



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS

PARADOJA CLIMÁTICA Y DE RECURSOS: CÓMO EL CAMBIO CLIMÁTICO RESTRINGE LOS RECURSOS PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

PAULINA SOPHIA FERNÁNDEZ MUÑOZ

PROFESOR GUÍA:

LUIS ORELLANA ESPINOZA

PROFESOR CO-GUÍA:

EMILIO CASTILLO DINTRANS

MIEMBROS DE COMISIÓN:

IRENE DEL REAL CONTRERAS

ANDREINA GARCÍA GONZALEZ

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto FONDEF 20I10147

SANTIAGO DE CHILE

2023

**RESUMEN TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: Magíster en Minería
POR: Paulina Fernández Muñoz
FECHA: 2023
PROFESOR GUÍA: Luis Orellana Espinoza**

PARADOJA CLIMATICA Y DE RECURSOS: CÓMO EL CAMBIO CLIMÁTICO RESTRINGE LOS RECURSOS PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

El cambio climático es uno de los desafíos más importantes de la última década, con peligros directos para el crecimiento económico y el desarrollo de la sociedad global moderna. Entre los sectores productivos estratégicos afectados, destaca la minería, donde la producción de metales y minerales es clave para los objetivos de la transición energética. La minería en Chile representa el 50% de las exportaciones totales en valor, siendo el primer productor mundial de cobre. Sin embargo, las instalaciones mineras en Chile se ubican en zonas altamente vulnerables a los impactos negativos del cambio climático, lo que las hace susceptible a riesgos en la cadena de suministro.

En este trabajo se desarrolla una metodología para evaluar los efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos, aplicable a distintas operaciones mineras de la gran minería de cobre en Chile, con el objetivo de mejorar la comprensión de cómo el cambio climático puede afectar la producción de recursos minerales. La metodología empleada combina datos de producción y frecuencia de ocurrencia de amenazas proyectadas al futuro, junto con información actual de factores y subfactores de vulnerabilidad de la cadena de suministro. La modelación se realizó utilizando la metodología de Schnebele et al. (2019).

Los resultados muestran que la producción de cobre en Chile se ha visto afectada negativamente por precipitaciones extremas y sequías, con pérdidas de 1.77% y 6.56%, respectivamente. Para el futuro se pronostica que las pérdidas de producción anual serán aún mayores, en el caso de precipitaciones extremas entre 91,000 y 334,000 toneladas métricas de cobre, equivalente al 1.39% a 5.08%, es decir, a la producción anual de las minas Zaldívar y Los Pelambres. En el caso de sequías se prevé entre 173,000 y 709,000 toneladas métricas de cobre, equivalente al 2.65% y 10.78%, es decir, a la producción anual de las minas Ministro Hales y Collahuasi.

Se concluye que la disponibilidad de información es un factor crítico para pronosticar los impactos del cambio climático en la industria minera. Los resultados también revelan las consecuencias de no tomar acciones para adaptarse ante amenazas climáticas futuras y orientan a las empresas y a los responsables políticos para que sean más conscientes de los impactos del cambio climático. Como consideraciones para trabajos futuros, se deberían incluir otras amenazas climáticas, como las costeras y eventos extremos como tormentas y olas de calor y frío. Además, se debería ampliar el estudio a otras instalaciones de cobre en el mundo e incluir otras materias primas. Finalmente, se sugiere la inclusión de la cuantificación de pérdidas de vida, viviendas y fauna local que podrían determinarse a partir de esta metodología, como insumo importante para las comunidades.

ABSTRACT

Climate change is one of the biggest problems of the last 10 years. It poses a direct threat to economic growth and the growth of a modern global society. Among the strategic productive sectors affected, mining stands out, where the production of metals and minerals is key to the goals of the energy transition. Mining in Chile represents 50% of total export value, being the world's top producer of copper. However, mining facilities in Chile are located in highly vulnerable areas to the negative impacts of climate change, making them susceptible to risks in the supply chain.

This work develops a methodology to evaluate the effects of climate change on resource availability, applicable to different copper mining operations in Chile, with the aim of improving understanding of how climate change can affect mineral resource production. The methodology combines production data and the frequency of occurrence of projected future threats, along with current information on vulnerability factors and subfactors of the supply chain. The modeling was done using the Schnebele et al. (2019) methodology.

The results show that copper production in Chile has been negatively affected by extreme precipitation and droughts, with losses of 1.77% and 6.56%, respectively. For the future, it is forecasted that annual production losses will be even greater, in the case of extreme precipitation between 91,000 and 334,000 metric tons of copper, equivalent to 1.39% to 5.08%, or the annual production of Zaldívar and Los Pelambres mines. In the case of droughts, it is predicted that between 173,000 and 709,000 metric tons of copper, equivalent to 2.65% and 10.78%, or the annual production of the Ministro Hales and Collahuasi mines.

It is concluded that information availability is a critical factor for predicting the impacts of climate change on the mining industry. The results also reveal the consequences of not taking action to adapt to future climate threats and guide companies and policymakers to be more aware of the impacts of climate change. As considerations for future work, other climate threats, such as coastal hazards and extreme events like storms and heat waves, should be included. Additionally, the study should be expanded to other copper facilities in the world and include other raw materials. Finally, the quantification of losses of life, housing, and local fauna that could be determined from this methodology is suggested as an important input for communities.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis de magister se ha realizado con el financiamiento del proyecto FONDEF 20I10147.

En primer lugar, agradezco a mi profesor guía Luis Felipe Orellana, por haberme brindado la oportunidad de participar en el proyecto y en las diferentes actividades que surgieron a lo largo de mis estudios de Magíster. A mi profesor co-guía Emilio Castillo por sus consejos, recomendaciones y por su disposición a enseñar y ayudarme. A ambos agradezco su guía, orientación, confianza, apoyo y tiempo, que sin duda aportaron de forma invaluable a mi desarrollo profesional y a la motivación de continuar en el área de la investigación, para realizar estudios de doctorado. Agradezco a Cristian Cifuentes de Cochilco, por su disposición a resolver las inquietudes surgidas y por la información proporcionada. A Jorge Del Río por proporcionar parte de la información que fue utilizada en esta tesis.

Agradezco al constante apoyo por parte de Carol Tapia y Gloria Jiménez, quienes me guiaron por los diversos trámites administrativos que compete al programa de Magíster.

Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida. A mi madre por su ejemplo de superación y esfuerzo y por apoyarme en las decisiones de continuar mis estudios y así cumplir mis metas profesionales. A mi padre, por las palabras de aliento, por su cariño. A mis hermanos, Eavy, Felipe y Amaro por las risas, buenas ideas. A mi prima Nicol y primo Mateo, por su entusiasmo y las palabras de buena onda y de apoyo. A mi abuelita Margarita por sus buenos deseos. A mi abueli María por acompañarme a la distancia. A mi familia perruna y gatuna por los momentos de felicidad que me dan todos los días. A mi amiga Coni por su cariño y comprensión. A Ignacio por su cariño constante, risas y apoyo incondicional. A todos los miembros de mi familia que directa o indirectamente me brindaron su apoyo y compañía en este proceso.

Agradezco a todas las personas que conocí durante este tiempo en el Magíster, Franco, Saman y Javiera y a mi amigo de Geología que siempre ha estado Cristóbal, por su ayuda e inteligencia en cualquier tema y palabras de aliento.

En fin, a todas las personas que de una y otra forma estuvieron y están en este proceso tan importante de mi vida profesional.

Tabla de contenido

CAPITULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Preámbulo.....	1
1.2 Motivación	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Alcances	3
1.5 Metodología	3
1.6 Antecedentes de Estudio	13
1.7 Resumen de la investigación	18
CAPITULO 2	19
2. Article: Resource and climate paradox: How climate changes restricts resources for the energy transition	19
2.1 ABSTRACT	19
2.2 INTRODUCTION.....	19
2.3 METHODS AND DATA SOURCES.....	20
2.4 RESULTS.....	26
2.5 DISCUSSION	34
2.6 CONCLUSION	37
2.7 ACKNOWLEDGEMENTS	40
CAPITULO 3	41
3. Discusiones	41
CAPITULO 4	44
4. Conclusión y futuros trabajos	44
4.1 Conclusiones	44
4.2 Futuros trabajos y recomendaciones	45
Bibliografía.....	45
Anexos.....	52
Anexo A: Información climática	52
Anexo B: Subfactores de vulnerabilidad	54
Anexo C: Pérdidas productivas.....	56

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Ejemplos de producciones actuales (2021) vs producciones proyectadas (2030). Fuente: COCHILCO (2019).	4
Tabla 1.2. Categorías del índice de adaptación. Fuente: Propio.....	7
Tabla 1.3. Huella Hídrica Azul por región. Fuente: Fundación Chile (2018).	11
Tabla 1.4. Principales países productores de cobre a nivel mundial. Fuente: Sernageomin (2021).	17
Table 2.1. Vulnerability factors assessed for extreme precipitations and drought. Source: Own.	23

Table 2.2.	Continuation. Vulnerability factors assessed for extreme precipitations and drought. Source: Own.	24
Table 2.3.	Characteristics of disruptive climate events. Source: Own.	27
Table 2.4.	EAD by model for each mining facility. Source: Own.	33
Table 2.5.	EAD (%) by climatic hazard for each geographic area. Source: Own.	35
Tabla 3.1.	Comparación de índices climáticos, días secos consecutivos y olas de calor. Fuente: Propio basado en la base de datos de ARClím (MMA, 2022).	42
Tabla 3.2.	Escenarios de proyección esperada, máxima y mínima de producción, entre el 2019 y 2030, en miles de toneladas. Fuente: COCHILCO (2019b).	43
Tabla A.1.	Estaciones meteorológicas utilizadas en este trabajo. Fuente: CR2 (2022).	52
Tabla A.2.	Continuación. Estaciones meteorológicas utilizadas en este trabajo. Fuente: CR2 (2022).	53
Tabla A.3.	EAD precipitaciones extremas para cada instalación minera bajo escenario RCP2.6.	56

Índice de Figuras

Figura 1.1.	Ejemplo estación pluviométrica cercana a la faena minera de Collahuasi y Quebrada Blanca. Fuente: Explorador Climático.	6
Figura 1.2.	A) Mapa de elevaciones (m) y B) Mapa de pendientes (°). Fuente: Propio basado en la información de https://code.earthengine.google.com/	8
Figura 1.3.	Mapa de erosión de la I a VI región de Chile. Fuente: CIREN (s. f.).	9
Figura 1.4.	Agua continental por procesamiento mineral por región desde el 2013 al 2019. Fuente: COCHILCO (2020).	10
Figura 1.5.	Ejemplo de frecuencia de ocurrencia de precipitaciones extremas en A) Escondida y B) Salvador. Fuente: Propio.	13
Figura 1.6.	Cambio en la temperatura de la superficie global (promedio anual) observado y simulado utilizando factores humanos y naturales (2850-2000). Fuente: IPCC (2021).	14
Figura 1.7.	Cambios en la temperatura media anual de la superficie y las precipitaciones. A) Cambios de temperatura media anual (°C) en relación con 1850-1900. B) Cambio medio anual de precipitación (%) en relación con 1850-1900. Fuente: IPCC (2021).	16
Figure 2.1.	2021 production of copper mines in Chile. Source: Own base on COCHILCO database (COCHILCO, 2022b).	22
Figure 2.2.	Map of precipitation hazard above 20 mm in the (A) present (1980-2010), (B) near future (2035-2065) and (C) difference between future and present hazard. Source: Own based on ARClím database (Ministerio del Medio Ambiente, 2022).	26
Figure 2.3.	Disruption events by period. Source: Own based on newspapers, sustainability reports and mining Company websites.	27

Figure 2.4. Production losses due to extreme precipitation (A) by region and (B) geographic area. Production losses due to drought (C) by region and (D) geographic area. Source: Own.....	28
Figure 2.5. Map of the frequency of occurrence of climate hazards for each facility. (A) and (B) are the frequencies used for the extremes precipitations events and (C) for the droughts events. Source: Own based on ARClim database (Ministerio del Medio Ambiente, 2022).	29
Figure 2.6. (A) Vulnerability model for extreme precipitation hazard (Model P). (B) Vulnerability model for drought hazard (Model D). Source: Own.	30
.....	54
Figura A.1. Oferta referencial de aguas superficiales. Fuente: Fundación Chile (2018).....	54
Figura A.2. Oferta referencial de aguas subterráneas. Fuente: Fundación Chile (2018).....	55

CAPITULO 1

1. Introducción

1.1 Preámbulo

En la actualidad, el cambio climático es uno de los mayores desafíos globales que enfrenta la sociedad. Este fenómeno, causado principalmente por la emisión excesiva de gases de efecto invernadero, ha generado graves consecuencias a nivel global, tales como el aumento de la temperatura, variación de las precipitaciones, sequías agrícolas y ecológicas, mayor proporción de ciclones tropicales intensos, reducciones de las capas de hielo y la acidificación de los océanos (IPCC, 2021). A medida que las temperaturas globales continúan aumentando, las consecuencias se vuelven cada vez más evidentes, incluyendo la escasez de recursos y los efectos negativos en los ecosistemas y la salud humana. Entre los sectores que más contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero se encuentra la industria minera, que representa una gran parte de la economía mundial.

En este contexto, la transición energética se ha convertido en una prioridad para reducir la huella de carbono y mitigar los impactos del cambio climático. Sin embargo, las restricciones de recursos debidas a este fenómeno dificultan la transición energética y la adopción de fuentes de energía renovables. La minería, en particular, enfrenta desafíos significativos debido a la ubicación geográfica compleja de sus instalaciones, lo que aumenta el riesgo ante las condiciones climáticas cambiantes y sus impactos en las operaciones mineras. Como consecuencia, la minería se ve obligada a desarrollar nuevas estrategias para afrontar los desafíos del cambio climático, buscando soluciones innovadoras y sostenibles para mantener su competitividad y al mismo tiempo contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Chile, un país altamente dependiente de sus recursos naturales, se ha visto especialmente afectado por el cambio climático. Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Chile cumple con la mayoría de los 9 criterios de vulnerabilidad enunciados (Ministerio del Medio Ambiente, 2012), destacando entre ellos, áreas costeras de baja altura, zonas áridas y semiáridas, áreas propensas a la sequía y zonas montañosas. En particular, la minería en Chile, ha tenido consecuencias negativas debido a eventos climáticos extremos de precipitaciones y sequías, especialmente en términos de pérdidas productivas y en la seguridad de las operaciones mineras. La falta de agua puede limitar el suministro de energía hidroeléctrica, el uso de agua en los procesos de producción y la disponibilidad de agua para las comunidades cercanas a las minas. Por otro lado, las precipitaciones extremas pueden causar inundaciones, deslizamiento de tierra y otros eventos que pueden dañar la infraestructura minera (Rivera et al., 2020), como rutas de acceso, sistema de transporte y equipos e interrumpir el suministro de energía eléctrica (Kracht & Salinas, 2021).

1.2 Motivación

La minería es una actividad económica de gran importancia para el desarrollo de Chile, gracias a su aporte al Producto Interno Bruto (PIB), los ingresos fiscales, exportaciones, empleo, inversiones,

así también transfiriendo tecnología y conocimiento al servicio de sus proveedores y comunidades aledañas (COCHILCO, 2013). Respecto a la producción de cobre en Chile, representa el 50 % del valor de las exportaciones totales, siendo considerado con un 28.5 % el principal productor a nivel mundial. Sin embargo, el cambio climático está teniendo un impacto significativo en la industria minera, restringiendo los recursos para la transición energética y afectando directamente la productividad y la rentabilidad de las operaciones mineras.

El cambio climático ha generado nuevos desafíos para la minería, tales como la disminución de los recursos hídricos disponibles, el aumento de la frecuencia de fenómenos climáticos extremos y la mayor variabilidad climática. Todos estos factores pueden afectar la productividad de las operaciones mineras y, por ende, su rentabilidad. Además, la pérdida de productividad en la minería puede tener importantes efectos económicos y sociales en las regiones mineras y en el país en su conjunto. Esto ha llevado a una necesidad urgente de encontrar soluciones innovadoras y sostenibles para hacer frente a los desafíos climáticos y garantizar la viabilidad a largo plazo de la industria minera de cobre en Chile.

Investigaciones recientes se han centrado en el estudio de la criticidad mineral para evaluar la interrupción de la cadena de suministro, considerando factores económicos, políticos, sociales y, en ocasiones, medioambientales (Eheliyagoda et al., 2020; European Commission, 2014; Graedel et al., 2015; Helbig et al., 2018; Northey et al., 2017; Schneider et al., 2014; Watari et al., 2020). Sin embargo, los esfuerzos para reconocer y abordar la sensibilidad de la industria minera a los cambios climáticos, aún no son considerados ampliamente.

En este contexto, esta tesis de magíster se centrará en la cuantificación de las pérdidas productivas en las instalaciones mineras de la gran minería de Chile debido a amenazas climáticas extremas como las sequías y las precipitaciones extremas. La comprensión de estos impactos es fundamental para identificar los riesgos y oportunidades que se presentan para la minería en el contexto de la transición energética hacia una economía más sostenible y baja en carbono.

El trabajo se estructura como sigue. El capítulo 1 consiste en una introducción general donde se explicitan objetivos y alcances, se detalla la metodología y se incluye los antecedentes bibliográficos bajo las cuales se enmarca este estudio. En el segundo capítulo se menciona nuevamente las metodologías empleadas con menor detalle, los resultados, las discusiones y conclusiones desarrolladas en esta investigación. Este capítulo corresponde a un manuscrito en preparación, titulado “*Resource and climate paradox: How climate changes restricts resources for the energy transition*”. El tercer capítulo resume las discusiones del capítulo 2 e incluye otras. El cuarto capítulo resume las conclusiones principales de este trabajo. Finalmente, se incluyen anexos que contienen una mayor especificación de la información recabada en este estudio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Desarrollar una metodología para la evaluación de los efectos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos, que sea aplicable a distintas operaciones mineras.
- Evaluar los efectos del cambio climático aplicando la metodología elaborada para el caso de Cu en Chile.

1.3.2 Objetivo específicos

- Determinar las amenazas climáticas pasadas y futuras que han afectado o afectarán al sector minero.
- Evaluar los factores de vulnerabilidad para cada evento climático identificado.
- Proyectar y modelar la frecuencia de ocurrencia de intensidad de los eventos climáticos.
- Cuantificar la interrupción en la producción de cobre en Chile
- Proponer medidas de adaptación para la resiliencia

1.4 Alcances

Las siguientes restricciones y consideraciones se adoptarán a lo largo del desarrollo de esta investigación:

- Zona de estudio: La evaluación de la metodología se realizará para las operaciones de la gran minería de cobre de Chile, abarca desde la región de O'Higgins hacia el norte. De esta manera, se eliminará del análisis a sectores productivos distintos al cobre y se limitará dejando a sectores mineros de pequeña y mediana minería fuera del análisis. Se consideró tal zona de estudio debido a que las grandes faenas productoras de cobre en Chile se encuentran en esta zona, con equivalente en cobre fino para el 2020 en esas regiones de 5.772.192 toneladas métricas, siendo las grandes empresas equivalentes a 5.580.182 toneladas métricas.
- Objeto de estudio: Debido a la reportabilidad de información por parte de cada mina, se considerará como objeto de estudio a las instalaciones mineras en su conjunto independiente si corresponden a explotación mina, plantas de procesamiento y depósitos de residuos mineros masivos.
- Periodo de tiempo: En base a la disponibilidad de información respecto a las proyecciones futuras de la producción de cobre y las condiciones climáticas, se evaluará en el corto plazo (2030-2065).
- El análisis de eventos climáticos, así como el impacto se acotará a la información obtenida durante el transcurso de la investigación.

1.5 Metodología

Basado en la metodología de Schnebele et al. (2019), se cuantificó el riesgo de interrupción del suministro de cobre por evento climático para cada instalación perteneciente a la gran minería del

cobre en Chile (I-VI región), al combinar, (i) Producción proyectada de cada instalación, (ii) Vulnerabilidad de la cadena de suministro y (iii) Riesgo climático pronosticado en la ubicación de cada instalación de suministro de cobre.

1.5.1 Pronostico de la producción

Para cuantificar la exposición de la producción de la gran minería de cobre en Chile ante amenazas climáticas se recopilaron datos de producción de cobre de 2021 y datos de proyección de producción de cobre al 2030 a nivel de instalación. La fuentes de información fueron los informes y base de datos de COCHILCO (Comisión Chilena del Cobre, organismo técnico y altamente especializado, cuya función es asesorar al Gobierno de Chile en materias relacionadas a la producción del cobre y sus subproductos), quienes informan para las proyecciones de la producción de cobre al 2030, un incremento de 20.7%, respecto a la producción del 2018, lo cual equivale a que Chile alcance una producción de cobre de 7.04 millones de toneladas al año 2030 (COCHILCO, 2019b). La Tabla 1.1 muestra ejemplo de producciones en el 2021 vs proyecciones al 2030.

Tabla 1.1. Ejemplos de producciones actuales (2021) vs producciones proyectadas (2030). Fuente: COCHILCO (2019).

Mina	Producción actual	Producción proyectada
Chuquicamata	319,280	385,371
Escondida	1,011,327	1,032,261
El Teniente	459,817	554,999

1.5.2 Vulnerabilidad en la cadena de suministro

Los eventos climáticos de interrupción del suministro en el pasado fueron investigados con el objetivo de determinar los impactos de estas amenazas sobre las instalaciones mineras de cobre y así cuantificar el modelo de vulnerabilidad. Esta información se recopiló a partir de la base de dato de Hatayama & Tahara (2018), quienes introdujeron una perspectiva objetiva para la evaluación de la criticidad, analizando 448 eventos de interrupción del suministro para 22 metales, entre los que se destaca la variable de desastre natural, como un factor que ha causado interrupción a faenas mineras. Estos autores, recopilaron un total de 9 interrupciones ante desastre natural para el caso del cobre en Chile, de las cuales 5 corresponden a eventos climáticos y 4 a terremotos. Comenzando con esos 5 eventos climáticos y sumando información de reportes de sustentabilidad de las empresas mineras, periódicos y páginas web, se reunió un conjunto de datos que contenía 53 eventos climáticos, que abarcaban instalaciones mineras de cobre que han sufrido pérdidas de producción desde el 2001 por precipitaciones extremas y desde el 2014 por sequías. La lista de eventos climáticos se proporciona como información de apoyo (Tabla S1), con las siguientes variables: Año ocurrencia evento climático; Fecha específica; Duración del evento (días); Instalación (nombre mina); Área

geográfica (Norte o Centro-Sur); Región (I-VI); Causa; Efecto; y Pérdida de producción. Esta última variable se obtiene de la siguiente manera:

- Pérdida productiva informada: La información de las pérdidas productivas se menciona en los reportes de sustentabilidad, periódicos y/o páginas web.
- Pérdida productiva calculada: No se informa la pérdida productiva, pero se tiene información de la duración del evento climático. Se calcula considerando que un año productivo tiene 360 días y que la producción es el promedio de la producción del año (i) anterior (i-1) con la producción de 2 años anteriores (i-2), lo anterior se observa en la ecuación (1).

$$Pérdida\ productiva_{calculada} = \frac{Producción_{i-2} + Producción_{i-1}}{360} \cdot Duración\ evento\ (1)$$

- Pérdida productiva ajustada: Las Pérdida productiva calculada se ajusta considerando que la diferencia ente Pérdida productiva informada y Pérdida productiva calculada es, en promedio de un 11%, dato a partir del cual se ajustan los valores en la base de datos.

Para obtener el modelo de vulnerabilidad de las instalaciones de la producción del cobre, se utiliza las pérdidas de producción de cada instalación recién mencionadas y su relación con el factor de vulnerabilidad (FV). El FV, corresponde al promedio ponderado de los factores y subfactores que determinan la propensión o predisposición de las instalaciones mineras a verse afectado adversamente por eventos climáticos (Giz & Eurac, 2017) y es definido y caracterizado en base al evento climático a estudiar, en este caso, precipitaciones extremas y sequías. A continuación, se detallan los factores y subfactores a utilizar para cada evento climático:

- Factores y subfactores comunes para evento de precipitaciones extremas y sequías:
 - Intensidad del evento climático (PP): Se mide en mm y la información es extraída del Explorador Climático CR2 en base a las estaciones pluviométricas ubicadas cercanas a las minas en estudio (Tabla A1). En la Figura 1.1 se observa un gráfico de precipitaciones desde el 2001 al 2020 para la zona donde se encuentran ubicadas las faenas mineras de Collahuasi y Quebrada Blanca. Se considera que, a mayor intensidad de precipitación, mayor es la vulnerabilidad.

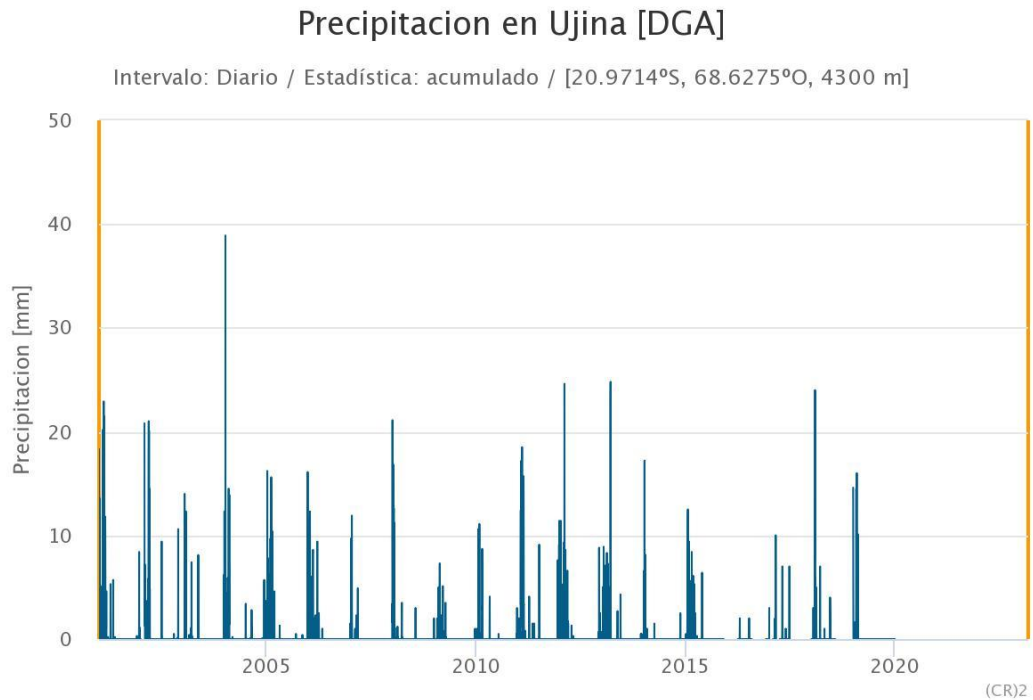


Figura 1.1. Ejemplo estación pluviométrica cercana a la faena minera de Collahuasi y Quebrada Blanca. Fuente: [Explorador Climático](#).

- Características internas de la faena (CI): Características intrínsecas de cada faena minera en base a clasificación de la empresa de acuerdo a la producción anual, existencia de relación con otras empresas y a la pertinencia de sus medidas de adaptación ante el cambio climático.
 - Coordinación de empresas: Corresponde a un índice para medir la dificultad de establecer un plan de adaptación, debido a que este puede contener requerimientos en los que se hace importante el compromiso de las empresas circundantes una de otra y su coordinación (Del Río Sánchez, 2022). Mientras mayor cantidad de dueños diferentes existe en un área específica, mayor tiempo tardará la toma de decisiones y negociaciones y, por lo tanto, tardanza en aplicar las medidas, por lo tanto, mayor vulnerabilidad. La información de la ubicación de las instalaciones es obtenida del Ministerio de Minería ([Faenas Mineras](#)) y el índice se calcula considerando la cantidad de dueños diferentes de las instalaciones que existe en una superficie de 25 km².
 - Tamaño faena: Se calcula en base al promedio anual de la producción de los últimos 5 años. La información se obtiene de COCHILCO ([Producción minera](#)). De acuerdo a la hipótesis de adaptación, a mayor tamaño de faena, existirá mayor disponibilidad de recursos e instrumentos para adaptación, por lo tanto, la vulnerabilidad será menor.

- Adaptación: Índice promedio anual de la evolución de los planes de adaptación ante el riesgo del cambio climático. La información se obtuvo a partir de los reportes de sustentabilidad de cada empresa desde el 2001 al 2021, evaluando las categorías que aparecen en la Tabla 1.2. Considera, a mayor valor de índice de adaptación, menor es la vulnerabilidad, dado que las empresas se encontrarán más preparadas para hacer frente el cambio climático.

Tabla 1.2. Categorías del índice de adaptación. Fuente: Propio.

Índice	Categoría	Descripción
0	No se menciona	En el reporte no menciona concepto de cambio climático, mitigación ni adaptación.
1	Comprensión de la situación	La empresa reconoce la existencia del cambio climático y propone medidas de mitigación para disminuir sus efectos.
2	Reconocimiento	La empresa reconoce que el cambio climático los puede afectar.
3	Identificación	Identifica y utiliza información climática para reconocer los riesgos.
4	Evaluación	Evalúa los riesgo climáticos que pueden afectar a las instalaciones mineras.
5	Generación	Comienza el desarrollo de medidas y planes de adaptación para enfrentar el cambio climático.
6	Ejecución	Pone en marcha medidas de adaptación.
7	Revisión	Revisa, corrige y sugiere cambios a los planes de adaptación ya desarrollados.

- Factores y subfactores para evento de precipitaciones extremas:
 - Topográficos (CT): Características de la superficie terrestre obtenida en base a Modelos Digitales de Elevación (MDE), en específico, se utilizó ALOS PALSAR de 30 m y el software ARCGIS.
 - Elevación del terreno: Elevación en m de la ubicación de cada instalación a una resolución de 30 m². Se considera a mayor elevación topográfica de la instalación, mayor es la intensidad de precipitación y, por lo tanto, mayor es la vulnerabilidad. La Figura 1.2A presenta el mapa de elevaciones del área de estudio.
 - Pendiente del terreno: Pendiente en grados de la ubicación de cada instalación a una resolución de 30 m². Se considera que mientras más empinado el terreno donde se ubica la instalación, la mina podría ser más vulnerable a deslizamiento de tierra (Rivera et al., 2020). La Figura 1.2B muestra el mapa de pendientes del área de estudio.

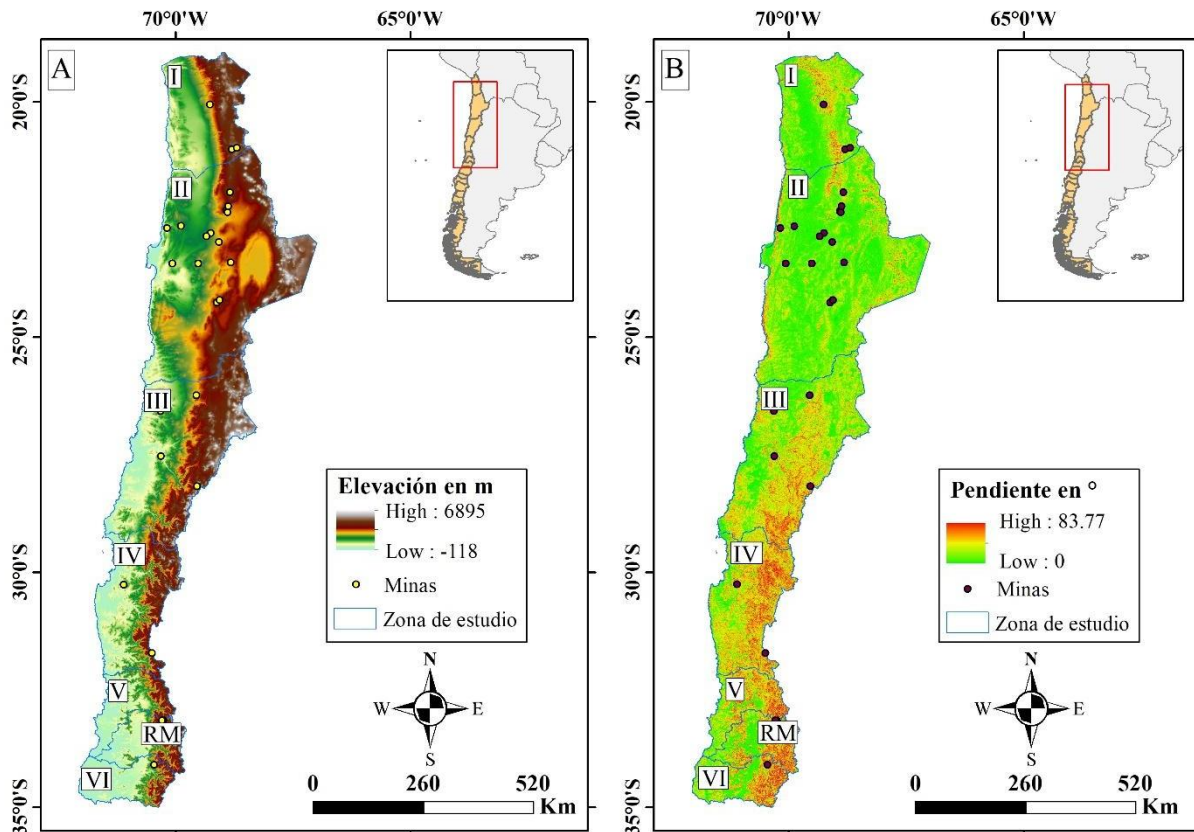


Figura 1.2. A) Mapa de elevaciones (m) y B) Mapa de pendientes ($^{\circ}$). Fuente: Propio basado en la información de <https://code.earthengine.google.com/>.

- Geología (GEO): Características o procesos que condicionan eventos de inestabilidad del terreno.
 - Erosión: Capacidad del suelo para resistir la erosión. Se refiere a la susceptibilidad de un suelo respecto a los agentes erosivos locales y varía de un suelo a otro en función de sus propiedades. Deriva de procesos que pueden afectar la estabilidad de los componentes de una instalación minera, ya sea por desmoronamiento, deslizamiento, subsidencia o desnivel del terreno (Figuroa Vera, 2012) (Figura 1.3). La información se obtiene de CIREN, Centro de Información de Recursos Naturales ([Erosión](#)). Se considera que a mayor índice de erodabilidad, mayor es la vulnerabilidad.

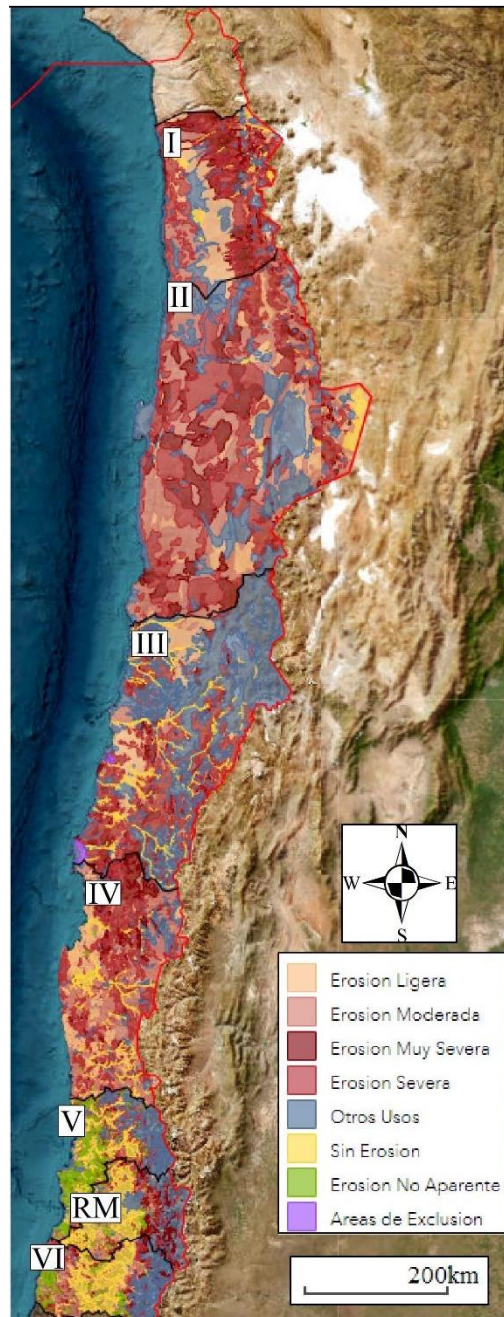


Figura 1.3. Mapa de erosión de la I a VI región de Chile. Fuente: CIREN (s. f.).

- Factores y subfactores para evento de sequías:
 - Tecnológicos (TEC): Características de las faenas mineras respecto al avance tecnológico en temas hídricos en base a la innovación de sus instalaciones para dejar de utilizar agua continental y reemplazarla por el uso de agua de mar.
 - Accesos a agua de mar: Distancia mínima en km de la instalación a una planta desalinizadora. La información de la ubicación de las plantas

desalinizadoras es obtenida de Minería Mapas, una plataforma para examinar información territorial ([Desalinizadoras](#)). La distancia se calcula utilizando esta información junto a la información de la ubicación de las instalaciones mineras utilizando el software ARCGIS. Se considera que a mayor distancia mayor es la vulnerabilidad.

- Agua de mar por faena: Cantidad de agua de mar en Mm^3 utilizada por cada faena. La información es obtenida de los reportes de sustentabilidad de cada empresa. Se considera a mayor uso de agua de mar en la instalación, menor es la vulnerabilidad.
- Consumo de agua (CA): Correspondiente al uso de agua continental en base al mineral procesado por región, por instalación y al agua fresca extraída de fuentes superficiales y/o subterráneas. Se considera que a mayor consumo de agua mayor es la vulnerabilidad de la instalación.
 - Agua continental por procesamiento mineral: Cantidad de agua de origen continental en m^3 según tonelada de mineral procesado obtenido de cada región de Chile (Figura 1.4). La información se obtiene de COCHILCO ([Consumo de agua en la minería](#)).

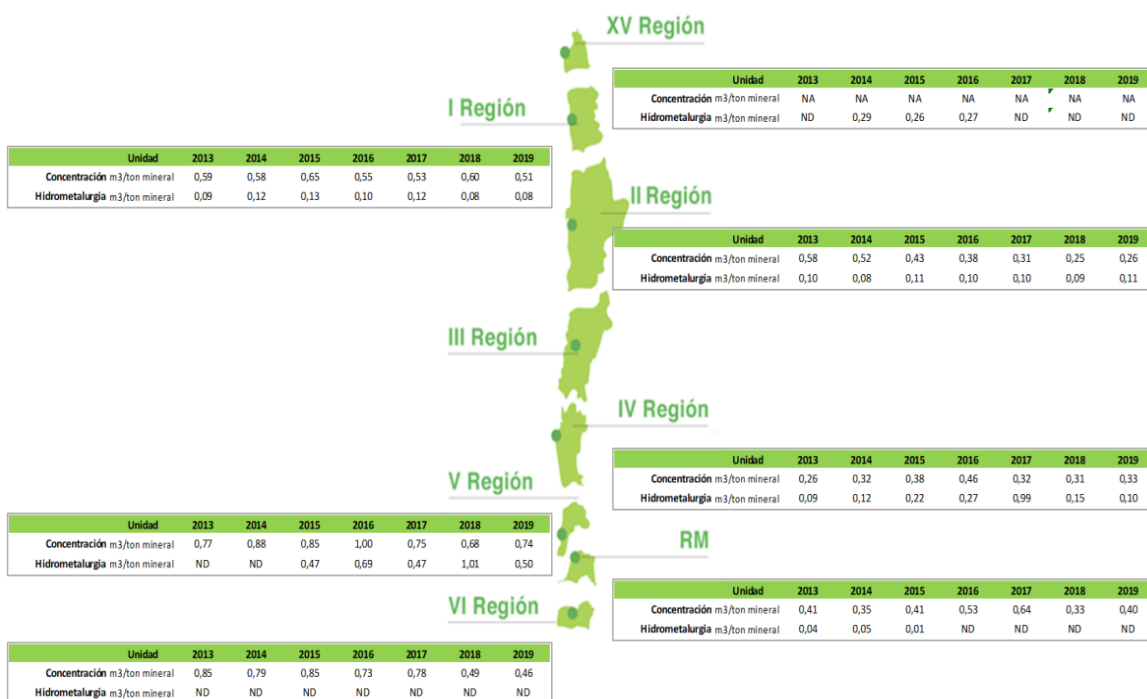


Figura 1.4. Agua continental por procesamiento mineral por región desde el 2013 al 2019. Fuente: COCHILCO (2020).

- Agua continental por faena: Consumo de agua continental en Mm^3 utilizada por cada instalación minera. La información es obtenida de los reportes de sustentabilidad de cada empresa.

- Huella Hídrica Azul (HH Azul): Volumen de agua fresca de fuentes superficiales y/o subterráneas en m³/s y que no se retorna al ambiente de donde se extrajo (Tabla 1.3). Este “no retorno” puede ocurrir por: 1) Evaporación o evapotranspiración de agua; 2) Incorporación de agua en el producto; 3) Agua que no retorna a la misma cuenca de extracción o que se vierte al mar y; 4) Retención de agua en el suelo (Fundación Chile, 2018). La información se obtiene para cada región de Chile de Fundación Chile ([Huella Hídrica](#)).

Tabla 1.3. Huella Hídrica Azul por región. Fuente: Fundación Chile (2018).

Región	HH Azul (m ³ /s)
Arica y Parinacota	2.37
Tarapacá	1.92
Antofagasta	5.72
Atacama	5.23
Coquimbo	21.96
Valparaíso	25.94
Metropolitana	36.11
Libertador General Bernardo O’Higgins	46.39
Maule	50.07
Biobío	12.35
Araucanía	3.50
Los Ríos	0.35
Los Lagos	1.14
Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	0.15
Magallanes y la Antártica Chilena	0.53

- Disponibilidad de agua (DA): Correspondiente al volumen de agua a ser utilizado en base a la oferta de aguas superficial y subterránea. La información se obtiene de Fundación Chile ([Huella Hídrica](#)). Se considera que a mayor disponibilidad de agua menor es la vulnerabilidad de la instalación.
 - Oferta aguas superficiales: Porción de agua en m³/s que después de precipitar sobre la cuenca y satisfacer las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo-cobertura vegetal, escurre por los cauces de los ríos y demás corrientes superficiales (Fundación Chile, 2018) (Figura A1).
 - Oferta aguas subterráneas: Porción de agua en m³/s que queda almacenada, o se desliza, cuando el agua de lluvia o proveniente de ríos llega a las capas impermeables de la tierra, luego de atravesar las permeables (Fundación Chile, 2018) (Figura A2).

Para promediar los factores y subfactores entre sí, estos deben ser normalizados entre 0 y 1, como recomienda Giz & Eurac (2017), donde 0 representa sin vulnerabilidad y 1 altamente vulnerable. La normalización es de carácter lineal y se realiza utilizando la ecuación (2).

$$Factor_{0-1} = \frac{Dato_i - Data_{Min}}{Data_{Máx} - Data_{Min}} \quad (2)$$

Donde:

- $Factor_{0-1}$: Representa el factor y subfactor normalizados entre 0 y 1.
- $Dato_i$: Valor a normalizar.
- $Data_{Min}$: El mínimo valor dentro de los datos del factor o subfactor utilizado como umbral.
- $Data_{Máx}$: El máximo valor dentro de los datos del factor o subfactor utilizado como umbral.

Posteriormente se realizó un promedio ponderado normalizado para obtener el factor de vulnerabilidad (FV) ante la amenaza de precipitaciones extremas (ecuación 3) y sequías (ecuación 4).

$$FV_{Precipitaciones} = \frac{PP+CI+CT+GEO}{4} \quad (3)$$

Donde,

- FV: Factor de vulnerabilidad
- PP: Intensidad de la precipitación
- CI: Características intrínsecas, corresponde al promedio ponderado entre el subfactor coordinación de empresas, tamaño de faena y adaptación.
- CT: Factor topográfico, corresponde al promedio ponderado entre la elevación y pendiente del terreno.
- GEO: Factor geológico que considera la erosión.

$$FV_{Sequías} = \frac{PP+CI+TEC+CA+DA}{5} \quad (4)$$

Donde:

- TEC: Factor tecnológico, corresponde al promedio ponderado de Acceso a agua de mar y Agua de mar por faena.
- CA: Factor de consumo de agua, corresponde al promedio ponderado de Agua continental por procesamiento mineral, Agua Continental por faena y Huella Hídrica Azul.
- DA: Factor disponibilidad de agua, corresponde al promedio ponderado de Oferta de aguas superficiales y Oferta de aguas subterráneas.

1.5.3 Pronostico de riesgo climático en Chile

Las previsiones de riesgo climático proporcionan un medio para cuantificar los impactos potenciales de futuros eventos climáticos extremos. Para pronosticar estos eventos de precipitaciones extremas y sequías, se utilizan los índices climáticos del proyecto ARClím. La información se obtiene de una plataforma web de libre acceso (Ministerio del Medio Ambiente, 2022), que proporciona datos grillados de índices climáticos de Chile Continental para el presente (1980-2010) y futuro (2035-2065) a una resolución de 5 km², bajo el escenario RCP 8.5, escenario pesimista de precipitaciones y sequías extremas.

Para precipitaciones extremas se seleccionaron los índices climáticos denominados “number of heavy precipitation days”, correspondiente al número de días en que la precipitación diaria supera los 10 mm y “number of very heavy precipitation days”, número de días en que la precipitación diaria supera 20 mm. Para sequías, el índice climático denominado “consecutive dry days”, correspondiente al número máximo de días consecutivos en que la precipitación diaria no supera 1 mm. En específico para pronosticar el riesgo climático en cada instalación, utilizamos la diferencia entre futuro y presente de cada índice climático, a lo que denominaremos frecuencia de ocurrencia de la amenaza.

Posteriormente para realizar la cuantificación de las pérdidas productivas es necesario que la frecuencia de ocurrencia de las amenazas sea normalizada y relacionada con el factor de vulnerabilidad de cada instalación. La Figura 1.5 muestra un ejemplo, para mina Escondida y mina Salvador, en el caso de precipitaciones extremas.

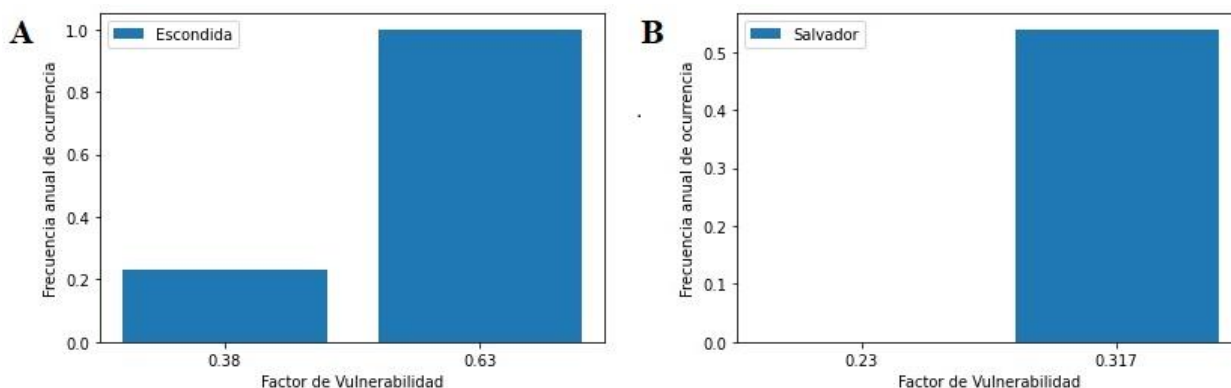


Figura 1.5. Ejemplo de frecuencia de ocurrencia de precipitaciones extremas en A) Escondida y B) Salvador. Fuente: Propio.

1.6 Antecedentes de Estudio

1.6.1 Cambio climático

El cambio climático se ha convertido en el mayor desafío que ha debido enfrentar la humanidad, existiendo un consenso científico de que este fenómeno es un hecho inequívoco, causado por la acción del hombre (Ministerio del Medio Ambiente, 2012). El cambio climático según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2021) se define como:

“Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como las modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición atmósfera o del uso del suelo.”

Durante las últimas seis décadas la tierra y el océano han absorbido una proporción casi constante de las emisiones de CO₂, registrando desde 1750 que las concentraciones de gases de efecto invernadero han estado aumentando, alcanzando promedios de 410 ppm de dióxido de carbono, 1866 ppb metano (CH₄) y 332 ppb de óxido nitroso (N₂O). Tales aumentos han llevado al calentamiento de la atmósfera, el océano y la tierra, reportando un aumento total de las temperaturas entre 1850-1900 y 2010-2019 de 0.8°C a 1.3 °C (Figura 1.6). Las precipitaciones también han sufrido variaciones con fuerte probabilidad de que hayan aumentado desde 1950 en una tasa más rápida desde la década de 1980, lo que ha contribuido con los cambios superficiales de la salinidad del océano. Se han registrado, además retrocesos de los glaciares desde la década de 1990 y la disminución del área de hielo marino del Ártico entre 1979-1988 y 2019-2020. Sumado a cambios en el nivel global del mar medio en 0.2 m entre 1901 y 2018 (IPCC, 2021).

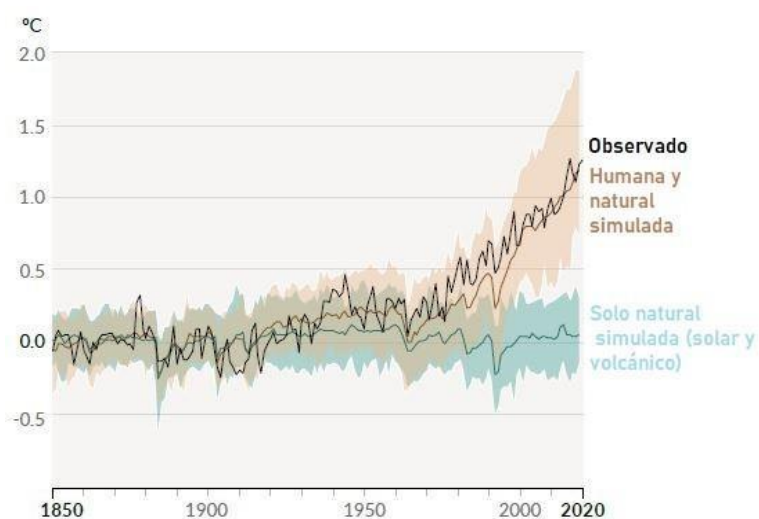


Figura 1.6. Cambio en la temperatura de la superficie global (promedio anual) observado y simulado utilizando factores humanos y naturales (1850-2000). Fuente: IPCC (2021).

Las proyecciones a futuro contemplan que la temperatura global del planeta seguirá aumentando hasta el menos mediado de siglo, logrando superar durante el s. XXI el calentamiento global de 1.5°C y 2°C afectando a todos los continentes y en general, siendo mayor en la tierra que en los océanos y en el Ártico y Antártica más que en los trópicos (Figura 1.7A) a menos que se produzcan reducciones profundas de CO₂ y otras emisiones de efecto invernadero para que esto no ocurra.

Grandes cambios en el sistema climático son generados por el aumento del calentamiento global, por lo que se espera: Mayor frecuencia e intensidad de extremos cálidos; olas de calor; fuertes precipitaciones y más frecuentes proyectando que los eventos diarios extremos se intensifiquen un

7 % por cada 1°C de calentamiento global, en especial en las latitudes altas, pacífico ecuatorial (Figura 1.7B); Sequías agrícolas y ecológicas en algunas regiones; Mayor proporción de ciclones tropicales intensos; y reducciones en el hielo marino del ártico y el permafrost, proyectando para el 2050 que el primero este prácticamente libre de hielo marino .

En particular, Chile es un país altamente vulnerable al cambio climático debido a que cumple con la mayoría de los 9 criterios de vulnerabilidad enunciados por CMNUCC (Ministerio del Medio Ambiente, 2012): Posee áreas costeras de baja altura, zonas áridas y semiáridas, zonas de bosques, territorio susceptible a desastres naturales, áreas propensas a sequía y desertificación, zonas urbanas con problemas de contaminación atmosférica y ecosistemas montañosos. Lo anterior, hace evidente lo fundamental de comprender como será el futuro de Chile en estos temas.

En base a los estudios realizados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), a continuación, se presentan parte de los principales efectos del cambio climático en Chile:

- Temperatura: Hacia el 2030 se prevé un aumento de a lo menos 0.5 °C para la zona sur y austral y de 1.5 °C para el norte grande y el altiplano, siendo estos valores incrementados para el período 2031-2050 (Ministerio del Medio Ambiente, 2012).
- Precipitación: Hacia el 2030, se proyecta una disminución de las precipitaciones entre un 5 % y 15 % para la zona entre las cuencas de los ríos Copiapó y Aysén, intensificándose la disminución para el periodo de 2031-2050 (Ministerio del Medio Ambiente, 2012).
- Eventos climáticos extremos: Se espera un marcado aumento de los eventos de sequía hacia mediados de siglo proyectándose más de 10 veces la ocurrencia en 30 años (CEPAL, 2009).
- Aumentos de las olas de calor, definidas como 3 días consecutivos por sobre el percentil 90% que corresponde a los 32.4°C (Villaruel, 2013).
- Biodiversidad: Se proyecta una pérdida importante del patrimonio genético nacional, caracterizado por el endemismo (Ministerio del Medio Ambiente, 2012).
- Recursos Hídricos: Se proyecta una reducción significativa de los caudales medios mensuales en las cuencas entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos y una elevación de la isoterma 0°C que trae como consecuencia la reducción de las reservas de agua en la cabecera de las cuencas nivales (Ministerio del Medio Ambiente, 2012).
- Salud: Podrían aumentar la ocurrencia de enfermedades ya existentes por la húmedas, precipitación y temperaturas y facilitar la introducción de nuevas enfermedades.
- Infraestructura: La mayor frecuencia e intensidad de los eventos extremos, pondrían en riesgo la infraestructura.

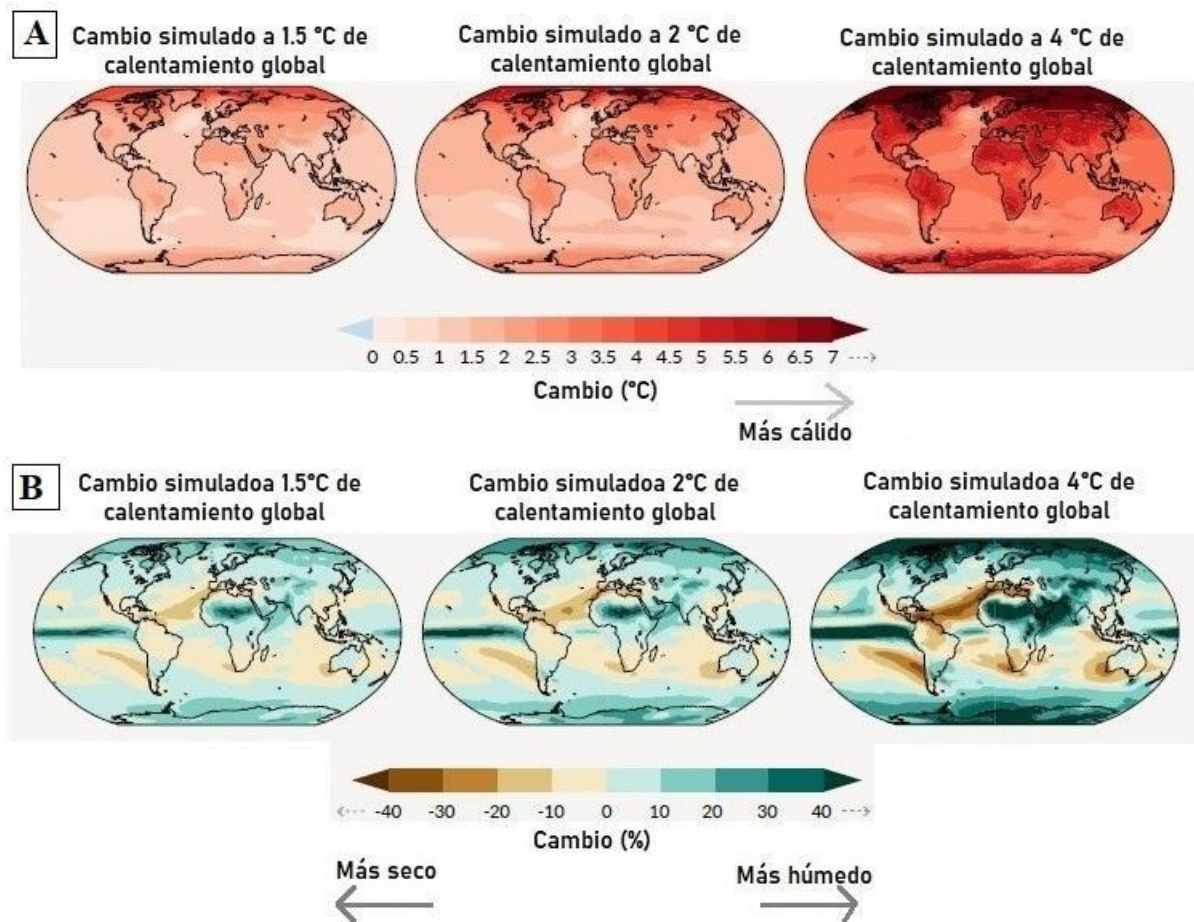


Figura 1.7. Cambios en la temperatura media anual de la superficie y las precipitaciones. A) Cambios de temperatura media anual (°C) en relación con 1850-1900. B) Cambio medio anual de precipitación (%) en relación con 1850-1900. Fuente: IPCC (2021).

1.6.2 Minería en Chile

La minería corresponde a un sector industrial estratégico, representa el 50 % del valor de las exportaciones totales, siendo considerado con un 28.5 % el principal productor de Cu a nivel mundial (Tabla 1.4). En la sección 2.3.1 se entregan más características del cobre en Chile.

Tabla 1.4. Principales países productores de cobre a nivel mundial. Fuente: Sernageomin (2021).

País	Producción de cobre		Participación en la producción mundial (%)
	2019	2020	
Total Mundial	20.393	20.263	-
Chile	5.822	5.773	28.5
Perú	2.460	2.200	10.9
China	1.680	1.700	8.4

1.6.3 Minería y cambio climático

Para intentar disipar y reducir los efectos del cambio climático los países se han comprometido a cumplir acuerdos y tratados que contribuyan a reducir las emisiones contaminantes de las empresas, con planes a futuro que contemplan transiciones a económicas bajas en carbono lo cual implica el uso de tecnologías limpias para el desarrollo productivo de los países. Esos nuevos cambios traerán consigo aumentar la producción y el consumo de minerales que antiguamente tenían baja producción como es el caso del litio en Chile y de aumentar aún más la producción de minerales como el cobre. No obstante, este nuevo desafío de extraer de manera sostenible y ambientalmente aceptable viene acompañado de las problemáticas que debe enfrentar la minería producto del cambio climático. Lo anterior impone desafíos de mitigación y adaptación que deben ser consideradas por las empresas para seguir produciendo a pesar de las adversidades que traen consigo los eventos climáticos extremos.

La minería comúnmente es posible ubicarla bajo condiciones geográficas complejas, posee activos con extensos periodos de vida útil, forma parte de cadenas globales y necesita recursos vulnerables como el agua y la energía para desarrollar sus actividades (ICMM, 2013), todos estos factores clasifican a la minería como un sector vulnerable. De acuerdo con el trabajo de síntesis de Beauchef Minería desarrollado por Kracht & Salinas (2021), señalan que el clima cambiante podría afectar la estabilidad y efectividad de la infraestructura y equipamiento de la minería, en especial debido a que los eventos climáticos son inusuales y difíciles de prever, pueden interrumpir las operaciones y provocar pérdidas financieras. Ejemplo de lo anterior, se observa en los eventos del primer trimestre del 2001 en la II región, que generaron que la mina El Abra se inundara dos veces, no alcanzando su capacidad según diseño lo cual le significó un costo de 2050 toneladas en producción. A partir de datos más recientes se tiene un segundo ejemplo que se presenció en enero del 2019, donde un frente de mal tiempo afecto a la zona norte del país genero una caída del 5.1% de la producción nacional de cobre durante el primer trimestre del 2019 en comparación al mismo periodo en 2018 (COCHILCO, 2022b). Ambos ejemplos dejan de manifiesto, como la intensificación de los eventos extremos puede causar efectos físicos en las etapas productivas de la minería. Es imperativo estar preparados antes tales eventos, estableciendo medidas de adaptación adecuadas para el sector.

1.6.4 Conceptos claves

A continuación, se presentan conceptos claves que serán utilizados en esta investigación.

Riesgo (climático): Consecuencias eventuales en situaciones en que algo de valor está en peligro y donde el desenlace es incierto (...). El riesgo resulta de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y el peligro (...) (IPCC, 2021). Se trata de una situación incierta debido a la que la variable a estudiar, en este caso el clima también es incierto pudiendo afectar a personas, bienes, ecosistemas, cultura, etc.

Peligro o amenaza: Acaecimiento potencial de un suceso o tendencia física de origen natural o humano, o un impacto físico que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructura, medios de subsistencia, prestaciones de servicios, ecosistemas y recursos ambientales (IPCC, 2021).

Exposición: La presencia de personas, medios de subsistencia, especies o ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2021).

Vulnerabilidad: Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad y la falta de capacidad de afrontamiento y adaptación (IPCC, 2021).

Impactos: Efectos en los sistemas naturales y humanos de episodios meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático. Se refieren a impactos en la vida, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructura debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren en un lapso de tiempo específico y a las vulnerabilidades las sociedades o sistemas expuestos a ellos (IPCC, 2021).

Mineral crítico: Elemento constitutivo valioso de un producto mineral que está sujeto al riesgo de interrupción del suministro y que cumple un propósito considerado importante según la perspectiva de los evaluadores (NRC National Research Council, 2008).

1.7 Resumen de la investigación

Los resultados de este estudio son presentados en el siguiente artículo:

Fernández, P., Orellana, L.F., Castillo, E. (2023). Resource and climate paradox: How climate changes restricts resources for the energy transition. Article to be submitted to the International Journal of Resources, Conservation and Recycling.

CAPITULO 2

2. Article: Resource and climate paradox: How climate changes restricts resources for the energy transition

Paulina Fernández^{1*}, Luis Felipe Orellana^{1,2,3}, Emilio Castillo

¹ Department of Mining Engineering, FCFM - University of Chile, Chile

² Advanced Mining Technology Center (AMTC), FCFM - University of Chile, Chile

³ Solar Energy Research Center, University of Chile, Chile

*Corresponding author: Paulina Fernandez (paulina.fernandez@ug.uchile.cl)

Keywords: Climate change, mining, mitigation, adaptation, copper, disruption supply chain

2.1 ABSTRACT

Climate change is one of the most significant challenges of the last decade, with direct risks to the disruption of the mining supply chain. Historically, the mining industry has focused on reducing its emissions but has paid little attention to the need to adapt to climate change. This article provides a methodology for quantifying the effects of climate change on resource availability, encouraging companies and policymakers to be more aware that climate change may affect them. The methodology considers each facility's projected 2030 production, vulnerability to extreme precipitation and drought events, and the frequency of those hazards. It was applied to data from large-scale copper mining in Chile, revealing possible disruptions in copper production in the future under a pessimistic climate change scenario. Efficient management of these climate risks requires the exploration and implementation of proactive and efficient adaptation measures.

2.2 INTRODUCTION

Progress in low-carbon technologies has led to an increase in demand for metals essential to the energy transition, such as copper, cobalt, tin, nickel, and lithium (Lèbre et al., 2020; Seck et al., 2020). To ensure adequate exploitation of these minerals, the mining sector needs certain conditions, including a habitable climate, access to water resources, and infrastructure for resource extraction and processing (Pearce et al., 2009). However, the geographic location of mining facilities in remote areas makes them vulnerable to the risk of supply disruption due to the effects of climate change. This latent threat could impact not only the production phase of the resource industry but also the entire supply chain (IPCC, 2012, 2013).

Criticality studies were one of the first ways that researchers tried to figure out what would happen if the supply chain for minerals used in the energy transition broke down. Economic, political, and social factors have been taken into account in these studies (Angerer et al., 2009; Buchert et al., 2009; Duclos et al., 2010; European Commission, 2014; Graedel et al., 2015; Habib & Wenzel, 2016; Helbig et al., 2018; Knoeri et al., 2013; Moss et al., 2011; Rosenau-Tornow et al., 2009; Schneider et al., 2014; Watari et al., 2020), and only rarely have the environmental impacts of

mining been addressed (Eheliyagoda et al., 2020; Frenzel et al., 2017; Graedel et al., 2012; Lèbre et al., 2020; Morley & Eatherley, 2008; Northey et al., 2017; Roelich et al., 2014). However, efforts to recognize and address the mining industry's sensitivity to climate change are not yet widely considered. Some work from Canada and Australia, two highly resource-dependent regions of the OECD, has investigated the impact of climate change on the future of the mining industry in these economies (Ford et al., 2010, 2011; Hodgkinson et al., 2010, 2014; Loechel et al., 2013; Mason et al., 2013; Sharma & Franks, 2013), and the ICMM (2013) report has given some guidance to the industry on climate change adaptation requirements, but further research is required to drive anticipatory adaptation efforts and the ensure operational continuity of mining sites and mining expectations.

We developed a methodological approach to quantify the disruption of the copper supply chain caused by climate hazards. This approach identifies vulnerabilities in the supply chain, the potential danger of climate hazards, and the production of each mining facility. As a first step in implementing the proposed methodology, we examined the production disruption of large-scale copper mining facilities in Chile, in the north and central-south of the country. In particular, the effects of climate change have been observed in Chile, such as the intensification of drought periods in the central-south zone, extreme events associated with temperature rises and changes in precipitation patterns, and increased occurrence of coastal storm surges, among others (Centro UC Cambio Global, 2019). Thus, the evaluation of these components in these regions provides suitable examples of how climate change can have negative consequences. Furthermore, copper is considered a strategic mineral for the transition to low or zero carbon energy, and the supply may be severely compromised, particularly in Chile, which is the world's leading producer of copper (Sernageomin, 2021).

2.3 METHODS AND DATA SOURCES

Based on the methodology of Schnebele et al. (2019), we quantify the risk of copper supply disruption by weather event for each facility belonging to large-scale copper mining in Chile (I-VI region) by combining, (i) projected production of each facility, (ii) Supply chain vulnerability and (iii) predicted weather risk at the location of each copper supply facility.

2.3.1 Copper supply in Chile

Mining in Chile has been a key player in Chile's economy and development, contributing to the Gross Domestic Product (GDP), tax revenues, exports, employment and attracting investment. In addition, it has contributed to expanding and improving infrastructure, services, transferring energy and supporting the communities surrounding the sites, which has boosted the country's development and improved the living conditions of its inhabitants (COCHILCO, 2013).

Mining is a strategic industrial sector, representing 50% of the value of total exports, with 28.5% being the main copper producer worldwide. In 2020, mining accounted for 12.5% of the GDP, and within this value, 11.2% corresponded to copper mining, producing 5.77 million metric tons of fine copper that year (Sernageomin, 2021). The main national producers of this mineral are in the private sector, with about 70% of production, while 30% is in the hands of the state-owned company Codelco. Among the first group, Escondida mine represents 20.7% of national

production, followed by Collahuasi with 11%, Anglo American with 8.1%, and the state mining company El Teniente with 7.7%.

To figure out the extent to which large-scale copper mining in Chile is affected by climate risks, we collected data on copper production in 2021 (Fig. 2.1) and projected copper production for each facility in 2030. The reports and databases of COCHILCO (Comisión Chilena del Cobre, in Spanish), a technical and specialized organization that advises the Chilean Government on matters related to copper production and its by-products, were the sources of information on mine production and projections for each facility. According to COCHILCO, the projected copper production for 2030 represents an increase of 20.7% compared to the 2018 production, which is equivalent to Chile producing 7.04 million tons of copper by 2030 (COCHILCO, 2019b).

2.3.2 Supply chain vulnerability

Weather hazards have caused numerous disruptions to copper production facilities in the past, affecting the stability of infrastructure, mining equipment, problems at ports and access routes, and the health of workers (Kracht & Salinas, 2021). For example, precipitations events in 2019 in the north zone of Chile generated a 5.1% drop in national copper production during the first half of 2019 compared to the same period 2018 (COCHILCO, 2022b).

We investigated previous weather events that disrupted the supply chain in order to determine their impacts on copper mining facilities and quantify the vulnerability model. We examined the year of occurrence of each weather event, its duration, the affected facility, geographic area, cause, effect, and production losses. This information was collected from various sources, including the database generated by Hatayama & Tahara (2018), sustainability reports of mining companies, newspapers, and websites. As a result, we assembled a dataset containing 53 weather events that resulted in production losses at copper mining facilities since 2001 due to extreme precipitation and since 2014 due to droughts. The list of weather events is provided as supporting information (Table S1).

To obtain the vulnerability model of the copper production facilities, we used the production losses of each facility and their relationship with the vulnerability index. The vulnerability index, corresponds to the weighted average of the factors and subfactors that determine the propensity or predisposition of mining facilities to be adversely affected by climatic events (Giz & Eurac, 2017). It is defined and characterized based on the climatic event to be studied, which in our case is extreme precipitation and droughts (Table 2.1).

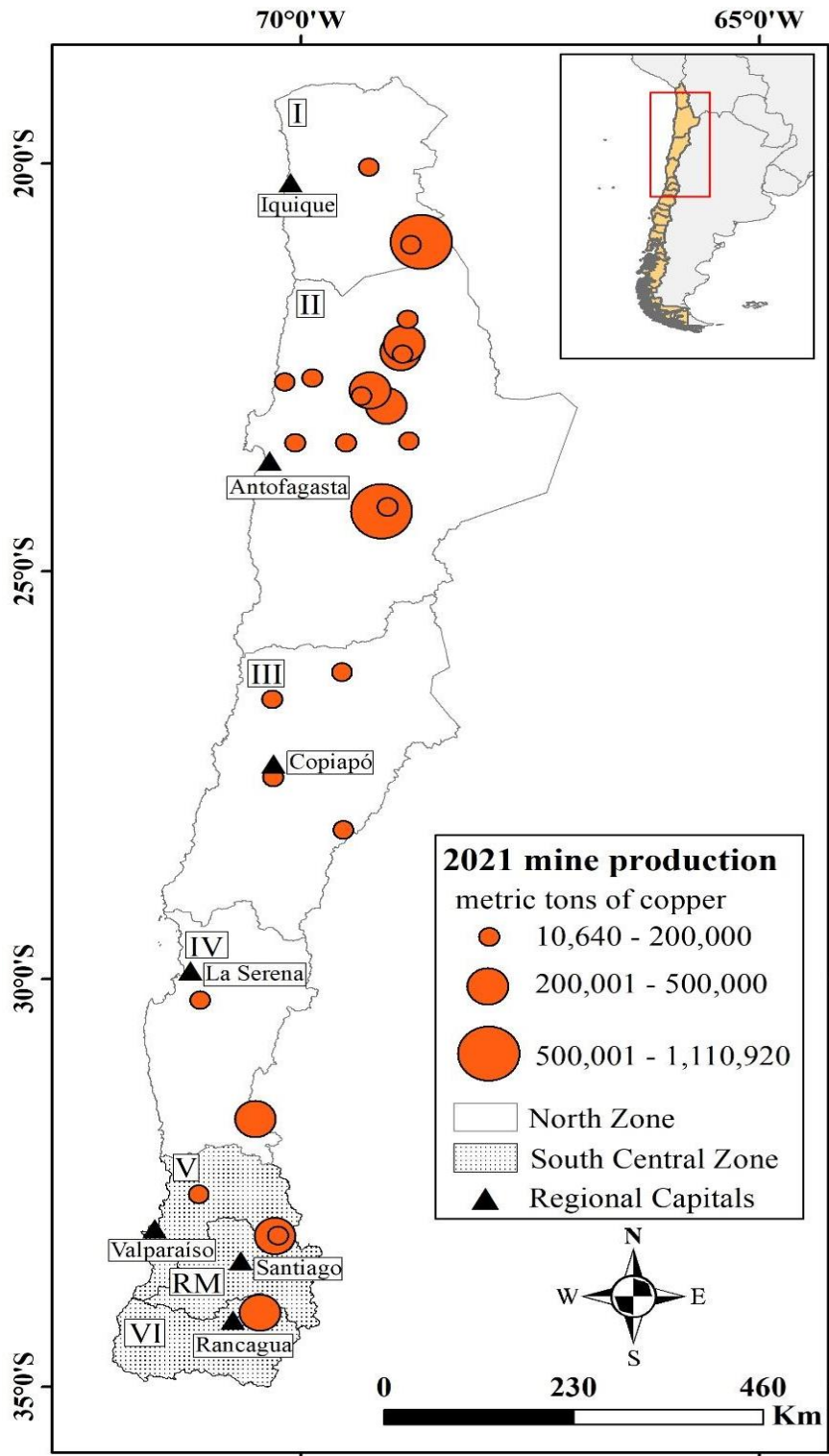


Figure 2.1. 2021 production of copper mines in Chile. Source: Own base on COCHILCO database (COCHILCO, 2022b).

Table 2.1. Vulnerability factors assessed for extreme precipitations and drought. Source: Own.

Extreme precipitation				Drought			
Factors	Subfactors	Description	Data Source	Factors	Subfactors	Description	Data Source
Intensity of the Climatic Event		Precipitations in mm during the period of the climatic event.	https://explorador.cr2.cl/	Intensity of the Climatic Event		Precipitations in mm during the period of the climatic event.	https://explorador.cr2.cl/
Internal Characteristics Of The Mine	Coordination Of Companies	Number of different owners of the facilities in an area of 25 km ² .	Del Río Sánchez (2022)	Internal Characteristics Of The Mine	Coordination Of Companies	Number of different owners of the facilities in an area of 25 km ² .	Del Río Sánchez (2022)
	Mine Size	Base on average annual production over the last 5 years.	COCHILCO, (2020b)		Mine Size	Base on average annual production over the last 5 years.	COCHILCO, (2020b)
	Adaptation	Average annual rate of evolution of adaptation plans (AP) to climate risk: 0. Not mentioned; 1. Understanding of the situation; 2. Recognition; 3. Identification of hazards; 4. Assessment of hazards; 5. Generation of AP; 6. Implementation of AP; 7. Revision of AP.	Sustainability reports for each company		Adaptation	Average annual rate of evolution of adaptation plans (AP) to climate risk: 0. Not mentioned; 1. Understanding of the situation; 2. Recognition; 3. Identification of hazards; 4. Assessment of hazards; 5. Generation of AP; 6. Implementation of AP; 7. Revision of AP.	Sustainability reports for each company
Topographical	Terrain Elevation	Elevation in m of the location of each facility to a resolution of 30 m ² .	https://asf.alaska.edu/	Technological	Access To Seawater	Minimum distance in km from the facility to a desalination plant.	Del Río Sánchez (2022)
	Terrain Slope	Slope in degrees of the location of each facility at a Resolution of 30 m ² .	https://asf.alaska.edu/		Seawater Per Mine	Amount of seawater in Mm ³ used by each mine.	Sustainability reports for each company
Geology	Erosion	Stability of the components of a mining facility according to the index of the soil's capacity to resist erosion.	https://esri.ciren.cl/porta/home/	Water Consumption	Continental Water From Mineral Processing	Amount of water of continental origin in m ³ per ton of processed ore obtained for each region of Chile.	COCHILCO (2020a)

Table 2.2. Continuation. Vulnerability factors assessed for extreme precipitations and drought. Source: Own.

	Continental Water Per Mine	Continental water consumption in Mm ³ used by each mine.	Sustainability reports for each company
	Blue Water Footprint	Volume of fresh water from surface and/or subway sources in m ³ /s that is not returned to the environment from which it was extracted (evaporation) obtained for each region of Chile.	Fundación Chile (2018)
Water availability	Supply of Surface Water	Portion of water in m ³ /s that after precipitation and after satisfying the evapotranspiration and infiltration quota of the soil-vegetative cover, runs off through watercourses.	Fundación Chile (2018)
	Groundwater Supply	Portion of water in m ³ /s that is stored, or runs off, when rainwater or water from rivers reaches the impermeable layers of the land.	Fundación Chile (2018)

Finally, the vulnerability index for each climate event per mining facility is normalized between 0 and 1 (Giz & Eurac, 2017), where 0 represents no vulnerability and 1 highly vulnerable. The normalization is linear in nature and is performed by occupying equation (2.1).

$$Factor_{0-1} = \frac{Data_i - Data_{Min}}{Data_{Max} - Data_{Min}} \quad (2.1)$$

2.3.3 Climate risk forecast in Chile

Climate risk forecasts provide a means to quantify the potential impacts of future extremes weather events. We use the climate indices of the ARClm project to forecast future extreme precipitation and drought events. This approach is a project of Chile's Ministry of Environment. It was developed by the Center for Climate and Resilience Research (CR2) and the Global Change Center (CCG-Catholic University of Chile) in collaboration with Chilean and international institutions to produce risk maps related to climate change in Chile (Ministerio del Medio Ambiente, 2022). The project is based on the 5th report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change Group II (WGII-IPCC). To use the climate indices, the project devised a freely accessible web platform, from which gridded data of climate indices for continental Chile is obtained for a recent historical period (1980-2010) and the near future (2035-2065) at a resolution of 5 km², under the RCP 8.5 scenario, a pessimistic scenario of extreme precipitation and drought that will lead to carbon concentrations by the end of the century that will produce global warming averaging 8.5 W/m² and predict a temperature increase of 4.3°C by 2100 relative to pre-industrial temperatures (Riahi et al., 2011).

For extreme precipitation, we selected the climate indices "number of heavy precipitation days," corresponding to the number of days in which daily precipitation exceeds 10 mm, and "number of very heavy precipitation days," corresponding to the number of days in which daily precipitation exceeds 20 mm. For drought, we selected the climatic index called "consecutive dry days," which corresponds to the maximum number of consecutive days in which the daily precipitation does not exceed 1 mm. Specifically, to forecast the climatic risk in each facility, we use the difference between the future and present for each climatic index.

An example of the information obtained from the climate indices is presented in Fig. 2.2, which shows the climate hazard for the present, future, and the difference in the frequency of both periods in the face of extreme precipitation hazard. The map highlights that much of the north zone will face a hazard of extreme precipitation with maximums of up to 0.7 days when future precipitation will exceed 20 mm. In contrast to the central-south zone, which shows a lower frequency of future precipitation exceeding 20 mm when compared to present precipitation.

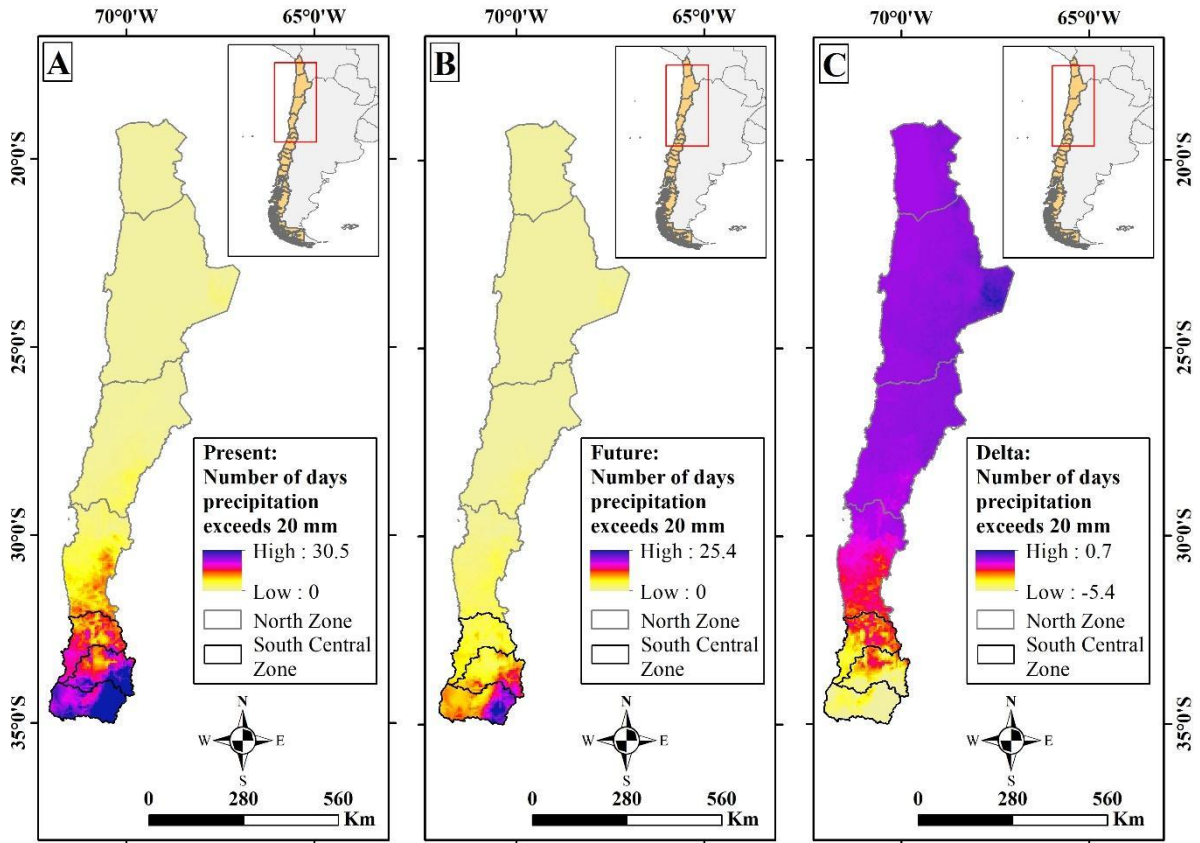


Figure 2.2. Map of precipitation hazard above 20 mm in the (A) present (1980-2010), (B) near future (2035-2065) and (C) difference between future and present hazard. Source: Own based on ARClm database (Ministerio del Medio Ambiente, 2022).

2.4 RESULTS

2.4.1 Summary of historical climate hazards investigated

The supply disruption events by period are presented in Fig. 3. In particular, copper supply disruptions are observed due to the climatic hazards of extreme precipitation (42 events) and drought (11 events). Extreme precipitation events occur from 2001 to 2020, while drought events occur from 2014 onwards. An increase in the number of disruption events has been recorded since 2011. However, poor access to information may restrict the number of events reported for each year.

The breakdown of the characteristics of weather-related disruptions is presented in Table 2.3. We can see from the causes of disruption that weather events not only cause direct damage but also hinder operations by disrupting the supply chain (Hatayama & Tahara, 2018). The causes of disruption due to extreme precipitation are preventive action, disruption of electrical systems, flooding, damage to infrastructure and material detachment, which mainly result in a suspension of supply. Prevention actions are due to roads with difficulty for transit, road closures, and port closures. However, prevention actions are mainly cancelled within 1 or 2 days, in these cases, any effect can be recovered through a temporary increase in production after the restart of operations.

On the other hand, the main cause of disruption due to droughts is copper processing restrictions, including those in the crushing and milling stage and concentrator plant restrictions due to water shortages, which mainly result in a decrease in supply.

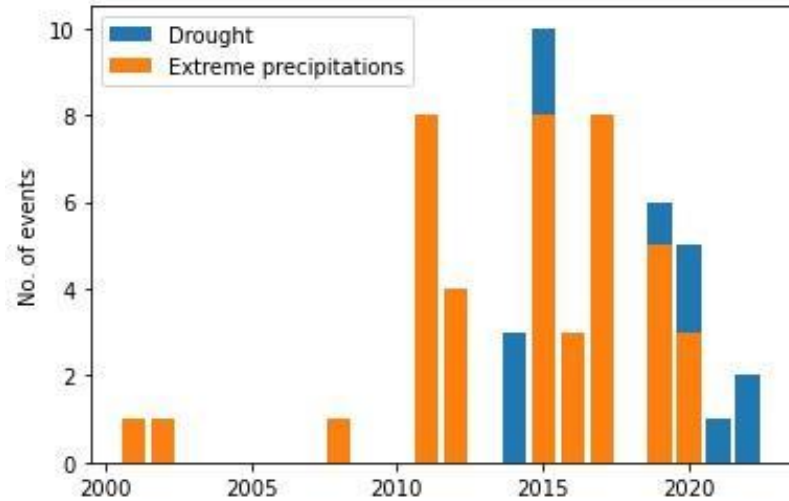


Figure 2.3. Disruption events by period. Source: Own based on newspapers, sustainability reports and mining Company websites.

Table 2.3. Characteristics of disruptive climate events. Source: Own.

Characteristics of the hazard	Extreme precipitation	Drought
Duration (days)	Min.: 1 Max.: 10 Average:4.8	Min.: 10 Max.: 90 Average: 52.7
Intensity of the climatic event (mm)	Min.: 7.4 Max.: 144.1	Min.: 0.0 Max.: 1.6
Predominant effect	Supply Suspension	Supply decline
Season (months)	April-September	October-March
Causes of disruption	Prevention action; Interruption electrical systems; Flooding; Damage to infrastructure; Interruption basic services; Detachment of material.	Restriction of copper processing; High temperature and anticipated snow melt.

The average duration of disruption events caused by extreme precipitation is 5 days, with precipitation intensity ranging from 7.4 mm to 144 mm, while for droughts, the average duration is 57 days, with precipitation not greater than 1.6 mm during the study period.

Due to extreme precipitation from 2001 to 2020, there have been production losses of 203,609 metric tons, equivalent to 1.77% of copper mining production during period. Production losses due to drought equal 380,977 metric tons, equivalent to 6.56% of production from 2014 to 2022. Fig. 2.4 shows that the regions of Chile that have suffered the greatest production losses due to extreme precipitation are the I and III regions, with 5.51% and 3.98%, respectively. As for droughts, the IV region has the highest production losses, equivalent to 6.92%. If we look at Chile by geographic zone, we can see that the extreme precipitation events cause more damage to production in the north (1.87%) than in the central-south (0.8%). Regarding drought events, by a slight difference,

the central-south zone presents higher production losses compared to the north zone, 6.61% vs. 6.32%.

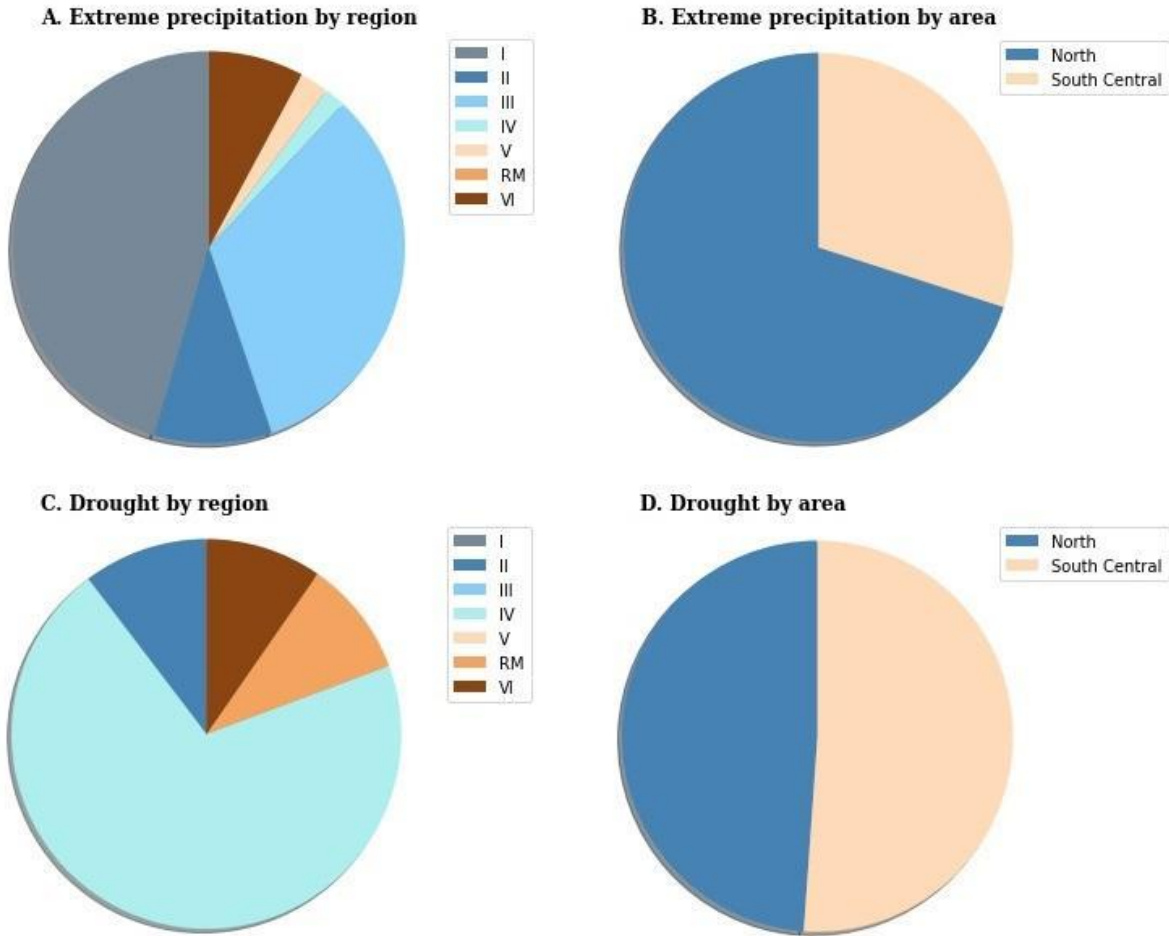


Figure 2.4. Production losses due to extreme precipitation (A) by region and (B) geographic area. Production losses due to drought (C) by region and (D) geographic area. Source: Own

2.4.2 Quantifying the risk of supply disruption

2.4.2.1 Coincidence of weather risk and copper facilities

Using the climate indices of the ARClm project and classifying each cell of the map at a resolution of 30 m², we determined the climate risk forecast for each facility for the hazards of extreme precipitation and drought (Fig. 2.5). This was done by calculating the difference between future and present climate hazards, which represents the future climate hazard that mining facilities should adapt to.

Under the hazard of extreme precipitation, a higher frequency of precipitation occurrence between 10 and 20 mm (Fig. 2.5A) occurs at mining facilities located in mountainous areas, while a higher frequency of precipitation over 20 mm (Fig. 2.5B) occurs mainly in the I, II, and III regions, whose facilities contributed to 74% of the production in 2021. It should be noted that none of the facilities located in the central-south zone had high frequencies for extreme precipitation. For droughts, Fig.

5C shows that the highest frequencies of occurrence of the climatic hazard are located in the I, II, IV, and V regions of Chile, with values exceeding 17 days in which the daily precipitation does not exceed 1 mm. Such mining facilities represent about 4.11 Mton, which accounted for 76% of copper production in Chile for 2021.

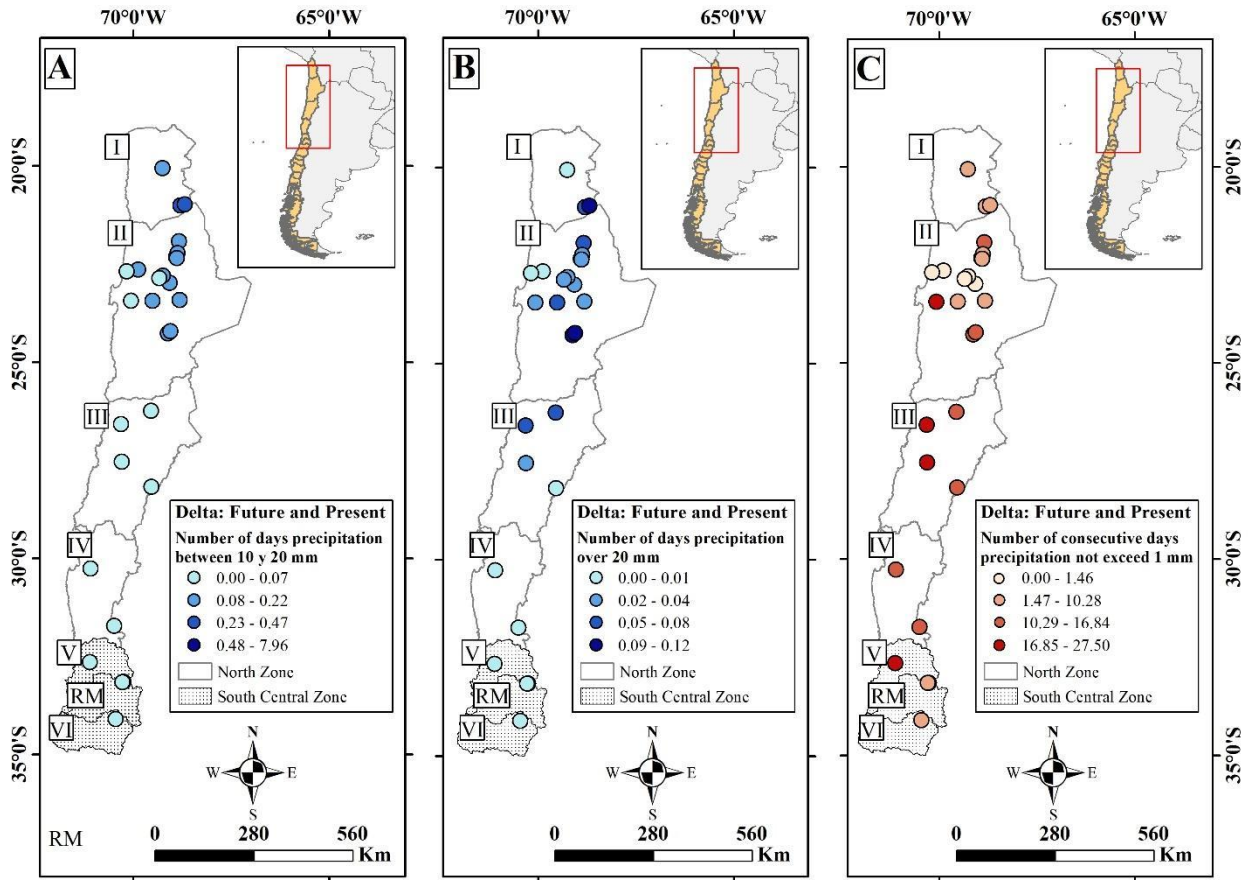


Figure 2.5. Map of the frequency of occurrence of climate hazards for each facility. (A) and (B) are the frequencies used for the extremes precipitations events and (C) for the droughts events. Source: Own based on ARClim database (Ministerio del Medio Ambiente, 2022).

2.4.2.2 Vulnerability Model

Schnebele et al. (2019) show that it is not the size of the climate event itself that causes production losses, but rather the conditions of the land where the mining facilities are. Thus, we determined two vulnerability models based on the hazard of extreme precipitation and drought, incorporating the magnitude of precipitation of each climatic event and the intrinsic characteristics of each mining facility, which make up the vulnerability factor.

To determine the productive losses in the face of the hazard of extreme precipitation, we have the P model, which corresponds to the linear representation of the data and the sensitivities of this model that arise from varying the slope of the equation and depend on the characteristics of each facility (Fig. 2.6A). The PA sensitivity represents mining facilities with past production losses of less than 2% and a greater number of public-sector companies. According to the vulnerability subfactors, it presents a greater number of facilities with the subfactor "coordination of companies"

over 2, indicating a greater number of different owners in an area of 25 km² and, therefore, the difficulty of it coordinating decision-making in the face of hazards from climatic events. PB sensitivity represents facilities with past production losses greater than 2%, mostly private-sector companies. With respect to the vulnerability subfactors, there are more facilities with the "mine size" subfactor below 300,000 metric tons, which, according to the vulnerability assumption indicates less availability of resources for adaptation. In addition, there are more facilities with the "Adaptation" subfactor under index 3, therefore, mining companies still do not use climate information to identify the climate hazards that may affect them. Seventy-eight percent of the facilities in this group are located above 3000 m, resulting in a higher probability of precipitation (Meseguer-Ruiz et al., 2019; Schumacher et al., 2020) and thus an increase in vulnerability. Finally, 89% of the facilities are located in areas of severe to very severe erosion, therefore, more processes can affect the stability of the components of a mining facility either by crumbling, sliding, or subsidence (Figuroa Vera, 2012). When comparing the P model with its sensitivities, the PB sensitivity presents a greater dependence on the vulnerability factor; therefore, mining facilities with a greater number of vulnerable subfactors are reflected in greater production losses.

Fig. 2.6B presents the vulnerability model for drought (Model D), which is a linear representation of the data passing through the origin and the sensitivity of the model (DA Sensitivity), which is a linear representation without considering the origin. According to the vulnerability subfactors, 59% of the facilities are located more than 107 km away from a desalination plant, and 71% of them do not yet use seawater. Furthermore, most of the facilities are located in regions with continental and groundwater supplies below 26 m³/s. On average, the facilities consume 10.61 Mm³ of seawater and 23.80 Mm³ of continental water. Comparing model D with the DA sensitivity, there is a greater dependence on the vulnerability factor in the latter, where from a vulnerability factor of 0.4 onwards, greater productive losses begin to be generated than in model D.

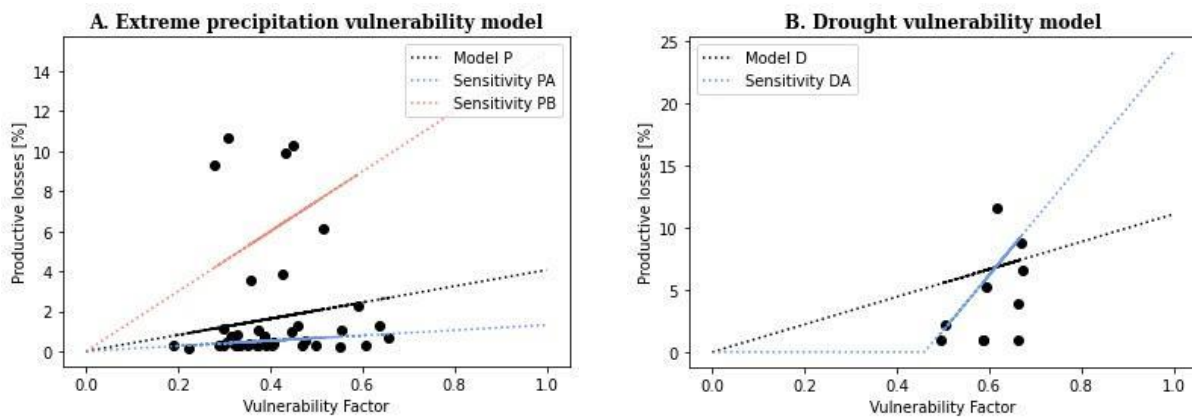


Figure 2.6. (A) Vulnerability model for extreme precipitation hazard (Model P). (B) Vulnerability model for drought hazard (Model D). Source: Own.

2.4.2.3 Expected Annual Disruption

We quantify the EAD (Expected Annual Disruption) that corresponds to the expected disruption of copper production due to the climatic hazards of extreme precipitation and drought by combining the projected production of each facility, the vulnerability of the supply chain, and the predicted climate risk at each facility's location. This measure, suggested by Schnebele et al. (2019) for calculating earthquake production losses, is analogous to the measure used by the Federal

Emergency Management Agency (FEMA) (2017) to measure damage, casualties, and economic losses from earthquakes in the United States. We calculated the EAD for extreme precipitation using equation (2.2) and the EAD for drought using equation (2.3).

$$EAD_P = Q \cdot \sum_{i=10}^{200} 0.04 \cdot VF[P = i] \cdot FO[P = i] \quad (2.2)$$

$$EAD_D = Q \cdot 0.11 \cdot VF \cdot FO \quad (2.3)$$

where Q , is the projected production by 2030 of each facility, $VF [P = i]$ is the expected vulnerability of each facility to P precipitation and drought events, and $FO [P = i]$ is the predicted frequency of occurrence of P climatic events of precipitation and drought, i.e., it is the risk of extreme precipitation and drought at the location of the facility. It is worth noting that, similar to Schnebele et al. (2019) for their earthquake model, models extreme precipitation and drought models do not consider short-term changes (e.g., from one year to the next) in the variables they include, but they can consider changes between longer periods (e.g., every 20 years) by using projected production and climate hazard data over that period. Furthermore, it should be noted that although VF is a continuous variable, we chose to work with the relationship between VF and FO in a discrete manner because we lack continuous measure to model future precipitation behavior. Table 2.4 presents the EAD and their sensitivities for large-scale copper mining facilities. The Escondida mine has the highest EAD for extreme precipitation, ranging from 36,998 to 136,417 metric tons/year, followed by the Collahuasi mine with 27,441 to 101,180 metric tons/year. The Michilla mine has the lowest EAD, between 32 to 116 metric tons/year. The Antucoya mine has an EAD of 36 to 112 metric tons/year. The values reflect a strong relationship between EAD and the projected production of each mine, where higher EADs are associated with higher annual production, and lower EADs are associated with lower annual production. In the case of droughts, the Escondida mine has the highest EAD, ranging from 37,790 to 154,594 metric tons/year, followed by the Los Pelambres mine with 16,992 to 69,514 metric tons/year. The Gabriela Mistral mine has the lowest EAD with 1,038 to 4,246 metric tons/year, followed by the Centinela mine with 1,985 to 8,120 metric tons/year. The above values are explained by the fact that higher EAD values are associated with higher vulnerability factor values and more frequent climatic events, along with high projected production, and vice versa for lower values.

It is important to note that many of the facilities have EAD values of 0 due to the fact that the projected production of facilities such as the Cerro Colorado mine, Lomas Bayas mine, and El Soldado mine are 0 towards 2030 (the production projection time horizon), since the useful life of these facilities ends or their environmental licenses would expire (AngloAmerican, 2020; Lomas Bayas, 2021; Minería Chilena, 2021). On the other hand, for some facilities, the predicted frequency of the climate hazard occurrence is 0 between 2035 and 2065 (the climate projection time horizon), given that future climate indicators are less frequent than the present ones. Therefore, there would not be an intensification of the hazard that would cause an disruption.

For extreme precipitation and according to the model and its sensitivities, the EAD for large-scale copper mining (I-VI region) varies between 1.39% and 5.08%, which is equivalent to production losses between 91,000 and 334,000 metric tons/year. Losses of this magnitude are equivalent to the annual production of the Zaldivar and Los Pelambres mines, according to the 2021 production. Considering the average value of a ton of copper in 2021, according to COCHILCO (2023), based on the London Metal Exchange, this would be equivalent to production losses valued at between \$843-\$3,115 MUSD. In the case of droughts, the EAD for large-scale copper mining (I-VI region) varies from 2.64% to 10.78%, which is equivalent to productive losses between 173,000 and

709,000 metric tons/year. Production losses of this magnitude are equivalent to the annual production of the Ministro Hales and Collahuasi mines, according to the 2021 production. According to COCHILCO (2023), based on the London Metal Exchange, it would be equivalent to production losses valued between \$1,616-\$6,610 MUSD.

Extreme precipitation does not cause an EAD that cannot be made up by a temporary increase in production. However, if you look out 20 years, to 2050, population growth and technological progress are expected to make copper demand go up (de Koning et al., 2018; Kuipers et al., 2018; Schipper et al., 2018; Seck et al., 2020). The expected amount of disruption would be between 1.4 and 5.1 Mt, a scenario that would worsen when considering the hazard of drought over a 20-year horizon, whose expected amount of disruption would be between 3.4 and 14.1 Mt. This amount of disruption could have a significant impact on the world copper supply, considering that the demand for the mineral increases every year (COCHILCO, 2022a) and that it is foreseen, depending on the climate scenario (4°C and 2°C scenario), that between 2010 and 2050, 78.3% to 89.4% respectively of the known resources in 2010 (which already contain the disrupted amount) will be extracted (Seck et al., 2020).

Table 2.4. EAD by model for each mining facility. Source: Own.

Zone	Mine	2021 production	EAD Model P (metric tons)	EAD Sensibility PA (metric tons)	EAD Sensibility PB (metric tons)	EAD Model D (metric tons)	EAD Sensibility DA (metric tons)
North	Cerro Colorado	57,400	0	-	0	0	0
	Collahuasi	630,041	27,441	-	101,180	16,562	67,756
	Quebrada Blanca	11,505	7,746	-	28,561	5,260	21,518
	Antucoya	78,580	112	36	-	0	0
	Centinela	274,197	5,572	1,798	-	1,993	8,151
	Chuquicamata	319,280	3,563	1,150	-	8,127	33,246
	El Abra	72,654	6,632	-	24,453	11,499	47,042
	Escondida	1,011,327	36,998	-	136,417	37,944	155,226
	Gabriela Mistral	100,900	417	135	-	1,042	4,262
	Lomas Bayas	64,282	0	0	-	0	0
	Mantos Blancos	45,706	475	-	1,752	3,665	14,991
	Michilla	21,228	32	-	116	0	0
	Ministro Hales	181,704	1,854	598	-	3,295	13,481
	Radomiro Tomic	326,456	4,058	1,309	-	8,518	34,847
	Spence	203,100	1,512	-	5,576	0	0
	Sierra Gorda	198,200	2,646	-	9,756	0	0
	Zaldivar	88,025	1,676	541	-	2,065	8,446
	Candelaria	118,627	486	157	-	12,700	51,954
	Caserones	109,675	0	-	0	7,566	30,953
	Manto Verde	49,013	1,684	-	6,211	5,981	24,467
Salvador	52,938	715	-	2,637	3,012	12,323	
Central-South	Carmen de Andacollo	44,780	0	0	-	2,832	11,585
	Los Pelambres	336,300	0	0	-	17,581	71,923
	El Soldado	42,262	0	0	-	0	0
	Andina	177,216	0	0	-	4,096	16,757
	Los Bronces	327,720	7,710	2,448	-	10,730	43,853
	El Teniente	459,817	0	0	-	19,019	36,894

2.5 DISCUSSION

Quantification of productive losses in mining due to climate hazards has not yet been done, but there is a methodology suggested by Schnebele et al. (2019) can be used to quantify productive losses due to natural disasters related to earthquakes. Based on this methodology, which considers concepts of vulnerability, hazard, and exposure, elements pertaining to the risk assessment (Giz & Eurac, 2017), it is possible to calculate production losses in large-scale copper mining in Chile due to the hazards of extreme precipitation and drought. However, a joint model that represents the impact of climate change on the mining industry in Chile has not been achieved due to the heterogeneity of climate hazards. These hazards must be analyzed considering their nature, temporal dimension (extreme and slow events), synergies, geographic context, exposure elements, and other factors (C40, 2018).

The modeling considered the vulnerability factor through a weighted average of factors and subfactors (Table 2.1 and 2.2). For simplicity, all factors had the same weight. However, further research is required to determine the correct weights of each factor, which, depending on the characteristics of the terrain and climatic conditions, will determine a greater impact of the climate hazard. Furthermore, some factors could include more elements in their calculation, for example, the factor "Geology" could include "rock type" and "hydrological conditions" in addition to the subfactor "Erosion," as suggested by Lee et al. (2018) and Momon et al. (2021). The "rock type" is related to the resistance, which affects the material available to generate landslides, while the "hydrological conditions" are related to the distance to bodies of water, i.e., the possibility of flooding in the event of increased precipitation.

In the modeling, the vulnerability component considers the current situation of each mining site but does not include projections and future trends. For example, the vulnerability subfactors "seawater per mine" and "continental water per mine" (for the current situation) were considered among the vulnerability subfactors for the hazard of drought. However, by 2030, seawater consumption is expected to increase by 156% compared to 2019 and represent 47% of the water required by mining in Chile, while the use of continental water will decrease by 6% (11 m³/sec) compared to 2019 consumption (13.3 m³/sec) (COCHILCO, 2019a). This trend would generate changes in the analysis performed, and possibly, for some mining facilities, the subfactor "continental water per mine" would not imply an element of vulnerability. Therefore, the results obtained should be used as a tool to understand "what would happen if the mining situation does not change and faces climate hazards in the future," which will guide actions for the development of adaptation plans in the short term. (Del Río Sánchez, 2022).

The models for each climate hazard have variations in their methodology. The EAD for extreme precipitation and drought are determined differently, depending on the available climate information on the frequency of occurrence of each climate hazard. Due to how sensitive the model is to changes in vulnerabilities, the results also show that the EAD for drought is higher than that for extreme rain. These changes are based on historical data, which, faced with the hazard of drought, shows that greater vulnerability leads to greater production losses when compared to the hazard of extreme precipitation. When the same comparison is made by geographic area (Table 2.5), the result is the same, with the EAD of drought being higher than the EAD of extreme precipitation. According to information from MMA (2022), it was expected that the EAD of drought would be higher in the central-south because the hazard would happen more often in the future for the facilities in the zone and these facilities were more likely to run out of water because

most of them were in high areas and it would cost more to pump water from the sea and it to the facilities (Rivera et al., 2020). Meanwhile, in the north zone, the results are explained by the greater vulnerabilities of the facilities. It is important to emphasize that the facilities within each geographic zone are not spatially distributed uniformly, with some facilities contributing more production than others (Schnebele et al., 2019). For example, an extreme precipitation event throughout the country would leave more of the copper supply exposed if it occurred in the north than in the central-south zone.

Table 2.5. EAD (%) by climatic hazard for each geographic area. Source: Own.

Geographic area	EAD Precipitation (%)	Extreme EAD Drought (%)
North zone	1.39%-5.08%	2.27%-9.30%
Central-South zone	0.00%-0.00%	0.36%-1.48%

Special attention should be paid to facilities located above 3000 masl (Collahuasi, Quebrada Blanca, El Abra, Escondida, Zaldívar, Caserones), as their EAD values for extreme precipitation and drought are close. According to the Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (2018), a slight increase in daily precipitation intensity is expected at these locations. Araya-Osses et al. (2020) also mention a 40% increase in precipitation, both in summer and winter, for the distant future (2081-2100), which poses a higher risk of extreme precipitation and thus higher values of copper supply disruption, which may exceed the disruption due to drought hazard. As disruptions become more frequent, the resilience of the supply chain will deteriorate, necessitating adaptation to avoid major disruptions (Lim-camacho et al., 2017).

The EAD calculation for each hazard was performed under the RCP8.5 climate change scenario, a pessimistic emissions scenario. We incorporated climate information from the "Climate Simulations" platform of Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 & Ministerio del Medio Ambiente (2018) to perform the EAD calculation for extreme precipitation (information available only for this hazard) under the RCP2.6 scenario (a scenario in which radiative forcing reaches a maximum of 3 W/m² before 2100 and then decreases to 2.6 W/m² in 2100 (IPCC, s. f.), consistent with an increase in the average global temperature of less than 2°C with respect to the pre-industrial era), an optimistic emissions scenario. We obtained EAD values for large-scale copper mining (I-VI region) between 0.78% and 2.74%, equivalent to production losses between 51,000 and 180,000 metric tons/year. The EAD under this new scenario has lower productive losses than the RCP8.5 scenario, which is explained by higher precipitation intensity in the latter scenario (CR2, 2018). A warmer atmosphere (RCP8.5 scenario) may contain more water vapor, which produces more intense precipitation, including 6-7% increases in precipitation intensity per degree of warming (Schroerer & Kirchengast, 2018). It is important to note that the results obtained from the "Climate Simulations" should be interpreted with caution, as they are based on two simulations and not an ensemble of climate simulations, such as the climate indicators of the ARClm project.

2.5.1 Hazard adaptation measures

To ensure that mining production is sustainable and efficient in the long run, it is important to determine how much production is lost due to climate change. This information is useful for the government and the mining industry because it helps them identify potential problems and

opportunities related to climate change. For government authorities, the information can be used to identify the companies that are most affected and develop public policies to mitigate the effects of climate change on mining production. These policies could include tax incentives or financing programs for companies. For the mining industry, the information can help to identify the most affected areas and prioritize responses to climate change threats by creating adaptation plans that are tailored to the needs of each facility. Additionally, the information can be used to make economic assessments of how production losses may affect the industry and the overall mining system. Providing accurate information can increase investors and societal confidence in the mining industry's capacity (Tabelin et al., 2021). Some authors, such as Lim-camacho et al. (2017), mention that supply chain adaptation can be complex, because measures taken in one area can have positive and negative implications in another. However, we emphasize the need for anticipatory adaptation in the mining system rather than reactive adaptation. Northey et al. (2017), even emphasize that these plans should be well-developed before mining exploitation begins.

2.5.1.1 Adaptation to extreme precipitation and drought

In order to manage climate risks, it is necessary to explore and implement efficient adaptation measures. Therefore, for each climate hazard, the following are suggested measures that should be included in a potential adaptation plan. For extreme precipitation:

- Improving the infrastructure of mining facilities, such as electrical, road and rail infrastructure. Includes improvements in planning, construction and maintenance processes. For electrical infrastructure, improvement in the ability to isolate fault locations to avoid impacts on the rest of the network. For road infrastructure, the creation or improvement of alternative entry and exit routes (Loechel et al., 2013).
- Establish flood defense measures (Smith, 2013).
- Provision of emergency supplies (Pumping equipment and standby generators) (Smith, 2013).
- Procurement of insurance (Smith, 2013).
- Increase storage capacity for essential materials, fuel and used products (Smith, 2013).
- Improving drainage systems to help water penetrate the soil, reducing runoff (Smith, 2013).
- Implementing campaigns to increase awareness and responsiveness to emerging risks, such as flooding (Loechel et al., 2013).
- Working with local water catchment authorities and local and state governments to encourage regional flood management and mitigation planning. Encourage regional investment in identifying opportunities for water storage and recovery from managed aquifers (Smith, 2013).

Suggested measures for the hazard of drought are:

- Increased water use efficiency, in particular, water fit for consumption, to avoid unnecessary use of high quality water (Loechel et al., 2013).
- Reuse of water from one process and/or sector to another (Loechel et al., 2013)
- Recycling of water from one process (Loechel et al., 2013).
- Increased rainwater harvesting and increased capture and storage of summer precipitations runoff (Loechel et al., 2013).
- Strategic storage of water of different types (potable, fresh, saline, recycled) (Loechel et al., 2013).
- Identification and exploitation of additional water sources when cost-effective and environmentally acceptable (Loechel et al., 2013).
- Desalination (Loechel et al., 2013).
- Establishment of collaborative agreements with communities and local governments that use the same water resources to avoid competition for those resources (Smith, 2013). In addition, improving communication channels with the community to publicize their actions (Centro UC Cambio Global, 2019) and implementation of monitoring technologies for the management of water demand and use (AngloAmerican, 2020; Antofagasta Minerals, 2021).

Measures can be implemented for both hazards, such as relocation and expansion of operating zones to decrease the risk of business continuity failure due to climate factors (Centro UC Cambio Global, 2019), strengthening climate change governance (Codelco, 2021) and investing in climate research and monitoring to understand climate hazards (Mason et al., 2013).

The advantage of some of the suggested measures is that they can have benefits for the mine or its surroundings (environment and communities) and can act as either an adaptation or a mitigation measure, such as "water use efficiency". However, to implement such measures, there are monetary (investing capital), cultural and/or knowledge barriers (resistance to change or lack of leadership), in addition to governmental complications (institutional arrangements) (Loechel et al., 2013).

2.6 CONCLUSION

The increasing global demand for minerals to support the transition towards sustainable low-carbon energies that mitigate the negative impacts of climate change is expected to increase copper demand. However, as climate change progresses, mining operations will be increasingly affected by more frequent and intense extreme weather events, which may disrupt operations and damage mining infrastructure. In particular, copper-producing facilities in Chile have historically faced the danger of extreme precipitations events and, in recent years, droughts that have caused significant production losses in the north and central-south regions of the country. Quantifying these losses is a challenging task, highlighting the need to determine the components of climate risk assessment

(hazard, threat, and exposure) at the facility level to understand the impacts of climate change on the copper mining industry in Chile.

In this study, a methodological approach was developed to quantify the disruption of copper supply in large-scale copper mining in Chile in the face of climate hazards for facilities located in the north and central-south of the country, based on facility-level data. The models consider: i) the production of each facility projected for 2030, ii) the vulnerability model from which production losses are calculated, and iii) the frequency of occurrence of extreme precipitation and drought events. It was found that not only the magnitude of the climatic event by itself is capable of generating disruptions in production, but also the intrinsic factors of each mine that generate conditions conducive to increasing the vulnerability of the facility. Among the factors studied for extreme precipitation, topographic and geological factors stand out, while for droughts, technological factors, water consumption, and availability stand out. It should be recognized that further research is needed to select the vulnerability factors that determine the most realistic scenario, considering that climate hazards not only cause direct damage but also hinder operations by interrupting the supply chain, such as disruptions to electrical systems, flooding, landslides, road closures, port closures, and water shortages.

We calculated the EAD for the hazard of extreme precipitation for large-scale copper mining (Regions I-VI), which ranges from 1.07% to 3.90%. We also calculated the EAD for the drought hazard, which ranges from 2.64% to 10.78%, as well as the EAD for each facility (Table 2.4). The EAD for drought is higher than that for extreme precipitation, due to the model's sensitivity to changes in vulnerabilities. These estimated trends can serve as a guide for similar metal industries.

The results shown are a step forward in figuring out how to measure the effects of climate change, and they show what could happen to copper production in the future based on a set of assumptions for a pessimistic climate change scenario (Scenario RCP8.5). In other words, the results show the consequences of not taking action to adapt to future climate hazards and guide companies and policy makers to be increasingly aware that climate change could affect them.

2.6.1 Limitations and uncertainties

The availability of information plays a crucial role in generating quantification models in the face of climate hazards and in the accuracy of the results, which are influenced by factors such as the transparency of the information and ease of access (Schrijvers et al., 2020). Within the limitations of this research, not all mining facilities report on the problems they have experienced due to climate hazards, and information provided by third parties is more prevalent than information provided directly by the company. In addition, some databases lack detail at the facility level for determining vulnerability factors. By compiling this information, more accurate individual projections could be made. Similarly, with reasonable assumptions, reliable estimates can be made in most cases.

Uncertainties are inherent in any future projection, especially in the long term (Schipper et al., 2018), and particularly in the face of such a variable component as climate. We have controlled for this factor by using climate information from the ARCLIM project, which aggregates data from more than 60 Global Circulation Models of the atmosphere (GCMs). However, one concern is that the data is presented as an average between simulations at the period level, without access to each simulation performed or to the daily simulations, which limited the projection in time.

2.6.2 Future work

For future work and a thorough analysis of the impacts of climate change on mineral commodity supply, it is critical to consider not only supply chain disruptions caused by extreme precipitation and drought hazards, but also coastal (coastal storms and sea level rise) and extremes weather events, such as storms (snowfall, floods and landslides) and heat and cold waves (wildfires and favorable conditions for disease development) (CR2 et al., 2022).

In this study, we attempted to determine the cost of copper supply disruptions caused by direct and indirect damages. To strengthen the database, it would be helpful to include copper disruptions caused by changes in rules and laws, as well as strikes in towns near the mines. That is, interruptions associated with environmental impacts that have affected the local environment and have intensified due to climate change, such as droughts. For example, BHP's Cerro Colorado mine has been affected by a prohibition from the environmental court to extract water from the Lagunillas aquifer, which could result in the operation being shut down (Peña, 2021; Sud Austral Consulting SpA & NeoUrbanismo Consultores SpA, 2020), thereby disruption supply. Another disruption has occurred in the Coquimbo region due to problems with the use of water from the Choapa River by Antofagasta Minerals' Los Pelambres mine, leading to mobilizations that blocked access to the mining site for 15 days (ADN, 2015; La Tercera, 2015a). Similar problems have occurred at AngloAmerican's El Soldado mine, which saw its production disrupted for almost 30 hours due to a blockade of access to the mine by neighbors from the town of El Melón in Nogales, who complained about water shortages (El Observador, 2022).

The transcendence of the effects of climate change and its partial inevitability, even in the most optimistic scenario, urgently pushes towards the development of national, territorial and sectoral climate change adaptation policies and plans (CR2 et al., 2022), aimed at facilitating the processes of adaptation and management of the risks associated with the phenomenon (IPCC, 2014). In this sense, although the EAD is a measure to quantify the risk for the supply of minerals, this study could be complemented by including the calculation in the components of the supply chain, i.e., calculating losses of life or housing in areas surrounding the mining facility (local environment and communities) as an input for localities and management in these areas.

Lastly, we propose to extend our study to other copper facilities around the world, especially in places that have already suffered from the effects of climate change. The Hatayama & Tahara (2018) database reports 9 mining facilities that have had copper supply disruption: 3 in the Philippines (Toledo Mine, Rapu Rapu Rapu Mine, Pasar Plant), 3 in Australia (Balcooma Mine, Mt Garnet Mill Mine, Vomacka Mine), 1 in Indonesia (Grasberg Mine), 1 in China (Yongping Mine) and 1 in the United States (Bingham Canyon Mine), as a result of typhoons and landslides, with supply suspension in some cases for months to years. Production losses of 55% were estimated in those years, a high figure due to the fact that mines such as Toledo stopped producing for about 14 years, fatal accidents occurred at the Grasberg mine and at the Bingham Canyon mine, the landslide involved an estimated 147 million tons of material that buried more than 95% of the shaft floor below 30 to 122 m. Furthermore, the methodology used in this work is not exhaustive for copper alone, we suggest extending the investigation to other raw materials, such as cobalt, nickel, and rare earths (neodymium, terbium, lanthanum, among others), which are very valuable materials for the increasing deployment of electric vehicles and renewable energy technologies (Seck et al.,

2020). This will allow for a more complete assessment of the potential impact of climate hazards on the availability of mineral raw materials in the future.

2.7 ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by FONDEF Project 20I10147. The support grant for master's studies is gratefully acknowledged. P. Fernández dedicates this work to his family for their unconditional support during these years of study.

CAPITULO 3

3. Discusiones

A continuación, se presentan algunas de las principales ideas que se discutieron en la sección 2.5:

- Desarrollar un modelo conjunto, que representa el impacto del cambio climático en la industria minera de Chile, no se ha logrado, debido a las características particulares de cada amenaza climática.
- El cálculo del factor de vulnerabilidad requiere mayor investigación, para determinar los pesos de los factores y subfactores, así como también para incorporar nuevos elementos. Además, que algunos de ellos consideran la situación actual de la minería por lo que los resultados deben ser utilizados como una herramienta para entender “que pasaría si la situación minera no cambia y enfrenta amenazas climáticas en el futuro”.
- Independiente del análisis realizado, las pérdidas productivas por sequías son siempre mayores a las pérdidas productivas por precipitaciones extremas debido a la sensibilidad del modelo a los cambios de vulnerabilidades.
- Al incorporar el escenario climático RCP2.6 para precipitaciones extremas, escenario optimista de emisiones, las pérdidas productivas son menores, debido a que las frecuencias de ocurrencia de esta amenaza ocurren con menor periodicidad (Tabla A.1 y A.2). Sin embargo, es importante tener precaución al interpretar los resultados de otras fuentes, en particular, porque la información para el escenario RCP2.6 se basa en dos simulaciones climáticas y no un ensamble como los resultados del escenario RCP8.5.
- Las medidas sugeridas ante la amenaza de precipitaciones extremas son: Mejora de la infraestructura minera; Medidas de defensa; Concientizar y aumentar la capacidad de respuesta antes riesgos y; Trabajo con autoridades locales para la gestión regional.
- Las medidas sugeridas ante la amenaza de sequías son: Eficiencia en el uso de agua; Reutilización y reciclaje; Captación y almacenamiento estratégico; Desalinización y; Acuerdos de colaboración con comunidades y gobiernos locales para gestión de recursos hídricos.

Los modelos de precipitaciones extremas y sequías incorporan en su cálculo el pronóstico de la frecuencia de ocurrencia de cada amenaza. En particular, ante la amenaza de sequía, la obtención de esa información no solo se debería provenir de los índices climáticos asociados a la escasez de precipitaciones, sino también a las altas temperaturas, debido a que existen faenas mineras que ya han sufrido pérdidas productivas por esta última variable. Ejemplo de los anterior ha ocurrido en 2014 para AngloAmerican Sur quienes mencionan una caída de un 30% en su producción, causado por el aumento de las temperaturas en los meses de agosto y octubre que genero un deshielo anticipado, provocando la falta de agua entre noviembre y diciembre del mismo año (La Tercera, 2015b). Al realizar el cálculo de la EAD para sequías incorporando los indicadores climáticos del proyecto ARClím denominados, “Consecutive days over 25°C”, “Consecutive days over 28°C” y

“Consecutive days over 30°C” al indicador “Consecutive dry days” se obtiene, pérdidas de producción entre 4.41% a 18.03%, un 2% a 8% mayores que si solo se utiliza un indicador climático. Lo anterior se explica y es observado en la Tabla 3.1, producto de que el pronóstico de la frecuencia de olas de calor puede llegar a alcanzar valores de 116 días en comparación con los eventos de días secos consecutivos cuyo máximo es de 27 días e incluso existe instalaciones que presentan frecuencias nulas para esta última variable, mientras que para olas de calor si se presentan frecuencias, como es el caso de la mina Antucoya y Michilla.

Tabla 3.1. Comparación de índices climáticos, días secos consecutivos y olas de calor. Fuente: Propio basado en la base de datos de ARClím (Ministerio del Medio Ambiente, 2012).

Mina	Indicadores climáticos (Diferencia Futuro y Presente)			
	Días Secos Consecutivos	Días consecutivos entre 25 y 28°C	Días consecutivos entre 28 y 30°C	Días consecutivos sobre 30°C
Cerro Colorado	9.64	2.21	0.03	0.00
Collahuasi	8.97	0.00	0.00	0.00
Quebrada Blanca	7.93	0.00	0.00	0.00
Antucoya	0.00	86.42	23.96	1.90
Centinela	1.46	71.14	29.30	4.70
Chuquicamata	9.62	29.61	1.18	0.02
El Abra	14.40	0.00	0.00	0.00
Escondida	12.60	0.00	6.44	0.00
Gabriela Mistral	7.63	55.25	6.96	0.55
Lomas Bayas	5.97	29.56	42.84	16.45
Mantos Blancos	22.61	63.27	26.93	2.32
Michilla	0.00	33.71	0.80	0.04
Ministro Hales	7.38	74.61	7.63	0.64
Radomiro Tomic	8.81	10.02	0.19	0.00
Spence	0.00	0.00	0.00	116.09
Sierra Gorda	0.00	0.00	0.00	107.19
Zaldivar	13.13	1.59	0.02	0.00
Candelaria	27.50	40.79	10.06	1.10
Caserones	13.31	8.83	0.00	0.00
Manto Verde	20.92	69.02	5.21	0.50
Salvador	16.84	1.86	0.00	0.00
Carmen de Andacollo	16.22	4.93	0.30	0.01
Los Pelambres	15.85	5.07	3.88	1.49
El Soldado	19.23	16.70	2.42	0.42
Andina	10.28	0.00	0.00	0.00
Los Bronces	10.05	0.00	0.00	0.00
El Teniente	8.98	17.14	2.81	0.42

Otra variable fundamental en los modelos, es el parámetro de vulnerabilidad, que es determinado en base a los eventos climáticos pasados, modelados de forma lineal al relacionarlo con las pérdidas

productivas. Esta linealidad debe ser estudiada con mayor profundidad, ya que se eligió de esa manera para simplificar el cálculo.

La metodología utilizada para el cálculo de la EAD se basó en el trabajo de Schnebele et al. (2019). Al comparar los resultados obtenidos en esta investigación con los obtenidos por estos autores, se observa que, para terremotos en base a todas las instalaciones analizadas, la EAD es de 204,000 a 730,000 toneladas métricas, mientras que la EAD para precipitaciones extremas y sequías es de 264,000 a 1,063,000 toneladas métricas. Se podría deducir que los eventos asociados al cambio climático tienen un impacto mayor que los eventos sísmicos. Es importante destacar que las instalaciones mineras pueden contar con planes de adaptación específicos para cada amenaza, lo que permite reducir las pérdidas mencionadas anteriormente. En el caso de que estos planes aún no estén implementados, para eventos climáticos es posible conocer en el corto plazo (días) el pronóstico de ocurrencia, a diferencia de un terremoto, lo que brinda la posibilidad de prepararse y cumplir con los requisitos necesarios para minimizar las pérdidas.

Finalmente, el cálculo de la incertidumbre de los resultados toma en cuenta la frecuencia de ocurrencia de las amenazas climáticas y la proyección de la producción. Para el parámetro de proyección de la producción, se consideró la variación entre el escenario de producción esperada, respecto de los escenarios de producción máxima y mínima (Tabla 3.2). Este análisis permitió determinar una incertidumbre del 15% a nivel nacional entre los escenarios mencionados. Luego, mediante el método de propagación de errores y la extrapolación de la información anterior a las instalaciones mineras, se obtuvo como resultado una EAD para la minería del cobre entre la I a VI región de $1.39\% \pm 0.86\%$ a $5.08\% \pm 3.14\%$ para precipitaciones extremas y una EAD de $2.64\% \pm 4.51\%$ a $10.78\% \pm 14.99\%$ para sequías. Cabe destacar que las incertidumbres son mayores para las sequías, ya que también lo son las incertidumbres de las frecuencias de ocurrencia de las amenazas a nivel de instalación.

Tabla 3.2. Escenarios de proyección esperada, máxima y mínima de producción, entre el 2019 y 2030, en miles de toneladas. Fuente: COCHILCO (2019b).

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Producción máxima	6.241,7	6.421,5	6.485,2	6.843,2	7.217,3	7.717,3	7.649,8	8.003,9	8.458,2	8.174,3	8.186,4	8.079,4
Producción esperada	5.882,0	5.870,3	5.912,3	6.188,5	6.539,5	6.885,6	6.813,8	7.011,0	7.327,2	7.151,9	7.083,6	7.038,9
Producción mínima	5.169,8	5.290,4	5.306,8	5.571,2	5.865,9	6.147,1	6.033,3	6.137,9	6.362,3	6.094,9	6.031,5	5.906,7

CAPITULO 4

4. Conclusión y futuros trabajos

4.1 Conclusiones

Se ha desarrollado un enfoque metodológico para cuantificar la interrupción del suministro de cobre en la gran minería de cobre en Chile ante amenazas climáticas para instalaciones ubicadas desde la región de O'Higgins hacia el norte. Los modelos consideran: i) la producción de cada instalación proyectada para el 2030, ii) el modelo de vulnerabilidad a partir del cual se calculan las pérdidas productivas y iii) la frecuencia de ocurrencia de los eventos de precipitaciones extremas y sequías. En base a los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- La definición de los modelos se fundamenta en diversos factores, siendo la disponibilidad de información un elemento clave para generar modelos simplificados que permitan un cálculo más eficiente. Por ejemplo, al modelar la vulnerabilidad, se utilizó un enfoque lineal con el objetivo de simplificar el proceso.
- El parámetro de vulnerabilidad del modelo considera factores y subfactores relevantes para cada una de las amenazas climáticas analizadas en su condición actual, por lo tanto, es importante destacar que los resultados obtenidos deben ser interpretados bajo la consideración de que, en caso de no producirse cambios significativos en la situación minera, la industria podría enfrentar dichas amenazas en el futuro. Adicionalmente, se reconoce la necesidad de continuar investigando para seleccionar los factores más adecuados, teniendo en cuenta que las amenazas climáticas no solo causan daños directos, sino que también pueden generar dificultades operativas al interrumpir la cadena de suministro.
- Dentro del modelo, el parámetro de frecuencia de ocurrencia de las amenazas climáticas es de gran relevancia. Específicamente en el caso de las sequías, resulta crucial analizar con detenimiento y de forma individual si es necesario incluir un índice climático basado en la escasez de precipitaciones o utilizar un índice climático combinado que relacione, además, a las altas temperaturas.
- Se calculó la EAD ante la amenaza de precipitaciones extremas para la gran minería del cobre (I-VI región) que es entre 1.39% y 5.08%, la EAD para la amenaza de sequías que es entre 2.64% y 10.78% y la EAD para cada instalación (Tabla 3). La EAD por sequía es mayor a la de precipitaciones extremas, debido a la sensibilidad del modelo a los cambios de vulnerabilidades. Estas tendencias estimadas, pueden servir de referencia para metales similares.
- Al comparar los valores de la EAD asociados a precipitaciones extremas y sequías con la EAD de los terremotos, se puede concluir que los eventos relacionados con el cambio climático tienen un impacto mayor. De todas formas, las amenazas climáticas pueden preverse con anticipación y, de esta manera, intentar minimizar las pérdidas productivas que se puedan generar.

- Los resultados mostrados suponen un paso adelante para la cuantificación de los impactos del cambio climático y revelan cómo podría ser la interrupción en la producción de cobre en un futuro, dado un conjunto de supuestos bajo un escenario pesimista de cambio climático (Escenario RCP8.5). Es decir, los resultados muestran las consecuencias de no tomar acciones para adaptarse ante amenazas climáticas futuras y orienta a que las empresas y a los responsables políticos sean cada vez más conscientes de que el cambio climático les podría afectar.

4.2 Futuros trabajos y recomendaciones

El resumen de los futuros trabajos, ya mencionados en la sección 2.6.2 se presenta a continuación:

- Considerar diversas amenazas climáticas, como las costeras y eventos extremos como tormentas, olas de calor y frío, además de precipitaciones extremas y sequías, para analizar exhaustivamente los impactos del cambio climático en el suministro de productos minerales.
- En este estudio se cuantificó la interrupción en el suministro de cobre causada por daños directos e indirectos, pero se recomienda fortalecer la base de datos incluyendo interrupciones por cambios de normas y leyes, huelgas y problemas ambientales. Es decir, interrupciones asociadas a impactos ambientales que han afectado al medioambiente local y que se han intensificado producto del cambio climático, como son las sequías.
- Se sugiere complementar este estudio que utiliza la EAD como medida para cuantificar el riesgo para el suministro de minerales, incluyendo también la cuantificación de pérdidas de vida, viviendas y fauna local en zonas aledañas a la instalación minera como insumo para las localidades y la gestión en estas zonas.
- Se propone ampliar el estudio a instalaciones de cobre en otras regiones del mundo que han sufrido interrupciones en el suministro debido a los efectos del cambio climático. Además, se sugiere incluir en la investigación otras materias primas, como el cobalto, níquel y las tierras raras, para obtener una evaluación más completa del impacto potencial de las amenazas climáticas en la disponibilidad de materias primas minerales en el futuro.

Con mayor disponibilidad de información climática, en especial con un modelo de precipitaciones continuo, generar una relación más robusta entre la Frecuencia de ocurrencia de la amenaza y el factor de vulnerabilidad (como se observa en la Figura 1.5). Además, de probar enfoques distintos al lineal para modelar la vulnerabilidad.

Bibliografía

ADN. (2015). *Vecinos de Salamanca llegaron a un acuerdo con Minera Los Pelambres*. ADN radio. <https://www.adnradio.cl/nacional/2015/03/11/vecinos-de-salamanca-llegaron-a-un->

- acuerdo-con-minera-los-pelambres-2668550.html
- Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Luellmann, A., Erdman, L., Scharp, M., Handke, V., & Marwede, M. (2009). *Raw materials for emerging technologies. The influence of sector-specific feedstock demand on future raw materials consumption in material-intensive emerging technologies. Final report - Abridged. Germany.* <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21292270>
- AngloAmerican. (2020). *Reporte de Sustentabilidad 2020.* <https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group/Chile/medios/reportes/anglo-american-report-de-chile-2020.pdf>
- Antofagasta Minerals. (2021). *Reporte sobre Cambio Climático 2021. Producción de cobre responsable y sustentable.*
- Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., & Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54(9–10), 4309–4330. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>
- Buchert, M., Schüler, D., & Bleher, D. (2009). *Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential. Unep 107.* <https://www.oeko.de/oekodoc/1070/2009-129-en.pdf>
- C40. (2018). *Consumption-based GHG Emissions of C40 cities.* <https://www.c40.org/research/>
- Centro UC Cambio Global. (2019). *Empresas y cambio climático en Chile: el camino hacia una adaptación sostenible.* https://cambioglobal.uc.cl/images/proyectos/ResumenEjecutivo_EmpresasCambioClimatico_AccionEmpresas-CCG-UC.pdf
- CEPAL. (2009). *La economía del cambio climático en Chile: Síntesis.* https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/32827/S2009772_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- CIREN. (s. f.). *Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales Nativos.* Recuperado 9 de marzo de 2023, de [tml?id=d058d49e817e495486ddba5e035588ef](https://www.ciren.cl/portal/contenido/monitoreo-de-ecosistemas-forestales-nativos)
- COCHILCO. (2013). *Minería en Chile: Impacto en regiones y desafíos para su desarrollo.* https://www.cochilco.cl/Libros/Libro_Mineria_en_Chile_Impacto_en_Regiones_y_Desafios_para_su_Desarrollo.pdf
- COCHILCO. (2019a). *Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2019-2030.* [https://www.cochilco.cl/Listado Temtico/proyeccion agua mineria del cobre 2019-2030 VF.pdf](https://www.cochilco.cl/Listado_Temtico/proyeccion_agua_mineria_del_cobre_2019-2030_VF.pdf)
- COCHILCO. (2019b). *Proyección de la producción de cobre en Chile 2019-2030.* [https://www.cochilco.cl/Listado Temtico/Proyección de la producción esperada de cobre 2019 - 2030 Vfinal.pdf](https://www.cochilco.cl/Listado_Temtico/Proyeccion_de_la_produccion_esperada_de_cobre_2019_-_2030_Vfinal.pdf)
- COCHILCO. (2020). *Consumo de agua en la minería del cobre al año 2019.* [https://www.cochilco.cl/Listado Temtico/2020 10 30 Consumo de agua en la minería del cobre al 2019_version final.pdf](https://www.cochilco.cl/Listado_Temtico/2020_10_30_Consumo_de_agua_en_la_mineria_del_cobre_al_2019_version_final.pdf)
- COCHILCO. (2022a). *Informe de tendencias del mercado del cobre: Proyecciones 2021-2022, Primer Trimestre de 2021.* [https://www.cochilco.cl/Mercado de Metales/Inf. Tendencias Mercado del Cobre Proy 2021-2022 Q1 2021.pdf](https://www.cochilco.cl/Mercado_de_Metales/Inf._Tendencias_Mercado_del_Cobre_Proj_2021-2022_Q1_2021.pdf)
- COCHILCO. (2022b). *Producción cobre de mina por empresa (mensual).*
- COCHILCO. (2023). *Precios de los Metales e Inventarios.* Boletín Cochilco. https://boletin.cochilco.cl/estadisticas/grafico.asp?tipo_metal=1
- Codelco. (2021). *Reporte de Sustentabilidad 2021 (Número 6).* https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20220429/20220429131137/reportes_sustentabilidad_codelco_2021.pdf

- CR2. (2018). “*Simulaciones climáticas regionales*”. Proyecto “*Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad*” (Número Fondap 15110009). <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/05/Simulaciones-climaticas-regionales-2018.pdf>
- CR2. (2022). *Explorador climático*. <https://explorador.cr2.cl/>
- CR2, Industrial, C. I., & FCFM Ingeniería de Minas. (2022). *Herramientas para la construcción de escenarios prospectivos de gestión del riesgo climático y desarrollo de estrategias de adaptación: el caso del sector minero. Informe Segundo Hito*.
- CR2, & MMA. (2018). *Simulaciones climáticas* (Nº v1). CR2. <https://www.cr2.cl/plataforma-de-simulaciones-climaticas/>
- de Koning, A., Kleijn, R., Huppes, G., Sprecher, B., van Engelen, G., & Tukker, A. (2018). Metal supply constraints for a low-carbon economy? *Resources, Conservation and Recycling*, 129(August 2017), 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.040>
- Del Río Sánchez, J. (2022). *Insumo clave para un plan de adaptación del sector minero: Mapas de riesgo climático del cobre de la Segunda Región*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/186008>
- Duclos, S. J., Otto, J. P., & Konitzer, D. G. (2010). Design in an era of Constrained Resources. *Mechanical Engineering*, 132(09), 36–40. <https://doi.org/10.1115/1.2010-Sep-3>
- Eheliyagoda, D., Zeng, X., & Li, J. (2020). A method to assess national metal criticality: the environment as a foremost measurement. *Humanities and Social Sciences Communications*, 7(1), 43. <https://doi.org/10.1057/s41599-020-00537-4>
- El Observador. (2022). *Vecinos de El Melón terminan bloqueo a mina El Soldado y abren diálogo con AngloAmerican*. El Observador. <https://www.observador.cl/vecinos-de-el-melon-terminan-bloqueo-a-mina-el-soldado-y-abren-dialogo-con-anglo-american/#:~:text=Hubo al menos tres reuniones,Caleos de El Melón%2C Nogales.>
- European Commission. (2014). *Report on critical raw materials for the EU*. [https://doi.org/https://doi.org/Ref.Ares\(2015\)1819595-29/04/2015](https://doi.org/https://doi.org/Ref.Ares(2015)1819595-29/04/2015)
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2017). *Hazus® Estimated Annualized Losses for the United States*. FEMA, pp. 366; Jaiswal, K.S., Bausch, D., Chen, R., Bouabid, J., Seligson, H., 2015. *Estimating annualized earthquake Losses for the conterminous United States*. *Earthq. Spectra* 31 (S1), S221-S243.
- Figuroa Vera, M. (2012). *Evaluación preliminar de riesgos medioambientales de faenas mineras abandonas paralizadas mediante sig en la II región de Antofagasta, Chile* [University of Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/100401>
- Ford, J. D., Pearce, T., Prno, J., Duerden, F., Berrang Ford, L., Beaumier, M., & Smith, T. (2010). Perceptions of climate change risks in primary resource use industries: a survey of the Canadian mining sector. *Regional Environmental Change*, 10(1), 65–81. <https://doi.org/10.1007/s10113-009-0094-8>
- Ford, J. D., Pearce, T., Prno, J., Duerden, F., Berrang Ford, L., Smith, T. R., & Beaumier, M. (2011). Canary in a coal mine: perceptions of climate change risks and response options among Canadian mine operations. *Climatic Change*, 109(3–4), 399–415. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0029-5>
- Frenzel, M., Kullik, J., Reuter, M. A., & Gutzmer, J. (2017). Raw material ‘criticality’—sense or nonsense? *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(12), 123002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5b64>
- Fundación Chile. (2018). *Radiografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile*. En *Escenarios Hídricos 2030*. <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/resumen-radiografia-del-agua-1.pdf>

- Giz & Eurac. (2017). *Risk Supplement to the Vulnerability Sourcebook. Guidance on how to apply the Vulnerability Sourcebook's approach with the new IPCC AR5 concept risk*. Bonn: GIZ. http://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2017/10/GIZ-2017_Risk-Supplement-to-the-Vulnerability-Sourcebook.pdf
- Graedel, T. E., Barr, R., Chandler, C., Chase, T., Choi, J., Christoffersen, L., Friedlander, E., Henly, C., Jun, C., Nassar, N. T., Schechner, D., Warren, S., Yang, M., & Zhu, C. (2012). Methodology of Metal Criticality Determination. *Environmental Science & Technology*, 46(2), 1063–1070. <https://doi.org/10.1021/es203534z>
- Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T., Nuss, P., & Reck, B. K. (2015). Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14), 4257–4262. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>
- Habib, K., & Wenzel, H. (2016). Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective – using the case of direct-drive wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3852–3863. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.064>
- Hatayama, H., & Tahara, K. (2018). Adopting an objective approach to criticality assessment: Learning from the past. *Resources Policy*, 55, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.11.002>
- Helbig, C., Bradshaw, A. M., Wietschel, L., Thorenz, A., & Tuma, A. (2018). Supply risks associated with lithium-ion battery materials. *Journal of Cleaner Production*, 172, 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.122>
- Hodgkinson, J. H., Hobday, A. J., & Pinkard, E. A. (2014). Climate adaptation in Australia's resource-extraction industries: ready or not? *Regional Environmental Change*, 14(4), 1663–1678. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0618-8>
- Hodgkinson, J. H., Loechel, B., Moffat, K., Howden, M., Littleboy, A. K., & Crimp, S. (2010). *Climate risks to the Australian mining industry – a preliminary review of vulnerabilities*. In: *Sustainable Mining Conference, 17–19 August 2010. Kalgoorlie, Western Australia*. https://research.csiro.au/climate/wp-content/uploads/sites/54/2016/03/5_WorkingPaper5_CAF_pdf-Standard.pdf
- ICMM. (2013). *Adapting to a Changing Climate: Implications for the Mining and Metals Industry*. International Council on Mining & Metals, London, UK March. https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental-stewardship/2019/guidance_changing-climate.pdf
- IPCC. (s. f.). *Definition of Terms Used Within the DCC Pages*. IPCC-data. Recuperado 2 de febrero de 2023, de <https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/glossary/index.h>
- IPCC. (2012). *Summary for policymakers*. In: *Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (Eds.), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Ad.*
- IPCC. (2013). *Summary for policymakers*. In: *Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth.*
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIAR5-IntegrationBrochure_es-1.pdf
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021*. En *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen,

L. Goldfarb, M.I. Gom.

- Knoeri, C., Wäger, P. A., Stamp, A., Althaus, H.-J., & Weil, M. (2013). Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand — With material flow supply modelling approaches. *Science of The Total Environment*, 461–462, 808–812. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.001>
- Kracht, W., & Salinas, B. (2021). *Minería y Cambio Climático*. <https://www.beauchefmineria.cl/wp-content/uploads/2021/05/Minería-y-Cambio-Climático-Síntesis-Ejecutiva.pdf>
- Kuipers, K. J. J., van Oers, L. F. C. M., Verboon, M., & van der Voet, E. (2018). Assessing environmental implications associated with global copper demand and supply scenarios from 2010 to 2050. *Global Environmental Change*, 49(May 2017), 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.02.008>
- La Tercera. (2015a). *Minera Los Pelambres y vecinos de Salamanca alcanzan acuerdo por uso de aguas*. La Tercera. <https://www.latercera.com/noticia/minera-los-pelambres-y-vecinos-de-salamanca-alcanzan-acuerdo-por-uso-de-aguas/>
- La Tercera. (2015b, marzo 14). La sequía llega a Los Bronces. *La Tercera*. <https://www.latercera.com/diario-impreso/la-sequia-llega-a-los-bronces/>
- Lèbre, É., Stringer, M., Svobodova, K., Owen, J. R., Kemp, D., Côte, C., Arratia-Solar, A., & Valenta, R. K. (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, 11(1), 4823. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9>
- Lee, S., Lee, S., Lee, M. J., & Jung, H. S. (2018). Spatial assessment of urban flood susceptibility using data mining and geographic information system (GIS) tools. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/su10030648>
- Lim-camacho, L., Plagányi, É. E., Crimp, S., Hodgkinson, J. H., Hobday, A. J., Mark, S., & Loechel, B. (2017). Complex resource supply chains display higher resilience to simulated climate shocks. *Global Environmental Change*, 46(January), 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.08.011>
- Loechel, B., Hodgkinson, J., Prober, S., & Moffat, K. (2013). *Climate adaptation in regional mining value chains: A case-study of the Goldfields-Esperance Region, Western Australia. Prepared for the Chamber of Minerals and Energy, Eastern Region, WA and the Goldfields Environmental Management Group. CSIRO Earth Scie.*
- Lomas Bayas. (2021). *2021 Reporte de Sostenibilidad Compañía Minera Lomas Bayas*. <https://www.glencore.com/.rest/api/v1/documents/3dd9cc0075b7e02a1ac176a0dd46ea31/2021-Lomas-Bayas-Reporte-de-Sostenibilidad.pdf>
- Mason, L., Unger, C., Lederwasch, A., Razian, H., Wynne, L., & Giurco, D. (2013). *Adapting to climate risks and extreme weather: A guide for mining and minerals industry professionals, National Climate Change Adaptation Research Facility*.
- Meseguer-Ruiz, O., Ponce-Philimon, P. I., Guijarro, J. A., & Sarricolea, P. (2019). Spatial distribution and trends of different precipitation variability indices based on daily data in Northern Chile between 1966 and 2015. *International Journal of Climatology*, 39(12), 4595–4610. <https://doi.org/10.1002/joc.6089>
- Minería Chilena. (2021). *El rol de Minera Cerro Colorado en la recuperación del acuífero y bofedal de Lagunillas*. Minería Chilena. <https://www.mch.cl/2021/09/09/el-rol-de-minera-cerro-colorado-en-la-recuperacion-del-acuifero-y-bofedal-de-lagunillas/>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2012). *Plan de acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022*. <http://cambioclimaticocr.com/2012-05-22-19-42-06/estrategia-nacional-de-cambio-climatico>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2022). *Atlas de riesgos climáticos*. <https://arclim.mma.gob.cl/>

- Momon, Adji, B. M., Kusuma, D. W., Yolarita, E., Ukhwatul, V., Masbiran, K., & Dodi, A. (2021). Study analysis of landslide vulnerability of mining area in the sub-district Lembah Gumanti, Solok regency (lubuk selasih street– surian). *E3S Web of Conferences*, 331(July), 06007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133106007>
- Morley, N., & Eatherley, D. (2008). Material Security: Ensuring resource availability for the UK economy. *En C-Tech Innovation Ltd* (Vol. 115). https://static1.squarespace.com/static/5a60c3cc9f07f58443081f58/t/5ab3e4ba03ce64d747ce1df8/1521738947024/material_security.pdf
- Moss, R. L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., & Kooroshy, J. (2011). *Critical Metals in Strategic Energy Technologies, JRC-scientific and strategic reports, European Commission Joint Research Centre Institute for Energy and Transport*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2239d6b7-cda8-4570-a9f0-13ad60ce3f11>
- Northey, S. A., Mudd, G. M., Werner, T. T., Jowitt, S. M., Haque, N., Yellishetty, M., & Weng, Z. (2017). The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. *Global Environmental Change*, 44, 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.04.004>
- NRC National Research Council. (2008). *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*. National Academies Press.
- Pearce, T. D., Ford, J. D., Prno, J., Duerden, F., Berrang-Ford, L., Smith, T., Pitman, J., Reid, A., Beaumier, M., & Marschall, D. (2009). *Climate change and Canadian mining: Opportunities for Adaptation*. <https://davidsuzuki.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2009/08/climate-change-canadian-mining-opportunities-adaptation.pdf>
- Peña, K. (2021). *Tribunal Ambiental ordena inédita medida contra mina de BHP en Tarapacá y forzaría su paralización*. Diario Financiero. <https://www.df.cl/empresas/mineria/tribunal-ambiental-ordena-inedita-medida-contra-mina-de-bhp-en-tarapaca>
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., & Rafaj, P. (2011). RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1), 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Rivera, D., Pagliero, L., McIntyre, N., Aitken, D., & Godoy, A. *icultura y la Minería de la Universidad del Desarrollo, Centre for Water in the Minerals Industry, Sustainable Minerals Institute de la University of Queensland, S. M. (2020). Informe Proyecto ARClím: Minería. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería de la Universidad del Desarrollo.*
- Roelich, K., Dawson, D. A., Purnell, P., Knoeri, C., Revell, R., Busch, J., & Steinberger, J. K. (2014). Assessing the dynamic material criticality of infrastructure transitions: A case of low carbon electricity. *Applied Energy*, 123, 378–386. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.052>
- Rosenau-Tornow, D., Buchholz, P., Riemann, A., & Wagner, M. (2009). Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials—a combined evaluation of past and future trends. *Resources Policy*, 34(4), 161–175. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.07.001>
- Schipper, B. W., Lin, H. C., Meloni, M. A., Wansleben, K., Heijungs, R., & van der Voet, E. (2018). Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics. *Resources, Conservation and Recycling*, 132(October 2017), 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.004>
- Schnebele, E., Jaiswal, K., Luco, N., & Nassar, N. T. (2019). Natural hazards and mineral commodity supply: Quantifying risk of earthquake disruption to South American copper supply. *Resources Policy*, 63, 101430. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101430>
- Schneider, L., Berger, M., Schüler-Hainsch, E., Knöfel, S., Ruhland, K., Mosig, J., Bach, V., &

- Finkbeiner, M. (2014). The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(3), 601–610. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0666-1>
- Schrijvers, D., Hool, A., Blengini, G. A., Chen, W. Q., Dewulf, J., Eggert, R., van Ellen, L., Gauss, R., Goddin, J., Habib, K., Hagelüken, C., Hirohata, A., Hofmann-Antenbrink, M., Kosmol, J., Le Gleuher, M., Grohol, M., Ku, A., Lee, M. H., Liu, G., ... Wäger, P. A. (2020). A review of methods and data to determine raw material criticality. *Resources, Conservation and Recycling*, 155(October 2019), 104617. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104617>
- Schroeder, K., & Kirchengast, G. (2018). Sensitivity of extreme precipitation to temperature: the variability of scaling factors from a regional to local perspective. *Climate Dynamics*, 50(11–12), 3981–3994. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3857-9>
- Schumacher, V., Justino, F., Fernández, A., Meseguer-Ruiz, O., Sarricolea, P., Comin, A., Peroni Venancio, L., & Althoff, D. (2020). Comparison between observations and gridded data sets over complex terrain in the Chilean Andes: Precipitation and temperature. *International Journal of Climatology*, 40(12), 5266–5288. <https://doi.org/10.1002/joc.6518>
- Seck, G. S., Hache, E., Bonnet, C., Simoën, M., & Carcanague, S. (2020). Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between low-carbon energy transition and supply limitations. *Resources, Conservation and Recycling*, 163(July), 105072. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105072>
- Sernageomin. (2021). Anuario de la minería de Chile 2020. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 13(April), 15–38.
- Sharma, V., & Franks, D. M. (2013). In Situ Adaptation to Climatic Change: Mineral Industry Responses to Extreme Flooding Events in Queensland, Australia. *Society & Natural Resources*, 26(11), 1252–1267. <https://doi.org/10.1080/08941920.2013.797528>
- Smith, M. (2013). *Assessing climate change risks and opportunities for investors. Australian National University and Investor Group on Climate Change. Mining and Minerals Processing Sector.*
- Sud Austral Consulting SpA, & NeoUrbanismo Consultores SpA. (2020). *Consideración De Variables De Cambio Climático En La Evaluación De Impacto Ambiental De Proyectos Asociados* Al Seia. https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2020/07/informe_final_consultoria_cambio_climatico.pdf
- Tabelin, C. B., Park, I., Phengsaart, T., Jeon, S., Villacorte-Tabelin, M., Alonzo, D., Yoo, K., Ito, M., & Hiroyoshi, N. (2021). Copper and critical metals production from porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, and sustainability issues. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105610. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105610>
- Villarroel, C. (2013). *Eventos extremos de precipitación y temperatura en Chile: Proyecciones para fines del siglo XXI* [University of Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114066>
- Watari, T., Nansai, K., & Nakajima, K. (2020). Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104669. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104669>

Anexos

Anexo A: Información climática

Tabla A.1. Estaciones meteorológicas utilizadas en este trabajo. Fuente: CR2 (2022).

Nombre estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Periodo
Baquedano	23.3	69.8	01-01-2001/06-03-2020
Camar	23.4	67.9	01-01-2001/31-12-2019
Canal Sauzal en Puente Termas	32.2	70.5	01-08-2005/06-06-2020
Cerro Moreno Antofagasta	23.4	70.4	01-01-2001/31-12-2021
Copiapó	27.3	70.	01-01-2001/31-12-2019
El Cobre	32.6	71.2	01-01-2001/31-08-2019
Elibor Campamento	27.7	70.2	01-01-2001/31-12-2019
El Loa Calama	22.4	68.9	01-01-2001/31-12-2021
El Tatio	22.3	68.0	01-01-2001/06-06-2020
Estero Yerba Loca	33.2	70.2	01-09-2013/06-06-2020
Iglesia Colorada	28.1	69.8	01-01-2001/31-12-2019
Las Vegas	26.5	69.6	01-01-2001/06-06-2020
Río Loa antes Represa Lequena	21.6	68.6	01-12-2001/06-06-2020

Tabla A.2. Continuación. Estaciones meteorológicas utilizadas en este trabajo. Fuente: CR2 (2022).

Linzor	22.22	68.02	01-01-2001/06-06-2020
Mendoza Aero	32.83	68.78	01-01-2001/29-12-2021
Peine	23.68	68.06	01-01-2001/31-12-2019
Pichasca	30.39	70.87	01-01-2001/30-11-2018
Río Pangal	34.25	70.33	01-11-2001/06-06-2020
Socaire	23.59	67.89	01-01-2001/30-11-2017
Ujina	20.97	68.63	01-01-2001/31-12-2019
Universidad de Antofagasta	23.70	70.42	01-05-2015/31-07-2017
Valle Olivares	33.19	70.11	01-10-2014/06-06-2020

Anexo B: Subfactores de vulnerabilidad

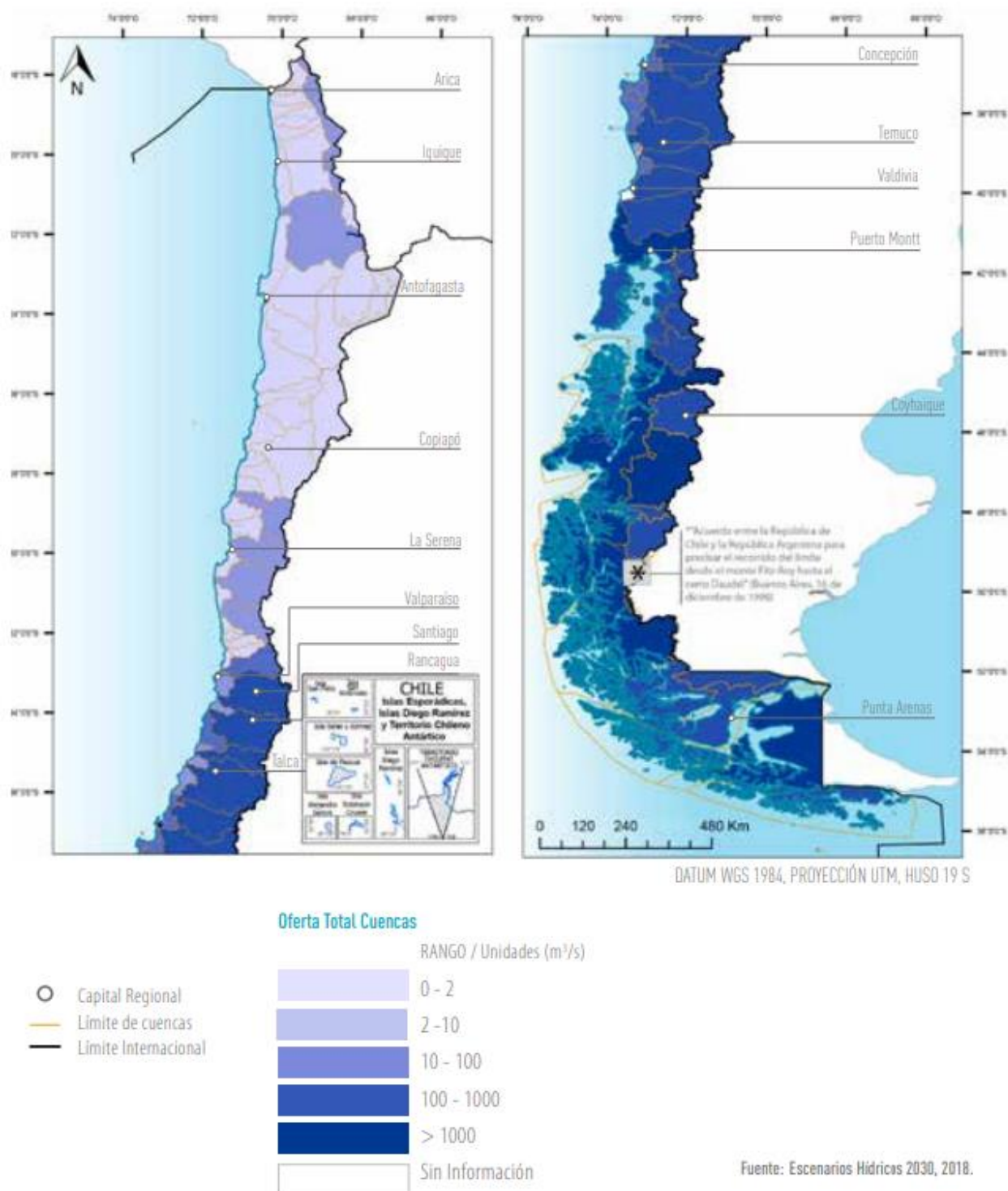
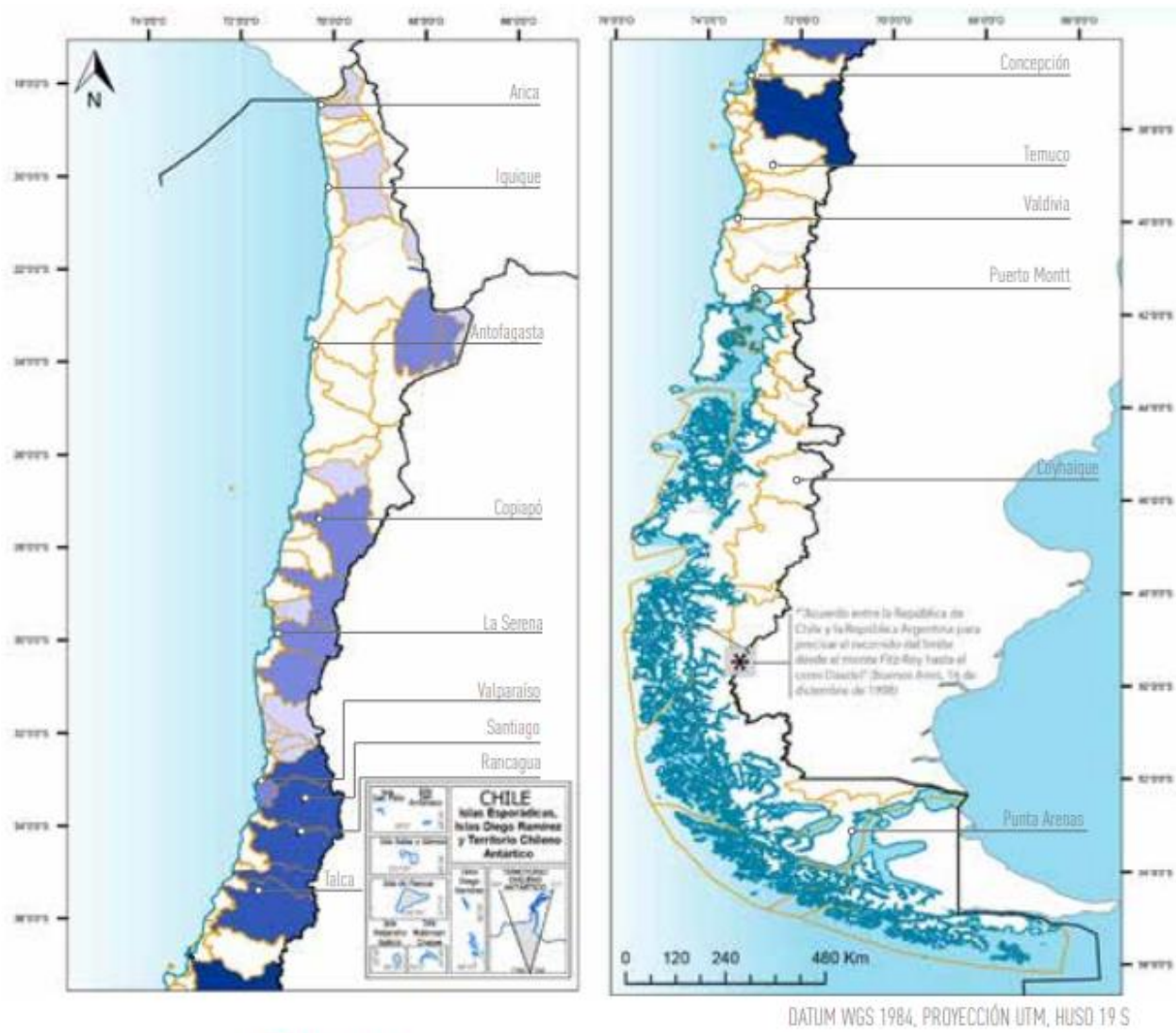


Figura A.1. Oferta referencial de aguas superficiales. Fuente: Fundación Chile (2018).



Fuente: Escenarios Hidricos 2030, 2018.

Figura A.2. Oferta referencial de aguas subterráneas. Fuente: Fundación Chile (2018).

Anexo C: Pérdidas productivas

Tabla A.3. EAD precipitaciones extremas para cada instalación minera bajo escenario RCP2.6.

Zona	Mina	2021 producción	EAD Modelo P (Toneladas métricas)	EAD Sensibilidad PA (Toneladas métricas)	EAD Sensibilidad PB (Toneladas métricas)	
Norte	Cerro Colorado	57,400	0	-	0	
	Collahuasi	630,041	8,753	-	32,274	
	Quebrada Blanca	11,505	2,678	-	9,875	
	Antucoya	78,580	107	35	-	
	Centinela	274,197	12,005	3,873	-	
	Chuquicamata	319,280	3,609	1,165	-	
	El Abra	72,654	4,772	-	17,594	
	Escondida	1,011,327	7,405	-	27,303	
	Gabriela Mistral	100,900	718	232	-	
	Lomas Bayas	64,282	0	0	-	
	Mantos Blancos	45,706	444	-	1,636	
	Michilla	21,228	29	-	106	
	Ministro Hales	181,704	3,231	1,043	-	
	Radomiro Tomic	326,456	5,087	1,641	-	
	Spence	203,100	3,685	-	13,588	
	Sierra Gorda	198,200	4,083	-	15,056	
	Zaldivar	88,025	723	233	-	
	Candelaria	118,627	951	307	-	
	Caserones	109,675	4,169	-	15,372	
	Manto Verde	49,013	704	-	2,596	
	Salvador	52,938	251	-	924	
	Carmen de Andacollo	44,780	62	20	-	
	Los Pelambres	336,300	5,572	1,789	-	
	Centro-Sur	El Soldado	42,262	0	0	-
		Andina	177,216	2,789	900	-
		Los Bronces	327,720	6,724	2,169	-
El Teniente		459,817	2,442	788	-	