

¿Cómo hacer sostenible el desarrollo? Perspectivas territoriales de los ODS 2030 en la Región de Antofagasta

*Proyecto Objetivos de Desarrollo Sostenible
para la Región de Antofagasta*



TRANSFERENCIA OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE PARA LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA,
INICIATIVA FINANCIADA POR EL GOBIERNO REGIONAL DE ANTOFAGASTA, FIC-R 2022 CÓDIGO BIP 40046483-0.

CORE
Consejo Regional
REGIÓN DE ANTOFAGASTA

GOBIERNO REGIONAL
ANTOFAGASTA



ESTRATEGIA REGIONAL DE INNOVACIÓN



Instituto Políticas Públicas
IPPUCN
Universidad Católica del Norte

Comité Editorial

Cristian Rodríguez Salas
Catalina Salgado Álvarez
Juan Páez Cortés
Katherine Segovia Olivares

Autores

Rodrigo Álvarez Veliz
Jonathan Richard Barton
Pamela Chavez Crooker
Jorge Dehays Rocha
José Antonio González Pizarro
Catalina Guerra Maldonado
Juan Páez Cortés
Gino Pérez Lancellotti
Paulina Ponce Philimon
Natalia Pozo Morales
Cristian Rodríguez Salas
Ximena Salgado Álvarez
Javier Urrutia Meza
Marcela Ziede Bize

Referatos

Sebastián Baeza González
Luis Gonzales Carrasco
Marcos González Hernando
Alejandro Orellana Mc Bride
Carolina Stefoni Espinoza

Nº de Inscripción de Registro de Propiedad Intelectual: 2024-A-10804

Primera Edición: 2024

ISBN: 978-956-287-492-2

Código BIP: 40046483-0

Diseño: Ediciones Mensaje, Mercedes Lincoñir H.

Impresión: Gráfica Andes

Financiamiento: Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (FIC-R) 2022 del Gobierno Regional de Antofagasta.



 <https://ror.org/02akpm128>



¿CÓMO HACER SOSTENIBLE EL DESARROLLO? PERSPECTIVAS TERRITORIALES DE LOS ODS 2030 EN LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA

*Proyecto “Objetivos de Desarrollo Sostenible
para la Región de Antofagasta”*

AUTORES

Rodrigo Álvarez Veliz
Jonathan Richard Barton
Pamela Chavez Crooker
Jorge Dehays Rocha
José Antonio González Pizarro
Catalina Guerra Maldonado
Juan Páez Cortés
Gino Pérez Lancellotti
Paulina Ponce Philimon
Natalia Pozo Morales
Cristian Rodríguez Salas
Ximena Salgado Álvarez
Javier Urrutia Meza
Marcela Ziede Bize

CORE
Consejo Regional
REGIÓN DE ANTOFAGASTA



GOBIERNO REGIONAL
ANTOFAGASTA



Instituto Políticas Públicas
IPPUCN
Universidad Católica del Norte




CAPÍTULO 8

SOSTENIBILIDAD Y RECURSO HÍDRICO EN LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA

Javier Fernando Urrutia Meza

 0000-0001-7598-5471


 Universidad Bernardo O'Higgins

Ximena Salgado Álvarez

 0009-0007-7823-1975

 Universidad Bernardo O'Higgins

Natalia Pozo Morales

 0009-0002-7418-9128

 Universidad Católica del Norte



RESUMEN

El capítulo explora la gestión y sostenibilidad de los recursos hídricos en la Región de Antofagasta, territorio caracterizado por su extrema aridez y la presencia de acuíferos subterráneos de recarga muy limitada. La región depende en gran medida del uso de aguas subterráneas no renovables y de la desalinización para abastecer a la población y a las industrias, especialmente a la minera. Se analiza cómo la aplicación de los indicadores del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6) enfrenta desafíos significativos en este entorno particular, dada la alta presión ejercida sobre las fuentes hídricas por el crecimiento de la actividad minera y la escasa recarga de los acuíferos. Además, el capítulo presenta las principales iniciativas para fortalecer la sostenibilidad del recurso, como la implementación de plantas desalinizadoras y la modernización de los Sistemas de Agua Potable Rural (APR), a fin de garantizar un acceso equitativo y sostenible al agua en comunidades urbanas y rurales.

Palabras clave: gestión hídrica, sostenibilidad, desalación, acuíferos fósiles, ODS 6.



1. INTRODUCCIÓN

La Región de Antofagasta, en donde se encuentra el desierto de Atacama, afronta desafíos únicos en relación con la gestión de sus recursos hídricos (DGA, 2016a). Este territorio se caracteriza por una aridez extrema, con precipitaciones anuales que raramente superan los 10 mm en vastas áreas (Urrutia *et al.*, 2018) y una intensa evaporación que excede los 2000 mm/año (Houston, 2006). En este contexto, la región depende principalmente de las aguas subterráneas para su abastecimiento (Jordan *et al.*, 2015; Herrera *et al.*, 2021). Adicionalmente, el agua desalinizada ha emergido como una fuente cada vez más importante para satisfacer las demandas de la población y sostener la economía regional, predominantemente impulsada por la industria minera. Prueba de ello son las dos plantas desalinizadoras que operan en la región: la Planta Desaladora Norte en Antofagasta, una de las más grandes de Latinoamérica, y la planta en Taltal. Gracias a estas instalaciones, más del 83% de la población urbana de Antofagasta se abastece de agua desalinizada (Ruffino *et al.*, 2022). Adicionalmente, la desalación ha permitido a varias empresas mineras acceder a nuevas fuentes de agua (Campero y Harris, 2019).

El panorama hídrico de Antofagasta es complejo, con acuíferos que albergan “aguas fósiles” recargadas hace milenios y que ahora se encuentran bajo presión por la sobreexplotación (Urrutia *et al.*, 2022; Herrera *et al.*, 2021; Aravena, 1995). La cuenca del río Loa, una fuente vital de agua para industrias y comunidades como Calama y Tocopilla, enfrenta importantes desafíos de sostenibilidad. Estos desafíos amenazan con afectar los frágiles ecosistemas de la región, debido a la estrecha interconexión entre las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca (Godfrey *et al.*, 2021). Además, la industria minera, incluyendo la producción de litio en el salar de Atacama (Cabello, 2022), intensifica la presión sobre estos ya escasos recursos hídricos.

En este escenario complejo, las comunidades rurales que dependen de los Sistemas de Agua Potable Rural, los cuales tienen fuentes de agua predominantemente subterráneas, enfrentan desafíos tanto técnicos como de gestión (Ruffino *et al.*, 2022). En este contexto hídrico desafiante de la región, la aplicación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 6 sobre agua limpia y saneamiento, revela limitaciones significativas. Los indicadores estandarizados no logran capturar adecuadamente la complejidad de la situación hídrica en Antofagasta, dejando de lado aspectos relevantes como la sostenibilidad a largo plazo de las fuentes de agua, el agotamiento y la contaminación de recursos hídricos debido a las actividades mineras, y las crecientes necesidades de agua en un contexto de cambio climático y urbanización acelerada. A pesar de que la desalinización ha sido implementada como una solución,

sigue existiendo una presión significativa sobre los acuíferos y fuentes naturales, lo que plantea riesgos tanto para el suministro doméstico como para los ecosistemas locales (Kumar *et al.*, 2021).

Adicionalmente, se observan diferencias en las prioridades de uso entre sectores como la minería, la agricultura y el uso urbano, lo que ha generado presiones importantes sobre los recursos hídricos, especialmente en zonas de alta biodiversidad y uso ancestral, como el río Loa y el salar de Atacama (DGA, 2016). Además, persisten desigualdades en el acceso al agua entre las distintas comunas de la región. En este sentido, se observa que las ciudades, como Antofagasta, se abastecen principalmente de agua desalada, mientras que las áreas rurales continúan enfrentando carencias en infraestructura de agua potable, afectando la calidad de vida y la sostenibilidad de las actividades agrícolas. Aproximadamente el 42% de la población rural de la Región de Antofagasta carece de un suministro formal de agua potable, lo que evidencia las inequidades en la distribución de recursos hídricos en la región (Ruffino *et al.*, 2022).

Frente a la compleja situación hídrica de la Región de Antofagasta, caracterizada por su extrema aridez y dependencia de fuentes de agua no renovables (aguas “fósiles”), se plantea la hipótesis de que los indicadores del ODS 6, si bien son relevantes, podrían no ser suficientes para capturar la naturaleza única y multifacética de los desafíos hídricos. Si bien el ODS 6 busca “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”, algunos de sus indicadores podrían no ser completamente adecuados para reflejar la realidad de la región, como aquellos relacionados con el tratamiento de aguas residuales, la calidad de cuerpos de agua superficiales y la eficiencia del agua en la agricultura, aspectos que tienen una relevancia diferente en un contexto de extrema aridez y donde la reutilización del agua es crucial. Además, existen desafíos específicos que requieren una atención particular, como la creciente importancia de la desalinización y su impacto, el disímil acceso al agua entre diferentes usos del agua (abastecimiento humano, minería e industria), el impacto de la minería en la cantidad y calidad del recurso hídrico, las desigualdades en el acceso al agua entre zonas urbanas y rurales, y los riesgos futuros asociados con el cambio climático y la expansión de la urbanización. Para abordar adecuadamente la situación hídrica en Antofagasta, se hace necesario desarrollar indicadores más específicos y contextualizados que capturen estas complejidades y proporcionen una imagen más precisa de los desafíos y oportunidades en la gestión del agua, considerando las particularidades del desierto, la importancia de la minería, la dependencia de la desalinización y la vulnerabilidad al cambio climático.

El objetivo de este texto es analizar los desafíos y limitaciones en la gestión del recurso hídrico en la Región de Antofagasta, con especial énfasis en la aplicabilidad de los indicadores del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, que se centran en el acceso al agua limpia y el saneamiento. El capítulo busca evaluar si los indicadores estandarizados del ODS 6 logran capturar de manera adecuada las complejidades del entorno hídrico único de esta región hiper árida, donde la desalinización y el uso de acuíferos de “aguas fósiles” juegan un rol crítico. Además, pretende identificar y dis-

cutir las diversas soluciones que se están implementando, como la desalinización y la optimización del uso de agua en la minería.

El capítulo está estructurado de la siguiente manera. En primer lugar, presenta metodologías empleadas para analizar los retos hídricos en la Región de Antofagasta, principalmente las basadas en la recopilación bibliográfica de fuentes científicas y técnicas. Se revisan estudios de hidrología, informes de la Dirección General de Aguas (DGA) y de COCHILCO, y se analiza la distribución y uso de los recursos hídricos a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se destaca el uso creciente de la desalación para abastecer tanto a la minería como a las áreas urbanas, reduciendo la presión sobre los acuíferos subterráneos que contienen aguas fósiles no renovables. Además, se examinan las soluciones implementadas, como la mejora de los Sistemas de Agua Potable Rural (APR) y la optimización del uso del agua en la minería.

2. METODOLOGÍAS

Con el fin de evaluar la aplicabilidad del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 en la Región de Antofagasta, se llevó a cabo un análisis bibliográfico considerando diversas fuentes de información. Con este análisis se buscó caracterizar la realidad del recurso hídrico en la región, considerando los desafíos y limitaciones inherentes a su gestión en un ambiente hiper árido, permitiendo la construcción de un esquema general de la ocurrencia del agua y su compleja situación en este territorio.

La revisión bibliográfica se centró en artículos científicos en los campos de hidrología, hidrogeología, gestión de recursos hídricos y estudios ambientales en zonas de alta aridez. Esta revisión abordó temas relevantes, como la caracterización hidrogeológica de los acuíferos en la Región de Antofagasta y Tarapacá, incluyendo los acuíferos de aguas fósiles; los patrones de precipitación y evaporación en el desierto de Atacama; la dinámica de los salares, especialmente el salar de Atacama, y los impactos del cambio climático en los recursos hídricos de la región.

Además de la literatura científica, se analizaron informes técnicos y documentos administrativos de diversas instituciones gubernamentales. Se analizaron los registros de derechos de agua otorgados, disponibles en la base de datos de la Dirección General de Aguas (DGA). Se realizaron análisis estadísticos a estos datos para identificar tendencias en la asignación de derechos de agua a lo largo del tiempo y entre diferentes usos del recurso. Los informes técnicos de la DGA, que incluyen estudios hidrológicos e hidrogeológicos de algunas cuencas, planes de desarrollo estratégicos y estimaciones de la oferta y demanda de agua, fueron examinados para comprender las políticas y estrategias actuales de gestión del agua en la región.

Adicionalmente, se analizó las proyecciones sobre el consumo de agua y sus fuentes, así como la extracción de litio, elaboradas por la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). Estos informes tienen información sobre las tendencias futuras en la demanda de agua, especialmente en el sector minero, y las estrategias propuestas para satisfacer esta demanda, incluyendo el creciente papel de la desalinización.

Se desarrolló un análisis espacial utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para mapear la distribución de los recursos hídricos, los puntos de extracción y los principales usuarios del agua en la región. Este análisis geográfico tiene como objetivo representar espacialmente los datos del agua para identificar las cuencas más importantes de la región.

3. PANORAMA HÍDRICO REGIONAL: UN ANÁLISIS DE SU DISTRIBUCIÓN, TIPOS Y DESAFÍOS

La ocurrencia de recursos hídricos en la Región de Antofagasta está dominada primordialmente por las aguas subterráneas, característica intrínsecamente ligada a las condiciones hiper áridas que prevalecen en la zona (Calderón-Seguel *et al.*, 2022). Este predominio de las aguas subterráneas se debe a que la tasa de evaporación potencial supera ampliamente a las precipitaciones en prácticamente toda la región (Kidder *et al.*, 2020; Gamboa *et al.*, 2019; Urrutia *et al.*, 2018), lo que limita severamente la presencia de cuerpos de agua superficiales permanentes (Houston, 2006). El desierto de Atacama se caracteriza por una aridez extrema debido a la alta evaporación, que supera ampliamente la escasa precipitación. Las altas temperaturas, la baja humedad, la intensa radiación solar y los vientos frecuentes provocan que la evaporación potencial anual alcance entre 2.000 y 3.000 mm (Lobos-Roco *et al.*, 2022). Esto limita considerablemente la formación de cuerpos de agua superficiales y produce que la recarga a los acuíferos sea prácticamente nula en casi toda la región (Vicencio, 2022; Herrera *et al.*, 2021; Rojas y Dassargues, 2007), salvo en los acuíferos del Altiplano (Urrutia *et al.*, 2019), que es donde ocurre una mayor cantidad de lluvia (Garreaud, 2009; Figura 1).

Diversas investigaciones sugieren que la recarga de los acuíferos en la Depresión Central es un proceso muy lento que puede tomar miles de años, con tiempos de tránsito de las aguas subterráneas que se encuentran en un rango entre 1.000 a 4.000 años en el acuífero de Calama (Herrera *et al.*, 2021) o el de Pica (Scheihing *et al.*, 2017). Lo anterior indica que los eventos de recarga a los acuíferos ubicados en el desierto de Atacama ocurrieron principalmente en épocas pasadas con condiciones climáticas más húmedas que las actuales (Frugone-Álvarez *et al.*, 2023). El comportamiento hidrodinámico

námico de estos sistemas es complejo y está influido por procesos atmosféricos tanto locales como regionales, así como también las unidades geológicas que conforman los acuíferos (Suárez *et al.*, 2020; Lobos-Roco *et al.*, 2021).

Como resultado de lo anterior, del total de 127.221 km² que conforman la Región de Antofagasta, el 85,2% está desprovisto de vegetación. El 14,3% restante se compone de pastizales y matorrales, mientras que solo el 0,4% está ocupado por humedales. La presencia de vegetación en la región está concentrada principalmente en las cercanías del río Loa, y en los bordes del salar de Atacama y de los salares ubicados en el Altiplano.

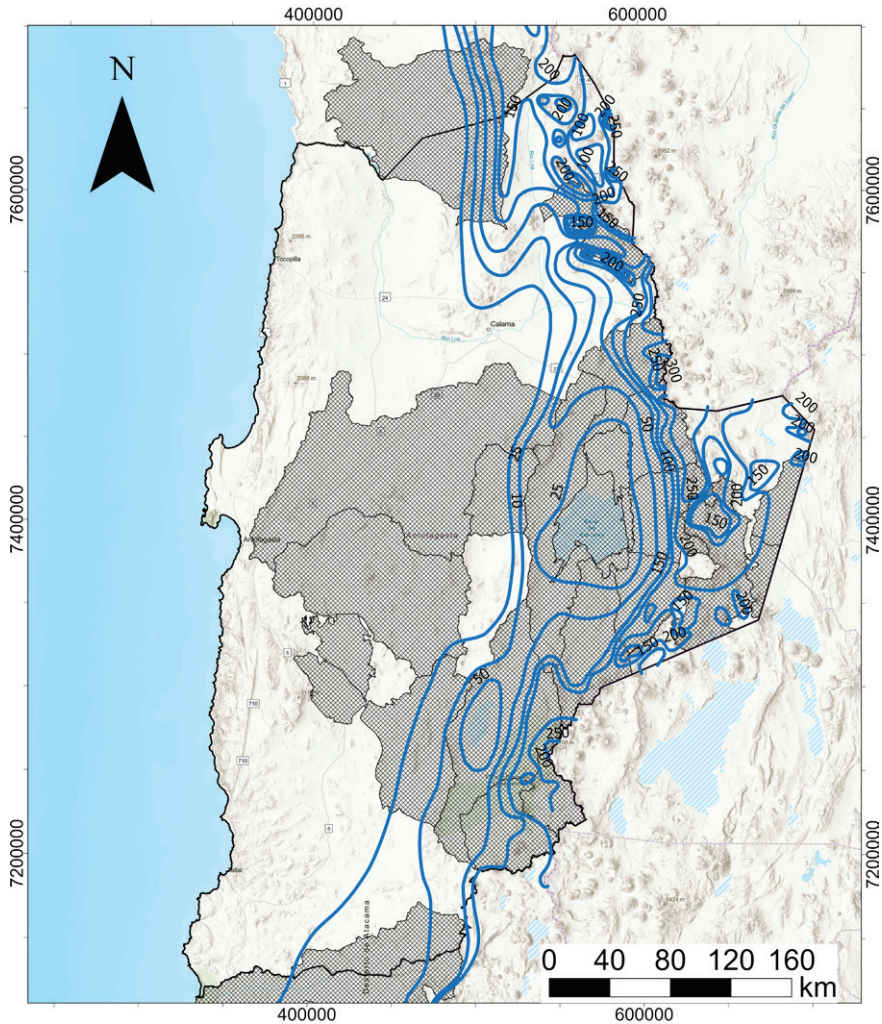
La región se caracteriza por la presencia de diez cuencas hidrográficas principales, según la clasificación de la Dirección General de Aguas. Entre ellas, destacan el río Loa y el salar de Atacama como las principales fuentes de agua superficial y subterránea. La cuenca del río Loa aporta aproximadamente el 55% del recurso hídrico regional, mientras que el salar de Atacama contribuye con cerca del 20%. En este sentido, las precipitaciones en la Depresión Central son inferiores a 10 mm/año (Figura 1), mientras que aumentan considerablemente hacia el este, donde la cordillera de los Andes registra los valores más altos, entre 200 y 250 mm/año, las cuales pueden ser en forma de lluvia y, en menor medida, de nieve (Urrutia *et al.*, 2019). Adicionalmente, la “camanchaca” aporta algo de humedad en zonas costeras (Carvajal *et al.*, 2022).

Los acuíferos de la Región de Antofagasta constituyen un sistema hidrogeológico complejo y diverso, fundamental para la sostenibilidad hídrica de esta zona hiper árida. La comprensión de estos recursos subterráneos es, por tanto, muy importante, dada la escasez extrema de aguas superficiales en la región y la creciente demanda de agua para usos urbanos, industriales y mineros. Las características geológicas y geomorfológicas de la Región de Antofagasta, que abarca desde la costa del océano Pacífico hasta la cordillera de los Andes, da lugar a una variedad de formaciones acuíferas con características distintivas, que hace compleja una evaluación regional e invita a estudiar más bien a escala local estos sistemas.

Los acuíferos de la cordillera de la Costa, aunque limitados en extensión y capacidad, desempeñan un papel importante para los ecosistemas y comunidades costeras. Los acuíferos que sustentan los humedales costeros en la cordillera de la Costa del norte de Chile se encuentran almacenados en rocas volcánicas fracturadas del Paleozoico y Mesozoico. Estudios recientes (Herrera y Custodio, 2014; Herrera *et al.*, 2018) indican que la recarga de estos acuíferos, esenciales para el mantenimiento de los humedales costeros, ocurrió principalmente durante periodos de mayor humedad en el pasado, hace entre 1.000 y 5.000 años. Por otro lado, el agua subterránea a mayor profundidad de estos acuíferos presenta un tiempo de residencia aún mayor, de entre 7.000 y 13.000 años, lo que evidencia los extensos tiempos de renovación de este recurso. Esta dependencia de la recarga en tiempos pasados de mayor humedad causa que los humedales costeros sean ecosistemas particularmente vulnerables a variaciones en el balance hídrico, ya que dependen de un recurso finito y con renovación lenta (Herrera *et al.*, 2023). Cualquier alteración en el equilibrio hídrico, ya sea por causas naturales o antrópicas, podría tener consecuencias importantes para estos ecosistemas.

FIGURA 1.

Mapa de isoyetas y acuíferos SHAC de la Región de Antofagasta. La distribución espacial de las precipitaciones medias anuales muestra un fuerte aumento hacia el este.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la DGA (2024).

Los acuíferos de la Depresión Central de Antofagasta, almacenados en material sedimentario no consolidado originados de procesos aluviales y coluviales (Houston y Hart, 2004), exhiben rasgos únicos controlados por el clima y la geomorfología de la

región. El nivel freático de estos acuíferos, que se encuentran generalmente a grandes profundidades, es resultado directo de la hiper aridez imperante. La recarga actual es prácticamente inexistente, lo que ha llevado a la denominación de estas aguas subterráneas como “aguas fósiles” (Herrera *et al.*, 2021; Houston, 2007; Aravena, 1995), ya que fueron recargados en eventos pasados con mayor humedad y una configuración hidrológica más activa.

Adicionalmente, en la cuenca del río Loa, existe una conexión importante entre los acuíferos almacenados en esa cuenca y el río, el cual es el más largo de Chile (Jordan *et al.*, 2014). La interacción entre el río Loa y el acuífero subyacente es un proceso complejo que varía a lo largo de su curso. En ciertas secciones, el acuífero alimenta al río (río ganador), mientras que, en otras, el río recarga el acuífero (río perdedor). Esta compleja interrelación está determinada por diversos factores, entre los que destaca la geología del acuífero (Jordan *et al.*, 2014). Esta dinámica resalta la importancia de gestionar de manera integral los recursos hídricos de la cuenca, considerando tanto las aguas superficiales como las subterráneas, para garantizar su sostenibilidad a largo plazo en un entorno, de por sí, árido y con crecientes demandas.

La calidad del agua en los acuíferos que se encuentran a gran profundidad de la Depresión Central tiende a ser relativamente buena, fenómeno que se explica por su aislamiento de los procesos superficiales de evapoconcentración (Gamboa *et al.*, 2019). La considerable profundidad a la que se encuentran estos recursos hídricos los protege de la intensa evaporación que caracteriza la superficie del desierto de Atacama, evitando así la concentración de sales y otros solutos que típicamente afectan las aguas más superficiales en ambientes áridos (Kidder *et al.*, 2020).

A pesar de la limitada información directa de estos acuíferos, es posible inferir aspectos importantes del comportamiento hidrogeológico regional basándose en el conocimiento de los patrones de precipitación y la configuración geomorfológica de la Depresión Central de la región. La distribución espacial de las precipitaciones en la Región de Antofagasta sigue un marcado gradiente altitudinal y longitudinal, incrementándose desde el oeste hacia el este (Garreaud *et al.*, 2009). Este patrón pluviométrico, combinado con la topografía regional, permite establecer un modelo conceptual del flujo general de las aguas subterráneas.

Según este modelo, el flujo predominante de las aguas subterráneas en la Depresión Central se dirige desde las zonas más elevadas de la precordillera, donde las precipitaciones son comparativamente más abundantes, hacia las partes más bajas (Scheihing *et al.*, 2017; Urrutia *et al.*, 2018; kidder *et al.*, 2020). Es razonable extrapolar este modelo conceptual de flujo de aguas subterráneas a otros acuíferos ubicados en la Depresión Central del norte de Chile. Esta generalización se basa en la similitud de las condiciones climáticas y geomorfológicas a lo largo de esta extensa región desértica. Sin embargo, es relevante reconocer que las variaciones locales en la geología, la tectónica y las estructuras geomorfológicas pueden introducir complejidades y desviaciones significativas de este modelo general, lo que hace necesario realizar estudios hidrogeológicos locales.

Dado que estos acuíferos representan reservas de agua de buena calidad en un entorno de extrema aridez, su potencial explotación debe ser considerada con cautela. La naturaleza fósil de estas aguas implica que su extracción equivaldría, en muchos casos, a una minería de agua no renovable en escalas de tiempo humanas. Lo anterior, debido a que, como se recargaron hace milenios, el agua extraída no se renovará en el corto plazo.

Finalmente, los acuíferos que se encuentran en la cordillera de los Andes tienen una dinámica diferente a los acuíferos en la Depresión Central, debido a que las rocas en las cuales el agua está almacenada y fluye, en conjunto con el régimen climático, son diferentes y producen la ocurrencia de los salares distintivos de esta zona (Blin y Suárez, 2023; Urrutia *et al.*, 2019; Urrutia *et al.*, 2022; Hernández-López *et al.*, 2016). En esta zona, la recarga de los acuíferos está fuertemente influenciada por la precipitación, que incluye tanto lluvia como nieve (Herrera *et al.*, 2016; Urrutia *et al.*, 2019). La contribución de la nieve es especialmente relevante en altitudes superiores a los 4.700 metros, donde se convierte en una fuente significativa de recarga durante los meses de primavera, cuando se produce el deshielo (Urrutia *et al.*, 2019). Sin embargo, por debajo de esta altitud la recarga se debe principalmente a eventos de lluvia intensos pero breves, que ocurren durante el verano austral (Uribe *et al.*, 2015). La evapotranspiración y la alta radiación solar también juegan un papel importante en el balance hídrico en los acuíferos del Altiplano, sobre todo en la dinámica de los salares y lagos salinos ubicados en esta zona. El balance hídrico en estos acuíferos es complejo. Los estudios han mostrado que la recarga anual promedio es de aproximadamente 23% de la precipitación media anual (Uribe *et al.*, 2015; Urrutia *et al.*, 2019; Kikuchi y Ferré, 2017), lo que destaca la fragilidad de estos sistemas frente a variaciones climáticas. Además, se ha identificado que estos acuíferos están conectados, permitiendo el flujo de agua entre diferentes subcuencas, lo que es importante para mantener un equilibrio de los niveles de agua en lagos salinos y manantiales en la región (Montgomery *et al.*, 2003; Urrutia *et al.*, 2022).

En el caso del salar de Atacama, esta corresponde a una cuenca endorreica, lo que significa que no tiene salida al océano, por lo que el agua que ingresa queda en el ciclo hidrológico del sistema, y se evapora o se extrae a través de los pozos de extracción de salmueras del núcleo salino (Marazuela *et al.*, 2019a). El salar de Atacama alberga un acuífero con aguas muy salinas (salmueras) en su núcleo, que contiene grandes concentraciones de litio, potasio y otros minerales (Munk *et al.*, 2021). El acuífero se alimenta principalmente de las aguas subterráneas provenientes de la cordillera de los Andes que rodea la cuenca, donde se concentran las mayores precipitaciones (Valdivielso *et al.*, 2022). Específicamente, la recarga proviene de la cordillera de los Andes al este y, en menor proporción, de la cordillera de Domeyko al oeste (Marazuela *et al.*, 2019b). No obstante, la aridez de la región limita la recarga directa por precipitación en el mismo núcleo salino, haciéndola mínima en comparación con el volumen total de agua almacenada en el acuífero del salar (Herrera *et al.*, 2024).

4. GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN ZONAS ÁRIDAS Y LOS ODS 6: DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES EN ANTOFAGASTA

4.1. Fuentes de Agua en Antofagasta: Desafíos de Sostenibilidad y Adaptación en un Entorno Árido

La Región de Antofagasta depende de una combinación de fuentes de agua, principalmente superficiales, subterráneas y desalinizadas para satisfacer sus necesidades hídricas (Kumar *et al.*, 2021). El río Loa, la principal fuente superficial, enfrenta desafíos de sostenibilidad debido a su alta explotación, con una cuenca que proporciona alrededor de 2,2 m³/s, pero con un caudal altamente regulado (Houston, 2023). Los acuíferos subterráneos, aunque relevantes, sufren de sobreexplotación, como lo demuestran los casos de Aguas Blancas y Rosario, donde la demanda (200 l/s y 237 l/s, respectivamente) supera con creces la recarga natural (121 l/s y 86 l/s, respectivamente) (DGA, 2016). El salar de Atacama, con una oferta hídrica estimada en 2,7 m³/s, contribuye principalmente a la industria debido a su alta salinidad, especialmente en la minería de litio. La Figura 2 ilustra la evolución temporal del caudal acumulado de los derechos de agua otorgados en la Región de Antofagasta, desglosado por la naturaleza del agua (superficial y subterránea), usando la base de datos de la DGA. En esta figura, se observa un aumento progresivo del caudal acumulado hasta el año 2008, momento en el cual se experimenta una desaceleración en la tasa de crecimiento.

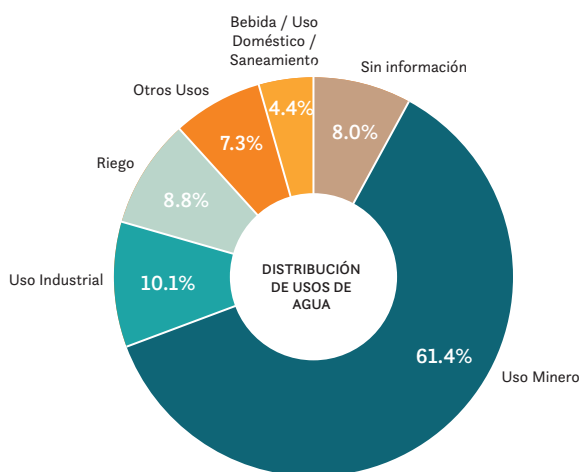
Durante el periodo de crecimiento, el caudal total otorgado se incrementó tanto para el agua superficial como para la subterránea. Hasta el año 2008, el agua superficial representaba aproximadamente un 32,6% del total acumulado, mientras que el agua subterránea constituía el 67,4% restante. Esta distribución muestra la relevancia de ambas fuentes de agua en la región, destacando los derechos de aguas superficiales. En Antofagasta, la cuenca del río Loa posee el mayor caudal superficial. Si se considera el gran caudal de extracción de agua superficial en la cuenca del río Loa y los elevados tiempos de tránsito de las aguas subterráneas (Herrera *et al.*, 2021), se tiene un escenario de explotación intensiva.

A partir de 2008, aunque el caudal total continúa acumulándose, el ritmo de crecimiento se reduce notablemente. Este cambio podría estar relacionado con diversos cambios realizados en la concesión de nuevos derechos de agua o con políticas más restrictivas implementadas para preservar los recursos hídricos en la región. El caudal total acumulado de los derechos de agua otorgados hasta la fecha más reciente es de aproximadamente 20.874 l/s.

Las zonas urbanas dependen de una mezcla de estas fuentes. Antofagasta, la capital regional, ha incrementado el uso de agua desalinizada proveniente de plantas costeras para aliviar la presión sobre los acuíferos locales y satisfacer la creciente

demanda de su población y sector industrial. Calama, por otro lado, depende en gran medida de aguas subterráneas extraídas de acuíferos cercanos, pero la sobreexplotación y la calidad del agua, que a veces requiere tratamiento adicional debido a la presencia de minerales y sales, plantean preocupaciones sobre la sostenibilidad a largo plazo. En localidades más pequeñas, como Tocopilla, Mejillones y Taltal, la dependencia de acuíferos subterráneos también es alta y se están considerando alternativas, como la desalación, para garantizar un suministro continuo y superar los problemas de sobreexplotación y calidad del agua. El reciclaje y reutilización de aguas servidas, con proyecciones de uso para riego y aplicaciones industriales en áreas urbanas como Antofagasta, se presenta como una solución complementaria para un uso más eficiente del recurso hídrico en la región.

FIGURA 2.
Uso del agua está mayoritariamente distribuido por la minería



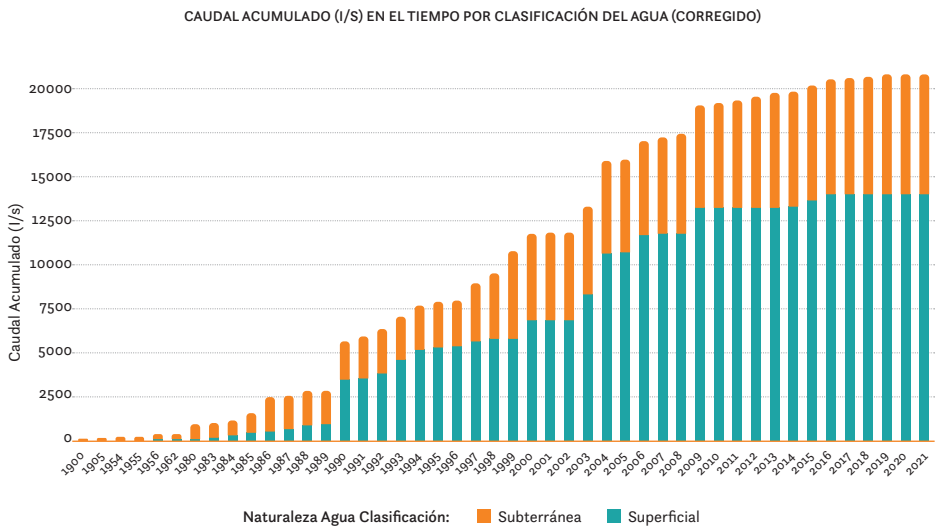
Fuente: Base de Datos de la DGA, recopilados por Álvarez-Garretón et al., (2018).

Mientras, la Figura 2 muestra, en términos porcentuales, el uso del agua en la región según la base de datos de la DGA. Se observa que el sector minero contiene la mayor cantidad de demanda de agua en la región, alcanzando un poco más del 60 %. En este sentido, el caudal total de agua subterránea usada por la minería es mayor a los 11.000 l/s. En contraste, el uso industrial depende principalmente de fuentes superficiales, con un caudal total de aproximadamente 4.000 l/s, en comparación con 2.315 l/s provenientes de fuentes subterráneas. Adicionalmente, se observa, además,

que la cantidad de agua para consumo humano es baja en relación a los otros usos, debido principalmente a que la desalación ha ido ganado espacio en el consumo de agua para las zonas urbanas.

Por otro lado, la cantidad de agua para uso industrial comenzó a registrar un caudal significativo ya en la década de 1950, con incrementos sostenidos desde entonces, según la Figura 3. Por otro lado, el uso minero empezó a mostrar un crecimiento más significativo a partir de los años 1980, razón por la cual el uso industrial es predominantemente superficial. Específicamente, el uso industrial tuvo un crecimiento temprano en 1954, mientras que el uso minero comenzó a crecer de manera más notable a partir de 1984.

FIGURA 3.
Caudal acumulado otorgado en la Región de Antofagasta

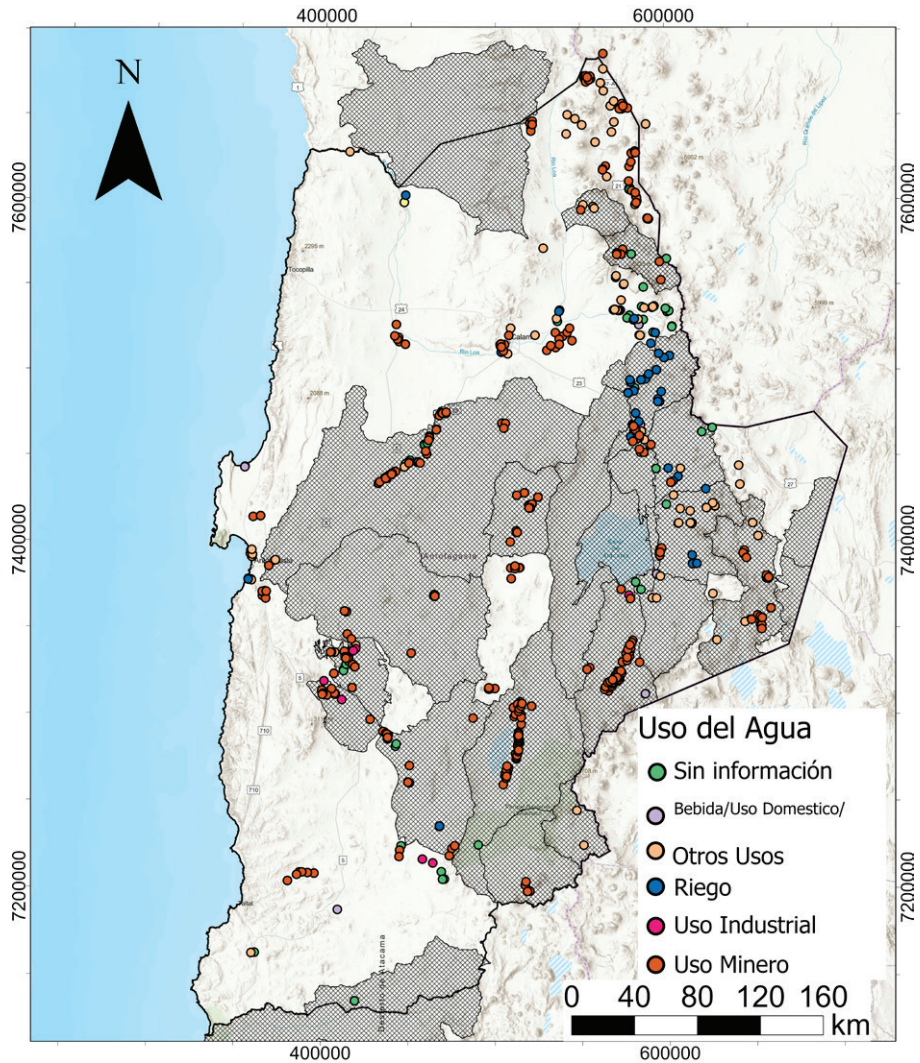


Fuente: Registros de la DGA hasta el año 2021.

Finalmente, la Figura 4 muestra la distribución espacial de los principales puntos de captación de aguas y su uso, en la Región de Antofagasta. Se puede observar que la mayor cantidad de puntos de captación de aguas para uso minero está ubicada cerca de las mineras más importante de la región, como Escondida y el salar de Punta Negra (aunque, como se estableció previamente, Escondida ha aumentado considerablemente el uso de agua desalada), Sierra Gorda, CODELCO en la cuenca del río Loa, entre otros.

FIGURA 4.

Mapa de distribución espacial de los principales puntos de captación de agua en la región, junto con el tipo de uso. Las zonas sombreadas representan los acuíferos clasificados de la DGA.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la DGA (2024).

Respecto a lo anterior, COCHILCO (2024) proyecta un cambio significativo en la demanda de agua en la minería de cobre en Antofagasta para el período 2023-2034, con un aumento en el uso de agua de mar y una disminución en el uso de agua continental. Se espera que la demanda de agua continental disminuya un 29%, de 6,23 m³/s en 2022 a 4,5 m³/s en 2034, mientras que la demanda de agua de mar aumentará en un 54%. Este cambio se debe en gran parte al aumento de la capacidad de desalación en la región. Proyectos como la planta de desalación Escondida Water Supply Extension (2.500 l/s) y la de Minera Centinela (1.150 l/s, ampliable) son ejemplos de esta inversión en infraestructura hídrica. Además, se espera que proyectos futuros, como la planta desaladora de CODELCO en el Distrito Norte (840 l/s), refuercen aún más esta capacidad.

A pesar de estos avances, la dependencia de las aguas subterráneas seguirá siendo significativa, según las proyecciones de COCHILCO. Dada la baja tasa de renovación de estos recursos en la región, es importante una gestión cuidadosa y un conocimiento adecuado de los acuíferos para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

La producción de litio en la región, liderada por SQM y Albemarle en el salar de Atacama, también ejerce presión sobre los recursos hídricos. Con una producción que se espera se duplique para 2025, alcanzando más de 200 kt LCE anuales, la demanda de agua en la cuenca del salar de Atacama aumentará considerablemente, lo que plantea desafíos adicionales para la gestión hídrica en la región.

Las condiciones climáticas áridas de Antofagasta han llevado a la declaración de seis acuíferos como áreas de restricción y a la cuenca del río Loa como agotada. La combinación de baja recarga natural, alta demanda y la vulnerabilidad del salar de Atacama crea un escenario complejo que exige estrategias de conservación y manejo sustentable del agua.

A pesar de estos desafíos, la seguridad hídrica en la región ha mejorado gracias a la implementación de tecnologías como la desalación y la reutilización del agua. Actualmente, operan trece plantas desaladoras en la región y se espera que nuevas plantas entren en funcionamiento en los próximos años. Proyectos como la Nueva Planta de Tratamiento Nudo Uribe, que busca eliminar las descargas de aguas tratadas al mar, demuestran el compromiso de la región con la sostenibilidad y una gestión hídrica más eficiente.

Para hacer frente a la escasez hídrica, en las últimas décadas se han implementado varias estrategias. La principal ha sido la construcción de plantas desaladoras de agua de mar, siendo la más grande la Planta Desaladora Norte en Antofagasta, que abastece a cerca del 85% de la población urbana (Steflová *et al.*, 2021; Cabrera-González *et al.*, 2022). Esta planta produce 91,24 millones de litros diarios de agua potable (Steflová *et al.*, 2021). También existen otras plantas desaladoras más pequeñas en Tocopilla y otras localidades costeras (Ruffino *et al.*, 2022). Sin embargo, la desalación tiene desventajas que debe analizarse, como el alto consumo energético y los potenciales impactos ambientales del vertido de salmuera al océano (Steflová *et al.*, 2021; Cabrera-González *et al.*, 2022).

Otra opción implementada es el tratamiento y reutilización de aguas residuales. Actualmente se está construyendo una nueva planta de tratamiento en Antofagasta que permitirá tratar el 100% de las aguas residuales de la ciudad y reutilizarlas en la industria minera (Campo *et al.*, 2023). Esto ayudará a reducir la presión sobre las fuentes de agua dulce. También se están explorando tecnologías, como la captación de agua de niebla y otras tecnologías.

4.2. Desafíos en la aplicación de los ODS 6 en la región

Considerando la ocurrencia de los recursos hídricos establecidos previamente, se puede establecer que la aplicación de las métricas del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6), que se centra en garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, presenta desafíos significativos en la Región de Antofagasta, dada la complejidad y singularidad de su contexto hidrogeológico y climático.

La aridez tiene implicaciones importantes para la disponibilidad y gestión del agua, que no se reflejan fácilmente en las métricas estándar del ODS 6. Por ejemplo, mientras las métricas del ODS 6 se centran en el acceso al agua potable y servicios de saneamiento, no capturan adecuadamente la sostenibilidad a largo plazo de las fuentes de agua en un entorno donde la recarga natural es prácticamente inexistente y la hidrodinámica de las aguas subterráneas que constituyen las principales fuentes de agua son complejas y dependen de procesos locales.

La región se caracteriza por su extrema aridez y su dependencia crítica de las aguas subterráneas, lo que genera una situación muy compleja en términos de gestión y conservación de recursos hídricos. A este respecto, los acuíferos de la Depresión Central de la región albergan principalmente “aguas fósiles”, recurso que se formó hace mucho tiempo y en condiciones climáticas muy diferentes al actual (Houston y Hart, 2004) y que, en esencia, no se renueva. Esta particularidad plantea el siguiente dilema: ¿cómo evaluar la sostenibilidad de un recurso que, por definición, no es renovable? Los marcos de referencia actuales, incluidos los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), no están diseñados para abordar esta realidad única, lo que dificulta la medición precisa del uso sostenible del agua en la región.

La calidad del agua en Antofagasta presenta otro desafío importante. Los eventos de contaminación y los procesos que afectan la calidad del agua son complejos, y dependen de varios factores tales como disolución de sales, aportes geotérmicos, interacción del agua con la roca, y aportes antropogénicos de diversas actividades humanas, entre otros (Kidder *et al.*, 2020; Kidder *et al.*, 2023). La cuantificación de las masas de agua de buena calidad, relevante para el indicador 6.3.2 del ODS 6, se ve obstaculizada por diversos factores. El clima extremo de la región, la distribución heterogénea de los recursos hídricos y la escasez de datos confiables complican aún más esta evaluación, impidiendo una comprensión completa y precisa de la situación. Adicionalmente, la aplicación del ODS 6, indicador 6.3.1 en Antofagasta, se ve dificultada.

tada por la escasez de agua, la generación de aguas residuales con alta concentración de contaminantes por la actividad minera, el crecimiento demográfico, la dispersión geográfica, los costos de inversión y la falta de un marco regulatorio sólido, entre otros. Estos factores limitan la capacidad de la región para tratar adecuadamente las aguas residuales mineras e industriales.

La evaluación de la escasez hídrica en Antofagasta también requiere un enfoque único. Los indicadores estándar de la meta 6.4 del ODS 6, que miden el porcentaje de recursos hídricos utilizados en relación con las necesidades ambientales, no se adaptan bien a este entorno hiper-árido. Los ciclos hidrológicos convencionales y los patrones meteorológicos que normalmente se utilizan para definir la escasez de agua no reflejan adecuadamente la dinámica de las aguas subterráneas de la región. Estos recursos subterráneos tienen tiempos de tránsito y renovación que difieren significativamente de los sistemas de aguas superficiales más comunes, lo que exige un replanteamiento de cómo se define y mide la escasez hídrica en tales contextos. Además, la variabilidad espacial en la disponibilidad de agua es grande en Antofagasta. Mientras algunas áreas reciben menos de 10 mm de precipitación anual, otras en la cordillera de los Andes pueden recibir hasta 250 mm y tienen salares activos. Esta heterogeneidad hace que las métricas agregadas a nivel regional puedan no reflejar adecuadamente las realidades locales y los desafíos específicos de cada zona.

La calidad del agua también presenta desafíos únicos. Aunque los acuíferos profundos tienden a tener agua de buena calidad, la presencia natural de elementos como arsénico, como ejemplo en el río Loa (Alam *et al.*, 2023; Flores *et al.*, 2023; Ruffino *et al.*, 2022), en algunas zonas requiere tratamientos específicos. Las métricas del ODS 6 relacionadas con la calidad del agua podrían no capturar adecuadamente estos desafíos geológicos naturales y las inversiones necesarias para abordarlos.

La interconexión entre las aguas superficiales y subterráneas, como en el caso del río Loa y sus acuíferos asociados, añade complejidad a la medición del progreso en la gestión sostenible del agua. Las métricas del ODS 6 tienden a tratar las aguas superficiales y subterráneas por separado, lo que podría no reflejar adecuadamente la necesidad de una gestión integrada en Antofagasta.

Uno de los principales desafíos es la disponibilidad de datos precisos y actualizados que permitan medir con exactitud los avances hacia el cumplimiento de la meta 6.5. En muchas ocasiones, la falta de información clara sobre el uso y la distribución del agua dificulta la evaluación de los indicadores propuestos por los ODS. Además, la recolección de datos en zonas rurales o remotas de la región es particularmente compleja debido a la escasez de infraestructura y recursos técnicos adecuados. Esta carencia de datos impide tener un panorama claro de la situación actual del recurso hídrico, lo que a su vez obstaculiza la planificación y el diseño de políticas públicas eficientes.

Otro aspecto crítico está relacionado con la coordinación entre los diferentes actores que participan en la gestión del agua. En Antofagasta coexisten múltiples sectores interesados, como las empresas mineras, las comunidades locales, los agricultores y las autoridades gubernamentales. Estos grupos suelen tener prioridades y necesida-

des muy diferentes, lo que complica la implementación de una gestión integrada que equilibre los intereses de todos.

Adicionalmente, la contaminación derivada de actividades industriales y mineras afecta tanto a las fuentes superficiales como a las subterráneas, comprometiendo la sostenibilidad del recurso y dificultando el cumplimiento de los ODS, especialmente la meta 6.6, enfocada en la protección y restauración de los ecosistemas relacionados con el agua. Esta meta se ve obstaculizada por la escasez hídrica propia de la región y la presión ejercida sobre los ecosistemas naturales asociados a los pocos cursos de aguas superficiales que existen en la región. La capacidad de las autoridades locales para regular, monitorear y mitigar los impactos se ve limitada por la falta de recursos y tecnologías avanzadas para la evaluación de la calidad del agua y el estado de los ecosistemas.

Un desafío importante radica en el monitoreo de ecosistemas hídricos altamente vulnerables y dispersos, como ríos con flujos intermitentes y acuíferos, que cubren vastos terrenos en la región. La falta de sistemas de monitoreo continuo, especialmente para las aguas subterráneas, dificulta la evaluación precisa de indicadores relevantes como la extensión, el estado de conservación, el volumen de agua subterránea almacenada y la calidad del agua. Esta deficiencia impide cuantificar con precisión los cambios en estos ecosistemas, lo que a su vez obstaculiza la toma de decisiones informadas para su protección y restauración.

Finalmente, la naturaleza única de los ecosistemas dependientes del agua en la región, como los humedales costeros y los salares andinos, plantea desafíos para las métricas relacionadas con la protección de ecosistemas acuáticos. Estos ecosistemas frágiles y altamente adaptados podrían requerir indicadores más específicos que los proporcionados por el marco general del ODS 6.

4.3. El caso del salar de Atacama y la aplicación de los ODS 6

La implementación de los indicadores del ODS 6 en el salar de Atacama enfrenta varias dificultades debido a la naturaleza única de este ecosistema hiper árido y a las complejas interacciones entre las actividades económicas, las dinámicas hídricas y los factores ambientales. A este respecto, el salar de Atacama corresponde a una cuenca endorreica de aproximadamente 17.000 km², que alberga una de las mayores reservas mundiales de litio y otras sales minerales de gran valor económico (Bustos-Gallardo *et al.*, 2021). Su delicado equilibrio hídrico, controlado principalmente por la recarga de precipitaciones provenientes de la cordillera de los Andes y la intensa evaporación en el núcleo del salar, se ha visto alterado por la actividad humana, especialmente por la extracción de salmueras ricas en litio (Marazuela *et al.*, 2020). Al igual que la mayoría de las aguas subterráneas de la Depresión Central, las aguas del salar de Atacama tienen una fracción muy importante de agua recargada en períodos pasados de mayor humedad (Moran *et al.*, 2019; Herrera *et al.*, 2020). La lenta renovación de las aguas subterráneas en esta

cuenca plantea un desafío crucial para la gestión de recursos hídricos y la aplicación de las metas e indicadores del ODS 6. Este objetivo busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua, pero la limitada recarga de los acuíferos y las bajas tasas de renovación dificultan el establecimiento de políticas que aseguren el acceso al agua a largo plazo y la sostenibilidad del recurso.

La extracción de salmuera para la minería del litio en la cuenca del salar de Atacama está generando graves consecuencias para la disponibilidad de agua y la salud de los ecosistemas. Se ha demostrado que esta actividad ha provocado descensos en los niveles freáticos (Boutt *et al.*, 2016), afectando tanto a las comunidades locales como a los humedales y lagunas que dependen de la descarga continua de aguas subterráneas (Salas *et al.*, 2010). Esta situación compromete el cumplimiento del ODS 6, que busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua para las personas y el medio ambiente.

La explotación intensiva del litio plantea desafíos significativos para la sostenibilidad de los recursos hídricos y la conservación de los ecosistemas únicos del área. Las lagunas y humedales asociados al salar son hábitats críticos para especies endémicas, como los flamencos andinos, que dependen de la estabilidad del nivel freático y la calidad del agua, por lo que se pueden ver afectados por los descensos causados por la extracción de salmuera.

En este contexto, la implementación del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, que busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua, enfrenta retos considerables. Cumplir con este objetivo en el salar de Atacama requiere un enfoque de gestión integrada que equilibre las necesidades de la industria del litio con la protección de los recursos hídricos y los ecosistemas asociados. Esto implica mejorar la comprensión científica de los procesos hidrológicos, implementar prácticas de extracción más sostenibles y fortalecer la gobernanza del agua en la región, buscando un equilibrio entre los intereses económicos y la conservación del medio ambiente.

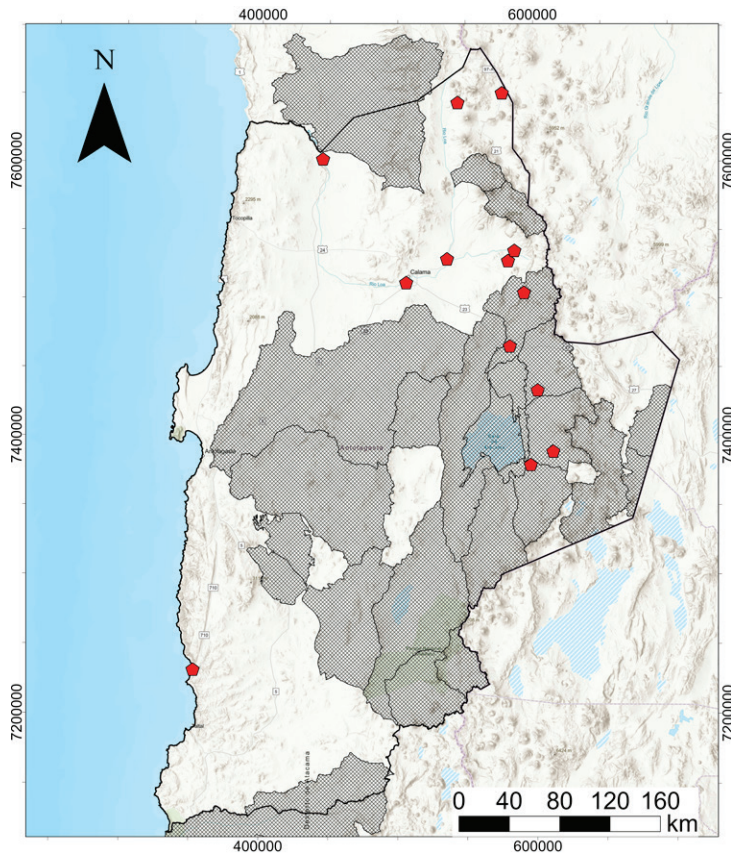
5. DESAFÍOS Y SOLUCIONES SOBRE LOS SISTEMAS DE AGUA POTABLE RURAL EN ANTOFAGASTA

La Figura 5 ilustra la distribución de los Sistemas de Agua Potable Rural (APR) a nivel regional, destacando una concentración en cuencas hídricas particularmente vulnerables, como la del río Loa y la del salar de Atacama. Los APR tienen como objetivo abastecer de agua potable a localidades rurales, contribuyendo al desarrollo económico y a la integración social del país. Estos sistemas en su gran mayoría se basan en pozos,

filtros y almacenajes del agua. El foco de esta agua es para el consumo humano. Bajo el contexto de hiper aridez de la región, los APR representan un sistema importante para el suministro de agua a las comunidades rurales, que a menudo están compuestas por población indígena, como los atacameños y quechuas, asentados en localidades de difícil acceso y que viven a altitudes considerables, entre los 2.000 y 3.600 metros sobre el nivel del mar (DGA, 2016). Estos lugares remotos de difícil acceso dificultan considerablemente la implementación de sistemas de distribución urbanas convencionales.

FIGURA 5.

Distribución espacial de los APR en la Región de Antofagasta, que se representan en forma de pentágonos de color rojo, mientras que las zonas sombreadas representan los acuíferos de la DGA.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la DGA (2024).

La gestión de estos sistemas APR enfrenta varios desafíos tanto desde el punto de vista técnico como institucional. La infraestructura disponible muchas veces es insuficiente para cubrir la demanda existente, lo que genera un déficit en la prestación del servicio. Este déficit se acentúa por la falta de mantenimiento adecuado, la escasez de recursos financieros y la limitada capacidad técnica de las comunidades para gestionar estos sistemas de manera autónoma. Adicionalmente, como se ha visto anteriormente, las fuentes de agua para los APR son principalmente acuíferos que están sujetos a sobreexplotación (como en el caso de la cuenca del río Loa), debido a la alta demanda. Esto lleva a que, en algunos casos, las fuentes de agua para los APR sean inadecuadas en cantidad o calidad, afectando directamente a las comunidades que dependen de ellas para su abastecimiento.

A este respecto, existen numerosas brechas relacionadas con los sistemas APR y la dimensión social del acceso al agua, entre las que destaca la necesidad de mejorar la cobertura y la calidad de los servicios de agua potable en las zonas rurales a través de estos sistemas. Es por esto que se ha propuesto varias líneas de acción para reducir estas brechas, incluyendo la mejora de la infraestructura existente, la implementación de nuevas tecnologías para el tratamiento y distribución del agua, y el fortalecimiento de las capacidades institucionales y comunitarias para la gestión de estos sistemas. También se ha incluido como acciones el desarrollo de proyectos específicos que buscan asegurar una fuente de agua más estable y de mejor calidad para las comunidades rurales, como la identificación de nuevas fuentes subterráneas y la posible implementación de plantas de tratamiento y reutilización del agua (Campo *et al.*, 2023). Algunas soluciones que se implementan en la zona sur, como la recarga artificial o gestionada, es compleja en la región debido a la baja pluviometría y a la compleja configuración hidrogeológica, entre otros aspectos.

Adicionalmente, es importante que se aborde la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas de APR. Para esto, se requiere un enfoque integral que abarque tanto la modernización de la infraestructura como el fortalecimiento de la gestión institucional y comunitaria. La falta de personal capacitado y la escasez de recursos financieros son obstáculos que deben superarse mediante la creación de mecanismos de financiamiento sostenibles y programas de capacitación técnica para las comunidades.

Adicionalmente, se debe promover la participación de las comunidades en la gestión de los APR, reconociendo que la integración de las visiones y necesidades locales es muy relevante para asegurar la sostenibilidad y pertinencia de las soluciones implementadas. Además, se debe enfatizar la importancia de valorar y respetar los conocimientos tradicionales de las comunidades indígenas en relación con el manejo del agua, incorporando esta dimensión cultural en la planificación y ejecución de los proyectos hídricos.

La evaluación de distintas iniciativas que puedan proponerse para mejorar los APR debe ir más allá de su impacto inmediato en la reducción de las brechas existentes. Se debe buscar garantizar que estas soluciones contribuyan a la resiliencia de las comunidades frente a eventos climáticos extremos y a los cambios en la disponibilidad

hídrica. Finalmente, se debe considerar no solo los aspectos técnicos y sociales, sino también los económicos y ambientales, asegurando que las inversiones realizadas generen un retorno significativo en términos de calidad de vida y desarrollo sostenible para las comunidades rurales de la región.

6. HACIA UNA GESTIÓN HÍDRICA SOSTENIBLE EN ANTOFAGASTA

La gestión sostenible del agua en la Región de Antofagasta requiere un enfoque multidisciplinario que permita abordar los desafíos únicos presentados por su geografía hiperárida y la compleja interacción entre las necesidades humanas, la actividad económica y los frágiles ecosistemas. A la luz de las limitaciones identificadas en la aplicación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en este contexto particular de la región, es imperativo desarrollar estrategias adaptadas que no solo complementen los marcos globales, sino que también respondan directamente a las realidades locales.

Un primer paso en esta dirección es el desarrollo de indicadores locales que permitan capturar mejor la dinámica hídrica de Antofagasta. Estos indicadores deben ir más allá de las métricas convencionales de acceso al agua y saneamiento, incorporando medidas específicas relacionadas con la gestión de aguas fósiles, la eficiencia en el uso del agua en la industria minera, y la salud de los ecosistemas dependientes de aguas subterráneas. Por ejemplo, se podrían desarrollar índices que evalúen la tasa de extracción de aguas fósiles en relación con estimaciones de reservas totales, proporcionando una imagen más clara de la sostenibilidad a largo plazo de estas fuentes. Asimismo, se debieran considerar indicadores que midan la eficiencia hídrica en distintos procesos mineros e industriales de la región.

La innovación tecnológica debe ser un foco central en la búsqueda de soluciones para la escasez hídrica de Antofagasta. La desalinización, ya en uso en la región, presenta oportunidades para una expansión como solución, pero también desafíos que deben abordarse. Es importante invertir en investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia energética de los procesos de desalinización, reduciendo así los costos operativos. Además, se deben explorar tecnologías emergentes para el tratamiento y la reutilización de aguas residuales, adaptadas a las condiciones áridas de la región.

Adicionalmente, el monitoreo de los distintos componentes del balance hídrico en la región debe mejorarse, ya que hay grandes áreas en las que no se cuenta de información sobre los recursos hídricos. La gobernanza del agua en Antofagasta requiere un replanteamiento que promueva una gestión verdaderamente integrada y participativa con todos los actores del agua en la región.

Adicionalmente, la adaptación al cambio climático debe ser una prioridad en cualquier estrategia de gestión hídrica para Antofagasta. Los modelos climáticos proyectan una mayor variabilidad en las precipitaciones y un aumento de las temperaturas en la región, lo que podría exacerbar aún más la escasez de agua (Blin *et al.*, 2022; Araya-Osses *et al.*, 2020). Es esencial desarrollar planes de adaptación que consideren múltiples escenarios climáticos y sus impactos en los recursos hídricos locales. Esto podría incluir la diversificación de las fuentes de agua y la mejora de la eficiencia en el uso del agua en todos los sectores.

La investigación y desarrollo deben jugar un papel central en la búsqueda de soluciones adaptadas al contexto único de Antofagasta. Es importante establecer programas de investigación interdisciplinarios para abordar los complejos desafíos hídricos de la región. Áreas prioritarias de investigación podrían incluir la dinámica de los acuíferos de aguas fósiles, el impacto de la minería e industria en los recursos hídricos, la restauración de ecosistemas dependientes del agua en ambientes hiper áridos y el desarrollo de cultivos resistentes a la sequía adaptados a las condiciones locales.

7. CONCLUSIONES

La Región de Antofagasta presenta una situación compleja relacionada con la gestión de sus recursos hídricos, en donde la extrema aridez y las bajas precipitaciones configuran un entorno de gran desafío para la sostenibilidad hídrica. La mayor parte del agua proviene de acuíferos subterráneos que contienen aguas fósiles, lo que implica que su explotación no es sostenible a largo plazo. Este uso intensivo de aguas subterráneas contrasta con la casi inexistente recarga natural, lo que obliga a una gestión cuidadosa y a la búsqueda de alternativas como la desalación de agua de mar, que está ganando terreno especialmente en las áreas urbanas y en la industria minera.

Dentro de este contexto, es importante señalar las limitaciones en la aplicación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente del ODS 6, en la región, que no capturan adecuadamente las particularidades del contexto hídrico de Antofagasta. Las métricas estandarizadas no reflejan la complejidad de un entorno donde la escasez crónica de agua y la competencia entre diferentes sectores hacen que la gestión integrada de los recursos sea muy importante. Además, los indicadores globales no abordan adecuadamente los problemas locales de calidad del agua, como los altos niveles de arsénico, ni la distribución desigual del acceso al agua entre las áreas urbanas y rurales, donde las comunidades más aisladas enfrentan mayores desafíos.

El cambio climático y su impacto en la variabilidad hídrica son otros factores críticos en la región, donde el calentamiento global puede exacerbar aún más la ya limitada

disponibilidad de agua. La gestión de los recursos hídricos también está influenciada por dinámicas internacionales, ya que algunas cuencas de la región son compartidas con países vecinos, lo que añade una dimensión transfronteriza a la problemática del agua. Por último, la fuerte dependencia de la minería en Antofagasta, que es intensiva en el uso de agua, pone de manifiesto la necesidad de estrategias más sostenibles que puedan equilibrar el desarrollo económico con la conservación ambiental y la equidad en el acceso a los recursos hídricos.

8. REFERENCIAS

- Alam, M. A., Mukherjee, A., Bhattacharya, P., & Bundschuh, J. (2023). An appraisal of the principal concerns and controlling factors for Arsenic contamination in Chile. *Scientific Reports*, 13(1), 11168. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38290-8>
- Álvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817-5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Aravena, R. (1995). Isotope hydrology and geochemistry of northern Chile groundwaters. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 24(3), 495-503.
- 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, 4309-4330. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>
- Blin, N., Hausner, M., Leray, S., Lowry, C., & Suárez, F. (2022). Potential impacts of climate change on an aquifer in the arid Altiplano, northern Chile: The case of the protected wetlands of the Salar del Huasco basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 39, 100996. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100996>
- Blin, N., & Suárez, F. (2023). Evaluating the contribution of satellite-derived evapotranspiration in the calibration of numerical groundwater models in remote zones using the EEFlux tool. *Science of the Total Environment*, 858, 159764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159764>
- Boutt, D. F., Hynek, S. A., Munk, L. A., & Coenthals, L. G. (2016). Rapid recharge of fresh water to the halite-hosted brine aquifer of Salar de Atacama, Chile. *Hydrological Processes*, 30(25), 4720-4740. <https://doi.org/10.1002/hyp.10994>
- Bustos-Gallardo, B., Bridge, G., & Prieto, M. (2021). Harvesting Lithium: water, brine and the industrial dynamics of production in the Salar de Atacama. *Geoforum*, 119, 177-189. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.09.010>

- Cabello, J. (2022). Reservas, recursos y exploración de litio en salares del norte de Chile. *Andean Geology*, 49(2), 297-306. <https://doi.org/10.5027/andgeoV49n2-3418>
- Cabrera-González, M., Ramonet, F., & Harasek, M. (2022). Development of a Model for the Implementation of the Circular Economy in Desert Coastal Regions. *Land*, 11(9), 1506. <https://doi.org/10.3390/land11091506>
- Campero, C., & Harris, L. M. (2019). The legal geographies of water claims: seawater desalination in mining regions in Chile. *Water*, 11(5), 886. <https://doi.org/10.3390/w11050886>
- Campo, G., Ruffino, B., Reyes, A., & Zanetti, M. (2023). Water-Energy Nexus in the Antofagasta Mining District: Options for Municipal Wastewater Reuse from a Nearly Energy-Neutral WWTP. *Water*, 15(6), 1221. <https://doi.org/10.3390/w15061221>
- Carvajal, D., Mora-Carreño, M., Sandoval, C., & Espinoza, S. (2022). Assessing fog water collection in the coastal mountain range of Antofagasta, Chile. *Journal of Arid Environments*, 198, 104679. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104679>
- Comisión Chilena del Cobre. (2024). Proyección de demanda de agua en la minería del cobre 2023-2034. COCHILCO. <https://bit.ly/4d52Tlp>
- Dirección General de Aguas. (2016). Plan estratégico para la gestión de los recursos Hídricos Región de Antofagasta. Ministerio de Obras Públicas. <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/handle/20.500.12140/25861>
- Dirección General de Aguas. (2024). *Mapoteca Digital*. Ministerio de Obras Públicas. Obtenido de <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>
- Flores, V., Bravo, I., & Saavedra, M. (2023). Water Quality Classification and Machine Learning Model for Predicting Water Quality Status-A Study on Loa River Located in an Extremely Arid Environment: Atacama Desert. *Water*, 15(16), 2868. <https://doi.org/10.3390/w15162868>
- Frugone-Álvarez, M., Contreras, S., Meseguer-Ruiz, O., Tejos, E., Delgado-Huertas, A., Valero-Garcés, B., Giralt, S., Latorre, C., & Maldonado, A. (2023). Hydroclimate variations over the last 17,000 years as estimated by leaf waxes in rodent middens from the south-central Atacama Desert, Chile. *Quaternary Science Reviews*, 311, 108084. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108084>
- Gamboa, C., Godfrey, L., Herrera, C., Custodio, E., & Soler, A. (2019). The origin of solutes in groundwater in a hyper-arid environment: A chemical and multi-isotope approach in the Atacama Desert, Chile. *Science of the Total Environment*, 690, 329-351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.356>
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day south american climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 180-195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Godfrey, L. V., Herrera, C., Burr, G. S., Houston, J., Aguirre, I., & Jordan, T. E. (2021). $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{14}\text{C}$ activity of groundwater DOC and DIC in the volcanically active and arid Loa Basin of northern Chile. *Journal of Hydrology*, 595, 125987. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125987>

- Herrera, C., & Custodio, E. (2014). Origen de las aguas de pequeños manantiales de la costa del norte de Chile, en las cercanías de Antofagasta. *Andean Geology*, 41(2), 314-341. <https://doi.org/10.5027/andgeoV41n2-a03>
- Herrera, C., Custodio, E., Chong, G., Lambán, L. J., Riquelme, R., Wilke, H., Jódar, J., Urrutia, J., Urqueta, H., Sarmiento, A., Gamboa, C., & Lictevout, E. (2016). Groundwater flow in a closed basin with a saline shallow lake in a volcanic area: Laguna Tuyajto, northern Chilean Altiplano of the Andes. *Science of The Total Environment*, 541, 303-318. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.060>
- Herrera, C., Gamboa, C., Custodio, E., Jordan, T., Godfrey, L., Jódar, J., Luque, J. A., Vargas, J., & Sáez, A. (2018). Groundwater origin and recharge in the hyperarid Cordillera de la Costa, Atacama Desert, northern Chile. *Science of the Total Environment*, 624, 114-132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.134>
- Herrera, C., Godfrey, L., Urrutia, J., Custodio, E., Jordan, T., Jódar, J., Delgado, V., Calderón, A., Tapia, J., & Barrenechea, F. (2021). Recharge and residence times of groundwater in hyper arid areas: The confined aquifer of Calama, Loa River Basin, Atacama Desert, Chile. *Science of The Total Environment*, 752, 141847. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141847>
- Herrera, C., Urrutia, J., Godfrey, L., Jódar, J., Pereira, M., Villarroel, C., Lopez, G., & Gómez, L. (2024). An Evaluation of the Brine Flow in the Upper Part of the Halite Nucleus of the Salar de Atacama (Chile) through an Isotopic Study of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$. *Water*, 16(18), 2651. <https://doi.org/10.3390/w16182651>
- Hernández-López, M. F., Braud, I., Gironás, J., Suárez, F., & Muñoz, J. F. (2016). Modelling evaporation processes in soils from the Huasco salt flat basin, Chile. *Hydrological Processes*, 30(25), 4704-4719. <https://doi.org/10.1002/hyp.10974>
- Houston, J. (2006). Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. *Journal of Hydrology*, 330(3-4), 402-412. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.036>
- Houston, J. (2007). Recharge to groundwater in the Turi Basin, northern Chile: An evaluation based on tritium and chloride mass balance techniques. *Journal of Hydrology*, 334(3-4), 534-544.
- Houston, J. (2023). The provenance and persistence of the perennial Río Loa in the Atacama Desert: links between crustal processes and surface hydrology. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1310088. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1310088>
- Houston, J., & Hart, D. (2004). Theoretical head decay in closed basin aquifers: an insight into fossil groundwater and recharge events in the Andes of northern Chile. *Quarterly journal of engineering geology and hydrogeology*, 37(2), 131-139.
- Jordan, T. E., Kirk-Lawlor, N. E., Blanco, N. P., Rech, J. A., & Cosentino, N. J. (2014). Landscape modification in response to repeated onset of hyperarid paleoclimate states since 14 Ma, Atacama Desert, Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 126(7-8), 1016-1046. <https://doi.org/10.1130/B30978.1>

- Jordan, T., Herrera, C., Kirk-Lawlor, N., & Godfrey, L. (2015). Architecture of the aquifers of the Calama Basin, Loa catchment basin, northern Chile. *Geosphere*, 11(5), 1438-1474. <https://doi.org/10.1130/GES01176.1>
- Kidder, J. A., Leybourne, M. I., Layton-Matthews, D., Bowell, R. J., & Rissmann, C. F. W. (2020). A review of hydrogeochemical mineral exploration in the Atacama Desert, Chile. *Ore Geology Reviews*, 124, 103562. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103562>
- Kidder, J. A., Leybourne, M. I., & Layton-Matthews, D. (2023). Using groundwater in the hyper-arid Atacama Desert to discover buried hydrothermal mineral deposits. *International Geology Review*, 65(1), 133-153. <https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2043734>
- Kikuchi, C. P., & Ferré, A. (2017). Analysis of subsurface temperature data to quantify groundwater recharge rates in a closed Altiplano basin, northern Chile. *Hydrogeology Journal*, 25(1), 103-121. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1472-1>
- Kumar, A., Suozzi, E., Silva, C., De Maio, M., & Zanetti, M. (2021). Role of Integrated Approaches in Water Resources Management: Antofagasta Region, Chile. *Sustainability*, 13(3), 1297. <https://doi.org/10.3390/su13031297>
- Lobos-Roco, F., Hartogensis, O., Suárez, F., Huerta-Viso, A., Benedict, I., De La Fuente, A., & Vilà-Guerau de Arellano, J. (2022). Multi-scale temporal analysis of evaporation on a saline lake in the Atacama Desert. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(13), 3709-3729. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3709-2022>
- Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T. (2019a). Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. *Science of the Total Environment*, 651, 668-683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.190>
- Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T. (2019b). The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: The damping capacity of salt flats. *Science of the Total Environment*, 654, 1118-1131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.196>
- Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., & García-Gil, A. (2020). Towards more sustainable brine extraction in salt flats: Learning from the Salar de Atacama. *Science of the Total Environment*, 703, 135605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135605>
- Montgomery, E. L., Rosko, M. J., Castro, S. O., Keller, B. R., & Bevacqua, P. S. (2003). Interbasin underflow between closed Altiplano basins in Chile. *Groundwater*, 41(4), 523-531. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02386.x>
- Moran, B. J., Boutt, D. F., & Munk, L. A. (2019). Stable and Radioisotope Systematics Reveal Fossil Water as Fundamental Characteristic of Arid Orogenic-Scale Groundwater Systems. *Water Resources Research*, 55(12), 11295-11315. <https://doi.org/10.1029/2019WR026386>
- Munk, L. A., Boutt, D. F., Moran, B. J., McKnight, S. V., & Jenckes, J. (2021). Hydrogeologic and geochemical distinctions in freshwater-brine systems of an Andean

- salar. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(3), e2020GC009345. <https://doi.org/10.1029/2020GC009345>
- Ruffino, B., Campo, G., Crutchik, D., Reyes, A., & Zanetti, M. (2022). Drinking water supply in the region of Antofagasta (Chile): A Challenge between Past, Present and Future. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21), 14406. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114406>
- Salas, J., Guimerà, J., Cornellà, O., Aravena, R., Guzmán, E., Tore, C., von Igel, W., & Moreno, R. (2010). Hidrogeología del sistema lagunar del margen este del Salar de Atacama (Chile). *Boletín Geológico y Minero*, 121(4), 357-372.
- Scheihing, K. W., Moya, C. E., Struck, U., Lictévout, E., & Tröger, U. (2017). Reassessing hydrological processes that control stable isotope tracers in groundwater of the Atacama Desert (Northern Chile). *Hydrology*, 5(1), 3. <https://doi.org/10.3390/hydrology5010003>
- Šteflová, M., Koop, S. H. A., Fragkou, M. C., & Mees, H. (2021). Desalinated drinking-water provision in water-stressed regions: challenges of consumer-perception and environmental impact lessons from Antofagasta, Chile. *International Journal of Water Resources Development*, 38(4), 742-765. <https://doi.org/10.1080/07900627.2021.1898346>
- Uribe, J., Muñoz, J. F., Gironás, J., Oyarzún, R., Aguirre, E., & Aravena, R. (2015). Assessing groundwater recharge in an Andean closed basin using isotopic characterization and a rainfall-runoff model: Salar del Huasco basin, Chile. *Hydrogeology Journal*, 23(7), 1535-1551. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1300-z>
- Urrutia, J., Herrera, C., Custodio, E., Jódar, J., & Medina, A. (2019). Groundwater recharge and hydrodynamics of complex volcanic aquifers with a shallow saline lake: Laguna Tuyajto, Andean Cordillera of northern Chile. *Science of the Total Environment*, 697, 134116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134116>
- Urrutia, J., Guimerà, J., Custodio, E., Herrera, C., Jódar, J., Acosta, O., & Ansón, I. (2022). Processes explaining the origin and evolution of groundwater composition in the Andean Precordillera and Altiplano of the Tarapacá Region of northern Chile. *Science of the Total Environment*, 805, 149742. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149742>
- Valdivielso, S., Vázquez-Suñé, E., Herrera, C., & Custodio, E. (2022). Characterization of precipitation and recharge in the peripheral aquifer of the Salar de Atacama. *Science of The Total Environment*, 806, 150271. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150271>
- Vicencio, J. (2022). Analysis of an extreme precipitation event in the Atacama Desert in January 2020 and its relationship to humidity advection along the Southeast Pacific. *Atmósfera*, 35(3), 421-448. <https://doi.org/10.20937/ATM.52994>

COMITÉ EDITORIAL

- Cristian Rodríguez Salas
- Catalina Salgado Álvarez
- Juan Páez Cortés
- Katherine Segovia Olivares

AUTORES

Rodrigo Álvarez Veliz. *Geógrafo, Pontificia Universidad Católica de Chile.*

Jonathan Richard Barton. *Doctor en Historia Económica, Universidad de Liverpool.*

Pamela Chavez Crooker. *Post Doctorado en Fisiología Celular en Metales Pesados, Universidad de Hawái. Doctora en Microbiología Molecular y Biotecnología, Universidad de Kyoto.*

Jorge Dehays Rocha. *Doctor en estudios del Desarrollo, Universidad Central de Venezuela.*

José Antonio González Pizarro. *Doctor en Filosofía y Letras con mención en Historia, Universidad de Navarra.*

Catalina Guerra Maldonado. *Socióloga, Universidad de Chile. Diplomado en género desarrollo e inclusión social en América latina.*

Juan Páez Cortés. *Magíster en economía aplicada con mención en Estudios Regionales, Universidad Católica del Norte.*

Gino Pérez Lancellotti. *Doctor de Arquitectura, Universidad de Florencia y Máster en proyectos urbanos, Universidad Politécnica de Cataluña.*

Paulina Ponce Philimon. *Magíster en Políticas Públicas y Gobernanza, Universidad Católica del Norte Master en Ciencias de la Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, Universidad Autónoma de Barcelona.”*

Natalia Pozo Morales. *Geógrafa, Universidad Católica de Santiago.*

Ximena Salgado Álvarez. *Geóloga, Universidad Católica del Norte. Diplomado en Hidrogeología aplicada a minería y medio ambiente de la Universidad de Chile.*

Javier Urrutia Meza. *Doctor en Ciencias Mención Geología, Universidad Católica del Norte.*

Cristian Rodríguez Salas. *Doctor en Ciencias Políticas, Universidad Nacional San Martín.*

Marcela Ziede Bize. *Doctora en Economía empresarial y Gestión, Universidad de Pisa.*

PARES REVISORES

Sebastián Baeza González

AFILIACIÓN: Universidad de Concepción

ORCID: 0000-0002-0721-3813

Luis Gonzales Carrasco

AFILIACIÓN: Pontificia Universidad Católica de Chile

ORCID: 0000-0002-1067-4805

Marcos González Hernando

AFILIACIÓN: Universidad Diego Portales

ORCID: 0000-0003-4699-6547

Alejandro Orellana Mc Bride

AFILIACIÓN: Universidad de La Serena

ORCID: 0000-0001-7346-6838

Carolina Stefoni Espinoza

AFILIACIÓN: Universidad de Tarapacá

ORCID: 0000-0001-6949-2312

Este libro ofrece un análisis exhaustivo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la Región de Antofagasta, Chile, una de las principales zonas mineras del país y de importancia crítica a nivel global. A través de diversos capítulos, expertas y expertos abordan temas clave como la gobernanza territorial, la sostenibilidad ambiental, el acceso al agua, la migración y el impacto de la minería en el desarrollo local.

Se destacan los principales desafíos de la región en la implementación de la Agenda 2030, especialmente en áreas como la igualdad de género, la gestión sostenible de los recursos hídricos, y el ordenamiento territorial. También se presenta un análisis de la percepción ciudadana y el uso de indicadores ODS para medir el progreso hacia un futuro más equitativo y sostenible.

Con una visión crítica y basada en evidencia, esta obra ofrece reflexiones y propuestas para avanzar en el desarrollo sostenible, aportando soluciones innovadoras para enfrentar los retos ambientales, sociales y económicos que enfrenta la Región de Antofagasta en el siglo XXI.