

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**IMPACTO DE LA REGULACIÓN EN LA CALIDAD DEL AGUA DE UN RÍO  
MEDITERRÁNEO: EL CASO DEL RÍO BIOBÍO**

**KARLA RODRÍGUEZ.<sup>1</sup>**  
**JOSÉ LUIS ARUMI.<sup>2</sup>**  
**VERONICA DELGADO.<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

El deterioro de la calidad del agua es un desafío clave en cuencas con alta presión antrópica. Este estudio evalúa la evolución del Índice de Calidad de Agua (ICA) en la cuenca del río Biobío (Chile) entre 1994 y 2023, en relación con hitos regulatorios ambientales como la Ley N°19.300, el Decreto Supremo N°90, la entrada en funcionamiento de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) y la implementación de la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA). Se aplicó un análisis temporal del ICA en estaciones del cauce principal y sus afluentes, junto con un modelo conceptual de lazo causal para explorar las interacciones entre regulación, cumplimiento y calidad del agua. Los resultados muestran mejoras iniciales del ICA tras los hitos regulatorios, seguidas en algunos casos por una estabilización o retroceso asociado a menor fiscalización. El modelo se basa en bucles de retroalimentación entre percepción de fiscalización y comportamiento de cumplimiento. Los hallazgos subrayan la relevancia de una implementación sostenida para lograr mejoras duraderas en la calidad del agua.

---

<sup>1</sup> Estudiante Doctorado, Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción – email: [karlrodriguez@udec.cl](mailto:karlrodriguez@udec.cl)

<sup>2</sup> Profesor Titular, Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola e investigador Centro CRHIAM (ANID/FONDAP/1523A00015), Universidad de Concepción – email: [jarumi@udec.cl](mailto:jarumi@udec.cl)

<sup>3</sup> Profesora Titular, Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales, Universidad de Concepción – email: [vedelgado@udec.cl](mailto:vedelgado@udec.cl)

# 1. INTRODUCCIÓN

El deterioro de la calidad del agua constituye uno de los principales desafíos ambientales a nivel mundial. La intensificación de actividades humanas como la agricultura, la industrialización, el desarrollo urbano y el clima han generado crecientes presiones sobre los ecosistemas acuáticos, lo que afecta la disponibilidad de agua de calidad para diversos usos (Akhtar et al., 2021; Giri, 2021; Wang et al., 2023). Varios estudios han demostrado que la contaminación del agua no sólo mejora la biodiversidad acuática, sino también la salud humana, la seguridad alimentaria y el desarrollo económico sostenible, lo que convierte la gestión de la calidad del agua en un componente clave de la agenda ambiental mundial. (Giri, 2021).

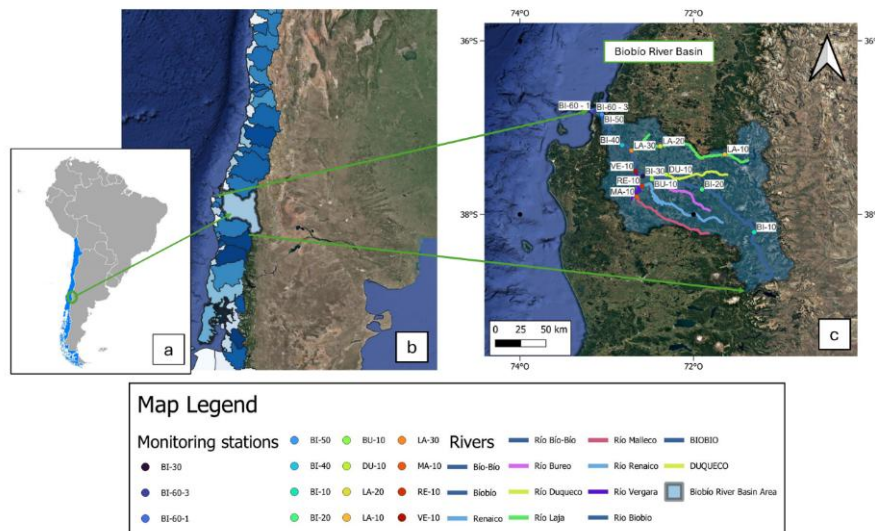
En América Latina, y particularmente en Chile, la preocupación por la calidad de las aguas ha aumentado en las últimas décadas, a medida que el modelo de desarrollo económico ha intensificado el uso de los recursos hídricos, muchas veces sin una regulación ambiental adecuada (Meza, 2009; Peña et al., 2004). Hasta la década de 1990, el país carecía de instrumentos efectivos para controlar la contaminación hídrica, situación que comenzó a revertirse con la promulgación de la Ley N°19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente (Congreso Nacional de Chile, 1994) y la posterior implementación de normativas específicas como el Decreto Supremo N°90 (DS 90) (Congreso Nacional de Chile, 2000), que regula las descargas de residuos líquidos a cuerpos de agua continentales, y la Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA) (Congreso Nacional de Chile, 2015) que establece para la protección de la cuenca del río Biobío. Estas regulaciones, junto al fortalecimiento institucional del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y la entrada en funcionamiento de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) y el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) (Congreso Nacional de Chile, 2010), son hitos fundamentales en la construcción de un marco para gestión de la calidad de aguas en el país. No obstante, el acceso, la calidad y la reparación del daño ambiental frente al recurso hídrico siguen presentando desafíos, como lo evidencia la praxis judicial analizada por Ochoa et al. (2016), Billi et al. (2020) y Delgado (2020), donde destacan tensiones entre la normativa vigente, su implementación administrativa y la jurisprudencia.

La cuenca del río Biobío (**Figura 1**), una de las más extensas e importantes de Chile, refleja de forma paradigmática los desafíos de gestión de la calidad del agua en contextos de alta presión antrópica. Con una superficie cercana a los 24.000 km<sup>2</sup> y una longitud aproximada de 380 km, el río atraviesa diversas zonas climáticas y socioeconómicas, recibiendo aportes de actividades forestales, industriales, agrícolas y urbanas (Alonso et al., 2017; Cornejo-D'Ottone et al., 2019; Parra et al., 2020; Stehr et al., 2010; Yevenes et al., 2018). Diversos estudios han documentado cómo estas presiones han generado una heterogeneidad espacial en la calidad del agua, con mejores condiciones en las cabeceras y una progresiva degradación hacia los tramos medio y bajo del río (Alonso et al., 2017; Stehr et al., 2010). Además, fenómenos como la sequía que afectó la zona entre los años 2010 a 2022 han exacerbado los problemas de calidad, afectando tanto los ciclos biogeoquímicos como la disponibilidad del recurso (Cornejo-D'Ottone et al., 2019; Yevenes et al., 2018).

Para evaluar y monitorear de manera integrada la calidad de las aguas superficiales, se han desarrollado herramientas como los Índices de Calidad de Agua (ICA), que permiten sintetizar múltiples parámetros fisicoquímicos en una sola métrica de fácil interpretación (Torres et al., 2009). En particular, esta investigación se utiliza el ICA adaptado en estudios previos de la cuenca

del río Biobío con datos históricos provenientes de diversas estaciones de monitoreo Parra et al. (2020), una metodología que combina parámetros críticos como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos, pH, nitratos y coliformes fecales, siguiendo esquemas de agregación multiplicativa que otorgan mayor sensibilidad a variaciones extremas en la calidad del agua (Torres et al., 2009).

El objetivo principal de este estudio es analizar el impacto de la regulación ambiental específicamente el Decreto Supremo N°90, la Norma Secundaria de Calidad Ambiental y la entrada en funcionamiento de la Superintendencia del Medio Ambiente como órgano fiscalizador sobre la calidad del agua del río Biobío, evaluando tendencias y cambios en los valores del ICA a lo largo del tiempo. Al hacerlo, se busca contribuir a la comprensión de la efectividad de las políticas públicas en contextos de alta presión antrópica y variabilidad climática, reconociendo, como plantean Ochoa et al. (2016), Billi et al. (2020) y Delgado (2020), que la existencia de normas ambientales no garantiza por sí sola la protección efectiva del recurso hídrico si no va acompañada de mecanismos adecuados de fiscalización, reparación y acceso judicial efectivo.



**Figura 1.** Ubicación geográfica de la cuenca del río Biobío. El panel (a) muestra la ubicación de Chile en Sudamérica. El panel (b) ofrece una visión más detallada de la posición de la cuenca dentro de Chile. El panel (c) presenta un mapa detallado de la cuenca del río Biobío, que incluye las 15 estaciones de monitoreo de calidad del agua con sus respectivas áreas de vigilancia, así como los principales ríos y afluentes identificados en la cuenca.

## 2. MÉTODOS

### 2.1. Fuentes de datos

Este estudio integra datos provenientes de la base de datos histórica de las estaciones de monitoreo establecidas por el Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile, a través del Programa de Monitoreo de la Calidad del Agua del Río Biobío (PMBB) iniciado en 1994 hasta 2017 (Parra et al., 2020). Estas estaciones fueron seleccionadas estratégicamente para representar distintos tramos del cauce principal y de sus principales afluentes (Parra et al., 2020). Posteriormente, en 2015, el Ministerio del Medio Ambiente de Chile, definió formalmente las "Áreas de Vigilancia"

y las "Estaciones de Monitoreo" de la NSCA para la cuenca del río Biobío. Esta estructuración se apoyó en gran medida en los datos históricos proporcionados por el Programa del Centro EULA (Parra et al., 2020), bajo un nuevo esquema de control normativo para fines de gestión ambiental desde 2018 a 2023 (**Tabla 1**).

Cabe destacar que las estaciones de monitoreo definidas en la NSCA corresponden directamente a las mismas estaciones históricas utilizadas por el Centro EULA, manteniendo idénticos códigos de identificación y localización geográfica a lo largo de más de treinta años de monitoreo continuo. Esta correspondencia asegura la comparabilidad temporal entre los registros históricos (EULA/DGA) y los datos recientes bajo el esquema normativo de la NSCA.

**Tabla 1.** Estaciones de monitoreo utilizadas, fuente de datos (EULA/DGA) y período de registro.

| Código de estación | Nombre de la estación                                    | Área de vigilancia | Fuente de datos | Período de monitoreo | Observaciones                      |
|--------------------|--|--------------------|-----------------|----------------------|------------------------------------|
| 08307001-3         | Río Biobío antes de Llanquén                             | BI-10              | EULA / DGA      | 1991–2023            | Datos continuos                    |
| 08317001-8         | Río Biobío en Rucalhue                                   | BI-20              | EULA / DGA      | 1991–2023            | Datos continuos                    |
| 08334001-0         | Río Biobío en Coihue                                     | BI-30              | EULA / DGA      | 1991–2023            | Datos continuos                    |
| 08390000-8         | Río Biobío antes de la unión de Gómero                   | BI-40              | EULA / DGA      | 1991–2023            | Datos continuos                    |
| 08394005-0         | Río Biobío antes de la Planta La Mochita                 | BI-50              | EULA / DGA      | 1991–2023            | Datos continuos                    |
| 08394003-4         | Río Biobío en la desembocadura norte                     | BI-60-1            | EULA / DGA      | 1991–2023            | Datos continuos                    |
| 08394004-2         | Río Biobío en la desembocadura sur                       | BI-60-3            | EULA / DGA      | 1991–2023            | Datos continuos                    |
| Modelo 08333004-K  | Río Bureo aguas arriba de la confluencia del Biobío      | BU-10              | EULA / DGA      | 2018–2023            | Datos continuos                    |
| 08323001-0         | Río Duqueco en Cerrillos                                 | DU-10              | EULA / DGA      | 2018–2023            | Sin datos entre 1994 y 2002        |
| 08375003-0         | Río Laja aguas abajo de la Central Hidroeléctrica Antuco | LA-10              | EULA / DGA      | 1991–2023            | Datos continuos                    |
| 08381013-0         | Río Laja aguas arriba de la confluencia del Caliboro     | LA-20              | EULA / DGA      | 1991–2023            | Datos disponibles a partir de 2014 |
| 08386003-0         | Río Laja en el Puente Laja                               | LA-30              | EULA / DGA      | 1991–2023            | Datos continuos                    |
| 08352003-5         | Río Malleco en el Puente Malleco (Ruta 180)              | MA-10              | EULA / DGA      | 2018–2023            | Datos disponibles a partir de 2014 |
| 08344001-5         | Río Renaico en Renaico                                   | RE-10              | DGA             | 2018–2023            | Datos disponibles a partir de 2014 |
| 08359002-5         | Río Vergara en Nacimiento                                | VE-10              | EULA / DGA      | 2018–2023            | Datos continuos                    |

*Nota:* Los períodos de registro corresponden a los años para los que se dispone de datos sobre la calidad del agua en cada estación. Los "datos continuos" indican un seguimiento regular entre 1994 y 2023, con mediciones anuales o estacionales en función de la disponibilidad. "Datos disponibles desde 2014" se refiere a las estaciones integradas en el programa de monitoreo más tarde o con registros disponibles solo a partir de ese año. "No hay datos entre 1994 y 2002" indica períodos que carecen de información histórica. Esta clasificación tiene como objetivo aclarar posibles discontinuidades en las series de datos analizadas.

## 2.2. Variables fisicoquímicas y métodos analíticos

Los datos de calidad del agua analizados en este estudio incluyen parámetros fisicoquímicos, seleccionados de acuerdo con los lineamientos de NSCA para la cuenca del río Biobío. Mientras que los procedimientos de muestreo y análisis siguen protocolos estandarizados de calidad de agua, basados en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Congreso Nacional de Chile, 2010), así como en los lineamientos técnicos nacionales establecidos por la SMA para el cumplimiento de la NSCA. Por lo que la selección de parámetros y su análisis responden tanto a criterios normativos locales como a tendencias internacionales reportadas en evaluaciones recientes de calidad de agua (Akhtar et al., 2021; Giri, 2021).

## 2.3. Cálculo del Índice de Calidad del Agua

El Índice de Calidad de Agua (ICA) utilizado en este estudio sigue la metodología desarrollada y adaptada por (Parra et al., 2020), específicamente ajustada para ríos de régimen templado mediterráneo en Chile. Para el período 1994–2017, se utilizaron directamente los valores del ICA publicados por Parra et al. (2020), quienes calcularon el índice aplicando la metodología desarrollada por el Centro EULA-Chile. Para el período 2018–2023, el ICA fue calculado

siguiendo la misma metodología manteniendo idénticos pesos relativos, factores de normalización y conjunto de parámetros, aplicada a los datos oficiales de la DGA/MMA bajo el esquema de la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA), asegurando así la continuidad metodológica entre ambos períodos. En cuanto al manejo de datos faltantes, los cálculos del ICA se realizaron únicamente cuando al menos el 80 % de los parámetros estaba disponible, sin aplicar imputación adicional, a fin de mantener la representatividad de los valores obtenidos. El índice fue calculado mediante una fórmula de promedio aritmético ponderado presentado en la ecuación 1.

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

Donde  $C_i$  es el valor normalizado del parámetro  $i$  (escalado de 0 a 100),  $P_i$  es el peso relativo asignado al parámetro  $i$ , y  $n$  es el número total de parámetros incluidos en el cálculo. La **Tabla 2** presenta el conjunto de parámetros seleccionados, sus respectivos pesos relativos y los factores de normalización utilizados para el cálculo del ICA específicos para la protección de los ecosistemas acuáticos de la cuenca del río Biobío. (Parra et al., 2020).

**Tabla 2.** Parámetros y pesos utilizados en el cálculo del ICA, valor de normalización ( $C_i$ ) y peso relativo ( $P_i$ ) para cada variable, Parra et al. (2020).

| Parámetro                          | Peso relativo ( $P_i$ ) | Factor de normalización ( $C_i$ ) |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                    |                         | 0                                 | 10        | 20        | 30        | 40        | 50        | 60        | 70        | 80        | 90        | 100       |
| Aluminio (mg/L)                    | 0.1                     | 3.3                               | 1.93      | 1.62      | 1.4       | 1.17      | 0.72      | 0.43      | 0.16      | 0.09      | 0.06      | 0.01      |
| Amonio (mg N/L)                    | 0.13                    | 0.125                             | 0.11      | 0.1       | 0.095     | 0.075     | 0.05      | 0.03      | 0.025     | 0.01      | 0.005     | < 0.001   |
| AOX (mg/L)                         | 0.1                     | 0.825                             | 0.65      | 0.5       | 0.3       | 0.15      | 0.1       | 0.05      | 0.006     | 0.005     | 0.002     | < 0.001   |
| Cloruro (mg/L)                     | 0.1                     | 90                                | 60        | 45        | 30        | 15        | 10        | 5         | 2         | 1         | 0.5       | < 0.05    |
| Coliformes fecales (NMP/100 ml)    | 0.16                    | 21000                             | 15000     | 10000     | 5000      | 1000      | 475       | 50        | 30        | 10        | 3         | < 0.5     |
| Conductividad ( $\mu$ S/cm)        | 0.1                     | 300                               | 180       | 140       | 100       | 75        | 50        | 25        | 15        | 10        | 5         | < 0.5     |
| DBO <sub>5</sub> (mg/L)            | 0.17                    | 12                                | 10        | 8         | 6         | 4         | 3         | 2.5       | 2         | 1.5       | 1         | < 0.5     |
| DQO (mg/L)                         | 0.1                     | 30                                | 20        | 15        | 10        | 7         | 5         | 3         | 2         | 1         | 0.5       | < 0.25    |
| Fenoles totales (mg/L)             | 0.1                     | 0.04                              | 0.012     | 0.008     | 0.005     | 0.004     | 0.003     | 0.0015    | 0.001     | 0.0005    | 0.0002    | < 0.001   |
| Fósforo total (mg/L)               | 0.14                    | 0.3                               | 0.27      | 0.22      | 0.2       | 0.17      | 0.12      | 0.1       | 0.07      | 0.05      | 0.03      | < 0.01    |
| Hierro total (mg/L)                | 0.1                     | 3                                 | 2.4       | 1.7       | 1         | 0.75      | 0.5       | 0.3       | 0.2       | 0.1       | 0.05      | < 0.05    |
| Nitrato (mg N/L)                   | 0.1                     | 10                                | 7.5       | 5         | 3         | 2.5       | 2         | 1.5       | 1         | 0.5       | 0.25      | < 0.1     |
| Nitrito (mg N/L)                   | 0.07                    | 0.045                             | 0.03      | 0.025     | 0.02      | 0.015     | 0.01      | 0.005     | 0.003     | 0.0025    | 0.001     | < 0.001   |
| Nitrógeno total (mg/L)             | 0.1                     | 5                                 | 4.5       | 3.5       | 3         | 2.5       | 2         | 1.5       | 1         | 0.5       | 0.3       | < 0.1     |
| Ortofosfato (mg P/L)               | 0.12                    | 0.3                               | 0.27      | 0.22      | 0.2       | 0.17      | 0.12      | 0.1       | 0.07      | 0.05      | 0.03      | < 0.01    |
| Oxígeno disuelto (mg/L)            | 0.17                    | <5                                | 5.6 - 6.2 | 5.9 - 6.8 | 6.2 - 6.9 | 6.5 - 8.7 | 6.5 - 8.9 | 6.5 - 8.5 | 6.5 - 8.3 | 6.5 - 7.8 | 6.5 - 7.5 | < 6.5 - 7 |
| pH (unidades)                      | 0.11                    | <5                                | 5.6 - 9.2 | 5.9 - 9   | 6.2 - 8.9 | 6.5 - 8.7 | 6.5 - 8.5 | 6.5 - 8.3 | 6.5 - 8.2 | 6.5 - 8   | 6.5 - 7.8 | 6.5 - 7.5 |
| Sólidos suspendidos totales (mg/L) | 0.1                     | 150                               | 110       | 80        | 55        | 45        | 30        | 20        | 10        | 5         | 2         | < 1       |
| Sulfato (mg/L)                     | 0.1                     | 180                               | 140       | 100       | 80        | 50        | 40        | 30        | 20        | 10        | 5         | < 1       |

La interpretación de los valores del ICA permite categorizar el estado de la calidad de agua de cada estación en distintas clases ambientales. Esta clasificación sigue la escala sugerida por el Centro EULA-Chile (Parra et al., 2020). La **Tabla 3** resume las categorías de calidad, sus respectivos rangos de ICA.

**Tabla 3.** Interpretación de categorías (ICA), Parra et al. (2020).

| Clase / Calidad | Rango ICA (%) | Características ambientales | Color    |
|-----------------|---------------|-----------------------------|----------|
| I Muy bien      | 91–100        | Excelente calidad           | Azul     |
| II Bueno        | 71–90         | Calidad aceptable           | Verde    |
| III Fera        | 51–70         | Contaminado                 | Amarillo |
| IV Pobre        | 41–50         | Muy contaminado             | Naranja  |
| V muy pobre     | 0–40          | Excesivamente contaminado   | Rojo     |

## 2.4. Análisis de datos

El análisis de tendencias en la calidad del agua se basó en los valores históricos del Índice de Calidad de Agua (ICA) calculados para cada estación de monitoreo entre los años 1994 y 2023. Para ello, se elaboraron series temporales bianuales del ICA por estación, representadas mediante gráficos de líneas que permiten visualizar de forma continua la evolución de la calidad del agua a lo largo del tiempo. Para la evaluación general de la cuenca, se seleccionaron estaciones representativas como lo son: BI-30, BI-40, BI-50 y BI-60 (también denominada BI-60-1).

Para contextualizar las tendencias observadas, se incorporaron hitos regulatorios relevantes, tales como la promulgación de la Ley N°19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente en 1994, el DS90, la implementación de la Ley N°20.417, que creó el Ministerio del Medio Ambiente, la SMA y el SEA y la entrada en vigor de la NSCA para la cuenca del río Biobío. Estos hitos fueron representados gráficamente mediante líneas verticales de referencia, lo que permitió facilitar la identificación de posibles cambios en la calidad del agua asociados a la introducción de estas políticas. Por lo que la comparación temporal también consideró: la detección de periodos de mejoría sostenida del ICA tras la implementación de normativas; la identificación de fases de relajación o estabilización en los valores del ICA, potencialmente vinculadas a una disminución de la percepción de fiscalización y la evaluación de diferencias entre estaciones del cauce principal y estaciones en afluentes secundarios, destacando el efecto de presiones antrópicas locales. Además, cabe destacar que todo el preprocesamiento de datos y las salidas gráficas se generaron utilizando Python 3.11, con scripts personalizados desarrollados para el cálculo de ICA, la normalización y la visualización de series de tiempo e hitos regulatorios.

## 2.5. Modelo conceptual

Con el fin de apoyar la interpretación de la evolución observada en la calidad del agua, se desarrolló un modelo conceptual que representa de manera cualitativa las relaciones causales entre variables clave del sistema. El modelo fue construido a partir de la revisión bibliográfica, el análisis empírico de series temporales del ICA y la identificación de hitos regulatorios, siguiendo un enfoque similar al propuesto por (Crielaard et al., 2022), donde se enfatiza la trazabilidad de los vínculos causales, la claridad del diagrama y su utilidad como base para modelos dinámicos posteriores. El modelo representa de manera cualitativa las relaciones causales entre:

- La promulgación e implementación de instrumentos regulatorios ambientales (Ej.DS90).
- La percepción social de riesgo ambiental y de fiscalización.
- El nivel de cumplimiento ambiental por parte de los usuarios de agua.
- Los cambios resultantes en la calidad del agua, medidos mediante el Índice de Calidad de Agua (ICA).

En el marco de la dinámica de sistemas, los diagramas causales permiten identificar bucles de retroalimentación que configuran el comportamiento del sistema. Existen dos tipos principales: los bucles de refuerzo (R), que amplifican los cambios iniciales, y los bucles de equilibrio (B), que tienden a estabilizar el sistema frente a perturbaciones (Meadows, 2008; Sterman, 2000). Este esquema fue adaptado a partir de Crielaard et al. (2022), quienes proponen un enfoque transparente para representar cualitativamente sistemas socioambientales complejos, como el vinculado a la interacción entre regulación, comportamiento humano y calidad del agua. El modelo conceptual desarrollado aquí no constituye una simulación cuantitativa, sino que representa relaciones causales clave para futuras fases de modelación dinámica (Stave, 2002).

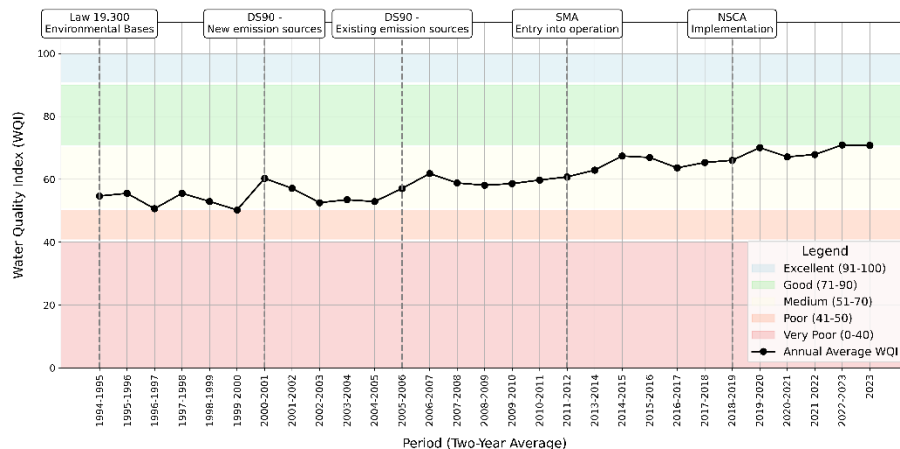
### 3. RESULTADOS

Dado el enfoque del estudio en la evaluación descriptiva de tendencias temporales del Índice de Calidad de Agua (ICA), no se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales. El análisis se centró en la identificación de patrones visuales y cambios estructurales asociados a hitos regulatorios.

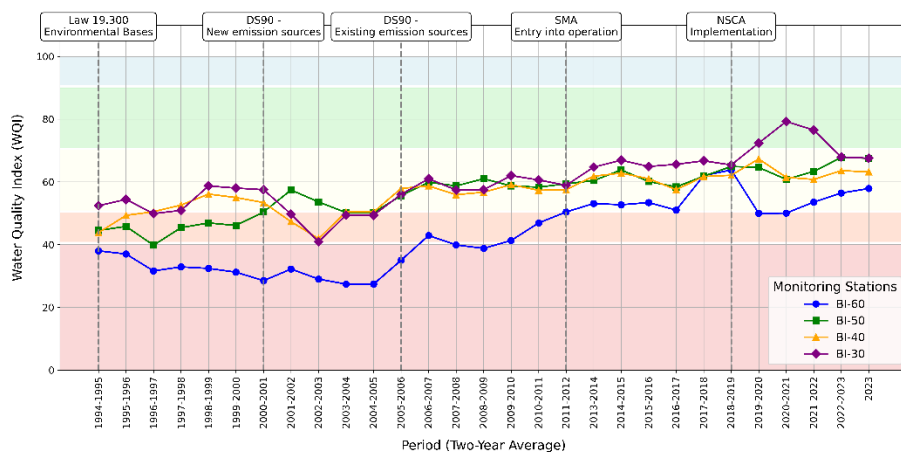
#### 3.1. Tendencia general del Índice de Calidad del Agua (ICA) en la cuenca del río Biobío (1994-2023)

El análisis histórico del Índice de Calidad de Agua (ICA) para la cuenca del río Biobío, entre los años 1994 y 2023, evidenció una tendencia general de mejora progresiva en la calidad del agua (**Figura 2**). Esta evolución no fue lineal, ya que presentó fluctuaciones atribuibles a factores regulatorios, institucionales y a las dinámicas propias del comportamiento de los actores regulados.

La **Figura 3** muestra la evolución del ICA promedio para la cuenca, junto con las series temporales de cuatro estaciones clave ubicadas al final del cauce principal del río: BI-30, BI-40, BI-50 y BI-60. Las estaciones fueron seleccionadas por su continuidad de datos, ubicación estratégica y relevancia para la evaluación de políticas públicas de calidad del agua. Las líneas verticales indican los principales hitos regulatorios: la promulgación de la Ley N°19.300 en 1994; la publicación del DS90 en 2000, cuya aplicación comenzó 180 días después de su publicación en el Diario Oficial, es decir, el 7 de marzo de 2001. Cabe destacar que su entrada en vigencia fue establecida de forma diferenciada según el tipo de fuente emisora. Para las denominadas “fuentes nuevas”, la exigencia comenzó a regir el 3 de septiembre de 2001, mientras que para las “fuentes existentes” se hizo exigible a partir del 3 de septiembre de 2006. También se destaca la entrada en funcionamiento de la SMA en 2012 y la entrada en vigor de la NSCA en 2018.



**Figura 2.** Evolución temporal del Índice de Calidad del Agua (ICA) promedio en la cuenca del río Biobío (1994-2023), con base en promedios de dos años de estaciones de monitoreo representativas. Las bandas de colores representan las categorías de calidad del agua utilizadas en la clasificación de los valores del ICA (véase **Tabla 3**).



**Figura 3.** Tendencias del Índice de Calidad del Agua (ICA) para cuatro estaciones de monitoreo clave (BI-30, BI-40, BI-50 y BI-60) ubicadas en la sección de la cuenca del río Biobío cerca de su desembocadura en el Océano Pacífico, basadas en promedios de dos años entre 1994 y 2023. Las bandas de colores indican las categorías de calidad del ICA (véase **Tabla 3**).

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. Relación entre las tendencias de la calidad del agua y los hitos regulatorios

El análisis temporal del Índice de Calidad de Agua (ICA) muestra que las mejoras en la calidad del agua en la cuenca del río Biobío se relacionan estrechamente con la promulgación y puesta en marcha de leyes, decretos y normativas ambientales en Chile. La tendencia ascendente observada, particularmente tras la promulgación de la Ley N°19.300, la implementación del DS90, la entrada en funcionamiento de la SMA y la puesta en vigor de la NSCA sugiere que los instrumentos regulatorios han tenido un efecto positivo real en el control de la contaminación hídrica. Estos hallazgos son coherentes con estudios a nivel global que destacan que la presencia de marcos regulatorios estrictos es uno de los factores más relevantes para la mejora de la calidad del agua en grandes cuencas (Akhtar et al., 2021; Giri, 2021; Wang et al., 2023).

### 4.2. Dinámica de reacción y relajación en el cumplimiento ambiental

Más allá de la promulgación de normativas, el comportamiento humano frente a la regulación parece seguir un patrón de reacción-relajación. Tras la entrada en vigor de nuevas leyes o regulaciones, se observa una mejora inicial en los valores de ICA, atribuible a un aumento en el cumplimiento ambiental por parte de los actores regulados. Sin embargo, con el paso del tiempo, si no existe una fiscalización constante, se detecta una relajación progresiva en el cumplimiento, reflejada en una estabilización o deterioro de los indicadores de calidad del agua. Esta dinámica es consistente con lo planteado por (Ochoa et al., 2016), quienes destacan que el diseño de la normativa ambiental chilena ha enfrentado históricamente dificultades en garantizar un cumplimiento sostenido debido a brechas institucionales en fiscalización y sanción.

### 4.3. Importancia de la implementación efectiva versus la promulgación formal

Los resultados indican que no basta con promulgar leyes ambientales: su implementación efectiva y el mantenimiento de esfuerzos de fiscalización son claves para lograr mejoras reales y sostenidas en los ecosistemas acuáticos. La evidencia recopilada concuerda con lo expuesto por (Akhtar et al.,

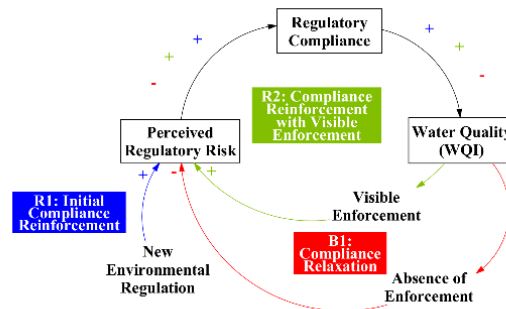
2021), quienes señalan que, a nivel internacional, muchos programas de gestión hídrica fracasan no por falta de normas, sino por ausencia de mecanismos eficaces de aplicación y seguimiento. En este sentido, el fortalecimiento de instituciones como la SMA ha sido un factor determinante en el caso chileno para sostener los logros alcanzados tras la entrada en vigor de las normativas.

#### 4.4. Representación conceptual: ciclos de cumplimiento en respuesta a la regulación

Con el objetivo de interpretar la dinámica observada entre la evolución de la calidad del agua y la implementación de instrumentos regulatorios en la cuenca del río Biobío, se elaboró un modelo conceptual utilizando la metodología de diagramas de lazo causal, representado en la **Figura 4**. El modelo integra tres bucles principales:

- **R1: Initial Compliance Reinforcement:** Representa el efecto inmediato de la promulgación de nuevas regulaciones ambientales como el DS90 o la NSCA, que incrementa la percepción de riesgo regulador, impulsa el cumplimiento ambiental y mejora la calidad del agua.
- **R2: Compliance Reinforcement with Visible Enforcement:** La presencia sostenida de fiscalización visible refuerza la percepción de riesgo, sosteniendo niveles elevados de cumplimiento ambiental y manteniendo la mejora en la calidad del agua.
- **B1: Compliance Relaxation:** En ausencia de fiscalización activa, la percepción de riesgo disminuye con el tiempo, relajando el cumplimiento y deteriorando nuevamente la calidad del agua.

Este comportamiento es consistente con las experiencias históricas de gestión de recursos hídricos en Chile, donde la implementación de marcos regulatorios ha logrado avances iniciales en calidad ambiental, pero su mantenimiento en el tiempo ha requerido esfuerzos permanentes de fiscalización y refuerzo institucional (Meza, 2009; Peña et al., 2004). De forma complementaria, la literatura internacional ha documentado fenómenos similares de reacción inicial y relajación posterior ante regulaciones ambientales en sistemas sociales complejos (Akhtar et al., 2021; Giri, 2021). El modelo conceptual sugiere que los logros iniciales en calidad de agua derivados de nuevas regulaciones solo pueden mantenerse mediante estrategias activas y sostenidas de fiscalización, así como un refuerzo constante de la percepción social de riesgo ambiental.



**Figura 4.** Modelo conceptual que ilustra los ciclos de retroalimentación causal entre la regulación ambiental, el riesgo percibido de cumplimiento, el comportamiento de cumplimiento y la calidad del agua en la cuenca del río Biobío.

#### **4.5. Implicaciones para la gobernanza ambiental futura**

Basado en el análisis realizado, se recomienda, primero reforzar los mecanismos de fiscalización periódica y sanción efectiva, segundo diseñar estrategias de comunicación de riesgo ambiental que mantengan alta la percepción de vigilancia entre los actores económicos y por último considerar en futuros análisis la inclusión de factores naturales (climáticos, hidrológicos) y socioeconómicos que puedan modular la respuesta del sistema. Ya que una gestión ambiental exitosa requiere comprender que los ecosistemas y las sociedades humanas forman parte de un mismo sistema adaptativo complejo (Delgado, 2020; Wang et al., 2023).

#### **4.6. Alcance y limitaciones del enfoque interpretativo**

Es importante señalar que este estudio se enfoca en la tendencia observada de la evolución temporal del Índice de Calidad de Agua (ICA) en la cuenca del río Biobío, centrando la interpretación de los cambios en su relación con la promulgación e implementación de instrumentos regulatorios (leyes, decretos y normativas ambientales). Por tanto, no se han considerado en este análisis los posibles efectos de eventos naturales extremos, como el terremoto de 2010, los periodos de sequía prolongada (2010–2022) o las inundaciones ocurridas en 2006 y 2023, a pesar de que estos fenómenos pudieron haber influido en la dinámica de calidad del agua. En particular, la sequía pudo haber reducido de manera significativa los caudales en ciertos tramos del río, afectando su capacidad de dilución y, con ello, la concentración y el comportamiento de los contaminantes.

Asimismo, no se incorporaron otros eventos excepcionales de carácter global, como la pandemia de COVID-19 (2020–2022), que pudo haber impactado indirectamente la calidad del agua en la cuenca mediante cambios en la actividad industrial, disminución temporal de fiscalizaciones ambientales o alteraciones en los procesos de monitoreo. Aunque su efecto específico no fue evaluado en este estudio, su consideración en análisis futuros permitiría comprender mejor las variaciones observadas bajo condiciones de disrupción social y económica.

Esta situación puede afectar de forma importante los volúmenes de agua circulante en ciertos tramos, limitando aún más la capacidad de asimilación de contaminantes, especialmente en contextos de escasez hídrica. Esta decisión metodológica responde a la necesidad de aislar y comprender específicamente la tendencia de la respuesta humana y social frente a las políticas públicas ambientales, evitando introducir variabilidad exógena que pudiera confundir la interpretación de los resultados. En futuros estudios, sería relevante integrar un análisis multifactorial que considere tanto las presiones antrópicas como los eventos naturales extremos y condiciones de uso del recurso hídrico, para una visión aún más integral de la evolución ambiental de la cuenca.

### **5. CONCLUSIÓN**

Este estudio demuestra que la evolución de la calidad del agua en la cuenca del río Biobío, evaluada mediante el Índice de Calidad de Agua (ICA) durante el período 1994–2023, está estrechamente vinculada a la implementación progresiva de instrumentos regulatorios ambientales en Chile. La promulgación de la Ley N°19.300, el Decreto Supremo N°90, la entrada en funcionamiento de la SMA y la entrada en vigor de la NSCA han tenido efectos positivos y medibles en la mejora de la calidad del agua en diversas estaciones de monitoreo.

Los resultados muestran un patrón recurrente de mejora inicial tras la implementación de normativas, seguido por fases de estabilización o retroceso, especialmente en contextos donde la fiscalización ha sido limitada. Esta dinámica de reacción-relajación ha sido documentada previamente en sistemas de gobernanza ambiental complejos (Akhtar et al., 2021; Ochoa et al., 2016), y subraya la importancia de mantener mecanismos institucionales activos de control, sanción y comunicación del riesgo regulatorio.

El modelo conceptual desarrollado como apoyo a la interpretación sistémica contribuye a explicar de manera sistémica las interacciones entre regulación, percepción de riesgo, cumplimiento y calidad del agua, alineándose con enfoques reconocidos en la literatura de dinámica de sistemas (Akhtar et al., 2021; Giri, 2021).

Se concluye que la sola existencia de marcos normativos no es suficiente para garantizar una mejora sostenida en la calidad del agua. Es necesario asegurar su implementación efectiva mediante estrategias de fiscalización continua, fortalecimiento institucional y uso de herramientas de análisis integradas. Para avanzar hacia una gestión hídrica más resiliente y adaptativa, se recomienda incorporar también factores climáticos, hidrológicos y socioeconómicos en futuros estudios, en línea con las recomendaciones de (Wang et al., 2023) sobre enfoques multifactoriales en sistemas acuáticos.

Este trabajo aporta de manera empírica y conceptual para fortalecer el diseño y la evaluación de políticas públicas ambientales en cuencas con alta presión antrópica, como la del Biobío, y puede servir como referencia para la aplicación de modelos similares en otros territorios de América Latina.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM) por apoyar esta investigación a través del proyecto ANID/FONDAP/1523A0001. También agradecemos al Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile y a la Dirección General de Aguas (DGA) por brindar acceso a los datos históricos de calidad del agua utilizados en este estudio.

## REFERENCIAS

- Akhtar, N., Syakir Ishak, M. I., Bhawani, S. A., & Umar, K. (2021). Various Natural and Anthropogenic Factors Responsible for Water Quality Degradation: A Review. *Water*, 13(19), 2660. <https://doi.org/10.3390/w13192660>
- Alonso, Á., Figueroa, R., & Castro-Díez, P. (2017). Pollution Assessment of the Biobío River (Chile): Prioritization of Substances of Concern Under an Ecotoxicological Approach. *Environmental Management*, 59(5), 856-869. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0824-5>
- Billi, M., Delgado, V., Jiménez, G., Morales, B., Neira, C. I., Silva, M. I., & Urquiza, A. (2020). Gobernanza policéntrica para la resiliencia al cambio climático: Análisis legislativo comparado y Ley Marco de Cambio en Chile. *Estudios Públicos*, 160, 7-53. <https://doi.org/10.38178/07183089/1028191015>
- Congreso Nacional de Chile, C. (1994). *Ley N°19.300: Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente*.

- Congreso Nacional de Chile, C. (2000). *Decreto Supremo N°90: Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales*.
- Congreso Nacional de Chile, C. (2010). *Ley N°20.417 (2010), que creó el Ministerio del Medio Ambiente, la SMA y el SEA: Crea el Ministerio del Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente*.
- Congreso Nacional de Chile, C. (2015). *Decreto Supremo N°9: Establece Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales de la Cuenca del Río Biobío*.
- Cornejo-D'Ottone, M., Figueroa, R., & Parra, O. (2019). Seasonality of the N<sub>2</sub>O cycle of the Biobío River during the megadrought. *Journal of Limnology*, 78(1), 14-26. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2018.1767>
- Crielaard, S., Lenschow, A., & Krueger, T. (2022). Refining the causal loop diagram – a transparent approach for qualitative systems analysis of the water–soil–agriculture system in Northern Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 5989-6008. <https://doi.org/10.5194/hess-26-5989-2022>
- Debels, P., Figueroa, R., Urrutia, R., Barra, R., & Niell, X. (2005). Evaluation of Water Quality in the Chillán River (Central Chile) Using Physicochemical Parameters and a Modified Water Quality Index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 110(1-3), 301-322. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-8064-1>
- Delgado, V. (2020). Reparación del daño ambiental causado a las aguas subterráneas en los tribunales de Chile. *Revista de Derecho Privado*, 38, 279-310. <https://doi.org/10.18601/01234366.n38.10>
- Giri, S. (2021). Water quality prospective in Twenty First Century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies and impediments. *Environmental Pollution*, 271, 116332. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116332>
- Meadows, D. H. (2008). *Thinking in Systems: A Primer*. Chelsea Green Publishing.
- Meza, F. (2009). *Control de calidad de las aguas en Chile*. INIA Tierra Adentro.
- Ochoa, F., Delgado, V., Álvez, A., & Rivera, D. (2016). El acceso al recurso hídrico en la praxis judicial chilena: Paradojas y malas prácticas. *Actas de Derecho de Aguas*, 6, 5-28.
- Parra, O., Figueroa, R., Urrutia, R., & Valdovinos, C. (2020). La cuenca hidrográfica del río Biobío. En *Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile: Evolución y perspectivas a 30 años de su creación* (pp. 91-139). Universidad de Concepción.
- Peña, H., Luraschi, M., & Valenzuela, S. (2004). *Agua, desarrollo y políticas públicas: La experiencia de Chile*. 1(2).
- Stave, K. A. (2002). Using system dynamics to improve public participation in environmental decisions. *System Dynamics Review*, 18(2), 139-167. <https://doi.org/10.1002/sdr.237>
- Stehr, A., Debels, P., Arumi, J. L., Alcayaga, H., & Romero, F. (2010). *Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: Experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile*.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill.
- Torres, P., Cruz, C. H., & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94.
- Wang, L., Cao, Y., & Infante, D. M. (2023). Disentangling Effects of Natural Factors and Human Disturbances on Aquatic Systems—Needs and Approaches. *Water*, 15, 1387. <https://doi.org/10.3390/w15071387>
- Yevenes, M. A., Figueroa, R., & Parra, O. (2018). Seasonal drought effects on the water quality of the Biobío River, Central Chile. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(14), 13844-13856. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1415-6>