

Propuestas para Chile

CAPÍTULO 5

Residuos de antimicrobianos en ecosistemas acuáticos: propuesta de políticas públicas en vigilancia ambiental

RICARDO SALAZAR
Escuela de Química UC

PATRICIA GARCÍA
Escuela de Medicina UC

ANDREA MORENO
Escuela de Medicina Veterinaria UC

CRISTIAN PAREDES
Escuela de Química y Farmacia UC

GUILLERMO DONOSO
Facultad de Agronomía y Sistemas Naturales UC

WENDY CALZADILLA
Universidad Técnica Federico Santa María

Residuos de antimicrobianos en ecosistemas acuáticos: propuesta de políticas públicas en vigilancia ambiental

INVESTIGADORES

RICARDO SALAZAR

Escuela de Química UC

PATRICIA GARCÍA

Escuela de Medicina UC

ANDREA MORENO

Escuela de Medicina Veterinaria UC

CRISTIAN PAREDES

Escuela de Química y Farmacia UC

GUILLERMO DONOSO

Facultad de Agronomía y Sistemas Naturales UC

WENDY CALZADILLA

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen¹

El objetivo de este proyecto es diseñar una propuesta de sistema nacional de vigilancia ambiental de residuos de antimicrobianos en Chile, abordando una de las principales brechas del Plan Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos: la ausencia de un monitoreo ambiental sistemático que permita anticipar riesgos sanitarios y ecológicos. El trabajo busca generar insumos técnicos, regulatorios y comunicacionales para orientar políticas públicas bajo un enfoque One Health.

La metodología fue cualitativa y exploratoria, basada en el análisis documental, la revisión de literatura científica y estudios de caso internacionales, además del levantamiento de experiencias nacionales. Se construyó una línea de base ambiental a partir de fuentes secundarias y se validó una propuesta

¹ Esta propuesta fue presentada en un seminario organizado por el Centro de Políticas Públicas UC el 17 de noviembre de 2025, en el cual participaron Paola Cruz, encargada del programa de aguas residuales del Ministerio de Salud, y Javiera Cornejo, directora ejecutiva del Center for Antimicrobial Stewardship in Aquaculture.

técnica de red de monitoreo, incluyendo protocolos de muestreo, criterios de priorización de contaminantes y alternativas de gobernanza y financiamiento. Entre los principales hallazgos destaca la evidencia de contaminación por antimicrobianos en diversos ecosistemas acuáticos del país, desde aguas residuales urbanas hasta zonas rurales, lacustres y costeras. Asimismo, se constató que Chile cuenta con capacidades técnicas consolidadas para implementar un sistema de vigilancia, pero los datos existentes están fragmentados y carecen de coordinación intersectorial.

La propuesta del sistema nacional de vigilancia ambiental de residuos de antimicrobianos supone una implementación gradual en tres etapas, integrándose a plataformas existentes y estando respaldada por una lista de observación nacional. Incluye componentes de fiscalización, tratamiento, educación y responsabilidad extendida del productor. También considera estrategias de difusión y de participación comunitaria.

Este trabajo es relevante porque propone una solución concreta, viable y de alto impacto para enfrentar la resistencia antimicrobiana desde su dimensión ambiental. Aporta evidencia técnica para cerrar una brecha crítica en la política pública y ofrece una hoja de ruta para transformar la vigilancia ambiental en una herramienta efectiva de prevención, regulación y protección tanto de la salud como de los ecosistemas.

1. Introducción

En 2019 se estimó que cinco millones de muertes a nivel mundial estuvieron asociadas a infecciones causadas por bacterias resistentes a los antimicrobianos², de las cuales más de un millón se atribuyeron directamente a dicha resistencia (Murray et al., 2022). Esta cifra revela que la resistencia a los antimicrobianos constituye una amenaza emergente significativa para la salud pública global, con impactos crecientes tanto en términos sanitarios como económicos.

La resistencia a los antimicrobianos es un fenómeno natural que se genera cuando microorganismos, tales como bacterias, hongos, virus y parásitos, sufren adaptaciones genéticas al verse expuestos a compuestos antimicrobianos en concentraciones menores al límite mínimo requerido para su inactivación (Michael et al., 2012). Esta exposición favorece la selección de cepas resistentes, que logran sobrevivir, proliferar y eventualmente diseminar sus características genéticas dentro de comunidades microbianas diversas^{3 4}.

2 Sustancias utilizadas para eliminar o inhibir microorganismos como bacterias, virus, hongos o parásitos, tanto en salud humana como animal, además de su uso en un contexto agrícola.

3 Organización Mundial de la Salud (17/11/2021), “Resistencia a los antimicrobianos”, disponible en <https://n9.cl/oa6h9>.

4 Organización Mundial de la Salud (17/05/2024), “La OMS pone al día la lista de bacterias farmacorresistentes más peligrosas para la salud humana”, disponible en <https://n9.cl/lxzp2>.

Un estudio realizado en Chile muestra que el incremento en la prevalencia de bacterias multirresistentes ha provocado un aumento del 14% en la duración de las hospitalizaciones y un 25% adicional en los ingresos a las unidades de cuidados intensivos (Allel et al., 2024). Esto se traduce en un aumento de los costos del tratamiento —estimado en 2.300 dólares por paciente—, lo que afecta la sostenibilidad financiera del sistema de salud, en tanto el impacto anual asciende a cincuenta y tres millones de dólares.

Así, el avance de la resistencia a los antimicrobianos compromete la eficacia de los medicamentos esenciales para el tratamiento de enfermedades infecciosas comunes, afectando no solo a la salud humana, sino también a la salud y la sanidad animal, la producción de alimentos y la integridad de los ecosistemas. Por este motivo, se requiere un enfoque coordinado, multisectorial y global que articule los esfuerzos tanto del Estado como de instituciones académicas, sectores productivos y la sociedad civil para así abordar esta amenaza de manera sostenible⁵.

Una de las principales acciones a nivel internacional corresponde a la iniciativa One Health —articulada por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Mundial de Sanidad Animal, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente—, cuyo enfoque integrado reconoce la interconexión entre la salud humana, la salud animal y la salud del medio ambiente para así abordar de forma sostenible e integral las amenazas para la salud y sus desafíos. One Health promueve la colaboración intersectorial para controlar el uso de antibióticos en las tres áreas (humana, animal y vegetal) y la vigilancia de las bacterias resistentes.

A pesar de que las consecuencias del desarrollo de la resistencia a los antimicrobianos ya son ampliamente reconocidas en el ámbito hospitalario y comunitario, su impacto también se extiende a la salud animal, la producción agropecuaria y la seguridad alimenticia. La estrecha e intrínseca conexión entre seres humanos, animales y medio ambiente supone que dicha resistencia sea una amenaza compartida, cuya expansión trasciende las fronteras del sector salud (Altevogt et al., 2025).

En el ámbito veterinario, el desarrollo de la resistencia a los antimicrobianos compromete el tratamiento de enfermedades infecciosas en salud animal, tanto en los animales de compañía como en los animales salvajes y de producción. Esto puede derivar en aumentos de la morbilidad, pérdida de productividad y el uso intensivo de antimicrobianos alternativos (Panicker et al., 2025). La Organización Mundial de Sanidad Animal destaca que el cuidado de las condiciones de higiene y estrés durante la crianza del ganado,

5 Organización Panamericana de la Salud (2020), “Resistencia a los antimicrobianos”, disponible en <https://n9.cl/3tg3>.

junto con una correcta prescripción de medicamentos por parte de los médicos veterinarios, es una de las principales vías para controlar la propagación de enfermedades⁶.

En este contexto, los ecosistemas acuáticos se han consolidado como reservorios clave de residuos de antimicrobianos, resultado de múltiples actividades humanas que liberan estos compuestos al ambiente. Una de las fuentes más relevantes corresponde a las descargas de aguas residuales urbanas, industriales y hospitalarias, las cuales contienen metabolitos⁷ de fármacos excretados por humanos y animales, además de antibióticos no metabolizados—o parcialmente metabolizados— que no son completamente eliminados durante los procesos convencionales de tratamiento (Aus der Beek et al., 2016; Cheung et al., 2025; Michael et al., 2012; Siri et al., 2024). Estos efluentes terminan vertiéndose en ríos, lagos u otros cuerpos receptores, actuando como rutas directas para la entrada de contaminantes farmacéuticos en los sistemas acuáticos y el medio ambiente.

Adicionalmente, la escurrentía agrícola y ganadera constituye una vía significativa de contaminación. En la producción animal, se estima que entre el 75% y el 90% de los antimicrobianos administrados son excretados sin cambios, alcanzando cuerpos de agua a través del lavado de suelos, aguas de establo o drenaje superficial (Marshall y Levy, 2011). Más aún, existe evidencia sólida de que los ambientes acuáticos pueden facilitar la transferencia horizontal de genes de resistencia entre bacterias a través de mecanismos como la conjugación, transformación y transducción⁸ (Cabello et al., 2013; Zhang, Fan y Zhang, 2025). Estos procesos permiten que genes que otorgan resistencia a los antimicrobianos se transfieran entre bacterias que habitan el ambiente y otras con capacidad patógena. Con ello, se refuerza un ciclo preocupante de retroalimentación entre los ecosistemas acuáticos, los animales y las personas, lo que obliga a mirar esta problemática desde una perspectiva integrada.

En este marco, el objetivo de este proyecto fue generar una propuesta técnica y regulatoria para avanzar hacia un sistema de vigilancia ambiental de antimicrobianos en ecosistemas acuáticos, con base en evidencia científica y en experiencias nacionales e internacionales. Así, la estructura del documento responde, en primer lugar, a los objetivos del estudio y a la metodología utilizada para analizar la situación nacional, identificar experiencias interna-

6 OMS (2022), “Resistencia a los antimicrobianos”, disponible en <https://n9.cl/u4gsc>.

7 Sustancias que aparecen cuando el organismo descompone (o metaboliza) un medicamento. El proceso metabólico, que ocurre principalmente en el hígado, transforma el fármaco original en nuevos compuestos que pueden ser inactivos, tener efectos terapéuticos similares o diferentes, o ser más fáciles de eliminar del organismo a través de la orina o la bilis. Algunos fármacos, llamados profármacos, se administran inactivos y se activan una vez metabolizados.

8 La conjugación, transformación y transducción son mecanismos por los cuales las bacterias intercambian material genético. La conjugación es cuando una bacteria transfiere ADN a otra a través de contacto físico; la transformación es cuando una bacteria capta ADN libre de su entorno; y la transducción corresponde a un virus que transporta ADN de una bacteria a otra.

ciones relevantes y construir un modelo técnico preliminar de vigilancia ambiental. La siguiente sección presenta los resultados del análisis, incluyendo capacidades técnicas, brechas institucionales y riesgos emergentes. A continuación, se desarrolla una propuesta de política pública para implementar un sistema nacional de vigilancia ambiental, abordando su gobernanza, financiamiento y estrategia de implementación. Finalmente, se exponen los principales aprendizajes, conclusiones y recomendaciones orientadas a fortalecer la respuesta nacional frente a la resistencia antimicrobiana desde una perspectiva ambiental.

2. Objetivos

Identificar y analizar los principales desafíos, brechas y oportunidades para el desarrollo de un sistema nacional de vigilancia ambiental de residuos antimicrobianos en Chile, a partir de la revisión de antecedentes técnicos, experiencias internacionales y capacidades institucionales disponibles. Más específicamente, los objetivos del estudio son:

1. Describir la situación nacional respecto a residuos antimicrobianos y genes de resistencia en ecosistemas acuáticos, regulaciones vigentes y capacidades técnicas instaladas.
2. Analizar experiencias internacionales relevantes en vigilancia ambiental de resistencia antimicrobiana y su aplicabilidad al contexto chileno.
3. Diseñar un modelo técnico para un sistema de vigilancia ambiental de antimicrobianos en Chile, considerando criterios territoriales, metodológicos e institucionales.
4. Proponer lineamientos estratégicos para el desarrollo de una política pública nacional en la materia, incluyendo gobernanza, financiamiento y estrategias de comunicación.

2.1 Metodología

Este informe se basa en una estrategia metodológica cualitativa y exploratoria, orientada a generar insumos técnicos y regulatorios para el diseño de un sistema nacional de vigilancia ambiental de residuos de antimicrobianos (SINVAR-AM). Para ello, se recurrió a un conjunto de técnicas complementarias de análisis documental, revisión sistemática de fuentes secundarias y contraste con experiencias internacionales.

En primer lugar, se realizó un levantamiento bibliográfico nacional e internacional, focalizado en publicaciones científicas revisadas por pares, informes técnicos de agencias multilaterales —como los de la OMS, de la Organización Panamericana de la Salud o de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura— y documentos regulatorios relevantes. Se consultaron también fuentes nacionales disponibles en plataformas oficiales —como la Red de Observación Ambiental— y bases de datos sectoriales.

Inicialmente, se revisaron estudios recientes sobre la presencia de residuos antimicrobianos y genes de resistencia en ecosistemas acuáticos y matrices productivas en Chile. Se evaluaron además antecedentes técnicos de normativa ambiental y sanitaria vigente, particularmente en relación con las Normas Secundarias de Calidad Ambiental, el Decreto Supremo N° 90 y el estado de avance del Plan Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos.

En segundo lugar, se revisaron e interpretaron experiencias regulatorias y operativas internacionales, incluyendo programas de la OMS⁹, de la Unión Europea¹⁰ y de los Estados Unidos¹¹, además de estudios piloto en América Latina y Asia. Estos casos fueron seleccionados por su relevancia técnica, aplicabilidad a contextos de ingreso medio y nivel de consolidación institucional.

Finalmente, y en base a este análisis, se elaboró una propuesta técnica para el diseño de un sistema nacional de vigilancia. Cabe destacar que no se implementaron actividades de monitoreo en terreno ni pruebas piloto durante el desarrollo del estudio. Por tanto, los contenidos del modelo propuesto deben entenderse como lineamientos orientadores, sustentados en evidencia secundaria, y no como resultados empíricos del proyecto.

3. Hallazgos y análisis de resultados

3.1 Diagnóstico nacional sobre vigilancia ambiental de residuos antimicrobianos

En el contexto chileno, la preocupación por la resistencia antimicrobiana se ha abordado desde una perspectiva intersectorial, bajo el enfoque internacional One Health. Un avance destacado fue la implementación del Plan Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos (2021-2025), segunda versión del plan iniciado en 2017, cuyo diseño e implementación está coordinado por la Mesa Interministerial sobre Resistencia Antimicrobiana, integrada por representantes del Ministerio de Salud, el Ministerio de Agricultura, el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, el Ministerio de Educación, el Ministerio de Medio Ambiente y el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (Ministerio de Salud, 2025a; Ministerio de Salud et al., 2021). El plan define cinco líneas estratégicas: (i) concientización, (ii) vigilancia integrada, (iii) control de infecciones, (iv) uso racional de antimicrobianos y (v) fortalecimiento de la investigación.

Gracias a esta estructura de gobernanza se han impulsado medidas concretas en los componentes humano y animal, tales como los Programas de

9 OMS (2021), "Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System (GLASS)", disponible en <https://n9.cl/lqsn8>.

10 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/whw2ry>.

11 U.S. Environmental Protection Agency (2022), "Drinking Water Contaminant Candidate List 5 - Final (CCL5)", disponible en <https://n9.cl/vm3k8>.

Optimización del Uso de Antimicrobianos en hospitales y la prescripción electrónica veterinaria, que mejoran la trazabilidad y el control de uso de fármacos en producción animal (Ministerio de Salud, 2025b)¹². Sin embargo, el propio seguimiento del Plan Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos reconoce que el componente ambiental sigue siendo el eslabón más débil. De hecho, actualmente no existe un programa nacional de vigilancia sistemática de residuos de antimicrobianos ni de genes de resistencia en aguas, sedimentos u otras matrices ambientales, y la evaluación del riesgo ecológico asociado es todavía incipiente (Ministerio de Salud, 2023).

Desde el punto de vista normativo, Chile cuenta con instrumentos generales para el control de calidad y descarga de aguas, pero carece de límites específicos para antimicrobianos y otros contaminantes emergentes¹³. El Decreto Supremo N° 90 establece condiciones para descargas a cuerpos de agua superficiales y el Decreto Supremo N° 609 regula descargas a alcantarillado. No obstante, ninguno de ellos incorpora fármacos u otros contaminantes emergentes. En paralelo, el marco jurídico distingue entre normas primarias, enfocadas en la protección de la salud humana, y normas secundarias, orientadas a la protección de ecosistemas y biodiversidad en cuerpos de agua específicos.

Las Normas Secundarias de Calidad Ambiental representan un instrumento clave para establecer estándares específicos de calidad del agua en función de sus usos y características ecológicas. Estas permiten incorporar nuevos parámetros (como residuos antimicrobianos u otros contaminantes emergentes), siempre que exista evidencia técnica suficiente que respalde su inclusión. Esto permite regular compuestos en el marco ambiental, estableciendo límites que sirvan de base tanto para la fiscalización como para el diseño de medidas de tratamiento o de prevención. La elaboración de estas normas está regulada por la Guía para la elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para aguas Continentales Superficiales, la cual exige información robusta sobre concentraciones ambientales, distribución espacial y efectos ecológicos potenciales (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). A la fecha, se han dictado normas secundarias para cinco ríos y dos lagos, lo que cubre solo una fracción del universo de cuerpos de agua del país (más de 1.200 ríos y 15.000 lagos y lagunas)¹⁴. En este contexto, los antecedentes ambientales sobre residuos antimicrobianos recopilados en este proyecto, junto con los hallazgos de investigaciones académicas recientes, constituyen un

12 Servicio Agrícola y Ganadero (21/11/2024), “SAG hace positivo balance de la prescripción electrónica de antibióticos para animales en Chile”, disponible en <https://n9.cl/s9q13t>.

13 Sustancias químicas o materiales nuevos —como medicamentos, microplásticos, productos de cuidado personal y aditivos industriales— detectados recientemente en el medioambiente y que pueden suponer un riesgo para la salud humana y los ecosistemas. Generalmente se encuentran en concentraciones muy bajas, pero su bioacumulación, persistencia y el hecho de que las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales no pueden eliminarlos por completo los han transformado en una problemática en la actualidad.

14 Superintendencia del Medio Ambiente (10/05/2025), “Registro de normas de calidad”, disponible en <https://n9.cl/8wvvvq>.

insumo crítico para robustecer futuros procesos de actualización de Normas Secundarias de Calidad Ambiental.

Un ejemplo ilustrativo es la norma del río Biobío, que ha dado lugar a un programa de monitoreo sistemático con muestreos en distintos puntos del río, integrando parámetros fisicoquímicos y biológicos y utilizando la Red de Observación Ambiental de la Superintendencia del Medio Ambiente para evaluar parámetros aún no regulados. Aunque estas iniciativas todavía no incluyen antimicrobianos como parámetros normados, muestran que existe una base institucional y técnica para ampliar el alcance de la vigilancia hacia contaminantes emergentes.

Paralelamente, en el proceso de consulta pública para la actualización del Decreto Supremo N° 90, organizaciones ciudadanas, académicas y servicios públicos plantearon explícitamente la necesidad de incorporar contaminantes emergentes (incluidos los fármacos), evidenciando un creciente consenso social y técnico respecto de la urgencia de integrar estos riesgos a la normativa nacional¹⁵.

En el plano productivo, sectores como la ganadería intensiva y la salmicultura siguen siendo fuentes relevantes de emisión de antimicrobianos. De acuerdo con los registros oficiales del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), en 2023 se comercializaron 442.236 kilogramos de antimicrobianos en el país, siendo los más utilizados los anfenicoles (cloranfenicol y florfenicol) —con 281.673 kilogramos destinados principalmente a especies acuáticas— y las penicilinas —con 43.093 kilogramos usados mayoritariamente en especies terrestres¹⁶.

Diversos estudios e informes han documentado el uso intensivo de florfenicol y oxitetraciclina en centros de cultivo de salmón, lo que ha generado preocupación por su descarga a fiordos y cuerpos de agua costeros (Cabello, 2006; Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura, 2022). En respuesta a esta problemática, las autoridades fortalecieron el monitoreo de bacterias prioritarias como *piscirickettsia salmonis* en salmicultura y *salmonella species* en producción animal, y ha impulsado el Programa de Uso Responsable y Prudente de Antimicrobianos en la Producción Primaria, el cual busca reducir el uso de antimicrobianos críticos como fluoroquinolonas, colistina y cefalosporinas de tercera generación¹⁷.

A esto se suma la prescripción electrónica veterinaria, que ha superado las 47.000 recetas emitidas, fortaleciendo la trazabilidad del uso de fármacos

15 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/uxncdo>.

16 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/8eilq>.

17 Servicio Agrícola y Ganadero (21/11/2024), "SAG hace positivo balance de la prescripción electrónica de antibióticos para animales en Chile", disponible en <https://n9.cl/s9q13t>.

en producción animal¹⁸. Estas medidas representan avances concretos para reducir la presión ambiental asociada al uso de antimicrobianos, aunque todavía persisten desafíos relevantes en el control y la fiscalización.

En términos de infraestructura sanitaria, Chile presenta una cobertura elevada, lo que constituye una oportunidad para avanzar en el control de contaminantes emergentes. De acuerdo con la Superintendencia de Servicios Sanitarios, cerca del 98% de la población urbana cuenta con conexión a alcantarillado y el 100% de las aguas servidas urbanas recolectadas recibe algún tipo de tratamiento en plantas de tratamiento de agua residual (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2025). Esta condición permite considerar la incorporación de requerimientos más exigentes respecto de la calidad de los efluentes tratados, incluyendo posibles parámetros para fármacos u otros microcontaminantes. Sin embargo, cualquier modificación de la normativa que introduzca nuevas obligaciones técnicas requerirá, en primer lugar, un diagnóstico claro que justifique su necesidad y, en segundo lugar, implicará incrementos en los costos operativos y de inversión para las empresas sanitarias.

Actualmente, la legislación tarifaria vigente establece que los costos de operación y expansión de los sistemas sanitarios deben ser cubiertos por los usuarios finales a través de las tarifas reguladas¹⁹. Esto permite mantener la sostenibilidad del sistema, pero también implica que las cargas adicionales asociadas al tratamiento avanzado recaerían directamente sobre los hogares, a menos que se establezcan mecanismos específicos para redistribuir dichos costos. En este sentido, la discusión sobre esquemas de financiamiento compartido entre los productores, el Estado y los usuarios finales es clave para viabilizar una regulación más exigente de los contaminantes emergentes, incluidos los residuos antimicrobianos.

Más allá del tratamiento, es necesario avanzar hacia una gestión preventiva del ciclo de vida de los antimicrobianos, incorporando medidas que reduzcan su ingreso al sistema de aguas residuales desde el origen. En este ámbito, la participación ciudadana cobra especial relevancia, ya que permite complementar las estrategias institucionales con cambios en las prácticas cotidianas de uso y disposición de los medicamentos. En Chile, si bien aún no existe un programa nacional de recolección de fármacos caducados, se han desarrollado iniciativas voluntarias del sector privado que ofrecen experiencias valiosas.

Un ejemplo destacable es el programa de recolección de medicamentos vencidos impulsado por Farmacias del Dr. Simi, que desde 2024 ha dispuesto contenedores especiales en sus sucursales para recibir medicamentos en des-

18 Servicio Agrícola y Ganadero (21/11/2024), "SAG hace positivo balance de la prescripción electrónica de antibióticos para animales en Chile", disponible en <https://n9.cl/s9q13t>.

19 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/9bsvgp>.

uso o expirados²⁰. Esta estrategia ha permitido recolectar y disponer de manera segura toneladas de productos farmacéuticos, evitando su eliminación inadecuada a través de la basura domiciliaria o el alcantarillado, prácticas que terminan impactando en los cuerpos de agua²¹. Otra iniciativa ejemplar proviene de la cadena Farmacias Cruz Verde —en colaboración con la Fundación Ecofarmacovigilancia Chile y la gestora de residuos Coactiva—, que en mayo de 2025 lanzó un programa para impulsar la gestión responsable de medicamentos caducados y en desuso²². En su primera etapa se implementaron veinte puntos de recolección en farmacias de la Región Metropolitana y se planea incorporar progresivamente nuevos puntos en distintas ciudades del país.

Estas experiencias, aunque acotadas, evidencian el potencial para articular al sector privado y a la ciudadanía en una estrategia nacional de reducción de residuos farmacéuticos. Su integración en políticas públicas permitiría fortalecer la prevención en su origen, reducir la carga de contaminantes emergentes y consolidar una cultura de uso y disposición responsable. En este contexto, avanzar hacia un programa nacional de recolección, respaldado por la regulación y conectado con los sistemas de salud y medio ambiente, se perfila como una herramienta clave para fomentar una gestión integrada del riesgo antimicrobiano.

Aun cuando se han implementado esfuerzos regulatorios y de prevención, los antecedentes científicos disponibles confirman (incluso en ausencia de un sistema nacional de monitoreo) que los residuos de antimicrobianos y las bacterias resistentes ya están presentes en diversos ecosistemas acuáticos del país. En zonas urbanas e industriales, como la cuenca del río Mapocho y los efluentes de las plantas de tratamiento de agua residual de la Región Metropolitana, se han detectado antibióticos de uso humano (por ejemplo, sulfametoxazol, ciprofloxacino y claritromicina), tanto en aguas residuales tratadas como en los ríos receptores, lo que demuestra la persistencia de estos compuestos tras el tratamiento convencional (Herrera-Muñoz et al., 2024; Wilkinson et al., 2022).

En zonas agrícolas y rurales del centro-sur, como en el Valle del Aconcagua y las zonas hortícolas de la Región del Maule, estudios han encontrado bacterias resistentes a múltiples antibióticos en aguas de riego y en cultivos como lechuga y cilantro, documentando la presencia de genes de resistencia (como blaTEM, sul1 y mcr-1) asociados a betalactámicos, sulfonamidas y colistina (Díaz-Gavidia et al., 2021; González-Rojas et al., 2025). Estos hallazgos sugieren una circulación activa de resistencia entre el ambiente, los animales y los alimentos, con escaso control sanitario en la fase ambiental.

20 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/wmo7f>.

21 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/q9l2t>.

22 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/gkw88>.

Respecto a los ecosistemas lacustres, estudios recientes en el lago Llanquihue han detectado elementos de resistencia antimicrobiana en aguas costeras, evidenciando la presencia de genes de resistencia y elementos genéticos móviles que facilitan su transferencia entre bacterias ambientales y potencialmente patógenas (Campanini-Salinas et al., 2024). Dado que este lago cumple funciones de abastecimiento de agua potable, turismo y actividades productivas, la presencia de estos elementos conlleva riesgos tanto para la salud pública como para las economías locales.

En zonas costeras y marinas, la evidencia también es consistente. En fiordos con actividad de salmonicultura intensiva, en las regiones de Los Lagos y Aysén, se han detectado bacterias marinas multirresistentes, así como residuos de antimicrobianos utilizados en la acuicultura chilena, incluyendo florfenicol y oxitetraciclina (Carrizo et al., 2021). Más recientemente se ha demostrado la presencia de bacterias resistentes en peces marinos silvestres, lo que indica que la presión antimicrobiana alcanza incluso áreas alejadas de los centros de cultivo (Miranda et al., 2024). En sectores costeros del centro-sur, como Concepción y Chiloé, se han reportado más de 200 contaminantes emergentes (incluyendo antibióticos y productos de cuidado personal) en agua, sedimentos y poros del fondo marino, lo que evidencia una carga persistente de contaminantes en zonas que carecen por completo de vigilancia sistemática (Jara et al., 2021).

Este conjunto de hallazgos refuerza la hipótesis central de este informe: los ecosistemas acuáticos chilenos, continentales y costeros ya están expuestos a residuos antimicrobianos y a elementos de resistencia provenientes de múltiples fuentes, en un contexto en el que aún no existe un sistema nacional que integre y supervise esta información. Además, hay que considerar que Chile cuenta con capacidades técnicas consolidadas para abordar esta problemática. Diversos centros de investigación y universidades disponen de equipamiento analítico avanzado y experiencia comprobada en monitoreo ambiental y sanitario, como lo evidencian algunos estudios recientes que han identificado antibióticos y genes de resistencia en múltiples regiones del país (Campanini-Salinas et al., 2024; Carrizo et al., 2021; Díaz-Gavidia et al., 2021; Herrera-Muñoz et al., 2024; Miranda et al., 2024).

Finalmente, el diagnóstico también revela una brecha en materia de información hídrica integrada. Actualmente, los datos sobre la calidad y la cantidad de agua en Chile se encuentran dispersos entre distintos servicios públicos y centros de investigación, lo que dificulta su uso para la toma de decisiones. En respuesta a este problema, el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (2020) propuso el diseño de un Sistema Nacional Unificado de Información Hídrica —todavía no operativo—, cuyo objetivo es entregar acceso oportuno a información estandarizada para apoyar

la planificación y la gestión sustentable del agua. Esta iniciativa representa una plataforma relevante que podría facilitar, en el futuro, la integración de información ambiental relacionada con contaminantes emergentes y la resistencia antimicrobiana. En este sentido, la principal lección para los países en desarrollo es la importancia de generar datos nacionales comparables y transparentes. Contar con información sólida permite respaldar políticas de prevención y facilita la cooperación internacional en la lucha contra la resistencia antimicrobiana (Oliveira et al., 2024).

3.2 Aprendizajes internacionales en vigilancia ambiental de residuos antimicrobianos

Las experiencias internacionales muestran un avance sostenido hacia sistemas de vigilancia ambiental bajo el enfoque One Health. Es importante distinguir que el monitoreo corresponde a la recolección periódica de datos en matrices ambientales como aguas residuales o cuerpos de agua. Además, la vigilancia implica analizar esa información en el tiempo para generar alertas, priorizar riesgos y orientar decisiones sanitarias (OMS, 2017).

Desde 2015, la OMS ha promovido el Sistema Global de Vigilancia de la Resistencia y el Consumo de Antimicrobianos, incorporando por primera vez la dimensión ambiental en una plataforma de vigilancia global. El sistema fomenta la recopilación estandarizada de datos de resistencia y uso de antimicrobianos en humanos, animales y el ambiente, incorporando también la dimensión de One Health que abarca la cadena alimentaria y promoviendo el monitoreo ambiental en matrices clave como agua y suelo²³. Su implementación ha revelado correlaciones significativas entre el uso de antibióticos y la aparición de resistencia bacteriana, sirviendo de base para fortalecer políticas públicas en prescripción, regulación veterinaria y gestión de residuos (Ajulo y Awosile, 2024).

Por otra parte, el Centro Europeo para la Prevención y el Control de Enfermedades, institución pública financiada con recursos de la Unión Europea, coordina la Red Europea de Vigilancia de la Resistencia a los Antimicrobianos. Esta red ha evolucionado desde un enfoque clínico hacia un modelo integrado que incluye el monitoreo ambiental. En virtud de la nueva Directiva de Aguas Residuales Urbanas, la Unión Europea ha impuesto que los Estados miembros monitoreen la resistencia antimicrobiana en las aguas residuales de todas las plantas de tratamiento que sirven a más de 100.000 habitantes para el 2027. Varios países europeos ya han incorporado el seguimiento de residuos de antibióticos y genes de resistencia en influentes y efluentes de sus estaciones depuradoras, utilizando estos análisis como herramienta de alerta temprana para la gestión del riesgo sanitario (Aarestrup y Woolhouse, 2020).

23 OMS (2021), "Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System (GLASS)", disponible en <https://n9.cl/lqsn8>.

Este enfoque permite obtener una “fotografía” de la situación de resistencia antimicrobiana en la comunidad y detectar tendencias en el tiempo (Flach et al., 2021). En ese marco, se analizaron 53 antibióticos en efluentes de siete países, detectando ciprofloxacina, azitromicina y cefalexina como marcadores de contaminación antibiótica que ocasionalmente superan umbrales de riesgo ecológico, por lo que se recomendó incorporarlos en programas regulares de monitoreo ambiental (Rodríguez-Mozaz et al., 2020). En resumen, la experiencia europea destaca la importancia de la vigilancia coordinada, combinando políticas regulatorias (como la lista de vigilancia de la Unión Europea) con investigaciones colaborativas que mapean la presencia de residuos antimicrobianos para informar estándares de calidad ambiental.

En Estados Unidos, un estudio pionero desarrollado por el Servicio Geológico --entidad pública de dicho país--, detectó la presencia de 95 contaminantes emergentes, incluidos antimicrobianos, en 139 cauces de agua de 30 estados diferentes (Kolpin et al., 2002). Estos hallazgos motivaron a instituciones como la Agencia de Protección Ambiental a incluir ciertos antibióticos en las listas de contaminantes prioritarios para evaluar su regulación²⁴. Además, en Estados Unidos existe el Sistema Nacional de Monitoreo de Resistencia Antimicrobiana, un sistema público que integra la vigilancia ambiental con datos sobre residuos antimicrobianos y cepas resistentes²⁵. Históricamente, ha monitoreado la resistencia antimicrobiana en tres ámbitos: la salud humana, los animales de consumo y los alimentos. Si bien la dimensión ambiental es aún incipiente, el país ha iniciado programas piloto con un enfoque One Health para incorporar la vigilancia de la resistencia antimicrobiana en el agua y el saneamiento. Desde 2020, la Agencia de Protección Ambiental lidera un grupo de trabajo enfocado en lanzar un programa de monitoreo en aguas superficiales a escala de cuencas y a nivel nacional (Franklin et al., 2024). Este esfuerzo piloto busca anticipar la diseminación comunitaria de bacterias resistentes mediante el muestreo sistemático de aguas residuales municipales e incluso efluentes industriales. La experiencia estadounidense resalta la necesidad de financiamiento sostenido, de coordinación técnica interinstitucional y de protocolos analíticos validados para consolidar la vigilancia ambiental como parte de los sistemas nacionales de salud pública (Franklin et al., 2024).

En Asia, países como India y China concentran altos niveles de contaminación ambiental por residuos farmacéuticos, por lo que han impulsado investigaciones que han alertado globalmente sobre la presencia de antibióticos en ríos y plantas industriales (Huang et al., 2020; Larsson, de Pedro y Paxeus,

24 U.S. Environmental Protection Agency (2022), “Drinking Water Contaminant Candidate List 5 - Final (CCL5)”, disponible en <https://n9.cl/vm3k8> y U.S. Environmental Protection Agency (2025), “CCL 4 - Chemical Contaminants”, disponible en <https://n9.cl/g84899>.

25 U.S. Centers for Disease Control and Prevention (06/08/2024), “About the National Antimicrobial Resistance Monitoring System (NARMS)”, disponible en <https://n9.cl/giohf>.

2007). Cabe destacar que Asia es un líder mundial en cuanto a producción científica sobre antibióticos ambientales, donde trabajos comparativos muestran que la mayoría de los estudios mundiales sobre residuos antimicrobianos en agua dulce provienen de países asiáticos, reflejando la magnitud del problema en ese continente (Thakur et al., 2025).

Por su parte, países africanos como Ghana, Senegal y Madagascar han comenzado a participar en proyectos piloto internacionales como Tricycle (a cargo de la OMS), que monitorean la bacteria *Escherichia coli*, resistente en aguas servidas²⁶. Estas experiencias, si bien incipientes, contribuyen a construir capacidades locales e instalar la relevancia del enfoque One Health.

En América Latina, la vigilancia ambiental de antimicrobianos también es incipiente. La mayoría de los países no han regulado recientemente sus normas de calidad del agua y los contaminantes emergentes no se incluyen (Sandoval et al., 2024). Sin embargo, existen avances científicos relevantes: por ejemplo, en Brasil se analizaron antimicrobianos en cuencas hidrográficas de Río de Janeiro y en agua potable urbana, evidenciando residuos persistentes en el ambiente (Bianco et al., 2022). En otros países, como Argentina y Colombia, estudios puntuales han detectado antimicrobianos en aguas hospitalarias, ríos urbanos y suelos agrícolas, aunque sin contar aún con sistemas nacionales consolidados (Sandoval et al., 2024). Además, en 1996 se formó la Red Latinoamericana de Vigilancia de la Resistencia a los Antimicrobianos (ReLAVRA), a cargo de la Organización Panamericana de la Salud, con el objetivo de fundamentar las políticas e intervenciones para la prevención y control de la resistencia antimicrobiana²⁷. En el 2000 se instauró ReLAVRA+ para expandirse en la región e integrar al Caribe. La red provee información clave para la elección del tratamiento empírico de las enfermedades infecciosas y el diseño de estrategias locales y regionales de utilización de antimicrobianos.

Frente a este desafío, la experiencia internacional ha explorado esquemas de responsabilidad extendida del productor para así distribuir los costos de tratamiento de microcontaminantes entre los productores, el Estado y los usuarios finales. La Directiva de la Unión Europea 2024/3119 sobre aguas residuales urbanas establece que las compañías farmacéuticas y de cosméticos deberán financiar al menos el 80% de los costos asociados al tratamiento adicional destinado a la eliminación de microcontaminantes vinculados a sus productos, consagrando el principio de “quien contamina paga” en este ámbito²⁸.

26 OMS (2025), “One Health: Integrated multi sector surveillance”, disponible en <https://n9.cl/w8dw4>.

27 Organización Panamericana de la Salud (2021), “Red Latinoamericana y del Caribe de Vigilancia de la Resistencia a los Antimicrobianos - ReLAVRA+”, disponible en <https://n9.cl/16bvg>.

28 Baker y McKenzie (09/01/2025), “European Union: Extended producer responsibility for pharmaceutical and cosmetic companies”, *InsightPlus*, disponible en <https://n9.cl/b82dk>.

Más allá del tratamiento, organismos internacionales como la OMS y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) han destacado la importancia de actuar también sobre el ciclo de vida de los antimicrobianos, promoviendo medidas como la prescripción y dispensación ajustada a la dosis necesaria, restricciones a la venta sin receta, programas de devolución de medicamentos vencidos y campañas de educación para reducir la eliminación inadecuada de fármacos al alcantarillado o a la basura (OCDE, 2019; OMS, 2019). En ese sentido, Francia²⁹ y Suecia han avanzado en el uso de sistemas de clasificación ecológica de medicamentos, mientras que Canadá cuenta con un sistema nacional de recolección de fármacos no utilizados (Wennmalm y Gunnarsson, 2009)³⁰. A nivel latinoamericano, si bien estas medidas son aún limitadas, en Chile se han desarrollado iniciativas relevantes desde el sector privado, tal y como se señaló previamente en este documento.

Estos antecedentes científicos confirman la urgencia de avanzar hacia un sistema de vigilancia ambiental integrado. A ello se suma una brecha importante en la integración de datos hídricos, lo que dificulta la toma de decisiones basadas en evidencia. En ese marco, Chile tiene la oportunidad de construir una estrategia preventiva que integre la dimensión ambiental como parte activa de su respuesta frente a la resistencia antimicrobiana.

4. Propuesta de política pública: sistema nacional de vigilancia ambiental de residuos antimicrobianos

La evidencia científica ha demostrado la presencia de residuos antimicrobianos y de genes de resistencia en diversos ecosistemas acuáticos. Sin embargo, Chile aún carece de una estrategia nacional que aborde de forma sistemática esta dimensión ambiental. Ante este escenario, se propone el diseño e implementación del SINVAR-AM. Esta herramienta permitirá establecer una vigilancia continua de estos compuestos en cuerpos de agua de relevancia sanitaria, ecológica y productiva, generando información robusta para orientar decisiones regulatorias y fortalecer la respuesta intersectorial bajo el enfoque One Health.

A diferencia del monitoreo aislado, la vigilancia ambiental requiere de gobernanza institucional, protocolos validados, plataformas interoperables y una lógica de uso de datos para anticipar riesgos y aplicar medidas preventivas. A continuación, se detallan los pilares de esta propuesta y las condiciones necesarias para su viabilidad e implementación progresiva.

29 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/3dzbc>.

30 Health Products Stewardship Association (04/05/2015), “What’s in Your Medicine Cabinet?”, disponible en <https://n9.cl/gfswq>.

a) Gobernanza intersectorial y articulación institucional

Considerando los desafíos históricos de fragmentación institucional en la gobernanza del agua, se propone avanzar hacia una gobernanza compartida del SINVAR-AM, liderado por el Ministerio del Medio Ambiente y coordinada con el Ministerio de Salud, el SAG, la Superintendencia de Servicios Sanitarios, la Dirección General de Aguas y la Superintendencia del Medio Ambiente. Esta articulación intersectorial permitiría consolidar una respuesta coherente frente a los riesgos ambientales y sanitarios asociados a los contaminantes emergentes, evitando duplicidades y fortaleciendo la coordinación entre las políticas de agua, medio ambiente y salud.

En este marco, adquiere especial relevancia el rol estratégico que podría desempeñar la futura Subsecretaría de Recursos Hídricos, todavía no operativa, pero propuesta actualmente en el proyecto de ley en tramitación (Boletín 14.446-09)³¹. Esta subsecretaría debiera dirigir la articulación de los sistemas de monitoreo y vigilancia hídrica con un enfoque preventivo y ecosistémico, promoviendo la integración de la resistencia antimicrobiana como componente estructural de la gestión ambiental del agua. En conjunto con el Ministerio del Medio Ambiente, esta subsecretaría podría convocar una mesa técnica intersectorial permanente, con representación de las agencias ambientales, sanitarias, productivas y de ciencia y tecnología. Esta instancia permitiría coordinar la interoperabilidad de datos, definir prioridades de monitoreo, evaluar riesgos y orientar medidas preventivas bajo el enfoque One Health.

Del mismo modo, se propone establecer vínculos formales entre el sistema de vigilancia ambiental de antimicrobianos y los instrumentos nacionales de planificación hídrica e hidrológica, incluyendo la Política Nacional de Recursos Hídricos y los Planes Estratégicos de Recursos Hídricos. Esta integración permitirá alinear los esfuerzos en materia de calidad del agua con los objetivos de seguridad hídrica, adaptación al cambio climático y protección de la salud pública. Finalmente, se recomienda incorporar explícitamente la dimensión de los residuos antimicrobianos dentro de los marcos regulatorios emergentes, como parte de una estrategia integral para enfrentar los desafíos asociados a la farmacorresistencia en el ambiente.

b) Plataforma nacional de datos y red de monitoreo

Los antecedentes recopilados por este estudio refuerzan la necesidad de contar con una plataforma nacional de datos ambientales especializada, capaz de integrar de forma interoperable información sobre datos fisicoquímicos, residuos antimicrobianos y resistencia bacteriana en el medio ambiente. Esta plataforma no solo permitiría visualizar y analizar la presencia de contaminantes en distintas matrices acuáticas, sino que también serviría como base técnica para orientar decisiones regulatorias y priorizar acciones preventivas bajo un enfoque de gestión integrada.

31 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/bkroi>.

La propuesta considera también el diseño e implementación de un modelo georreferenciado, vinculado a sistemas existentes como la Red de Observación Ambiental de la Superintendencia de Medio Ambiente³² y el futuro Sistema Nacional Unificado de Información Hídrica impulsado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, lo que permitirá conectar el monitoreo ambiental con la información sanitaria, productiva e hidrológica del país.

La red de monitoreo debería contar con puntos fijos y rotativos distribuidos por cuencas, incluyendo sectores urbanos, agrícolas e industriales, así como zonas prístinas, siguiendo las experiencias metodológicas del desarrollo de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Chile. Esta estructura permitirá capturar gradientes de presión antrópica y generar información representativa del territorio nacional, siguiendo criterios de priorización ambiental y sanitaria. Además de esto, proponemos lo siguiente:

- Lista de observación de antimicrobianos prioritarios. Se propone la elaboración de una lista de observación de compuestos antimicrobianos y genes de resistencia a ser monitoreados continuamente. Esta lista será construida en base a criterios técnicos como el volumen de uso nacional, persistencia ambiental, toxicidad ecológica y riesgo de selección de resistencia. Su revisión y actualización anual será responsabilidad de una mesa técnica permanente liderada por el Ministerio del Medio Ambiente y la futura Subsecretaría de Recursos Hídricos, con el apoyo de centros de investigación públicos, universidades y entidades reguladoras como la Superintendencia del Medio Ambiente y la Superintendencia de Servicios Sanitarios. La lista de observación será el instrumento rector para diseñar campañas de monitoreo e incorporar progresivamente nuevos parámetros a la normativa ambiental.
- Integración normativa y fiscalización. El sistema propuesto aportará la evidencia necesaria para incluir compuestos antimicrobianos como parámetros en las Normas Secundarias de Calidad Ambiental y en las normas de emisión, alineándose con los procesos de actualización del Decreto Supremo N° 90 y del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental que ya contempla riesgos asociados a la resistencia antimicrobiana. Esta articulación permitirá transformar los resultados del monitoreo en herramientas efectivas de fiscalización y prevención ambiental.
- Mecanismos de financiamiento y sostenibilidad. La implementación del sistema será progresiva, comenzando con un piloto en tres cuencas representativas. Se propone una estrategia de financiamiento mixto que combine recursos públicos sectoriales, tarifas de saneamiento, fondos de investigación, cooperación internacional y mecanismos de responsabilidad extendida del productor, particularmente para el sector farmacéutico. No obstante, la aplicación de la Ley 20.920, que establece un marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y el fomento al reciclaje

32 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/a9b4t5>.

en Chile, presenta actualmente limitaciones, ya que los antimicrobianos no forman parte de los productos prioritarios definidos por la normativa. Sin embargo, la experiencia acumulada en categorías ya reguladas, como envases, embalajes y neumáticos, ofrece un marco de referencia para avanzar hacia su eventual inclusión.

c) Medidas sectoriales y priorización de fuentes

Las plantas de tratamiento de agua residual y los establecimientos hospitalarios se reconocen como fuentes prioritarias de emisión de residuos antimicrobianos, en tanto concentran descargas provenientes del consumo humano y de actividades médicas especializadas. Para abordar esta situación, se propone implementar un programa nacional de vigilancia ambiental centrado en estas fuentes, articulado con la lista de observación y los lineamientos técnicos definidos por la mesa técnica permanente. Este programa será coordinado por el Ministerio del Medio Ambiente, en conjunto con el Ministerio de Salud, la Superintendencia de Servicios Sanitarios y el SAG, según corresponda. Sus funciones se estructurarán en tres componentes principales:

- Monitoreo en puntos críticos. La Superintendencia del Medio Ambiente y la Superintendencia de Servicios Sanitarios serán responsables de coordinar la instalación de estaciones de muestreo en efluentes de hospitales de alta complejidad, donde se evaluará la carga de antibióticos emitida, y en las salidas de las plantas de tratamiento de agua residual seleccionadas, para así medir la eficiencia de la remoción de compuestos incluidos en la lista de observación.
- Definición de metas y evaluación de desempeño. La mesa técnica permanente, liderada por el Ministerio del Medio Ambiente y la futura Subsecretaría de Recursos Hídricos, establecerá indicadores de riesgo por compuesto (considerando toxicidad y persistencia) y metas anuales de reducción de cargas. Los resultados serán evaluados periódicamente y reportados públicamente en plataformas como la del Sistema de Información Ambiental del ministerio.
- Evaluación de tecnologías de tratamiento avanzado. En colaboración con centros de investigación y universidades, se desarrollarán estudios piloto en plantas de tratamiento de agua residual seleccionadas, priorizando aquellas con mayor carga tratada o riesgo ambiental. El Ministerio de Salud y la Superintendencia de Servicios Sanitarios liderarán el diseño de estos pilotos, evaluando tecnologías como la oxidación avanzada, adsorción o membranas, con criterios de costo-efectividad y escalabilidad.

Este enfoque permitirá pasar del diagnóstico a una gestión activa del riesgo ambiental, incorporando evidencia técnica en la fiscalización, fortaleciendo la calidad de los tratamientos y avanzando hacia cuerpos de agua más protegidos frente a contaminantes emergentes.

4.1 Estrategia de implementación y sostenibilidad

Desde una perspectiva temporal, la implementación del SINVAR-AM debiera avanzar en etapas graduales, en concordancia con las capacidades institucionales del país, priorizando cuencas críticas y fortaleciendo las funciones públicas de vigilancia. En el corto plazo, se recomienda iniciar con un piloto en tres cuencas representativas, que permita validar protocolos de muestreo, capacitar equipos regionales y consolidar una plataforma interoperable de datos. Esta etapa requiere una inversión moderada y puede apoyarse en la infraestructura y capacidades ya existentes, como la Red de Observación Ambiental de la Superintendencia del Medio Ambiente y los laboratorios acreditados de salud pública y ambiental. En el mediano plazo debiera ampliarse la cobertura territorial integrando parámetros priorizados en los instrumentos regulatorios como las Normas Secundarias de Calidad Ambiental y actualizando la lista de observación conforme a nueva evidencia científica. A largo plazo, el sistema podrá consolidarse a nivel nacional, con foco en zonas de alto riesgo y articulación con la vigilancia clínica y veterinaria bajo el enfoque One Health.

En términos de gobernanza, el sistema debiera estructurarse bajo un modelo intersectorial integrado al Sistema Nacional Unificado de Información Hídrica, con participación del Ministerio del Medio Ambiente, el Ministerio de Salud, el SAG, la Superintendencia de Servicios Sanitarios, la Superintendencia del Medio Ambiente y la Dirección General de Aguas, permitiendo convertir datos ambientales en insumos efectivos para la regulación y planificación. Desde la perspectiva financiera, se propone un esquema de financiamiento mixto, combinando recursos públicos, fondos concursables y cooperación internacional. A futuro, la inclusión de los antimicrobianos en la Ley 20.920 permitirá una distribución más justa de los costos, evitando sobrecargar a los usuarios finales.

Finalmente, para asegurar su mejora continua y sostenibilidad en el tiempo, el sistema contemplará mecanismos de evaluación periódica, con indicadores verificables de cobertura, oportunidad, calidad analítica y uso regulatorio.

4.2 Estrategia de difusión, educación y transferencia del conocimiento

La implementación del SINVAR-AM contempla un componente fundamental de educación, sensibilización y comunicación pública, orientado a traducir la evidencia técnica en herramientas comprensibles y útiles para la ciudadanía. Esta línea de acción responde directamente al cuarto objetivo específico del proyecto, fortaleciendo el vínculo entre ciencia, políticas públicas y comunidad.

La propuesta tiene que ver con el diseño de una estrategia de difusión segmentada, que contemple campañas educativas para medios de comunicación masivos y redes sociales, materiales didácticos dirigidos a establecimientos escolares y jornadas participativas en barrios, centros de salud, ferias libres

y juntas de vecinos. En estos espacios, donde muchas veces circulan medicamentos sin regulación ni supervisión profesional, se promoverá activamente la correcta disposición de fármacos vencidos o no utilizados (OCDE, 2019; OMS, 2019).

Como referencia, el programa de recolección de medicamentos de las Farmacias del Dr. Simi ha demostrado que es posible generar una respuesta ciudadana efectiva cuando existen canales claros y accesibles³³. Esta experiencia puede inspirar la instalación de puntos de recolección en farmacias populares y recintos municipales de atención primaria, con apoyo técnico del Ministerio del Medio Ambiente y de la coordinación local.

Además, se promoverá la articulación con los programas de educación ambiental de dicho ministerio, incorporando contenidos sobre resistencia antimicrobiana ambiental en las iniciativas formativas ya existentes. El enfoque será inclusivo y territorializado, adaptando los mensajes a distintos niveles de comprensión y contextos socioculturales. Por otra parte, se considera parte de esta estrategia la comunicación técnica e intersectorial. Los resultados del sistema serán publicados en plataformas abiertas como el Sistema de Información Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente, acompañados de indicadores clave que faciliten su comprensión pública y la toma de decisiones basadas en evidencia. En conjunto, estas acciones permitirán que el sistema no solo genere datos de alta calidad, sino que promueva transformaciones culturales sostenidas en el tiempo, fortaleciendo la corresponsabilidad entre el Estado, el sector productivo y la ciudadanía.

4.3 Resultados esperados del sistema nacional de vigilancia ambiental de residuos de antimicrobianos

La implementación progresiva del SINVAR-AM permitirá consolidar una política pública robusta en materia de vigilancia ambiental de antimicrobianos. A partir del diagnóstico y la propuesta desarrollada, se identifican cuatro medidas prioritarias para avanzar de forma concreta:

- La creación de una lista de observación con respaldo técnico y marco legal.
- El diseño de una red de vigilancia ambiental operativa y conectada con los sistemas sanitarios y regulatorios.
- La incorporación explícita de la resistencia antimicrobiana ambiental en las normas de calidad de las aguas.
- El fortalecimiento institucional mediante la activación de una gobernanza interministerial permanente y el liderazgo técnico de la futura subsecretaría de recursos hídricos.

33 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/q9l2t>. Ver también <https://n9.cl/wmo7f>.

- Estas medidas permitirán que el monitoreo ambiental evolucione hacia un sistema de vigilancia orientado a la prevención, la gestión del riesgo y la toma de decisiones informada. A su vez, contribuirán a garantizar la continuidad técnica y financiera del sistema a través de una institucionalidad clara y una hoja de ruta viable. Con la implementación de esta propuesta, Chile no solo fortalecería su infraestructura sanitaria y ambiental, sino que también se posicionaría como referente regional en la vigilancia ambiental de resistencia a los antimicrobianos, en línea con las mejores prácticas internacionales.

5. Lineamientos generales, futuros estudios e implicancias en la política pública

El SINVAR-AM se proyecta como una plataforma estratégica para avanzar en la gestión ambiental de los residuos antimicrobianos en Chile. Su implementación permitirá cerrar una brecha histórica en la vigilancia de contaminantes emergentes, integrando monitoreo, regulación y prevención bajo el enfoque One Health. En este contexto, y con miras al mediano y largo plazo, es necesario fortalecer tres ejes principales:

- Actualización continua de la lista de observación, incorporando evidencia científica reciente, datos de uso nacional y nuevos compuestos identificados en estudios regulatorios o académicos.
- Interoperabilidad de datos y mejora de la trazabilidad, integrando plataformas existentes (como la Superintendencia del Medio Ambiente, la Mesa Técnica en Recursos Hídricos del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación y la Superintendencia de Servicios Sanitarios) y fortaleciendo los vínculos con los sistemas de vigilancia en salud humana y animal.
- Seguimiento y evaluación de desempeño mediante indicadores verificables, como la cobertura territorial, la oportunidad de reporte y la validación de resultados, junto con mecanismos de retroalimentación técnica y de evaluación externa.

En el plano técnico, se requiere impulsar estudios complementarios que respalden la toma de decisiones regulatorias. Por ende, es necesario lo siguiente:

- Una evaluación de tecnologías de tratamiento avanzado, incluyendo análisis de costo-efectividad y estudios piloto en plantas de tratamiento de agua residual de alto riesgo.
- Un análisis y evaluación de modelos financieros destinados a definir los mecanismos de distribución de costos entre las empresas farmacéuticas, los usuarios y el Estado.
- Una investigación sobre la dinámica de los genes de resistencia en ambientes acuáticos y sus posibles impactos en la salud humana y la biodiversidad.

Desde una perspectiva de política pública, la información generada por el SINVAR-AM permitirá respaldar procesos de revisión normativa, como la actualización de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental y de los decretos de descarga. Además, facilitará la aplicación progresiva de instrumentos como la responsabilidad extendida del productor, el diseño de incentivos regulatorios y la promoción de buenas prácticas a lo largo del ciclo de vida de los antimicrobianos. En conjunto, el sistema permitirá transformar el monitoreo ambiental en una herramienta concreta para la fiscalización, la gestión de riesgos y el diseño de políticas más eficaces frente a la resistencia antimicrobiana en el país.

6. Conclusiones

La resistencia a los antimicrobianos constituye una amenaza creciente para la salud pública, la producción de alimentos y la integridad de los ecosistemas, y los antecedentes reunidos en este estudio confirman que la dimensión ambiental de este problema ya es una realidad en Chile. La evidencia disponible da cuenta de la presencia de residuos de antimicrobianos y de genes de resistencia en diversos ecosistemas acuáticos del país, en un contexto en el que aún no existe un sistema nacional de vigilancia ambiental sistemática.

El análisis desarrollado demuestra que Chile cuenta con capacidades técnicas consolidadas, marcos de gobernanza intersectorial en desarrollo y una infraestructura sanitaria avanzada que permiten avanzar de manera realista hacia un sistema nacional de vigilancia ambiental de residuos de antimicrobianos (SINVAR-AM). No obstante, también se constatan brechas críticas en materia de coordinación institucional, de integración de datos hídricos y de ausencia de criterios regulatorios específicos para antimicrobianos y otros contaminantes emergentes en la normativa ambiental vigente.

En este escenario, el SINVAR-AM propuesto se proyecta como una herramienta estratégica de política pública, orientada a cerrar la brecha ambiental del Plan Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos mediante la integración de monitoreo, vigilancia, regulación y fiscalización bajo un enfoque One Health. Su diseño modular y progresivo, sustentado en experiencias internacionales y en la infraestructura existente (Red de Observación Ambiental, laboratorios acreditados, futuros Sistema Nacional Unificado de Información Hídrica y Subsecretaría de Recursos Hídricos), permite iniciar pilotos territoriales en cuencas prioritarias y escalar gradualmente hacia una cobertura nacional.

Desde la perspectiva regulatoria, la información generada por el SINVAR-AM ofrecerá insumos concretos para actualizar las normas de calidad y de emisión, incorporando los residuos antimicrobianos como nuevos pará-

metros en las Normas Secundarias de Calidad Ambiental y en los decretos de descargas. Esto permite que el monitoreo deje de ser únicamente descriptivo y se convierta en una base técnica para metas de reducción, exigencias de tratamiento y acciones de fiscalización ambiental más efectivas.

En el plano económico y de gestión, el estudio destaca la necesidad de avanzar hacia esquemas de financiamiento compartido que distribuyan de forma más equitativa los costos del tratamiento avanzado y las acciones preventivas entre empresas farmacéuticas, prestadores de servicios sanitarios, usuarios y el Estado, en línea con el principio de “quien contamina paga” y con las experiencias de responsabilidad extendida del productor en la Unión Europea. La evaluación y diseño de modelos financieros específicos constituyen, por tanto, un campo prioritario de trabajo para viabilizar la implementación sostenida del SINVAR-AM sin sobrecargar a los hogares.

Las implicancias de política pública trascienden el ámbito estrictamente ambiental. La articulación del SINVAR-AM con los instrumentos de planificación hídrica, las estrategias sanitarias y las políticas productivas permitirá integrar la resistencia a los antimicrobianos con las decisiones sobre seguridad hídrica, ordenamiento territorial, acuicultura, ganadería intensiva y agricultura. De este modo, la vigilancia ambiental pasa a ser un componente estructural de la política de salud pública, de la política de aguas y de la política productiva, y no solo un ejercicio técnico de monitoreo.

Finalmente, el estudio subraya que la sostenibilidad de la respuesta frente a la resistencia a los antimicrobianos requiere combinar instrumentos regulatorios (normas, fiscalización, responsabilidad extendida del productor, exigencias de tratamiento) con estrategias de educación, comunicación y cambio cultural a lo largo del ciclo de vida de los antimicrobianos. Iniciativas de recolección de medicamentos vencidos, campañas de uso responsable y participación comunitaria en territorios críticos son indispensables para reducir la carga de contaminantes en su origen y reforzar la corresponsabilidad entre el Estado, el sector productivo y la ciudadanía.

En conjunto, los resultados muestran que Chile dispone de las condiciones técnicas e institucionales mínimas para dar un salto cualitativo hacia una política pública robusta de vigilancia ambiental de antimicrobianos, siempre que se asuma una decisión política explícita de priorizar la resistencia a los antimicrobianos como un problema país. La implementación del SINVAR-AM ofrece una oportunidad concreta para posicionar a Chile como referente regional en la materia, fortaleciendo simultáneamente la protección de la salud humana, la resiliencia de los ecosistemas acuáticos y la legitimidad de la regulación ambiental basada en evidencia.

Referencias

- Aarestrup, F. M. y Woolhouse, M. E. J.** (2020). Using sewage for surveillance of antimicrobial resistance. *Science*, 367(6478), 630-632. DOI: 10.1126/science.aba3432.
- Ajulo, S. y Awosile, B.** (2024). Global antimicrobial resistance and use surveillance system (GLASS 2022): Investigating the relationship between antimicrobial resistance and antimicrobial consumption data across the participating countries. *PLoS One*, 19(2), e0297921. DOI: 10.1371/journal.pone.0297921.
- Allel, K., Peters, A., Haghparast-Bidgoli, H., Spencer-Sandino, M., Conejeros, J., Garcia, P., Pouwels, K. B., Yakob, L., Munita, J. M. y Undurraga, E. A.** (2024). Excess burden of antibiotic-resistant bloodstream infections: Evidence from a multicentre retrospective cohort study in Chile, 2018-2022. *The Lancet Regional Health*, 40, 100943. DOI: 10.1016/j.lana.2024.100943.
- Altevogt, B. M., Taylor, P., Akwar, H. T., Graham, D. W., Ogilvie, L. A., Duffy, E. y Essack, S. Y.** (2025). A One Health framework for global and local stewardship across the antimicrobial lifecycle. *Communications Medicine*, 5(1), 1-7. DOI: 10.1038/s43856-025-01090-4.
- Aus der Beek, T., Weber, F. A., Bergmann, A., Hickmann, S., Ebert, I., Hein, A. y Küster, A.** (2016). Pharmaceuticals in the environment—Global occurrences and perspectives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(4), 823-835. DOI: 10.1002/etc.3339.
- Bianco, K., de Farias, B. O., Gonçalves-Brito, A. S., Alves do Nascimento, A. P., Magaldi, M., Montenegro, K., Flores, C., Oliveira, S., Monteiro, M. A., Spisso, B. F., Pereira, M. U., Ferreira, R. G., Albano, R. M., Cardoso, A. M. y Clementino, M. M.** (2022). Mobile resistome of microbial communities and antimicrobial residues from drinking water supply systems in Rio de Janeiro, Brazil. *Scientific Reports*, 12(1), 1-11. DOI: 10.1038/s41598-022-21040-7.
- Cabello, F. C.** (2006). Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: A growing problem for human and animal health and for the environment. *Environmental Microbiology*, 8(7), 1137-1144. DOI: 10.1111/j.1462-2920.2006.01054.x.
- Cabello, F. C., Godfrey, H. P., Tomova, A., Ivanova, L., Dölz, H., Millanao, A. y Buschmann, A. H.** (2013). Antimicrobial use in aquaculture re-examined: Its relevance to antimicrobial resistance and to animal and human health. *Environmental Microbiology*, 15(7), 1917-1942. DOI: 10.1111/1462-2920.12134.
- Campanini-Salinas, J., Opitz-Ríos, C., Sagredo-Mella, J. A., Contreras-Sánchez, D., Giménez, M., Páez, P., Tarifa, M. C., Rubio, N. D. y Medina, D. A.** (2024). Antimicrobial resistance elements in coastal water of Llanquihue Lake, Chile. *Antibiotics*, 13(7), 1-14. DOI: 10.3390/antibiotics13070679.
- Carrizo, J. C., Griboff, J., Bonansea, R. I., Nimptsch, J., Valdés, M. E., Wunderlin, D. A. y Amé, M. V.** (2021). Different antibiotic profiles in wild and farmed Chilean salmonids. Which is the main source for antibiotic in fish? *Science of the Total Environment*, 800, 149516. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149516.

- Cheung, C., Naughton, P. J., Dooley, J. S. G., Corcionivoschi, N. y Brooks, C.** (2025). The spread of antimicrobial resistance in the aquatic environment from faecal pollution: A scoping review of a multifaceted issue. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(4), 1-24. DOI: 10.1007/s10661-025-13860-7.
- Díaz-Gavidia, C., Barria, C., Rivas, L., García, P., Alvarez, F. P., González-Rocha, G., Opazo-Capurro, A., Araos, R., Munita, J. M., Cortes, S., Olivares-Pacheco, J., Adell, A. D. y Moreno-Switt, A. I.** (2021). Isolation of ciprofloxacin and ceftazidime-resistant enterobacteriales from vegetables and river water is strongly associated with the season and the sample type. *Frontiers in Microbiology*, 12, 1-14. DOI: 10.3389/fmicb.2021.604567.
- Flach, C. F., Hutinel, M., Razavi, M., Åhrén, C. y Larsson, D. G. J.** (2021). Monitoring of hospital sewage shows both promise and limitations as an early-warning system for carbapenemase-producing Enterobacteriales in a low-prevalence setting. *Water Research*, 200, 1-10. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117261.
- Franklin, A. M., Weller, D. L., Durso, L. M., Bagley, M., Davis, B. C., Frye, J. G., Grim, C. J., Ibekwe, A. M., Jahne, M. A., Keely, S. P., Kraft, A. L., McConn, B. R., Mitchell, R. M., Ottesen, A. R., Sharma, M., Strain, E. A., Tadesse, D. A., Tate, H., Wells, J. E.,... y Garland, J. L.** (2024). A one health approach for monitoring antimicrobial resistance: Developing a national freshwater pilot effort. *Frontiers in Water*, 6, 1-16. DOI: 10.3389/frwa.2024.1359109.
- González-Rojas, N., Lira-Velásquez, D., Covarrubia-López, R., Plaza-Sepúlveda, J., Munita, J. M., Carter, M. J. y Olivares-Pacheco, J.** (2025). Antimicrobial resistance in the Aconcagua river, Chile: Prevalence and characterization of resistant bacteria in a watershed under high anthropogenic contamination pressure. *Antibiotics*, 14(7), 1-12. DOI: 10.3390/antibiotics14070669.
- Herrera-Muñoz, J., Ibáñez, M., Calzadilla, W., Cabrera-Reina, A., García, V., Salazar-González, R., Hernández, F., Campos-Mañas, M. y Miralles-Cuevas, S.** (2024). Assessment of contaminants of emerging concern and antibiotic resistance genes in the Mapocho river (Chile): A comprehensive study on water quality and municipal wastewater impact. *Science of the Total Environment*, 954, 176198. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176198.
- Huang, F., An, Z., Moran, M. J. y Liu, F.** (2020). Recognition of typical antibiotic residues in environmental media related to groundwater in China (2009-2019). *Journal of Hazardous Materials*, 399, 122813. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122813.
- Jara, B., Tucca, F., Srain, B. M., Méjanelle, L., Aranda, M., Fernández, C. y Pantoja-Gutiérrez, S.** (2021). Antibiotics florfenicol and flumequine in the water column and sediments of Puyuhuapi Fjord, Chilean Patagonia. *Chemosphere*, 275, 130029. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130029.
- Kolpin, D. W., Furlong, E. T., Meyer, M. T., Thurman, E. M., Zaugg, S. D., Barber, L. B. y Buxton, H. T.** (2002). Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams, 1999-2000: A national reconnaissance. *Environmental Science and Technology*, 36(6), 1202-1211. DOI: 10.1021/es011055j.

- Larsson, D. G. J., de Pedro, C. y Paxeus, N.** (2007). Effluent from drug manufactures contains extremely high levels of pharmaceuticals. *Journal of Hazardous Materials*, 148(3), 751-755. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.008.
- Marshall, B. M. y Levy, S. B.** (2011). Food animals and antimicrobials: Impacts on human health. *Clinical Microbiology Reviews*, 24(4), 718-733. DOI: 10.1128/CMR.00002-11.
- Michael, I., Rizzo, L., Mcardell, C. S., Manaia, C. M., Merlin, C., Schwartz, T., Dagot, C. y Fatta-Kassinos, D.** (2012). Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment: A review. *Water Research*, 47(3), 957-995. DOI: 10.1016/j.watres.2012.11.027.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación** (2020). Informe de recomendaciones. Disponible en: <https://n9.cl/55lkj>.
- Ministerio de Salud** (2023). *Avances y brechas para la implementación del Plan Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos en Chile*. Disponible en: <https://n9.cl/79922>.
- Ministerio de Salud** (2025a). *Estructura organizacional de la Comisión contra la Resistencia a los Antimicrobianos del Ministerio de Salud*. Disponible en: <https://n9.cl/kvks0>.
- Ministerio de Salud** (2025b). Programas de optimización de uso de antimicrobianos: Informe COMGES 2024. Disponible en: <https://n9.cl/vekv14>.
- Ministerio de Salud, Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, Ministerio de Agricultura, Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, Ministerio de Educación e Instituto de Salud Pública** (2021). *Plan Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos Chile 2021-2025*. Disponible en: <https://n9.cl/qnmpy8>.
- Ministerio del Medio Ambiente** (2017). *Guía para la elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en aguas continentales y marinas 2017*. Disponible en: <https://n9.cl/d7a01>.
- Miranda, C. D., Concha, C., Hurtado, L., Urtubia, R., Rojas, R. y Romero, J.** (2024). Occurrence of antimicrobial-resistant bacteria in intestinal contents of wild marine fish in Chile. *Antibiotics*, 13(4), 1-15. DOI: 10.3390/antibiotics13040332.
- Murray, C. J., Ikuta, K. S., Sharara, F., Swetschinski, L., Robles Aguilar, G., Gray, A., Han, C., Bisignano, C., Rao, P., Wool, E., Johnson, S. C., Browne, A. J., Chipeta, M. G., Fell, F., Hackett, S., Haines-Woodhouse, G., Kashef Hamadani, B. H., Kumaran, E. A. P., McManigal, B.,... y Naghavi, M.** (2022). Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: A systematic analysis. *The Lancet*, 399(10325), 629-655. DOI: 10.1016/S0140-6736(21)02724-0.
- OCDE, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico** (2019). *Pharmaceutical residues in freshwater: Hazards and policy responses*. DOI: 10.1787/c936f42d-en.

- Oliveira, M., Antunes, W., Mota, S., Madureira-Carvalho, Á., Dinis-Oliveira, R. J. y Dias da Silva, D. (2024). An overview of the recent advances in antimicrobial resistance. *Microorganisms*, 12(9), 1-50. DOI: 10.3390/microorganisms12091920.
- OMS, Organización Mundial de la Salud (2017). *Integrated surveillance of antimicrobial resistance in foodborne bacteria: Application of a one health approach*. Disponible en <https://n9.cl/1flks>.
- OMS, Organización Mundial de la Salud (2019). *Turning plans into action for antimicrobial resistance (AMR). Working Paper 2.0: Implementation and coordination*. Disponible en: <https://n9.cl/rar53>.
- Organización Mundial de la Salud (17/11/2021), “Resistencia a los antimicrobianos”, disponible en <https://n9.cl/oa6h9>.
- Organización Mundial de la Salud (17/05/2024), “La OMS pone al día la lista de bacterias farmacorresistentes más peligrosas para la salud humana”, disponible en <https://n9.cl/lxzp2>.
- Panicker, A., Changaroth, A., Gangadharan, S. V., Yamamoto, T., Noothalapati, H., Nambudiri, M. K. y Poornachandran, P. (2025). From farms to homes: Navigating antimicrobial resistance landscapes from livestock to humans. *One Health Advances*, 3(1), 1-16. DOI: 10.1186/s44280-025-00084-0.
- Rodríguez-Mozaz, S., Vaz-Moreira, I., Varela Della Giustina, S., Llorca, M., Barceló, D., Schubert, S., Berendonk, T. U., Michael-Kordatou, I., Fatta-Kassinos, D., Martínez, J. L., Elpers, C., Henriques, I., Jaeger, T., Schwartz, T., Paulshus, E., O’Sullivan, K., Pärnänen, K. M. M., Virta, M., Do, T. T.,... y Manaia, C. M. (2020). Antibiotic residues in final effluents of European wastewater treatment plants and their impact on the aquatic environment. *Environment International*, 140, 1-11. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105733.
- Sandoval, M. A., Calzadilla, W., Vidal, J., Brillas, E. y Salazar-González, R. (2024). Contaminants of emerging concern: Occurrence, analytical techniques, and removal with electrochemical advanced oxidation processes with special emphasis in Latin America. *Environmental Pollution*, 345, 123397. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123397.
- Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (2022). *Informe sobre uso de antimicrobianos en la salmonicultura nacional: Año 2021*. Disponible en: <https://n9.cl/elbkd>.
- Siri, Y., Bumyut, A., Precha, N., Sirikanchana, K., Haramoto, E. y Makkaew, P. (2024). Multidrug antibiotic resistance in hospital wastewater as a reflection of antibiotic prescription and infection cases. *Science of the Total Environment*, 908, 168453. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168453.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (2025). *Informe de gestión del sector sanitario 2024*. Disponible en: <https://n9.cl/i0k9mv>.
- Thakur, R., Singh, A., Dhanwar, R., Kadam, S., Waghmare, U., Lodha, T., Lopes, B. S. y Prakash, O. (2025). Global perspectives on residual antibiotics: Environmental challenges and trends. *Discover Sustainability*, 6(1), 1-17. DOI: 10.1007/s43621-025-01048-5.

- Wennmalm, Å. y Gunnarsson, B.** (2009). Pharmaceutical management through environmental product labeling in Sweden. *Environment International*, 35(5), 775-777. DOI: 10.1016/j.envint.2008.12.008.
- Wilkinson, J. L., Boxall, A. B. A., Kolpin, D. W., Leung, K. M. Y., Lai, R. W. S., Wong, D., Ntchantcho, R., Pizarro, J., Mart, J., Echeverr, S., Garric, J., Chaumot, A., Gibba, P., Kunchulia, I., Seidensticker, S., Lyberatos, G., Morales, J. M., Kang, H.,... y Teta, C.** (2022). Pharmaceutical pollution of the world's rivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(8), 1-10. DOI: 10.1073/pnas.2113947119.
- Zhang, T., Fan, L. y Zhang, Y.** (2025). Antibiotic resistance genes in aquatic systems: Sources, transmission, and risks. *Aquatic Toxicology*, 284, 107392. DOI: 10.1016/j.aquatox.2025.107392.

CÓMO CITAR ESTE CAPÍTULO:

Salazar-González, R. A., García, P., Moreno-Switt, A., Paredes-Kunst, C. L., Donoso, G. D. y Calzadilla, W. (2026). Residuos de antimicrobianos en ecosistemas acuáticos: propuesta de políticas públicas en vigilancia ambiental. En: Centro de Políticas Públicas UC (ed.), *Propuestas para Chile. Concurso Políticas Públicas 2025*. Pontificia Universidad Católica de Chile, p. 159-186.

Veinte años
Concurso Políticas Públicas / 2025

Propuestas para Chile



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE