

Estado de conservación y vulnerabilidad a los efectos del cambio climático y presiones antrópicas en el humedal costero Petrel y cuenca aportante, Pichilemu, O'Higgins

Claudia Rojas^{1,2}, Humberto Aponte¹, Morgane Derrien¹, Ernesto San-Blas¹, Raúl Valenzuela^{3,4}, Etienne Bresciani³, Tania Villaseñor⁵, Jorge Medina¹, Carolina Reyes¹, Gabriel Arriagada¹, Céline Lavergne^{6,7}, Verónica Molina⁶, Brynely Batidas⁸, Yoelvis Sulbaran¹, Bruna Fuentes¹, Matías Barceló¹, Carlos Faundez, Ismael Maldonado¹

¹ Instituto de Ciencias Agroalimentarias, Animales y Ambientales (ICA3), Universidad de O'Higgins, San Fernando, Chile

² Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES), Santiago, Chile

³ Instituto de Ciencias de la Ingeniería (ICI), Universidad de O'Higgins, Rancagua, Chile

⁴ Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), Universidad de Chile

⁵ Facultad de Agronomía y Sistemas Naturales, Pontificia Universidad Católica de Chile

⁶ HUB AMBIENTAL UPLA y Departamento de Ciencias y Geografía, Universidad de Playa Ancha, Valparaíso, Chile

⁷ Departament de Biologia Marina i Oceanografia, Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC), Barcelona, España

⁸ INIA La Platina, La Pintana, Santiago, Chile

⁹ Departamento Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile

Palabras Claves: Biogeoquímica costera, conectividad hidrológica, microbiología ambiental, gobernanza local, resiliencia ecosistémica

Introducción:

Las zonas costeras de Chile son ecosistemas dinámicos y productivos que proveen servicios esenciales como regulación hídrica, captura de carbono y hábitat para gran diversidad biológica. Sin embargo, enfrentan amenazas derivadas del cambio climático —aumento del nivel del mar, erosión costera e intrusión salina— y de la presión humana, como expansión urbana, contaminación y sobreexplotación de recursos, entre otros. En la Región de O'Higgins, el Humedal Petrel, primer humedal urbano declarado en la región, constituye un sitio estratégico para comprender estos procesos. Su estudio permite evaluar el estado de conservación y vulnerabilidad costera, sirviendo como modelo para el monitoreo y la toma de decisiones en otras zonas costeras de la zona central de Chile frente al cambio climático.

Metodología:

El estudio se desarrolló en el Humedal Petrel y su cuenca aportante, en la comuna de Pichilemu (Región de O'Higgins), siguiendo un enfoque interdisciplinario y multiescalar (Figura 1). La aproximación combinó análisis ambientales y sociales para comprender la dinámica ecológica y las vulnerabilidades del sistema frente a presiones naturales y antrópicas.

Se estableció un transecto de monitoreo que se extiende desde la intersección del humedal con el océano Pacífico, avanzando aguas arriba a través del humedal Petrel y su afluente aportante, el estero San Antonio. A lo largo de este gradiente se realizó una caracterización mediante el estudio de suelos, sedimentos y cuerpos de agua (superficial y subterránea). Se determinaron parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, carbono orgánico total, fósforo Olsen, metales), biológicos (actividad enzimática, composición microbiana, nematofauna) y flujos de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O).



Figura 1: Monitoreo del Humedal Petrel y su cuenca aportante con enfoque interdisciplinario y multiescalar

Complementariamente, se instalaron sensores automáticos de agua, temperatura y conductividad en suelos y acuíferos, y estaciones meteorológicas para el monitoreo continuo de temperatura, precipitación y viento. A escala regional, se utilizaron datos de reanálisis ERA5 y simulaciones con el modelo WRF (Weather Research and Forecasting) para analizar tendencias climáticas y validar observaciones locales.

Finalmente, se integraron estos datos biofísicos con el estudio social mediante entrevistas a actores locales, permitiendo vincular la información ambiental y social en un marco común orientado a la gestión adaptativa y la conservación de los ecosistemas costeros.

Resultados y Discusión:

El Humedal Petrel y su cuenca aportante cumplen un rol esencial como sumidero de carbono, regulador hidrológico y reservorio de biodiversidad microbiana y faunística, aunque muestran signos de presión ambiental por cambio de uso del suelo, salinización y contaminación difusa.

El análisis de suelos y sedimentos reveló altos contenidos de carbono orgánico total (hasta 7,4%) y una marcada estabilidad de la fracción húmica, lo que indica condiciones anóxicas y materia orgánica recalcitrante en los sectores saturados del humedal. La actividad enzimática, particularmente la hidrólisis de diacetato de fluoresceína (FDA), mostró mayor intensidad en los suelos del humedal y en horizontes superficiales, reflejando una elevada actividad microbiana general. En contraste, los suelos asociados a un régimen fluvial —ubicados en las terrazas y márgenes del estero— presentaron mayores valores de β -glucosidasa y tirosinasa, asociados a una mayor oxigenación y mineralización de compuestos fenólicos durante los meses más secos, favoreciendo la degradación de materia orgánica y la emisión de CO_2 . Por su parte, las emisiones de CH_4 asociadas a la transformación de la MO bajo condiciones anaeróbicas fueron mayores en suelos bajo régimen de saturación, alcanzando valores hasta tres veces superiores ($5,4 \text{ mg C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) respecto a zonas con mayor presión antrópica. En contraste, las emisiones de N_2O fueron más altas en sitios con mayor presión antrópica ($5,5 \text{ mg N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), mientras que en las zonas saturadas presentaron los valores más bajos ($0,35 \text{ mg N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Estos resultados dependen fuertemente de factores como regímenes de saturación, temperatura y actividad microbiana.

Los estudios de nematofauna evidenciaron comunidades contrastantes entre ambos ambientes. En los sedimentos del humedal predominó *Leptolaimus petrelense* n. sp., recientemente descrita como una nueva especie, junto a *Anoplostoma* sp., ambas indicadoras de condiciones reductoras y alta disponibilidad de materia orgánica. En los suelos asociados al régimen fluvial se registró una mayor diversidad de nematodos bacterívoros y fungívoros, característicos de ecosistemas más oxigenados y con mayor variabilidad hídrica. Además, se detectaron nematodos entomopatógenos (*Steinernema australe* y *Heterorhabditis* sp.), lo que sugiere una red trófica compleja en la interfase terrestre–acuática.

El análisis de aguas superficiales y subterráneas evidenció variaciones en la conductividad eléctrica, temperatura y carbono disuelto a lo largo del transecto que conecta el océano Pacífico con el Estero San Antonio, reflejando la influencia marina y los aportes continentales. En la sección superior del estero se detectaron señales de contaminación microbiológica y química, asociadas a actividades antrópicas y usos agrícolas. A lo largo del transecto, la diferenciación de comunidades microbianas mostró la presencia de taxones indicativos de ambientes salinos en los sectores próximos al humedal, evidenciando un gradiente ecológico vinculado a la conectividad hídrica. Estas diferencias hidrológicas y biológicas explican parte de la heterogeneidad biogeoquímica observada y su relación con los procesos de intercambio gaseoso y mineralización de materia orgánica. Fluctuaciones temporales significativas fueron observadas en las variables medidas; estas se relacionan no solamente con el clima, sino también con la conectividad del sistema con el mar, la cual depende de la apertura o del cierre de la barra de arena separando el humedal del mar.

Los datos meteorológicos y climáticos, obtenidos mediante estaciones locales, reanálisis ERA5 y simulaciones WRF, mostraron una marcada variabilidad térmica e hídrica anual, destacando el rol del régimen de brisa mar-tierra en la regulación térmica costera y en la dinámica de evaporación e infiltración.

Finalmente, el componente social e institucional permitió identificar brechas en la aplicación de la Ley 21.202 y la Ordenanza Municipal de Humedales, así como el rol articulador de actores locales (UOH, DIDECO, DMA, JVV) en la gobernanza adaptativa del humedal. La integración de estos resultados biofísicos y sociales ofrece una visión ecosistémica que refuerza la necesidad de estrategias de manejo sostenible y monitoreo continuo para preservar la funcionalidad ecológica del Humedal Petrel frente a los efectos del cambio climático.

Conclusión:

El estudio desarrollado en el Humedal Petrel y su cuenca aportante proporcionó una visión integral del funcionamiento ecológico y social de este sistema costero. La integración de análisis biogeoquímicos, hidrológicos y biológicos permitió identificar gradientes ambientales que explican la distribución del carbono, la composición microbiana y la actividad enzimática, evidenciando la interacción entre procesos naturales y presiones humanas. Los registros meteorológicos y de modelación climática aportaron un contexto regional para interpretar las variaciones locales de agua y temperatura, fundamentales en la regulación de los flujos de carbono y gases de efecto invernadero. A nivel institucional, se reconocieron avances en la gestión ambiental local, aunque persisten desafíos en la coordinación intersectorial y en la implementación efectiva de instrumentos de protección. En conjunto, los resultados refuerzan la importancia del Humedal Petrel como sistema modelo para la planificación ambiental y la toma de decisiones en zonas costeras de Chile central.

Referencias:

- Arriola, P. (en curso). Estudio de la dinámica estacional y espacial del carbono orgánico y de la condición biológica de suelos y sedimentos de la Laguna Petrel, comuna de Pichilemu, región de O'Higgins. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo, Escuela de Ciencias Agroalimentarias, Animales y Ambientales, Universidad de O'Higgins, Chile.
- Núñez Manqueñir, E. 2025. Análisis de inundaciones de origen fluvial y marino en el sector del estero San Antonio, comuna de Pichilemu, Chile. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Geólogo. Universidad de O'Higgins.
- Bastidas, B., Morales-Montero, P., Holovochov, O., Sulbarán, Y., & San-Blas, E. 2024. *Leptolaimus petrelense* n. sp. (Plectida: Leptolaimidae), a new nematode species from the Petrel lagoon, central Chile. *Nematology*, 26(10), 1115-1125. <https://doi.org/10.1163/15685411-bja10362>
- López Méndez, G. 2024. Análisis local de los flujos de agua subterránea mediante modelación numérica en el Acuífero Cuaternario Costero de Pichilemu. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Geólogo. Universidad de O'Higgins.
- Morgane Derrien, Céline Lavergne, Polette Aguilar-Muñoz, Yoelvis Sulbarán, María Soledad Pavlov, Macarena Pérez, Carolina Reyes, Gabriel Arriagada, Etienne Bresciani, Ismael Maldonado, Tania Villaseñor, Verónica Molina, Claudia Rojas. 2025. Comprehensive approach to coastal lagoon ecological health evaluation: Example of Petrel Lagoon, Central Chile, *Ecological Indicators*, Volume 176, 113679, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113679>.

Fuente de Financiamiento

Proyecto: Sistema Articulado de Investigación en Cambio Climático y Sustentabilidad (URO-RED21992, MINEDUC, Chile).