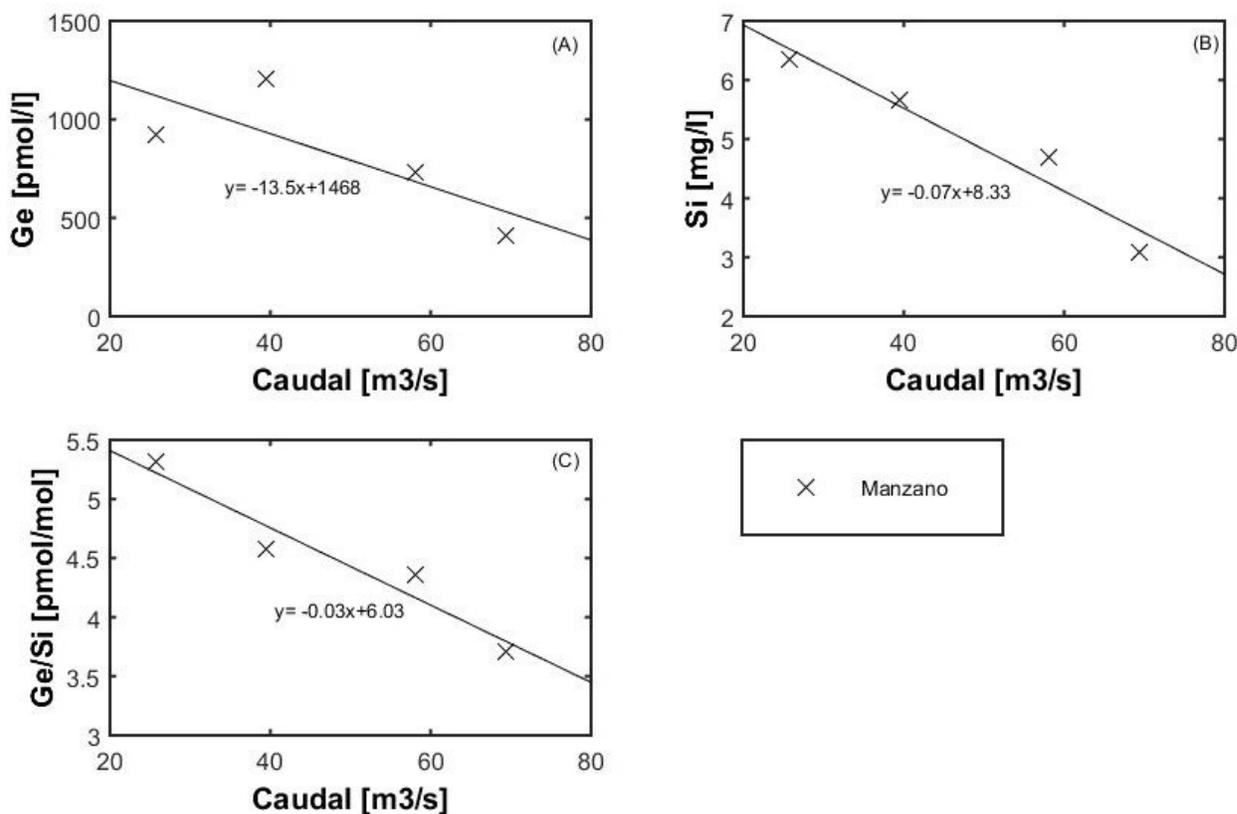


Figura 4.7: Relaciones de concentración del Ge, Si y Ge/Si versus descarga para el punto el Manzano, Río Maipo. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.

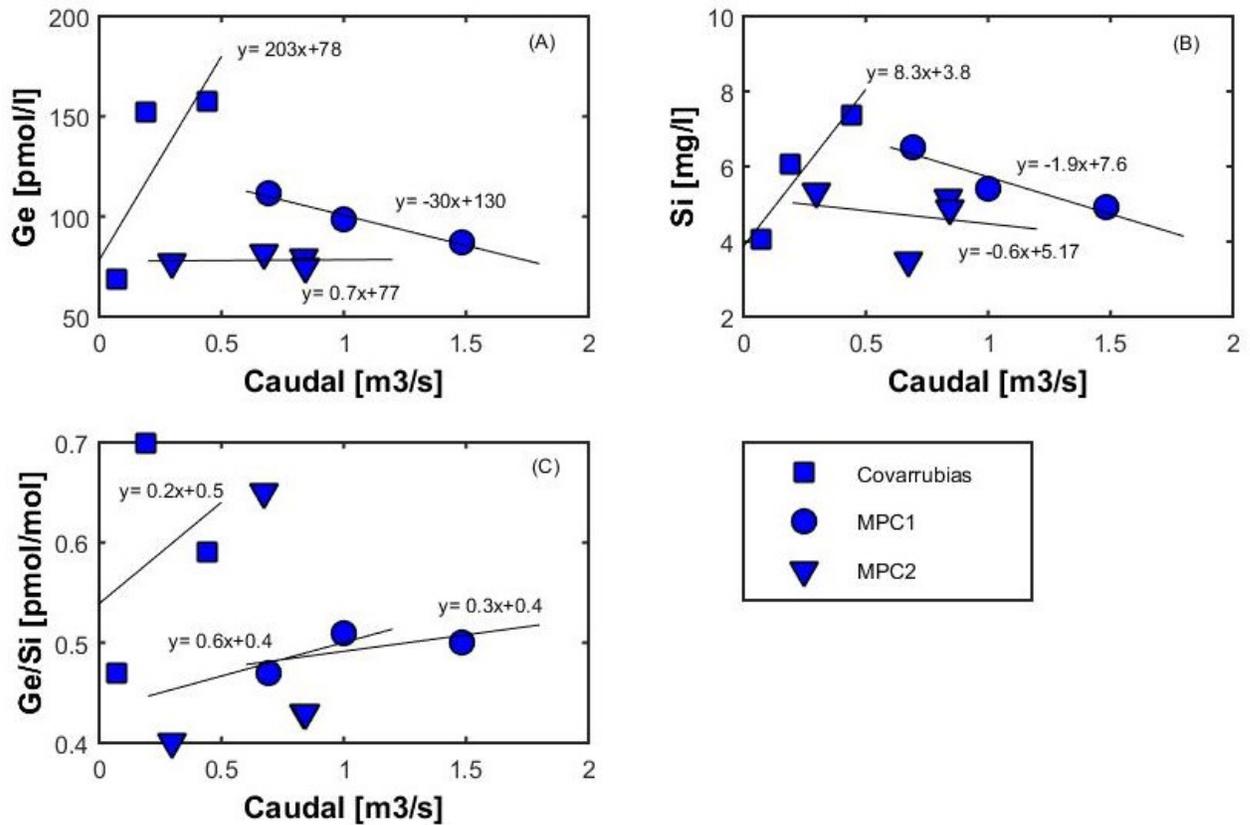


Figura 4.8: Relaciones de concentración del Ge, Si y Ge/Si versus descarga para el punto el sector del Mapocho. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.

4.3. Variabilidad espacial y temporal de las razones isotópicas de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

A partir de los resultados obtenidos se pueden observar distintos patrones de distribución espacial para las razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en las subcuencas del Mapocho y Maipo. En el caso de los ríos del Mapocho las razones varían entre 0.70371 a 0.70417 ‰, mientras que en la subcuenca del Maipo las razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oscilan entre los 0.70589 a 0.70732 ‰ (Figura 4.9). Esta diferencia esta relacionada directamente con las distintas litologías presentes en cada área. Para el sector del Mapocho, González (2022) reportó firmas isotópicas de Sr para las formaciones volcánicas miocenas Abanico, Farellones y rocas de intrusivas del Cuaternario correspondientes a 0.70368 ± 21 , $0.70376\text{‰} \pm 39$ y $0.70497\text{‰} \pm 93$, respectivamente. Dichos valores se reflejan en la composición isotópica de Sr en los ríos que drenan esas formaciones, y permiten establecer que constituyen las únicas fuentes de los solutos liberados por la meteorización y erosión. En cambio, el sector del Maipo se observan variaciones más significativas en las razones de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en las diferentes litologías. Las formaciones sedimentarias marinas del Jurásico Superior, como la formación Lo Valdés y Río Colina presentan valores de $0.70719\text{‰} \pm 14$ y 0.70595‰ respectivamente (González, 2022). Estos valores son más radiogénicos que aquellos existentes para as formaciones volcanosedimentarias , tanto del Jurásico (Río Damas $0.70524\text{‰} \pm 49$), del Cretácico (Colimapu $0.70384\text{‰} \pm 4$) y las formaciones miocenas y rocas del Cuaternario ($0.70497\text{‰} \pm 93$). Debido a que las razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en los ríos de la subcuenca del Maipo varían entre 0.70589 a 0.70732 ‰, es posible establecer que

existen procesos de mezcla entre las distintas fuentes de solutos, en lugar de que sólo un tipo de litología o formación sea la fuente exclusiva. Lo anterior es respaldado por las concentraciones de elementos mayores como Na, ya que estas formaciones marinas no son fuente de Na, a diferencias de las rocas silicatadas, que corresponden a las formaciones Colimapu, Río Damas, Abanico, Farello y rocas del Cuaternario. Los valores radiogénicos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las rocas carbonatadas pueden obscurecer las razones más primitivas observadas en las rocas silicatadas. Este efecto ha sido discutido anteriormente y se asocia a la diferencia entre las tasas de disolución entre ambas litologías, siendo mayor la de las carbonáticas y por ende la razón isotópica de Sr imperante en el agua va a corresponder al de estas rocas. El contenido de Sr en las aguas también puede sustentar esta idea, pues de la figura 4.9A se observa que las aguas del Maipo poseen altos valores de estroncio. Palmer & Edmond (1992) afirma que las rocas carbonatadas poseen altas concentraciones estroncio respecto a las rocas silicatadas, y bajo esa lógica en el Cajón del Maipo existe un efecto de obscurecimiento asociado a la presencia de rocas marinas del Jurásico Superior.

En cuanto a la variabilidad temporal de la composición isotópica de estroncio, no se observan grandes cambios ni para el sector del Cajón del Maipo o del Mapocho considerando el error asociado a la razón isotópica de cada formación, salvo para el sector de las Melosas donde a partir de octubre la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ se asemeja aún más a las formaciones marinas del Jurásico. Esto se observa en las figuras 4.10 y 4.11, donde se tienen que las pendientes de las rectas que se ajustan a los datos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ son prácticamente nulas. Esto implicaría que las fuentes de meteorización y erosión se mantienen estables a lo largo del período estudiado, y no existiría una influencia estacional relacionada, por ejemplo, a la activación de nuevas fuentes litológicas debido al derretimiento de nieves y glaciares en períodos cálidos.

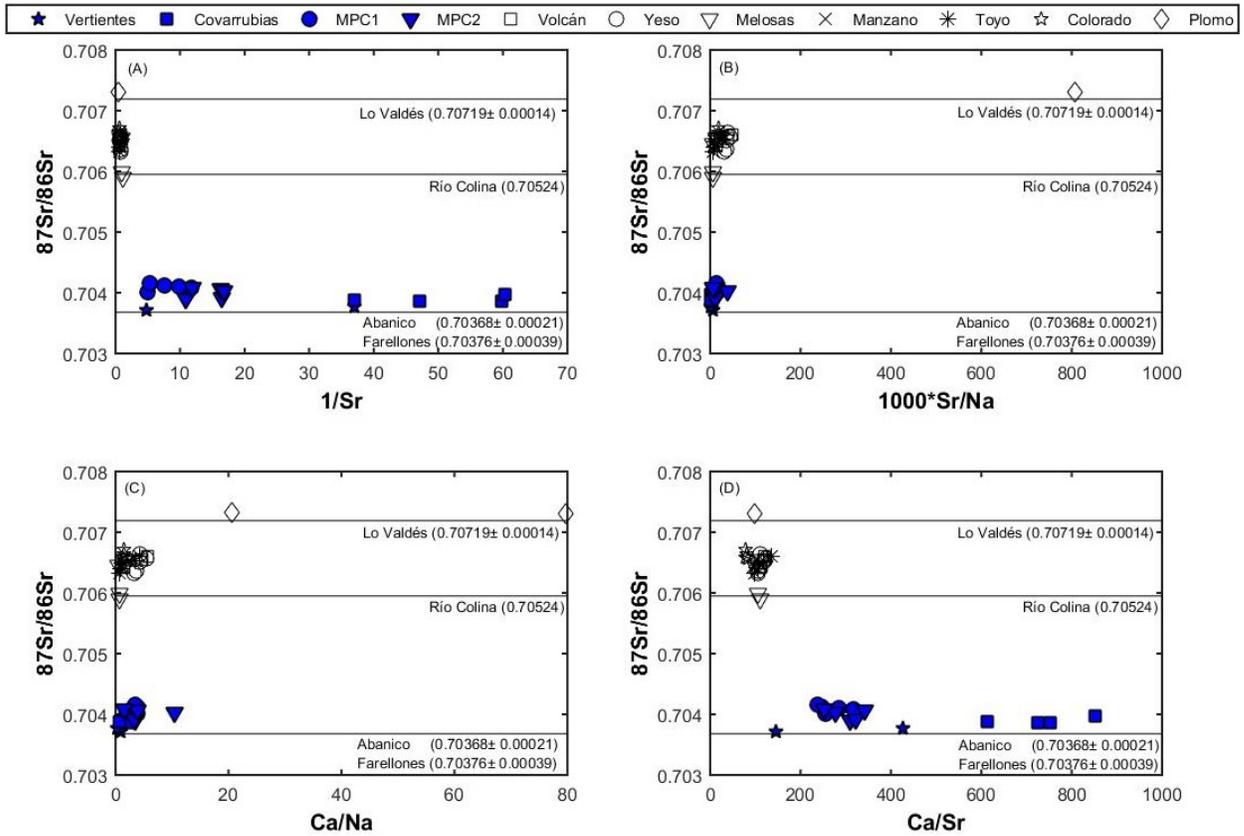


Figura 4.9: Razones isotópicas de estroncio en función de las razones $1/\text{Sr}$, Sr/Na , Ca/Na y Ca/Sr para los ríos de las subcuencas del Mapocho y del Maipo. Las líneas horizontales representadas corresponden a las razones aproximadas para las formaciones Lo Valdés, Río Colina, Abanico y Farellones. Los símbolos corresponden a los mencionados en las figuras 3.1 y 3.2.

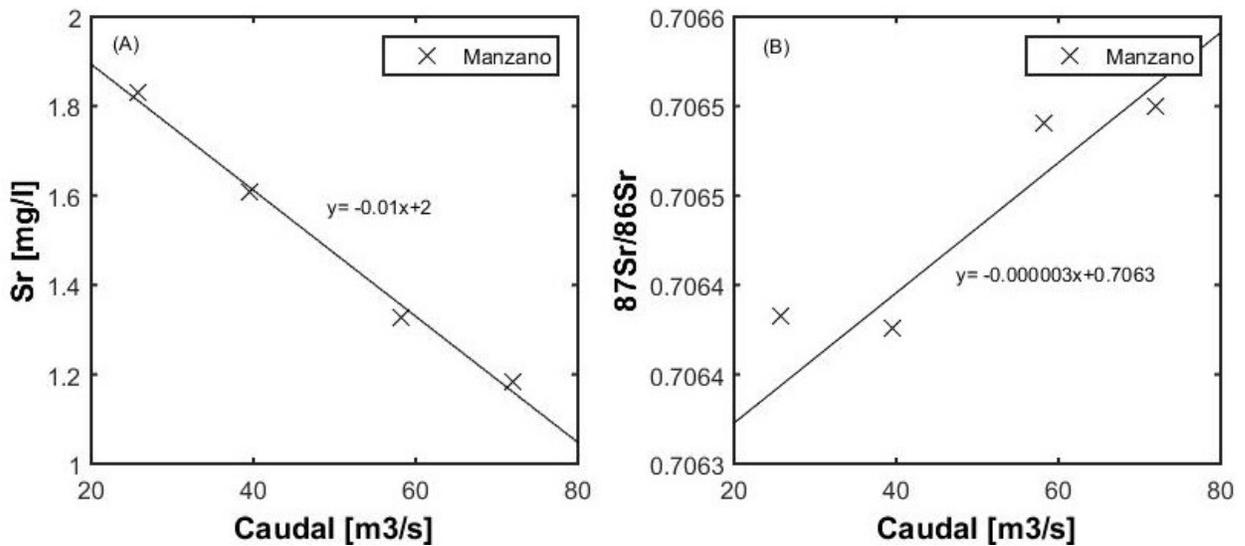


Figura 4.10: Relaciones de concentración del Sr y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus descarga para el punto el Manzano, Río Maipo. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.

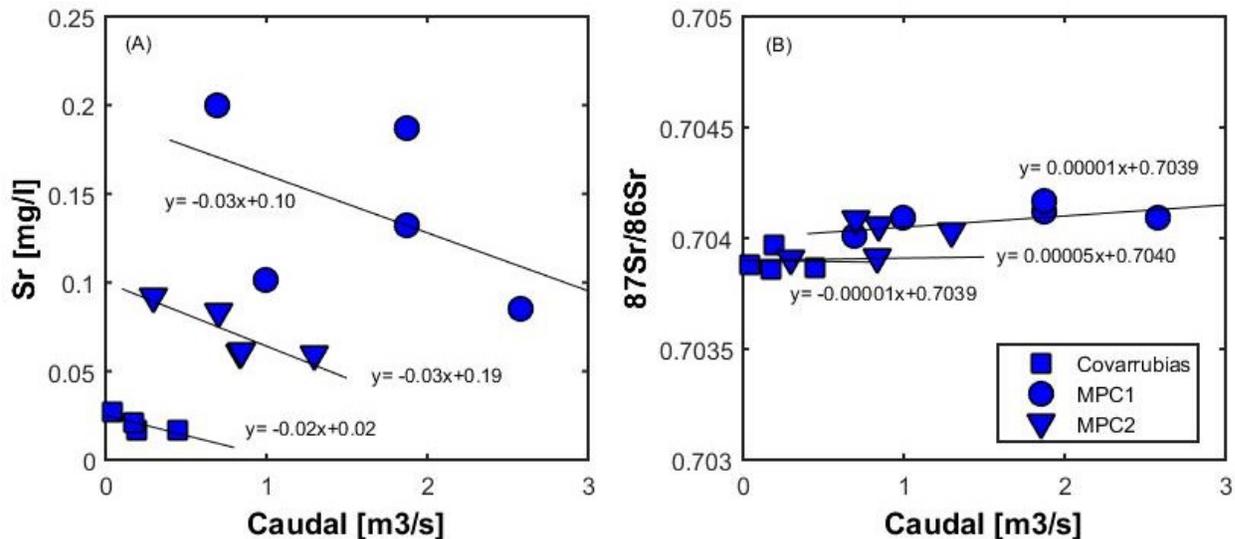


Figura 4.11: Relaciones de concentración del Sr y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus descarga para el sector del Mapocho. Están representadas las rectas que se ajustan a los datos y su respectiva ecuación.

4.4. Implicancias para la calidad del agua para su uso en la agricultura y consumo humano

La calidad del agua es vital cuando se trata del consumo humano, pues el agua está involucrada en una serie de procesos que ocurren dentro del cuerpo humano como lo es regular la temperatura, remover toxinas, ayudar a disolver nutrientes y vitaminas, entre otros (Montain et al., 1999; Jequier and Constant, 2010). Para la agricultura el panorama no es diferente, por ejemplo un agua que posea una salinidad elevada o que contenga iones tóxicos pueden afectar los cultivos y disminuir su producción (Ayers et al., 1985).

En Chile la calidad del agua para consumo humano y la agricultura están reguladas por los decretos NCH409/1 (INN,2005) y NCH1333 (INN,1987) (Ver tablas B.1 y B.2 en anexos), respectivamente. Estas establecen los aspectos físicos, químicos y biológicos para determinar la calidad del agua en cada caso. Para el agua potable, y en base a los elementos que se tienen (Ver tablas A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 y A.6 en anexos), la mayoría de los elementos estudiados presentan concentraciones por debajo de los límites establecidos por cada norma en los ríos de las subcuencas del Maipo y Mapocho. A pesar de esto, existen algunas excepciones en la concentración de Mn en MPC1 y de SO_4 en las Melosas y Yeso, además el pH durante algunos meses es mayor al rango establecido para distintos ríos. Para el caso de las aguas de riego el parámetro más crítico corresponde a la concentración de SO_4 , ya que en la mayoría de los ríos del sector del Maipo se presentan valores por sobre la concentración máxima establecida. Algunas problemas puntuales existen para algunos meses en el punto MPC1 para las concentraciones de Mn, Cu y Zn. En base a lo anterior, tanto para la agricultura como para el consumo humano el agua debe ser tratada para que pueda cumplir con la norma en MPC1 en Mapocho y en Las Melosas y Yeso. Cabe mencionar que no se detectaron fuentes antropogénicas en los solutos de los ríos estudiados, y que estos valores elevados corresponden fuentes naturales. El escenario de cambio climático actual ha afectado a la disponibilidad de precipitaciones y la cobertura de nieve, disminuyendo los caudales en el tiempo. Por lo tanto, este escenario junto con el patrón de dilución que domina las concentraciones de

solutos, se espera las concentraciones de los elementos mayores y traza aumenten al disminuir los caudales, y por ende podrían superar los límites establecidos por las normas de calidad de agua con mayor frecuencia. Esto plantea desafíos en términos de la disponibilidad de agua apta para su uso y los costos asociados para tratarla.

Capítulo 5

Conclusiones

En este estudio es posible determinar que la distribución no homogénea de las distintas litologías presentes en las subcuencas del río Maipo y río Mapocho determinan las diferencias geoquímicas que existen en los ríos de la zona. A partir de los elementos mayores y la composición isotópica de Sr se puede concluir que en el sector del Mapocho la fuente de solutos es la meteorización de rocas silicatadas de las formaciones Abanico, Farellones y rocas del Cuaternario. En cambio, en el Cajón del Maipo las fuentes de solutos corresponden a distintos tipos de litologías de carácter sedimentarias carbonatadas y evaporíticas, y rocas silicatadas. En particular, las rocas marinas del Jurásico estarían dominando la química del agua de este sector a pesar de ocupar tan solo el $\approx 3.38\%$ del área total de la cuenca.

Las razones Ge/Si establecen que existe una meteorización incongruente de las rocas silicatadas con formación de arcillas para todo el sector del Mapocho y los puntos Volcán, Yeso y Colorado para el sector del Maipo. Los puntos de las Melosas, Toyo y Manzano presentan algún tipo de fuente adicional de solutos correspondiente a oxidación de sulfuros o descarga de manantiales hidrotermales. Sin embargo, no es posible identificar el principal contribuyen con los antecedentes que se disponen. Desde esa perspectiva quedan desafíos pendientes para entender de dónde proviene esta fuente adicional de Ge, además de realizar un período de muestreo más extenso donde se incluyan los meses correspondientes al caudal base y la medición de razones Ge/Si en los manantiales hidrotermales que descargan a los ríos afectados.

En cuanto a la variabilidad temporal, para la mayoría de los elementos mayores existe un efecto de dilución que está relacionado con el régimen hídrico y los períodos de deshielo de los ríos investigados. Sin embargo, existen algunas excepciones donde existe la activación de nuevas fuentes de solutos como el Si, SO_4 y Ge, los cuales muestran patrones quimioestáticos o de aumento de concentración a medida que aumenta el caudal. Los isótopos de Sr demuestran que la fuente de los solutos como el Ca, Mg y Sr se mantienen estable a lo largo del período estudiado.

Bibliografía

- Aguirre, A. A., Derry, L. A., Mills, T. J., & Anderson, S. P. (2017). Colloidal transport in the Gordon Gulch catchment of the Boulder Creek CZO and its effect on C-Q relationships for silicon. *Water Resources Research*, 53(3), 2368–2383. <https://doi.org/10.1002/2016WR019730>
- Ameijeiras-Mariño, Y., Opfergelt, S., Derry, L. A., Robinet, J., Govers, G., Minella, J. P. G., & Delmelle, P. (2018). Ge/Si ratios point to increased contribution from deeper mineral weathering to streams after forest conversion to cropland. *Applied Geochemistry*, 96, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.06.002>
- Arnorsson, S. (1984). Germanium in Icelandic geothermal systems (Vol. 48).
- Ayala, Á., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., & Farinotti, D. (2020). Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin, in the semiarid Andes of central Chile. *Cryosphere*, 14(6), 2005–2027. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2005-2020>
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (Vol. 29, p. 174). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Banner, J. L. (2004). Radiogenic isotopes: Systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 65(3–4), 141–194. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00086-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00086-2)
- Baronas, J. J., Torres, M. A., West, A. J., Rouxel, O., Georg, B., Bouchez, J., Gaillardet, J., & Hammond, D. E. (2018). Ge and Si isotope signatures in rivers: A quantitative multi-proxy approach. *Earth and Planetary Science Letters*, 503, 194–215. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.09.022>
- Benavente, O., Tassi, F., Reich, M., Aguilera, F., Capecchiacci, F., Gutiérrez, F., Vaselli, O., & Rizzo, A. (2016). Chemical and isotopic features of cold and thermal fluids discharged in the Southern Volcanic Zone between 32.5°S and 36°S: Insights into the physical and chemical processes controlling fluid geochemistry in geothermal systems of Central Chile. *Chemical Geology*, 420, 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.11.010>
- Bernstein, L. R. (1985). *Germanium geochemistry and mineralogy* (Vol. 49).
- Capo, R. C., Stewart, B. W., Chadwick, O. A. (1998). Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. In *Geoderma* (Vol. 82).
- Chillrud, S. N., Pedrozo, F. L., Temporetti, P. F., Planas, H. F., Froelich, P. N., Roselli, L., Lyons, T., Scheiber, M., Rye, D., Mortlock, R., Clark, J., & Har, K. (1994). Chemical weathering of phosphate and germanium in glacial meltwater streams: Effects of subglacial pyrite oxidation. In *Limnol. Oceanogr* (Vol. 39, Issue 5).
- Correa-Burrows, J. P., Navarrete-Calvo, Á., Valenzuela-Díaz, M. J., Zapata-Aguiló, V. A., Montserrat, S., Navarro-Valdivia, L., McPhee, J., & Caraballo, M. A. (2021). The role of local geochemical

and mineralogical backgrounds as essential information to build efficient sediment quality guidelines at high-mountainous hydrothermally-altered basins (Mapocho basin, Chile). *Science of the Total Environment*, 785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147266>

Cotrim da Cunha, L., Buitenhuis, E. T., le Quéré, C., Giraud, X., Ludwig, W. (2007). Potential impact of changes in river nutrient supply on global ocean biogeochemistry. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(4). <https://doi.org/10.1029/2006GB002718>

Daniele, L., Cannatelli, C., Buscher, J. T., & Bonatici, G. (2019). Chemical composition of Chilean bottled waters: Anomalous values and possible effects on human health. *Science of the total environment*, 689, 526-533.

Depetris, P. J., Pasquini, A. I., & Lecomte, K. L. (2014). *Weathering and the Riverine Denudation of Continents*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7717-0>

DGA. (2017). DGA 2017.

Dirección general de aguas de diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad cuenca del Río Maipo. (2004).

Dickin, A. P. (2018). *Radiogenic isotope geology*. Cambridge university press.

Dosskey, M. G., Vidon, P., Gurwick, N. P., Allan, C. J., Duval, T. P., Lowrance, R. (2010). The role of riparian vegetation in protecting and improving chemical water quality in streams 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(2), 261-277.

Evans, M. J., Deny, L. A., & France-Lanord, C. (2004a). Geothermal fluxes of alkalinity in the Narayani river system of central Nepal. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(8). <https://doi.org/10.1029/2004GC000719>

Evans, M. J., Deny, L. A., & France-Lanord, C. (2004b). Geothermal fluxes of alkalinity in the Narayani river system of central Nepal. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(8). <https://doi.org/10.1029/2004GC000719>

Evans, M. J., & Derry, L. A. (2002). Quartz control of high germanium/silicon ratios in geothermal waters. In *Geology* (Issue 11).

Farías-Barahona, D., Ayala, Á., Bravo, C., Vivero, S., Seehaus, T., Vijay, S., Schaefer, M., Buglio, F., Casassa, G., & Braun, M. H. (2020). 60 years of glacier elevation and mass changes in the Maipo River Basin, central Andes of Chile. *Remote Sensing*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/rs12101658>

Fiege, K., Miller, C. A., Robinson, L. F., Figueroa, R., & Peucker-Ehrenbrink, B. (2009). Strontium isotopes in Chilean rivers: The flux of unradiogenic continental Sr to seawater. *Chemical Geology*, 268(3–4), 337–343. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.09.013>

Froelich, P. N., Blanc, V., Mortlock, R. A., Chillrud, S. N., Dunstan, W., & Udomkit, A. (1992). RIVER FLUXES OF DISSOLVED SILICA TO THE OCEAN WERE HIGHER DURING GLACIALS: Ge/Si IN DIATOMS, RIVERS, AND OCEANS. In *PALEOCEANOGRAPHY* (Vol. 7, Issue 6).

Gaillardet, J., Dupre, B., Louvat, P., & Allegre, C. J. (1999). Global silicate weathering and CO consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. In *Chemical Geology* (Vol. 159).

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>

- Gaspar, F., Opfergelt, S., Dessert, C., Robert, V., Ameijeiras-Mariño, Y., & Delmelle, P. (2021). Imprint of chemical weathering and hydrothermalism on the Ge/Si ratio and Si isotope composition of rivers in a volcanic tropical island, Basse-Terre, Guadeloupe (French West Indies). *Chemical Geology*, 577. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120283>
- Godsey, S. E., Hartmann, J., & Kirchner, J. W. (2019). Catchment chemostasis revisited: Water quality responds differently to variations in weather and climate. *Hydrological Processes*, 33(24), 3056–3069. <https://doi.org/10.1002/hyp.13554>
- Godsey, S. E., Kirchner, J. W., & Clow, D. W. (2009). Concentration-discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments. *Hydrological Processes*, 23(13), 1844–1864. <https://doi.org/10.1002/hyp.7315>
- González, J. (2022). Geoquímica y composición isotópica de estroncio de las formaciones sedimentarias mesozoicas de la cuenca del río Maipo.
- Han, Y., Huh, Y., & Derry, L. (2015). Ge/Si ratios indicating hydrothermal and sulfide weathering input to rivers of the Eastern Tibetan Plateau and Mt. Baekdu. *Chemical Geology*, 410, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.06.001>
- He, D., Lee, C. T. A., Yu, X., & Farner, M. (2019). Ge/Si Partitioning in Igneous Systems: Constraints From Laser Ablation ICP-MS Measurements on Natural Samples. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(10), 4472–4486. <https://doi.org/10.1029/2019GC008514>
- Hernández, A., Francois, J., Contreras, V., Saud, F., & Saavedra, F. (2021). Cambios en la cobertura de nieve y su relación con el caudal para la caracterización, monitoreo y gestión de las cuencas de montaña en los Andes extratropicales de Chile entre los 29° y 37°S utilizando teledetección.
- Höll, R., Kling, M., & Schroll, E. (2007). Metallogenesis of germanium-A review. In *Ore Geology Reviews* (Vol. 30, Issues 3–4, pp. 145–180). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.034>
- INN, 1987. NCH409/1: Norma Chilena de Calidad de Agua Potable. Instituto Nacional de Normalización
- INN, 2005. NCH409/1: Norma Chilena de Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Instituto Nacional de Normalización
- Jequier, E., Constant, F., 2010. Water as an essential nutrient: the physiological basis of hydration. *Eur. J. Clin. Nutr.* 64 (2), 115–123.
- Jeschke, A. A., Vosbeck, K., & Dreybrodt, W. (2001). PII S0016-7037(00)00510-X Surface controlled dissolution rates of gypsum in aqueous solutions exhibit nonlinear dissolution kinetics.
- Kump, L. R., Brantley, S. L., & Arthur, M. A. (2000). Chemical weathering, atmospheric CO₂, and climate. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28, 611–667. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.611>
- Kurtz, A. C., Derry, L. A., & Chadwick, O. A. (2002). Germanium-silicon fractionation in the weathering environment.
- Kurtz, A. C., Lugolobi, F., & Salvucci, G. (2011). Germanium-silicon as a flow path tracer: Application to the Rio Icaos watershed. *Water Resources Research*, 47(6). <https://doi.org/10.1029/2010WR009853>
- Kurtz Andy. (2000). AndyKurtz-Germaniums silicon. Levenson, Y., Schiller, M., Kreisserman, Y., & Emmanuel, S. (2015). Calcite dissolution rates in texturally diverse calcareous rocks. *Geological Society Special Publication*, 406(1), 81–94. <https://doi.org/10.1144/SP406.14>

- Louvat, P., & Allegre, C. J. (1997). Present denudation rates on the island of Reunion determined by river geochemistry: Basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions. In *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Vol. 61, Issue 17).
- Lugolobi, F., Kurtz, A. C., & Derry, L. A. (2010). Germanium-silicon fractionation in a tropical, granitic weathering environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(4), 1294–1308. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.11.027>
- Mardones, V. (2019). Evolucion-tectonica-meso-cenozoica-de-la-cordillera-principal-de-.
- McArthur, J. M., Howarth, R. J., Shields, G. A., & Zhou, Y. (2020). Strontium Isotope Stratigraphy. In *Geologic Time Scale 2020* (pp. 211–238). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00007-3>
- Meek, K., Derry, L., Sparks, J., & Cathles, L. (2016). $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Ca/Sr, and Ge/Si ratios as tracers of solute sources and biogeochemical cycling at a temperate forested shale catchment, central Pennsylvania, USA. *Chemical Geology*, 445, 84–102. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.04.026>
- Meybeck, M. (1983). Atmospheric inputs and river transport of dissolved substances (Issue 141). 1AHS Publ.
- Meybeck, M. (2003). Global Occurrence of Major Elements in Rivers.
- Meza, F. J. (2005). Variability of reference evapotranspiration and water demands. Association to ENSO in the Maipo river basin, Chile. *Global and Planetary Change*, 47(2-4 SPEC. ISS.), 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.10.013>
- Millot, R., Gaillardet, J., Dupré, B., & Allégre, C. J. (2003). Northern latitude chemical weathering rates: Clues from the Mackenzie River Basin, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(7), 1305–1329. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01207-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01207-3)
- Montain, S.J., Latzka, W.A., Sawka, M.N., 1999. Fluid replacement recommendations for training in hot weather. *Mil. Med.* 64 (7), 502–508.
- Moquet, J. S., Crave, A., Viers, J., Seyler, P., Armijos, E., Bourrel, L., Chavarri, E., Lagane, C., Laraque, A., Casimiro, W. S. L., Pombosa, R., Noriega, L., Vera, A., & Guyot, J. L. (2011). Chemical weathering and atmospheric/soil CO₂ uptake in the Andean and Foreland Amazon basins. *Chemical Geology*, 287(1–2), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.01.005>
- Mortlock, R. A., & Froelich, P. N. (1987). Continental weathering of germanium: Ge/Si in the global river discharge.
- Mortlock, R., & Froelich, P. N. (1996). Determination of germanium by isotope dilution-hydride generation inductively coupled plasma mass spectrometry. In *Chimica Acta* (Vol. 332).
- Murnane, R., & Stallard, R. (1990). Ge y Si en rios de la cuenca Orinoco.
- Negrel, P., Allegre, C. J., Dupre, B., & Lewin, E. (1993). Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios and strontium isotopic ratios in river water: The Congo Basin case. In *Earth and Planetary Science Letters* (Vol. 120).
- Palmer, M. R., & Edmond, J. M. (1992). Controls over the strontium isotope composition of river water. In *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Vol. 56).
- Schopka, H. H., Derry, L. A., & Arcilla, C. A. (2011). Chemical weathering, river geochemistry and atmospheric carbon fluxes from volcanic and ultramafic regions on Luzon Island, the Philippines. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(4), 978–1002. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.014>

- Scribner, A. M., Kurtz, A. C., & Chadwick, O. A. (2006). Germanium sequestration by soil: Targeting the roles of secondary clays and Fe-oxyhydroxides. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3–4), 760–770. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.051>
- Stallard, R. F. (1985). River chemistry, geology, geomorphology and soils in the amazon and orinoco basins abstract.
- Thiele, R., & Cubillos, E. (1980). Carta de Santiago.
- Torres, M. A., West, A. J., Clark, K. E., Paris, G., Bouchez, J., Ponton, C., Feakins, S. J., Galy, V., & Adkins, J. F. (2016). The acid and alkalinity budgets of weathering in the Andes–Amazon system: Insights into the erosional control of global biogeochemical cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 450, 381–391. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.06.012>
- Valenzuela-Diaz, M. J., Navarrete-Calvo, A., Caraballo, M. A., McPhee, J., Garcia, A., Correa-Burrows, J. P., & Navarro-Valdivia, L. (2020). Hydrogeochemical and environmental water quality standards in the overlap between high mountainous natural protected areas and copper mining activities (Mapocho river upper basin, Santiago, Chile). *Journal of Hydrology*, 588. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125063>
- Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J. P., Mendoza, P. A., Gómez, T., Vásquez, N., & Cepeda, J. (2021). Impacts of Climate Change on Water Resources in Chile (pp. 347–363). *https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_19*
- Viers, J., Carretier, S., Auda, Y., Pokrovsky, O. S., Seyler, P., Chabaux, F., Regard, V., Tolorza, V., & Herail, G. (2019). Geochemistry of Chilean Rivers Within the Central Zone: Distinguishing the Impact of Mining, Lithology and Physical Weathering. *Aquatic Geochemistry*, 25(1–2), 27–48. <https://doi.org/10.1007/s10498-019-09350-1>
- Viers, J., Oliva, P., Dandurand, J. L., Dupré, B., & Gaillardet, J. (2013). Chemical Weathering Rates, CO₂ Consumption, and Control Parameters Deduced from the Chemical Composition of Rivers. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition (Vol. 7, pp. 175–194)*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00506-4>
- White, A. F., & Buss, H. L. (2013). Natural Weathering Rates of Silicate Minerals. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition (Vol. 7, pp. 115–155)*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00504-0>
- White, W. M. (Ed.). (2018). *Encyclopedia of Geochemistry*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39312-4>
- Xu, Z., & Liu, C. Q. (2010). Water geochemistry of the Xijiang basin rivers, South China: Chemical weathering and CO₂ consumption. *Applied Geochemistry*, 25(10), 1603–1614. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.08.012>

Anexo A

Datos fisicoquímicos y concentraciones de los ríos del sector del Maipo y del Mapocho

Tabla A.1: Parámetros fisicoquímicos para los ríos de la subcuenca del Maipo

Río	Fecha	mN	mE	pH	T [°C]	SPC [μ S/cm]	C [μ S/cm]	TDS [mg/l]	ORP [mV]	Caudal (m ³ /s)
Colorado	11-08-2021									
	08-09-2021	6282088	372839	7.6	14.0	1305.0	1035.0	849.0		
	11-10-2021			8.1	15.1	897.0	727.0	583.0	175.6	
	10-11-2021									25.68
Manzano	11-08-2021									39.51
	08-09-2021									58.16
	11-10-2021	6282784	369079	7.2	11.2	1198.0	882.0	779.0	177.4	71.98
	10-11-2021									69.37
Melosas	11-08-2021									
	08-09-2021									
	11-10-2021	6253754	389136	7.7	10.0	2110.0	1506.0	1371.0		
	10-11-2021			7.5	9.8	1506.0	1065.0	980.0	267.8	
Plomo	07-12-2021			8.0	9.3	1871.0	1311.0	1216.0	118.3	
	04-01-2022									
	07-12-2021	6280633	415810	7.4	6.4	1255.0	809.0	816.0	484.2	
	06-01-2022									
Toyo	11-08-2021									
	08-09-2021									
	11-10-2021	6272560	375808	7.8	8.0	1607.0	1087.0	1045.0		
	10-11-2021			7.5	9.7	1232.0	871.0	801.0	165.3	
Volcán	07-12-2021			9.0	15.5	1529.0	1252.0	994.0	58.7	
	04-01-2022									
	11-08-2021									
	08-09-2021									
Yeso	11-10-2021	6256426	399761	7.0	7.2	1616.0	1067.0	1050.0		
	10-11-2021			7.0	7.3	1190.0	788.0	774.0	203.0	
	07-12-2021			6.9	7.4	1037.0	689.0	674.0	96.7	
	04-01-2022									
Yeso	11-08-2021									
	08-09-2021									
	11-10-2021	6260259	388525	7.0	13.9	897.0	707.0	588.0	265.4	
	10-11-2021			8.7	17.6	1126.0	1252.0	994.0	58.7	

Tabla A.2: Parámetros fisicoquímicos para los ríos de la subcuenca del Mapocho

Rio	Fecha	mN	mE	pH	T [°C]	SPC [μS/cm]	C [μS/cm]	TDS [mg/l]	ORP [mV]	Caudal (m3/s)
Covarrubias	06-09-2021									0.44
	15-10-2021			8.3	7.4	147.8	98.1	96.1		0.19
	04-11-2021	6304859	372190	8.5	13.0	135.8	104.7	88.2	114.2	0.17
	08-12-2021			9.1	22.5	165.6	157.7	107.6	373.4	0.04
	05-01-2022			9.1	19.9	162.7	146.9	105.7	350.4	0.07
MPC1	10-08-2021									0.69
	06-09-2021									2.58
	15-10-2021			8.2	5.3	208.1	129.9	135.3		1.00
	04-11-2021	6306678	365014	6.3	10.3	268.7	193.2	174.0	259.6	1.87
	08-12-2021			7.5	11.3	358.6	265.0	232.4	366.8	1.87
05-01-2022			7.6	13.7	385.5	302.5	250.6	102.3	1.48	
MPC2	10-08-2021									0.30
	06-09-2021									0.83
	15-10-2021									0.84
	04-11-2021	6304417	373409	6.8	9.8	137.4	97.5	89.3	236.0	1.30
	08-12-2021			8.5	13.7	174.0	136.5	113.0	202.8	0.71
05-01-2022			8.5	14.7	205.3	164.8	133.4	136.7	0.67	
Vertientes	06-09-2021									
	06-09-2021	6304980	375259							

Tabla A.3: Datos químicas de los ríos de la subcuenca del Maipo

Río	Fecha	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Si (mg/L)	Ge (pmol/l)	Sr (mg/L)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Ge/Si (μmol/mol)
Colorado	11-08-2021	167.06	30.16	105.07	106.75	369	6.41	423.53	2.09	0.70663	1.83
	08-09-2021	140.48	26.63	104.27	97.60	340	6.23	418.86	1.81	0.70658	1.90
	11-10-2021	132.07	24.27	85.09	100.65	338	5.83	350.18	1.69	0.70672	1.68
	10-11-2021	98.70	13.60	45.80	97.60	238			1.18	0.70656	
Manzano	11-08-2021	174.55	24.49	210.92	156.77	384	6.34	924.70	1.83	0.70643	5.31
	08-09-2021	160.94	22.05	161.37	122.00	405	5.67	1202.94	1.61	0.70643	4.57
	11-10-2021	132.97	16.92	123.22	91.50	230	4.70	732.54	1.33	0.70654	4.36
	10-11-2021	125.60	10.70	52.50	88.45	318			1.18	0.70655	
04-01-2022	129.15	15.52	95.51	106.75	326	3.09	408.92			3.71	
Melosas	11-08-2021	118.15	16.05	164.58	105.53	164	5.37	954.20	1.11	0.70598	4.97
	08-09-2021	103.47	13.22	132.42	85.40	164	4.98	601.01	0.94	0.70589	3.37
	11-10-2021	129.63	14.55	234.93	88.45	325	4.08	1707.33	1.33	0.70646	11.73
	10-11-2021	129.10	8.40	76.50	79.30	217			1.14	0.70655	
07-12-2021	213.40	10.30	51.00	82.35	525						
04-01-2022	180.29	17.00	239.36	158.60	377	3.92	1220.04			8.70	
Plomo	07-12-2021	257.50	27.74	3.23	118.95	661			2.60	0.70731	
	06-01-2022	232.30	28.51	11.27	134.20	224				0.70732	
Toyo	11-08-2021	177.91	21.74	256.53	145.18	399	5.83	1206.95	1.80	0.70633	7.99
	08-09-2021	172.52	19.94	195.06	103.70	321	5.02	1665.13	1.63	0.70639	6.73
	11-10-2021	146.18	15.92	138.14	112.85	344	4.34	868.76	1.34	0.70650	5.60
	10-11-2021	135.80	9.30	38.20	82.35	299			1.14	0.70654	
07-12-2021	185.20	11.30	43.00	88.45	432			1.38	0.70660		
04-01-2022	160.38	16.01	129.92	94.55	331	3.80	579.52			4.27	
Volcán	11-08-2021	210.32	20.20	141.14	198.25	424	8.63	212.23	1.89	0.70642	0.68
	08-09-2021	210.28	20.46	138.11	179.95	525	8.57	220.87	1.87	0.70644	0.72
	11-10-2021	196.31	17.36	107.00	152.50	398	7.18	198.86	1.67	0.70655	0.77
	10-11-2021	162.40	10.00	28.30	131.15	316			1.34	0.70659	
07-12-2021	130.80	8.10	27.70	115.90	262			1.08	0.70655		
04-01-2022	149.52	14.68	81.28	160.43	275	5.84	203.23			0.97	
Yeso	11-08-2021	127.36	19.39	38.33	100.65	321	3.63	195.68	1.20	0.70632	1.51
	08-09-2021	174.47	19.86	40.29	85.40	413	2.94	163.24	1.48	0.70651	1.50
	11-10-2021	167.56	20.29	38.89	79.30	594	3.03	158.47	1.51	0.70663	1.50
	10-11-2021	123.70	13.80	32.80	100.65	362			1.18	0.70636	
07-12-2021	176.40	18.60	32.40	118.95	453			1.43	0.70656		
04-01-2022	166.16	22.09	40.06	103.70	427	3.53	174.09			1.37	

Tabla A.4: Datos químicas de los ríos de la subcuenca del Mapocho

Río	Fecha	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Si (mg/L)	Ge (pmol/l)	Sr (mg/L)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Ge/Si (μmol/mol)
Covarrubias	06-09-2021	12.59	1.43	8.46	54.90	38	7.39	157.26	0.02	0.70387	0.59
	15-10-2021	14.11	1.68	8.62	54.90	238	6.07	152.22	0.02	0.70397	0.70
	04-11-2021	15.36	1.90	6.11	76.25	37			0.02	0.70386	
	08-12-2021	16.64	2.49	22.67	64.05	59			0.03	0.70388	
	05-01-2022	21.37	2.62	10.67	26.23	20	4.07	68.83			0.47
MPCI	10-08-2021	50.95	6.94	13.15	62.83	109	6.53	111.23	0.20	0.70401	0.47
	06-09-2021	27.03	3.15	9.19	51.85				0.09	0.70409	
	15-10-2021	28.96	3.84	8.03	48.80	10	5.40	98.54	0.10	0.70409	0.51
	04-11-2021	32.61	4.27	8.36	42.70	79			0.13	0.70412	
	08-12-2021	44.42	5.95	12.92	9.15	168			0.19	0.70417	
05-01-2022	56.56	7.31	7.98	24.40	111	4.90	86.93			0.50	
MPC2	10-08-2021	28.66	2.62	8.46	71.98	118	5.34	76.85	0.09	0.70391	0.40
	06-09-2021	19.54	1.78	5.81	51.85	30	5.15	79.51	0.06	0.70391	0.43
	15-10-2021	21.01	2.15	5.31	42.70	32	4.86	74.82	0.06	0.70406	0.43
	04-11-2021	16.43	1.41	1.56	48.80	9			0.06	0.70403	
	08-12-2021	21.00	1.43	14.75	48.80	64			0.08	0.70409	
05-01-2022	32.30	1.88	5.78	51.85	43	3.49	81.47			0.65	
Vertientes	06-09-2021	30.95	6.96	33.02	158.60	2	8.81	518.90	0.21	0.70371	1.65
	06-09-2021	11.51	0.68	33.26	88.45	0	8.42	183.90	0.03	0.70377	0.61

Tabla A.5: Concentraciones de los elementos traza para los ríos del sector del Cajón del Maipo

Río	Fecha	Pb (mg/l)	Mn (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe2O3 (mg/l)	Al2O3 (mg/l)	Mo (mg/l)	Cd (mg/l)	Ba (mg/l)	Cr (mg/l)
Colorado	11-08-2021	0.001	0.028	0.000	0.006	0.003	0.024	0.005	0.000	0.026	0.000
Colorado	08-09-2021	0.001	0.020	0.000	0.006	0.003	0.022	0.005	0.000	0.027	0.000
Colorado	11-10-2021	0.001	0.016	0.001	0.005	0.017	0.032	0.004	0.000	0.028	0.000
Colorado	10-11-2021	0.000	0.022	0.001	0.024	0.014	0.059	0.003	0.000	0.025	0.000
Manzano	11-08-2021	0.001	0.050	0.001	0.011	0.002	0.016	0.004	0.000	0.026	0.000
Manzano	08-09-2021	0.001	0.034	0.000	0.004	0.003	0.020	0.004	0.000	0.026	0.000
Manzano	11-10-2021	0.000	0.023	0.001	0.012	0.007	0.034	0.003	0.000	0.024	0.000
Manzano	10-11-2021	0.000	0.032	0.001	0.014	0.008	0.041	0.003	0.000	0.023	0.000
Manzano	04-01-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Manzano	02-02-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Melosas	11-08-2021	0.001	0.032	0.000	0.006	0.004	0.009	0.002	0.000	0.038	0.000
Melosas	08-09-2021	0.001	0.013	0.000	0.003	0.002	0.014	0.002	0.000	0.040	0.000
Melosas	11-10-2021	0.000	0.069	0.000	0.006	0.003	0.025	0.003	0.000	0.028	0.000
Melosas	10-11-2021	0.000	0.062	0.000	0.028	0.005	0.046	0.002	0.000	0.024	0.000
Melosas	07-12-2021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Melosas	04-01-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Melosas	02-02-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Melosas	09-03-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Melosas	07-04-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Plomo	07-12-2021	0.001	0.000	0.000	0.007	0.009	0.012	0.004	0.000	0.012	0.000
Plomo	01-06-2022	0.000	0.000	0.000	0.020	0.007	0.010	0.004	0.000	0.012	0.000
Plomo	02-02-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Plomo	08-03-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Plomo	07-04-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Toyo	11-08-2021	0.002	0.077	0.001	0.007	0.003	0.018	0.004	0.000	0.026	0.000
Toyo	08-09-2021	0.001	0.045	0.000	0.004	0.003	0.018	0.004	0.000	0.026	0.000
Toyo	11-10-2021	0.000	0.032	0.001	0.007	0.008	0.028	0.003	0.000	0.024	0.000
Toyo	10-11-2021	0.000	0.042	0.000	0.012	0.008	0.044	0.003	0.000	0.023	0.000
Toyo	07-12-2021	0.000	0.030	0.001	0.007	0.006	0.074	0.003	0.000	0.030	0.000
Toyo	04-01-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Toyo	09-03-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Toyo	07-04-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Volcan	11-08-2021	0.002	0.042	0.001	0.029	0.005	0.008	0.003	0.000	0.023	0.000
Volcan	08-09-2021	0.001	0.045	0.001	0.023	0.003	0.013	0.003	0.000	0.023	0.000
Volcan	11-10-2021	0.001	0.031	0.001	0.014	0.009	0.011	0.003	0.000	0.022	0.000
Volcan	10-11-2021	0.000	0.023	0.001	0.013	0.007	0.017	0.003	0.000	0.022	0.000
Volcan	07-12-2021	0.000	0.016	0.000	0.012	0.008	0.018	0.003	0.000	0.027	0.000
Volcan	04-01-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Volcan	02-02-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Volcan	09-03-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Volcan	07-04-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Yeso	11-08-2021	0.000	0.002	0.000	0.011	0.005	0.011	0.008	0.000	0.023	0.000
Yeso	08-09-2021	0.000	0.003	0.017	0.002	0.002	0.002	0.016	0.005	0.023	0.000
Yeso	11-10-2021	0.001	0.005	0.000	0.004	0.007	0.034	0.004	0.000	0.021	0.000
Yeso	10-11-2021	0.000	0.002	0.000	0.012	0.015	0.018	0.005	0.000	0.021	0.000
Yeso	07-12-2021	0.000	0.001	0.000	0.009	0.005	0.017	0.006	0.000	0.023	0.000
Yeso	04-01-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Yeso	02-02-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Yeso	09-03-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Yeso	07-04-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla A.6: Concentraciones de los elementos traza para los ríos del sector del Mapocho

Río	Fecha	Pb (mg/l)	Mn (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe2O3 (mg/l)	Al2O3 (mg/l)	Mo (mg/l)	Cd (mg/l)	Ba (mg/l)	Cr (mg/l)
Covarrubias	06-09-2021	0.000	0.005	0.001	0.007	0.020	0.033	0.007	0.000	0.003	0.000
Covarrubias	15-10-2021	0.000	0.004	0.001	0.007	0.025	0.033	0.000	0.000	0.001	0.000
Covarrubias	04-11-2021	0.000	0.005	0.001	0.013	0.008	0.010	0.001	0.000	0.002	0.000
Covarrubias	08-12-2021	0.000	0.003	0.001	0.018	0.017	0.015	0.001	0.000	0.002	0.000
Covarrubias	05-01-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Covarrubias	03-02-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Covarrubias	10-03-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Covarrubias	07-04-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MPC1	10-08-2021	0.000	0.193	0.151	0.056	0.001	0.016	0.001	0.000	0.008	0.000
MPC1	06-09-2021	0.000	0.024	0.013	0.048	0.014	0.031	0.001	0.000	0.003	0.000
MPC1	15-10-2021	0.000	0.060	0.025	0.017	0.009	0.027	0.001	0.000	0.006	0.000
MPC1	04-11-2021	0.000	0.162	0.026	0.021	0.011	0.048	0.001	0.000	0.008	0.000
MPC1	08-12-2021	0.000	0.564	0.362	0.207	0.015	0.023	0.001	0.000	0.012	0.000
MPC1	05-01-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MPC1	03-02-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MPC1	10-03-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MPC1	07-04-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MPC2	10-08-2021	0.000	0.006	0.001	0.009	0.004	0.011	0.001	0.000	0.006	0.000
MPC2	06-09-2021	0.000	0.003	0.002	0.021	0.011	0.022	0.001	0.000	0.005	0.000
MPC2	15-10-2021	0.000	0.004	0.001	0.016	0.006	0.018	0.001	0.000	0.005	0.000
MPC2	04-11-2021	0.000	0.004	0.001	0.010	0.005	0.025	0.001	0.000	0.005	0.000
MPC2	08-12-2021	0.000	0.003	0.001	0.014	0.008	0.021	0.002	0.000	0.005	0.000
MPC2	05-01-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MPC2	03-02-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MPC2	10-03-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MPC2	07-04-2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Vertiente 1	06-09-2021	0.000	0.000	0.000	0.006	0.001	0.004	0.004	0.000	0.066	0.000
Vertiente 2	06-09-2021	0.000	0.002	0.000	0.006	0.017	0.011	0.008	0.000	0.012	0.000

Anexo B

Normas Chilenas para el agua de riego y agua potable

Tabla B.1: Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego definido por la norma NCH1333

Elemento	Unidad	Límite máximo
Al	mg/l	5
As	mg/l	0.1
Ba	mg/l	4
Be	mg/l	0.1
B	mg/l	0.75
Cd	mg/l	0.01
CN-	mg/l	0.2
Cl	mg/l	200
Co	mg/l	0.05
Cu	mg/l	0.2
Cr	mg/l	0.1
F-	mg/l	1
Fe	mg/l	5
Li	mg/l	2.5
Mn	mg/l	0.2
Hg	mg/l	0.001
Mo	mg/l	0.01
Ni	mg/l	0.2
Ag	mg/l	0.2
Pb	mg/l	5
Se	mg/l	0.02
Na	%	35
SO4	mg/l	250
V	mg/l	0.1
Zn	mg/l	2

Tabla B.2: Concentraciones máximas de elementos químicos en agua potable definido por la norma NCH1333

Elemento	Límite máximo (mg/l)
Cu	2
Cr	0.05
F-	1.5
Fe	0.3
Mn	0.1
Mg	125
Se	0.01
Zn	3
As	0.01
Cd	0.01
CN-	0.05
Hg	0.001
NO3-	50
NO2-	4
Pb	0.05
SO4	500
TDS	1500