

Impacto de los procesos de desalinización en los niveles de gases de efecto invernadero

Dr. Sebastián Herrera León

Académico Departamento de Ingeniería Química de Medio Ambiente
Secretario de Vinculación Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas
Universidad Católica del Norte – Antofagasta



Universidad
Católica del Norte













Universidad de Antofagasta (2015)



Universidad de Antofagasta (2015)



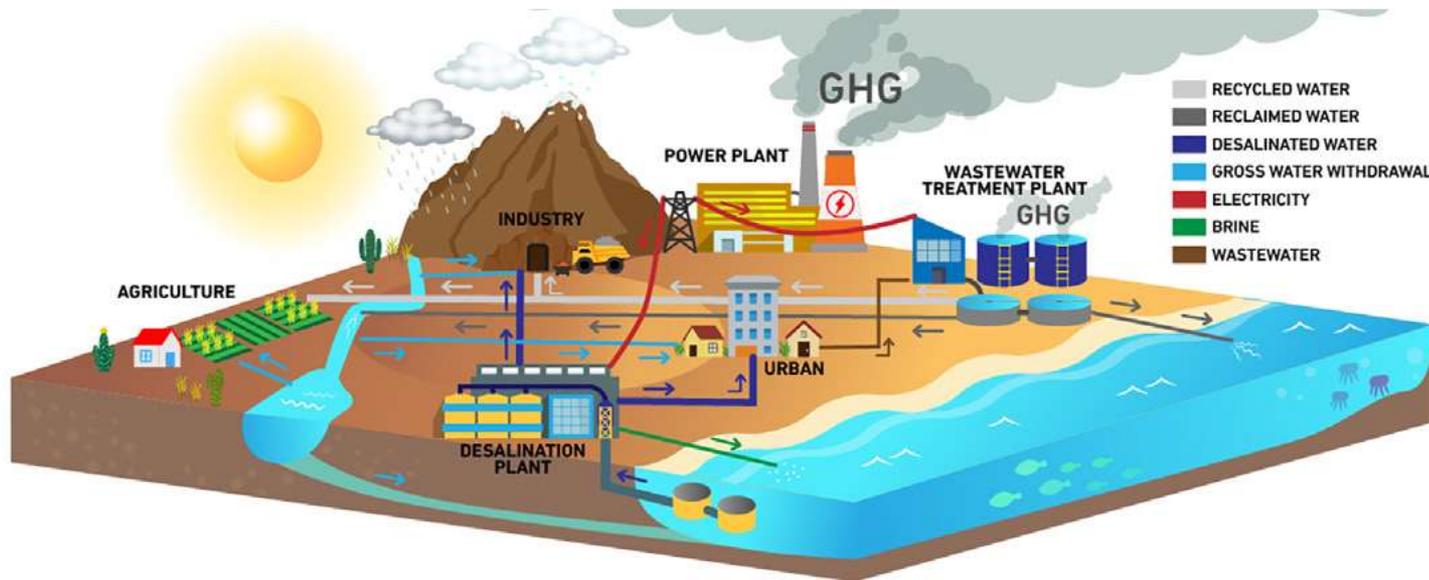
Universidad de Antofagasta (2015)

Contenidos de mi presentación

- Estrés hídrico y gases de efecto invernadero.
- Diseño de sistemas de desalinización integrados.

Estrés hídrico y gases de efecto invernadero

Impacto de la desalinización y tratamiento de aguas residuales



$$\text{WATER STRESS} = \frac{\text{WATER USE}}{\text{WATER RESOURCES} - \text{EFR}}$$

Indicator 6.4.2 needs to incorporate the quantification of greenhouse gas emissions generated by water treatment systems.

Fuente: Impact of seawater desalination and wastewater treatment on water stress levels and greenhouse gas emissions: The case of Chile. Science of The Total Environment (2022).

ODS 6.4.2: Nivel de estrés hídrico

$$\text{Stress (\%)} = \frac{TFWW}{(TRWR - EFR)} \times 100$$

- NO STRESS <25%
- LOW 25% - 50%
- MEDIUM 50% - 75%
- HIGH 75-100%
- CRITICAL >100%

<https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/metadata-06-04-02.pdf>

ODS 6.4.2: Nivel de estrés hídrico

Extracción total de
agua convencional


$$\text{Stress (\%)} = \frac{TFWW}{(TRWR - EFR)} \times 100$$

- NO STRESS <25%
- LOW 25% - 50%
- MEDIUM 50% - 75%
- HIGH 75-100%
- CRITICAL >100%

<https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/metadata-06-04-02.pdf>

ODS 6.4.2: Nivel de estrés hídrico

$$\text{Stress (\%)} = \frac{TFWW}{(TRWR - EFR)} \times 100$$



Agua convencional
disponible total

- NO STRESS <25%
- LOW 25% - 50%
- MEDIUM 50% - 75%
- HIGH 75-100%
- CRITICAL >100%

<https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/metadata-06-04-02.pdf>

ODS 6.4.2: Nivel de estrés hídrico

$$\text{Stress (\%)} = \frac{TFWW}{(TRWR - EFR)} \times 100$$

Requerimientos de
flujo ambiental



- NO STRESS <25%
- LOW 25% - 50%
- MEDIUM 50% - 75%
- HIGH 75-100%
- CRITICAL >100%

<https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/metadata-06-04-02.pdf>

ODS 6.4.2: Nivel de estrés hídrico

$$\text{Stress (\%)} = \frac{\text{TFWW}}{(\text{TRWR} - \text{EFR})} \times 100$$

- NO STRESS <25%
- LOW 25% - 50%
- MEDIUM 50% - 75%
- HIGH 75-100%
- CRITICAL >100%

<https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/metadata-06-04-02.pdf>

			2019	2020
Agricultural water withdrawal as % of total renewable water resources	%	I	3.19	3.19
MDG 7.5. Freshwater withdrawal as % of total renewable water resources	%	E	3.83	3.83
SDG 6.4.1. Industrial Water Use Efficiency	US\$/m3	E	41.45	42.34
SDG 6.4.1. Irrigated Agriculture Water Use Efficiency	US\$/m3	E	0.23	0.23
SDG 6.4.1. Services Water Use Efficiency	US\$/m3	E	125.71	114.26
SDG 6.4.1. Water Use Efficiency	US\$/m3	I	7.34	6.93
SDG 6.4.2. Water Stress	%	E	8.98	8.98

<https://data.apps.fao.org/aquastat/?lang=en>

ODS 6.4.2: Nivel de estrés hídrico

$$\text{Stress (\%)} = \frac{TFWW}{(TRWR - EFR)} \times 100$$

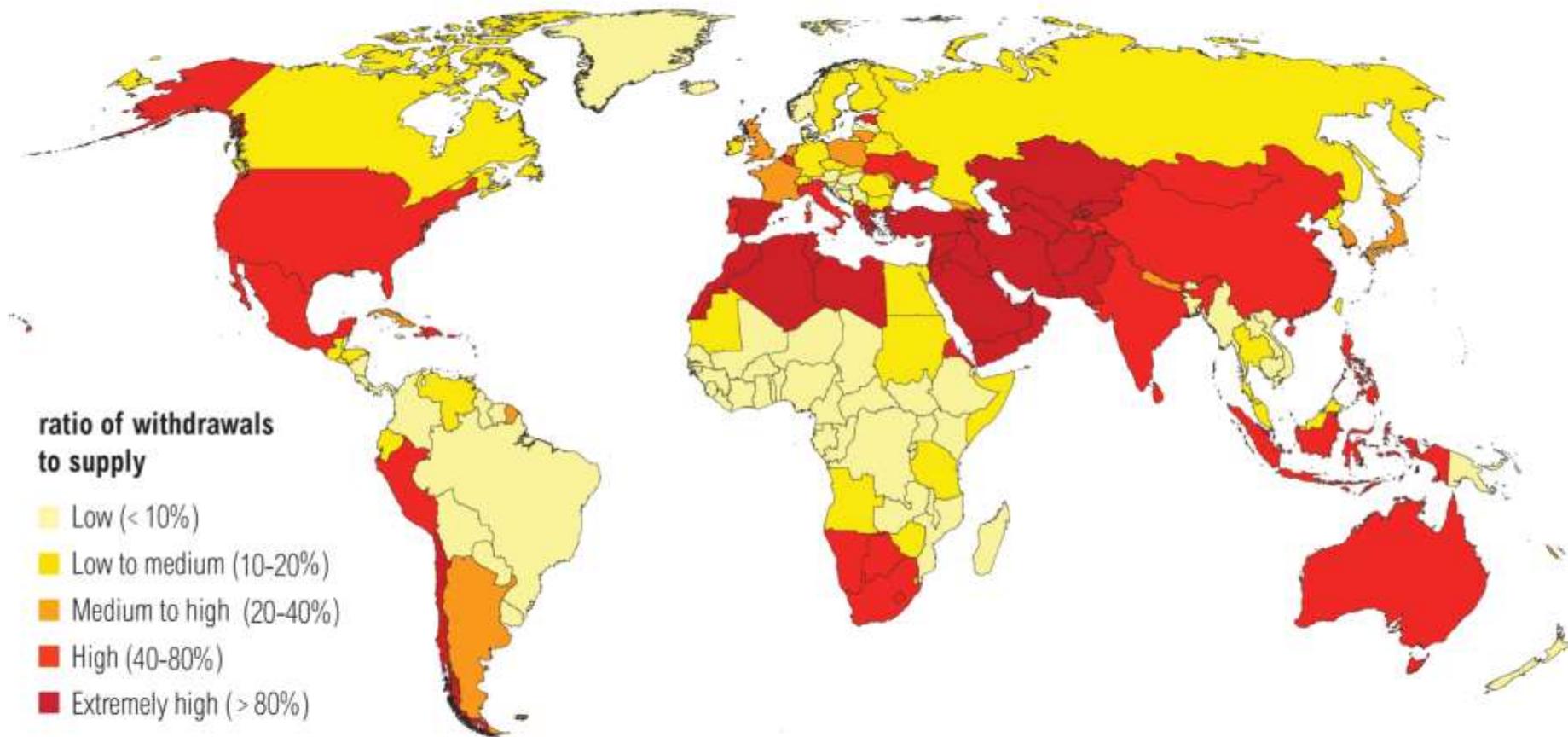
- NO STRESS <25%
- LOW 25% - 50%
- MEDIUM 50% - 75%
- HIGH 75-100%
- CRITICAL >100%

<https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/metadata-06-04-02.pdf>

			2019	2020
Agricultural water withdrawal as % of total renewable water resources	%	I	3.19	3.19
MDG 7.5. Freshwater withdrawal as % of total renewable water resources	%	E	3.83	3.83
SDG 6.4.1. Industrial Water Use Efficiency	US\$/m3	E	41.45	42.34
SDG 6.4.1. Irrigated Agriculture Water Use Efficiency	US\$/m3	E	0.23	0.23
SDG 6.4.1. Services Water Use Efficiency	US\$/m3	E	125.71	114.26
SDG 6.4.1. Water Use Efficiency	US\$/m3	I	7.34	6.93
SDG 6.4.2. Water Stress	%	E	8.98	8.98

<https://data.apps.fao.org/aquastat/?lang=en>

Water Stress by Country: 2040

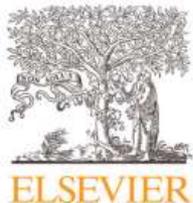


NOTE: Projections are based on a business-as-usual scenario using SSP2 and RCP8.5.

For more: ow.ly/RiWop

La escala de análisis importa

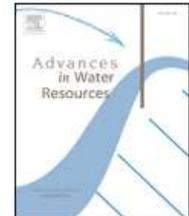
Advances in Water Resources 123 (2019) 134–144



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Advances in Water Resources

journal homepage: www.elsevier.com/locate/advwatres



Scale matters: Effects of temporal and spatial data resolution on water scarcity assessments



Manuela I. Brunner^{1,*}, Massimiliano Zappa¹, Manfred Stähli¹

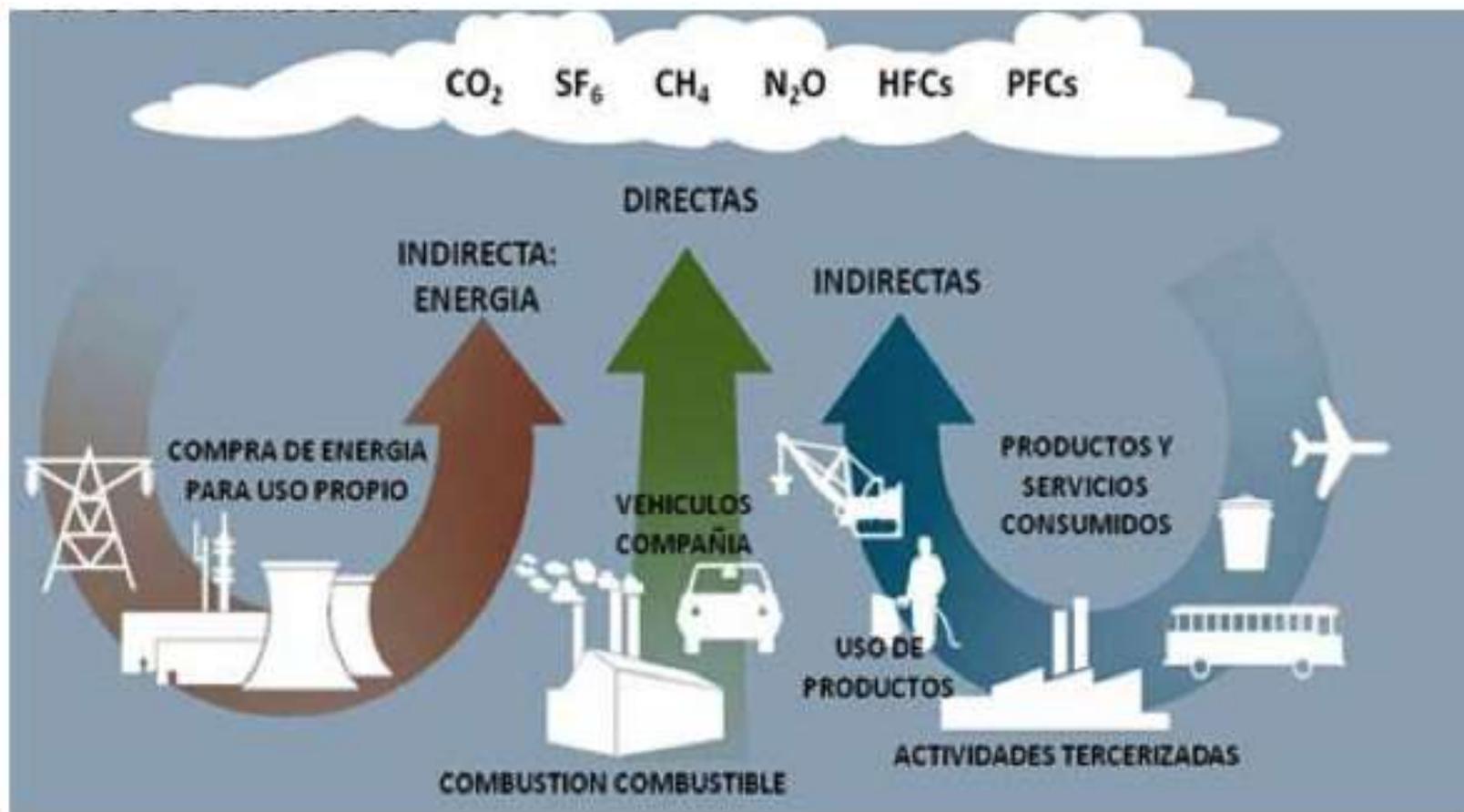
Zürcherstrasse 111, Birmensdorf ZH CH-8903 Switzerland

$$\text{Stress (\%)} = \frac{TFWW}{(TRWR - EFR)} \times 100$$



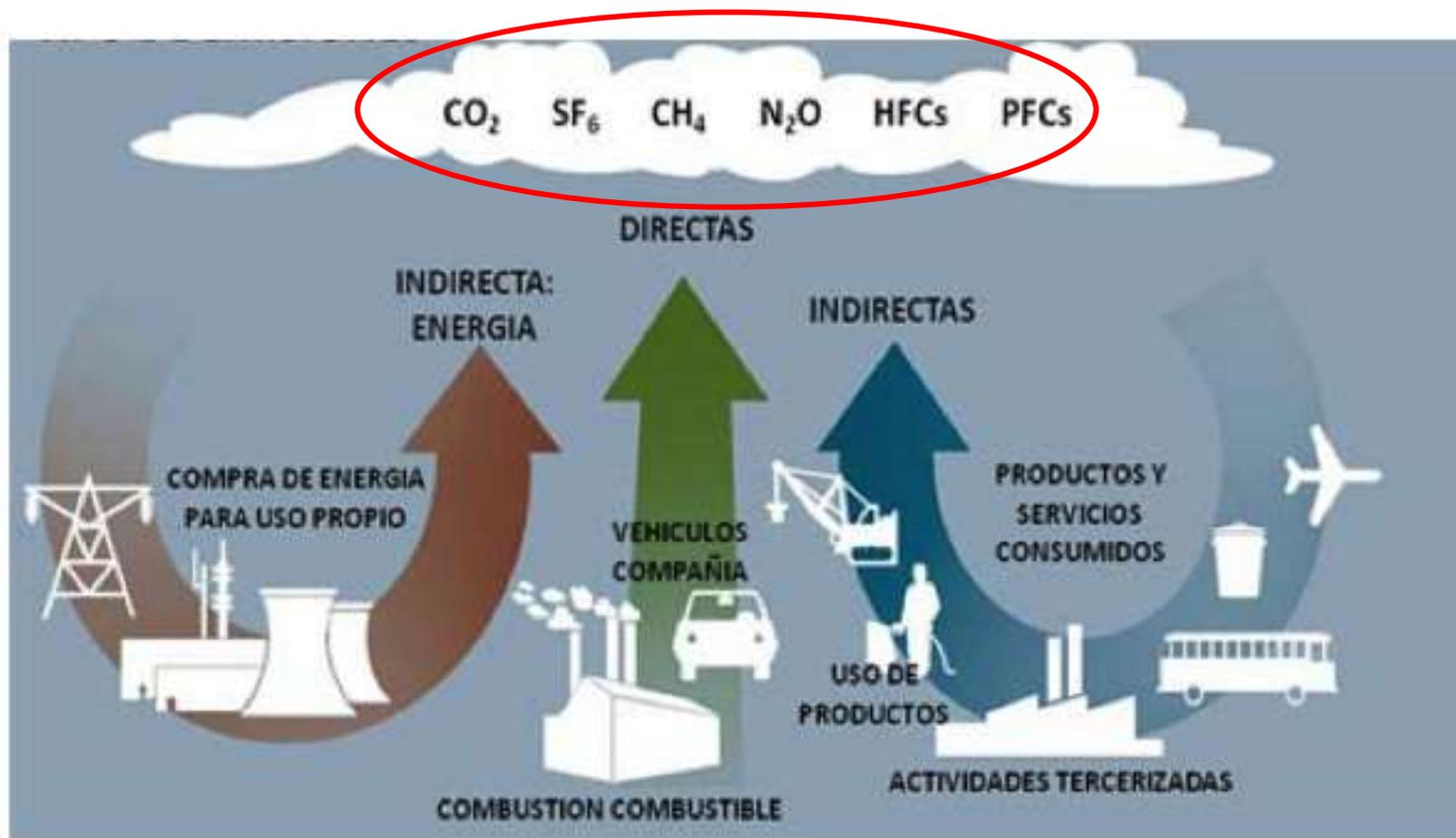


Gases de Efecto Invernadero

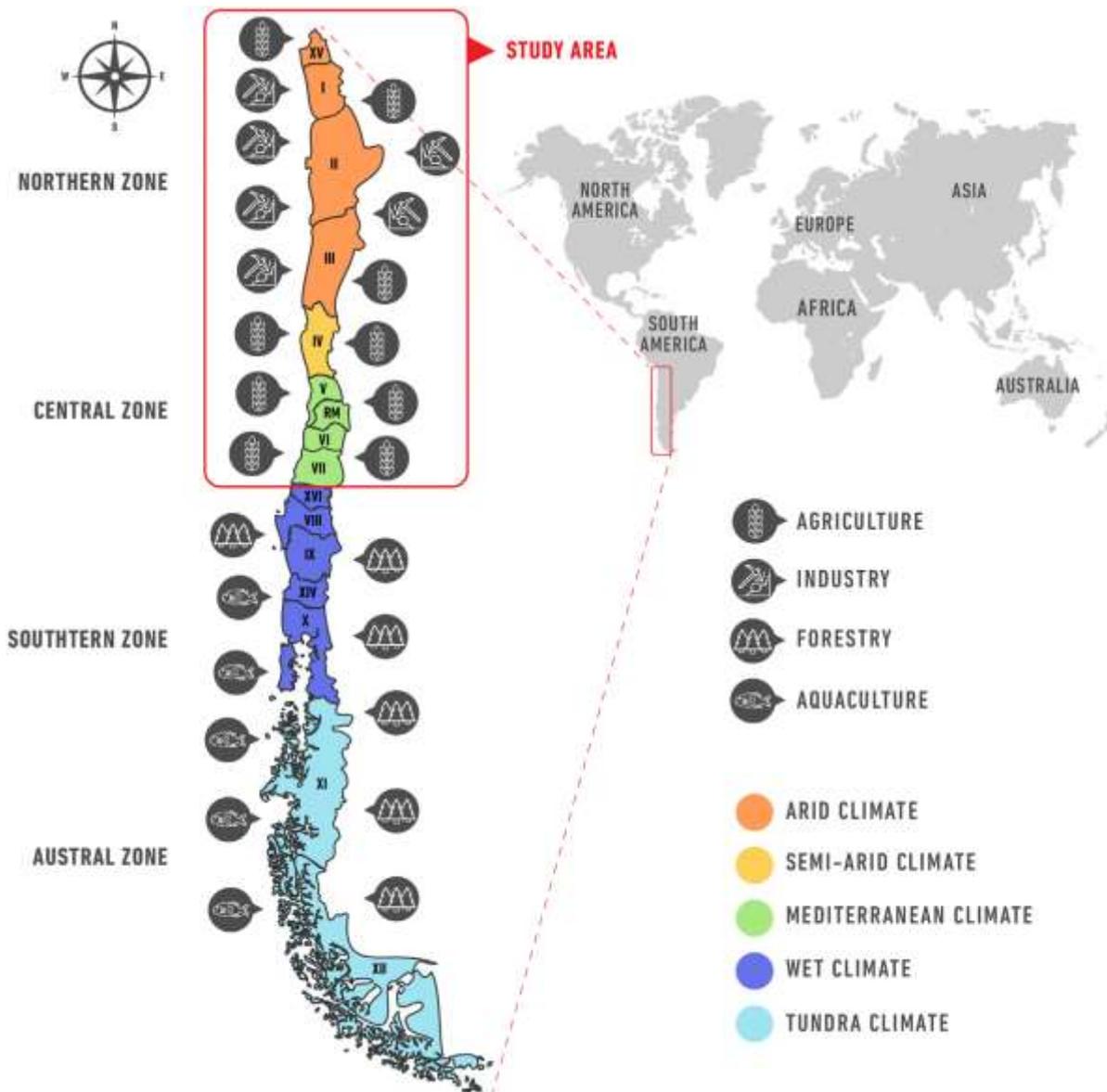


Gases de Efecto Invernadero

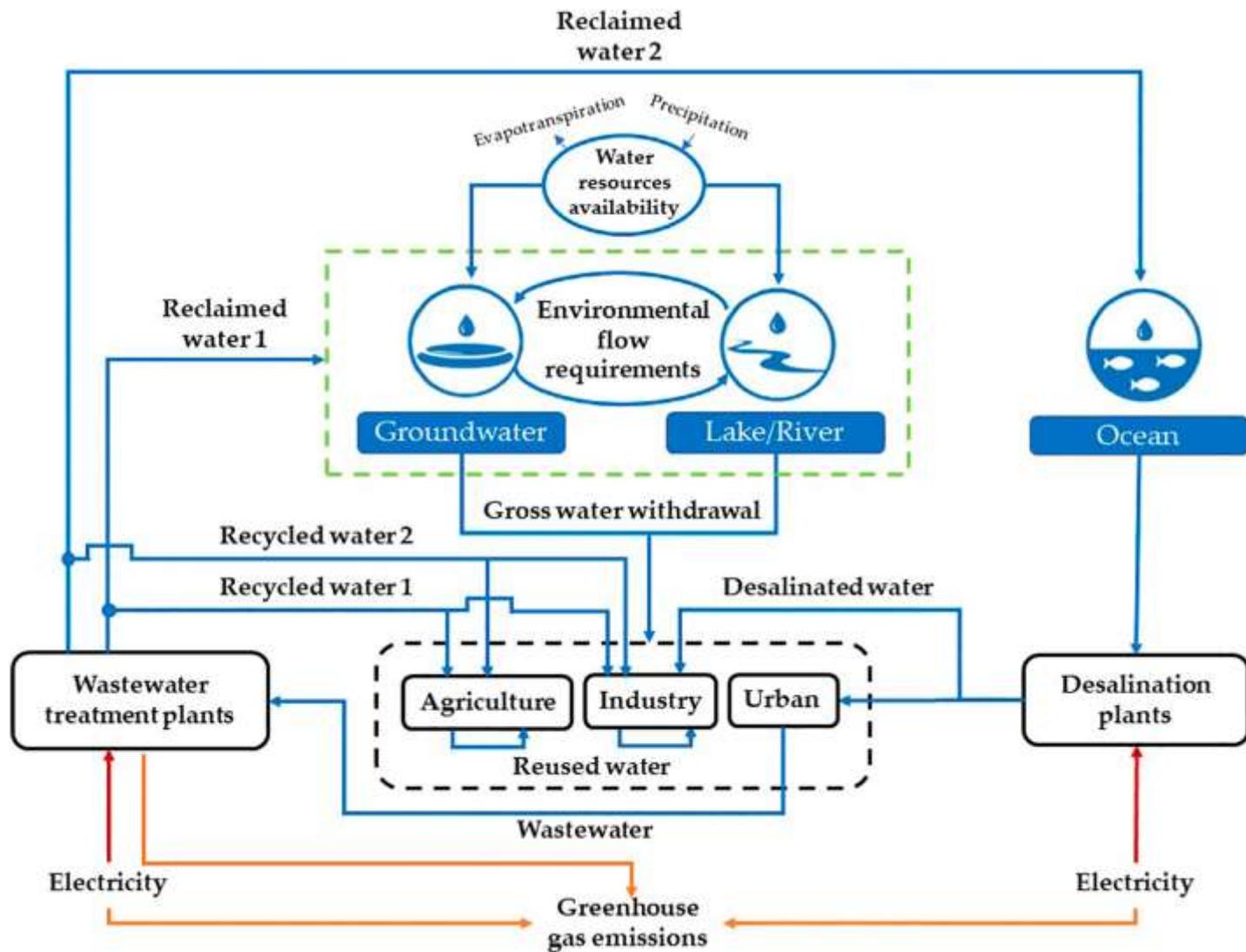
CO₂-eq



Estrés hídrico en la zona norte y centro de Chile

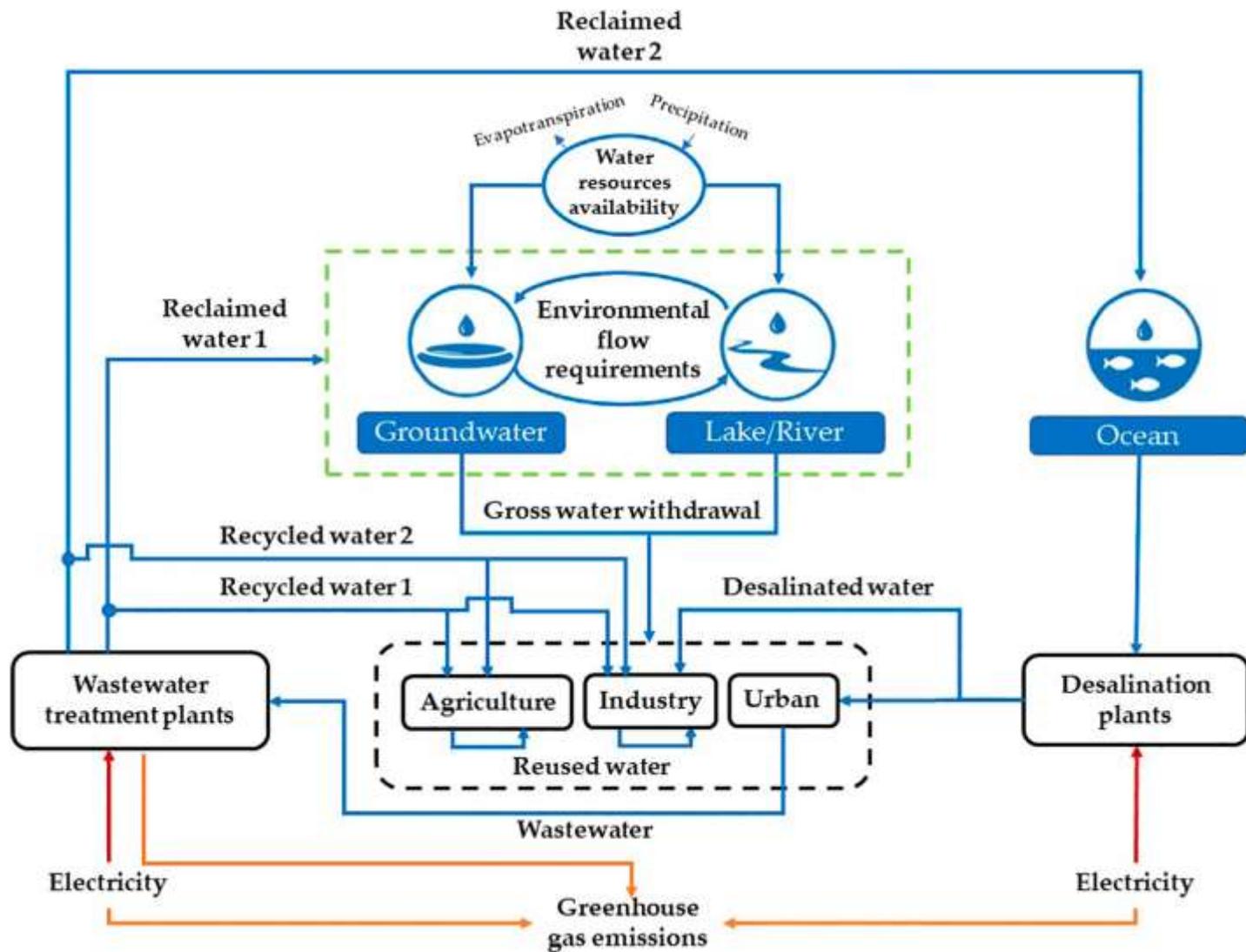


Fuente: Impact of seawater desalination and wastewater treatment on water stress levels and greenhouse gas emissions: The case of Chile. Science of The Total Environment (2022).



$$WSI (\%) = \frac{\text{net water withdrawal} - \text{recycled water} - \text{desalinated water}}{\text{water resources availability} - \text{environmental flow requirements}} * 100$$

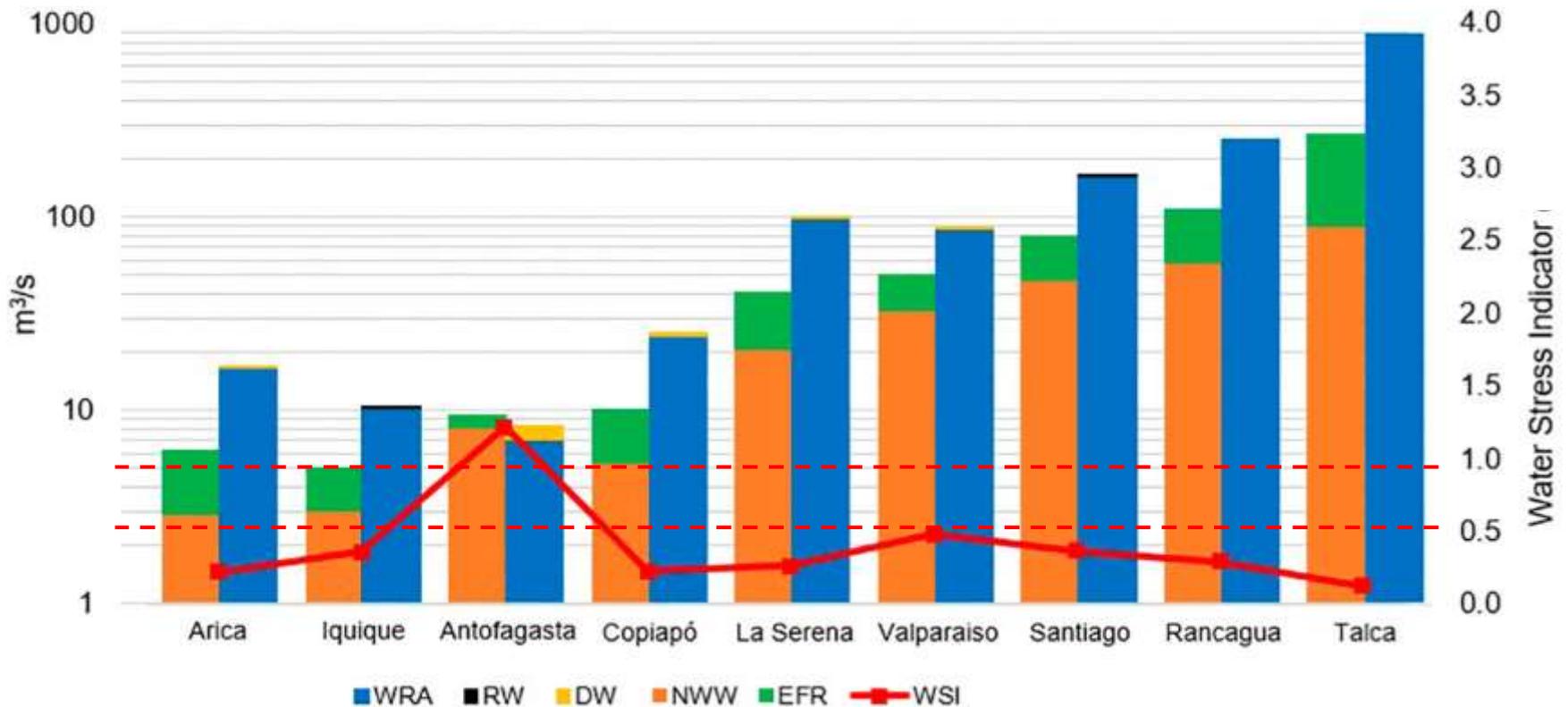
Fuente: Impact of seawater desalination and wastewater treatment on water stress levels and greenhouse gas emissions: The case of Chile. Science of The Total Environment (2022).



$$WSI (\%) = \frac{\text{net water withdrawal} - \text{recycled water} - \text{desalinated water}}{\text{water resources availability} - \text{environmental flow requirements}} * 100$$

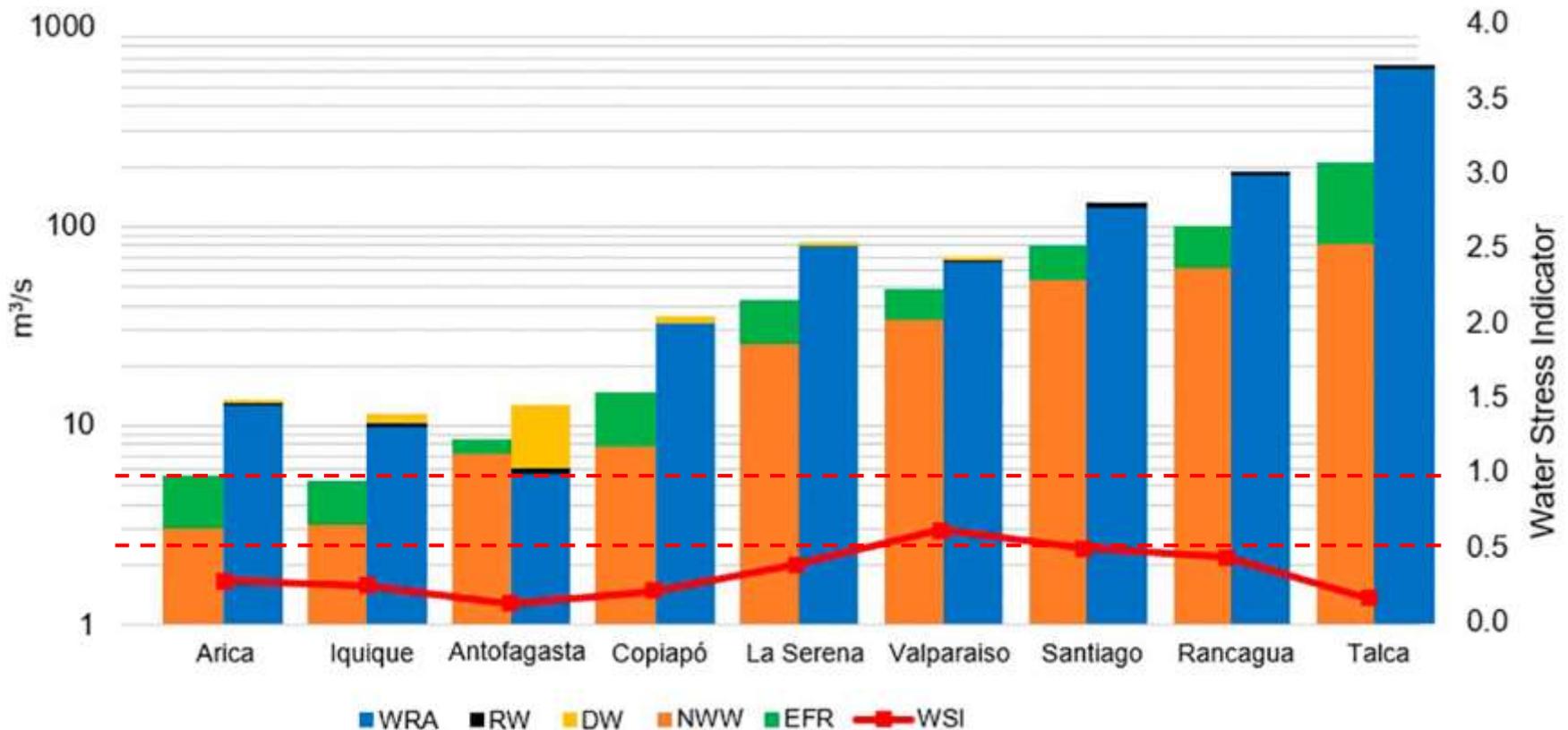
Fuente: Impact of seawater desalination and wastewater treatment on water stress levels and greenhouse gas emissions: The case of Chile. Science of The Total Environment (2022).

Estrés hídrico en Chile año 2015



Fuente: Impact of seawater desalination and wastewater treatment on water stress levels and greenhouse gas emissions: The case of Chile. Science of The Total Environment (2022).

Estrés hídrico en Chile año 2030

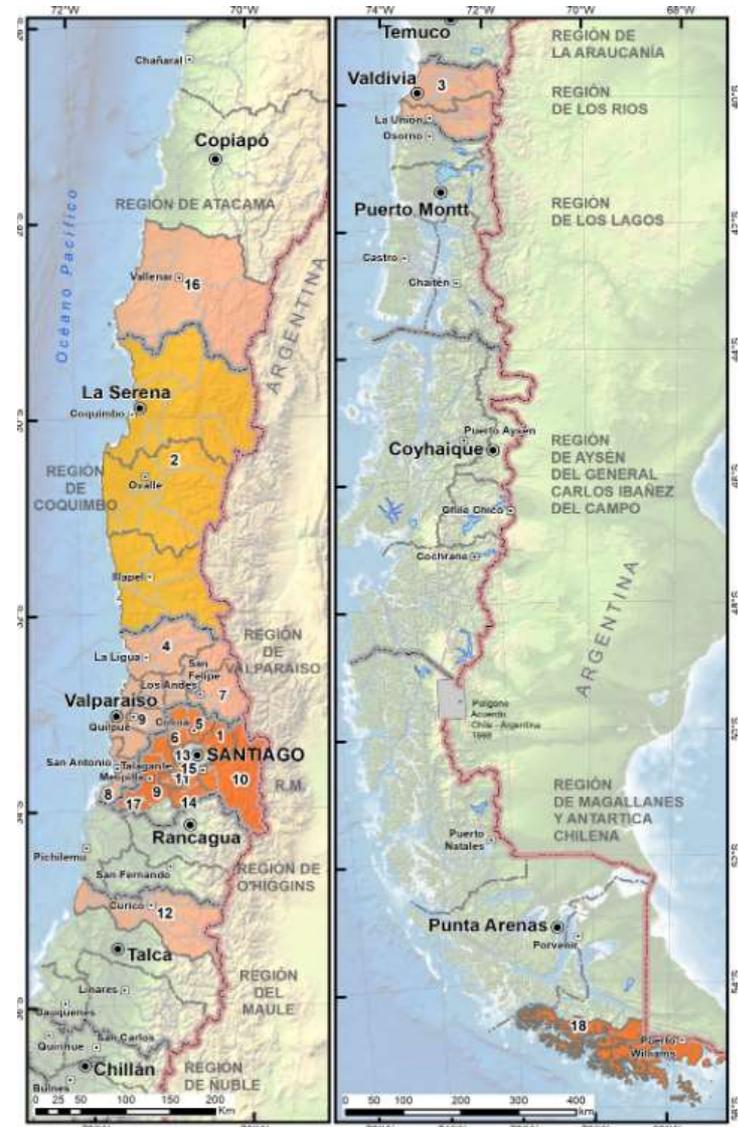


Fuente: Impact of seawater desalination and wastewater treatment on water stress levels and greenhouse gas emissions: The case of Chile. Science of The Total Environment (2022).

Situación actual de escasez hídrica en Chile

Decretos de escasas hídrica

Metropolitana	Comunas de Lo Barnechea, Las Condes y Vitacura
Coquimbo	Región de Coquimbo
Los Ríos	Provincias de Ranco y Valdivia
Valparaíso	Provincia de Petorca
Metropolitana	Comunas de Colina y Til Til
Metropolitana	Comuna de Lampa
Valparaíso	Provincias de Valparaíso, San Felipe de Aconcagua, Los Andes, Marga Marga y Quillota
Valparaíso	Provincia de San Antonio
Metropolitana	Comunas de Curacaví, María Pinto y Melipilla.
Metropolitana	Comunas de San José de Maipo, Pirque, Puente Alto, San Bernardo, Isla de Maipo y Buin.
Metropolitana	Comunas de Padre Hurtado, Peñaflor, Talagante y El Monte, Provincia de Talagante
Maule	Provincia de Curicó
Metropolitana	Comuna de Pudahuel, Provincia de Santiago
Metropolitana	Comuna de Paine, Provincia de Maipo
Metropolitana	Comuna de Calera de Tango, Provincia de Maipo
Atacama	Provincia de Huasco
Metropolitana	Comuna de San Pedro, Provincia de Melipilla
Magallanes y de la Antártica Chilena	Comuna de Cabo de Hornos



Emisiones de gases de efecto invernadero

Table 3

Desalinated water and greenhouse gas emissions produced in the northern and central zones of Chile in 2015 and 2030.

Administrative region	2015					2030				
	Desalinated water capacity (m ³ /s)	Indirect GHG emissions [tCO ₂ -eq/year]		Direct GHG emissions [tCO ₂ -eq/year]		Desalinated water capacity (m ³ /s)	Indirect GHG emissions [tCO ₂ -eq/year]		Direct GHG emissions [tCO ₂ -eq/year]	
		Min	Max	Min	Max		Min	Max	Min	Max
Arica	0.01	631	1,009	-	-	0.01	237	378	-	-
Iquique	0	0	0	-	-	0.95	22,422	35,875	-	-
Antofagasta	1.27	80,328	128,526	-	-	6.28	148,525	237,640	-	-
Copiapó	0.98	61,558	98,493	-	-	2.28	53,927	86,282	-	-
La Serena	0.16	10,293	16,469	-	-	0.84	19,943	31,909	-	-
Valparaiso	0.09	5,803	9,284	-	-	0.89	21,098	33,756	-	-
Santiago	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-
Rancagua	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-
Talca	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-
Total	2.51	158,613	253,782	-	-	11.25	266,151	425,842	-	-

Fuente: Impact of seawater desalination and wastewater treatment on water stress levels and greenhouse gas emissions: The case of Chile. Science of The Total Environment (2022).

Emisiones de gases de efecto invernadero

Table 3

Desalinated water and greenhouse gas emissions produced in the northern and central zones of Chile in 2015 and 2030.

Administrative region	2015					2030				
	Desalinated water capacity (m ³ /s)	Indirect GHG emissions [tCO ₂ -eq/year]		Direct GHG emissions [tCO ₂ -eq/year]		Desalinated water capacity (m ³ /s)	Indirect GHG emissions [tCO ₂ -eq/year]		Direct GHG emissions [tCO ₂ -eq/year]	
		Min	Max	Min	Max		Min	Max	Min	Max
Arica	0.01	631	1,009	-	-	0.01	237	378	-	-
Iquique	0	0	0	-	-	0.95	22,422	35,875	-	-
Antofagasta	1.27	80,328	128,526	-	-	6.28	148,525	237,640	-	-
Copiapó	0.98	61,558	98,493	-	-	2.28	53,927	86,282	-	-
La Serena	0.16	10,293	16,469	-	-	0.84	19,943	31,909	-	-
Valparaiso	0.09	5,803	9,284	-	-	0.89	21,098	33,756	-	-
Santiago	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-
Rancagua	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-
Talca	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-
Total	2.51	158,613	253,782	-	-	11.25	266,151	425,842	-	-

Menos que el **0.5%** emitido a nivel nacional en 2020 (95.000.000 t CO₂-eq/year)

Fuente: Impact of seawater desalination and wastewater treatment on water stress levels and greenhouse gas emissions: The case of Chile. Science of The Total Environment (2022).

Diseño de sistemas de desalinización integrados

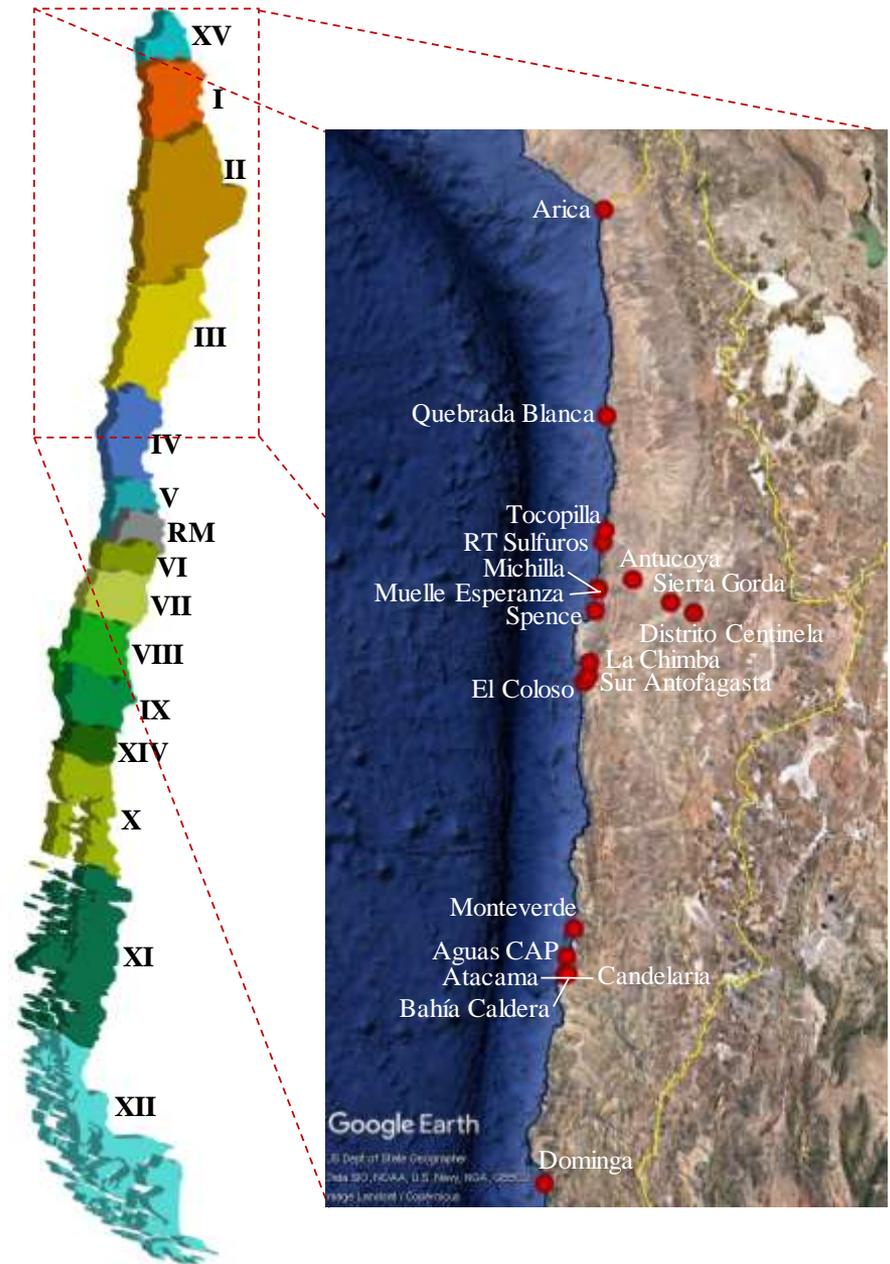
Proyectos de desalinización en Chile con una producción mayor a 10 l/s:

Capacidad actual → 5.868 l/s

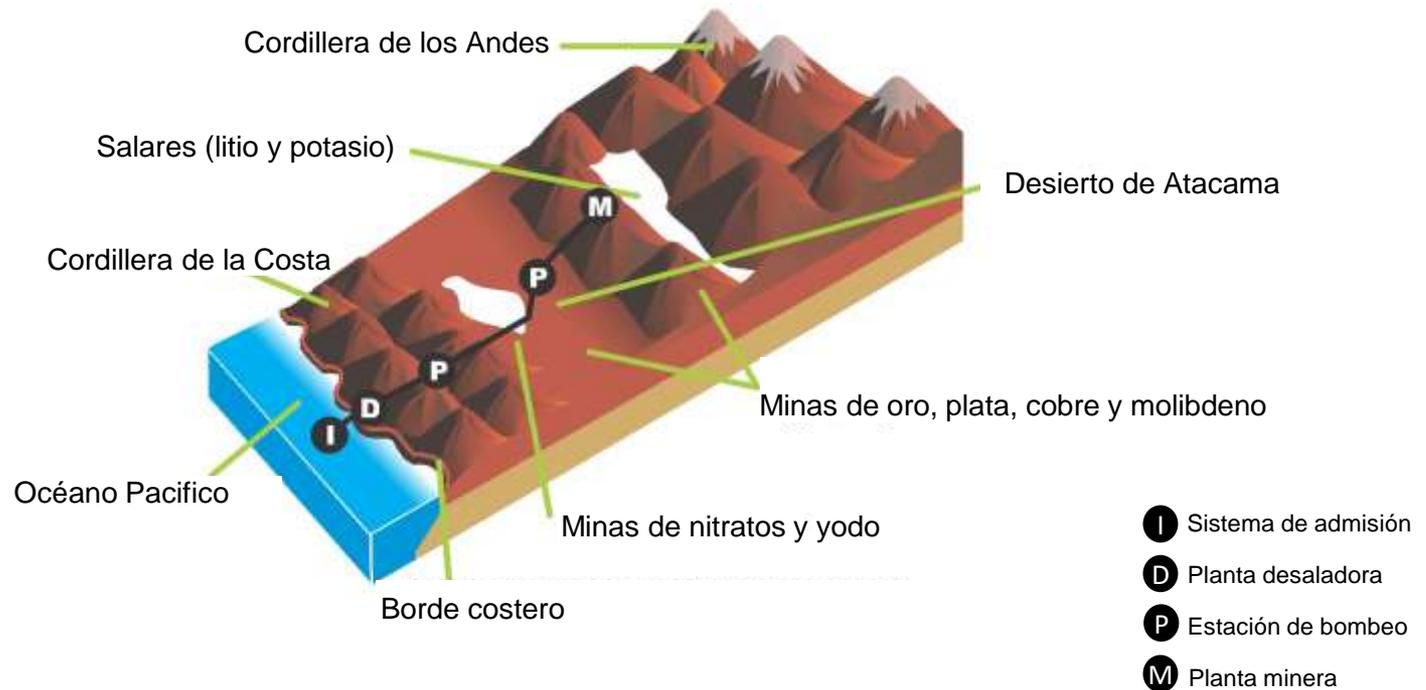
Capacidad futura → 12.706 l/s



70% sector minero
30% sector urbano

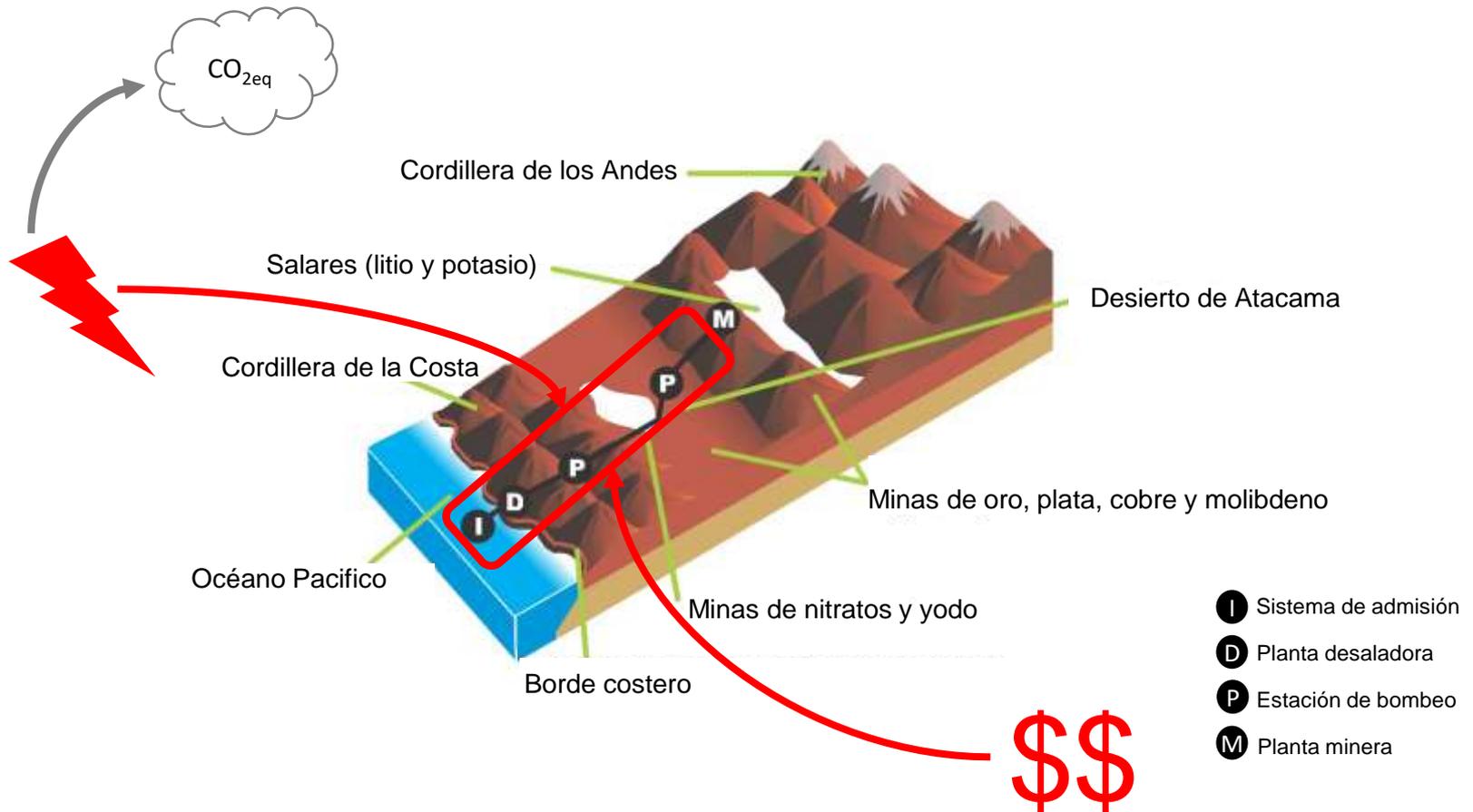


Redes de abastecimiento de agua desalinizada para minería



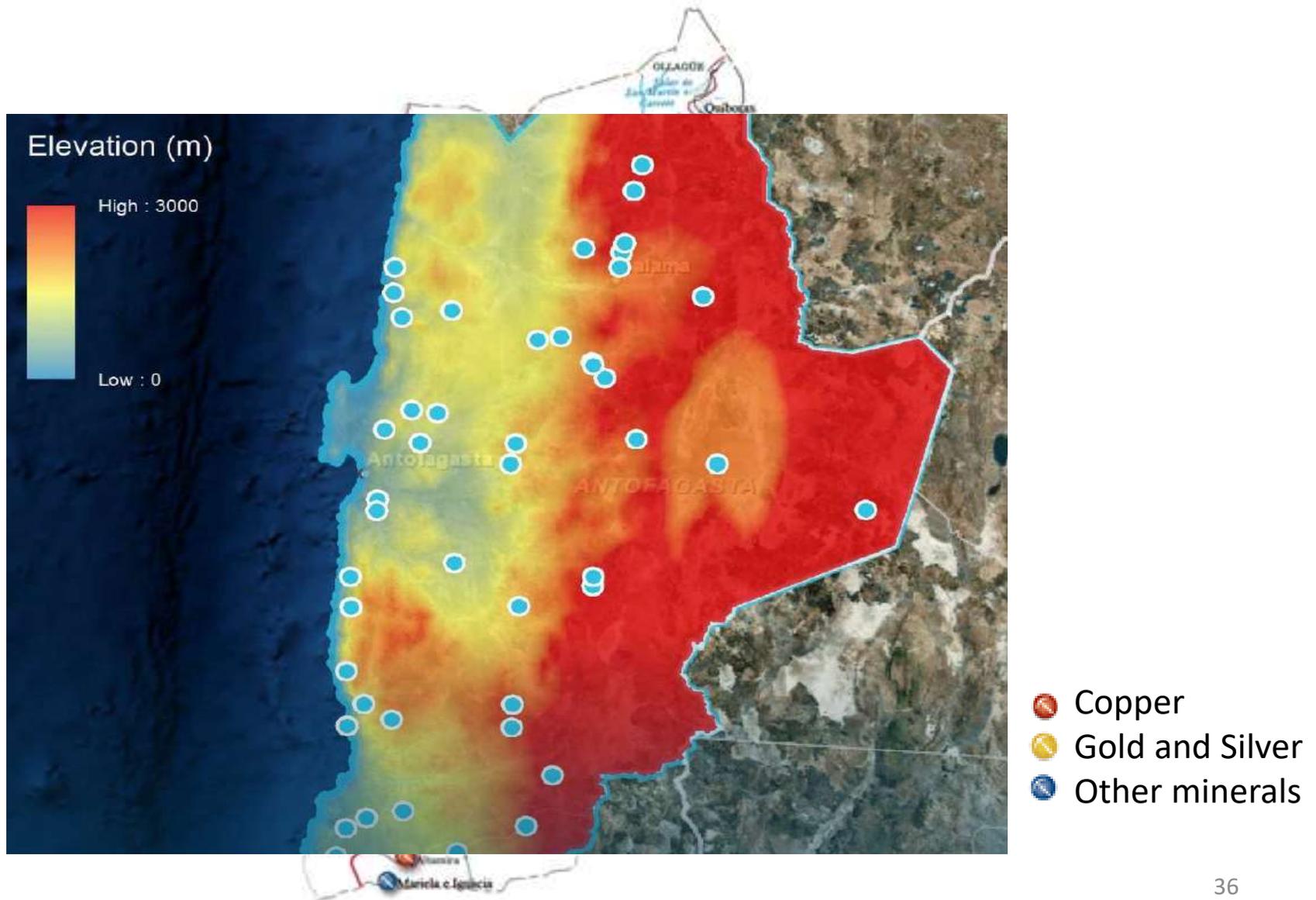
Fuente: The use of seawater in mining. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review (2018)

Redes de abastecimiento de agua desalinizada para minería

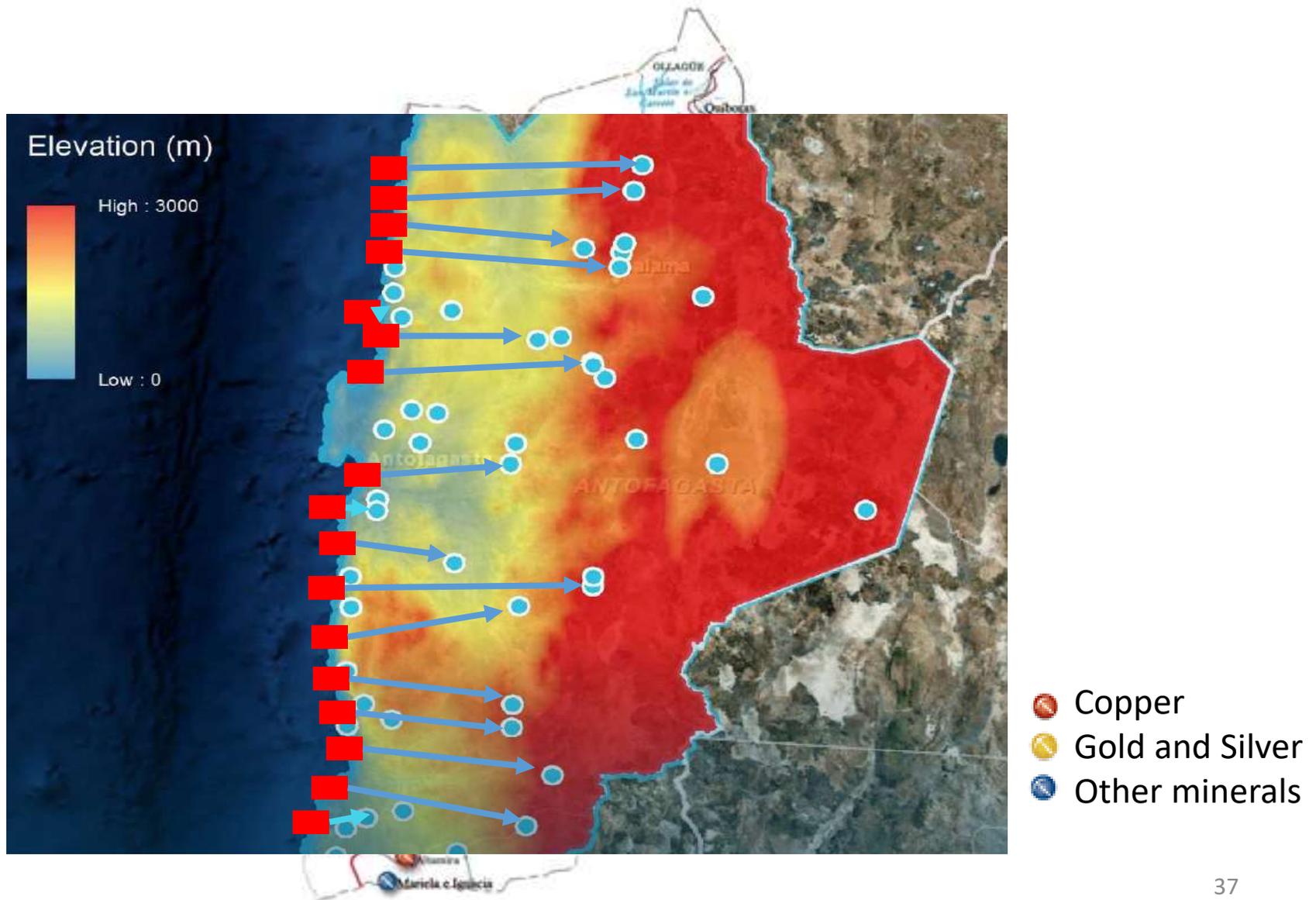


Fuente: The use of seawater in mining. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review (2018)

Chile – Región de Antofagasta



Chile – Región de Antofagasta



Potenciales problemas

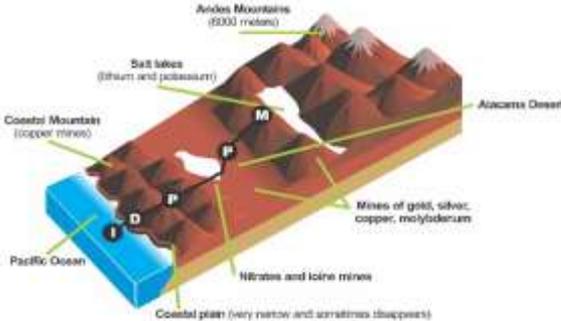
1. Instalación de varios sistemas de suministro de agua independientes.
2. Aumento desproporcionado de la demanda energética y sin una estrategia de control adecuada.
3. Potenciales conflictos entre distintos usuarios debido a un acceso heterogéneo a los recursos hídricos.

Motivación

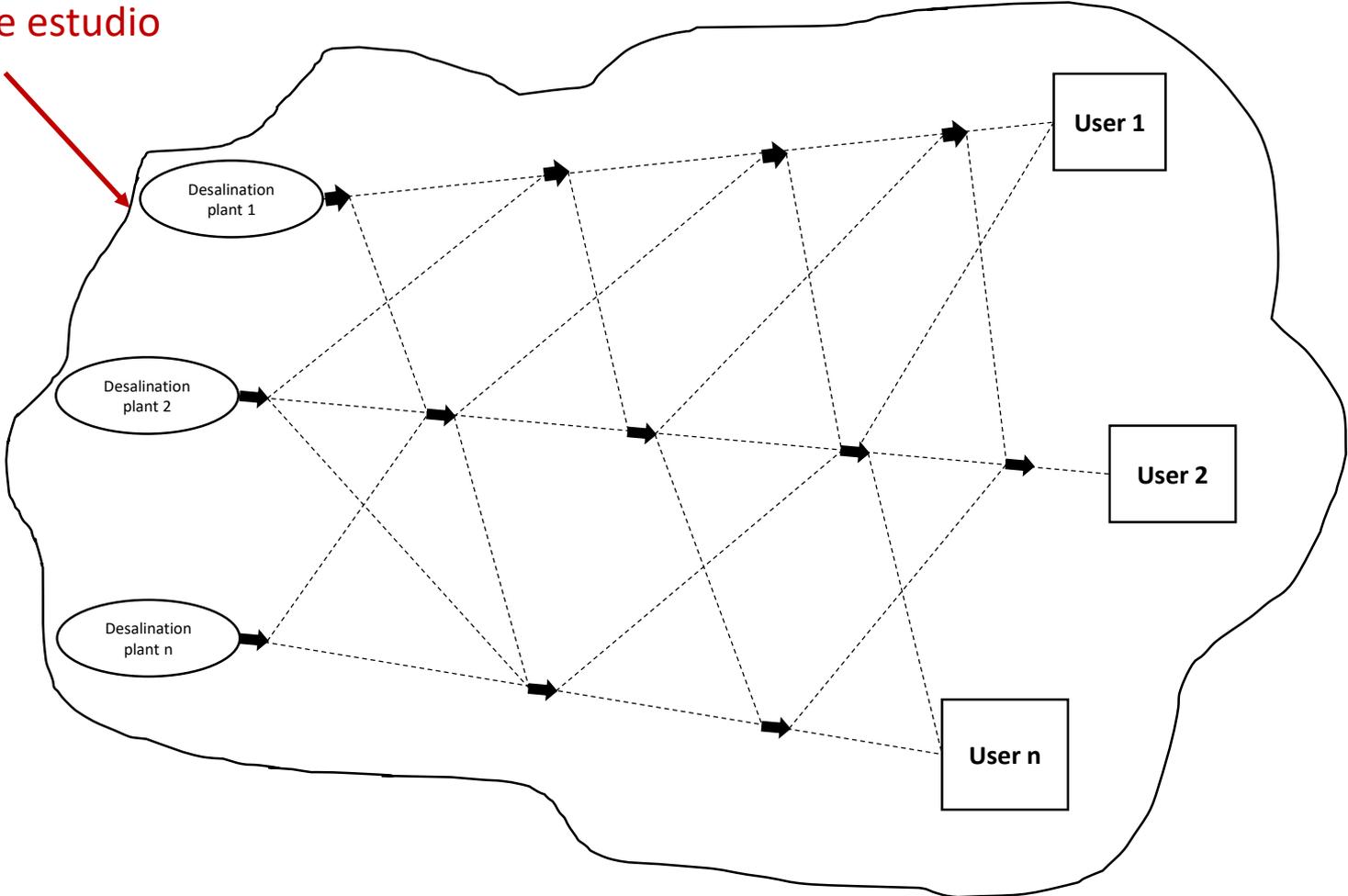
Proponer sistemas integrados de suministro de agua desalinizada para abastecer los requerimientos de más una operación minera



Problema de diseño



Área de estudio



Problema de diseño

- ¿Cuál es la cantidad de agua demandada que debemos suministrar?
- ¿Qué dimensiones de tuberías tenemos disponibles?
- ¿Cuáles son los costos operativos y de capital del sistema?
- ¿Qué tipo de fuente de energía tenemos disponible?
- ¿Cuál es la mejor alternativa para abastecer el agua demandada?

Metodología de diseño

1. Definir el sistema como una red
2. Describir la red matemáticamente
3. Incluir datos como parámetros y escalares
4. Definir la función objetivo
5. Evaluar y analizar

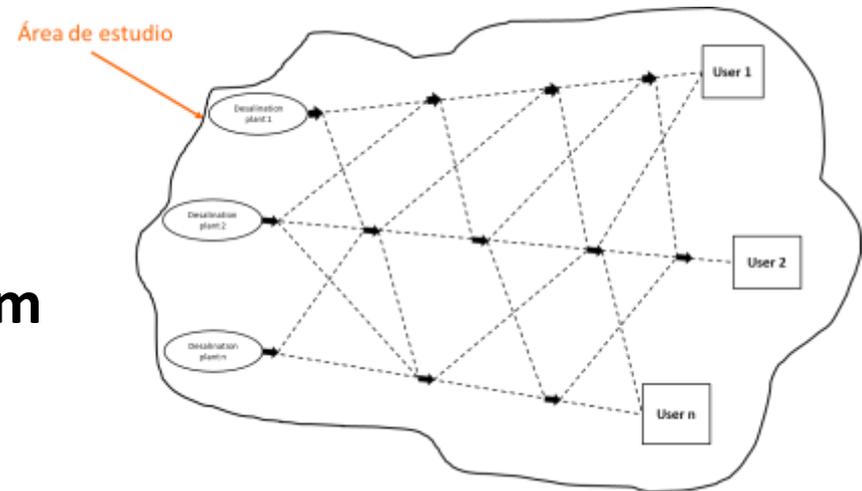
Mixed Integer Nonlinear Problem

$$\text{MIN } Z = f(x, y)$$

$$\text{s. t. } \quad h(x) = 0$$

$$g(x, y) \leq 0$$

$$x \in \mathbb{R}^n, y \in \{0,1\}^m$$



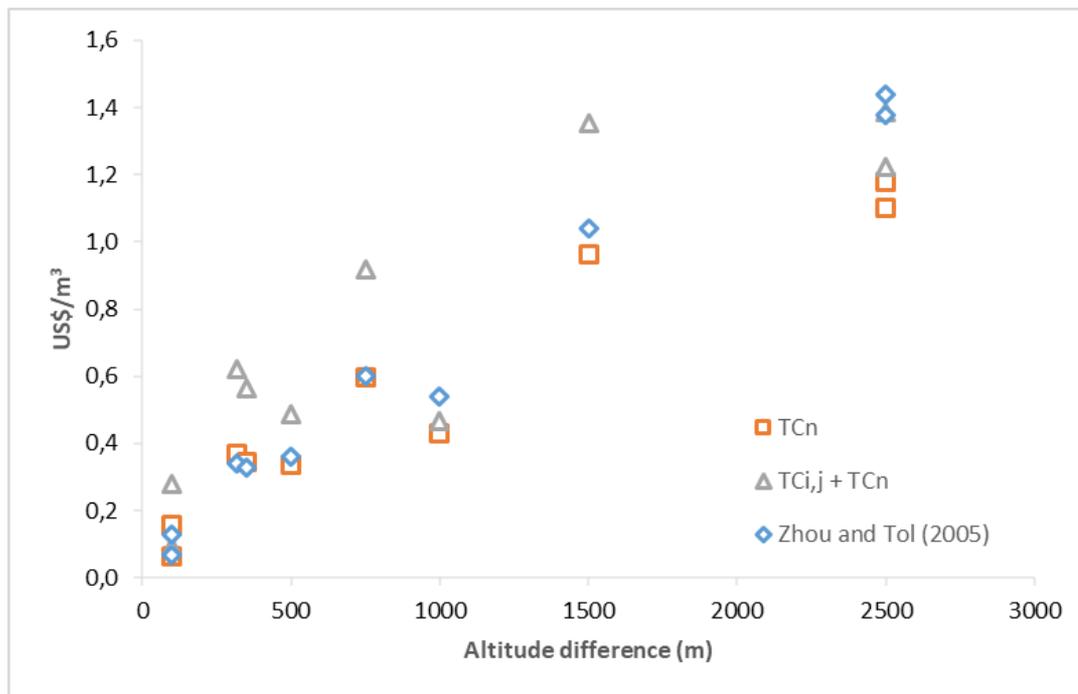
Resultados principales

Enfoque de optimización con un objetivo

- Se propuso un modelo MINLP para diseñar sistemas de suministro de agua integrado desde una perspectiva económica en áreas no costeras que sufren de escasez hídrica.
- Se consideró los costos de instalación y operación de las plantas desalinizadoras, estaciones de bombeo y tuberías.
- Se evaluó principalmente la influencia de la altura desde la costa de los usuarios de agua en los costos totales del sistema.
- Como caso de estudio se consideraron las operaciones mineras de Chile como usuarios de agua desalada.

Efecto de la altura de los usuarios

A mayor altura desde la costa, los costos del sistema de transporte de agua incrementan significativamente.

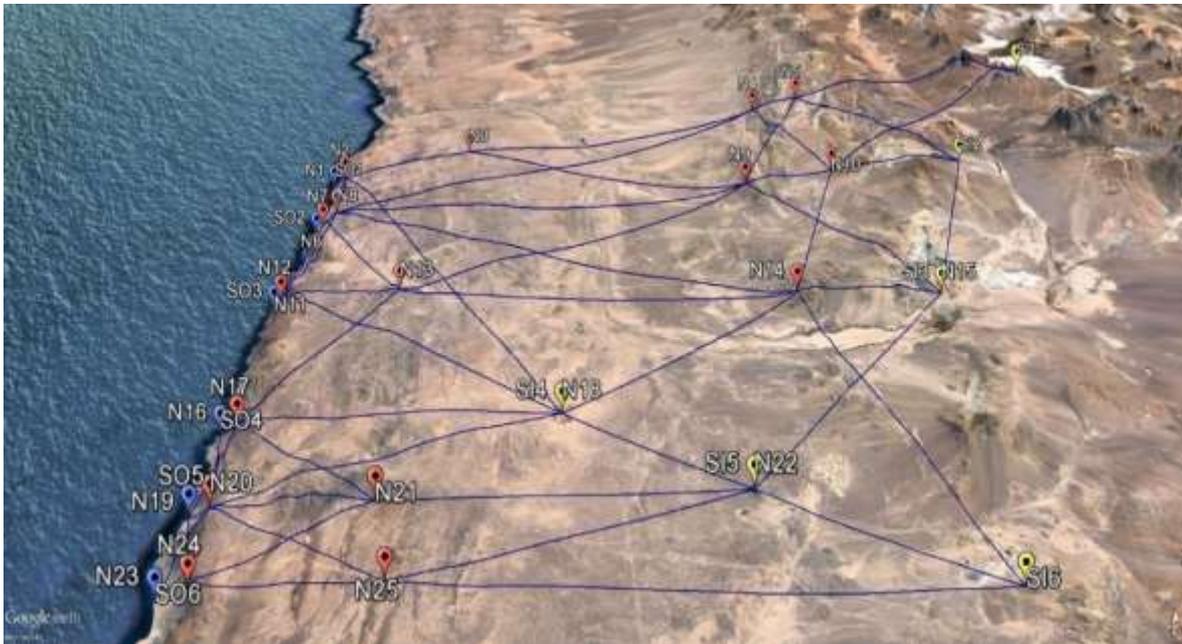


TCn: costos de las estaciones de bombeo

TCi,j: costos de las tuberías

Caso de estudio

- Región de Antofagasta – topografía compleja.
- Se consideraron 6 operaciones mineras, 6 plantas desaladoras, 25 estaciones de bombeo y 5 tipos de diámetro de tuberías.



SO: plantas desaladoras
N: estaciones de bombeo
SI: operaciones mineras

Fuente: Optimization approach to designing water supply systems in non-coastal areas suffering from water scarcity. Water Resources Management (2018)

Solución

- Se alcanzaron soluciones óptimas globales usando el algoritmo de optimización BARON en la plataforma GAMS.
- La solución se comparó con la estrategia actual de las compañías mineras, siendo 16,7% más económica en términos de costos totales.



SO: plantas desaladoras

N: estaciones de bombeo

SI: operaciones mineras

Solución

- Se desarrollo un análisis de sensibilidad para evaluar el tiempo de convergencia del modelo propuesto.
- La solución obtenida para cada uno de los casos de estudio siempre fue un sistema integrado con una planta desaladora abasteciendo a todos los usuarios.

Caso estudio	Número de plantas desaladoras	Número de estaciones de bombeo	Número de plantas mineras	Costas totales [millones US\$]	Tiempo de convergencia [seg]
1	1	3	2	483	0,84
2	1	4	3	803	2,54
3	1	4	4	1098	18,69
4	1	5	5	1265	203,91
5	1	6	6	1783	15723

Enfoque de optimización multiobjetivo

- Se propuso un modelo MINLP para diseñar sistemas de suministro de agua integrado desde una perspectiva económica y ambiental para abastecer a las operaciones mineras de Chile y comunidades cercanas.
- Se consideró los costos de instalación y operación de las plantas desaliniadoras, estaciones de bombeo y tuberías, y los efectos ambientales negativos que genera la operación del sistema.
- Se evaluó los efectos económicos y ambientales de la incorporación de un sistema fotovoltaico para suministrar parte de la energía requerida para operar el sistema.
- Se validó el modelo propuesto con los datos de un proyecto de desalinización de escala real.

Efectos ambientales negativos debido al consumo de electricidad

Se puede indicar que la matriz energética de Chile contamina el medio ambiente, ya que más del 40% de la electricidad disponible se produce a través de la combustión de combustibles fósiles.

Tipo de fuente	Red eléctrica chilena [%]	Tasas de emisión de GEI [gr CO ₂ eq/kWh]	Tasas de emisión de GEI in Chile [gr CO ₂ eq/kWh]
Carbón	40	1023	409,2
Hidroeléctrica	33	25	8,25
Gas Natural	16	606	96,96
Biomasa	3	86	2,58
Petróleo	3	780	23,4
Viento	3	31	0,93
Solar	2	71	1,42

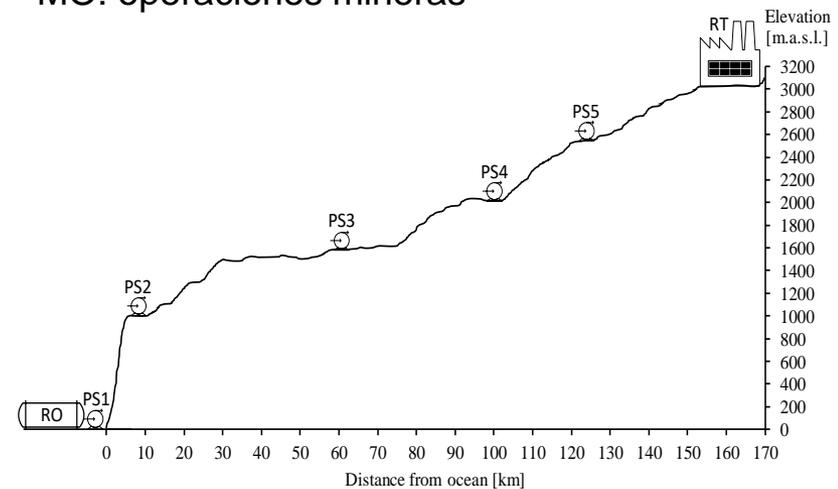
Fuente: Applying a multi-objective optimization approach in designing water supply systems for mining industries. The case of Chile. Journal of Cleaner Production (2019).

Validación del modelo

Proyecto Radomiro Tomic – planta desaladora de 1965 l/s que abastecerá los procesos productivos de la compañía ubicada a 3000 metros sobre el nivel del mar.



RO: plantas desaladoras
PS: estaciones de bombeo
MO: operaciones mineras



Fuente: Applying a multi-objective optimization approach in designing water supply systems for mining industries. The case of Chile. Journal of Cleaner Production (2019).

Caso de estudio

- Región de Antofagasta – topografía compleja.
- Se consideraron 3 operaciones mineras, 3 comunidades, 3 plantas desaladoras, 14 estaciones de bombeo y 3 tipos de diámetro de tuberías.



RO: plantas desaladoras

PS: estaciones de bombeo

MO: operaciones mineras

Fuente: Applying a multi-objective optimization approach in designing water supply systems for mining industries. The case of Chile. Journal of Cleaner Production (2019).

Solución

- Se alcanzaron soluciones óptimas globales usando el algoritmo de optimización BARON en la plataforma GAMS.
- La solución óptima es un sistema integrado desde una perspectiva económica y ambiental.



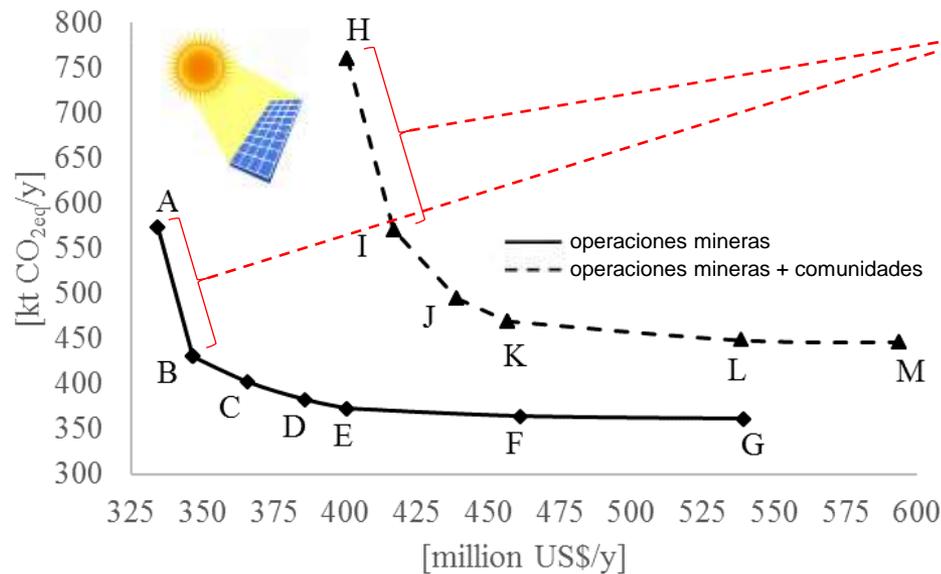
RO: plantas desaladoras

PS: estaciones de bombeo

MO: operaciones mineras

Solución

Se obtuvo el óptimo de Pareto para comprender el comportamiento de las compensaciones entre los factores económicos y ambientales del sistema de suministro integrado de agua desalinizada.



Fuente: Applying a multi-objective optimization approach in designing water supply systems for mining industries. The case of Chile. Journal of Cleaner Production (2019).

Apoyo en el desarrollo de herramienta: Smart Water Supply System

M.C.Inversiones Limitada
una subsidiaria de Mitsubishi Corporation

THE UNIVERSITY
OF QUEENSLAND
AUSTRALIA
SMICEChile



THE PROJECT VISION

The current situation of largely disconnected water supply systems between water sources and sectors in arid zones is inefficient, environmentally and economically non-optimal and unsustainable for the long-term.

There is an opportunity to make a transition to interconnected systems that connect water supplies, users and related infrastructure to ensure supply reliability, minimise costs and avoid over extraction of freshwater sources.

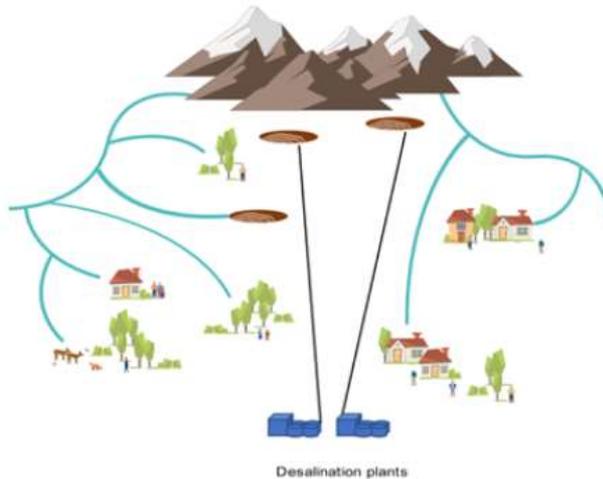
OVEREXPLOITATION OF WATER RESOURCES

DISCONNECTED

INEFFICIENT

SUBOPTIMAL

LOW SUSTAINABILITY



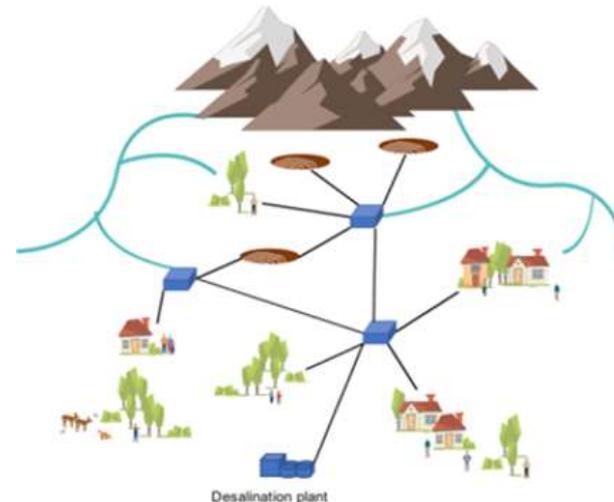
OPTIMISED AND SUSTAINABLE SUPPLY SYSTEM

INTERCONNECTED

HIGH RELIABILITY

COST-EFFECTIVE

COLLABORATIVE



Fuente: Delivering economic and social development in arid zones through smart water supply systems (2023)

Apoyo en el desarrollo de herramienta: Smart Water Supply System



PROF. NEIL MCINTYRE
Technical Advisor



DR LILIANA PAGLIERO
Technical Leader



DR DOUG AITKEN
Project Leader



LEVI CAMPOS
Researcher Tool Development



DR PASCAL BOLZ
Researcher - GIS & Mapping



DR NATHALIE JAMMET
*Researcher Optimisation
& Tool Development*



PROF. GUILLERMO DONOSO
Researcher Concept Feasibility



DR MARTIN STRINGER
Researcher Tool Visualisation



DR SEBASTIÁN HERRERA
Optimisation & Tool Development



FRANCISCA RIVERO
*Researcher Stakeholder
Engagement*



PROF. LUIS CISTERNAS
*Researcher Optimisation
& Tool Development*



CLAUDIA MORENO
Researcher Environmental Costs



BABAK ZOLGHADR-ASLI
*PhD Researcher Agricultural
Water Supply*



RODRIGO RIVAS
Financial Manager

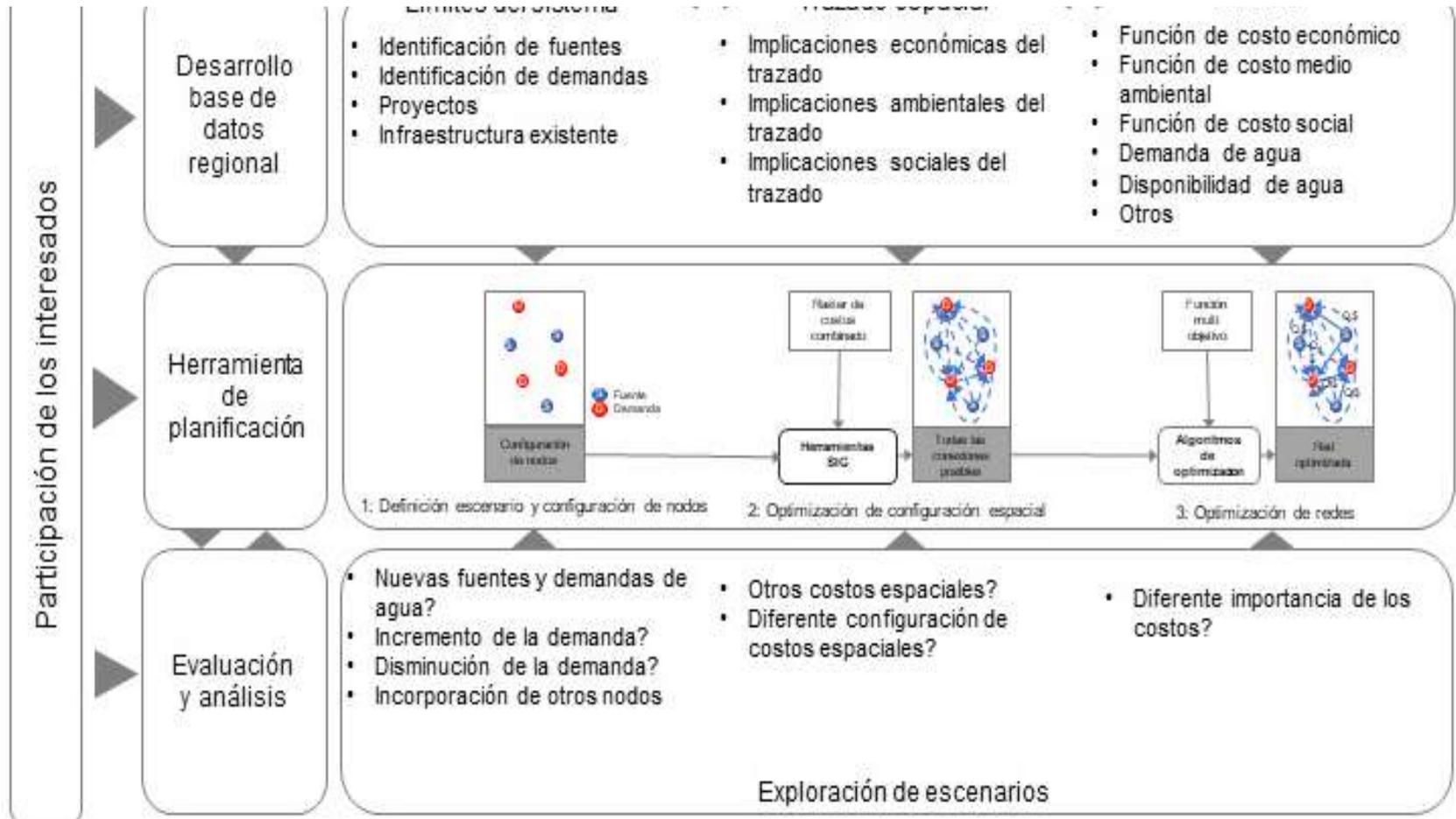


DR GABRIEL PÉREZ MURILLO
*PhD Researcher Agricultural
Water Supply*

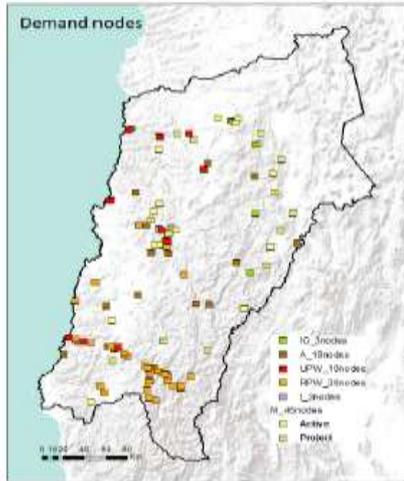
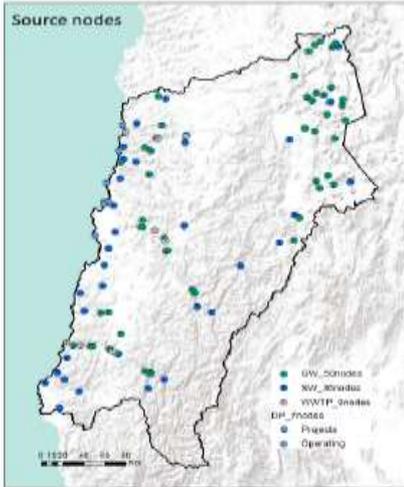


GIOVANA GARCÍA
Researcher Water Resources

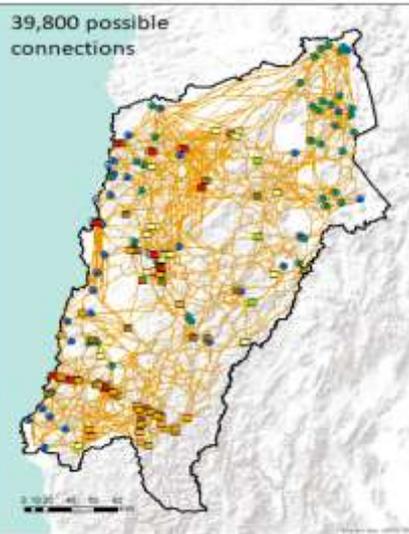
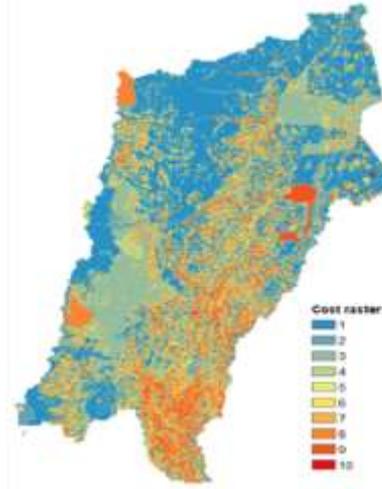
Enfoque de planificación participativa



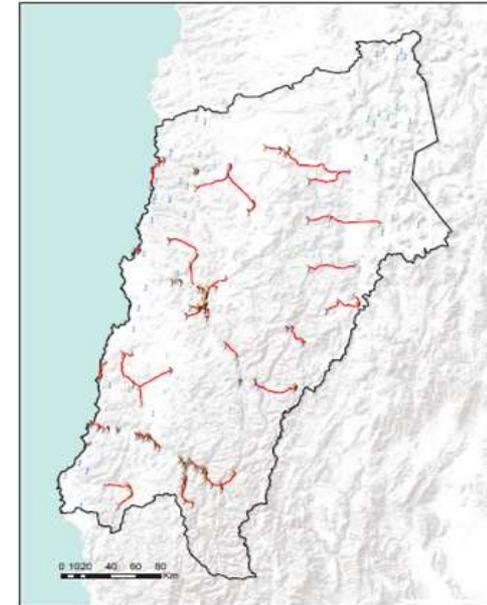
Definición de nodos



Optimización espacial



Optimización matemática



Gracias por su atención

contacto: sebastian.herrera@ucn.cl

Dr. Sebastián Herrera León

Académico Departamento de Ingeniería Química de Medio Ambiente

Secretario de Vinculación Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas

Universidad Católica del Norte – Antofagasta



Universidad
Católica del Norte