



# RECUPERACIÓN DEL SISTEMA LACUSTRE DE VICHUQUÉN

Evidencia científica integrada, prioridades estratégicas y hoja de ruta para la acción

Integración de estudios ANAM, DGA, DVS, UCSC, EULA, GHD, OITEC e INFOR (2015–2026)

*Unión Comunal del Lago Vichuquén*

---

## 1. Resumen ejecutivo — Estado ambiental del sistema lacustre Vichuquén (ANAM 2015–2026)

**Mensaje principal:** el análisis integrado de los monitoreos ANAM 2015–2026, complementado con estudios de la DGA, DVS, UCSC, EULA, GHD, OITEC e INFOR, indica que el Lago Vichuquén enfrenta un proceso de deterioro ecológico estructural cuya causa de fondo es el exceso de nutrientes —fósforo y nitrógeno— aportado por la cuenca durante más de un siglo y acumulado en los sedimentos, mientras que la creciente salinización, la estratificación y la sequía actúan como detonantes y amplificadores que gobiernan cuándo y con qué intensidad ese reservorio interno se moviliza y desencadena floraciones. La salinización se asocia a la disminución de los aportes de agua dulce, la dinámica de la barra de Llico y la intrusión marina acumulada durante la última década.

### Principales conclusiones:

#### 1. Los nutrientes aportados por la cuenca son la causa de fondo; la salinización es el principal detonante estructural, en interacción con la eutrofización y la carga interna de nutrientes.

La conductividad del Lago Vichuquén aumentó desde ~6.900  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 2015 hasta cerca de 19.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 2026, mientras que la Laguna Torca pasó de 3.400 a casi 9.800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ambas tendencias son sostenidas y estadísticamente significativas. Los años con menores niveles de agua coinciden con los mayores niveles de salinidad, confirmando la relación entre sequía, disminución del volumen almacenado y concentración de sales. No obstante, la salinización no actúa de forma aislada: opera en conjunto con la estratificación, la anoxia de fondo, la carga interna de fósforo, la menor renovación hídrica y la temperatura, que constituyen un mecanismo multifactorial. El mismo ingreso de sal que en el Vichuquén ancestral —oligotrófico y sin anoxia— era parte de un equilibrio funcional, hoy es nocivo porque el sistema que lo recibe cambió (ver §2.7).

#### 2. El cuerpo del lago es mayoritariamente mesotrófico, con floraciones episódicas y carga interna de fósforo.

Por mediana de clorofila, el lago se mantiene en rango mesotrófico la mayor parte de la serie, con eventos eutróficos–hipereutróficos localizados (2025 y mayo 2026). El fósforo disuelto de superficie es bajo, pero eso no indica pobreza de nutrientes: las floraciones lo captan y el sistema concentra fósforo en el sedimento y en el fondo (gradiente ~80×). La condición preocupante no es una columna rica en nutrientes disueltos, sino la acumulación y el reciclaje interno de fósforo bajo la anoxia de fondo, que sostiene floraciones recurrentes. El término «hipereutrofia» se reserva para esos eventos y para el sedimento, no para el estado medio de la columna.

#### 3. El año 2025 constituyó el episodio ambiental más crítico de la serie histórica.

Durante 2025 se registraron simultáneamente la mayor conductividad, una clorofila-a alta, los menores niveles de oxígeno disuelto y floraciones de cianobacterias. La clorofila del lago en 2025 fue



alta (mediana  $\approx 11 \mu\text{g/L}$  en la ventana de comparación; el «628  $\mu\text{g/L}$ » de versiones previas era una media artefactual), compatible con una floración eutrónica–hipereutrónica localizada.

#### **4. En 2026 persisten señales de alerta ecológica.**

La campaña de mayo de 2026 detectó presencia de *Microcystis* en todos los puntos del lago, microcistinas en bajas concentraciones, sectores con clorofila superior a  $100 \mu\text{g/L}$  (Pto 3: Bahía Paula y Pto 4: Bahía Aquelarre) y conductividades cercanas a  $19.000 \mu\text{S/cm}$ . Aunque las microcistinas permanecen bajo el límite de referencia OMS para actividades recreativas, la presencia generalizada de cianobacterias confirma que las condiciones que favorecen las floraciones siguen activas.

#### **5. La situación sanitaria muestra una mejora importante.**

A diferencia del deterioro ecológico, los indicadores microbiológicos evolucionan favorablemente. Los coliformes fecales han disminuido significativamente respecto de los máximos de 2018–2020; el lago mantiene valores bajos y el Estero Llico muestra una reducción importante, sugiriendo avances en el control de aguas servidas y saneamiento.

#### **6. La evidencia ecológica confirma el deterioro estructural.**

La pérdida de macrófitas sumergidas y la fuga del cisne de cuello negro de la Laguna Torca (documentadas desde 2014–2015 y ratificadas por INFOR en 2025), junto con el registro temprano de *Microcystis*, muestran que el daño trasciende los parámetros fisicoquímicos y constituye un colapso ecológico de cuenca, homologable al del río Cruces (Valdivia, 2004).

#### **Diagnóstico integrado:**

El principal problema ambiental ya no es la contaminación fecal: es el exceso de nutrientes aportado por la cuenca y acumulado en el sedimento durante más de un siglo, que se expresa mediante una secuencia de fenómenos interrelacionados: carga de nutrientes desde la cuenca → acumulación en el sedimento → menor disponibilidad de agua dulce → descenso de niveles → intrusión salina por barra abierta → aumento de salinidad → estratificación permanente → anoxia de fondo → liberación interna de fósforo → floraciones de cianobacterias → mayor consumo de oxígeno → deterioro ecológico progresivo. Este mecanismo explica de manera coherente los cambios de la última década.

#### **Prioridades estratégicas:**

- Restablecer una gestión hidráulica regulada del sistema lago–estero–mar, reduciendo los procesos de salinización.
- Continuar disminuyendo las cargas externas de nutrientes, especialmente en el Estero Llico.
- Implementar un monitoreo permanente de salinidad, nutrientes, oxígeno, fitoplancton y cianotoxinas, con meses de muestreo fijos (idealmente marzo y septiembre cada año) para asegurar la comparabilidad interanual.
- Desarrollar la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) y el futuro Plan de Descontaminación.
- Avanzar hacia un Plan Integral de Manejo de Cuenca, incorporando aspectos hidrológicos, ecológicos y sanitarios.



Conclusión: el Lago Vichuquén presenta una paradoja ambiental: mientras la calidad sanitaria mejora significativamente, la condición ecológica continúa deteriorándose. **La causa de fondo es el exceso de nutrientes acumulado en el sistema; la salinización progresiva, la estratificación permanente y la anoxia son los detonantes que lo movilizan. Por ello, la recuperación exige combinar la reducción de las cargas externa e interna de nutrientes con la gestión del balance hídrico de la cuenca —factores complementarios— para revertir la tendencia y asegurar la sustentabilidad futura del sistema.**

## 2. Análisis integrado

El análisis integrado de 12 años de monitoreo (2015–2026), complementado con estudios DGA, DVS, UCSC, EULA, GHD, OITEC e INFOR, confirma que el Lago Vichuquén enfrenta un problema ambiental estructural cuya causa de fondo es el exceso de nutrientes aportado por la cuenca y acumulado en los sedimentos, mientras que la creciente salinización y la estratificación actúan como detonantes que movilizan ese reservorio interno y desencadenan sus consecuencias ecológicas.

### 2.1 Diagnóstico general: una evolución dual

#### Aspectos que mejoran:

- Disminución muy significativa de la contaminación fecal respecto de los máximos históricos.
- Reducción de la materia orgánica en varios sectores.
- Mejora parcial de la calidad sanitaria del Estero Llico por la operación de las plantas de tratamiento.
- Recuperación del oxígeno disuelto de superficie en mayo de 2026 respecto de 2025 (con la salvedad de que el OD de superficie puede reflejar sobresaturación por la floración y no la oxigenación de la columna, cuyo fondo permanece anóxico según DVS).

#### Aspectos que empeoran:

- Salinización acelerada del Lago Vichuquén y la Laguna Torca.
- Disminución del oxígeno disuelto en años recientes. La materia orgánica, medida por su indicador propio —la DBO—, es baja en el lago (rango de aguas naturales) y solo se eleva puntualmente durante floraciones; la DQO sube, pero puede estar influenciada por la salinidad y mide materia orgánica que incluye formas no biodegradables.
- Persistencia de condiciones eutróficas e hipereutróficas y permanencia de cianobacterias (*Microcystis*).
- Consolidación de una estratificación salina permanente que favorece la anoxia profunda y el reciclaje interno de fósforo.
- Pérdida de macrófitas sumergidas y migración del cisne de cuello negro en la Laguna Torca, indicador ecológico que evidencia el deterioro del sistema.



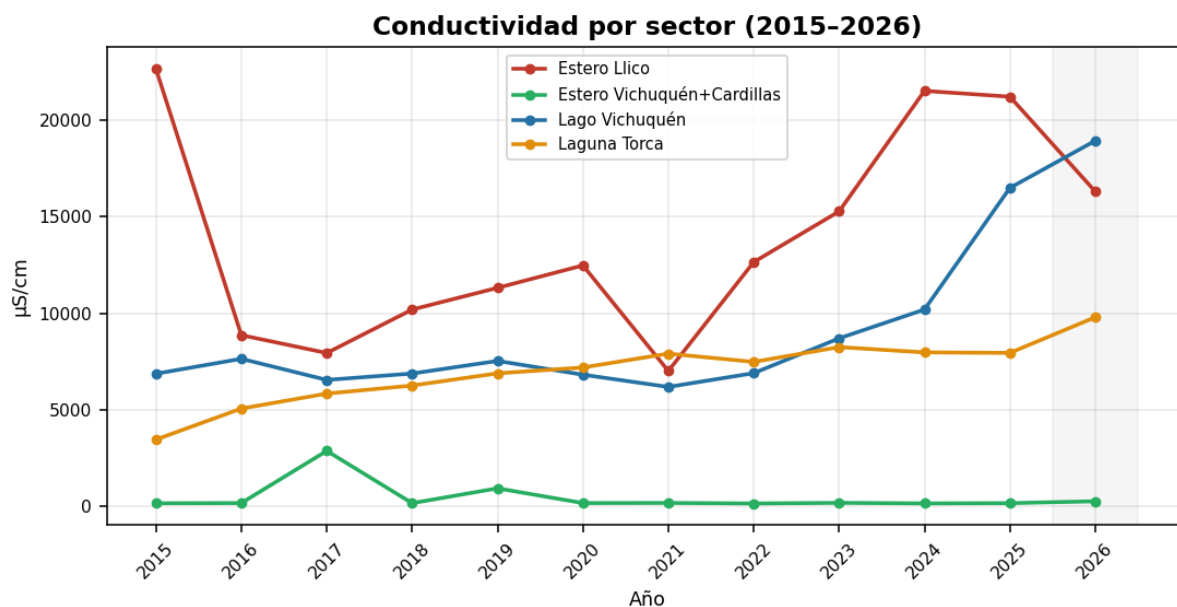
## 2.2 Hallazgo principal: la salinización, principal detonante estructural en interacción con la eutrofización

El cambio más notable en la última década es el aumento de la conductividad eléctrica, macroparámetro que mide de forma indirecta la cantidad de sales en el agua:

**Tabla 1. Conductividad por sector: 2015, 2026 y variación.**

Sector	2015	2026	Variación
Lago Vichuquén	6.860 $\mu\text{S}/\text{cm}$	18.947 $\mu\text{S}/\text{cm}$	+176%
Laguna Torca	3.440 $\mu\text{S}/\text{cm}$	9.789 $\mu\text{S}/\text{cm}$	+185%

El fenómeno descrito se acentúa especialmente desde 2023. La información hidrológica muestra además una correlación inversa entre nivel del lago y salinidad —menor nivel  $\rightarrow$  mayor conductividad  $\rightarrow$  mayor salinización— con  $r = -0,65$  para el Lago Vichuquén.



**Figura 1. Conductividad por sector (2015–2026).**

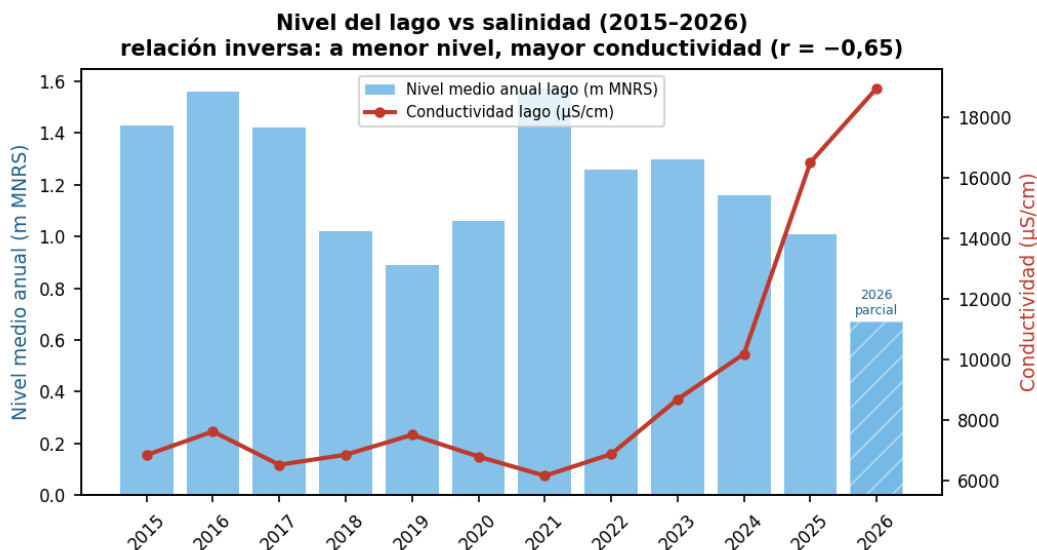


Figura 2. Nivel medio anual del lago frente a conductividad: relación inversa ( $r = -0,65$ ).

### 2.3 Relación entre salinidad y floraciones algales

Uno de los hallazgos encontrados es la asociación entre el aumento de la salinidad, la presencia de cianobacterias y el incremento de clorofila. La co-variación entre conductividad y clorofila existe pero es frágil: descansa en 2025–2026 ( $n=9$ , con alta influencia de esos años) y la correlación de rango (Spearman) es débil ( $\sim 0,35$ ). Se trata, por tanto, de evidencia sugerente y no concluyente, apoyada sobre todo en la biología: las cianobacterias toleran mejor la salinidad y, si la especie dominante es *Nodularia* (halotolerante), el vínculo con la salinización es aún más directo. Un muestreo independiente en playa Paula (verano) apunta a *Nodularia* con nodularina, no a *Microcystis*; de confirmarse, refuerza —no debilita— el vínculo con la salinización.

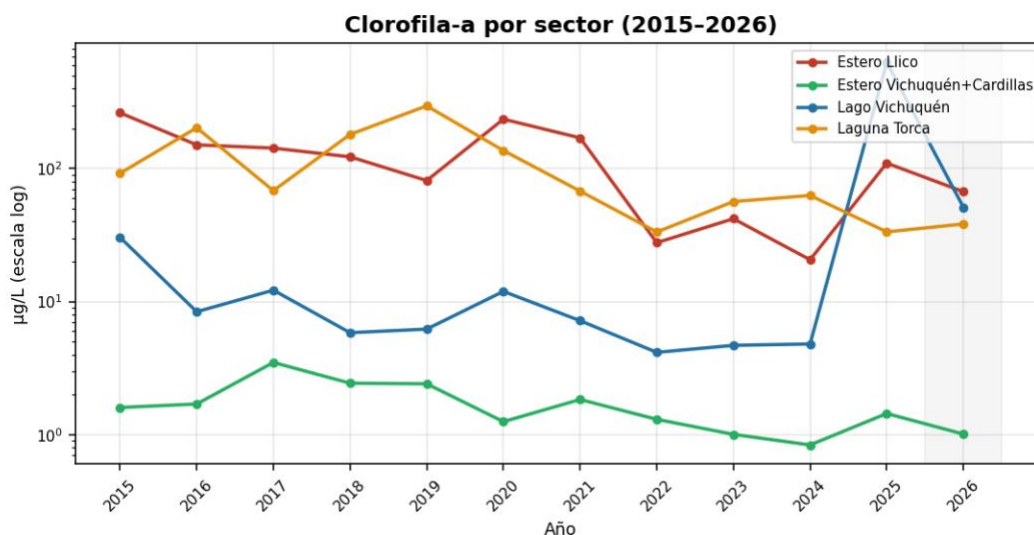


Figura 3. clorofila-a por sector (Lago Vichuquén).



## 2.4 El año 2025: punto de inflexión

La serie identifica a 2025 como un año especialmente crítico: coinciden la máxima conductividad, una clorofila alta y el menor oxígeno disuelto, con presencia de cianobacterias. La clorofila del lago en 2025 fue alta (mediana  $\approx 11 \mu\text{g/L}$  en la ventana marzo–junio; el «628  $\mu\text{g/L}$ » de versiones previas era una media aritmética dominada por un valor extremo, no representativa). Aunque hay una discrepancia metodológica con las mediciones DVS de diciembre de 2025, ambas fuentes coinciden en una floración extraordinaria durante el otoño de 2025 (la DGA la sitúa por satélite entre abril y comienzos de mayo).

## 2.5 Estado actual del lago (mayo 2026)

### Positivo:

- Oxígeno superficial adecuado (7–8 mg/L).
- Microcistinas muy bajas (0,25–0,37  $\mu\text{g/L}$ ), bajo el límite OMS de 1  $\mu\text{g/L}$ . Advertencia: si la cianobacteria dominante fuese Nodularia (y no Microcystis), la toxina relevante sería la nodularina, que el ensayo de microcistinas no detecta; un muestreo independiente en verano reportó nodularina, por lo que este valor no debe leerse como ausencia de cianotoxinas.
- Coliformes muy bajos dentro del lago y ausencia de aceites y grasas detectables.

### Preocupante:

- Presencia de Microcystis en los cinco puntos muestreados del lago.
- Clorofila extremadamente alta en dos sectores ( $>100 \mu\text{g/L}$ ): Bahía Paula y Bahía Aquelarre.
- Conductividad cercana a 19.000  $\mu\text{S/cm}$  y DBO elevada en algunos puntos del lago (8–25 mg/L), asociada a la floración.
- Persistencia de condiciones hipereutróficas.

## 2.6 Modelo causal que surge del conjunto de evidencias

La integración de ANAM, DVS, UCSC, DGA e INFOR permite proponer el siguiente mecanismo, consistente con prácticamente todos los estudios revisados:

### Modelo conceptual ampliado (cadena de retroalimentación):

Carga histórica de nutrientes desde la cuenca (forestal, agrícola y aguas servidas) → Acumulación de fósforo en el sedimento (causa de fondo). Sobre esa base: Megasequía → Menor nivel del lago → Salinización + Menor renovación hídrica → Estratificación salina permanente → Anoxia profunda → Liberación del fósforo sedimentario → Mayor biomasa algal → Bloom de cianobacterias → Mayor consumo de oxígeno → Retroalimentación positiva (refuerza la anoxia y la liberación de fósforo).

La morfometría del lago amplifica el proceso: con profundidad máxima de 31 m, profundidad media de 17,1 m, superficie de 12,5  $\text{km}^2$  y volumen de 0,21  $\text{km}^3$  ( $\approx 210$  millones de  $\text{m}^3$ ) (EULA-Chile, 2016; DVS, 2025), el Lago Vichuquén es un cuerpo profundo y de mezcla lenta. Esa profundidad favorece una estratificación fuerte, un hipolimnion extenso y la acumulación de nutrientes en el fondo, lo que ayuda a explicar por qué la anoxia y el reciclaje interno de fósforo se sostienen en el tiempo. Su cubeta tiene forma de «U» (relación profundidad media/máxima  $\approx 0,6$ ), con gran proporción de zonas profundas, y



su fondo se encuentra hasta 26 m bajo el nivel del mar (criptodepresión de -26 m; EULA-Chile, 2016), rasgo que ayuda a explicar su susceptibilidad a la intrusión salina.

*Nota: este modelo es multifactorial. La causa de fondo es el exceso de nutrientes acumulado en el sedimento durante un siglo; la salinización es el principal detonante estructural, que opera junto con la estratificación, la anoxia, la carga interna de fósforo, la sequía y la menor renovación hídrica. Los datos muestran asociaciones (correlación) consistentes con esta cadena, no una prueba de causalidad única.*

<b>Factor</b>	<b>Nivel de evidencia</b>	<b>Rol en el sistema</b>
Salinización	Muy alta	Principal detonante estructural; sostiene la estratificación salina
Estratificación permanente	Muy alta	Aísla el hipolimnion; condición para la anoxia
Sequía / balance hídrico	Muy alta	Reduce nivel y renovación; concentra sales
Carga interna de fósforo	Alta	Realimenta nutrientes desde el sedimento anóxico
Aporte externo de nutrientes (cuenca)	Alta	Causa de fondo; carga histórica acumulada en el sedimento; foco en Estero Llico y afluentes
Cambio climático	Media	Agrava sequía y temperatura del agua
Aguas servidas	Baja–Media	En mejora por plantas de tratamiento

*Tabla 2. Ranking cualitativo de factores causales y su nivel de evidencia en el sistema lacustre Vichuquén.*

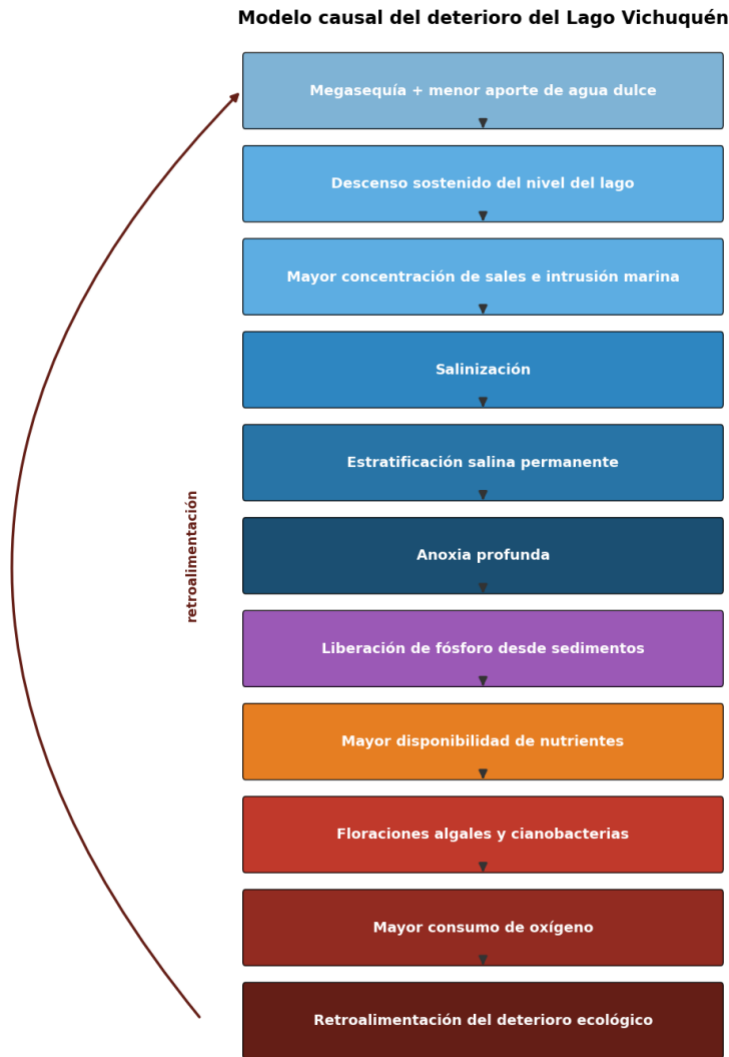


Figura 4. Modelo causal del deterioro del Lago Vichuquén (cadena de retroalimentación).

## 2.7 Cinco supuestos equivocados sobre la dinámica del sistema y la gestión de la barra

El manejo del complejo exige descartar cinco supuestos frecuentes que, de mantenerse, conducen a decisiones equivocadas sobre la barra de Llico. Cada uno se contrasta a continuación con la evidencia disponible.

**Supuesto equivocado 1 — “El ingreso de agua salada es natural, luego es inocuo.”** El efecto del ingreso de sal es radicalmente distinto según el estado del sistema receptor:

- **Vichuquén ancestral** (oligotrófico, sin reservorio de nutrientes en el sedimento, sin anoxia, con intercambio mareal regular y buena renovación): la sal entraba y se exportaba dentro de un equilibrio funcional. Los registros sedimentarios de 7.000 años muestran fases marina, salobre y estratificada según la precipitación, sin la carga antrópica actual (Frugone-Álvarez et al. 2017, internet).



- **Vichuquén actual** (cargado de nutrientes tras un siglo de aporte de la cuenca, estratificado y con anoxia de fondo): la misma intrusión forma una haloclina estable, sella el fondo, profundiza la anoxia y moviliza el fósforo sedimentario (DGA, Minuta DCPRH N°27, 2025, local).

**Implicancia:** lo que cambió no es la sal sino el sistema que la recibe; por eso la sal, hoy, es el detonante que activa el reservorio interno de nutrientes.

**Supuesto equivocado 2 — “La barra abierta garantiza la renovación del lago.”** La renovación beneficiosa depende del aporte de agua dulce —lluvia directa y escorrentía secundaria de la cuenca—, que exporta sales y nutrientes hacia el mar. Hoy está disminuida por la megasequía (CR2, La megasequía 2010–2019; Boisier et al. 2025, internet) y por la menor escorrentía estival de las plantaciones exóticas (Alvarez-Garretón et al. 2019; Lara et al. 2021, internet). La barra no controla esa renovación: la controla la lluvia.

**Supuesto equivocado 3 — “Cerrar la barra impide la renovación del agua.”** El cierre artificial se ejecuta después de que el sistema ya descargó hacia el mar. Por lo tanto no atrapa agua estancada ni bloquea el aporte de agua dulce —que depende de la lluvia y la escorrentía, no de la barra—; solo impide el reingreso de agua salada (el detonante) al lago vaciado. Suponer que la barra estanca el sistema confunde dos procesos independientes.

**Supuesto equivocado 4 — “Toda renovación es buena, también la del mar.”** La “renovación” por ingreso de agua salada al Vichuquén actual no renueva: deteriora. Aporta la sal que genera la estratificación, la anoxia y la liberación de fósforo desde el sedimento (DGA, Minuta DCPRH N°27, 2025, local). Solo el aporte dulce renueva en sentido sanitario; el aporte salino, en las condiciones de hoy, es nocivo.

**Supuesto equivocado 5 — “Dejar la barra abierta no afecta a la Laguna Torca.”** La barra permanentemente abierta, con la cota deprimida por la sequía, condena a la Laguna Torca a una salinización progresiva y a secarse: por su escasa profundidad, sus pérdidas por evaporación dejan de compensarse con el aporte desde el lago, cuyo nivel desciende. Su conductividad ya subió de ~3.400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (2015) a 9.789  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (mayo 2026) (ANAM, local). Una gestión que ignora a Torca sacrifica el humedal de mayor valor de conservación de la cuenca —hábitat del cisne de cuello negro, Reserva Nacional— (CONAF 2020, Avifauna Laguna Torca, local).

**Hilo conductor de los cinco:** la causa de fondo son los nutrientes que la cuenca acumuló durante un siglo; la salinidad es el detonante; el efecto de la sal depende del estado del sistema (ancestral vs actual); la renovación que importa es la de agua dulce, hoy reducida por la megasequía; y el cierre de la barra protege —no estanca— a un sistema vaciado, evitando el reingreso salino y la pérdida de Torca.

## 2.8 Implicancias de gestión

Actuar exclusivamente sobre las floraciones algales o la presencia de cianobacterias aborda los síntomas, no la causa principal. La evidencia converge hacia tres prioridades: (1) regular el balance hídrico del sistema, controlando la conectividad lago–mar para reducir el incremento de la salinidad; (2) mantener el control de nutrientes, especialmente en el Estero Llico y otras fuentes externas; y (3) implementar una gestión integral de cuenca, con monitoreo permanente, modelación hidráulica y la futura Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA).



## 2.9 Conclusión

La condición sanitaria del lago, ejemplificada en la contaminación fecal, es hoy considerablemente mejor que hace una década. Sin embargo, el sistema presenta un deterioro ecológico estructural creciente cuya causa de fondo es la acumulación histórica de nutrientes, que la salinización, la estratificación permanente y la anoxia movilizan desde el sedimento (eutrofización interna). La crisis ambiental observada en 2025 no fue un evento aislado, sino la manifestación más visible y evidente de un proceso de deterioro que se ha desarrollado a lo largo de los años, que continúa activo en 2026, y que si no se toman medidas, se podría agudizar en los próximos años. La recuperación sostenible del lago, y del sistema hídrico en general, dependerá tanto de la reducción de las cargas externa e interna de nutrientes —la causa de fondo— como de la regulación hídrica de la relación lago–estero–mar, que controla el detonante salino, junto con un plan de manejo integral de la cuenca soportado en la evidencia científica y un monitoreo y seguimiento continuo.

## PARTE II — DETALLE Y RESPALDO TÉCNICO

### Alcance de los datos analizados

Campaña ANAM de mayo de 2026 (muestreo del 22-05-2026): 160 registros de laboratorio, 10 estaciones de muestreo y 17 variables medidas.

Serie histórica consolidada ANAM: 4 sectores (Estero Llico; Estero Vichuquén + Las Cardillas; Lago Vichuquén; Laguna Torca), 21 variables y 12 años (2015–2026), con 760 registros de promedios anuales por variable y sector.

**Núcleo del análisis: datos de monitoreo ANAM (las dos fuentes anteriores). Para complementar la evolución del cuerpo de agua, evaluar causas y fundamentar las acciones, se integraron además las siguientes fuentes, todas locales (carpeta UC Vichuquén) salvo indicación. Se detallan sin omisiones:**

- Monitoreo ANAM — campaña de mayo 2026 (260522.xlsx): 160 registros de laboratorio, 10 estaciones, 17 variables (muestreo 22-05-2026).
- Monitoreo ANAM — serie consolidada 2015–2026 (Vichuquen\_Base\_Completa\_2015\_2026.xlsx): 4 sectores, 21 variables, 760 registros de promedios anuales.
- Línea base ambiental DVS Tecnología S.A. (dic 2025): 18 estaciones (15 lago, 3 estero), perfiles superficie/media/fondo, sedimentos y ADN ambiental (eDNA).
- Red oficial de monitoreo de lagos DGA (desde 2013; Minuta DCPRH N°27, verano 2025, y series previas N°17/2015, N°10/2023, N°2/2025): campañas estacionales verano/invierno; 3 puntos del lago × 3 estratos + Estero Llico y Estero Vichuquén; perfiles con sonda (T, conductividad, pH, OD, turbidez), clorofila, fósforo, ortofosfato, sílice, nitrógeno, Secchi y fitoplancton. Carpeta “dga”.
- Hidrología y niveles — carpeta “Hidrodinamia UCLV”: series diarias de nivel (m MNRS) y precipitación 2017–2025; serie semanal de cotas 2015–2026 (hoja “Niveles Lago”); registro de aperturas de la barra 2015–2023; parámetros morfométricos (hoja “Datos Generales Cotas”: superficie 13,89 km<sup>2</sup> (incluye el estero)); planillas anuales de precipitaciones/niveles.



- Estudio limnológico EULA-Chile (Universidad de Concepción): Informe Final 2016 “Diagnóstico y Caracterización del Estado Trófico del Lago Vichuquén” (cargas de nutrientes, fitoplancton, medidas de recuperación) y referencias al informe limnológico 2008.
- Estudio hidrodinámico CREA – Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC, dic 2019): modelo validado, topo-batimetría, perfiles de salinidad/OD (haloclina 10–15 m), propuesta de manejo con compuertas. Carpeta “Agua del algo”.
- Estudio GHD “Análisis Desembocadura Estero Llico” (para la Dirección de Obras Portuarias, MOP): alternativas de obra, sistema de control de nivel (compuerta Rubber Dam), protocolo de apertura/cierre. Carpeta “RECURSO de protección” / “GHD”.
- Expediente de ingeniería OITEC “Pretil Fusible de la Desembocadura del Estero Llico” (Municipalidad de Vichuquén, Rev 1, abril 2026; expediente DGA VP-0701-319): memoria y anexos de topobatimetría, hidrología, modelación hidráulica HEC-RAS 2D, marea/oleaje, mecánica de suelos y sedimentos, reglas limnimétricas, planos y documentación legal; presentado bajo los arts. 41 y 171 del Código de Aguas. Carpeta “OITEC”.
- Informe INFOR (Instituto Forestal, 27-11-2025) “Diagnóstico y propuesta para un plan de restauración de la cuenca del complejo lacustre Llico-Vichuquén”: marco de restauración, “Acción Madre” (regulación lago–mar), Ley 21.600 (Área Degradada). Carpeta “Agua del algo”.
- TDR / Consulta Pública de Mercado SEREMI MA Maule (abril 2026): “Estudio Integral para la Elaboración del Plan de Descontaminación del Sistema Lacustre del Lago Vichuquén” (12 componentes; base de la NSCA y eventual PDA). Carpeta “Agua del algo”.
- Antecedentes complementarios consultados: RCA de las plantas de tratamiento de Llico y Vichuquén (carpeta “Alcantarillado”); informe de Microcistis 2015 (Seremi Salud); registros de la estación meteorológica del Club Aéreo de Vichuquén (Aeródromo Torca) usados en la calibración hidráulica de OITEC.
- Referencias externas (internet): umbrales de estado trófico (OCDE/Nürnberg), calidad microbiológica (NCh 1333) y cianotoxinas (OMS); literatura científica sobre salinidad y cianobacterias citada en el cuerpo del informe.

## Fuentes externas de nutrientes y sedimentos: el origen en la cuenca

El reservorio de nutrientes que hoy alimenta las floraciones se cargó durante más de un siglo desde la cuenca.

**Uso de suelo forestal.** El uso predominante de la cuenca es la plantación forestal exótica: el monocultivo abarcaba el 65% del área de drenaje y el bosque nativo menos del 1% en 2009 (EULA-Chile 2016, local); hacia 2024, ~68% de la subcuenca estaba en plantaciones y más del 80% de esa superficie había sido talada al menos una vez entre 2001 y 2024 (MapBiomass Chile y Global Forest Watch, internet). La tala rasa expone el suelo y multiplica la erosión: la pérdida de suelo bajo *Pinus radiata* puede ser hasta cuatro veces mayor que bajo bosque nativo (Aburto et al. 2020, internet).

**Cargas de nutrientes y sedimentos.** El aporte difuso de la cuenca al lago —principalmente de usos agrícola y forestal— se estimó entre 5 y 25 toneladas anuales de fósforo y entre 50 y 230 toneladas anuales de nitrógeno para 2009–2015 (EULA-Chile 2016, local). En condiciones invernales se midió un ingreso de 7,3 toneladas diarias de sedimentos por el Estero Vichuquén (EULA-Chile 2008, local). La



sedimentación acumulada ayuda a explicar que la profundidad máxima del lago descendiera de 37 m (1872) a 31 m (2016) (Pedreros et al. 2019, internet).

**Menor aporte de agua dulce.** Las plantaciones de pino y eucalipto reducen la escorrentía media anual —hasta un 40% cuando reemplazan casi por completo al bosque nativo— y afectan especialmente los caudales de verano; la reconversión a bosque nativo los aumenta entre 40% y más de 150% en otoño-verano (Alvarez-Garretón et al. 2019; Lara et al. 2021, internet). Esto conecta el uso de suelo con la menor renovación hídrica y, por esa vía, con la salinización.

**Coherencia con los datos ANAM de mayo 2026.** Los propios resultados ANAM ubican los focos de nutrientes en los esteros afluentes y en el Estero Llico (fósforo total 0,47–0,48 mg/L y nitrógeno 7,9 mg/L frente a la planta de Llico), con turbiedad y sólidos elevados —consistente con un origen en la cuenca— mientras el cuerpo del lago mantiene fósforo disuelto bajo por captación algal y segregación vertical.

*Fuentes — EULA-Chile (2008, 2016) y DGA (Minutas DCPRH): información local (carpeta “UC Vichuquén”). Pedreros et al. (2019), Frugone-Álvarez et al. (2017), Aburto et al. (2020), Alvarez-Garretón et al. (2019), Lara et al. (2021), MapBiomias Chile y Global Forest Watch: literatura científica e imágenes satelitales de acceso público (internet).*

### 3. Resultados de mayo de 2026 — matriz completa (17 parámetros × 10 estaciones)

Las dos tablas siguientes contienen todos los parámetros medidos por ANAM el 22 de mayo de 2026. Se dividen en dos grupos de estaciones para mantener el formato vertical: (A) esteros y Laguna Torca; (B) los 5 puntos del Lago Vichuquén.

**Tabla 3. (A) Esteros y Laguna Torca**

Parámetro (unidad)	Llico planta	Llico Las Conchas	Laguna Torca	Est. Vichuquén	Est. Cardillas
Oxígeno disuelto (mg/L)	6,8	5,8	8,3	6,4	6,1
Aceites y Grasas (A y G) (mg/L)	<4	<4	<4	<4	<4
Conductividad (µS/cm)	13390,05	19234,67	9788,96	166,82	310,16
Coliformes fecales (NMP/100mL)	240,0	7,8	79,0	350,0	170,0
Turbiedad (UNT)	17	36	19	10,0	5,5
Nitrito (NO <sub>2</sub> ) (mg/L)	<0,039	<0,039	<0,039	<0,039	<0,039
Clorofila a (µg/L)	115,54	18,60	38,37	1,12	0,90
Fósforo total (P) (mg/L)	0,4690	0,4830	0,0660	0,1010	0,0660
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	8	3	5	<1	2
NKT (mg/L)	7,880	0,285	<0,010	<0,010	0,011
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	29,90	14,70	104,10	4,40	3,10
Sólidos Suspendidos totales (mg/L)	24	<1	18	<1	<1
Nitrato (NO <sub>3</sub> ) (mg/L)	<0,203	<0,203	<0,203	<0,203	<0,203



Alcalinidad Total (CaCO <sub>3</sub> ) (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	200	177	435	47	43
Nitrógeno total (NT) (mg/L)	7,88	0,29	0,01	<0,01	0,01
Microcistinas (µg/L)	—	—	—	—	—
Microcystis	—	—	—	—	—

**Tabla 4. (B) Lago Vichuquén (5 puntos)**

Parámetro (unidad)	Pto 1: Pta Litre-Pta Barco	Pto 2: Península	Pto 3: Bahía Paula	Pto 4: Bahía Aquelarre	Pto 5: Bahía Totorilla
Oxígeno disuelto (mg/L)	7,3	7,6	8,2	7,9	8,0
Aceites y Grasas (A y G) (mg/L)	<4	<4	<4	<4	<4
Conductividad (µS/cm)	18917,07	18898,86	18976,96	18960,58	18982,58
Coliformes fecales (NMP/100mL)	<1,8	<1,8	33,0	2,0	<1,8
Turbiedad (UNT)	9,5	12	19	19	10,0
Nitrito (NO <sub>2</sub> ) (mg/L)	<0,039	<0,039	<0,039	<0,039	<0,039
Clorofila a (µg/L)	11,42	17,25	110,88	102,61	13,74
Fósforo total (P) (mg/L)	0,0040	0,0060	0,0100	0,0110	0,0030
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	25	8	15	9	8
NKT (mg/L)	0,116	0,010	<0,010	<0,010	0,061
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	136,10	33,90	48,40	26,20	23,80
Sólidos Suspendidos totales (mg/L)	<1	15	30	28	9
Nitrato (NO <sub>3</sub> ) (mg/L)	<0,203	<0,203	<0,203	<0,203	<0,203
Alcalinidad Total (CaCO <sub>3</sub> ) (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	117	116	116	116	116
Nitrógeno total (NT) (mg/L)	0,12	0,01	<0,01	<0,01	0,06
Microcistinas (µg/L)	0,34	0,30	0,33	0,37	0,25
Microcystis	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia

### 3.1 Lectura por parámetro (mayo 2026)

- Oxígeno disuelto (OD): bueno en todo el sistema (5,8–8,3 mg/L); más alto en Laguna Torca y en los puntos del lago, más bajo frente a la población Las Conchas (5,8).
- Aceites y grasas: <4 mg/L (no detectable) en las 10 estaciones.
- Conductividad: contraste neto: esteros afluentes dulces (167–310 µS/cm) vs. lago salobre (~18.900), Estero Llico (13.390–19.235) y Laguna Torca (9.789).



- Coliformes fecales: el lago está limpio (<1,8–33); los focos están en los esteros afluentes (Vichuquén 350, Cardillas 170) y en el Estero Llico frente a la planta (240).
- Turbiedad: mayor frente a Las Conchas (36 UNT) y en puntos del lago (19); esteros afluentes más claros.
- Nitrito (NO<sub>2</sub>) y Nitrato (NO<sub>3</sub>): bajo límite de detección (<0,039 y <0,203 mg/L) en todas las estaciones.
- Clorofila a: el indicador más disperso: muy alta frente a la planta de Llico (115,5) y en Pto 3: Bahía Paula (110,9) y Pto 4: Bahía Aquejarre (102,6); baja en esteros afluentes (~1).
- Fósforo total: alto en Estero Llico (0,47–0,48 mg/L); bajo en el cuerpo del lago (0,003–0,011); intermedio en esteros y Torca (0,07–0,10). Además, por la incompatibilidad con la clorofila, este «total» corresponde en realidad a fósforo disuelto: su bajo valor refleja captación por el fitoplancton y segregación vertical (fondo ~80× mayor), no pobreza de nutrientes.
- DBO: elevada en Pto 1: Pta Litre-Pta Barco (25 mg/L) y Pto 3: Bahía Paula (15); baja en esteros afluentes (<1–2).
- NKT y Nitrógeno total: pico en Estero Llico-planta (7,9 mg/L); resto bajo (≤0,3).
- DQO: no se emplea como indicador analítico (en agua salina el cloruro la eleva y la vuelve no comparable); para la demanda orgánica de oxígeno se usa la DBO. Su valor se conserva solo como dato bruto en las tablas.
- Sólidos suspendidos totales (SST): mayores en puntos del lago (Pto 3: Bahía Paula 30, Pto 4: Bahía Aquejarre 28 y Estero Llico-planta 24); <1 en aguas más claras.
- Alcalinidad total: máxima en Laguna Torca (435 mg CaCO<sub>3</sub>/L); lago y Llico ~116–200; esteros afluentes blandos (43–47).
- Microcistinas y Microcystis: detectadas y “Presencia” en los 5 puntos del Lago Vichuquén (microcistinas 0,25–0,37 µg/L, bajo el umbral OMS de 1 µg/L). Ausentes en los registros del resto de las estaciones. La determinación de ANAM indica solo presencia Microcystis. Un muestreo independiente sugiere Nodularia con nodularina.

En síntesis, mayo 2026 confirma tres patrones: (i) floración algal con cianobacterias en el cuerpo del lago; (ii) carga orgánica y de nutrientes en el Estero Llico por aguas servidas; y (iii) contaminación fecal difusa en los esteros afluentes pese a su buena calidad fisicoquímica.



#### 4. Evolución 2015–2026 — todas las variables, 4 sectores

A continuación, la serie anual por sector de cada variable. Salvo dos excepciones, cada gráfico muestra el promedio anual por sector con su línea de tendencia (2015–2026) y una barra de categorías de referencia. Los gráficos de clorofila-a y de fósforo total se rehicieron con medianas en la ventana de comparación marzo–junio (2018–2026) y tratamiento de censura, porque sus medias de todos los meses estaban distorsionadas por estacionalidad, outliers y valores bajo el límite de detección.

Importante sobre las categorías: los umbrales son rangos de referencia, no una norma única aplicable a Vichuquén. Su base es: estado trófico = umbrales OCDE/Nürnberg; calidad microbiológica = NCh 1333 (riego/contacto); microcistinas = guía recreativa OMS; el resto son rangos de trabajo de uso limnológico general. La conductividad se evalúa como desviación respecto de agua dulce, teniendo presente que el Lago Vichuquén es naturalmente salobre. Estos cortes sirven para lectura rápida y deben validarse con la norma secundaria de calidad (NSCA) cuando esté disponible.

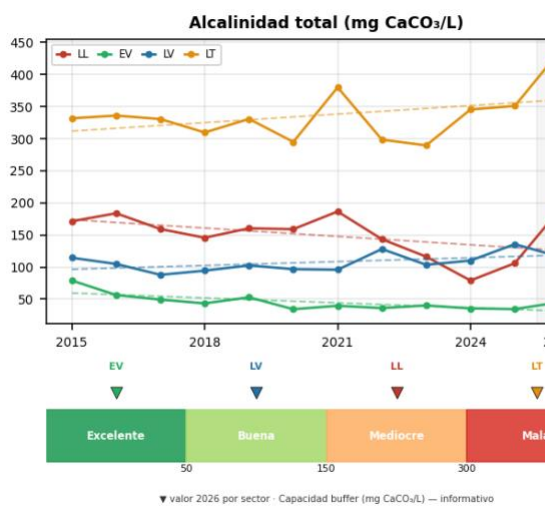
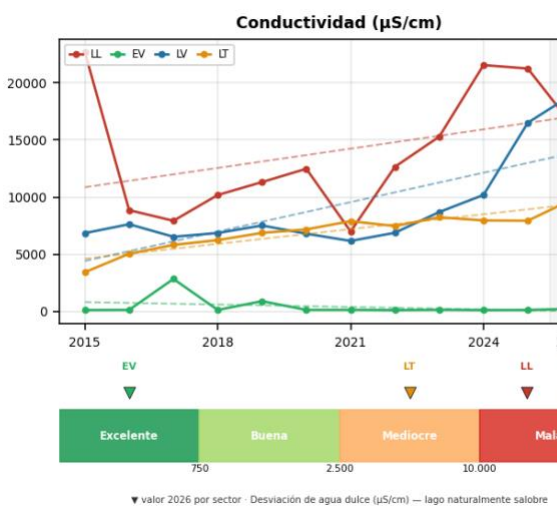
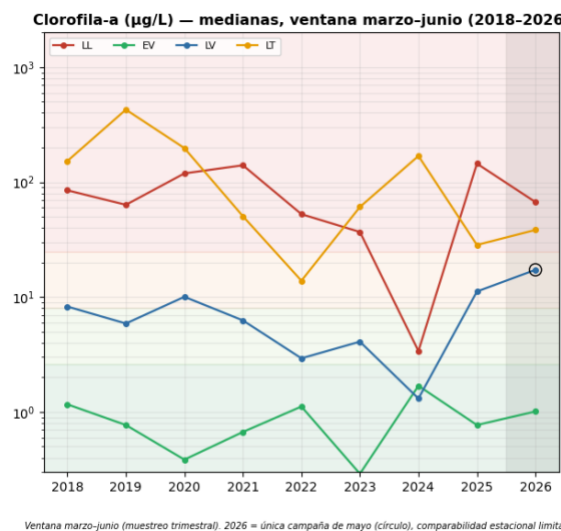
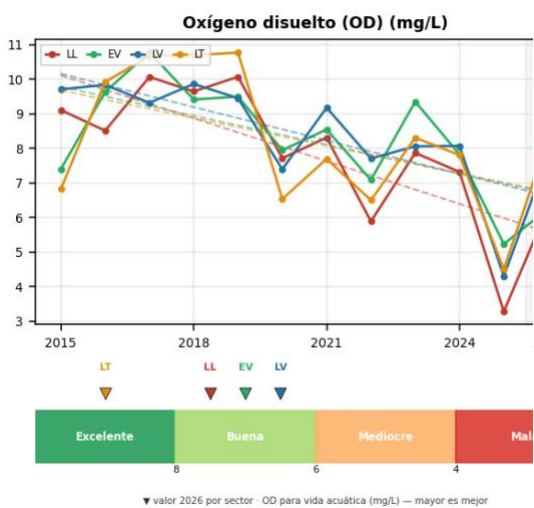


Figura 5. Oxígeno disuelto (OD) por sector, 2015–2026.

Figura 7. Clorofila-a por sector (medianas, ventana marzo–junio, 2018–2026).



Figura 6. Conductividad por sector, 2015–2026.

Figura 8. Alcalinidad total por sector, 2015–2026.

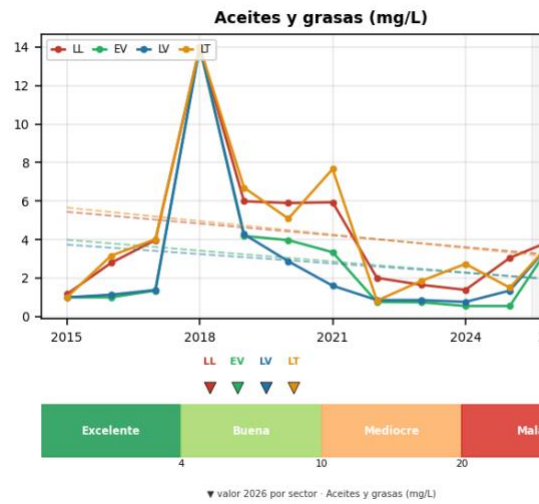
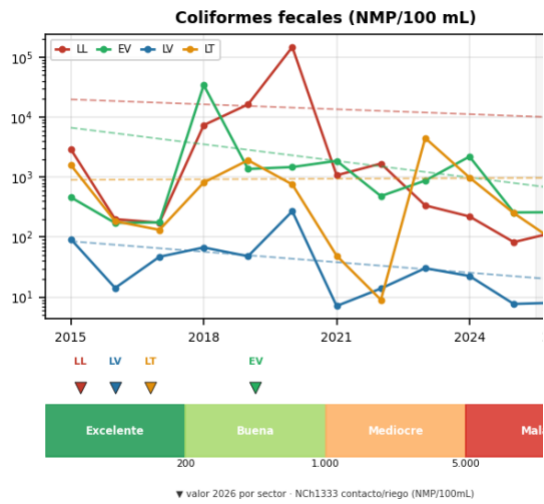


Figura 9. Coliformes fecales por sector, 2015–2026.

Figura 10. Aceites y grasas por sector, 2015–2026.

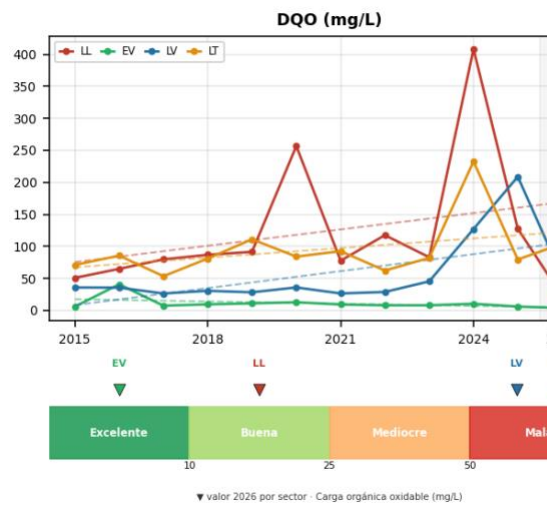
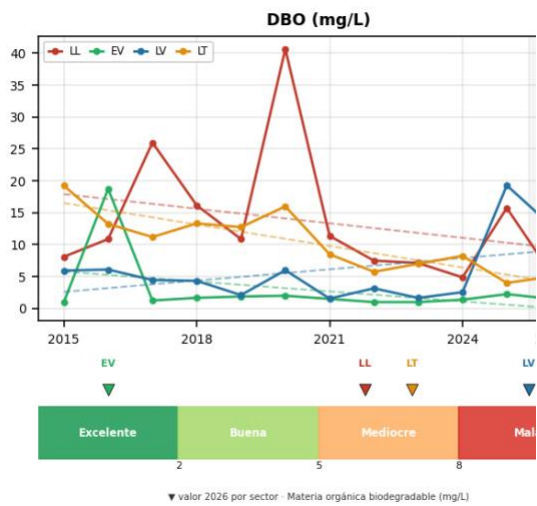


Figura 11. DBO por sector, 2015–2026.

Figura 12. DQO por sector, 2015–2026 (dato bruto; no usado analíticamente).

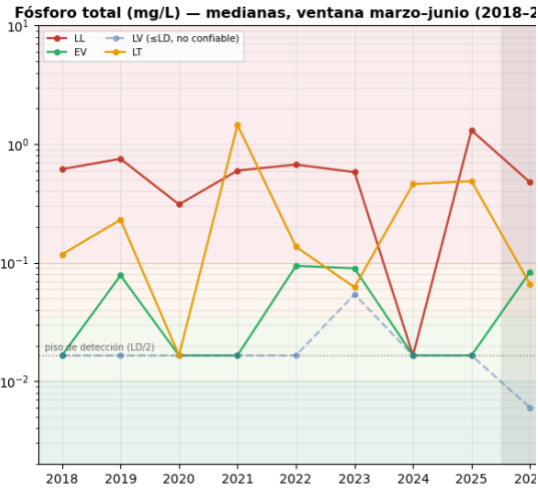


Figura 13. Fósforo total por sector (medianas, ventana marzo-junio, 2018–2026).

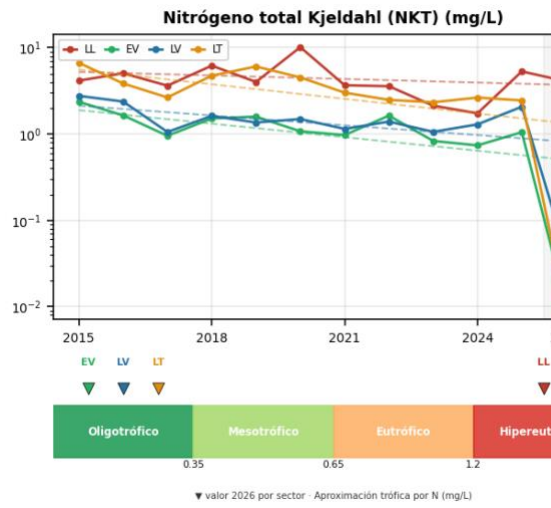


Figura 14. Nitrógeno total Kjeldahl (NKT) por sector, 2015–2026.

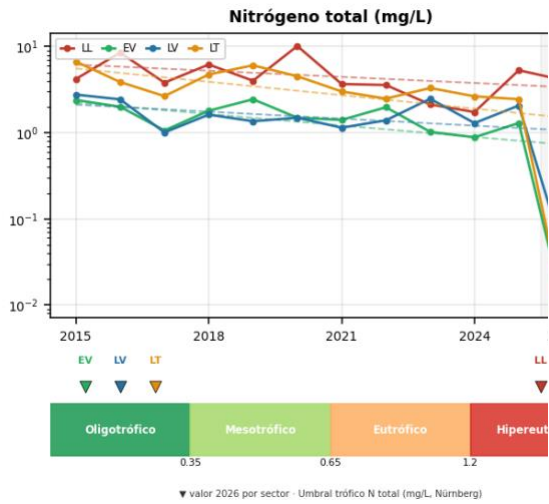


Figura 15. Nitrógeno total por sector, 2015–2026.

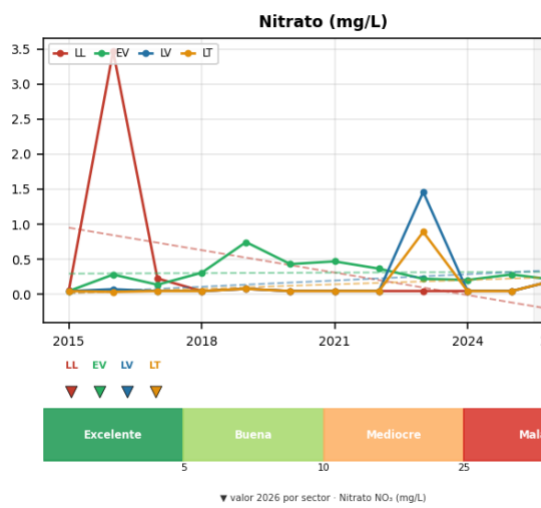
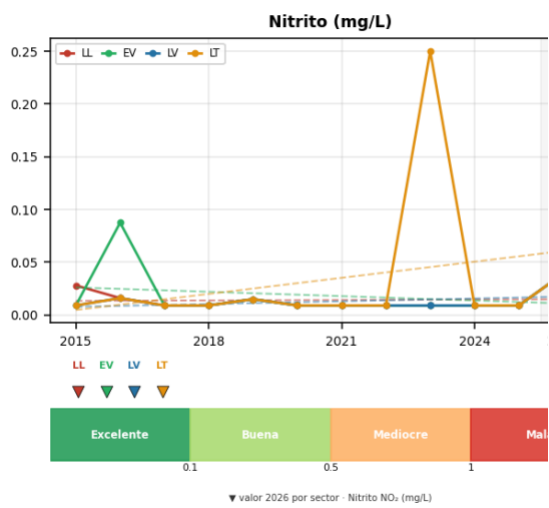
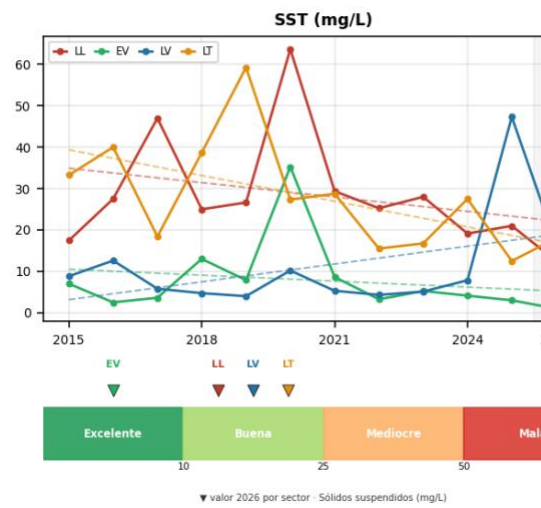
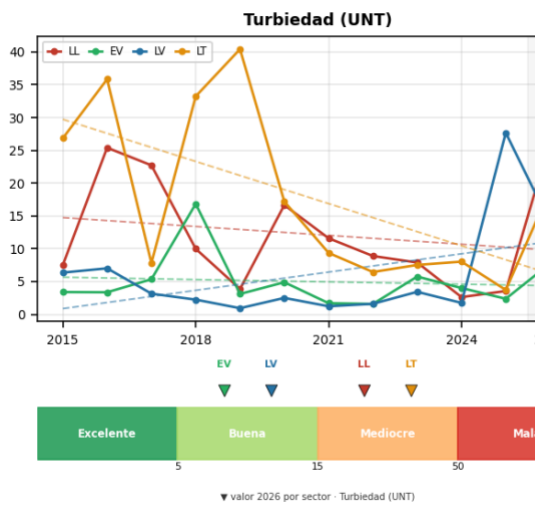


Figura 16. Turbiedad por sector, 2015–2026.

Figura 18. Sólidos suspendidos totales (SST) por sector, 2015–2026.

Figura 17. Nitrito por sector, 2015–2026.

Figura 19. Nitrato por sector, 2015–2026.



## 5. Análisis detallado de resultados comparados en el tiempo

Esta sección profundiza la comparación interanual 2015–2026. Las tendencias se estiman por regresión lineal sobre los promedios anuales; “r” es el coeficiente de correlación con el tiempo ( $|r| \rightarrow 1$  indica tendencia sostenida). Nota: el promedio 2026 proviene de una sola campaña (mayo); en variables de nitrógeno, varios valores de mayo quedaron bajo el límite de detección, lo que puede acentuar artificialmente algunas pendientes (se señala con \*).

### 5.1 Tendencias sostenidas de largo plazo (2015–2026)

Variables con tendencia temporal marcada ( $|r| > 0,6$ ), ordenadas por fuerza de la tendencia:

**Tabla 5. Variables con tendencia temporal marcada ( $|r| > 0,6$ ), 2015–2026.**

	Variable	Sector	r (tiempo)	Cambio 2015→2026	Interpretación
↑	Conductividad	Laguna Torca	+0,93	3.440 → 9.789 $\mu\text{S/cm}$	Salinización sostenida
↑	Conductividad	Lago Vichuquén	+0,74	6.860 → 18.947 $\mu\text{S/cm}$	Salinización acelerada
↓	Oxígeno disuelto	Estero Llico	-0,75	9,1 → 6,3 mg/L	Pérdida de oxigenación
↓	Oxígeno disuelto	Lago Vichuquén	-0,74	9,7 → 7,8 mg/L	Pérdida de oxigenación
↓	DBO	Laguna Torca	-0,86	19,2 → 5 mg/L	Menos carga biodegradable
↓	Alcalinidad total	Est. Vichuquén+Cardillas	-0,71	79 → 45 mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$	Agua más blanda
↑	DQO	Lago Vichuquén	+0,58	36 → 54 mg/L	Más materia orgánica
↓	Clorofila-a	Estero Llico	-0,65	263 → 67 $\mu\text{g/L}$	Menos biomasa algal (sigue alta)
↓	N total / NKT	Laguna Torca	-0,74	6,7 → ~0* mg/L	*2026 bajo LOD (dato puntual)
↓	N total / NKT	Est. Vichuquén+Cardillas	-0,76	2,4 → ~0* mg/L	*2026 bajo LOD (dato puntual)

Dos señales dominan el largo plazo (incluyendo 2026): (a) salinización del Lago Vichuquén y de la Laguna Torca, y (b) caída del oxígeno disuelto. Como contrapeso, varias variables de carga (DBO, alcalinidad, clorofila del Llico) descienden, lo que sugiere mejoras parciales. Las fuertes caídas de nitrógeno marcadas con \* dependen de valores de mayo 2026 bajo el límite de detección y deben confirmarse con más campañas.

### 5.2 Estado trófico del Lago Vichuquén, año a año

Clasificación por clorofila-a (umbrales OCDE: oligotrófico <2,6; mesotrófico 2,6–8; eutrófico 8–25; hipereutrófico >25  $\mu\text{g/L}$ ):

**Tabla 6. Estado trófico del Lago Vichuquén por año (clorofila-a).**

Año	Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ )	Estado trófico
2015	30,4	hipereutrófico
2016	8,4	eutrófico



2017	12,2	eutrófico
2018	5,8	mesotrófico
2019	6,2	mesotrófico
2020	11,9	eutrófico
2021	7,2	mesotrófico
2022	4,2	mesotrófico
2023	4,7	mesotrófico
2024	4,8	mesotrófico
2025	628,4	HIPEREUTRÓFICO (media artefactual; floración extrema, ver §2.4)
2026 (mayo)	51,2	hipereutrófico

Por mediana en la ventana de comparación (marzo–junio), el cuerpo del lago se mantiene en rango mesotrófico (3–11  $\mu\text{g/L}$ ) durante toda la serie 2018–2026, sin alcanzar hipereutrofia sostenida; los valores más altos son 2025 ( $\approx 11$ ) y mayo 2026 ( $\approx 17$ , eutrófico). La tendencia creciente de clorofila no es robusta (desaparece en toda ventana estacional). La señal es de floraciones episódicas sobre un fondo mesotrófico, no de hipereutrofia sostenida de la columna de agua.

Matiz necesario sobre los nutrientes. La clasificación trófica se apoya en la clorofila, no en el fósforo de superficie, y por una razón de fondo: el «fósforo total» que reporta ANAM en el lago (0,003–0,017  $\text{mg/L}$ ) es estequiométricamente incompatible con la clorofila medida (la biomasa de mayo 2026 exige  $\sim 135 \mu\text{g P/L}$  y el «total» reportado es  $\sim 10$ ), por lo que en realidad corresponde a fósforo disuelto/filtrado, no al total que incluye la biomasa. Ese P disuelto bajo en superficie NO indica un lago pobre en fósforo: refleja que las floraciones lo captan y lo retienen en biomasa, mientras el sistema concentra fósforo en el sedimento y en el fondo —el gradiente superficie–fondo de ortofosfato es  $\sim 80\times$  (DVS:  $\sim 10 \mu\text{g/L}$  en superficie vs  $\sim 800$  en el fondo)—. En suma, el fósforo de superficie no es informativo del estado trófico: el sistema no es oligotrófico, sino de reciclaje interno con fuerte segregación vertical del fósforo.

Contexto de largo plazo: el deterioro no es nuevo. El estudio limnológico EULA-Chile ya documentó eutrofización y alta sedimentación en 2008; en 2015 la autoridad sanitaria prohibió el uso recreativo; el Informe Final EULA 2016 confirmó la condición eutrófica–hipereutrófica; y la línea base DVS 2025 la describe como hipereutrofia estructural. La serie ANAM se inserta así en una trayectoria de degradación continua de más de 15 años, con una aceleración reciente (2025–2026) ligada a la salinización y la megasequía.

### 5.3 Salinización: el cambio estructural del lago

La conductividad del Lago Vichuquén se mantuvo plana en  $\sim 6.000\text{--}7.000 \mu\text{S/cm}$  durante 2015–2022 y luego se disparó: 8.693 (2023)  $\rightarrow$  10.189 (2024)  $\rightarrow$  16.499 (2025)  $\rightarrow$  18.947 (mayo 2026). Es decir, se multiplicó  $\times 2,76$  respecto de 2015 y  $\times 2,75$  solo desde 2022. La Laguna Torca muestra el mismo patrón de forma más gradual ( $r=0,93$ ; 3.440  $\rightarrow$  9.789). Los esteros afluentes siguen sin afectación por aumento de la salinidad (167–310  $\mu\text{S/cm}$ ), lo que confirma que el fenómeno ocurre en los cuerpos



detenidos y no es un error de medición. La causa más probable es un desbalance hídrico (menor recarga de agua dulce, mayor evaporación y/o intrusión salina ligada al manejo de la barra de Llico). El cambio es estadísticamente significativo por Mann-Kendall ( $Z=2,40$ ;  $p<0,05$ ; pendiente de Sen  $\approx 1.160 \mu\text{S}/\text{cm}\cdot\text{año}$ ); más que una tendencia lineal, es una aceleración concentrada entre 2023–2026.

#### 5.4 Carga orgánica y oxígeno: señales convergentes

La DBO del lago —indicador de demanda bioquímica de oxígeno— es baja en la mayor parte de la serie ( $\approx 0,5\text{--}3 \text{ mg/L}$ ; el 51% de los registros  $\leq 2 \text{ mg/L}$ , rango de aguas naturales) y solo se eleva en la campaña de mayo 2026 ( $8\text{--}25 \text{ mg/L}$ ), durante la floración; en la ventana marzo–junio no muestra tendencia robusta ( $r\approx 0,2$ ). El oxígeno disuelto de superficie cae en años recientes (mínimo en 2025), aunque puede estar afectado por sobresaturación durante floraciones. La DQO no se usa como indicador: en agua salina se afecta por el cloruro (su mediana pasa de  $\sim 35$  a  $\sim 110 \text{ mg/L}$ , pero con máximos de hasta  $1.080 \text{ mg/L}$ ), lo que la hace no comparable; se conserva solo como dato bruto.

#### 5.5 Relación salinidad–clorofila: evidencia y fundamentos biológicos

Observación en los datos. En el Lago Vichuquén, conductividad y clorofila-a covarían positivamente a escala anual, pero la asociación es frágil: con datos limpios (medianas, ventana marzo–junio) la correlación de Pearson es  $\sim 0,7$  (detrendada  $\sim 0,8$ ), pero la de rango (Spearman) es solo  $\sim 0,35$  y casi todo el peso recae en 2025–2026 ( $n=9$ , alta influencia). No constituye prueba de causalidad; el respaldo principal es biológico (literatura, abajo).

Fundamentos biológicos (literatura científica). La hipótesis de que el aumento de salinidad favorece el dominio de cianobacterias tiene respaldo en la literatura:

- Halotolerancia diferencial: bajo salinización del agua dulce, las cianobacterias tienden a ganar ventaja competitiva sobre las algas verdes (clorofitas), más halosensibles; al subir la sal, la comunidad puede desplazarse de dominancia de clorofitas a cianófitas, elevando el riesgo de floraciones tóxicas (Osburn et al., 2023; estudios de halotolerancia bajo salinización, 2024–2025).
- Adaptación de *Microcystis* a aguas salobres: *Microcystis aeruginosa*, típicamente dulceacuícola, puede aclimatarse a agua salobre acumulando osmolitos compatibles —notablemente sacarosa, por transferencia horizontal reciente de genes (*sppA*, *spsA*, *susA*)— y lípidos insaturados, lo que explica su tolerancia salina (Tang et al., PNAS-adyacente 2018; AEM 2019).
- Tolerancia con costo: a salinidades altas, la tasa de crecimiento y de producción de microcistinas de *Microcystis* disminuye, pero el organismo tolera concentraciones de hasta  $\sim 7 \text{ g/L}$  de NaCl o más. Así, en rangos salobres puede persistir mientras competidores menos tolerantes decaen (AEM 2019).
- Hidrología y estabilidad de la columna: la reducción del nivel de agua (sequía) favorece floraciones de cianobacterias en lagos someros, asociada a mayor estabilidad de la columna y a la flotabilidad (vacuolas de gas) que da ventaja a las cianobacterias (Bakker & Hilt, Hydrobiologia 2016).

Lectura integrada para Vichuquén. Estos mecanismos encajan con lo observado: un lago naturalmente salobre que se saliniza aún más ( $\approx 19.000 \mu\text{S}/\text{cm}$  en 2026, equivalente a varios  $\text{g/L}$ ) generaría un sistema ambiental que penaliza a las algas verdes y deja espacio competitivo a cianobacterias halotolerantes como *Microcystis*; con nutrientes suficientes, el resultado es más biomasa cianobacteriana y, por tanto, más clorofila.



### 5.5.1 Contraste con la dinámica de la barra de Llico

La barra de arena de Llico es la compuerta hidráulica del sistema: conecta el lago con el mar a través del estero. Según los registros locales de niveles (carpeta dga, “General Niveles Lago.xlsx”), la apertura de la barra dreña el lago (el nivel baja hasta ~2 cm/h y el estero sube ~11 cm por marejada y alta marea mientras está abierta), mientras que la recarga de agua dulce depende de la lluvia y de los esteros afluentes (“por cada mm que llueve el lago sube 5–6 mm”; “los esteros alimentan el lago hasta 72 h después de la lluvia”). De este balance se desprende un mecanismo plausible de salinización: en años secos, con menor aporte de los esteros y/o un manejo de la barra que permita mayor intercambio con el mar en marea alta, el agua dulce no compensa la evaporación ni la entrada salina, y la conductividad sube —justo lo observado desde 2023.

Confirmación con datos. El informe de línea base DVS (dic 2025) atribuye la salinización a la intrusión marina posterior al tsunami de 2010 y a la intervención en la barra de Llico, agravadas por la megasequía. Esa atribución ahora puede respaldarse con datos: la carpeta Hidrodinamia UCLV aporta las series diarias de nivel y precipitación (2017–2025) y el registro de aperturas de la barra (2015–2023). El análisis hidrodinámico se desarrolla en el punto siguiente.

### 5.5.2 Hidrodinámica con datos: lluvia, nivel del lago y aperturas de la barra

Con las series diarias de la carpeta Hidrodinamia UCLV es posible documentar el ciclo hidrológico que regula al sistema. El nivel del lago (medido en metros sobre el nivel de referencia, m MNRS) sube con las lluvias de otoño–invierno y baja cuando el agua sale al mar tras la apertura de la barra de Llico. Según el protocolo de la Dirección de Obras Portuarias, la barra se abre cuando el nivel alcanza la cota +1,95 m (la cota de inundación de la primera vivienda de Llico es +2,45 m); en años secos el nivel no alcanza ese umbral y la barra no se abre.

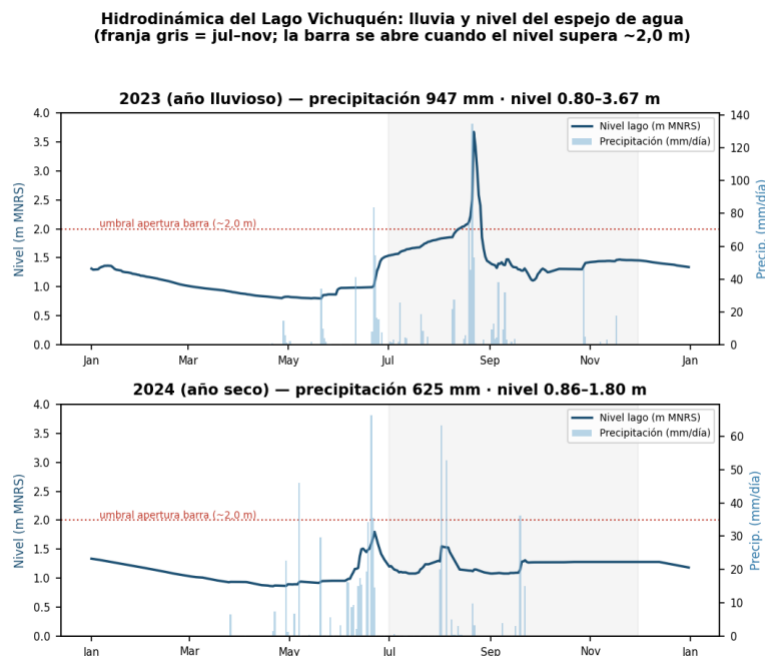


Figura 20. Hidrodinámica: precipitación y nivel del lago (2023 vs 2024).



El contraste 2023 vs 2024 es elocuente: en 2023 (947 mm) las lluvias de agosto llevaron el nivel a 3,67 m y, tras la apertura, descendió a ~1,3 m; en 2024 (625 mm) el nivel se mantuvo todo el año bajo 2,0 m, y en 2025 (109 mm hasta mayo) el sistema quedó en cotas muy bajas (0,68–1,18 m). Esto evidencia, con datos locales, que la recarga depende directamente de la lluvia y que la salida al mar se produce por la apertura de la barra.

Según la Minuta DGA DCPRH N°27 (imágenes Copernicus), el estado de la barra en fechas de monitoreo fue: febrero 2023 cerrada, febrero 2024 cerrada, octubre 2024 abierta y marzo 2025 cerrada.

**Tabla 7. Registro de aperturas de la barra de Llico (2015–2023):**

Año	Aperturas	Cota (m MNRS)	Observación / precipitación
2015	3 aperturas	2,37	Año lluvioso
2016	No se abrió	2,01 (máx.)	No alcanzó el umbral
2017	3 aperturas	2,34	Año lluvioso (≈1.998 mm, registro parcial)
2018	No se abrió	1,48 (máx.)	Año seco (129 mm)
2019	No se abrió	1,10 (máx.)	Año seco (registro de nivel incompleto)
2020	1 apertura	2,40	636 mm
2021	No se abrió	1,89 (máx.)	390 mm
2022	3 aperturas	2,16	521 mm (2 cierres naturales)
2023	≥1 apertura	2,11	947 mm (año muy lluvioso)

Lectura: la barra se abre solo en años en que la lluvia eleva el nivel por sobre ~2,0 m (2015, 2017, 2020, 2022, 2023); en los años secos (2016, 2018, 2019, 2021) el lago no alcanza el umbral, no se abre y permanece en cotas bajas, sin “lavado” del sistema. Esta es la base hidrológica de la salinización: en períodos secos disminuye el aporte de agua dulce de la lluvia y de los esteros, y el lago —en cotas bajas y con intercambio marino a través de la barra— concentra sales. Concuera con la atribución del informe DVS (intrusión marina post-tsunami 2010 + barra + megasequía) y con el salto de conductividad observado en la serie ANAM desde 2023.

Cruce cuantitativo nivel–salinidad. Con la serie semanal de cotas del lago (hoja “Niveles Lago”, 2015–2026) se calculó el nivel medio anual y se cruzó con la conductividad de la serie ANAM. El resultado confirma una relación inversa: a menor nivel del lago, mayor salinidad (coeficiente de Pearson  $r = -0,65$  para el Lago Vichuquén y  $r = -0,56$  para la Laguna Torca;  $n = 12$  años). Además, el nivel medio anual del lago muestra una tendencia descendente ( $\approx -0,04$  m/año;  $r = -0,55$ ), con los valores más bajos en 2025 (1,01 m) y 2026 (0,67 m, año parcial), los mismos años del salto de conductividad. Esto aporta respaldo cuantitativo, con datos locales, al mecanismo: en años secos el lago baja, no se “lava” por apertura de barra y concentra sales.

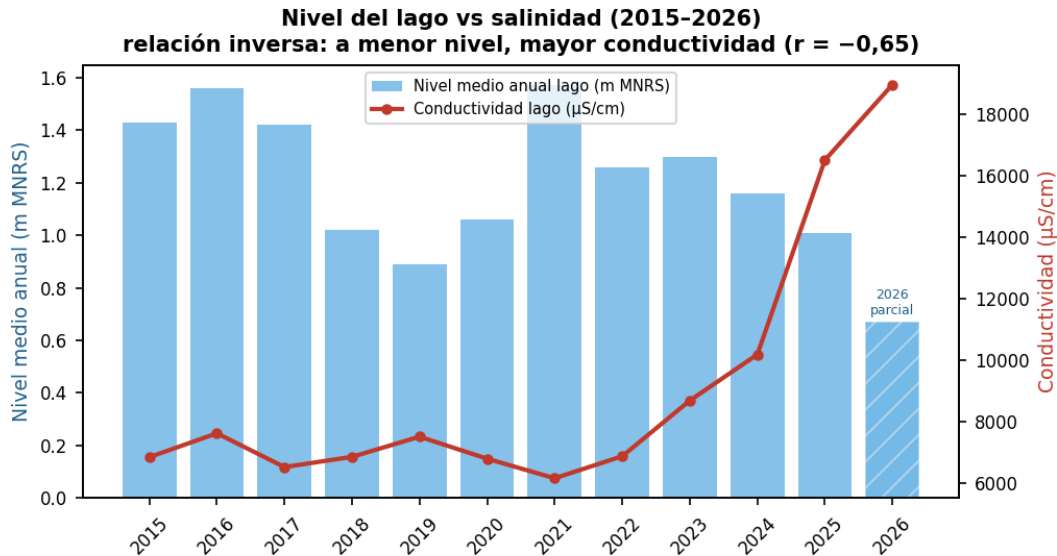


Figura 21. Nivel medio anual del lago frente a conductividad (relación inversa).

Niveles medios anuales del lago (m MNRS): 2015 1,43 · 2016 1,56 · 2017 1,42 · 2018 1,02 · 2019 0,89 · 2020 1,06 · 2021 1,57 · 2022 1,26 · 2023 1,30 · 2024 1,16 · 2025 1,01 · 2026 0,67 (parcial, 24 semanas). La cota de referencia de conexión con Torca es 1,72 m; el lago lleva la mayor parte del período por debajo de ese umbral, lo que mantiene a la Laguna Torca desconectada y dependiente de su propio balance.

Antecedente hidrodinámico independiente (UCSC, 2019). El estudio hidrodinámico del CREA–Universidad Católica de la Santísima Concepción (diciembre 2019), con modelo validado y campañas de invierno/verano 2018–2019, ya describía la estratificación salina del lago: una haloclina entre ~10 y 15 m de profundidad, con agua superficial de ~4 psu y de fondo >7,5 psu. Comparado con la línea base DVS (2025), que ubica la oxiclina más somera (5–8 m), se confirma un agravamiento de la estratificación en el tiempo. El mismo estudio atribuye la salinización, en parte, al hundimiento de la costa del Maule por el terremoto de 2010, y advierte que abrir la barra de forma permanente introduciría agua de mar (35 psu) a la capa profunda, agravando la anoxia; por ello recomienda un manejo regulado con compuertas en la conexión Estero–Lago. En la misma línea, el estudio GHD para la Dirección de Obras Portuarias propuso instalar un sistema de control de nivel en el Estero Llico — un vertedero con compuerta inflable tipo “Rubber Dam” (regulable, 80 m), fijada a la cota +1,4 m para impedir la entrada de agua de mar— como solución estructural a la inundación y a la salinización. El informe del Instituto Forestal (INFOR, nov 2025) refuerza esta línea: designa la regulación científica de la conectividad lago–mar (el sistema de control de nivel de la barra) como la “Acción Madre” del plan de restauración, sin la cual “ninguna otra medida tendrá la efectividad requerida”, y propone declarar la cuenca como Área Degradada (Ley 21.600). Esta solución ya dejó de ser solo una recomendación: la Municipalidad de Vichuquén ingresó a la DGA el proyecto de ingeniería “Pretil Fusible de la Desembocadura del Estero Llico” (arts. 41 y 171 del Código de Aguas, expediente VP-0701-319, Rev 1 de abril 2026). Su protocolo de operación fija la apertura a +1,95 mNRS y cierres diferenciados (invierno +1,45; verano +1,85 mNRS) para evacuar crecidas e impedir el ingreso de agua de mar; la modelación HEC-RAS 2D (calibrada con la crecida de agosto 2023) confirma la reducción de la cota máxima y que la Laguna Torca se acopla sobre +2,2 mNRS. El expediente aporta además



topobatemetría (lago ~13 km<sup>2</sup>, ~30 m de profundidad), hidrología (evento de diseño de tormenta de 20 días), granulometría (D50 = 0,59 mm) y dos reglas limnimétricas (puente Las Conchas y Playa Paula), cerrando varias brechas de datos físicos del sistema. El evento extremo de agosto de 2023 usado para calibrar el modelo (8 días, ~320 mm, cota máxima +3,672 mNRS) se reconstruyó con datos de la estación del Club Aéreo de Vichuquén aportados por la propia Unión Comunal. También señala el alto consumo hídrico de la silvicultura de la cuenca (>70% del área) como factor del déficit de agua.

### 5.5.3 Cantidad de agua del lago: tendencia y balance de volúmenes

A partir de la columna “cota promedio semanal” (nivel medio anual del lago) se analizó estadísticamente la tendencia de la cantidad de agua. Valores del nivel medio anual (m MNRS): 1,43 (2015); 1,56 (2016); 1,42 (2017); 1,02 (2018); 0,89 (2019); 1,06 (2020); 1,57 (2021); 1,26 (2022); 1,30 (2023); 1,16 (2024); 1,01 (2025); 0,67 (2026, parcial).

#### Resultado del análisis de tendencia (cota promedio semanal):

- Serie 2015–2026 (incluye 2026 parcial): regresión lineal con pendiente  $-4,2$  cm/año ( $R^2=0,30$ ;  $r=-0,55$ ;  $p=0,037$ ); pendiente de Sen (robusta)  $-4,4$  cm/año; test de Mann-Kendall  $Z=-1,71$  ( $p=0,086$ ). Tendencia decreciente, estadísticamente marginal.
- Serie 2015–2025 (solo años completos): pendiente  $-2,6$  cm/año ( $R^2=0,14$ ;  $p=0,23$ ); Mann-Kendall  $Z=-1,09$  ( $p=0,28$ ). La señal de descenso es más débil y no significativa al excluir 2026.
- Lectura honesta: existe una tendencia a la baja en el nivel medio del lago, pero está fuertemente influida por los años muy secos 2025–2026; con los años completos la evidencia es sugerente, no concluyente. Se requieren más temporadas para confirmarla.

Conversión a volumen. Con la superficie del lago (13,89 km<sup>2</sup>, hoja “Datos Generales Cotas”), una variación de 1 m de nivel equivale a  $\approx 13,9$  millones de m<sup>3</sup> (Mm<sup>3</sup>). El “agua almacenada” por encima del nivel de referencia (cota $\times$ superficie) pasó de  $\approx 20$  Mm<sup>3</sup> (2015) a  $\approx 14$  Mm<sup>3</sup> (2025) y  $\approx 9$  Mm<sup>3</sup> (2026 parcial), con una tendencia de aproximadamente  $-0,4$  a  $-0,6$  Mm<sup>3</sup>/año. Nota: el volumen total del lago es del orden de 210 Mm<sup>3</sup> (DVS, prof. media 17,1 m); lo que fluctúa entre años es la capa superficial representada en el gráfico. Nota: esta superficie de 13,89 km<sup>2</sup> (hoja de cotas) difiere de los 12,5 km<sup>2</sup> del levantamiento batimétrico de EULA usado en la morfometría (§2.6); la diferencia se debe a que los 13,89 km<sup>2</sup> incluyen la superficie del estero, mientras que los 12,5 km<sup>2</sup> corresponden solo al cuerpo del lago (batimetría EULA). Para morfometría y carga interna se usa 12,5 km<sup>2</sup>; aquí se conserva 13,89 km<sup>2</sup> solo para la conversión nivel–volumen de la serie de cotas.

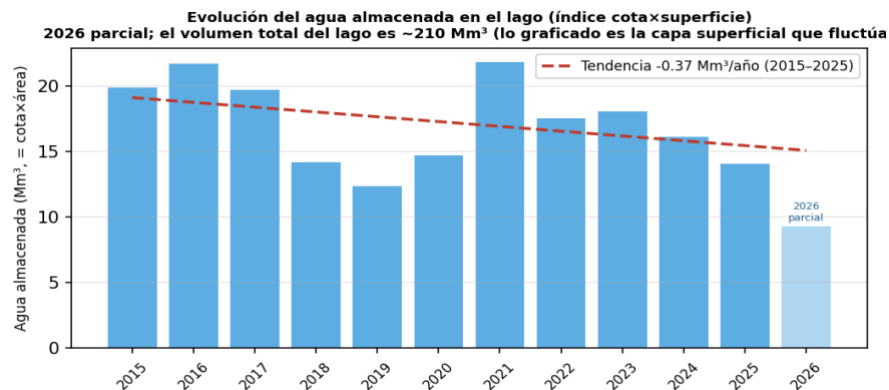




Figura 22. Agua almacenada sobre el nivel de referencia (cota × superficie), 2015–2026.

Estimación de agua que entra y sale cada año. Usando la variación diaria del nivel ( $\Delta V = \text{superficie} \times \Delta \text{nivel}$ ) sobre las series diarias, se estima el agua que ingresa (suma de las subidas de nivel: lluvia y aporte de esteros) y la que sale (suma de las bajadas: apertura de la barra hacia el mar y evaporación):

Tabla 8. Estimación de agua que entra y sale del lago por año.

Año	Tipo	Entra (Mm <sup>3</sup> )	Sale (Mm <sup>3</sup> )	Cobertura
2018	Seco	12,8	11,0	365 días
2020	Medio	43,5	29,7	363 días
2021	Seco	10,3	12,3	365 días
2022	Medio	31,7	34,3	365 días
2023	Muy lluvioso	50,7	50,4	365 días
2024	Seco-medio	25,2	27,3	366 días
2017	—	61,4	61,8	parcial (245 d)
2025	Muy seco	1,3	7,4	parcial (146 d)

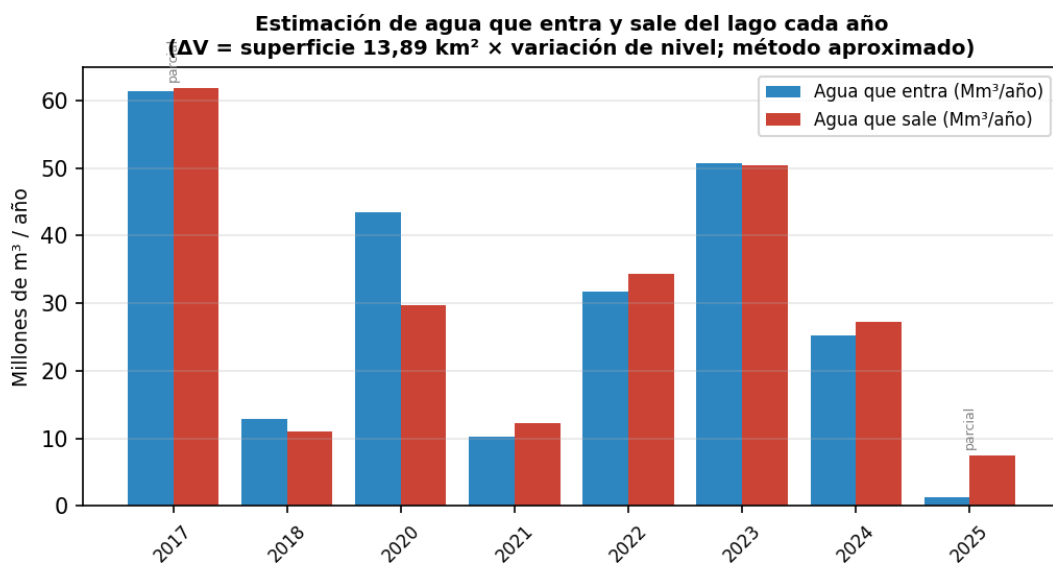


Figura 23. Agua que entra y sale del lago por año (estimación).

Lectura: el agua movilizada cada año sigue de cerca a la lluvia: en 2023 (muy lluvioso) entraron y salieron del orden de 50 Mm<sup>3</sup>, mientras que en años secos como 2018 o 2021 apenas ~10–13 Mm<sup>3</sup>. En condiciones normales el sistema tiende al equilibrio anual (entra ≈ sale), porque el lago vuelve a cotas similares; el saldo neto refleja el cambio de almacenamiento del año. La caída del agua almacenada y la menor circulación en años secos son coherentes con la salinización (menos recambio de agua dulce).



## 5.6 Calidad microbiológica: de crisis a control

Los coliformes fecales muestran la evolución más favorable. El Estero Llico pasó de un pico extremo de 147.312 NMP/100 mL en 2020 (y 16.300 en 2019) a  $\approx 124$  en mayo 2026. Cada sector tuvo su episodio crítico —Estero Vichuquén+Cardillas 34.267 (2018); Laguna Torca 4.479 (2023)— pero todos están hoy en valores bajos. El Lago Vichuquén ha sido siempre el sector sanitariamente más limpio (pico de apenas 270 en 2020; 8 en 2026). La mejora del Estero Llico es coherente con la gestión de la planta de tratamiento de aguas servidas.

## 5.7 Confirmación con la línea base ambiental DVS (diciembre 2025)

El informe de DVS Tecnología S.A. (campaña 16–18 dic 2025; 18 estaciones; superficie, capa media y fondo; sedimentos y ADN ambiental) aporta evidencia medida que confirma y profundiza el diagnóstico de esta serie:

- Salinización con causa identificada: la conductividad superficial pasó de 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 2008 a 20.391  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 2025, atribuida a la intrusión marina post-tsunami 2010 y a la dinámica de la barra de Llico, agravadas por la megasequía. Coincide con la tendencia ascendente de conductividad de la serie ANAM.
- Estratificación halina permanente (haloclina/picnoclina): separa un epilimnion oxigenado de un hipolimnion anóxico. La oxiclina se adelgazó desde 8–10 m (históricos) a 5–8 m en 2025.
- Anoxia de fondo: oxígeno disuelto en el fondo de 1,3 mg/L promedio (mínimo 0,2), con olor sulfuroso y bacterias sulfato-reductoras; en superficie, sobresaturación (112 %). Da contexto a la caída de OD observada en la serie ANAM.
- Carga interna de fósforo: el fósforo total sedimentario subió de 1,76 g/kg (2016) a 6,9–10 g/kg (2025) y el ortofosfato de fondo a 1,3 mg/L (máx 2,4). El fondo actúa como reservorio que realimenta la eutrofización.
- Estado trófico: el informe clasifica al sistema en hipereutrofia estructural, perpetuada por la estratificación salina; el estero Llico aparece como hipereutrófico (clorofila promedio 27,3  $\mu\text{g}/\text{L}$ ; DBO promedio 90,8 mg/L).
- Microbiología (ADN ambiental): en el estero Llico domina *Microcystis aeruginosa* (16–35 %), junto con *Enterobacteriaceae* (9 %), *Escherichia coli* (8 %) y *Salmonella enterica* (1 %), señal de aguas residuales. Confirma la presencia de cianobacterias detectada por ANAM en mayo 2026.

### 5.7.1 Estimación gruesa de la carga interna de fósforo (orden de magnitud)

A partir de los datos medidos por DVS (dic 2025) es posible una estimación de orden de magnitud de la carga interna de fósforo, útil para dimensionar el problema. No reemplaza una medición directa.

Mecanismo (EULA-Chile, 2016): en condiciones oxigenadas, el hierro (III) forma fosfato férrico insoluble que queda retenido en el sedimento; bajo anoxia, el Fe(III) se reduce a Fe(II) y libera fosfato hacia la columna de agua. La estratificación salina permanente, al sostener la anoxia de fondo, mantiene activo este «bombeo» interno de fósforo.

Vía 1 — flujo bentónico. La curva hipsográfica (ver figura) indica que bajo la oxiclina (5–8 m) el lecho anóxico abarca del orden de 10 km<sup>2</sup> ( $\approx 9,8$ –10,8 km<sup>2</sup>). Aplicando tasas de liberación de fósforo bajo



anoxia reportadas para lagos eutróficos ( $\approx 5\text{--}20 \text{ mg P}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ ) y una estratificación cuasi-permanente de 180–365 días al año, la liberación interna resulta del orden de 20–40 toneladas de P al año (rango amplio: 9–75 t·año<sup>-1</sup>).

Vía 2 — stock acumulado en el hipolimnion. La misma curva sitúa el volumen del hipolimnion bajo la oxiclina en  $\approx 124\text{--}155 \text{ Mm}^3$  ( $\approx 58\text{--}73 \%$  del volumen total de  $210 \text{ Mm}^3$ ). Con un ortofosfato de fondo de 0,8 mg/L promedio (máx 2,4 mg/L; DVS 2025) y un promedio hipolimnético de 0,4–0,8 mg/L, el stock de fósforo disuelto retenido es del orden de varias decenas de toneladas ( $\approx 50\text{--}110 \text{ t}$  como P, o  $\approx 15\text{--}35 \text{ t}$  si el dato se informa como  $\text{PO}_4$ ).

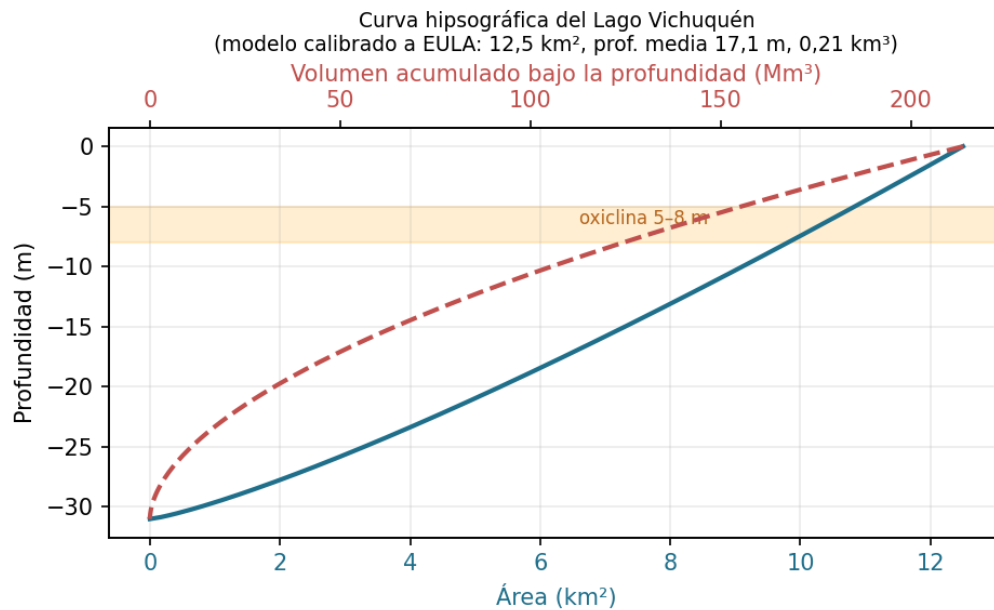


Figura 24. Curva hipsográfica del Lago Vichuquén (área y volumen acumulado por profundidad), calibrada a la morfometría de EULA-Chile y confirmada por 5.854 sondeos batimétricos de OITEC (2016).

Caveats. Son estimaciones de orden de magnitud con incertidumbre de factor 2–3. Dependen de supuestos no medidos directamente: el área y el tiempo efectivo de anoxia, la tasa de liberación (tomada de literatura, no medida in situ) y el volumen del hipolimnion. Además, si el ortofosfato se informa como  $\text{PO}_4$  (y no como P), el stock disuelto se reduce en un factor  $\approx 3$ . Las cifras deben leerse como un dimensionamiento preliminar, no como un valor establecido.

Estado de la brecha. Persisten dos brechas para cerrar el cálculo: (i) medir in situ la tasa de liberación bentónica de fósforo (cámaras de incubación en condiciones anóxicas), hoy tomada de literatura; y (ii) precisar si el ortofosfato se informa como P o como  $\text{PO}_4$ . Con ello, la estimación pasaría de orden de magnitud a una carga interna medida (t P·año<sup>-1</sup>), comparable con la carga externa de la cuenca.

## 5.8 Lectura integrada

- Frente sanitario en mejora: caída sostenida de coliformes fecales y de la clorofila del Estero Llico.



- Frente ecológico en deterioro: salinización creciente del lago y de Torca, caída del oxígeno y floración hipereutrófica con cianobacterias en 2025–2026. Es el riesgo emergente prioritario.
- 2025 fue un año bisagra: convergen una clorofila alta, el aumento importante de la conductividad y el mínimo de OD. Determinar qué ocurrió ese año (hidrología, barra, temperatura, vertidos) es clave.
- Mecanismo estructural (DVS): la salinización mantiene una haloclina permanente que sostiene anoxia de fondo y reciclaje interno de fósforo; el sistema está en hipereutrofia estructural, muy vulnerable a floraciones ante cualquier evento que rompa la estratificación.
- Base hidrológica (Hidrodinamia UCLV): la recarga depende de la lluvia (el nivel sube) y la salida al mar de la apertura de la barra (el nivel baja); en años secos el lago no alcanza el umbral de apertura y permanece en cotas bajas, condición que favorece la concentración de sales. La gestión de la barra y el balance hídrico son, por tanto, palancas centrales del problema; el estudio UCSC (2019) recomienda un manejo regulado con compuertas (no apertura/cierre de hecho) y reducir el consumo hídrico de la silvicultura de la cuenca.

### **5.9 Evidencia ecológica independiente: pérdida de macrófitas y fuga de los cisnes de cuello negro**

Una línea de evidencia independiente del monitoreo fisicoquímico confirma el deterioro: la desaparición de las macrófitas acuáticas sumergidas y de la fauna asociada. El estudio EULA-Chile constató ya en 2015 la ausencia de la vegetación sumergida que en 2008 era abundante —Luchecillo (*Egeria densa*), Huiro verde y Huiro (*Potamogeton* spp.) y Pinito de agua—, atribuyéndola al aumento de salinidad, que provoca plasmólisis y muerte de las especies dulceacuícolas. Con esa vegetación desapareció también el cisne de cuello negro (*Cygnus melancoryphus*), cuya alimentación dependía del Luchecillo.

El informe del Prof. Carlos Ramírez (PUC), sobre la base de los censos de A. Villa para CONAF, documentó la magnitud del colapso en la Laguna Torca: la suma de los conteos mensuales de cisnes cayó de 3.840 (2013) a 2.530 (2014), con un desplome en el segundo semestre (de 421 cisnes en diciembre de 2013 a 112 en diciembre de 2014; 44 en enero y 43 en febrero de 2015), hasta quedar un único ejemplar en marzo de 2015. Como referencia histórica, la laguna llegó a albergar 1.266 cisnes (enero de 2000) y un máximo de 1.502 (enero de 2005, tras la migración desde el río Cruces).

El patrón es homologable al colapso del Santuario Carlos Anwandter del río Cruces (Valdivia, 2004): pérdida de *Egeria densa*, agua verde-amarillenta por proliferación de fitoplancton y fuga de los cisnes. En la Laguna Torca, además, ya en 2014–2015 se identificó *Microcystis aeruginosa* (det. Prof. Iris Pereira, U. de Talca), lo que adelanta casi una década el registro de cianobacterias respecto de las campañas recientes. A diferencia de Valdivia, en Torca no existe una fuente industrial puntual: el desencadenante es el cambio en la hidrología y la salinización de la cuenca.

El informe INFOR (2025) integra esta evidencia en su diagnóstico de «colapso ecosistémico de cuenca», asociando la migración del cisne de cuello negro a la desaparición de macrófitas y a episodios de anoxia. Es la consecuencia ecológica visible de la cadena salinización → estratificación → anoxia → carga interna de fósforo → floraciones, y un argumento de alto valor para la gestión y la comunicación.



## 6. Del diagnóstico a la acción: prioridades

El análisis de los datos converge en dos causas raíz: el exceso de nutrientes (con foco en las diversas fuentes aportantes de nutrientes, en especial el Estero Llico) y la salinización del lago (ligada al manejo de la barra y a la megasequía). Sobre esa base, y considerando las medidas propuestas por EULA (2016), el estudio GHD (DOP) y la línea base DVS (2025), se ordenan las acciones por importancia y por urgencia. Una pieza estructural transversal —y, según el informe INFOR (2025), la “Acción Madre” sin la cual ninguna otra medida es efectiva— es la instalación de un sistema de control de nivel en el Estero Llico (compuerta tipo Rubber Dam/vertedero) recomendado por GHD, UCSC e INFOR, que ataca a la vez la inundación y la salinización y evita los cierres de hecho. INFOR clasifica los protocolos hidráulicos y el control de cargas externas como acciones urgentes (0–3 años). Este sistema ya se materializó en el proyecto “Pretil Fusible” (OITEC/Municipalidad), en tramitación ante la DGA (art. 41), por lo que la prioridad pasa a ser acompañar y destrabar su autorización. Existe, además, un estudio oficial en preparación: la SEREMI del Medio Ambiente del Maule abrió en 2026 una consulta de mercado (TDR, financiamiento FNDR) para el estudio integral que sustentará la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) y un eventual Plan de Descontaminación. En el orden por importancia, la prioridad estructural encabezante es recuperar el balance hídrico del sistema lago–estero–mar (control de nivel), del que depende controlar la salinización; el saneamiento del Estero Llico la acompaña como prioridad sanitaria, y encabeza el orden por urgencia junto con la vigilancia de cianotoxinas.

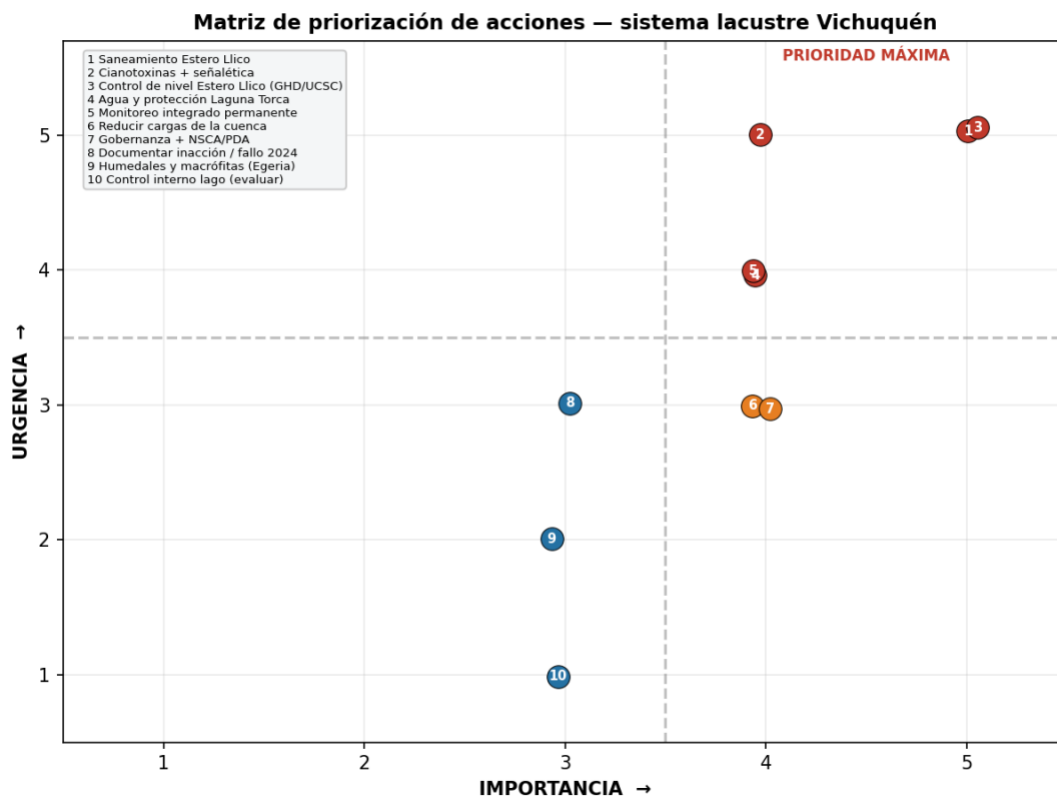


Figura 25. Matriz de priorización de acciones (urgencia × importancia).



Orden por importancia: 1) Instalar un sistema de control de nivel en el sistema lago–estero–mar (compuerta Rubber Dam/vertedero, GHD/UCSC/INFOR) con autorización del art. 41, para recuperar el balance hídrico y reducir la salinización — 2) Saneamiento del Estero Llico — 3) Asegurar agua y proteger la Laguna Torca — 4) Monitoreo integrado permanente — 5) Reducir cargas de la cuenca — 6) Gobernanza y NSCA/PDA — 7) Vigilancia de cianotoxinas — 8) Documentación legal — 9) Humedales y macrófitas — 10) Control interno del lago (evaluar tras modelación).

Orden por urgencia: 1) Vigilancia de cianotoxinas y señalética de contacto (inmediato, salud) — 2) Saneamiento del Estero Llico (salud + fallo judicial 2024) — 3) Sistema de control de nivel del Estero Llico — 4) Agua y protección de la Laguna Torca — 5) Monitoreo integrado — 6) Documentación legal — 7) Reducir cargas de la cuenca — 8) Gobernanza/NSCA — 9) Humedales y macrófitas — 10) Control interno (tras modelación).

Marco de restauración INFOR (2025). El informe INFOR propone un plan multiescalar coherente con este orden de prioridades, articulado en torno a una «Acción Madre» estructural —la regulación científica de la conectividad lago–mar—, sin la cual, según INFOR, ninguna otra medida alcanza la efectividad requerida. Propone además declarar la cuenca como Área Degradada (Ley 21.600) para activar instrumentos formales de restauración. Las acciones se escalonan en el tiempo:

Línea de acción	Contenido principal	Escala temporal
Acción Madre (N°1)	Regulación científica de la conectividad lago–mar: infraestructura de bajo impacto para regular el nivel; protocolo de barra por niveles/mareas/calidad de agua, observatorio hidrológico y monitoreo permanente.	Urgente (0–3 años)
Cargas internas (N°2)	Inmovilizadores de fósforo, aireación en zonas críticas y remoción localizada de sedimentos, coordinadas con la regulación lago–mar para evitar reconcentración.	Consolidación (3–10 años)
Cargas externas (N°3)	Solución sanitaria integral de Llico y borde lacustre, fajas ribereñas nativas, manejo forestal ecosistémico, buenas prácticas agrícolas/biofiltros y fiscalización de descargas.	Urgente–consolidación (0–10 años)
Humedales y riberas (N°4)	Recuperación de vegetación nativa por bioingeniería, rehabilitación de humedales	Restauración profunda (10–20 años)



	funcionales (incluida Laguna Torca) y conectividad hidrológica controlada.	
Gobernanza	Declaratoria de Área Degradada (Ley 21.600), Comité de Gestión Ecosistémica con la comunidad y monitoreo continuo.	Transversal

Tabla 9. Matriz de medidas según el marco de restauración INFOR (2025), articuladas en torno a la regulación de la conectividad lago-mar.

### Catálogo de opciones de mejora por nivel de intervención

Dado que la causa de fondo es el exceso de nutrientes, las opciones se ordenan por nivel de intervención. Atacar solo las floraciones aborda el síntoma, no la causa.

#### 6.1 Reducir el ingreso de nutrientes desde la cuenca

Es la línea de mayor impacto a largo plazo: reforestación con especies nativas y prácticas forestales de menor impacto (fin de la tala rasa, control de erosión), franjas de amortiguación de vegetación nativa a lo largo de esteros y quebradas, uso estratégico de fertilizantes, y mejora del tratamiento de aguas servidas (ampliación de cobertura, tratamiento terciario y humedales de tratamiento, reúso de efluentes). La reconversión forestal, además, recupera escorrentía estival que ayuda a exportar sales y nutrientes.

#### 6.2 Remover o inmovilizar nutrientes dentro del lago

Medidas de apoyo, eficaces solo si se controla el ingreso externo: aireación u oxigenación del fondo para reducir la liberación de fósforo bajo anoxia; aditivos fijadores de fósforo (bentonita modificada con lantano tipo Phoslock, o sulfato de aluminio/alumbre, que reduce la carga interna entre 60% y 90% por 5–20 años); restauración de humedales ribereños; y dragado de sedimentos como recurso excepcional, costoso y disruptivo.

#### 6.3 Gestión del nivel y de la conectividad lago-estero-mar

Regular la barra de Llico para impedir el reingreso salino en nivel bajo sobre un lago vaciado, sin bloquear la renovación de agua dulce, y protegiendo los niveles de la Laguna Torca. Esta gestión es necesaria pero no suficiente: debe acompañarse de la reducción de cargas de nutrientes.

#### 6.4 Intervenciones sobre las algas (último recurso)

La ultrasonificación y los alguicidas solo atacan el síntoma, pueden dañar organismos no objetivo (zooplancton, diatomeas), liberar toxinas y consumir oxígeno al descomponerse la biomasa; la evidencia de campo sobre ultrasonido es desfavorable. No sustituyen el control de nutrientes.



## 6.5 El costo de la inacción

El deterioro de la calidad del agua reduce el valor de las propiedades ribereñas, los ingresos por turismo y recreación, y la actividad económica local; la literatura económica documenta una relación robusta entre mala calidad del agua y menor crecimiento. Estos costos crecientes justifican inversiones mayores pero de mayor alcance, frente al gasto recurrente y sin solución de fondo de las medidas solo sintomáticas.

*Fuentes — Síntesis de opciones de restauración lacustre basada en literatura técnica de acceso público (internet) y en los estudios de cuenca EULA-Chile y DGA (local).*

## 7. Anexo — Series numéricas por variable (promedio anual por sector)

**Tabla 10. Aceites y grasas (mg/L)**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	1.167	2.792	3.977	14.0	5.99	5.898	5.938	2.013	1.65	1.387	3.05	4
Estero Vichuquén	1	1	1.352	14.0	4.188	3.972	3.345	0.76	0.744	0.55	0.55	4
Lago Vichuquén	1	1.136	1.383	14.0	4.274	2.872	1.603	0.858	0.857	0.762	1.35	4
Laguna Torca	1	3.167	4.015	14.0	6.7	5.086	7.665	0.825	1.85	2.737	1.5	4

**Tabla 11. Alcalinidad total (mg CaCO<sub>3</sub>/L)**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	171.3	183.8	159.2	145.7	160.4	159.0	186.5	143.4	116.1	79.0	106.0	188.5
Estero Vichuquén	79.0	56.4	49.2	43.3	52.9	34.2	39.6	36.0	40.1	35.5	34.5	45.0
Lago Vichuquén	114.4	104.8	87.9	94.3	102.5	96.7	95.8	128.1	103.5	110.0	135.6	116.2
Laguna Torca	331.8	336.0	330.6	309.7	330.8	295.0	380.0	298.5	289.5	345.5	351.0	435.0

**Tabla 12. Clorofila-a (µg/L). Nota: el promedio del Lago Vichuquén en 2025 (628,4) es una media artefactual dominada por un valor extremo; la mediana representativa de la ventana marzo-junio es ≈11 µg/L (ver §2.4).**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	262.6	150.9	142.6	122.7	81.4	235.4	170.2	27.8	42.0	20.7	110.0	67.1
Estero Vichuquén	1.6	1.7	3.49	2.437	2.411	1.252	1.837	1.304	1.005	0.836	1.442	1.01
Lago Vichuquén	30.4	8.395	12.2	5.841	6.214	11.9	7.19	4.156	4.692	4.806	628.4	51.2
Laguna Torca	92.2	202.9	68.3	180.7	296.2	136.8	67.8	33.4	56.5	62.9	33.5	38.4

**Tabla 13. Coliformes fecales (NMP/100 mL)**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	2.908	199.1	174.1	7.337	16.300	147.312	1.072	1.681	337.5	220.8	82.5	123.9
Estero Vichuquén	460.7	172.0	176.3	34.267	1.367	1.470	1.869	482.4	875.0	2.199	257.5	260.0
Lago Vichuquén	92.4	14.2	47.0	67.3	48.0	269.9	7.1	13.9	30.3	22.4	7.68	8.08
Laguna Torca	1.590	183.9	132.1	811.7	1.912	754.6	49.0	9	4.479	982.8	251.0	79.0



**Tabla 14. Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	22.676	8.860	7.932	10.186	11.314	12.477	6.999	12.650	15.280	21.536	21.232	16.312
Estero Vichuquén	134.0	146.5	2.852	140.8	909.6	145.2	152.5	124.0	157.0	127.6	140.8	238.5
Lago Vichuquén	6.857	7.631	6.535	6.867	7.521	6.806	6.172	6.886	8.693	10.189	16.499	18.947
Laguna Torca	3.441	5.050	5.824	6.245	6.877	7.180	7.900	7.472	8.239	7.964	7.938	9.789

**Tabla 15. DBO ( $\text{mg}/\text{L}$ )**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	8.111	10.9	26.0	16.2	10.9	40.7	11.4	7.5	7.125	4.875	15.8	5.5
Estero Vichuquén	1	18.8	1.25	1.667	1.875	2	1.5	1	1	1.375	2.25	1.5
Lago Vichuquén	5.941	6.1	4.458	4.333	2.1	6	1.55	3.158	1.65	2.55	19.3	13.0
Laguna Torca	19.2	13.2	11.2	13.3	12.8	16.0	8.5	5.75	7	8.25	4	5

**Tabla 16. DQO ( $\text{mg}/\text{L}$ )**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	50.8	64.9	79.7	86.8	91.5	256.7	77.6	117.5	83.0	408.1	127.5	22.3
Estero Vichuquén	6	40.8	7.375	9.5	11.0	12.8	9.25	8	8	10.4	6	3.75
Lago Vichuquén	35.8	35.5	26.5	30.6	28.3	35.9	26.5	28.8	45.4	127.0	208.8	53.7
Laguna Torca	71.0	85.5	53.4	81.0	111.0	84.0	92.5	62.2	82.0	232.5	79.5	104.1

**Tabla 17. Fósforo total ( $\text{mg}/\text{L}$ )**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	0.254	1.574	0.401	0.882	0.832	0.916	1.158	0.487	0.297	0.179	1.029	0.476
Estero Vichuquén	0.179	0.037	0.033	0.069	0.146	0.036	0.161	0.084	0.048	0.108	0.033	0.084
Lago Vichuquén	0.173	0.103	0.034	0.033	0.078	0.347	3.449	0.051	0.042	0.046	0.125	0.007
Laguna Torca	0.72	0.323	0.079	0.132	0.205	0.059	0.964	0.1	0.048	0.231	0.26	0.066

**Tabla 18. Nitrato ( $\text{mg}/\text{L}$ )**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	0.054	3.47	0.225	0.046	0.077	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.203
Estero Vichuquén	0.046	0.281	0.136	0.307	0.745	0.431	0.469	0.366	0.221	0.204	0.283	0.203
Lago Vichuquén	0.046	0.072	0.046	0.046	0.077	0.046	0.046	0.046	1.46	0.046	0.046	0.203
Laguna Torca	0.046	0.035	0.046	0.046	0.077	0.046	0.046	0.046	0.89	0.046	0.046	0.203

**Tabla 19. Nitrito ( $\text{mg}/\text{L}$ )**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	0.028	0.016	0.009	0.009	0.015	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.039
Estero Vichuquén	0.009	0.087	0.009	0.009	0.015	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.039
Lago Vichuquén	0.009	0.016	0.009	0.009	0.015	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.039
Laguna Torca	0.009	0.016	0.009	0.009	0.015	0.009	0.009	0.009	0.25	0.009	0.009	0.039



**Tabla 20. Nitrógeno total (mg/L)**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	4.2	8.512	3.81	6.198	4.015	10.2	3.678	3.581	2.13	1.739	5.312	4.085
Estero Vichuquén	2.4	2	1.062	1.8	2.446	1.495	1.407	1.975	1.024	0.885	1.298	0.01
Lago Vichuquén	2.771	2.44	1.009	1.621	1.359	1.492	1.145	1.393	2.478	1.294	2.07	0.042
Laguna Torca	6.7	3.875	2.66	4.747	6.062	4.527	3.015	2.487	3.308	2.645	2.45	0.01

**Tabla 21. Nitrógeno total Kjeldahl (NKT) (mg/L)**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	4.156	5.058	3.634	6.198	4.015	10.2	3.678	3.581	2.13	1.739	5.312	4.082
Estero Vichuquén	2.36	1.645	0.954	1.515	1.589	1.075	0.973	1.633	0.831	0.739	1.05	0.01
Lago Vichuquén	2.767	2.379	1.055	1.621	1.359	1.492	1.145	1.393	1.06	1.294	2.07	0.041
Laguna Torca	6.685	3.85	2.654	4.747	6.062	4.527	3.015	2.487	2.333	2.645	2.45	0.01

**Tabla 22. Oxígeno disuelto (OD) (mg/L)**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	9.111	8.512	10.1	9.65	10.1	7.717	8.312	5.885	7.87	7.32	3.272	6.3
Estero Vichuquén	7.4	9.637	10.8	9.417	9.5	7.95	8.549	7.087	9.355	7.825	5.232	6.25
Lago Vichuquén	9.712	9.84	9.321	9.867	9.455	7.395	9.182	7.707	8.062	8.073	4.297	7.8
Laguna Torca	6.825	9.925	10.7	10.7	10.8	6.533	7.697	6.5	8.31	7.808	4.5	8.3

**Tabla 23. SST (mg/L)**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	17.4	27.5	47.0	25.0	26.6	63.7	29.4	25.2	28.0	19.1	21.0	12.5
Estero Vichuquén	7	2.5	3.625	13.0	7.875	35.2	8.625	3.25	5.25	4.125	3	1
Lago Vichuquén	8.824	12.6	5.792	4.733	4	10.2	5.3	4.316	5.1	7.85	47.3	16.6
Laguna Torca	33.2	40.0	18.4	38.7	59.2	27.3	28.8	15.5	16.8	27.5	12.5	18.0

**Tabla 24. Turbiedad (UNT)**

Sector	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Estero Llico	7.522	25.4	22.7	9.992	3.86	16.7	11.6	8.894	7.902	2.629	3.555	26.5
Estero Vichuquén	3.4	3.362	5.35	16.8	3.106	4.895	1.698	1.589	5.759	4.014	2.373	7.75
Lago Vichuquén	6.365	7.018	3.154	2.241	0.939	2.506	1.228	1.605	3.432	1.744	27.7	13.9
Laguna Torca	26.9	35.9	7.82	33.2	40.4	17.2	9.365	6.45	7.53	8.04	3.715	19.0