

CAPÍTULO 1 / Sección 1

Hidrología y química de aguas en la cuenca alta del río Mapocho

Santiago Montserrat^{1*}, Salvador Quezada¹, Dimitri Dionizis¹, Paula Ojeda¹ y Miguel Lagos-Zuñiga^{1,2}.

1. Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Av. Tupper 2007, Santiago, Chile.

2. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Av. Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile.

*santiago.montserrat@amtc.cl

RESUMEN

En este trabajo se presenta una caracterización hidroquímica de la cuenca alta del río Mapocho y se analizan posibles cambios futuros debido a proyecciones climáticas en el periodo (2030-2060). La cuenca alta del río Mapocho se caracteriza por la presencia de Drenaje Ácido de Roca (ARD) en una de sus cuencas de cabecera, que condiciona la calidad de aguas del sistema. Además, en unas de sus subcuencas se desarrolla la operación minera de Anglo American Sur. Los resultados del estudio muestran que la calidad de las aguas está fuertemente relacionada con la hidrología de la cuenca, en particular con los procesos nivo-glaciares, y la geología de sus cuencas de cabecera. Proyecciones de cambio hidrológico sugieren una disminución importante de la escorrentía y un aumento del derretimiento glaciar como consecuencia del incremento de las temperaturas. En el futuro, esto se traduciría en un empeoramiento en la calidad de las aguas de la cuenca.

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas andinas, generalmente dominadas por procesos nivales, juegan un rol fundamental en el suministro hídrico de regiones más bajas, sosteniendo sistemas naturales, a la población y actividades económicas (Barnett et al., 2005; Viviroli et al., 2007). Por otro lado, la calidad química de las aguas generadas en estos sistemas depende principalmente de la geología y actividades productivas desarrolladas en dichos sistemas (Valenzuela-Díaz et al., 2020).

En estas cadenas montañosas es posible encontrar depósitos ricos en minerales, particularmente reservas de pórfido de cobre (Cu) en zonas con rocas con alteración hidrotermal. Estos sistemas suministran actualmente cerca de las tres cuartas partes del cobre mundial, la mitad del molibdeno (Mo) y aproximadamente un quinto del oro (Au) (Sillitoe, 2010). Si las rocas mineralizadas quedan expuestas a la superficie de manera natural, estas son meteorizadas por el ambiente y, en presencia de agua (lluvia o deshielo), pueden generar aguas ácidas ricas en metales y sulfatos, denominadas Drenaje Ácido de Roca (ARD por sus siglas en inglés) (Bigham y Nordstrom, 2000). La actividad minera, ya sea por la construcción de rajes, túneles, procesos de conminución y generación de residuos reactivos como botaderos o relaves, pueden aumentar la superficie de rocas mineralizadas en contacto con el ambiente, aumentando la generación de aguas ácidas. En este caso se denominan Drenaje Ácido de Mina (AMD

Las proyecciones de cambio climático sugieren:

↑ **3,5°C**
a finales del siglo XXI

645 km²

Zona de estudio, entre los 966 m s.n.m. y los 4.900 m s.n.m.

La precipitación media anual en la cuenca estudiada alcanza

832 mm

con una fuerte variabilidad interanual (~35% de la precipitación media anual).

por sus siglas en inglés) (Bigham y Nordstrom, 2000; Caraballo et al., 2013, 2016). De esta manera, la única diferencia entre ARD y AMD es que el primero es de origen natural, mientras que el segundo deriva de actividades antrópicas (Valenzuela-Díaz et al., 2020).

Según Naciones Unidas, el drenaje ácido de mina (AMD) será uno de los principales y más desafiantes problemas ambientales que enfrentará la sociedad en los próximos años (Valenzuela-Díaz et al., 2020; Zarroca et al., 2021). Esto, debido a su potencial impacto en la calidad de las aguas, el que se manifiesta en aguas de bajo pH, alta conductividad eléctrica y alta concentración de metales y sulfatos (Dold, 2017; Valenzuela-Díaz et al., 2020). Este fenómeno es particularmente importante en zonas donde la actividad minera comenzó antes de la promulgación de leyes relacionadas con la protección del medio ambiente. En estos casos, los datos de calidad de aguas en condiciones previas a la minería son nulos o escasos, lo que dificulta generar líneas base de calidad (Valenzuela-Díaz et al., 2020). Por ello, entender el origen y dinámica de ARD y AMD en cuencas de montaña resulta de gran interés para poder asistir a los responsables de la toma de decisiones en temas ambientales, como quienes elaboran estudios de impacto ambiental (EIA) o implementan estrategias de reducción y mitigación de AMD (Zegers et al., 2021).

La mezcla de las aguas ácidas con otras neutras o alcalinas, y con bajo contenido de metales y sulfatos es el principal mecanismo natural de atenuación del AMD y ARD en los sistemas de pórfidos cupríferos. Considerando que la química de las aguas depende de los procesos de interacción agua-roca y mezcla a lo largo de la cuenca, la fuente y distribución temporal de las aguas resultan de gran importancia en la atenuación del AMD y ARD (Zegers et al., 2021).

Las proyecciones de cambio climático sugieren un aumento en las temperaturas a finales del siglo XXI de 3,5 °C y una disminución de las precipitaciones promedio de hasta un 30% en el escenario de emisiones RCP8.5¹. Esto se traduce en una disminución de la cantidad de nieve y escorrentía superficial, así como una mayor tasa de derretimiento glaciar (DGA, 2018; Bozkurt et al., 2018). Además, el potencial impacto sobre el régimen hidrológico de una determinada cuenca no sólo estará asociado a menores caudales,

sino también a cambios respecto de su distribución temporal y espacial. El régimen de caudales en cuencas de montaña depende de los eventos de lluvia o nieve y de su almacenamiento a lo largo de la cuenca (Williams et al., 2015). En cuencas pluviales, los caudales están concentrados en el tiempo (crecida) y distribuidos a lo largo de la cuenca. En cambio, en cuencas nivales, los procesos de acumulación y derretimiento de la nieve distribuyen el caudal tanto en el espacio como en el tiempo. En el caso de los glaciares, la fuente de agua está muy localizada, pero se distribuye a lo largo de varias escalas de tiempo (Jones et al., 2019). Por último, el retroceso glaciar puede exponer nuevas áreas a procesos de **meteorización**, aumentando así las fuentes de ARD (Huss et al., 2017).

Dada la relación entre los procesos de ARD y AMD con la hidrología, es esperable que cambios en el clima impacten en la calidad de aguas de ciertos ambientes de montaña (Furniss et al., 1999). Observaciones realizadas en las últimas décadas sugieren que condiciones más secas y cálidas derivadas del cambio climático son responsables del deterioro de la calidad de las aguas en zonas de montaña con **mineralización** de sulfuros metálicos alrededor del mundo (Zarroca et al., 2021).

En este trabajo, se presenta un ejercicio de caracterización hidroquímica desarrollado en la cuenca alta del río Mapocho, la que se caracteriza por ser una cuenca de montaña con ARD y actividad minera. Esta cuenca se ubica al este de la ciudad de Santiago y constituye una importante fuente de recursos hídricos para la ciudad. La cuenca se caracteriza por su gran altura, siendo los procesos de derretimiento nival y glaciar determinantes en el régimen hidrológico y la calidad de las aguas. Finalmente, se analizan los posibles efectos del cambio climático en la hidrología de la cuenca, y cómo esta podría afectar la calidad de aguas del sistema.

1. Este escenario supone altas emisiones de gases de efecto invernadero sin medidas de adaptación-mitigación. Este escenario traería como consecuencia un incremento en la forzante radiativa de 8,5W/m² a finales de siglo.

2. METODOLOGÍA

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio comprende la cuenca alta del río Mapocho, definida por la ubicación de la estación fluviométrica administrada por la Dirección General de Aguas (DGA) Mapocho en Los Almendros (MLA, Figura 1). Esta cuenca se ubica al este de la ciudad de Santiago, comprende un área total de 645 km² y se desarrolla desde los 966 m s.n.m. hasta los cerca de 4.900 m s.n.m. En estas altas cotas se registra la presencia de glaciares, tanto blancos como rocosos, los que representan cerca de un 3% del área total de la cuenca. La cuenca MLA está formada por tres subcuencas principales:

Río San Francisco (SF): Comprende un área total de 108 km², de los cuales el 4,4% corresponde a glaciares rocosos. En ella no se presentan glaciares blancos. En SF se desarrolla la actividad minera de Anglo American Sur (AAS), particularmente en la quebrada Disputada. En 1996, AAS implementó una estrategia de remediación del AMD de la quebrada Disputada. Esta quebrada fue hidrológicamente aislada del resto de la cuenca de SF mediante la construcción de un muro corta fuga, el que previene la salida de aguas que interactúan con la actividad minera en la quebrada Disputada. Desde entonces, el único flujo de salida desde la quebrada

Disputada proviene desde un canal perimetral que recolecta las aguas en el sector de Aguada de Los Machos, la que no entra en contacto con la actividad minera.

Estero Yerba Loca (YL): Esta cuenca es un área protegida bajo categoría de Santuario de la Naturaleza y preservación ecológica. Comprende un área total de 119 km², con un 8,1% del área cubierta por glaciares (2,4% rocosos y 5,7% blancos). En la cabecera de la cuenca se encuentra un complejo de brechas ígneo/hidrotermales con al menos dos centros de mineralización de pórfidos de cobre conocidos como Los Sulfatos y La Paloma, los cuales presentan mineralización de pirita (FeS₂) y calcopirita (CuFeS₂) en sus niveles más someros (Toro et al., 2012). Durante el periodo de deshielo, las aguas de derretimiento de nieve y glaciares interactúan con las rocas mineralizadas y con zonas donde existe **alteración hidrotermal** con presencia de jarosita y alunita (Gutiérrez, 2015). Dicha interacción produce drenaje ácido de roca (ARD), caracterizado por aguas ácidas con pH en torno a 3 y altas conductividades eléctricas, principalmente debido a la alta concentración de sulfatos, calcio y otras especies minerales disueltas (Gutiérrez, 2015; Jorquera et al., 2014; Valenzuela-Díaz et al., 2020). Aguas abajo, las aguas ácidas generadas por el ARD reciben aportes de aguas sin dicha influencia. Es decir, se mezclan con aguas neutras a alcalinas y con bajo contenido metálico, lo cual genera una dilución y neutralización progresiva.



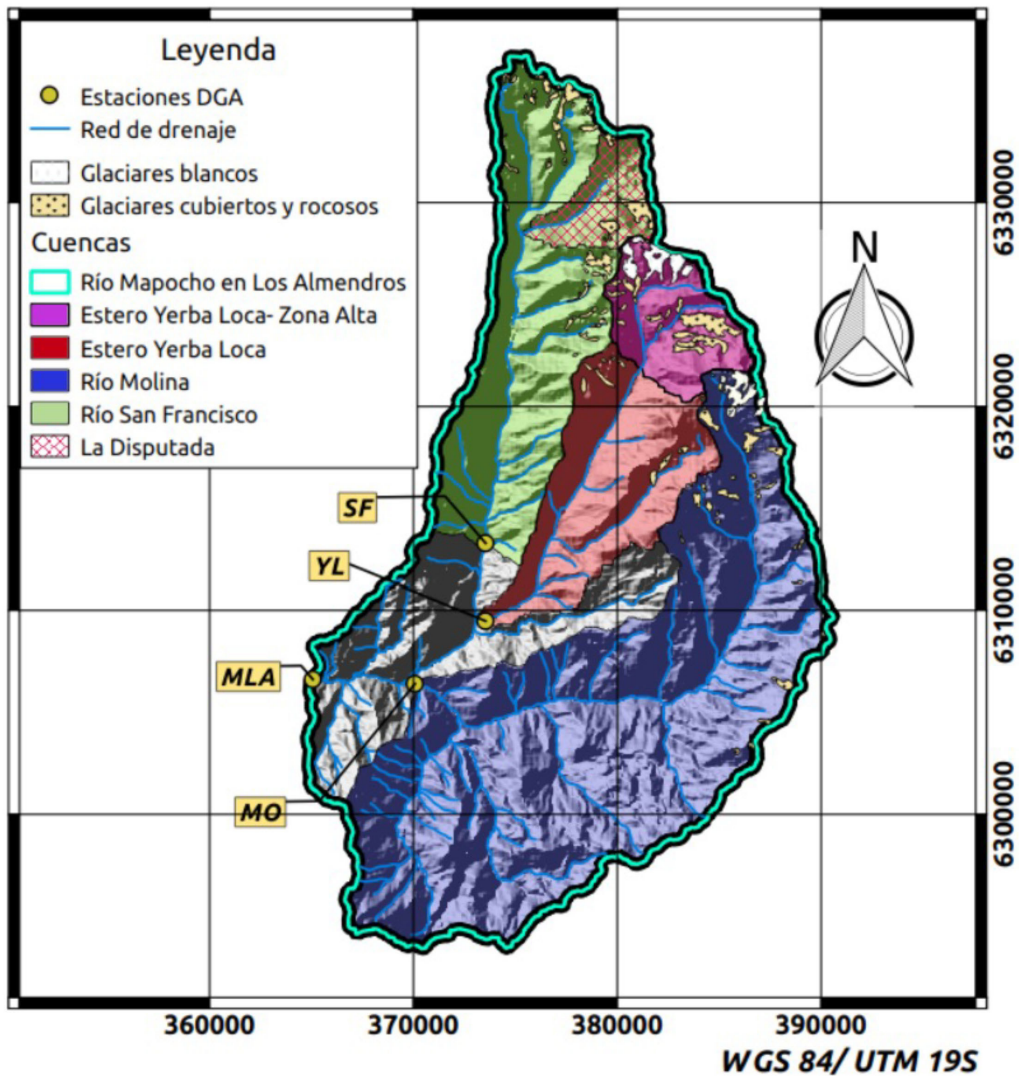


Figura 1. Esquema de la zona de estudio. Los puntos amarillos representan la salida de cada una de las subcuencas asociadas a la ubicación de estaciones fluviométricas administradas por DGA.

Río Molina (MO): La cuenca del río Molina tiene un área de 300 km², equivalente a casi la mitad de la cuenca de MLA. La cobertura glaciar alcanza el 4% del área total. Dentro de ella se desarrolla principalmente actividad ganadera a pequeña escala. Sus aguas se clasifican como bicarbonatadas cálcicas, con pH neutro a alcalino y con bajo contenido de metales disueltos, por lo que se infiere que en esta cuenca no existen procesos de ARD o AMD.

2.2. Bases de datos

La zona de estudio cuenta con cuatro estaciones fluviométricas administradas por la DGA, tres de ellas ubicadas a la salida de cada una de las subcuencas aportantes (San Francisco antes de la junta con el estero Yerba Loca, SF; Yerba Loca antes de la junta con el río San Francisco, YL, y río Molina antes de la junta con el río San Francisco, MO), finalizando con la estación ubicada a la salida del área de estudio (Mapocho en los Almendros, MLA) (Figura 1). Asociado a estas estaciones, la DGA ha recopilado muestras de calidad de aguas de manera estacional, es decir,

cuatro muestras por año, desde 1974. Además, desde 2011 se cuenta con una serie de muestras de calidad y química de aguas tomadas en las distintas subcuencas y por distintas consultoras para AAS. Estos datos están disponibles en el Servicio de Evaluación Ambiental como parte del Estudio de Impacto Ambiental Los Bronces Integrado (www.sea.gob.cl).

Debido a que las muestras fueron obtenidas por distintos grupos, se utilizaron diversas técnicas de medición y análisis. Un detalle de los métodos analíticos utilizados puede ser consultado en el estudio de Valenzuela-Díaz et al. (2020). Para el control de calidad, se calculó el balance iónico de las muestras usando el programa PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) con la base de datos WATEQ4f, la que incluye el efecto de la actividad de H^+ y de las cargas eléctricas de los diferentes componentes químicos según su especiación. Las muestras con balance iónico superior a $\pm 10\%$ fueron descartadas, siguiendo el criterio de Nordstrom et al. (2009) para aguas de drenaje ácido.

En el año 2016, y en la misma ubicación de las estaciones fluviométricas DGA, AMTC instaló sondas físico-químicas de medición continua. De esta manera, y con una resolución temporal de 15 minutos, se obtienen valores de pH, conductividad eléctrica, potencial redox y temperatura a la salida de cada una de las subcuencas del área de estudio.

Para caracterizar las forzantes meteorológicas en el área de estudio, en particular precipitación y temperatura, se consideraron los datos de 17 estaciones meteorológicas de la red DGA/DMC y una estación de la red privada de AAS. Con esta información se construyó un producto meteorológico basado en gradientes altitudinales (PMG), de donde es posible obtener series diarias de precipitación y temperatura distribuidas sobre el área de estudio para el período 1980-2020 (Quezada et al., 2021).

2.3. Modelo Hidrológico

Se desarrolló el modelo hidrológico WEAP (Water Evaluation and Planning, Yates et al., 2005) calibrado para el periodo observacional 1999-2015. WEAP es un modelo hidrológico semi-distribuido que permite representar procesos nivales y glaciares de manera simple y con necesidad de pocos datos. El balance de agua se resuelve con el método de la humedad de

suelo (Hansen, 1994), utilizando dos capas de suelo. En la capa superficial se resuelve el balance de aguas (evapotranspiración, precipitación, derretimiento de nieve y hielo y **escorrentía**). La segunda capa representa estratos profundos del suelo que regulan el flujo base (Yates, 1996; Yates et al., 2005). El derretimiento de nieve es modelado con el método de grado día (Hock, 2003), mientras que el balance de hielo glaciario se resuelve con un modelo radiativo simplificado (Condom et al., 2012).

El modelo hidrológico es forzado con las series de precipitación y temperaturas del producto meteorológico basado en gradientes (Quezada et al., 2021), en conjunto con series simuladas por el reanálisis atmosférico ERA5 (Hersbach et al., 2020) para humedad y viento. La nubosidad y cobertura de nieve, utilizadas como verificación de procesos de acumulación y derretimiento de nieve, se obtuvieron de productos satelitales MODIS (Hall et al., 2002). La calibración del modelo se realizó considerando como función objetivo la eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970), que cuantifica la calidad de un ajuste entre series observadas y simuladas por medio del cuadrado de la diferencia de sus valores, alcanzando un valor 1 para un ajuste perfecto, 0 para un ajuste con la misma capacidad predictiva que el promedio de la serie observada y valores negativos cuando el promedio de la serie representa mejor las observaciones. Este procedimiento arrojó buenos resultados, obteniéndose un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe a escala diaria de 0,76. Más detalles de la construcción y otros resultados del modelo se pueden encontrar en Zegers et al. (2021).

2.4. Escenarios climáticos futuros

Con el fin de estudiar posibles condiciones futuras del sistema, se obtuvieron 10 **modelos de circulación general (GCMs)** disponibles del proyecto CMIP5 (www.wcrp-climate.org), considerando el escenario de emisiones RCP8.5 (Tabla 1). Los GCMs son modelos globales que resuelven ecuaciones de conservación para todo el sistema climático en resoluciones horizontales entre 100 y 200 km. Desde los GCMs se extraen series de precipitación y temperatura diarias, las que fueron escaladas estadísticamente utilizando el método multivariado "Multivariate Bias Correction with the N-dimensional probability density function

Tabla 1. Modelos de Circulación Global (GCM) utilizados para el análisis de cambio climático. Se detalla las instituciones que han desarrollado cada GCM y su resolución nativa (antes del escalamiento).

Modelo	Institución	Resolución (°lat x °lon)
BNU-ESM	Beijing Normal University, China	2.8x2.8
CCSM4	National Center of Atmospheric Research, USA	1.2x0.9
CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia	1.9x1.9
GISS-E2-H	Goddard Institute for Space Studies, NASA, USA	2.5x2.0
GISS-E2-R	Goddard Institute for Space Studies, NASA, USA	2.5x2.0
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre, UK	1.9x1.2
IPSL-CM5A-LR	Institute Pierre Simone Laplace, Francia	3.7x1.9
IPSL-CM5B-LR	Institute Pierre Simone Laplace, Francia	3.7x1.9
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute, Alemania	1.9x1.9
NorESM1-M	Norwegian Climate Center, Noruega	2.5x1.9

transform” (MBCn) propuesto por Cannon (2018). Este método escala las series respetando la covariabilidad que puede existir entre la precipitación y la temperatura durante eventos de tormenta. Esto permite representar de mejor forma los eventos de acumulación nival y crecidas pluviales respecto de métodos de escalamiento univariados como QDM (Quantile Delta Mapping) (Cannon et al., 2015), según se discute en Dionizis et al. (2021). Para el escalamiento se utilizó como base observacional histórica el producto PMG antes descrito.

3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA E HIDROQUÍMICA DE MLA

3.1. Caracterización hidrometeorológica del área de estudio

La precipitación media anual en la cuenca MLA alcanza los 832 mm, con una fuerte variabilidad interanual (~35% de la precipitación media anual). Esta se concentra durante los meses de otoño-invierno, donde más del 90% de la precipitación ocurre entre los meses de abril y agosto (Figura 2). Durante las tormentas de otoño-invierno, la línea de nieve se sitúa entre los 1.000 y 2.500 m s.n.m. Esto se traduce en que la precipitación sólida media anual sobre la cuenca de

MLA equivale al 53±18% de su superficie. Sin embargo, en el caso de las subcuencas de YL y SF, las que se desarrollan a mayores cotas, el porcentaje medio anual de precipitación sólida representa hasta 76% y 72% de las áreas totales, respectivamente.

Dado lo anterior, en condiciones promedio, la cuenca MLA presenta un régimen hidrológico nivo-pluvial, con un caudal medio anual de 5,9 m³/s. Los máximos caudales medios mensuales ocurren en el periodo noviembre-diciembre, es decir, durante la época de deshielo, alcanzando valores cercanos a los 10 m³/s. Por otro lado, los caudales medios mensuales mínimos ocurren en abril, luego de la época de derretimiento, los que alcanzan en promedio ~2,5 m³/s. El aumento de caudal entre los meses de abril y agosto (periodo de acumulación), se atribuye al componente pluvial de la parte baja de la cuenca MLA.

La curva de variación estacional de caudales en el río Molina sigue el mismo patrón que el observado en MLA, con un caudal medio anual de 3,9 m³/s (70% del caudal de MLA) con máximos en el periodo noviembre-diciembre de 8,2 m³/s (75% de MLA) y mínimos de 0,6 m³/s en abril (33% de MLA).

La cuenca del estero Yerba Loca presenta un régimen nivo-glaciar, con un caudal medio anual de 1,0 m³/s (18% de MLA), máximo de 2,2 m³/s (20% de MLA) durante diciembre y mínimo de 0,2 m³/s (11% de MLA) durante mayo-junio, lo que demuestra el casi nulo aporte

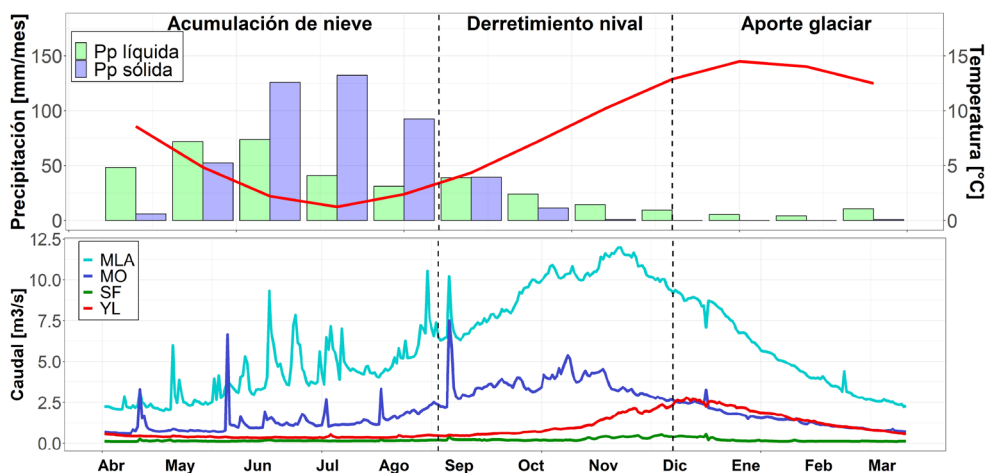


Figura 2. En el panel superior, climograma de la cuenca alta del río Mapocho (MLA). En el panel inferior, caudales medios diarios para el periodo 1980-2019 obtenidos desde registros DGA para las subcuencas en estudio.

pluvial de la cuenca. El retraso en la ocurrencia de los caudales máximos y en el periodo de recesión, respecto a MLA, se explica por una mayor proporción de aguas debido al derretimiento de nieve desde zonas altas y al derretimiento glaciar, el cual cobra mayor importancia en esta cuenca.

La cuenca del estero SF se encuentra altamente intervenida por la operación de la mina Los Bronces de AAS. Esto se traduce en que exista una escasa variación de caudales a lo largo del año. Según los registros de DGA, el caudal medio anual a la salida de SF alcanza los 0,1 m³/s, con flujos máximos en torno al mes de diciembre, que alcanzan apenas un 12% más que el caudal medio anual. El aporte de SF al caudal de MLA apenas alcanza a un 1,7% del promedio anual observado².

3.2. Química de aguas

La hidroquímica de la cuenca alta del río Mapocho, en distintas escalas temporales está fuertemente condicionada por la geología de las cuencas tributarias y el ARD de la cuenca alta del estero YL, su régimen hidrológico, la operación de la mina Los Bronces y por la precipitación de distintas especies minerales como resultado de la mezcla de aguas.

3.2.1. Química histórica

Los aspectos históricos más relevantes respecto a la química de aguas de la cuenca MLA fueron descritos por Valenzuela-Díaz et al. (2020). Estos se resumen en la Figura 3, tomando como base registros de concentraciones de cobre total, el que puede considerarse un buen indicador de ARD o AMD en cuencas asociadas a pórfidos de Cu (Plumlee et al., 1999). Los datos muestran que las concentraciones de Cu en el río Molina son normalmente inferiores a 0,1 mg/L, por lo que se infiere que esta cuenca no ha sido afectada por AMD o ARD durante el periodo de análisis. Por su parte, la cuenca del estero Yerba Loca presenta concentraciones medias de Cu en el rango de 2,2-4,0 mg/L, asociado al ARD en la parte alta de la cuenca. Posterior al año 2010, se observa un leve aumento en las concentraciones de Cu, principalmente en los valores extremos, posiblemente atribuible a la baja de caudales durante el período de megasequía (Garreaud et al., 2020; Boisier et al., 2016).

La cuenca de SF es la que presenta mayor variación histórica en la composición química de sus aguas. Anterior a 1996, las aguas se encontraban significativamente contaminadas por AMD, con concentraciones medias de Cu en el rango de 5 a 11 mg/L. Luego, en el periodo 1996-2000, se observa una importante mejora en la calidad de las aguas, con

² En régimen intervenido.

concentraciones medias de Cu de 1,6 mg/L, pero con una alta variabilidad. Esta mejora se atribuye al sistema de remediación implementado por AAS en 1996, en particular la construcción de un muro corta fuga. A partir del año 2000, los efectos de la estrategia de remediación de AMD se hacen evidentes en la calidad de aguas de SF. A partir de esta fecha, las concentraciones medias de Cu son menores a 0,4 mg/L y presentan una menor variabilidad (Valenzuela-Díaz et al., 2020).

La calidad de aguas en la cuenca de MLA responde principalmente a la de sus tributarios. En particular, se observa una baja significativa en la concentración de Cu luego de la implementación del muro corta fuga, y un leve aumento luego del año 2010 en línea con lo observado en YL.

3.2.2. Distribución espacial

Actualmente, y luego de la implementación de la estrategia de mitigación de AMD implementada por AAS en 1996, la calidad química de las aguas de MLA responde principalmente al alto aporte de metales y acidez generados por el ARD en la zona alta de YL, así

como a la mezcla con tributarios con aguas neutras a alcalinas, como el caso de SF y MO. Además, y a medida que ocurren los procesos de dilución y neutralización, la química de aguas a lo largo es fuertemente influenciado por procesos de **precipitación mineral**, en particular en minerales de Aluminio (Al) y Hierro (Fe).

La Figura 4A presenta las concentraciones totales sumadas de Zn, Cu, Pb, Cd, Co y Ni en función del pH, para los datos recopilados entre 1996 y 2020, clasificados según la subcuenca de origen. Este gráfico se denomina diagrama de Ficklin y se utiliza para clasificar las aguas de acuerdo con su nivel de contaminación por ARD o AMD (Plumlee et al., 1999). Se observa que existen diferencias considerables en las concentraciones de metales asociados a las distintas subcuencas. En la zona alta de YL, las aguas son ácidas, con valores de pH en torno a 3, con alta concentración de metales y alta conductividad eléctrica. Luego, en la salida de la cuenca y al mezclarse sus aguas con las de San Francisco, que son neutras a alcalinas y con menor contenido metálico, el pH tiende a aumentar y el contenido metálico a disminuir. Por su parte, las aguas de MO presentan contenidos metálicos y conductividades

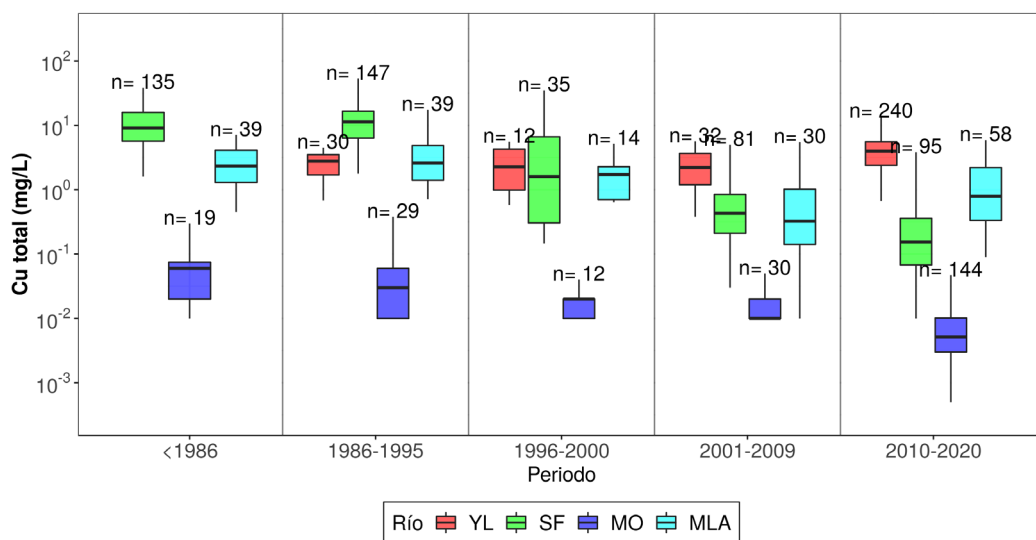


Figura 3. Variación histórica de la concentración total de Cu en la cuenca alta del río Mapocho. Datos obtenidos desde estaciones DGA en el periodo 1974–2020. El número sobre las cajas indica el número de datos de Cu disponibles en cada periodo (Adaptado de Valenzuela-Díaz et al., 2020).

eléctricas más bajas, y sus valores de pH se mantienen en un rango neutro a alcalino. La química de las aguas en MLA es el resultado de la mezcla de los tributarios mostrados en la Figura 4A, por lo que sus valores de pH y de concentraciones de metales se encuentran entre los de YL y los de SF y MO.

En la Figura 4B, se presenta la carga de Cu total (es decir, concentración multiplicada por caudal) en función del pH, para ilustrar los aportes másicos de cobre de cada tributario. Se observa que las cargas asociadas a MLA son del mismo orden de magnitud que las estimadas para YL, de manera que la mayoría de la masa de Cu en MLA tendría su origen en dicha cuenca. Los aportes de SF, debido a la menor concentración de metales y bajo caudal de salida, son aproximadamente un orden de magnitud inferior a la carga metálica descrita en MLA. Los valores de carga de Cu total asociados a MO y a tributarios sin influencia de ARD, alcanzan valores de hasta tres órdenes de magnitud inferior a la carga de MLA, siendo sus aportes prácticamente despreciables en dichos casos. Sin embargo, durante períodos de altos caudales, las cargas de este tributario pueden llegar a ser del orden

de las estimadas en SF, pero siempre manteniéndose bajo las de YL.

A lo largo del sistema, y debido a los procesos de neutralización, precipitan hidrosulfatos de Fe y Al (Navarrete, 2020) que se identifican en terreno por la coloración rojiza o blanquecina que dan al agua y al lecho del río, donde forman una fina capa sobre los sedimentos detríticos (Figura 5). Usando técnicas de difracción de rayos X y digestión ácida, se propuso que los precipitados corresponderían a schwermanita, mineral de color rojizo que precipita para valores de pH en torno a 1.9-4.7 (Caraballo et al., 2013; Zegers et al., 2021), e hidrobasaluminita, mineral de color blanquecino, cuya precipitación ocurre para valores de pH entre 4.0 y 5.5 (Caraballo et al., 2013; España, 2007; Sánchez-España et al., 2011; Zegers et al., 2021). También, para condiciones de pH en torno a 5-6, es posible observar precipitados de tonalidades verdosas, las que se asocian a minerales de Cu. Además, la concentración de cobre disuelto puede disminuir debido a procesos de sorción en hidróxidos de hierro (Runkel et al., 1999) o en hidrobasaluminita (Montecinos et al., 2020; Zegers et al., 2021). Si bien en la cuenca de Yerba Loca se identifican

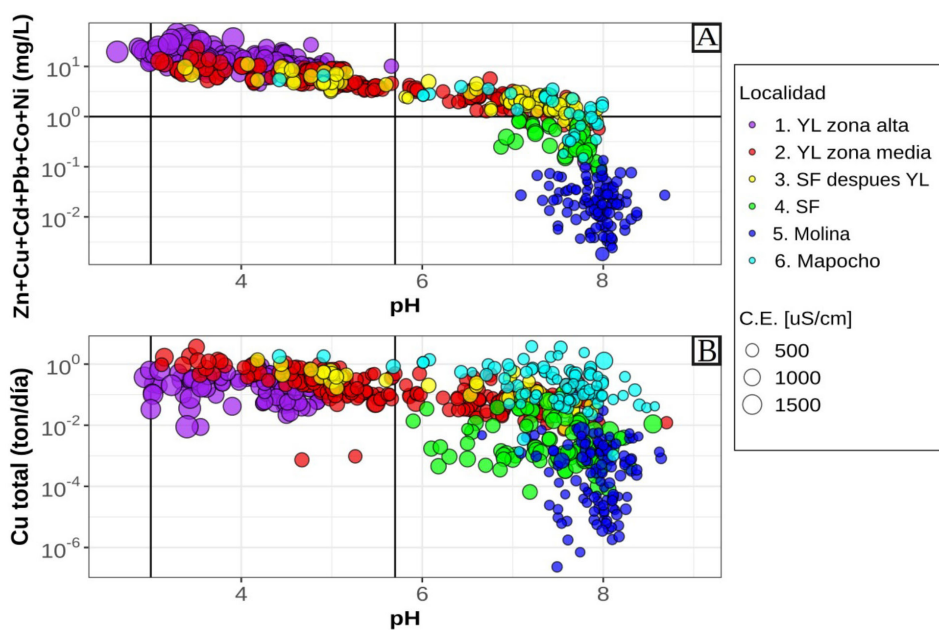


Figura 4. A) Diagrama de Ficklin modificado y B) relación entre la carga de Cu total y el pH para las muestras de agua en el periodo 1996-2020. Los datos están clasificados según su cuenca de origen (Figura 1). El tamaño relativo de los círculos es proporcional a la conductividad eléctrica de las muestras.

ambos tipos de precipitados (blancos y rojos), aguas abajo de YL, producto del incremento de pH por neutralización con aguas de SF, sólo se han identificado los precipitados blancos, los que en algunos casos presentan tonalidades verdes (Correa-Burrows et al., 2021; Zegers et al., 2021). Concentraciones de Cu más altas se identificaron en arenas y limos comparadas con las presentes en gravas. Esto podría atribuirse a la formación de precipitados ricos en Cu, o bien a la adsorción y/o co-precipitación de Cu durante la formación de precipitados de Al (Correa-Burrows et al., 2021).

La precipitación de estos minerales libera protones (H^+) al sistema, lo que retrasa la neutralización de las aguas debido a procesos de dilución con aguas

neutras y alcalinas. Esto genera un estancamiento del pH (efecto buffer) en torno a valores en donde ocurre la precipitación mineral. Para ilustrar esto, se presenta un histograma con los valores de pH medidos en YL por la sonda físico-química de registro continuo (Figura 6). Se observa que la distribución presenta las mayores frecuencias de datos en torno a pH 7.5, asociado a periodos donde se reduce la influencia de ARD. Le sigue una alta concentración de datos en torno al pH 5, que se asocia a un estancamiento de pH debido a la precipitación de hidrobasaluminita. Por último, existe una concentración menos marcada de datos en torno al pH 4, que se asocia a la precipitación de los hidróxidos de Fe. Las observaciones en terreno muestran que estas reacciones ocurren preferentemente antes de alcanzar la salida de YL.

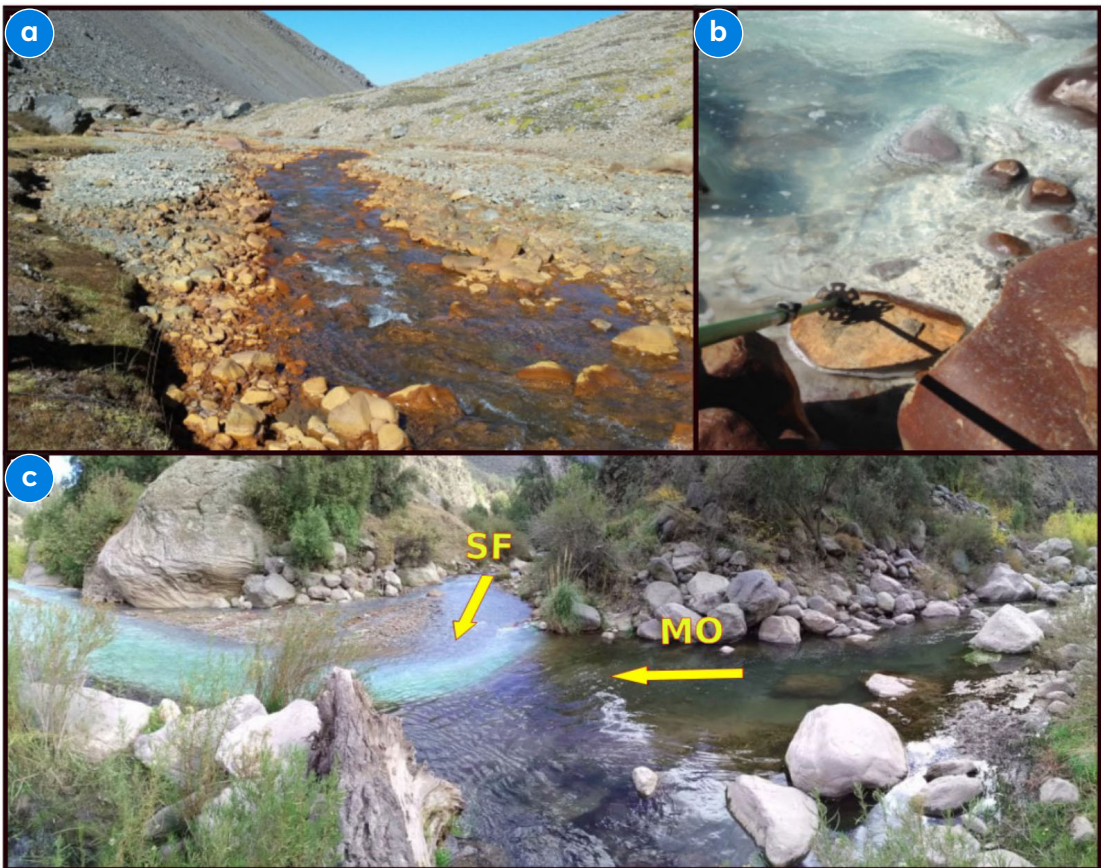


Figura 5. Fotografías de terreno con precipitados en el lecho del río. **a)** Precipitados rojizos asociados a minerales de Fe observados en la parte alta del YL. **b)** Precipitados blanquecinos en la zona alta de YL asociados a minerales de Al encontrados en la confluencia de YL con un aporte lateral alcalino. **c)** Precipitados blanquecinos y verdosos en la confluencia de SF y MO.

En general, los balances de masa de metales en la cuenca de MLA no cierran sin considerar los procesos de precipitación mineral. Esto debido a que los metales, en particular Fe, Al y Cu, pueden quedar retenidos como precipitados en el lecho durante periodos de bajos y/o medios caudales, ser resuspendidos durante eventos de crecida o disueltos producto de bajas en las condiciones de pH. De esta manera, los sedimentos del lecho pueden actuar como fuentes o sumideros de metales dependiendo de las condiciones locales de caudal y acidez (Zegers et al., 2021). Los precipitados neoformados normalmente se transportan asociados a partículas de sedimento o como partículas

independientes, por lo que siguen la misma ruta que los sedimentos del río. Por ello, para entender el transporte y destino de metales en los ríos, es también necesario entender el transporte de sedimentos.

La Figura 7 muestra los resultados de un modelo de transporte de metales en la cuenca de YL. Se observa que el modelo de precipitación mineral es fundamental para poder reproducir las concentraciones de Fe disuelto a la salida de la cuenca. Si no se consideran los procesos de precipitación de Fe, el modelo sobreestima el Fe disuelto en cerca de un 500%. Además, el modelo de transporte de sedimentos, en particular relacionado

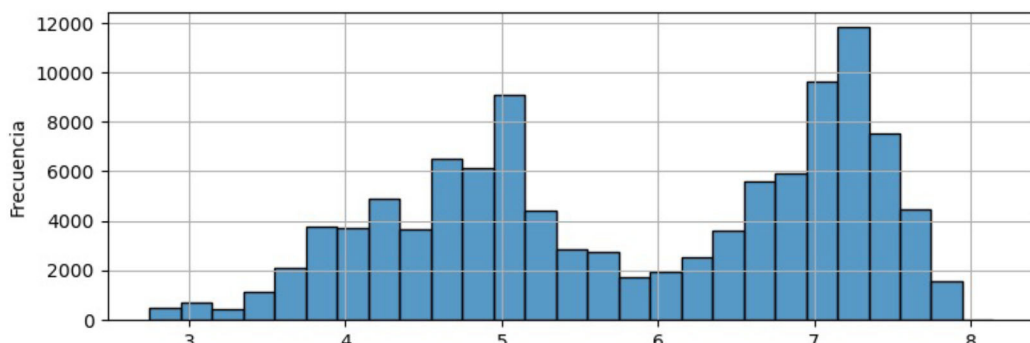
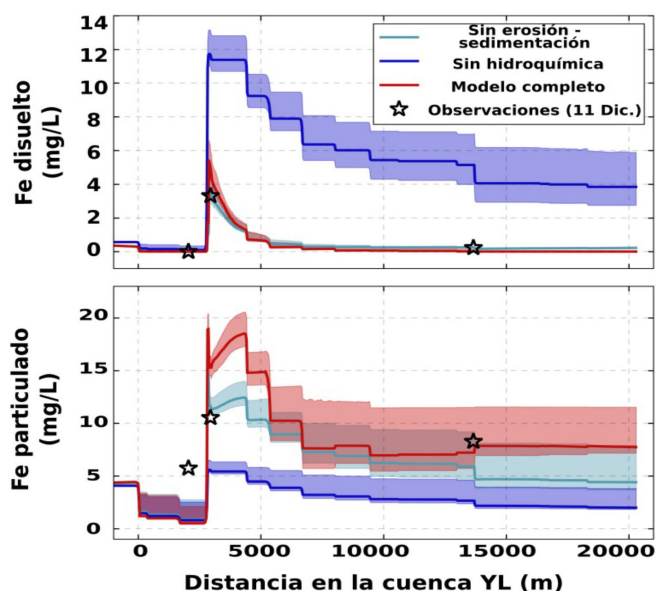


Figura 6. Histograma de pH registrados en la salida de la cuenca de YL con frecuencia de 15 minutos en el periodo septiembre de 2016 a diciembre de 2019.

Figura 7. Concentraciones de Fe disuelto y particulado simuladas para la cuenca de Yerba Loca para el día 11/12/2013. La distancia horizontal está medida desde la parte alta hasta la salida de la cuenca. Las simulaciones corresponden al modelo químico completo (incluidos procesos de precipitación mineral y transporte de sedimentos), desactivando el módulo de erosión-sedimentación y el módulo hidroquímico, que simula los procesos de precipitación mineral (adaptado de Zegers et al., 2021).



con los procesos de erosión y sedimentación, se vuelve relevante para representar la cantidad de Fe particulado. Al no considerarlo, se subestiman las concentraciones de Fe particulado en torno a un 25%-70% (Zegers et al., 2021).

3.2.3. Distribución temporal y su relación con la hidrología

La dinámica temporal de la química de aguas en la cuenca de MLA responde fuertemente al régimen hidrológico y origen del agua respecto de la geología de la cuenca, en particular, a la zona de **mineralización** y **alteración hidrotermal** en la cuenca alta del estero YL. De esta manera, la carga metálica no sólo depende de las altas concentraciones de metales y acidez presentes en las aguas de la cuenca alta de YL, sino que también de la distribución temporal y espacial de los caudales dentro de MLA. En la Figura 8 se muestran caudales medios diarios y datos de pH medios diarios obtenidos a partir de los registros continuos medidos a la salida de las subcuencas tributarias y de MLA en el periodo 2016-2019. Los datos de pH muestran que las aguas de SF y MO presentan valores de pH neutros a alcalinos durante todo el año.

El pH en YL muestra un comportamiento estacional bien definido. Durante el periodo junio-octubre, es

decir, durante el periodo de acumulación y hasta inicios de la época de deshielo, las aguas a la salida de YL se presentan neutras. Esto coincide con la época de menores caudales en YL, donde los aportes de agua desde la cuenca alta, donde ocurre el ARD, son marginales (Zegers et al., 2021). Sin embargo, durante noviembre, y junto con el aumento de caudales de deshielo en YL (y por lo tanto mayores aportes desde la zona del ARD), el pH baja bruscamente, alcanzando mínimos cercanos a 4 durante diciembre. Estos bajos valores de pH persisten hasta cerca del mes de abril, es decir, hasta finales de la época de deshielo. Luego, las aguas se neutralizan lentamente en línea con la baja de caudales, alcanzando nuevamente valores neutros en torno al mes de junio.

Durante diciembre-marzo, la acidez del estero YL tiene la capacidad de migrar aguas abajo, alcanzando la salida de MLA, donde el pH desciende a valores en torno a 5. Estos valores de pH se encuentran por debajo del límite establecido por la Norma Secundaria de Calidad de Aguas para el río Mapocho (Área de vigilancia MP-TR-10 válida para el tramo comprendida entre la confluencia de los ríos San Francisco y Molina y la confluencia del río Mapocho con el estero el Arrayán), la que establece un rango de pH entre 6.5 y 8.5. En este mismo periodo, YL también registra su mayor acidez (pH~4), lo que coincide con sus máximos caudales.

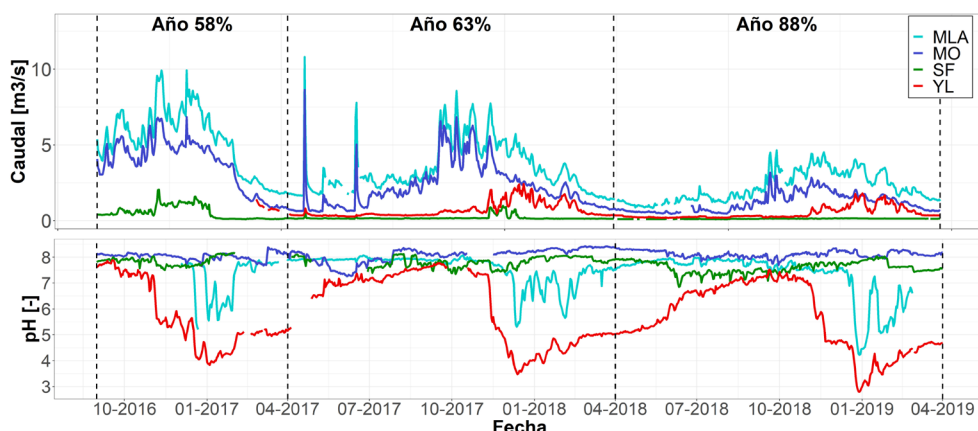


Figura 8. Panel superior indica caudales medios diarios medidos en estaciones DGA a la salida de las subcuencas en estudio en el periodo 2016-2019. Panel inferior indica valores de pH medios diarios, obtenidos de los registros continuos de las sondas instaladas por AMTC, en el mismo lugar de ubicación de las estaciones DGA y durante el mismo periodo. En la parte superior de la figura, se indica la probabilidad de excedencia asociada a cada año hidrológico.

Además, durante estos meses, los caudales de MO están en periodo de recesión, alcanzando valores prácticamente equivalentes a los caudales de YL, por lo que los aportes de agua de ambas cuencas al sistema son similares.

Según se observa en la Figura 7, los menores valores de pH, tanto en YL como en MLA, se registran para el verano de 2019, donde alcanzan mínimos en torno a 4 y 5, respectivamente. Esto coincide con que el año hidrológico 2018-2019 fue un año más seco que los años anteriores presentados en la figura, lo que explicaría el aumento en las concentraciones de Cu observadas durante el periodo de la mega sequía (Figura 3) respecto al período histórico anterior en las cuencas de YL y MLA. Durante la mega sequía, los años hidrológicos se han mantenido en general por debajo del 70% de probabilidad de excedencia, con excepción de los años 2015 y 2016 que estuvieron cerca de un año promedio (es decir cerca de 50% de probabilidad de excedencia).

4. PROYECCIONES FUTURAS

La Figura 9 presenta las señales de cambio a nivel anual de precipitación y temperatura para la estación Los Bronces en el periodo futuro (2030-2050) respecto del periodo histórico (1985-2005). Se observa que todos los GCMs escalados son consistentes en proyectar un aumento de las temperaturas, la que fluctúa entre 0,2 y 1,8 °C. Para el caso de la precipitación, el rango de variación va entre un déficit cercano al -12% y un aumento del orden del 7%. Sin embargo, las tendencias observadas en las últimas décadas sugieren que es poco probable que aumenten las precipitaciones medias en la cuenca (Boisier, 2016), por lo que se estima que los GCMs que proyectan aumentos de precipitación simulan condiciones menos probables en esta región.

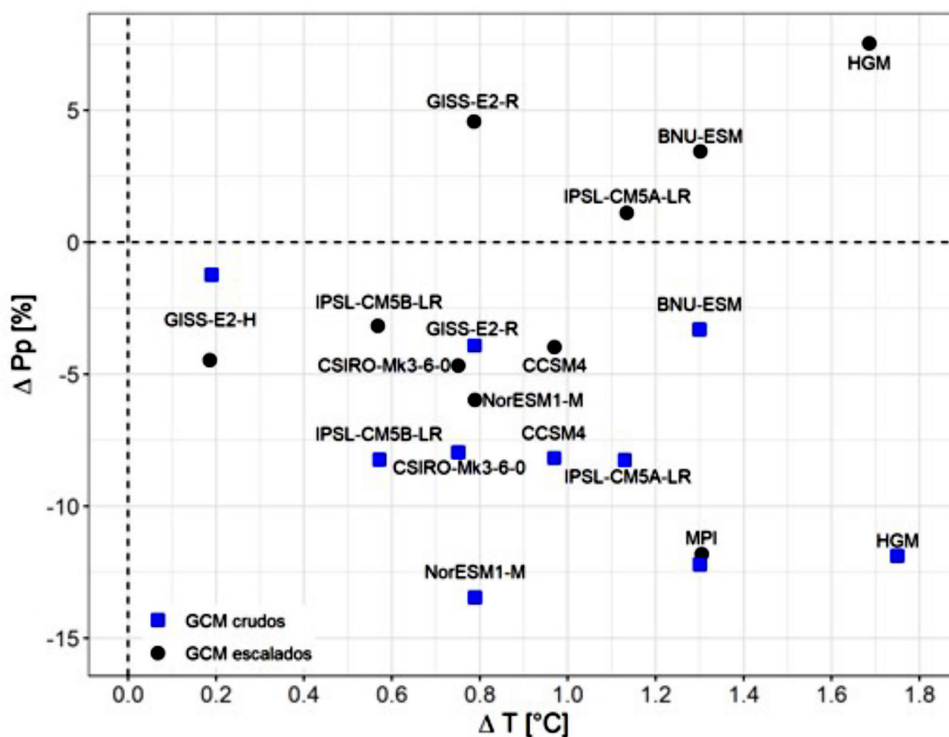


Figura 9. Proyecciones de cambio climático (precipitaciones y temperatura) a nivel medio anual en la estación Los Bronces. Se presentan las señales obtenidas de los modelos GCM crudos y escalados.

Se observa que el proceso de escalamiento puede modificar significativamente las tendencias de cambio en las señales de precipitación respecto del modelo GCM crudo, mientras que para la temperatura este cambio no es significativo (Figura 9). En particular, se observa que todos los modelos GCMs crudos proyectan una señal de cambio negativa para la precipitación, pudiendo cambiar esta tendencia producto del proceso de escalamiento. El caso más extremo corresponde al modelo GCM HGM, donde el modelo crudo proyecta una disminución de las precipitaciones en torno al 12%, similar al modelo MPI. Sin embargo, y luego del proceso de escalamiento, HGM proyecta un aumento en las precipitaciones en torno al 7%, mientras que MPI prácticamente mantiene su tendencia a pesar del escalamiento. Lo anterior se explica porque, si bien el método de escalamiento permite rescatar la señal de cambio original de los GCMs, las proyecciones están sujetas a la relación que existe entre el modelo histórico crudo y el producto observacional utilizado como base para escalar. Por ello, si estas dos series son lo suficientemente distintas, pueden existir diferencias significativas en las señales de cambio.

La Figura 10 muestra el porcentaje de cambio proyectado para el balance hídrico, obtenido de comparar los resultados del modelo hidrológico en periodo histórico (1985-2005) y futuro (2030-

2050) forzado con cada uno de los modelos GCMs considerados. El balance hídrico representa la partición de flujos dentro de una cuenca, es decir, qué porcentaje de la precipitación vuelve a la atmósfera a través de la evapotranspiración y qué porcentaje se manifiesta como escorrentía, de modo de cerrar la ecuación de balance hídrico para un periodo climatológico:

$$Pp \approx Q - ET$$

Donde Pp es la precipitación, Q es el caudal a la salida de la cuenca y ET es la **evapotranspiración**. Notar que en la ecuación anterior se supone que el cambio en los almacenamientos sería nulo, puesto que se está analizando un periodo temporal de 20 años de extensión.

Es posible apreciar que las variaciones en la evapotranspiración son de menor magnitud que en caudal y precipitación, y que las señales proyectadas en la precipitación repercuten de manera directa en la generación de escorrentía, pero no de forma lineal. Por ejemplo, considerando el modelo MPI, el cual resulta el más desfavorable, una disminución en torno a un 10% en las precipitaciones medias genera una disminución cercana al 20% en los caudales. Por otro lado, disminuciones en torno al 5% en la precipitación media proyectada por un grupo de cinco GCMs, generan una disminución en torno al 10%-15% en los caudales. Por

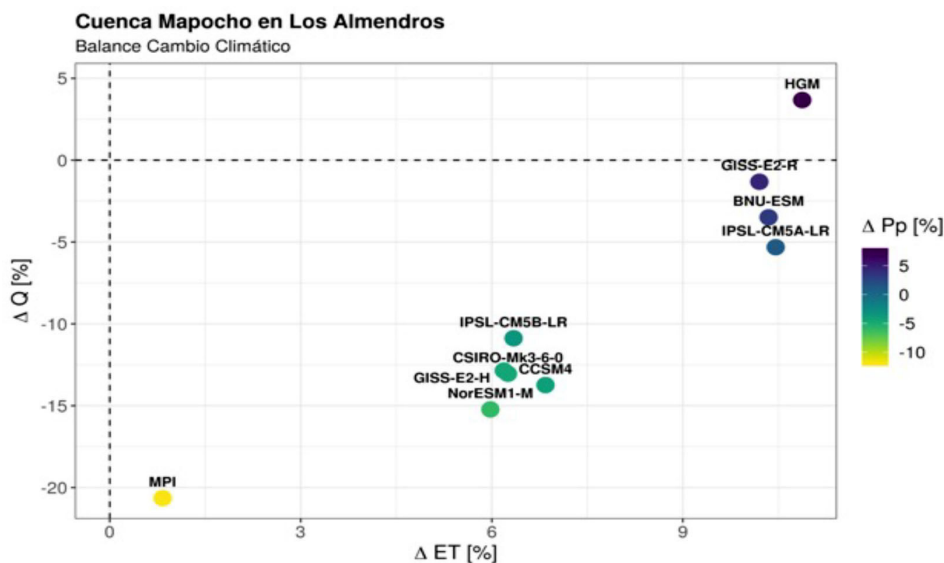


Figura 10. Cambios en el balance hídrico de la cuenca MLA proyectados para el periodo 2030-2050 respecto al periodo histórico (1985-2005).

último, a pesar de existir modelos GCMs escalados que proyectan un aumento en las precipitaciones, estos no necesariamente generan un aumento en la escorrentía. Esto se debe al aumento en la evapotranspiración producto del aumento en las temperaturas. En general, el efecto sobre la evapotranspiración varía dependiendo del GCM analizado. En aquellos modelos donde la disminución de precipitación es cercana al 5%, el aumento de temperatura provoca aumentos de la evapotranspiración en torno a un 6% al suministrar más energía al sistema. Sin embargo, al considerar el modelo MPI (más pesimista en la proyección de precipitación) se observa un aumento de menor magnitud (~1%) en la evapotranspiración, pues en este caso la limitante para evaporar no es la energía (temperatura) sino que la disponibilidad de agua.

Considerando que las proyecciones de aumento de precipitación en la cuenca parecen poco probables, se estima una disminución en el caudal medio anual en torno a 10%-15%, pudiendo incluso llegar a cerca de 20% en el periodo (2030-2060). Por su parte, se espera un aumento en la evapotranspiración en torno al 6%.

La Figura 11 muestra la variación porcentual del caudal medio anual futuro respecto al proyectado en las cuencas YL y MLA, asociado a distintas probabilidades de excedencia. La probabilidad de excedencia

corresponde a la probabilidad de que el caudal sea mayor o igual a un cierto valor. Es decir, probabilidades de excedencia altas se asocian a caudales bajos, y viceversa.

Se proyecta una disminución media de los caudales de MLA en torno al 15% para prácticamente todo el rango de probabilidades de excedencia considerado. Sin embargo, en el rango 20% y 50% de probabilidad de excedencia, la disminución media estaría en torno al 8%. Considerando las forzantes meteorológicas de GCMs más pesimistas, estas disminuciones podrían alcanzar hasta más del 30%.

Para YL, las disminuciones proyectadas para el caudal serían de menor magnitud, con una media cercana al 5% para caudales mayores que la media (es decir para probabilidades de excedencia menores que 50%), y una variación casi nula para caudales de 50% a 85% de probabilidad de excedencia. Sin embargo, para el caso de caudales extremadamente bajos (Q95%), todos los modelos GCM considerados simulan aumentos de caudal, los que llegarían a una media cercana al 7%.

Lo anterior se explica por la mayor contribución glaciar de esta cuenca a la escorrentía. El aumento proyectado en las temperaturas aceleraría el derretimiento

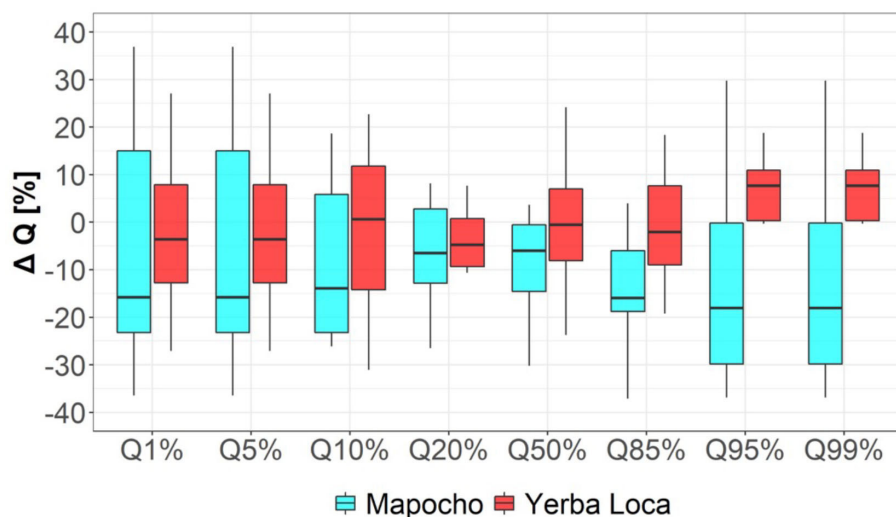


Figura 11. Variación porcentual del caudal medio anual en periodo futuro (2030-2050) respecto a periodo histórico (1985-2005) para distintas probabilidades de excedencia. Las cajas representan los resultados asociados a los 10 GCMs. La línea negra horizontal representa la mediana de los resultados, los bordes de las cajas los percentiles 25% y 75 %, y las líneas verticales los valores extremos.



glaciar, aumentando los caudales respecto al periodo histórico durante años secos. Sin embargo, este mayor derretimiento también aumentaría el retroceso glaciar, variable no considerada en el modelo hidrológico WEAP, el cual conceptualiza los cuerpos glaciares como prismas de área basal constante y altura variable. Por ello, se espera una disminución paulatina del aporte glaciar conforme disminuye su volumen.

Las proyecciones de variación de caudales junto con la tendencia observada durante los últimos años, sugieren la ocurrencia de un empeoramiento de la calidad de las aguas de MLA, en particular durante años secos. La mayor contribución hídrica desde la cuenca alta de YL debido al mayor derretimiento glaciar aumentará los aportes de ARD al sistema. Además, el menor aporte hídrico asociado al resto de los tributarios (los que no cuentan con un significativo aporte glaciar pero sí con una mejor calidad de aguas), disminuirá la capacidad de dilución y neutralización del sistema.

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presenta la caracterización hidroquímica de la cuenca alta del río Mapocho (MLA) y se analizan posibles cambios futuros como consecuencia de cambios proyectados en el clima. **La cuenca de MLA resulta de gran interés, no solo por ser un importante suministro hídrico a la ciudad de Santiago, sino, además por ser una cuenca de montaña que combina procesos de ARD y actividad minera con potencial AMD.** El AMD ha sido catalogado por Naciones Unidas como uno de los problemas ambientales más desafiantes para la sociedad en los próximos años.

Respecto a la hidrología, los análisis muestran la importancia de los procesos nivales y glaciares en el régimen hidrológico de la cuenca, en particular en las cuencas de cabecera donde el porcentaje de cobertura glaciar es mayor. Estos procesos determinan la temporalidad y origen de las aguas a lo largo de la cuenca. **Se destaca la importancia de los glaciares de la cuenca YL, los cuales constituyen un importante aporte para la cuenca MLA, principalmente en los años hidrológicos secos. Esta contribución se torna más relevante al analizar los efectos del cambio climático, debido a que los aumentos proyectados en las temperaturas aceleran el derretimiento glaciar.** Durante periodos secos, el mayor derretimiento glaciar puede incluso aumentar los caudales con relación al periodo histórico.

La calidad de las aguas está principalmente condicionada por el ARD en la parte alta de la cuenca de YL y la actividad minera desarrollada por AAS en la cuenca SF. Respecto a SF y la operación minera de ASS,

la implementación del muro corta fuga, el cual generó el cierre hidrológico de la cuenca de la quebrada Disputada, marca uno de los hitos más importantes en la calidad de las aguas de la cuenca MLA. La implementación del muro corta fuga redujo significativamente el efecto del AMD generado por la mina en un periodo inferior a cuatro años. La mega sequía marca otro hito de interés, dado que en este periodo se intensifica el efecto de ARD en la cuenca de YL, llegando a impactar la calidad de las aguas de MLA.

La generación de ARD ocurre en la parte alta de YL y su impacto en la cuenca está sujeta a las variaciones hidrológicas. Durante el período de acumulación, esta zona se encuentra congelada y no realiza mayores aportes a la escorrentía superficial. Cuando comienza el deshielo, los aportes de la zona alta son menores y logran ser neutralizados por distintos tributarios de aguas alcalinas que tienden a aumentar sus caudales por el derretimiento de nieve. Avanzado el deshielo, ocurren los mayores aportes de ARD desde la zona alta, tanto por derretimiento de nieve como de glaciares. Esto genera que la acidez pueda migrar más abajo en la cuenca, llegando incluso a impactar la salida de MLA cuando los caudales de YL y MO son similares.

En el futuro, se prevé una disminución importante en la escorrentía de MLA, superior al 10%, producto de la disminución en las precipitaciones (-10%) y aumento de la evapotranspiración debido a mayores temperaturas (+1,5°C). **Además, las mayores temperaturas aumentarán el derretimiento glaciar, pudiendo en el futuro aumentar los caudales de YL durante años secos. Esto generará un mayor aporte de ARD desde la cuenca alta de YL sumado a una disminución de los caudales de tributarios que contribuyen a la neutralización y dilución.** Por ello, en el futuro, y en línea con lo observado en otras partes del mundo, se espera que ocurra un empeoramiento de la calidad de las aguas en la cuenca alta del río Mapocho.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Centro Avanzado de Tecnologías para la Minería (AMTC) y al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. También agradecen a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través del proyecto PIA-AFB180004. MLZ agradece el apoyo financiero de la beca de doctorado ANID 21192178. Este estudio

ha sido el fruto de años de trabajo, donde, además de los autores, se reconocen y agradecen los importantes aportes de G. Zegers, F. Saavedra, L. Navarro, A. Navarrete, M. Valenzuela-Díaz, J. P. Correa-Burrows, A. Caro, P. Mendoza, J. McPhee, M. Caraballo y Y. Niño. Los autores agradecen también el apoyo y colaboración de Anglo American Sur en el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Barnett, T. P., Adam, J. C., y Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow dominated regions. *Nature*, 438, 303–309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>, arXiv:arXiv:1011.1669v3
- Bigham, J., Nordstrom, D.K., 2000. Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters. *Reviews in mineralogy and geochemistry* 40, 351–403.
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., y Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., y Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, 150(3), 131–147.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., y Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50, 31–49.
- Caraballo, M. A., Rimstidt, J. D., Macías, F., Nieto, J. M., y Hochella, M. F. (2013). Metastability, nanocrystallinity and pseudo-solid solution effects on the understanding of schwertmannite solubility. *Chemical Geology*, 360–361, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.09.023>
- Caraballo, M. A., Macías, F., Nieto, J. M., y Ayora, C. (2016). Long term fluctuations of groundwater mine pollution in a sulfide mining district with dry mediterranean climate: implications for water resources management and remediation. *Science of the Total Environment*, 539, 427–435.
- Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J. C., Suarez, W., Ramos, C., y Gomez, J. (2012). Simulating the

implications of glaciers' retreat for water management: a case study in the Rio Santa basin, Peru. *Water International*, 37(4), 442-459.

Correa-Burrows, J. P., Navarrete-Calvo, A., Valenzuela-Díaz, M. J., Zapata-Aguiló, V. A., Montserrat, S., Navarro-Valdivia, L., McPhee, J., y 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, 147266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147266>

Dirección General de Aguas. (2018). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro, SIT N°435*. Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación. Santiago, Chile.

Dionizis, D., Ojeda, P., Quezada, S., Lagos, y Montserrat, S. (2021). *Implicancias de la elección del método de escalamiento estadístico de modelos de circulación general en proyecciones de cambio hidrológico*. Enviado a XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Chile, Santiago.

Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120-132.

España, J. S. (2007). The behavior of iron and aluminum in acid mine drainage: speciation, mineralogy, and environmental significance. En T. M. Letcher (Ed.), *Thermodynamics, Solubility and Environmental Issues* (pp. 137-150). Elsevier.

Furniss, G., Hinman, N. W., Doyle, G. A., y Runnells, D. D. (1999). Radiocarbon-dated ferricrete provides are cord of natural acid rock drainage and paleoclimatic changes. *Environmental Geology*, 37, 102-106.

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., y Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010-2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439.

Gutiérrez, F. (2015). *Estudio del origen de la acidez de las aguas en el sector Los Sulfatos*. Informe Final. Anglo American.

Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DiGirolamo, N. E., y Bayr, K. J. (2002). MODIS snow-cover products. *Remote sensing of Environment*, 83(1-2), 181-194.

Hansen, E. (1994). WEAP - A system for tackling water resource problems. An annual review of the European water and wastewater industry. *Water Management Europe*, 94, 74-75.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., y Simmons, A. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.

Hock, R. (2003). Temperature Index Melt Modelling in Mountain Areas. *Journal of Hydrology*, 282, 104-115.

Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R. S., Clague, J. J., Vuille, M., Buytaert, W., Cayan, D. R., Greenwood, G., Mark, B. G., Milner, A. M., Weingartner, R., y Winder, M. (2017) Towards mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, 5, 418-435. <https://doi.org/10.1002/2016EF000514>

Jones, D. B., Harrison, S., Anderson, K., y Whalley, W. B. (2019). Rock glaciers and mountain hydrology: A review. *Earth-Science Reviews*, 193, 66-90. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.001>

Jorquera, C. O., Oates, C. J., Plant, J. A., Kyser, K., Ihlenfeld, C., y Voulvoulis, N. (2014). Regional hydrogeochemical mapping in Central Chile: natural and anthropogenic sources of elements and compounds. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 15, 72-96.

Montecinos, M., Coquery, M., Alsina, M. A., Bretier, M., Gaillard, J. F., Dabrin, A., y Pastén, P. (2020). Partitioning of copper at the confluences of andean rivers. *Chemosphere*, 127318.

Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.

Navarrete, A., (2020). *Control hidrológico y geoquímico en las variaciones espaciales y temporales del drenaje ácido de roca en cuencas andinas de alta montaña (Yerba Loca, Chile)*. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias, mención Geología. Universidad de Chile.

Nordstrom, D.K., McCleskey, R.B., Ball, J.W., 2009. Sulfur geochemistry of hydrothermal waters in yellowstone national park: I: acid-sulfate waters. *Applied Geochemistry* 24, 191-207

Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US Geological Survey Denver, CO.

Plumlee, G. S., Smith, K. S., Montour, M. R., Ficklin, W. H., y Mosier, E. L. (1999). Geologic controls on the composition of natural waters and mine waters draining diverse mineral-deposit types. En L. H. Filipek, G. S. Plumlee (Eds.), *Reviews in economic geology (Vol. 6B), The environmental geochemistry of mineral deposits, Part B: Case studies and research topics* (pp. 373-432). Society of Economic Geologists, Inc.

Quezada, S., Dionizis, D., Ojeda, P., Lagos, M., y Montserrat, S. (2021). Efectos de la incorporación de estaciones meteorológicas de montaña en la reducción de sesgos en productos grillados de temperatura y precipitación. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Chile, Santiago.

Runkel, R. L., Kimball, B. A., McKnight, D. M., y Bencala, K. E. (1999). Reactive solute transport in streams: a surface complexation approach for trace metal sorption. *Water Resources Research* 35, 3829–3840. <https://doi.org/10.1029/1999WR900259>

Sánchez-España, J., Yusta, I., y Diez-Ercilla, M. (2011). Schwertmannite and hydrobasaluminite: A reevaluation of their solubility and control on the iron and aluminum concentration in acidic pit lakes. *Applied Geochemistry*, 26, 1752–1774.

Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105, 3–41.

Toro, J. C., Ortúzar, J., Zamorano, J., Cuadra, P., Hermosilla, J., y Spröhnle, C. (2012). Protracted magmatic-hydrothermal history of the Río Blanco–Los Bronces district, Central Chile: Development of world's greatest known concentration of copper. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 16(10), 105–126.

Valenzuela-Díaz, M. J., Navarrete-Calvo, A., McPhee, J., García, A., Correa-Burrows, J. P., Navarro-Valdivia, L., y Caraballo, M. A. (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*, 125063.

Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., y Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, 43, 1–13. <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>

Williams, M. W., Hood, E., Molotch, N. P., Caine, N., Cowie, R., y Liu, F. (2015). The 'teflon basin' myth: hydrology and hydrochemistry of a seasonally snow-covered catchment. *Plant Ecology & Diversity*, 8, 639–661.

Yates, D. (1996). WatBal: An integrated water balance model for climate impact assessment of river basin runoff. *Water Resources Development*, 12(2), 121–39.

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., y Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. *Water International*, 30(4), 487–500.

Zarroca, M., Roqué, C., Linares, R., Salminci, J., y Gutiérrez, F. (2021). Natural acid rock drainage in alpine catchments: A side effect of climate warming. *Science of The Total Environment*, 778, 146070. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146070>

Zegers, G., Navarro-Valdivia, L., Lagos-Zuñiga, M., Navarrete-Calvo, A., Caraballo, M., Niño, Y., McPhee, J., y Montserrat, S. (2021). An integrated modeling approach for mineral and metal transport in acidic rivers at high mountainous porphyry Cu systems. *Journal of Hydrology*, 126718.

Glosario

ARD: drenaje ácido de roca. Liberación natural de acidez, sulfato y metales disueltos en aguas producto de la meteorización de sulfuros.

AMD: drenaje ácido de mina. Generación de ARD, sobre rocas expuestas a meteorización producto de la actividad minera.

GCM: modelo de circulación general de la atmósfera (acrónimo según iniciales en inglés). Simulan variables de estado y flujos, tanto físicos como químicos, en todo el sistema atmosférico y se utilizan para realizar proyecciones de cambio climático.

Precipitación mineral: reacción química donde el producto es un sólido.

Probabilidad de excedencia: en hidrología estadística, representa la probabilidad de que el valor de una variable (p.e., caudal) sea mayor o igual a cierto valor de referencia.

Alteración hidrotermal: proceso de transformación mineralógica, química y textural de una roca, producto de la interacción con fluidos hidrotermales.

Meteorización: proceso de desintegración física o química de minerales y rocas por interacción con la atmósfera, hidrósfera y biósfera.

Escorrentía: componente del ciclo hidrológico que hace referencia a la lámina de agua proveniente de la precipitación que escurre sobre la superficie de una cuenca.

Mineralización: proceso de incorporación de minerales de interés en rocas preexistentes.

Evapotranspiración: componente del ciclo hidrológico que representa la suma de todos los flujos que van desde la cuenca hacia la atmósfera. Agrupa evaporación desde cuerpos de agua, transpiración vegetal, entre otros.

Sorción: proceso físico-químico en el cual una sustancia se adhiere a otra.