

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



ANÁLISIS DE DATOS DE CALIDAD DE AGUA PARA LA ZONA NORTE
DE CHILE

SEBASTIÁN ANDRÉS RAMOS MATUS

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD
DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA.

CHILLÁN-CHILE

2025

**ANÁLISIS DE DATOS DE CALIDAD DE AGUA PARA LA ZONA NORTE
DE CHILE**

Aprobado por:

José Luis Arumí R.
Ingeniero Civil, PhD.
Profesor Titular

Profesor Guía

Nicole Uslar Valle
Ingeniero Civil Agrícola, PhD.
Asesor Externo

Profesor Co-Guía

Ana María Aguilar B.
Ingeniero Constructor, Mg.
Profesor Asistente

Profesor Asesor

José Luis Arumí R.
Ingeniero Civil, PhD.
Profesor Titular

Director Departamento

Octavio Lagos R.
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Titular

Decano

AGRADECIMIENTOS

Al concluir esta importante etapa de mi vida quiero partir agradeciendo a cada docente que estuvo presente en mi formación, a todas las personas que hicieron posible este gran desafío. Esta mención en especial para mis padres y hermana por el apoyo incondicional, sin duda fueron un pilar fundamental.

Eterna gratitud a nuestra Universidad De Concepción por todo el aprendizaje obtenido y herramientas que son la base de mi formación profesional, mi agradecimiento a toda la comisión de profesores guía, jefe de carrera por la comprensión y sugerencias en cada minuto.

Gracias infinitas.

ÍNDICE DE MATERIAS

Página

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. Objetivo general	7
2.2. Objetivos específicos.....	7
3. MARCO TEÓRICO	8
3.1. Calidad del agua.....	8
3.2. Factores geológicos que influyen en la calidad del agua	8
3.3. Guías y Normativa Nacional de Calidad de Agua	11
3.3.1. Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental	11
3.3.2. Norma NCh 409 del 2005 – Agua Potable:	12
3.3.3. Norma NCh 1333 de 1978/1987 - Norma chilena sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos:	14
3.4. Normativas Internacionales de Calidad de Agua.....	15
3.4.1. Normativa Canadiense para Calidad de Agua (CCME).....	15
3.4.2. Normativa Mexicana para calidad de Aguas	15
3.4.3. Normativa Francesa para Calidad de Aguas:.....	15
3.5. Clasificación de calidad del ICA	16
4. METODOLOGÍA	18
4.1. Sitio de estudio	18
4.2. Análisis de datos	19

4.3. Índice de Calidad de Agua (ICA)	21
4.4. Normalización de parámetros.....	22
4.4.1. Parámetros Generales	23
4.4.2. Parámetros Complementarios	26
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
6. CONCLUSIÓN	37
7. LITERATURA CITADA.....	39
8. ANEXO.....	411
8.1. Normativas	411

ÍNDICE DE TABLAS

En el texto	Página
Tabla 1. Ponderación de parámetros generales y complementarios en el índice de calidad de aguas.....	20
Tabla 2. Valores asignados para la normalización.	22
Tabla 3. Normalización para Oxígeno Disuelto.	23
Tabla 4. Normalización para conductividad eléctrica.....	23
Tabla 5. Normalización de pH.....	25
Tabla 6. Normalización para DQO.....	26
Tabla 7. Normalización de parámetros complementarios.....	26
Tabla 8. N° de estaciones con parámetros fuera de rango según la NCH 1333 y 409.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio (Datum WGS84).	18
Figura 2. Curva para normalización de pH, desarrollada por NSF.	24
Figura 3. Parámetros generales, según índices de calidad de aguas.	28
Figura 4. Parámetros complementarios, según índices de calidad de aguas.	29
Figura 5. Parámetros complementarios, según índices de calidad de aguas.	31
Figura 6. Parámetros complementarios, según índices de calidad de aguas.	32
Figura 7. Mapa minero de Chile (ubicación referencial), CIREN.	35
Figura 8. Índices de calidad de aguas (ICA) para las estaciones de monitoreo DGA, en las regiones de Atacama y Coquimbo.	36
Figura 9. Parámetros según normativa francesa.	41
Figura 10. Parámetros según normativa canadiense.	42

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Índice de Calidad de Aguas	21

ANÁLISIS DE DATOS DE CALIDAD DE AGUA PARA LA ZONA NORTE DE CHILE

WATER QUALITY DATA ANALYSIS FOR NORTHERN CHILE

Palabras Clave: Calidad de Aguas, Superficial, Subterránea, NCH N°1333, y 409.

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas en las regiones de Atacama y Coquimbo, utilizando datos proporcionados por las estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) entre 2004 y 2024. Para ello, se aplicaron las normas chilenas NCh 1333 y NCh 409/1, referidas a los usos en riego y consumo humano, complementadas con normativa internacional en los casos no regulados.

El análisis se basó en la normalización de los parámetros fisicoquímicos disponibles en cada estación de monitoreo. Estos valores fueron luego incorporados en la fórmula del Índice de Calidad del Agua (ICA), lo que permitió clasificar el estado general del recurso hídrico en ambas regiones.

Los resultados indican que la Región de Coquimbo presenta un mayor número de estaciones con parámetros que exceden los límites normativos, tanto en aguas superficiales como subterráneas. Esta condición se asocia a la influencia de factores geológicos naturales y a los impactos generados por la actividad minera. En la Región de Atacama, se observa una situación similar.

De acuerdo con SERNAGEOMIN (2023), esta región concentra el 22,7 % de la superficie nacional de concesiones mineras y más de 3.100 faenas activas, en comparación con las 980 registradas en Coquimbo.

El análisis conjunto de ambas regiones permite concluir que la calidad de las aguas superficiales y subterráneas está determinada por una combinación de factores naturales, como la geología local, y por actividades antrópicas, especialmente la minería. En particular, las estaciones de monitoreo ubicadas en las proximidades de explotaciones mineras presentan los niveles más altos de alteración, lo que evidencia una relación directa entre la presión minera y el deterioro de la calidad del recurso hídrico.

WATER QUALITY DATA ANALYSIS FOR NORTHERN CHILE

Keywords: Water Quality, Surface, Underground, NCH N°1333, y 409.

ABSTRACT

This research aimed to assess the quality of surface and groundwater in the regions of Atacama and Coquimbo, using data provided by monitoring stations of the General Water Directorate (DGA) between 2004 and 2024. For this purpose, Chilean standards NCh 1333 and NCh 409/1 related to irrigation and human consumption, respectively were applied, supplemented by international regulations in cases not covered by national legislation.

The analysis was based on the normalization of the physicochemical parameters available at each monitoring station. These values were then incorporated into the Water Quality Index (WQI) formula, allowing for a general classification of water quality in both regions.

The results indicate that the Coquimbo Region has a greater number of stations with parameters exceeding regulatory limits, in both surface and groundwater. This condition is linked to the influence of natural geological factors as well as the impacts of mining activity. A similar situation was observed in the Atacama Region. According to SERNAGEOMIN (2023), Atacama accounts for 22.7% of the national surface area under mining concessions and more than 3,100 active mining operations, compared to 980 registered in Coquimbo.

The joint analysis of both regions leads to the conclusion that the quality of surface and groundwater is determined by a combination of natural factors such as local geology and anthropogenic activities, especially mining. Monitoring stations located near mining operations show the highest levels of alteration, evidencing a direct relationship between mining pressure and the degradation of water quality.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para la vida y para el desarrollo sostenible de la agricultura en Chile, donde su disponibilidad y calidad varían significativamente a lo largo del territorio. Esto plantea importantes desafíos para los agricultores, quienes deben optimizar la gestión de recursos bajo condiciones muchas veces limitantes. Se espera que la población mundial alcance los 9.700 millones de personas para 2050, lo que incrementará en más de un 50% la demanda de alimentos (FAO, 2009). Este escenario exige no solo intensificar la producción agrícola, sino hacerlo de manera sustentable, enfrentando limitaciones de suelos, agua y los efectos del cambio climático (Domínguez et al., 2019).

Por otro lado, las características del agua potable dependen en gran medida de la fuente de abastecimiento de donde se extrae, y esto hace que la percepción que tienen las personas varíe a lo largo del territorio nacional. Por ejemplo, el agua potable producida a partir de fuentes subterráneas, como pozos o sondajes que abastecen gran parte de la zona centro norte del país, contiene más sales minerales (principalmente de calcio) y se dice que es más “dura”. Por otra parte, el agua superficial, proveniente de lagos y ríos, es considerada más “blanda” (Andess Chile, 2024).

En las regiones de Atacama y Coquimbo, el contexto ambiental está marcado por características climáticas extremas que influyen significativamente en la disponibilidad y calidad del agua. Atacama alberga el desierto más árido del

mundo, donde las precipitaciones son extremadamente escasas y las temperaturas pueden oscilar drásticamente entre el día y la noche, la aridez extrema de esta región impone una presión constante sobre los recursos hídricos, que son esenciales para las actividades mineras y para las pequeñas comunidades agrícolas que subsisten en condiciones difíciles (Zanetta, Hepp, & Machuca, 2017). Por otro lado, Coquimbo con su clima semiárido, experimenta veranos calurosos e inviernos suaves, con precipitaciones irregulares y concentradas en pocos meses del año, esta variabilidad climática crea desafíos para la recarga de acuíferos y la gestión de embalses, que son vitales para la agricultura y el abastecimiento humano (Filipp, 2010).

Este estudio tiene como objetivo identificar los factores clave que influyen en la calidad del agua en la zona norte de Chile, enfocándose en las regiones de Atacama y Coquimbo. Para ello, se realizará la recopilación y análisis de datos históricos y actuales, evaluando los parámetros de calidad del agua en función de los estándares establecidos en las normativas chilenas vigentes, como la NCh 409/1 y la NCh 1333/78.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Identificar los parámetros críticos de calidad del agua, según las normas chilenas N° 1.333 y N° 409, a partir del análisis de datos en las regiones de Atacama y Coquimbo.

2.2. Objetivos específicos

- Recopilar información sobre la calidad del agua a partir de diversas fuentes, incluyendo registros oficiales de la Dirección General de Aguas (DGA), datos proporcionados por empresas sanitarias, informes técnicos y monitoreos realizados por organismos regionales o privados.
- Realizar un análisis estadístico, utilizando los índices de calidad del agua desarrollados a partir de escenarios hídricos proyectados para el año 2030 en Chile.
- Identificar parámetros críticos que puedan limitar el uso del agua tanto para riego como para consumo humano, evaluándolos en función de las normativas chilenas N° 1.333 (calidad del agua para riego) y N° 409 (calidad del agua para consumo humano).

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Calidad del agua

La calidad del agua es un recurso esencial para el desarrollo sostenible, impactando directamente la salud humana, la biodiversidad y la economía regional. En las regiones de Antofagasta y Coquimbo, este aspecto adquiere particular relevancia debido a las condiciones ambientales y las actividades antropogénicas predominantes en cada territorio (Ministerio del Medio Ambiente, 2018).

Es por esto, que, la preservación y mejora de la calidad del agua en ambas regiones es fundamental para garantizar el bienestar socioeconómico y ambiental. La implementación de políticas de gestión basadas en criterios científicos y normativos se revela como una estrategia indispensable para asegurar la sustentabilidad de este recurso vital, permitiendo su uso adecuado y eficiente en un contexto de creciente presión antropogénica y variabilidad climática (Ministerio del Medio Ambiente, 2018; Sánchez et al., 2018).

3.2. Factores geológicos que influyen en la calidad del agua

La geología de las regiones de Coquimbo y Atacama influye significativamente en la calidad de sus aguas. En Coquimbo, la presencia de rocas sedimentarias y metamórficas, junto con antecedentes de actividad volcánica, determina en gran parte la composición mineral del agua subterránea. Además, la región sufre procesos de erosión y lixiviación de minerales, especialmente en áreas

con actividad minera, lo que contribuye a una mayor concentración de metales pesados en el recurso hídrico. Por otra parte, el clima semiárido, caracterizado por precipitaciones irregulares y temporadas secas prolongadas, afecta los niveles de recarga de los acuíferos e incide directamente en la concentración de estos elementos (Dirección General de Aguas [DGA], 2016).

En la Región de Atacama, donde se ubica el desierto más árido del mundo, las formaciones rocosas son ricas en minerales como cobre y litio, los cuales influyen tanto en la calidad del agua subterránea como superficial. Las actividades mineras intensivas en esta zona contribuyen a la contaminación con metales pesados y residuos industriales. A su vez, la baja recarga de acuíferos, debido a la escasez de precipitaciones, exacerba los problemas de calidad del agua. La falta de vegetación y las fluctuaciones térmicas también reducen la capacidad natural de filtración del suelo, aumentando su vulnerabilidad a la contaminación (DGA, 2018).

Según datos del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2023), el 22,7% de la superficie nacional destinada a explotación minera se ubica en Atacama, posicionándola como la segunda región con mayor cantidad de concesiones, después de Antofagasta. Por su parte, la Región de Coquimbo concentra un 10,4% de la superficie nacional de concesiones de explotación, siendo también una zona de relevancia minera.

En ambas regiones se encuentran importantes menas primarias, entre ellas: plata (Ag), cobre (Cu), plomo (Pb), oro (Au), cobalto (Co), hierro (Fe), manganeso (Mn), wolframio (W o tungsteno), zinc (Zn) y titanio (Ti). En cuanto

a menas secundarias, estas incluyen vanadio (V), molibdeno (Mo), mercurio (Hg), además de algunos elementos ya mencionados. Debido a esta alta presencia de minerales metálicos, es esperable que los parámetros químicos del agua en dichas regiones presenten concentraciones relativamente elevadas.

Uno de los principales problemas ambientales asociados a las ciudades mineras es la exposición crónica de la población a metales pesados, los cuales pueden estar presentes en el aire, suelo y agua. Un estudio desarrollado por el Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) de la Pontificia Universidad Católica de Chile y la Universidad de Concepción alertó sobre altos niveles de mercurio, arsénico, cobre y plomo en los suelos de zonas urbanas cercanas a faenas mineras (Silva, 2022).

3.3. Guías y Normativa Nacional de Calidad de Agua

3.3.1. Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental

Con el propósito de conservar y proteger los ecosistemas acuáticos en Chile, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) ha impulsado una regulación que establece estándares de calidad para las aguas en el territorio nacional. Esta normativa, fundamentada en criterios científico-técnicos reconocidos tanto a nivel nacional como internacional, tiene como objetivo principal facilitar el mantenimiento y la recuperación de los ecosistemas acuáticos. En este marco, se definen cuatro categorías de calidad del agua, que van desde la clase "excepcional" hasta la "insuficiente". Dichas clasificaciones permiten evaluar el estado de las aguas superficiales y, en función de los resultados obtenidos, determinar el uso más adecuado para cada cuerpo de agua.

- Excelente: Estado natural o muy similar al natural de la cuenca o el cuerpo de agua marina, asegura la preservación de las especies más sensibles, reproducción de peces sensibles, alta saturación de oxígeno, apta para fuente de agua potable
- Bueno: Óptima para la protección y conservación de ecosistema acuáticos, alta biodiversidad con una gran densidad, siempre una buena concentración de oxígeno, escasa carga orgánica, estado oligotrófico

- Regular: Disminución de biodiversidad, tendencia al aumento del estado trófico (mayor abundancia de macrófitas, aumento de turbiedad, etc.), gran diversidad de peces, pero no apta para peces sensibles, oxígeno se reduce respecto de clases anteriores (cargas orgánicas, algas), estado mesotrófico
- Mala: Condición crítica para el ecosistema acuático, daños en su estructura y función (mortalidad $\geq 50\%$ del ecosistema acuático), muy pocas especies tolerantes con abundancia muy alta, especies sensibles desaparecen, mortalidad masiva de peces, concentraciones ambientalmente inaceptables, estado eutrófico
- Muy mala: Intoxicaciones, aparición de cianobacterias tóxicas, peces desaparecen, pérdida de biodiversidad, concentraciones ambientalmente inaceptables, muy poco oxígeno, alta turbiedad, estado hipertrófico

3.3.2. Norma NCh 409 del 2005 – Agua Potable:

La norma NCh 409 establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio nacional.

Los parámetros para definir y algunos ejemplos de los requisitos de calidad se han agrupado en los tipos siguientes:

Tipo I: Parámetros microbiológicos y de turbiedad.

- Coliformes totales: Máximo 3 NMP/100 mL en el sistema de distribución.
- Escherichia coli (E. coli): Ausencia en 100 mL de muestra.
- Turbiedad: Máximo 2 NTU en el agua distribuida.

Tipo II: Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud.

- Arsénico (As): Máximo 0,01 mg/L.
- Plomo (Pb): Máximo 0,01 mg/L.
- Nitratos (NO_3^-) expresados como N: Máximo 10 mg/L.
- Fluoruros (F^-): Máximo 1,5 mg/L.

Tipo III: Elementos radioactivos.

- Radiación alfa total: Máximo 0,5 Bq/L.
- Radiación beta total: Máximo 1,0 Bq/L.

Tipo IV: Parámetros relativos a las características organolépticas.

- Color aparente: Máximo 15 unidades de color verdadero (UCV).
- Olor y sabor: No deben presentar características objetables.
- pH: Rango aceptable entre 6,5 y 8,5.

Tipo V: Parámetros de desinfección.

- Cloro residual libre: Entre 0,2 y 2,0 mg/L en la red de distribución.
- Trihalometanos totales (subproductos de desinfección): Máximo 0,1 mg/L.

3.3.3. Norma NCh 1333 de 1978/1987 - Norma chilena sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos:

La norma NCh 1333 fija un criterio de calidad del agua de acuerdo con requerimientos científicos referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos, según su uso determinado.

Estos criterios tienen por objetivo proteger y perseverar la calidad de las aguas que se destinen a usos específicos de la degradación producida por contaminación con residuos de cualquier tipo u origen.

Aplicaciones de la norma:

- Agua para consumo humano
- Agua para bebida de animales
- Riego
- Recreación y estética
- Vida acuática

3.4. Normativas Internacionales de Calidad de Agua

3.4.1. Normativa Canadiense para Calidad de Agua (CCME)

La normativa canadiense "*Canadian Environmental Quality Guidelines*" especifica los valores de referencia para aguas superficiales para distintos parámetros de acuerdo con los distintos usos, incluyendo agricultura, salud humana y protección de vida acuática y ecosistemas. Es importante destacar que se consideró esta normativa por ser una de las más utilizadas y validadas a nivel internacional.

3.4.2. Normativa Mexicana para calidad de Aguas

Se utilizó la normativa mexicana para calidad de aguas (León, 1998) exclusivamente para definir las clases en lo concerniente al parámetro DQO, ya que este último no se considera en las normativas nacionales ni en la mayoría de las internacionales utilizadas.

3.4.3. Normativa Francesa para Calidad de Aguas:

La normativa francesa, al igual que la canadiense hace una clasificación de los parámetros diferenciando el uso. Se utilizó esta normativa para complementar la norma, específicamente en referencia al parámetro pH, y complementar lo establecido por la normativa mexicana en el parámetro DQO.

3.5. Clasificación de calidad del ICA

El índice en este estudio define categorías de calidad del agua y establece rangos de valores vinculados a los posibles usos del recurso. Los valores que definen cada clase se compararon con normativas tanto nacionales como internacionales, garantizando así una evaluación precisa y estandarizada, conforme a los criterios exigidos.

- *Clase Excepcional:*

Esta clase corresponde a la categoría más estricta de calidad de agua que entrega el índice, ya que estas últimas se enfocan en la protección de vida acuática y ecosistemas. La selección de esta clase de acuerdo con las normas anteriores se realiza a partir de la comparación de los valores límites para los distintos parámetros que considera, y por su coincidencia con aquellos presentados por otras normativas, principalmente internacionales, que están enfocadas en el mismo objetivo de protección.

- *Clase Buena:*

Esta clase está referida principalmente al uso aplicable a riego. La selección de esta clase se realiza a partir de la comparación de los valores límites para los distintos parámetros que considera, y por su coincidencia con las normativas canadiense y francesa para agua de riego y agricultura.

- *Clase Regular:*

Esta clase define los estándares para aguas de uso recreativo, bebida de animales y riego restringido. De la misma manera que para las clases anteriores, se realiza a partir de la comparación de los valores límites para los distintos parámetros que considera, y por su coincidencia con normativa francesa para bebida de animales. Cabe destacar, que esta clase presenta valores límite levemente superiores a los de la NCh 409. Como se mencionó anteriormente, si bien la Clase Regular es menos estricta que la norma para agua potable, todas aquellas clases a partir de esta, incluyendo las Clases Buena y Excepcional, se consideran como agua potabilizable mediante un tratamiento simple.

- *Clase Insuficiente:*

Esta clase comprende las aguas que exceden los límites establecidos, en general, no adecuada para conservación de comunidades acuáticas o su aprovechamiento para los usos prioritarios sin un tratamiento específico.

4. METODOLOGÍA

4.1. Sitio de estudio

El estudio se centró en la calidad de aguas de la zona norte de Chile, específicamente en las regiones de Atacama y Coquimbo.

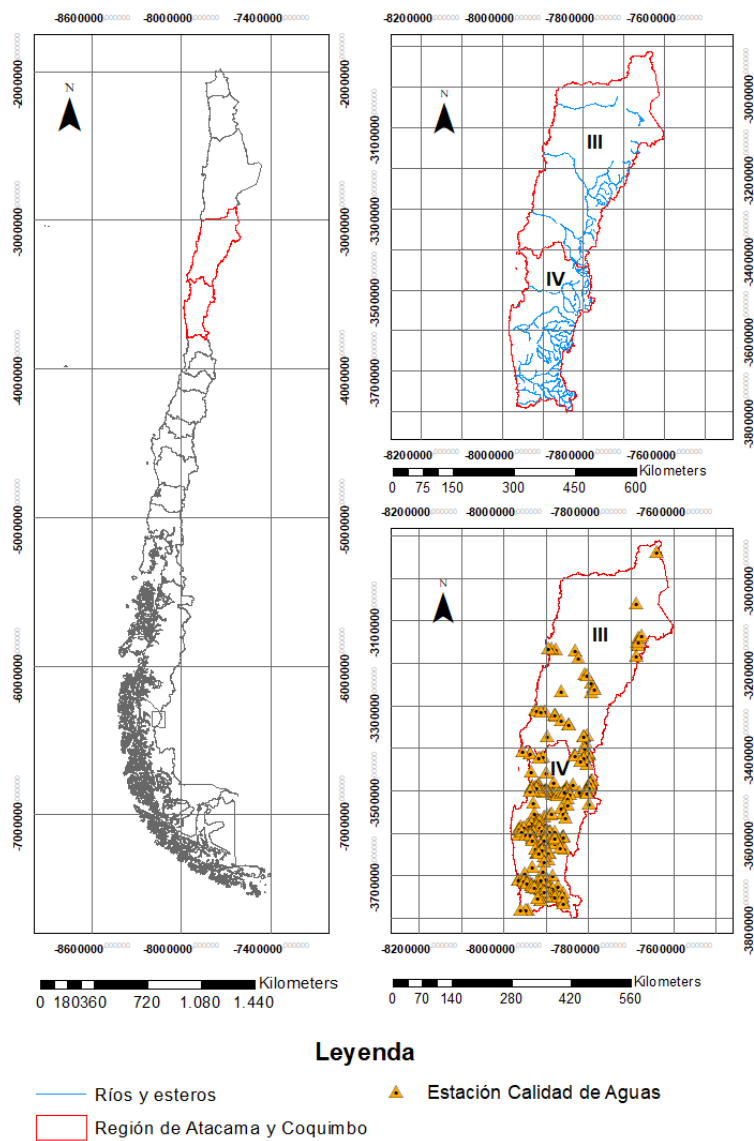


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio (Datum WGS84). Fuente: Elaboración propia.

4.2. Análisis de datos

El presente estudio se fundamenta en la recopilación de información proveniente de diversas fuentes, tanto públicas como privadas. Se analizaron datos obtenidos de las estaciones de monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA).

Con base en esta información, se definieron los parámetros generales del índice, los cuales incluyen oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, DQO y pH.

Estos parámetros entregan información importante relativa a la calidad del agua y, además, son monitoreados en todas las estaciones de calidad de la DGA. Los parámetros generales tienen una ponderación igual al 49% del total del índice, mientras que el 51% restante corresponde a los parámetros complementarios.

Los parámetros complementarios se refieren a aquellos parámetros que más pueden afectar la calidad del agua. Lo anterior podría en algunos casos permitir identificar el origen de la anomalía. Para determinar qué parámetros se clasificarían como complementarios, se analizaron las bases de datos de los monitoreos que realiza la DGA a nivel regional, se identificaron aquellos que son medidos en la mayoría de las estaciones y que además tienen una representatividad temporal. Los parámetros medidos por las estaciones de la DGA fueron comparados con aquellos propuestos por las distintas normativas mencionadas anteriormente para la protección de vida acuática y ecosistemas, y uso agrícola.

Además, se incluyen los parámetros nitrato y nitrito por ser parámetros comúnmente considerados en los índices de calidad de agua internacionales, debido a su importancia para la identificación de contaminación derivada de la agricultura.

Tabla 1. Ponderación de parámetros generales y complementarios en el índice de calidad de aguas.

	Parámetros	Ponderación
Generales	Oxígeno disuelto	49%
	pH	
	Conductividad eléctrica	
	Demanda Química de Oxígeno	
Complementarios	Arsénico	51%
	Cadmio	
	Cianuro	
	Cromo VI	
	Cobalto	
	Cobre	
	Mercurio	
	Molibdeno	
	Níquel	
	Nitrato	
	Nitrito	
	Plata	
Plomo		
Selenio		

4.3. Índice de Calidad de Agua (ICA)

El índice propuesto se fundamenta en el análisis de datos obtenidos de diversas estaciones de la DGA, que en su mayoría registran datos anuales. Sin embargo, se ha identificado que algunos conjuntos de datos presentan información incompleta, y ciertas estaciones han suministrado únicamente registros temporales, lo cual dificulta el seguimiento continuo. Ante esta situación, se plantea evaluar la información en períodos específicos (por ejemplo, de un año a otro), lo que permitirá obtener resultados más representativos al analizar tendencias y patrones.

En este contexto, Girardi et al. (2018) proponen una metodología para evaluar la calidad de aguas que, al igual que los índices nacionales de referencia, distingue dos clases de parámetros. Por un lado, se consideran cuatro parámetros generales, los cuales proporcionan una visión integral de la calidad del agua y se miden de manera sistemática en todas las estaciones en línea de la DGA. Por otro lado, se incluyen parámetros complementarios, que aportan información adicional para un análisis más detallado.

El índice de calidad de agua propuesto, al igual que el ICA NSF, queda definido por la siguiente ecuación:

$$ICA = W_{pg} \cdot \max(Q_{ipg}) + W_{pc} \cdot \max(Q_{ipc}) \quad [1]$$

Dónde:

W_{pg} = Peso asignado a los parámetros generales ($W_{pg} = 0.49$)

W_{pc} = Peso asignado a los parámetros complementarios ($W_{pc} = 0.51$)

$max(Q_i)$ = máximo valor normalizado de los parámetros o generales (pg) o complementarios (pc).

4.4. Normalización de parámetros

Para valorar y comparar los parámetros generales y complementarios de un cuerpo de agua, es esencial contar con una escala normalizada que permita integrarlos en un índice final. En este sentido, cada parámetro, independientemente de su unidad de medida original, se transforma a una escala común. La escala utilizada y los valores asignados a cada clase (Q_i) se detallan en la Tabla 1. De esta forma, se asigna el valor 1 al rango óptimo (Clase Excepcional), el valor 2 a la Clase Buena, el valor 3 a la Clase Regular y, finalmente, el valor 4 a la Clase Insuficiente. Los criterios para definir cada categoría se fundamentan en los estándares establecidos por Girardi et al. (2018) para la clasificación de la calidad del agua.

Tabla 2. Valores asignados para la normalización.

Clase	Valor asignado al parámetro (Q_i)
Excepcional	1
Buena	2
Regular	3
Insuficiente	4

4.4.1. Parámetros Generales

i. Oxígeno Disuelto (OD)

La normalización del oxígeno disuelto se realiza tomando como referencia los valores entregados en la guía de calidad de aguas del Ministerio del Medio Ambiente (Tabla 3).

Tabla 3. Normalización para Oxígeno Disuelto.

Parámetro	Unidad	Clasificación Qi			
		1	2	3	4
Oxígeno disuelto	mg/L	>7,5	5,5<OD ≤ 7,5	5,0<OD ≤ 5,5	<5

ii. Conductividad

Al igual que con el oxígeno disuelto, se utilizó como rango de clasificación para la conductividad el rango establecido por la guía de calidad de aguas del Ministerio del Medio Ambiente (Tabla 4).

Tabla 4. Normalización para conductividad eléctrica.

Parámetro	Unidad	Clasificación Qi			
		1	2	3	4
CE	μS/cm	>600	750	1500	2250

iii. pH

La metodología utilizada para los parámetros mencionados, conforme a la guía de calidad de aguas del Ministerio de Medio Ambiente, no permite diferenciar clases con relación al pH, ya que asigna un rango uniforme para este parámetro. En este contexto, los valores de Qi se determinan a partir de gráficas estandarizadas (Figura 2), en las cuales se especifican los valores máximos y mínimos permitidos para cada parámetro según su clase. Este método es el recomendado por la NSF (Fundación Nacional de Saneamiento de Estados Unidos).

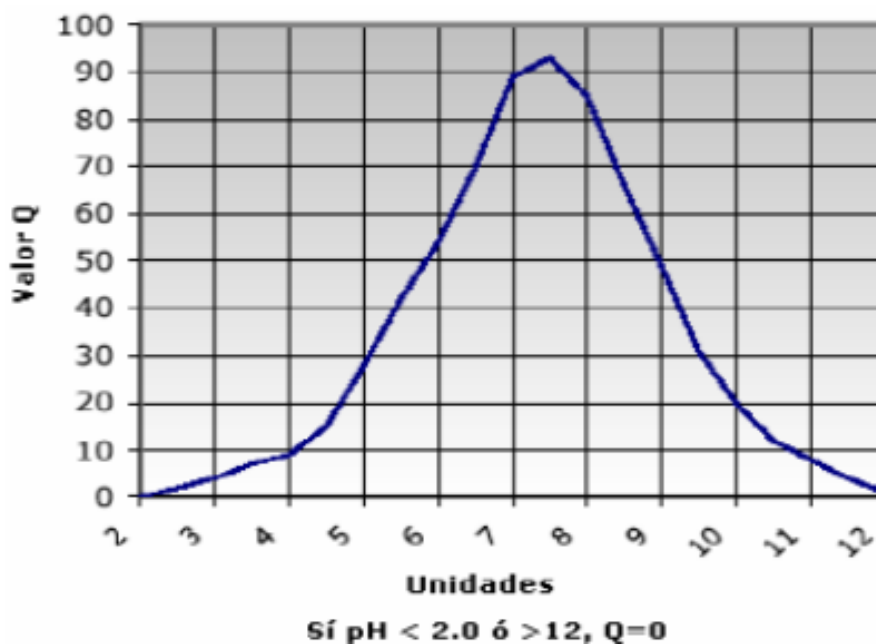


Figura 2. Curva para normalización de pH, desarrollada por NSF.

En la Tabla 5 se presentan los valores que definen las Qi de acuerdo con la metodología de la NSF antes descrita.

Tabla 5. Normalización de pH.

Parámetro	Unidad	Clasificación Qi			
		1	2	3	4
pH	-	$6,5 \leq \text{pH} \leq 8,2$	$6,0 \leq \text{pH} \leq 6,5$	$5,5 \leq \text{pH} \leq 6,0$	$< 5,5$
			$8,2 < \text{pH} \leq 9,0$	$9,0 < \text{pH} \leq 9,5$	$> 9,5$

iv. DQO

En general las normativas y metodologías estudiadas consideran en los índices que proponen el parámetro DBO como parámetro fundamental. Sin embargo, este parámetro no pudo ser incluido en el índice propuesto ya que éste no es medido en las estaciones de monitoreo en línea de la DGA. En este contexto, Girardi et al. (2018) proponen incorporar la DQO, que corresponde a un indicador indirecto de la cantidad de materia orgánica que presenta el agua y que sí es medido por la DGA. Es importante resaltar que la DQO representa la demanda de oxígeno necesaria para oxidar los compuestos orgánicos e inorgánicos. Dado que en Chile este parámetro no se encuentra normado, se recurrió a normativas internacionales para los distintos usos previamente mencionados, en particular a la norma de calidad de agua mexicana y a la norma de calidad de agua de Francia. En la Tabla 6 se detallan los valores de Qi correspondientes a los distintos rangos de DQO.

Tabla 6. Normalización para DQO.

Parámetro	Unidad	Clasificación Qi			
		1	2	3	4
DQO	mg/L	≤10	10<DQO ≤ 20	20<DQO<40	≥ 40

4.4.2. Parámetros Complementarios

Los parámetros complementarios, como se mencionó anteriormente, hacen referencia a 14 parámetros que mide DGA, dentro de los cuales 6 son considerados como críticos por su riesgo comprobado de desarrollar cáncer en animales y/o humanos. Los valores que definen cada clase para cada parámetro provienen de las normas secundarias generales de calidad (Ministerio de Medio Ambiente, 2018).

A estos parámetros le asigna un valor de Qi de 1 a 4 para ser ingresado al ICAS (Tabla 7). En los casos donde el valor de dos clases tiene como límite el mismo valor (por ejemplo, el arsénico en las clases 2 y 3), el valor del ICAS tomará el valor de la clasificación con peor calidad.

Tabla 7. Normalización de parámetros complementarios.

Parámetro	Unidad	Rangos de concentración definidos para cada Qi			
		1	2	3	4
Arsénico	mg/L	<0,04	0,1	0,1	>0,1
Cadmio	mg/L	<0,0018	0,01	0,01	>0,01
Cianuro	mg/L	<0,004	0,01	0,05	>0,05
Cromo VI	mg/L	0,008	0,1	0,1	>0,1
Cobalto	mg/L	≤0,0025	0,05	1	>1
Cobre	mg/L	<0,0072	0,2	1	>1
Mercurio	mg/L	<0,00004	0,00005	0,001	>0,001
Molibdeno	mg/L	<0,008	0,15	0,5	>0,5

Continuación tabla anterior

Níquel	mg/L	<0,042	0,2	0,2	>0,2
Nitrato	mg/L	≤13	13	50	>50
Nitrito	mg/L	<0,05	>0,06	>0,06	>0,06
Plata	mg/L	≤0,00025	0,01	0,2	>0,2
Plomo	mg/L	<0,002	0,2	5	>5
Selenio	mg/L	0,004	0,02	0,05	>0,05

(*) Color rojo indica valores críticos por su riesgo de cáncer en humanos y animales.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de 5.186 lecturas realizadas en 250 estaciones de muestreo en los últimos veinte años (2004-2024). De ese total, el 72% (equivalente a 3.742 lecturas) contaba con los parámetros mínimos necesarios para calcular el Índice de Calidad de Aguas (ICA). Por el contrario, en las 1.444 lecturas restantes no fue posible aplicar la fórmula, ya que faltaba uno o más de los parámetros generales requeridos para su cálculo.

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros de calidad aguas para ambas regiones.

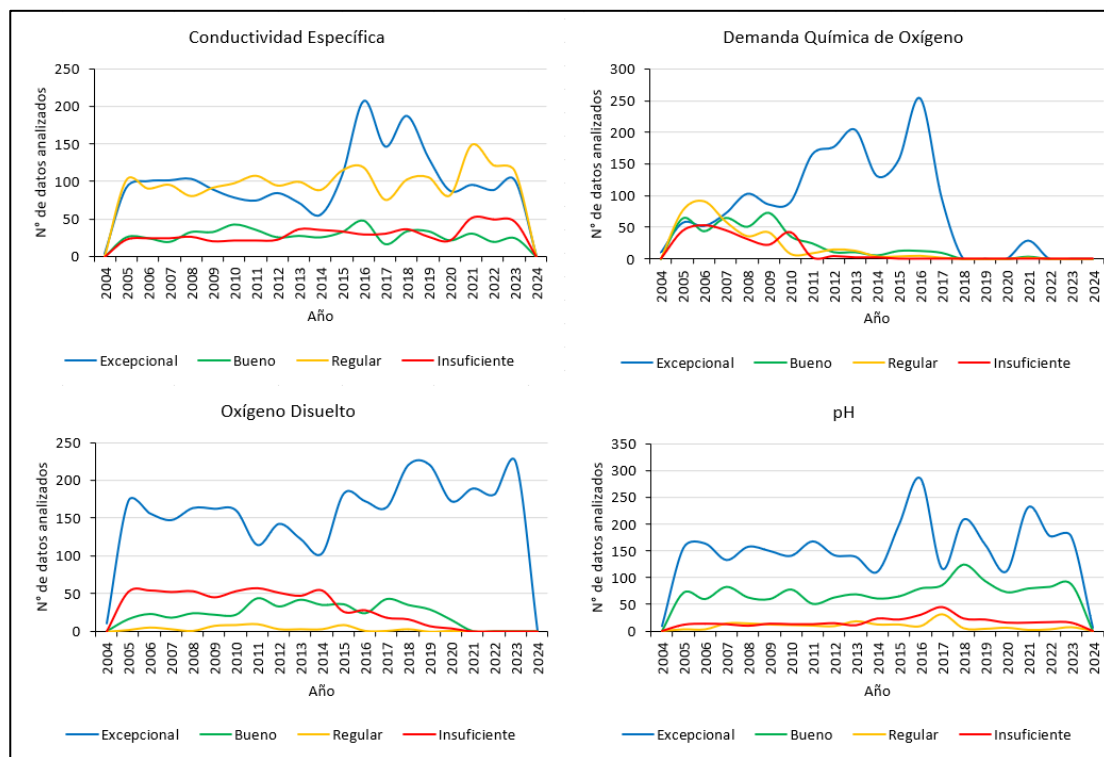


Figura 3. Parámetros generales, según índices de calidad de aguas.
Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los resultados de los parámetros generales presentados en la Figura 3, se observa que la mayoría de los datos obtenidos en las estaciones de monitoreo se ubican dentro de la categoría de calidad excepcional, es decir, dentro de rangos óptimos conforme a la normalización aplicada. En cuanto a la conductividad específica, los datos de las estaciones se distribuyen de manera similar entre las categorías excepcional y regular, y un porcentaje menor de estaciones clasificadas con calidad insuficiente.

Respecto al pH, los datos muestran una tendencia constante a lo largo del tiempo, concentrándose principalmente en las categorías excepcional y

bueno, lo que indica una estabilidad en las condiciones ácido-básicas del agua en las estaciones monitoreadas. Por otro lado, en el oxígeno disuelto, se observa una mejora a partir del año 2014, junto con una disminución sostenida del número de estaciones con calidad insuficiente, manteniéndose solo en la categoría excepcional a partir del 2020.

En cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO), también se evidencia una mejora generalizada en la calidad del agua al comparar con los registros iniciales de 2004. Sin embargo, a partir de 2017 - 2018, las estaciones de la DGA dejaron de registrar este parámetro, lo que impide la aplicación del Índice de Calidad del Agua (ICA).



Figura 4. Parámetros complementarios, según índices de calidad de aguas.
Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los resultados de los parámetros complementarios presentados en la Figura 4, revelan diversas tendencias en los índices de calidad del agua. En el caso del selenio, la calidad ha sido excelente, no obstante, a partir del año 2016 se observa una disminución en el número de estaciones con esta clasificación, atribuida principalmente a estaciones que dejaron de transmitir. Una situación similar se presenta con la plata, cuya calidad ha permanecido mayoritariamente en nivel bueno, aunque también con una reducción progresiva en el número de estaciones que reportan esa condición.

Respecto al nitrato, este parámetro comenzó a ser monitoreado a partir del año 2020. Desde entonces, la mayoría de las estaciones ha registrado una calidad excelente, seguida por clasificaciones en niveles bueno e insuficiente, lo que indica cierta variabilidad en su comportamiento reciente.

Por otro lado, el molibdeno ha mostrado índices más variable a lo largo del tiempo. En los primeros años, la calidad registrada correspondía principalmente a la categoría buena, sin embargo, a partir del 2016 algunas estaciones han presentado una disminución hacia valores regulares, mientras que otras han mejorado, alcanzando índices de calidad excepcionales.

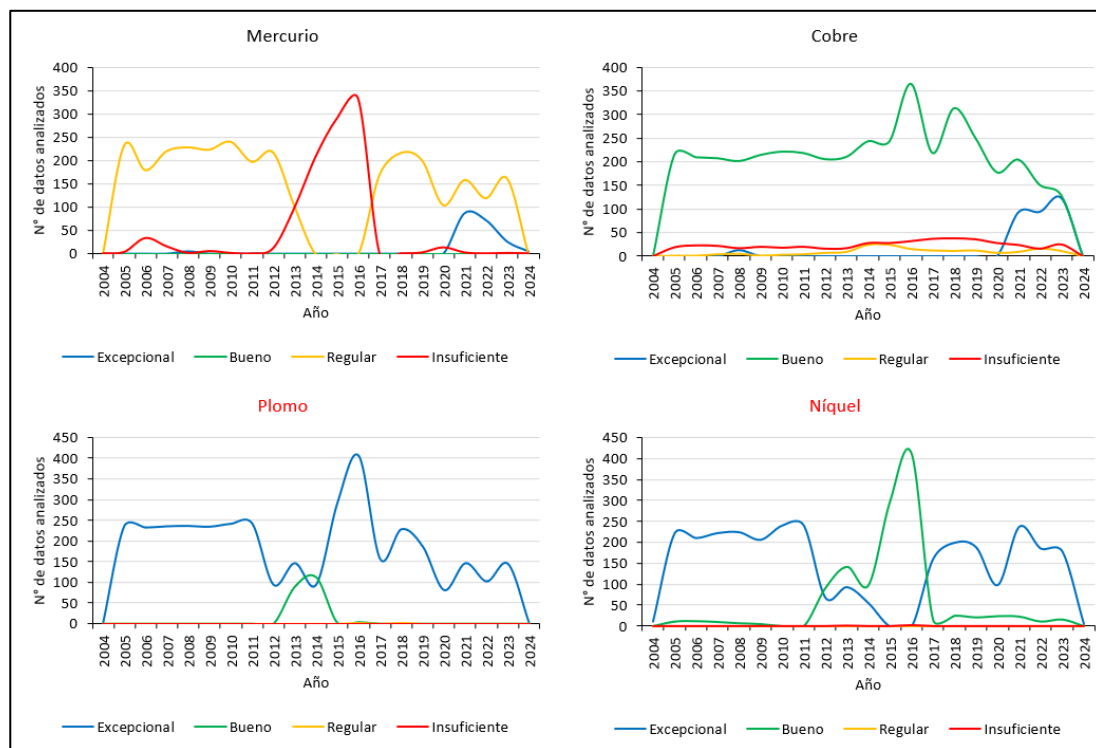


Figura 5. Parámetros complementarios, según índices de calidad de aguas.
Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los resultados de los parámetros complementarios presentados en la Figura 5, el mercurio ha mostrado una calidad regular, aunque entre los años 2012 y 2017 se registró un periodo en que varias estaciones alcanzaron niveles de calidad insuficiente, lo que sugiere una posible influencia antrópica o geológica en esas estaciones. En el caso del cobre, la calidad ha sido buena, con una tendencia a la mejora en los últimos años. No obstante, persisten algunas estaciones con índices de calidad regulares e incluso insuficientes, posiblemente asociadas a puntos que históricamente han mantenido esas condiciones. El plomo ha presentado mayormente una calidad excepcional; sin embargo, en los últimos años se ha observado una disminución en el

número de estaciones que mantienen esta clasificación. Esta reducción podría deberse a que algunas estaciones han dejado de registrar este parámetro o han quedado fuera de funcionamiento. Por su parte, el níquel ha registrado una calidad mayormente excepcional, aunque se evidenciaron descensos puntuales en los años 2011 y 2017, cuando la calidad alcanzó niveles buenos. Posteriormente, la mayoría de las estaciones recuperaron valores con niveles de calidad excelente.

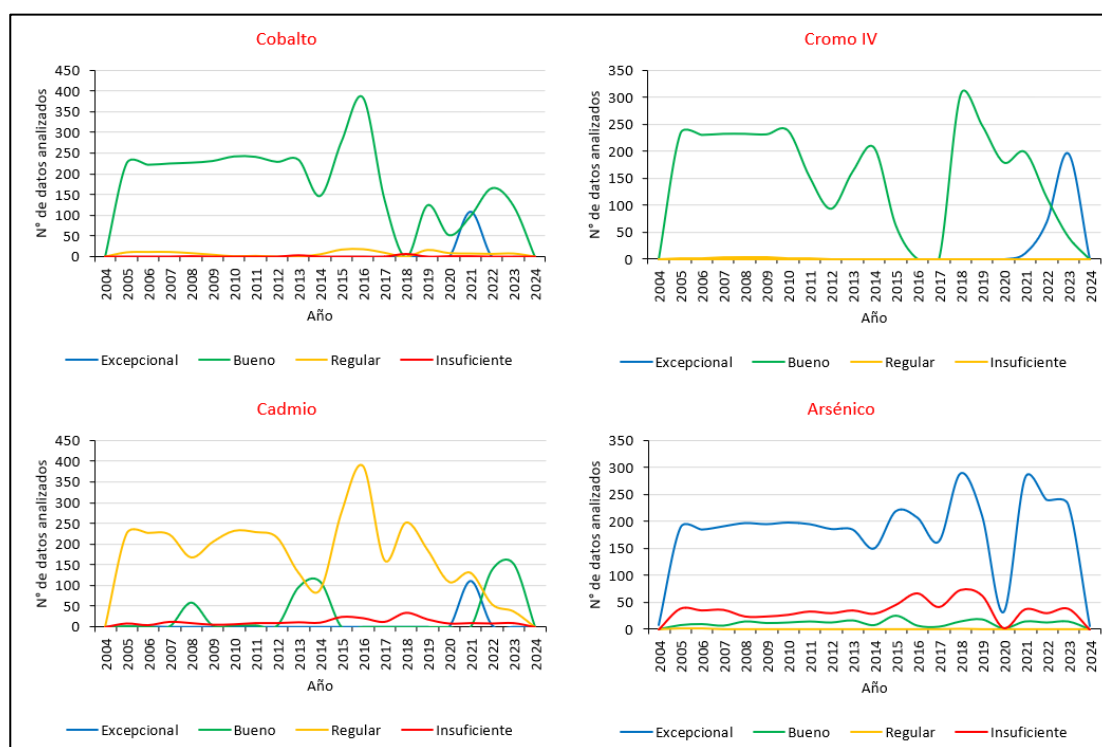


Figura 6. Parámetros complementarios, según índices de calidad de aguas.
Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los resultados de los parámetros complementarios presentados en la Figura 6, se observa que el cobalto, junto con el cromo, mantiene un índice

de calidad del agua clasificado como bueno, con una clara tendencia a mejorar hacia una calidad excepcional en los últimos años. En contraste, el cadmio presenta mayormente una calidad regular, aunque se identifican mejoras puntuales durante los años 2012-2014 y a partir del año 2020.

En cuanto al arsénico, la mayoría de las estaciones registran índices de calidad excepcional, sin embargo, otras presentan niveles que se mantienen en una categoría “insuficiente”. Además, en el año 2020 se observó una disminución considerable en el número de estaciones que reportaron este parámetro.

Tabla 8. N° de estaciones con parámetros fuera de rango según la NCH 1333 y 409.

Parámetros	N° de Estaciones fuera de NCH 1333 y 409			
	Coquimbo		Atacama	
	Pozos	Ríos	Pozos	Ríos
Arsénico	44	11	2	10
Cadmio	3	22	1	2
Cobalto		8	1	
Cobre		15		5
Mercurio	122	41	6	26
Molibdeno	10	40	6	20
Níquel		3		
Nitrato	6		1	1
Plata	39	1		
Plomo	4			2
Selenio	3	7	1	1

Fuente: Elaboración propia.

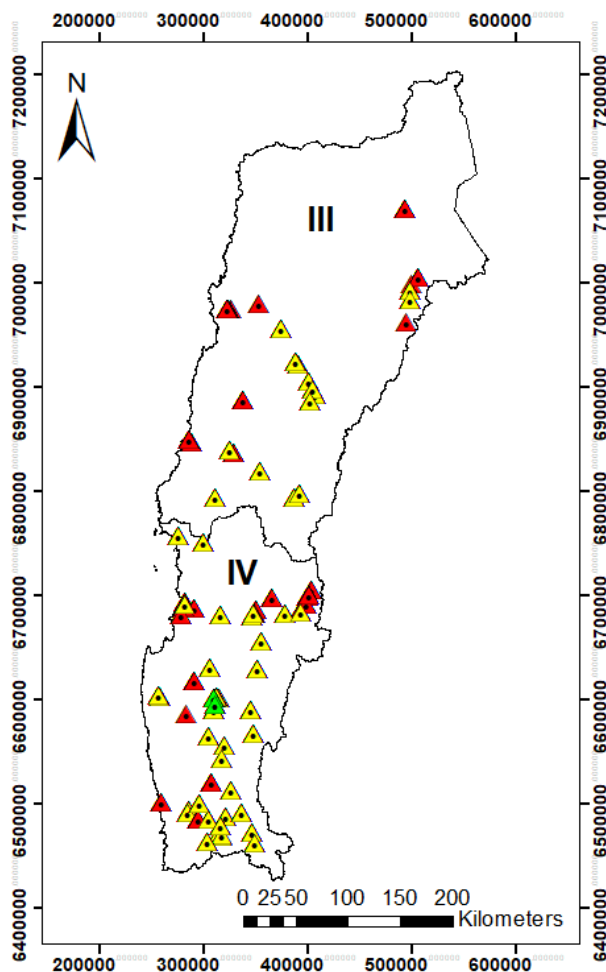
Del análisis de los resultados se observa que varios parámetros superan los límites establecidos por las normas chilenas NCh 1333 y NCh 409. Los

elementos que presentan mayores concentraciones por sobre lo permitido son el mercurio, el molibdeno, el arsénico y la plata.

Estas concentraciones elevadas pueden explicarse, en parte, por la presencia natural de estos minerales en la geología de las zonas estudiadas. No obstante, también se identificó una relación importante entre los niveles alterados y la cercanía de las estaciones de monitoreo a faenas mineras. En este contexto, datos proporcionados por SERNAGEOMIN (2011) indican que la Región de Atacama cuenta con 3.114 faenas mineras registradas, frente a las 980 de la Región de Coquimbo, lo que representa una influencia significativa sobre el sistema hidrológico. De hecho, la mayoría de los resultados fuera de norma provienen de estaciones ubicadas en las inmediaciones de explotaciones mineras, lo que sugiere una posible influencia directa los índices de calidad del agua, Figura 7 y Figura 8.



Figura 7. Mapa minero de Chile (ubicación referencial), CIREN.



Leyenda

- ▲ Bueno
- ▲ Regular
- ▲ Insuficiente
- Atacama y Coquimbo

ICA	Pozos	Rios
No Aplica	607	1882
Excepcional	0	2
Bueno	0	24
Regular	134	1114
Insuficiente	485	938

Figura 8. Índices de calidad de aguas (ICA) para las estaciones de monitoreo DGA, en las regiones de Atacama y Coquimbo.

6. CONCLUSIÓN

Los resultados indican que la Región de Coquimbo presenta un mayor número de estaciones con parámetros que exceden los límites normativos establecidos, tanto en aguas superficiales como subterráneas. Esta condición puede atribuirse a una combinación de factores naturales, relacionados con la presencia geológica de minerales metálicos, y factores antrópicos, principalmente asociados a la actividad minera. Además, el clima semiárido de la región, caracterizado por precipitaciones escasas e irregulares, limita la recarga de los acuíferos, lo que favorece la concentración de contaminantes en el agua.

En la Región de Atacama se observa una situación similar, con alteraciones en múltiples parámetros de calidad en aguas tanto superficiales como subterráneas. Esta situación está influida por una geología altamente mineralizada y por una actividad minera aún más intensa que en Coquimbo. Según datos actualizados de SERNAGEOMIN (2023), Atacama concentra el 22,7 % de la superficie nacional de concesiones mineras, con más de 3.100 faenas activas, frente a las 980 registradas en Coquimbo, lo que representa una presión significativa sobre el sistema hidrológico.

El análisis realizado en ambas regiones permite concluir que la calidad del agua en ambas regiones está influenciada tanto por factores naturales como la geología, así como también por actividades humanas, principalmente asociada a la minería. Las estaciones ubicadas en las cercanías de faenas

mineras son, en general, las que presentan mayores niveles de alteración en la calidad del agua superficial. En cuanto a las aguas subterráneas, estas muestran una calidad aceptable en la mayoría de los casos, aunque algunos pozos registran índices insuficientes, atribuibles principalmente a condiciones geológicas locales más que a contaminación directa de origen humano.

7. LITERATURA CITADA

- Andess Chile. (2020). *Calidad del agua potable en Chile*. Andes Chile. <https://www.andess.cl/calidad-del-agua-potable-en-chile/>
- Domínguez, J., Vergara, M., Aguirre, R., Barrera, D., Montero, J., Cáceres, L., Eguillor, P., Espinoza, A., García, A., Reyes, A., Pino, G., Pizarro, M., Tapia, B., Acuña, D., Laval, E., Yañez, L., Muñoz, M., Cartes, G., Contreras, P., Valdés, A., & Galán, M. (2019). *Panorama de la agricultura chilena*. ODEPA.
- Emol. (2022, 14 de noviembre). *Hallan altos niveles de mercurio en el río Copiapó: Superan hasta en 10 veces lo permitido*. <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2022/11/14/1078267/altos-niveles-mercurio-copiapo.html>
- FAO. (2009). *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*. FAO.
- García de la Fuente, C. (2013). Parámetros fisicoquímicos del agua. *Albítar: publicación veterinaria independiente*, (167), 8-9.
- Girardi, C., González, F., Jara, S., Charre, R., Elorrieta, M., Sanchis, E., Arancibia, A., & Castillo, I. (2018). *Metodología de construcción de índice de calidad para aguas superficiales*.
- Instituto Nacional de Normalización. (1978). *NCh1333.Of78 Modificada en 1987: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos*. INN. <https://www.studocu.com/cl/document/universidad-tecnica-federico-santa-maria/ingenieria-sanitaria/nch1333-1978-mod-1987/38549702>.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2005). *NCh409/1. Of2005: Agua potable - Parte 1 - Requisitos*. <https://es.scribd.com/document/422710013/NCh-409-01-2005-pdf>.
- León, L. (1998). *Índice de Calidad de Agua, Forma de estimarlos y aplicación en la Cuenca Lerma-Chapala*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Martínez, B. (2003). *Manual de buenas prácticas ambientales en canales de riego*. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/29045>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2018). *Guía de Calidad del Agua*. Ministerio del Medio Ambiente.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s.f). Índice de calidad del agua "ICA". <https://www.snet.gob.sv/Hidrologia/Documentos/calculolCA.pdf>
- SERNAGEOMIN. (2008). *Yacimientos metalíferos de la Región de Atacama* (Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos, N° 27).

SERNAGEOMIN. (2011). *Atlas de Faenas Mineras, Región de Coquimbo* (Mapas y Estadísticas de Faenas Mineras de Chile No 8).

SERNAGEOMIN. (2011). *Atlas de Faenas Mineras: Regiones de Antofagasta y Atacama*. Servicio Nacional de Geología y Minería (Mapas y Estadísticas de Faenas Mineras de Chile No 7).

SERNAGEOMIN. (2018). *Base de datos de depósitos metalíferos de la Región de Coquimbo*.

SERNAGEOMIN. (2023). *Catastro nacional de concesiones mineras*

8. ANEXO

8.1. Normativas

- Normativa Francesa de Calidad de Aguas.

Elementos o compuestos	Unidad	Muy buena	Buena	Mala
Cobre (dureza 100mg/L)	mg/L	0,5	5	
Cromo total	mg/L	0,05	1	
Hierro	mg/L			
Manganeso	mg/L			
Magnesio				
Selenio	mg/L	0,01	0,05	
Zinc (dureza 100mg/L)	mg/L	5	50	
Arsénico	mg/L	0,05	0,5	
Cadmio (dureza 100mg/L)	mg/L	0,005	0,02	
Cianuro	mg/L			
Mercurio	mg/L	0,001	0,003	
Nitrato		50	450	
Nitrito	mg/L	0,1	30	
Razón nitrato + nitrito				
Plomo (dureza 100mg/L)	mg/L	0,05	0,1	
Cloruro	mg/L			
pH	Rango			
Sulfato	mg/L	250	1000	
Aluminio	mg/L			
Boro	mg/L			
OD (valores mínimos)	mg/L			
Niquel (dureza 100mg/L)	mg/L	0,05	1	
Plata				
Conductividad eléctrica	uS/cm			
RAS	-			
Molibdeno	mg/L			
Cobalto				
Berilio				
Calcio		1000		
Litio				
Vanadio				
Sodio		150	2000	

Figura 9. Parámetros según normativa francesa.

- Normativa Canadiense Protección vida acuática

Elemento	límite máximo (mg/L)	Cálculos y especificaciones
Cobre	Depende de la dureza CaCO ₃	0 to < 82 mg/L
Cromo	VI 0,001 y III 0,0089	≥82 to ≤180 mg/L
Hierro	0,3	Desconocida
Manganeso		
Magnesio		
Selenio	0,001	
Zinc	0,03	
Arsénico	0,005	
Cadmio	0,0009	
Cianuro	0,005	
Mercurio	0,000026	
Nitrato	13	
Nitrito	0,06	
Razón nitrato + nitrito		
Plomo	Depende de la dureza CaCO ₃	0 to ≤ 60 mg/L >60 to ≤ 180 mg/L >180 mg/L
Cloruro	120	Desconocida
pH	6,5 - 9,0	
Sulfato		
Aluminio	Depende del pH	0,005 pH<6,5
Amonio	No mide DGA	
Boro	1,5	
OD	Depende de temperatura del agua	
Molibdeno	0,073	
Niquel	Depende de la dureza CaCO ₃	0 to ≤ 60 mg/L > 60 to ≤ 180 mg/L >180 mg/L Desconocida
Plata	0,00025	
Talio	0,0008	

Figura 10. Parámetros según normativa canadiense.