



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado

Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas
Programa de Magíster en Ciencias con Mención en Oceanografía

**Aportes continentales y oceánicos de nutrientes inorgánicos al
golfo de Arauco (Región del Biobío) y un análisis del estado
trófico**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias con Mención en
Oceanografía

Yasser Fernández Perera

Profesor Guía: Dr. Renato Quiñones
Profesor Co-guía: Dr. Marcus Sobarzo

Concepción
2024

La Tesis de “*Magíster en Ciencias con Mención en Oceanografía*” titulada “*Aportes continentales y oceánicos de nutrientes inorgánicos al golfo de Arauco (Región del Biobío) y un análisis del estado trófico*”, del Sr. Yasser Fernández Perera y realizada en la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, ha sido aprobada por la siguiente Comisión de Evaluación:

Dr. Renato Quiñones
Profesor Guía
Departamento de Oceanografía
Universidad de Concepción

Dr. Marcus Sobarzo
Profesor Co-Guía
Departamento de Oceanografía
Universidad de Concepción

Dra. Laura Farías
Miembro Comité de Tesis
Departamento de Oceanografía
Universidad de Concepción

Dr. Marcelo Gutiérrez
Miembro Comité de Tesis
Departamento de Oceanografía
Universidad de Concepción

Dr. Diego Narváez
Director
Programas de Postgrados en Oceanografía
Departamento de Oceanografía
Universidad de Concepción

Derecho de Autor

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

A mi madre Dulce María.

A la memoria de mis abuelos Olga Perera y Pedro Aquilino.

A la memoria de mi maestro y amigo, Rolando Hernández Masías.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi Profesor Guía, el Dr. Renato Quiñones, por su aporte a mi formación científica y por su crucial contribución a la realización de esta tesis. Quisiera también expresar mi agradecimiento a mi Profesor Co-guía, el Dr. Marcus Sobarzo por su importante contribución al desarrollo de esta investigación.

Agradezco a los Doctores Benjamín Sraín, Odette Vergara y Rodrigo Montes, por su colaboración y buena disposición para resolver dudas durante el desarrollo de la tesis.

Agradezco a mi familia y a mi compañera Indira Repilado Hernández.

Esta Tesis fue financiada por el Programa de Estudios Ecosistémicos del Golfo de Arauco (PREGA) de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas de la Universidad de Concepción financiada por Celulosa Arauco y Constitución S.A. y por el Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuícola (INCAR; FONDAP-ANID 15110027 y 1522A0004)

CURRICULUM VITAE

Yasser Fernández Perera

Nacido el 25 de junio de 1988

2009-2014: Licenciado en Geografía, Facultad de Geografía, Universidad de la Habana, Cuba.

Publicaciones

- Silva, N., Rivas, L., Catalina, O., Fernández Y. 2017. Reajuste de densidad aparente y retención de carbono: Modelos idóneos para arenas cubanas. M+A. Revista Electrónica de Medioambiente. 18 (2): 117-135.

Áreas de investigación

- Principal: Oceanografía Química
- Secundaria: Oceanografía Física

Cruceros oceanográficos

- Crucero Archipiélago Los Canarreos, ICiMar-GEOCUBA, Cuba, febrero 2015.
- Crucero Archipiélago Los Colorados , ICiMar-GEOCUBA, Cuba, abril 2015.
- Crucero Archipiélago Jardines del Rey, ICiMar-GEOCUBA, Cuba, agosto 2015.
- Crucero Archipiélago Jardines de la Reina, ICiMar-GEOCUBA, Cuba, noviembre 2015.

- Crucero Estudio de Zona de Préstamo de Cayo Blanco, GAMMA-Compañía de dragado holandesa VanOor, Cuba, septiembre de 2015.
- Crucero Estudio de Zona de Préstamo de Cayo Coco, GAMMA-Compañía de dragado holandesa VanOor, Cuba, mayo de 2016.
- Crucero Estudio de Zona de Préstamo de Cayo Santa María, GAMMA-Compañía de dragado holandesa VanOor, Cuba, diciembre de 2016.

Estadías de investigación o entrenamiento

- Laboratorio de Procesos Costeros del Centro de Servicios Ambientales de Matanzas (CSAM). Procesos costeros y criterios metodológicos para la recuperación de playas. Dr. José Luis Juanes (ICiMar). Cuba enero de 2015.
- Laboratorio de Computación de GEOCUBA. Entrenamiento en Procesamiento Digital de Imágenes de Satélite. Dr. José Luis Juanes (ICiMar). Cuba enero de 2016.
- Laboratorio de Química Orgánica de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Entrenamiento en Sedimentología Marina. MSc Lourdes Rivas”, Matanzas Cuba, junio de 2016.

CONTENIDO

CURRICULUM VITAE	vi
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	13
ABSTRACT	17
1.- INTRODUCCIÓN.....	20
1.1 Límites fisiográficos y antecedentes del golfo de Arauco	24
1.2 Hidrografía y dinámica del golfo de Arauco.....	26
1.3 Importancia económica y social del golfo de Arauco	28
1.4 Unidades fiscalizables y Servicio de Evaluación Ambiental en el golfo de Arauco.....	29
2.-HIPÓTESIS DEL TRABAJO Y OBJETIVOS.....	31
2.1 Hipótesis	31
3 OBJETIVO GENERAL.....	31
3.1 Objetivos específicos.....	31
4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
4.1 Capítulo 1: Aportes de nutrientes terrestre, tanto de origen fluvial como antropogénico en el golfo de Arauco, Chile-central	33
4.2 Capítulo 2: Balance de nutrientes y metabolismo neto del ecosistema golfo de Arauco en Chile-central mediante la modelación biogeoquímica LOICZ	35
4.2.1 Modelo biogeoquímico LOICZ	35
4.2.2 Balance de Agua	36
4.2.3 Balance de Sal.....	37
4.2.4 Balance de materiales no conservativos (nutrientes)	37
4.2.5 Estimación de error del modelo LOICZ.....	38
4.2.6 Análisis de sensibilidad del modelo LOICZ	38
4.2.7 Establecimiento de límites fisiográficos, cajas y capas utilizadas en el modelo LOICZ	39

4.3 Capítulo 3: Aportes de nitrito, nitrato, fosfato y amonio que ingresan al golfo de Arauco por la surgencia producida por los vientos sur-oeste.	40
5 RESULTADOS	46
5.1 Capítulo: 1 Aportes de nitrógeno y fósforo terrestre de origen fluvial y antropogénico en el golfo de Arauco, Chile.....	46
5.2 Capítulo: 2 Balance de nutrientes y metabolismo neto del ecosistema golfo de Arauco en Chile-central mediante la modelación biogeoquímica LOICZ	119
5.3 Capítulo 3. Aportes de nutrientes que ingresan al golfo de Arauco por la surgencia producida por vientos suroeste	168
5.3.1 Flujos de nutrientes oceánicos y su variabilidad anual e interanual.	171
5.3.2 Aportes de nutrientes producto a la surgencia costera vs aportes de nutrientes terrestre, tanto de origen natural como antropogénicos en el golfo de Arauco	174
5.3.3 Relación N:P en la capa superficial	175
6 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	177
8.- REFERENCIAS	185
ANEXOS	206

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Unidades fiscalizables ubicadas en el borde costero de las comunas de Hualpén, San Pedro de la Paz, Coronel, Lota y Arauco.....	30
Tabla 2. Cruceros desarrollados en el golfo de Arauco 2015-2019.....	42
Capítulo 2 Tabla 1. Parámetros utilizados en el modelo biogeoquímico LOIZC en el golfo de Arauco (2015-2019).	167
Tabla 2. Metabolismo neto del ecosistema (ENM) y (n-fix-denit) estimados en la capa superficial y profunda en el golfo de Arauco por estaciones del año (2015-2019).	167
Capítulo 3 Tabla 1. Aportes de nutrientes que ingresan al golfo de Arauco (kg d^{-1}) por la surgencia producida por vientos suroeste	169
Tabla 2. Concentraciones de nutrientes en diferentes niveles de profundidad (capa superficial y profunda) en golfo de Arauco	176

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de ubicación del área de estudio.	25
Figura 2. Estaciones de efluentes industriales (puntos negros) y fuentes fluviales (círculos rojos) a lo largo de la costa del golfo de Arauco (25 estaciones en total).	33
Capítulo 2 Figura 1 Ubicación del área de estudio y las estaciones utilizadas en los presupuestos de sal, agua y nutrientes	156
Figura 2. Modelo de una caja y dos capas utilizadas en el presupuesto de agua (V), sal (S) y materiales no conservativos (P y N)	157
Figura 3. Coeficiente de correlación de Spearman. El eje y representa los aportes de nutrientes, dado en kmol/día)	157
Figura 4. Índice ENOS.....	158
Figura 5. Salinidad promedio en la columna de agua (0-30 m) en el golfo de Arauco (2015-2019). Las mediciones de salinidad corresponden a los monitoreos realizados por el Programa de Monitoreo Medio Marino y Estuarino Planta Arauco, MAPA, específicamente la estación 4 (Ver Fig.1). Dichas mediciones presentan una frecuencia trimestral.....	159
Figura 6. Concentración promedio de nutriente (μM) medidos en el golfo de Arauco entre los años 2015-2019. a) nitrito; b) nitrato c) fosfato y d) amonio. Las mediciones de nutrientes corresponden a los monitoreos realizados por el Programa de Monitoreo Medio Marino y Estuarino Planta Arauco, MAPA, específicamente la estación 4 (Ver Fig.1). Dichas mediciones presentan una frecuencia trimestral.....	160
Figura 7. Presupuesto de agua, sal y materiales no conservativos, año 2015	161
Figura 8. Presupuesto de agua, sal y materiales no conservativos del año 2016	162
Figura 9. Presupuesto de agua, sal y materiales no conservativos del año 2017	163
Figura 10. Presupuesto de agua, sal y materiales no conservativos del año 2018	164

Figura 11. Presupuesto de agua, sal y materiales no conservativos del año 2019	165
Figura 12. Modelo de una caja y dos capas utilizadas en el presupuesto anual de agua (V), sal (S) y materiales no conservativos de dos años contrastantes (2015 y 2018).....	166
Capítulo 3 Figura 1. Gráficos de caja para los flujos de nutrientes advectados a la capa superficial en diferentes estaciones del año	172
Figura 2. Gráfico de barras para los aportes interanuales de NID y PID. Período 2015-2019.....	173
Figura 3. Serie de aportes diarios de nitrógeno y fósforo en primavera, verano, otoño e invierno (2015-2019).....	175

RESUMEN

En las zonas costeras existen ecosistemas sensibles que ofrecen hábitats críticos para muchas especies marinas, al tiempo que brindan servicios ecosistémicos de gran importancia para el ser humano. Estos ecosistemas son muy heterogéneos y están sujetos a constantes cambios provocados, en parte, por procesos físicos, químicos y biológicos externos que varían a diferentes escalas espaciales y temporales, por ejemplo, aportes de materia orgánica y nutrientes desde el continente, flujos de aguas subterráneas, fluviales y lavado del suelo, radiación solar, precipitación y surgencia costera, entre otras. Al combinarse estos procesos pueden, bajo ciertas circunstancias, crearse sistemas biológicamente muy productivos, pero vulnerables a las presiones ambientales, tanto naturales como antropogénicas.

Por otra parte, las zonas costeras son altamente pobladas y, en consecuencia, son sistemas altamente vulnerables. Alteraciones biogeoquímicas producidas por ejemplo por el incremento en el ingreso de nutrientes y/o en sustancias contaminantes continentales, pueden desencadenar procesos de eutrofización y cambios en las tramas tróficas (ej. blooms de fitoplancton).

El golfo de Arauco, ubicado en la zona centro-sur de Chile, presenta una orientación hacia el ecuador, siendo considerado como un enclave económico importante del país albergando importantes industrias y actividades económicas claves para la economía nacional. Entre las principales industrias, destaca la pesca, industria forestal y producción de pulpa y celulosa, industria química, minería, producción de energía, turismo

y recreación, entre otras.

La zona ha presentado un rápido crecimiento económico y demográfico. En la actualidad, posee una población de 419 595 personas distribuidas en cinco comunas. Desde el punto de vista oceanográfico, el golfo está bajo la influencia de la surgencia costera, debido a la predominancia de vientos sur-oeste, principalmente desde primavera hasta comienzos de otoño. Los eventos de surgencia llevan a la superficie agua ecuatorial sub-superficial (AESS) con altas concentraciones de nutrientes (20-40 de nitrato, 2,6-3 de fosfato), alta salinidad (34,4-34,9) y bajo contenido de oxígeno disuelto (2-15 % saturación).

Se ha planteado, en la literatura científica, que la carga de nutrientes aportada por el río Biobío explicaría la elevada productividad primaria en el golfo de Arauco. Sin embargo, no existe suficiente información cuantitativa sobre el proceso de incorporación de nutrientes proveniente de otras fuentes externas, tales como los aportes producidos por procesos de surgencia y los flujos antropogénicos terrestres, tanto fluviales como antropogénicos. En este contexto, el presente trabajo de Tesis plantea las siguientes dos hipótesis. Primero, que la concentración de nitrógeno (N) y fósforo (P) que ingresa al golfo de Arauco producto de la surgencia generada por vientos sur-oeste es mayor que aquella proveniente de fuentes de origen terrestre, tanto naturales como antropogénicas y, segundo, que en el golfo de Arauco, durante el periodo primavera-verano la proporción N/P en la capa superficial de la columna de agua será menor que en el periodo de invierno, producto de la influencia de las aguas ecuatoriales subsuperficiales.

Para contrastar estas hipótesis, se estimó el balance de nutrientes en el

golfo de Arauco, determinando la importancia relativa del aporte de nitrógeno inorgánico disuelto y fósforo inorgánico disuelto generado por surgencia y fuentes terrestres fluviales y antropogénicas. Para ello, se compararon los aportes antropogénicos y el ingreso de N y P por surgencia costera en las diferentes estaciones (verano, invierno, primavera y otoño) y a escala interanual (2015 a 2019), utilizando el modelo biogeoquímico de cargas LOICZ de una caja y doble capa (*Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone, LOICZ*) del programa *Future Earth* (Gordon et al. 1996).

Nuestros resultados evidenciaron que en el golfo de Arauco existen 21 fuentes emisoras de nutrientes relacionadas con diferentes actividades o procesos industriales, incluyendo las aguas servidas, además de 4 entradas fluviales principales (ríos Biobío, Laraquete, Carampangue y Tubúl-Raqui. La mayor parte de los nutrientes que llegan a las aguas costeras del golfo de Arauco desde el continente provienen de los ríos, aportando el 65% (56.897 kg d^{-1}) de los aportes totales (87.390 kg d^{-1}); mientras que, los efluentes industriales aportan el 35 % (30.493 kg d^{-1}). Cabe destacar que el aporte de los ríos incluye fuentes naturales y antrópicas.

Las fuentes industriales más relevantes en cuanto a aportes de nutrientes fueron, en primer lugar, la industria y procesamiento de pescado, seguido de la industria forestal y producción de pulpa y celulosa, aguas servidas, producción de energía y, finalmente, otras industrias. Por su parte, las modelaciones indicaron que el sistema recibe flujos de agua, sal y nutrientes desde el océano adyacente hacia la capa profunda durante todo el año, con entradas oceánicas máximas durante la primavera y el verano mientras que, los suministros de origen continental hacia la capa superficial son mayores durante el invierno y primavera. Desde el punto de vista interanual, los flujos de nutrientes desde el océano abierto disminuyeron durante los eventos

cálidos (El Niño) reportados durante los años 2015 y 2019 mientras que, durante los eventos fríos (La Niña) o periodos neutrales no se evidenciaron diferencias significativas.

Los tiempos de residencia del sistema se estimaron en 20 días para la primavera, 35 en verano, 64 en otoño y 40 en invierno. Además, se obtuvieron flujos negativos de Δ PID y Δ NID en la capa superficial y positivos en la capa profunda, indicando producción de materia orgánica suficiente como para ser exportada al océano abierto o ser enterrada en el sedimento marino. Nuestros resultados indican que el golfo de Arauco funciona como un sumidero de carbono con predominio de la fijación de nitrógeno y un estado autótrofo en la capa superficial. La capa profunda, no obstante, mostró heterotrofia en las estaciones de primavera de 2015 y 2017, verano de 2017 y 2019 y otoño de 2017.

ABSTRACT

Coastal zones contain fragile ecosystems that provide critical habitats for many marine species, as well as ecosystem services of great importance to humans. These ecosystems are highly heterogeneous and subject to constant change, in part caused by external physical, chemical and biological processes that vary at different spatial and temporal scales, such as inputs of organic matter and nutrients from the mainland, groundwater and river flows and soil flushing, solar radiation, precipitation and coastal upwelling, among others. The combination of these processes can create systems that are biologically highly productive but vulnerable to environmental pressures, both natural and anthropogenic. On the other hand, coastal zones are highly populated and therefore highly vulnerable systems. Biogeochemical changes caused, for example, by increased nutrient inputs and/or land-based pollutants can trigger eutrophication processes and changes in trophic webs (e.g. phytoplankton blooms).

The Gulf of Arauco, located in south-central Chile, faces the equator and is considered an important economic enclave in the country, hosting major industries and economic activities that are key to the national economy. Among the main industries are fishing, forestry, pulp and cellulose production, chemical industry, mining, energy production, tourism and recreation, among others. The area has experienced rapid economic and demographic growth. It currently has a population of 419,595 spread across five districts. Oceanographically, the gulf is under the influence of coastal upwelling due to the predominance of south-westerly winds, especially in the spring and early autumn. Upwelling events bring to the surface equatorial subsurface water (AESS) with high nutrient concentrations (20-40 nitrate, 2.6-3 phosphate), high salinity (34.4-34.9) and low dissolved oxygen content

(2-15 % saturation). It has been suggested in the scientific literature that the nutrient load contributed by the Biobío River would explain the high primary productivity in the Gulf of Arauco. However, there is not enough quantitative information on the process of nutrient incorporation from other external sources, such as the contributions produced by upwelling processes and anthropogenic terrestrial inputs, both fluvial and anthropogenic. In this context, the present thesis work proposes the following two hypotheses. First, that the concentration of nitrogen (N) and phosphorus (P) entering the Gulf of Arauco as a result of upwelling generated by south-westerly winds is higher than that coming from land-based sources, both natural and anthropogenic, and second, that in the Gulf of Arauco, during the spring-summer period, the N/P ratio in the surface layer of the water column will be lower than in the winter period, due to the influence of subsurface equatorial waters.

To contrast these hypotheses, the nutrient balance in the Gulf of Arauco was estimated, determining the relative importance of the contribution of dissolved inorganic nitrogen and dissolved inorganic phosphorus generated by upwelling and fluvial and anthropogenic land-based sources. For this purpose, anthropogenic inputs and the input of N and P by coastal upwelling were compared in different seasons (summer, winter, spring and fall) and on an interannual scale (2015 to 2019), using the LOICZ biogeochemical model of single-box and double-layer loads (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone, LOICZ) of the Future Earth program (Gordon et al. 1996).

Our results showed that in the Gulf of Arauco there are 21 sources of nutrient emissions related to different activities or industrial processes, including wastewater, in addition to main four fluvial inputs (Biobío, Laraquete, Carampangue and Tubúl-Raqui rivers). Most of the nutrients entering the

coastal waters of the Gulf of Arauco from the mainland come from rivers, contributing 65% (56,897 kg d⁻¹) of the total input (87,390 kg d⁻¹), while industrial discharges (effluents) contribute 35% (30,493 kg d⁻¹). It should be noted that the contribution of rivers includes natural and anthropic sources. The most important industrial sources in terms of nutrient inputs were the fish processing industry, followed by forestry industry and pulp and cellulose production, waste water, energy production and other industries.

The modelling showed that the system receives fluxes of water, salt and nutrients from the adjacent ocean into the deep layer throughout the year, with maximum oceanic inflows during spring and summer, while continental inputs to the surface layer are greatest during winter and spring. Interannually, nutrient fluxes from the open ocean decreased during warm (El Niño) events reported during 2015 and 2019 while no significant differences were evident during cold (La Niña) events or neutral periods. The residence times of the system were estimated to be 20 days in spring, 35 in summer, 64 in autumn and 40 in winter. In addition, negative fluxes of Δ PID and Δ NID were obtained in the surface layer and positive fluxes in the deep layer, indicating sufficient organic matter production to be exported to the open ocean or buried in marine sediments. Our results indicate that the Gulf of Arauco functions as a carbon sink, with a predominance of nitrogen fixation and an autotrophic state in the surface layer. However, the deep layer showed heterotrophy in spring 2015 and 2017, summer 2017 and 2019, and autumn 2017.

1.- INTRODUCCIÓN

Si bien los patrones oceanográficos regionales son relativamente conocidos para la zona central de Chile (ej. Fonseca y Farías, 1987; Sobarzo, 1999; Faúndez-Báez et al, 2001; Parada et al. 2001; Valle-Levinson et al. 2003, Vergara et al. 2016; Gómez et al. 2018, Costa et al. 2019 y Wong et al, 2021), existe poca información sobre el proceso de incorporación de nutrientes al golfo de Arauco por fuentes externas al mismo.

La variabilidad estacional de la surgencia costera, unido a la descarga de los ríos ubicados en la zona centro-sur (ej. Biobío e Itata, Salamanca & Pantoja 2009), son factores que influyen directamente en la distribución espacial y temporal de los nutrientes en la plataforma continental. De igual forma, la composición del fitoplancton de la zona centro-sur de Chile está fuertemente influenciada por el aporte de nutrientes provenientes de los ríos, afectando en consecuencia la trama trófica costera (Anabalon et al. 2016, Masotti et al 2018).

En tal sentido Djurfeldt (1989) postuló que el flujo de nutrientes hacia capas superficiales asociada a eventos de surgencia costera desempeña un rol importante para el mantenimiento de la alta producción biológica de la zona central de Chile. Por otra parte, Dalba (1993) planteó que la carga de nutrientes por aportes del río Biobío sería un factor primordial para explicar la elevada productividad primaria que existe en el golfo; mientras que el Centro de Ciencias Ambientales (EULA, 1993) demostró que la concentración y distribución espacial de los nutrientes como el amonio, nitrito y nitrato, no solo estaban relacionados con los procesos de surgencia, sino también con el aporte de otras fuentes naturales e industriales ubicadas en el golfo de Arauco.

Para proporcionar una buena descripción de la dinámica de nutrientes mediante la identificación y cuantificación de los flujos dentro y fuera de la zona costera, Gordon et al. (1996) propusieron una metodología de modelación biogeoquímica para determinar presupuestos de agua, sal y nutrientes (C, N, P). Este enfoque permite evaluar si el sistema fija nitrógeno o predomina la desnitrificación. De esta forma, se determina el comportamiento del sistema costero como fuente o sumidero de nutrientes y materia orgánica y, además, se puede estimar el tiempo de intercambio de agua interno.

Numerosos estudios se han llevado a cabo alrededor del mundo siguiendo el enfoque metodológico de Gordon (1996) con el objetivo de contribuir en el conocimiento de la función que cumplen los sub-sistemas costeros en el ciclo del carbono y en la influencia del cambio climático global sobre dicha función. Por ejemplo, se han realizado estudios en lagunas costeras (Delgadillo et al. 2008 y Padedda et al. 2010), estuarios (Marone et al. 2005 y Boonphakdee & Fujiwara, 2008), golfos y bahías (Camacho-Ibar et al. 2003; Smith & Hollibaugh, 2006, Farías, 2002 y Yuk & Aoki, 2011), fiordos patagónicos (Pantoja et al., 2010) y en sistemas oceánicos de borde oriental (Liu et al., 2010). Se ha aplicado, además, en otros ecosistemas en Chile, tales como el fiordo de Aysén (Guzmán 2000, 2004 y Silva et al. 2000) y las zonas estuarinas de los ríos en Valdivia (Arcos et al. 2002).

En la región del Biobío, Farías (2002) aplicó la metodología de Gordon et al., (1996) y realizó una modelación en el golfo de Arauco para verano e invierno del año 1991. Por medio de un modelo de una caja y dos capas, demostró que en el golfo de Arauco el agua ingresa constantemente por el fondo marino en ambos períodos, pero con una mayor intensidad en verano debido a las aguas de surgencia costera que a su vez son el suministro principal de nutrientes. En invierno indicó que la entrada de agua y nutrientes desde el río Biobío era de una

magnitud considerable. Farías (2002) obtuvo un flujo negativo para el fósforo inorgánico disuelto (DIP) y el nitrógeno inorgánico disuelto (DIN) en la capa superficial y sugirió que esto se debía a la producción primaria fitoplanctónica. En el caso de la capa profunda, Farías (2002) obtuvo un flujo positivo atribuyéndolo a procesos de respiración de materia orgánica y/o resuspensión desde los sedimentos.

Con el objetivo de estimar balances de nutrientes y carbono en el Sistema de la Corriente de Humboldt, Quiñones et al. (2010), usando el modelo de Gordon et al. (1996), mostraron que la principal fuente de nutrientes en el sistema proviene desde las aguas de surgencia costera y que, una vez que éstos ingresan a la capa de mezcla son removidos por procesos no conservativos como la producción primaria. Los resultados del modelo también indicaron una posible limitación de nitrógeno en el Sistema de la Corriente de Humboldt frente a Chile, asociado principalmente a la ocurrencia de procesos de desnitrificación en las aguas subóxicas.

Es importante destacar que el modelo LOICZ contempla no solo el intercambio que se produce entre el sistema a modelar y el océano adyacente sino también las entradas de nutrientes y flujos agua de origen continental, tanto de origen natural como antropogénico. En este punto es conocido que, a nivel global, ha aumentado los aportes antropogénicos de nutrientes y contaminantes derivados de procesos industriales, agricultura, desechos domiciliarios y el lavado de suelos y, como resultado, los ecosistemas marinos costeros están recibiendo un enriquecimiento de nutrientes, que sobrepasa las tasas naturales de producción y asimilación de los mismos (CEPAL 2022).

En consecuencia, elevadas concentraciones de nutrientes en el océano costero pueden gatillar procesos de eutrofización, cuya principal fuente son los aportes

antropogénicos asociados a la descarga de aguas residuales industriales y servidas, el uso de fertilizantes ricos en nitrógeno en la agricultura, y deforestación, entre otros (Gladyshev & Gubelit 2019). En este sentido, hay estudios que indican que los flujos de nutrientes en la zona centro sur de Chile, están claramente influenciado por el uso del suelo (ej. EULA 1993, Pérez et al. 2015), sin embargo, no se conoce con exactitud los impactos ecológicos de estos aportes en los ecosistemas costeros. Además, no existen estudios hasta la fecha referentes a cómo se comportan las entradas de nutrientes alóctonos que llegan golfo de Arauco, tanto de origen natural como antropogénico y el posible comportamiento temporal y espacial de los mismos. Se desconoce, además, si los aportes alóctonos de nutrientes de origen natural, por ejemplo, los producidos por la surgencia costera, sobrepasan cuantitativamente las entradas terrestres de nutrientes de origen antropogénico y; finalmente cuáles son las actividades económicas o industriales que más aportan nutrientes hacia la zona costera del golfo de Arauco.

En este sentido se conoce que, el golfo de Arauco está sometido a una considerable presión antropogénica (Dalba 1993, EULA 1993, Farías 2002, Cid-Aguayo 2019, Lincura 2021), la extracción, transformación, y comercialización de recursos pesqueros constituyen actividades que le han otorgado por años, al sector pesquero de la Región del Biobío, una alta importancia económica a nivel nacional (SERNAPESCA 2021).

Existen cinco comunas cuyas divisiones administrativas forman parte del borde costero del golfo de Arauco, de norte a sur: Hualpén, San Pedro de la Paz, Coronel, Lota y Arauco. Estas comunas juntas albergan una población total de 419.595 habitantes (INE 2017). Por su parte la comuna de Coronel, ubicada en el centro del borde costero del golfo de Arauco, es considerada como una “Zona de Sacrificio” (Lincura 2021), por lo que desde el año 2015 el Ministerio de Medio

Ambiente (MMA) se encuentra liderando el desarrollo de una estrategia de intervención multisectorial, la cual tiene como objetivo apoyar la recuperación ambiental del territorio (Programa para la Recuperación Ambiental y Social; PRAS).

Ante lo anteriormente expuesto, esta Tesis de Grado tiene como objetivo estimar balances de nutrientes en el golfo de Arauco en escalas anual e interanual, determinando la importancia relativa del aporte de nitrógeno y fósforo generado por surgencia y fuentes terrestres fluviales y antropogénicas.

1.1 Límites fisiográficos y antecedentes del golfo de Arauco

El golfo de Arauco es parte de un conjunto de bahías situadas en la región costera de la zona central de Chile, con una orientación hacia el norte respecto a la línea de costa. Limita al norte con Punta Cullinto y al sur con Punta Lavapié. Entre ambas puntas se encuentra la isla Santa María (Fig.1).

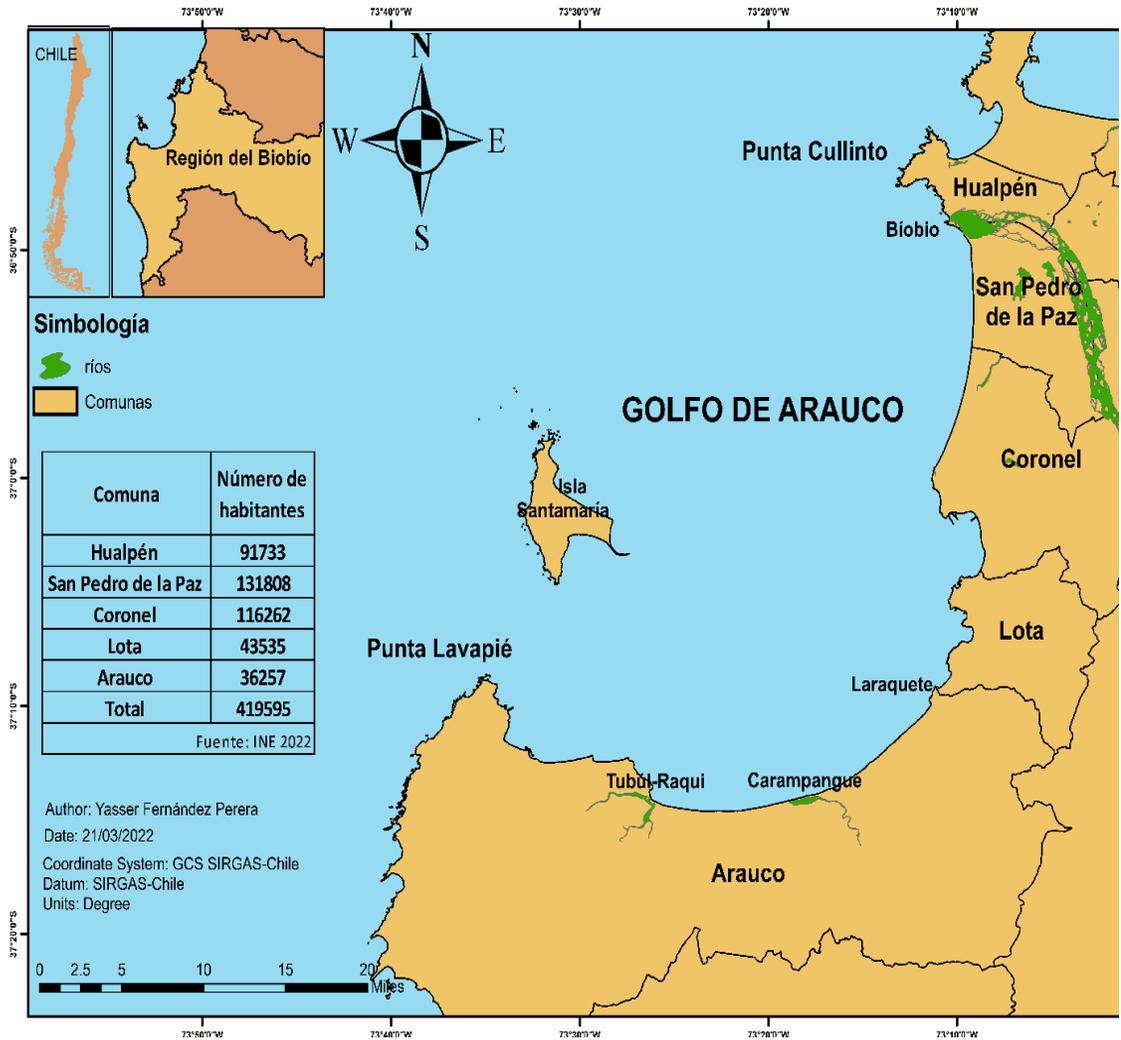


Figura 1 Esquema de ubicación del área de estudio.

El fondo del golfo es una plataforma baja con su parte central levemente más profunda, hundiéndose hacia el norte y noreste hasta alcanzar el borde sur del cañón del Biobío (Farías 2002 y Sobarzo et al. 2016). Desde el río Biobío (frente al cañón submarino) hasta Coronel, el sedimento es negro, de origen andino y caracterizado por un tamaño fino a medio, con clastos de basalto debido a su origen volcánico. En términos geológicos, la isla Santa María con una superficie de 35 km², constituye un bloque de la plataforma terciaria costera que se extiende

desde Arauco hasta Dichato y eleva la isla como resultado de la tectónica que afectó la costa al final del Período Terciario hace 3.5 millones de años (Gómez et al. 2018). Geomorfológicamente, el golfo de Arauco es un gran embalse de aproximadamente 35 km de largo, con algunos promontorios rocosos, principalmente en sus sectores más occidentales y orientales (Costa et al. 2019).

Existen cuatro ríos que desembocan directamente al golfo de Arauco (Fig. 1), siendo el más importante el Biobío que, además de su gran caudal, es el cuerpo receptor de aguas domésticas e industriales de la cuenca hidrográfica del Biobío (Farías, 2002 y Ortega, 2018). Los otros tres ríos (Carampangue, Laraquete, Tubúl y Raqui) son menos caudalosos y se ubican al sur del golfo. El impacto invernal del río Biobío sobre el área costera provoca una reducción de la salinidad de las aguas superficiales (<33.8) desde la línea de costa hasta los 70 km, inclusive, llegando a 233 km costa afuera (Saldías et al. 2012).

1.2 Hidrografía y dinámica del golfo de Arauco

Los patrones de viento en la costa de Chile central están regulados en gran medida por el desplazamiento estacional del anticiclón del Pacífico Sur, un centro de alta presión atmosférica ubicado en el Pacífico sureste (Montecino et al, 2006). El movimiento meridional del mismo se traduce en vientos del sur y suroeste favorables a surgencia durante las temporadas de primavera, verano y principios de otoño. En cambio, durante el invierno el centro del anticiclón se ubica más al norte (Anabalón et al. 2016) provocando una predominancia de los vientos del norte que inducen hundimiento o relajación costera.

En los últimos años se ha incrementado la necesidad de estudiar los sistemas costeros de alta productividad, especialmente aquellos vinculados al desarrollo de grandes pesquerías. Uno de estos sistemas es el golfo de Arauco, en el cual

convergen varios factores que influyen en su dinámica e hidrografía (Wong 2021). En primer lugar, es un sistema afectado por eventos de surgencia costera inducida por el viento con un marcado carácter estacional. En segundo lugar, su estructura hidrográfica es influida por el aporte variable de agua dulce entregadas por el río Biobío, tercero; la batimetría se caracteriza por un cañón submarino en la zona norte la cual genera una dinámica compleja (Sobarzo et al. 1994) y, por último, al ser una bahía semicerrada y protegida de los vientos favorables a surgencia costera, la dinámica del golfo incluye un proceso conocido como sombra de surgencia (SS), el cual consiste en un contraste entre aguas superficiales cálidas localizadas al interior del golfo y aguas frías propia de la surgencia costera ubicadas al oeste de punta Lavapié (Wong et al. 2021).

La hidrografía del golfo ha sido descrita por Sobarzo (1993). Se puede resumir de la siguiente manera: de septiembre a mayo (finales de primavera a principios de otoño) hay un período de surgencia que coincide con el período de predominio de los vientos del sur y suroeste. El agua involucrada en este proceso corresponde al Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW) con una alta salinidad ($S > 34,4$ psu), altos niveles de nutrientes y bajo contenido de oxígeno disuelto (<1 ml/l⁻¹). Entre fines de mayo y fines de agosto (otoño - invierno), el viento predominante es del norte. Esta condición permite que el agua superficial subantártica (SASW) con salinidades inferiores a 34,4 psu ocupe el golfo. Debido a la mayor descarga del río sobre el golfo, el SASW se diluye y la salinidad superficial disminuye. Esta condición crea una estructura de dos capas con distinta densidad. El espesor de la capa superficial y la extensión de la pluma del río dependen del caudal diario del río. Durante el invierno, la influencia superficial del río cubre casi todo el golfo, pero durante el verano la pluma del río se mueve hacia el sur y se acerca a la costa.

1.3 Importancia económica y social del golfo de Arauco

De norte a sur existen cinco comunas cuyas divisiones administrativas forman parte del borde costero del golfo de Arauco, a saber: Hualpén, San Pedro de la Paz, Coronel, Lota y Arauco. En total albergan una población de 419 595 habitantes (INE, 2017).

Durante el siglo XX el territorio tuvo un importante desarrollo vinculado a la minería del carbón. Sin embargo, en los últimos 40 años la industria de monocultivos forestales se impuso como actividad productiva dominante (Cid-Aguayo 2019), representando el 37% de la superficie total de la provincia de Arauco (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA 2022). En tal sentido, el proyecto “Modernización y Ampliación de la Planta Arauco” (MAPA), ubicado en la comuna de Arauco, proyecta una capacidad de producción de 156 000 000 de toneladas anuales de celulosa, presentándose como una de las plantas de mayor capacidad a nivel mundial (SEIA 2022).

Por otra parte, la extracción, transformación y comercialización de recursos pesqueros constituyen actividades que le han otorgado por años, al sector pesquero regional, el primer lugar en importancia económica a nivel nacional (Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura 2021). En tal sentido, existen más de 100 plantas de procesamiento de pescado y sus derivados y los desembarques producto de la actividad de los agentes extractivos artesanales e industriales se cuantificó en 1 105 569 toneladas anuales (Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura, SERNAPESCA 2021). La flota total regional es de 3356 embarcaciones y el total de pescadores inscritos en el RPA (Registro Pesquero Artesanal 2022) es de 21525 pescadores.

Por su parte la comuna de Coronel, ubicada en el centro del borde costero del golfo de Arauco, es considerada como “Zona de Sacrificio” (Lincura 2021) por lo que desde el año 2015 el Ministerio de Medio Ambiente (MMA), se encuentra liderando el desarrollo de una estrategia de intervención multisectorial que tiene como objetivo apoyar la recuperación ambiental del territorio PRAS (Programa para la Recuperación Ambiental y Social).

Coronel es un territorio con fuertes conflictos socioambientales (Agustín 2020) y su economía se focaliza en la industria maderera, pesquera y energética, además, posee dos barrios industriales de gran importancia económica, Escuadrón y Parque Industrial Coronel, ligadas a la importación y exportación gracias al complejo de terminales de carga de la empresa Froward, Puerto Coronel y Oxiquim (Ministerio de Medio Ambiente 2016; Cid-Aguayo 2019). La presencia de tres centrales termoeléctricas, la descarga de aguas servidas tratadas y vertidas mediante emisarios submarinos y los residuos líquidos provenientes de pesqueras aumentan la presión ambiental del territorio, cuyos impactos reales para la salud humana y para las aguas continentales y marinas aún se desconocen (MMA 2022).

1.4 Unidades fiscalizables y Servicio de Evaluación Ambiental en el golfo de Arauco

El Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) es el instrumento ambiental de carácter preventivo que permite a las autoridades determinar, antes de la ejecución de un proyecto, el cumplimiento de normativas ambientales dispuestas en la Legislación Ambiental de Chile. Según los expedientes e informes de las declaraciones de impacto ambiental (2023), en el golfo de Arauco existen actualmente 263 proyectos de todos los sectores productivos (Tabla 1).

Tabla 1. Unidades fiscalizables ubicadas en el borde costero de las comunas de Hualpén, San Pedro de la Paz, Coronel, Lota y Arauco. Unidad Fiscalizable se define como una unidad física en la que se desarrollan obras, acciones o procesos, relacionados entre sí y que se encuentran regulados por uno o más instrumentos de carácter ambiental de competencia de la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA 2022).

Comunas	Unidades Fiscalizables	Saneamiento Ambiental	Vivienda e Inmobiliarias	Instalación Fabril	Minería	Industria de la Pesca	Producción de Energía	Industria Forestal	Transporte	Infraestructura Portuaria	Agroindustria	Otros
Hualpén	32	1	3	2	3	-	4	-	3	1	-	15
San Pedro de la Paz	44	3	19	3	3	-	-	2	3	-	1	10
Coronel	123	15	11	19	6	21	10	10	14	3	4	10
Lota	18	4	1	-	-	8	1	1	1	1	-	1
Arauco	46	8	7	6	5	5	3	3	1	-	-	8
Total	263	31	41	30	17	34	18	16	21	5	5	45

Para los efectos de esta tesis, se seleccionaron solamente las actividades económicas o industrias que cumplen con tres criterios: (i) Industrias de sectores productivos situadas en las comunas limítrofes con las aguas marinas del borde costero del golfo de Arauco, de norte a sur: Hualpén, San Pedro de la Paz, Coronel, Lota y Arauco; (ii) Industrias que por su actividad productiva declararon ante el Servicio de Evaluación Ambiental la construcción y operación de efluentes para tratar aguas servidas e industriales (riles) que vierten directamente a las aguas marinas mediante emisarios submarinos, ductos o canales e (iii) Industrias que se encuentren activas en el presente y que cuentan con los seguimientos ambientales de calidad de agua tal como la regulación ambiental chilena lo exige.

2.-HIPÓTESIS DEL TRABAJO Y OBJETIVOS

2.1 Hipótesis

H-1: Los aportes de nitrógeno inorgánico total y fósforo inorgánico total que ingresan de manera directa al golfo de Arauco mediante ductos industriales es menor que aquellos transportados por los ríos, sean de origen natural y/o antropogénico.

H-2: En el golfo de Arauco, durante el periodo primavera-verano la proporción N/P en la capa superficial de la columna de agua será menor que en el periodo de invierno, producto de la influencia de las aguas ecuatoriales subsuperficiales.

3 OBJETIVO GENERAL

Estimar balances de nutrientes en el golfo de Arauco en escalas anual e interanual, determinando la importancia relativa del aporte de nitrógeno y fósforo generado por surgencia y fuentes terrestres fluviales y antropogénicas.

3.1 Objetivos específicos

1. Estimar los aportes anuales e interanuales de nitrógeno y fósforo de origen terrestre, tanto naturales como antropogénicos en el golfo de Arauco.
2. Estimar el balance de nitrógeno inorgánico disuelto, fósforo inorgánico disuelto y el metabolismo neto del ecosistema golfo de Arauco mediante el modelo biogeoquímico de cargas de una caja y doble capa, [*Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ)*] del programa *Future*

Earth].

3. Comparar los aportes anuales e interanuales de nitrógeno y fósforo que ingresan al golfo de Arauco por la surgencia producida por los vientos suroeste y los aportes que ingresan por fuentes terrestres tanto naturales como antropogénicas.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Capítulo 1: Aportes de nutrientes terrestre, tanto de origen fluvial como antropogénico en el golfo de Arauco, Chile-central

Se elaboró un inventario de las industrias que cumplían con los criterios mencionados (ver Tabla 1) y se seleccionaron 25 estaciones en total (21 fuentes industriales y 4 fuentes fluviales) (Fig. 2).



Figura 2. Estaciones de efluentes industriales (puntos negros) y fuentes fluviales (círculos rojos) a lo largo de la costa del golfo de Arauco (25 estaciones en total).

Los datos de las concentraciones de nutrientes junto a los caudales de los ríos se obtuvieron de la Dirección General de Agua (DGA) mientras que, los

parámetros de efluentes industriales fueron el resultado de la recopilación de bibliografía de diferentes orígenes, tales como: Estudios de Impacto Ambiental (EIA), Programa de fiscalización ambiental del Ministerio de Medio Ambiente (SNIFA), Superintendencia de Servicios Sanitarios (SSIS) y los monitoreos propios de las industrias.

Luego se calcularon los flujos de nutrientes terrestres siguiendo la metodología de Farfan et al. (1983), la cual asume los flujos terrestres de nutrientes como el producto entre las concentraciones de estos (C) y los caudales de los efluentes industriales y fuentes fluviales (ríos). Para efectos de esta tesis se tomaron los caudales de agua como el volumen de agua (m^3) que fluye por un ducto, canal, emisario o río por unidad de tiempo t (segundos).

$$F_{(r)} = C \cdot Q \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$F_{(ef)} = C \cdot Q \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde (F) es el aporte de nutrientes, dado en una tasa diaria de flujo ($kg\ d^{-1}$). (r) denota los aportes desde fuentes fluviales (ríos) mientras que, (ef) son los aportes desde ductos, canales o emisarios industriales. (C) es la concentración de nutrientes en (mol/l) tanto de los flujos naturales como desde los efluentes industriales y (Q) los caudales de agua ($m^3\ s^{-1}$). Cabe destacar que fue necesario convertir de cantidad de sustancia a masa, utilizando el peso molar de cada elemento (nitrito, nitrato, fosfato y amonio).

Dicho lo anterior, dividimos operativamente dos grupos de fuentes emisoras de nutrientes en el golfo de Arauco: (i) Efluentes industriales, con los aportes másicos antropogénicos mediante emisarios submarinos y, (ii) Aportes fluviales*. El uso del símbolo * es para indicar que estos incluyen aportes de nutrientes

tanto de origen antropogénico como natural transportados por los ríos que desembocan en el golfo de Arauco.

4.2 Capítulo 2: Balance de nutrientes y metabolismo neto del ecosistema golfo de Arauco en Chile-central mediante la modelación biogeoquímica LOICZ

4.2.1 Modelo biogeoquímico LOICZ

En el presente trabajo de Tesis se aplicó el modelo LOICZ para construir el presupuesto de nutrientes del golfo de Arauco. En particular, se utilizó la versión actualizada del programa “*Future Earth Coasts*” disponible en: <https://www.futureearthcoasts.org/>; anteriormente LOICZ.

Se construyó el modelo siguiendo las tres etapas descritas en Gordon et al. (1996) que consisten en: balance de agua $\frac{dV}{dt}$ (Ecuación 3), balance de sal $\frac{dVS}{dt}$ (Ecuación 4) y balance de materiales no conservativos $\frac{dVY}{dt}$ (Ecuación 5).

$$\frac{dV}{dt} = V_Q + V_P + V_G + V_0 - V_E + V_R \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\frac{dVS}{dt} = V_P S_P - V_E S_E + V_R S_R + V_x (S_{OCN} - S_{sis}) \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\frac{dVY}{dt} = V_R Y_R + V_x (Y_{OCN} - Y_{sis}) + \Delta Y \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde:

VS es el volumen de sal, (**VY**) figura como el presupuesto del **N**, **P** y **C** y (**V**) denota el volumen de agua.

V_Q agua dulce (flujos de los ríos), **V_P** precipitación, obtenida de la estación meteorológica Carrier Sur, **V_G** son aguas subterráneas (en nuestro caso se asumió cero), **V₀** son otros aportes, por ejemplo: flujos de efluentes industriales, **V_E** es la evaporación diaria la cual se calculó mediante la metodología descrita por Penman, (1948) a partir de una superficie libre de agua y **V_R** es el flujo residual que contiene el volumen en el sistema.

S_{ocn} y **S_{sis}** son las salinidades del océano y del sistema (golfo de Arauco), respectivamente. **S_P**, **S_E** y **S_R** es el promedio de salinidad que se debe a la precipitación, evaporación y flujo residual entre dos fronteras, por ejemplo: entre el océano abierto y el sistema.

ΔY es el flujo de material no conservativo (nitrógeno inorgánico, fósforo inorgánico disuelto). **Y_R** es el valor promedio del material no conservativo entre dos fronteras. **Y_{ocn}** e **Y_{sis}**, son los valores promedio del material no conservativo del océano y sistema.

4.2.2 Balance de Agua

La ecuación 6 describe la conservación del volumen de agua. En nuestro caso, el balance de agua fue estimado a partir del flujo residual **V_R** de agua por la ecuación:

$$V_R = V_{entra} - V_{sale} = -(V_P - V_E) \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde **V_P** y **V_E** son los flujos de las precipitaciones y de evaporación y **V** son los volúmenes de agua que entran y salen del golfo de Arauco (**V_{entra}** - **V_{sale}**).

4.2.3 Balance de Sal

La ecuación 7 describe la sal que es adicionada o removida del sistema por circulación del agua, se estimó mediante la ecuación:

$$V_X = \frac{V_R V_s}{(S_{sis} - S_{ocn})} \quad (\text{Ecuación 7})$$

S_R es la salinidad asociada al flujo residual y representa el promedio entre la salinidad (S_{sis}), y la salinidad del mar adyacente (S_{ocn}). El tiempo de intercambio total de agua (τ) fue estimado por la razón:

$$\tau = \frac{V_{sis}}{(V_x + |V_R|)} \quad (\text{Ecuación 8})$$

donde V_{sis} , es el volumen de agua del golfo de Arauco.

4.2.4 Balance de materiales no conservativos (nutrientes)

La ecuación 9 describe el balance de masa de cualquier material no conservativo (Y). En nuestro caso estimamos el nitrógeno inorgánico disuelto (**NID**) y el fósforo inorgánico disuelto (**PID**) que se intercambian entre el mar adyacente y el golfo de Arauco sobre la base de los criterios establecidos en el balance de agua y sal. Es importante destacar que el **NID** se refiere, en lo adelante, al nitrógeno inorgánico disuelto en el idioma español, sin embargo; en ocasiones se utilizará **DIN** en su versión en inglés (*Dissolved inorganic nitrogen*). Lo mismo ocurre para el caso del PID (Fósforo inorgánico disuelto) y DIP (*Dissolved inorganic phosphorus*).

$$\Delta PID = -V_R Y_R - V_x (Y_{ocn} - Y_{sis}) \quad (\text{Ecuación 9})$$

donde, Y_{ocn} y Y_{sis} representan las concentraciones del fósforo y/o nitrógeno

inorgánico disuelto en el mar adyacente y en el sistema, Y_R es la concentración asociada al flujo residual (promedio entre el Y_{sis} y Y_{ocn}).

4.2.5 Estimación de error del modelo LOICZ

Se estimó el grado de incertidumbre de las variables de entrada, lo cual permitió calcular los errores asociados al modelo LOICZ (Swaney y Giordani, 2007). Para ello, se utilizó un proceso estocástico numérico de simulación de Monte Carlo, el cual implica la generación repetida de muestras dentro de las funciones de densidad de probabilidad, mediante la utilización de algoritmos que generan valores aleatorios (*Randomization*) (Kendall y Buckland, 1982). El cálculo del error del modelo LOICZ mediante la simulación Monte Carlo se llevó a cabo considerando las etapas descritas por Manly (1997).

4.2.6 Análisis de sensibilidad del modelo LOICZ

Se calculó la sensibilidad relativa o proporcional de acuerdo a Swaney & Hong (2009), efectuándose cambios en los parámetros de entrada, es decir, disminuyendo y aumentando un 10% su valor original (o base), asignándose de esta manera 3 valores a cada parámetro: (i) valor mínimo, (ii) valor máximo y (iii) mejor estimación.

Con este enfoque se ejecutaron $2p + 1$ realizaciones o simulaciones (donde p es el número de parámetros evaluados) considerando el valor mínimo y el valor máximo de cada parámetro, más la simulación en que todos los parámetros adoptan su valor base (Swaney & Hong, 2009).

4.2.7 Establecimiento de límites fisiográficos, cajas y capas utilizadas en el modelo LOICZ

Una de las consideraciones más importantes al elegir un sistema para presupuestar es la escala espacial y los límites con los que se va a realizar los balances de sal, agua y materiales no conservativos (Gordon et al. 1996). En este sentido, siguiendo las directrices metodológicas de Gordon et al. (1996), se consideró el golfo de Arauco como un sistema semicerrado de una sola caja y dos capas (Capa superficial: 0-15, capa profunda 16-30 m). El límite inferior de la capa superficial se determinó en base a la posición de la haloclina, a partir de perfiles de CTD, utilizando el programa Ocean Data View (ODV) versión 4. Además, se consideró que el mayor intercambio de materiales entre el sistema golfo de Arauco y el océano adyacente se produce entre el norte de la isla Santa María y Punta Cullinto, al norte del golfo (Boca Grande), de aproximadamente 33 kilómetros de longitud.

Se consideró el (i) límite norte del sistema golfo de Arauco entre la isla Santa María y Punta Cullinto, ubicada en la comuna de Hualpén, sin considerar el cañón del Biobío; (ii) límite sur, borde costero de la comuna de Arauco con un punto de cierre en Punta Lavapié; (iii) límite este, borde costero de las comunas de San Pedro de la Paz, Coronel y Lota y, finalmente, (iv) borde costero este de isla Santa María como el límite oeste (Fig. 1).

4.3 Capítulo 3: Aportes de nitrito, nitrato, fosfato y amonio que ingresan al golfo de Arauco por la surgencia producida por los vientos sur-oeste.

Para estimar los flujos de nutrientes que ingresan al golfo de Arauco producto de la surgencia producida por vientos sur-oeste, se utilizó el índice de Bakun (1975), el cual relaciona la tensión del viento favorable a la surgencia costera dada por el transporte de Ekman por cada 1000 metros de costa. Este índice supone varias limitaciones a tener en cuenta, ya que indica solamente el flujo de nutrientes advectados hacia la superficie por surgencia inducida por viento sur-oeste y un océano sin límites verticales y horizontales (ignorando la surgencia inducida por la batimetría y por ondas atrapadas a la costa). Además, supone que el volumen de agua desplazado por transporte (zonal) de Ekman durante vientos favorables a la surgencia costera es remplazado enteramente por aguas subsuperficiales a través de un movimiento vertical; mientras que el viento norte es el resultante del hundimiento costero causando una pérdida de nutrientes de la capa fótica hacia aguas profundas. Esta metodología se utilizó, tomando en consideración de que el afloramiento de nutrientes es el resultado del proceso físico generado por el estrés del viento a lo largo de la costa (Transporte de Ekman) (Barber & Smith 1981; García-Reyes et al. 2014; Testa 2018, Jacob et al. 2018, Vergara 2018).

$$F = IS \cdot C \quad (\text{Ecuación 10})$$

Dónde **IS** es el Índice de Surgencia de Bakún (1975), dado en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. La estimación se llevó a cabo en base a 1000 metros lineales de costa y **C** son las concentraciones de nutrientes (nitrato, nitrito, fosfato y amonio).

Las concentraciones de nitrito, nitrato, fosfato y amonio fueron obtenidas de los cruceros oceanográficos desarrollados en el golfo en diferentes estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno), durante el período comprendido entre

los años 2015-2019. Estos datos corresponden a 24 estaciones monitoreadas en diverso grado y frecuencia por cruceros desarrollados por los siguientes programas: Programa de Monitoreo Medio Marino y Estuarino del Proyecto MAPA (MAPA = Modernización Ampliación Planta Arauco; Celulosa Arauco y Constitución S.A.), Programa de Estudios Ecosistémicos del golfo de Arauco de la Universidad de Concepción (PREGA), Programa de Observación del Ambiente Litoral (POAL) de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante y de los informes de los Programas de Vigilancia Ambiental (PVA) de diferentes industrias ubicadas en el borde costero (Tabla 2).

Cabe destacar que, a diferencia de los datos de concentraciones de nutrientes de origen continental, para el índice de surgencia solo se contaron con mediciones entre los años 2015-2019; por tanto, para la comparación final entre los aportes de nutrientes al golfo de Arauco vía surgencia versus entradas de origen continental, se utilizó dicho período de tiempo.

Tabla 2. Cruceros desarrollados en el golfo de Arauco 2015-2019. Proyectos: (MAPA, PREGA y POAL). Sistema de coordenadas geográficas: (WGS,1984).

Proyecto Asociado	Estación	Latitud	Longitud	Profundidad (m)
PROYECTO MAPA	EST 1	-37.68900	-73.18601	36
	EST 2	-37.87020	-73.17509	28
	EST 3	-37.99990	-73.16310	15
	EST 4	-37.10980	-73.19360	18
	EST 5	-37.13090	-73.18258	12
	EST 6	-37.12276	-73.16201	10
	EST 7	-37.11580	-73.14603	8
	EST 8	-37.11790	-73.14250	5
	EST 9	-37.10600	-73.13712	10
	EST 10	-37.94000	-73.11750	10
	EST 11	-37.87800	-73.14760	20
PREGA	EST 12	-37.112985	-73.325066	4
	EST 13	-37.093129	-73.334764	15
	EST 14	-37.081188	-73.342576	20
MONITOREOS PROPIOS DE LAS INDUSTRIAS	EST 15	-37.03667	-73.16167	12
	EST 16	-36.523444	-73.091637	13
	EST 17	-36.523155	-73.091592	14
	EST 18	-36.522695	-73.092207	19
	EST 19	-36.523796	-73.091581	14
	EST 20	-36.523679	-73.092032	14
	EST 21	-36.57234	-73.102267	21
	EST 22	-36.570028	-73.101152	19
	EST 23	-36.582604	-73.113218	24
	EST 24	-37.13804	-73.10159	19

Finalmente, se utilizó el umbral operacional descrito por García-Reyes et al. (2014), para determinar vientos favorables a surgencia costera y separar los cruceros efectuados durante períodos de surgencia versus hundimiento o relajación. Dichos autores plantearon que existen dos características en el forzamiento de corrientes ascendentes; la duración y la intensidad del evento. Para incluir ambos, tomamos en consideración el viento acumulado a lo largo de la costa durante tres días previos a cada crucero y una intensidad $\geq 0.05 \text{ Nm}^{-2}$

(García-Reyes et al. 2014). El número de eventos así identificados se registraron para cada crucero y se utilizaron, posteriormente, para cuantificar los flujos de nutrientes en períodos con vientos favorables a surgencia y/o relajación y se comparó con los aportes de origen terrestres.

Los datos de dirección y magnitud del viento fueron descargados de la estación meteorológica localizada en el aeropuerto Carriel Sur en Talcahuano, Concepción (36°47'S, 73°04'W) disponibles en línea en <http://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/index.xhtml>. La dirección del viento fue alineada con relación a la línea de costa (18° respecto al norte geográfico) y rotado en 180°, invirtiendo la dirección del viento desde donde viene hacia dónde va. Luego se calculó la componente meridional (V) del viento a partir de la magnitud y dirección dada en metros por segundos.

$$V = \text{Magnitud del viento} \cdot \text{coseno (dirección)} \quad \text{(Ecuación 11)}$$

Para los efectos de nuestra investigación solo se calculó el estrés del viento (Nm^{-2}) meridional (τ_y) mediante la fórmula:

$$t_y = C_d \rho_a \cdot \text{comp}V \cdot U_{10} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Dónde (τ_y) es la componente meridional del viento; C_d es el coeficiente adimensional de arrastre, considerado como constante 0.002, ρ_a es la densidad del aire (1.24 kg/m^3) y U_{10} es la velocidad del viento medida a 10 metros sobre el nivel del mar (Wu, 1982).

4.3.1 Relación N:P

Los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno y el fósforo son cruciales para la vida en la Tierra y su alteración puede tener consecuencias significativas para el ecosistema costero (Rabouille et al. 2001, Rabalais et al. 2009). Varios factores podrían alterar a nivel local y regional las proporciones de N y P. Por ejemplo, cambios en la tasa de remineralización de nutrientes, aportes continentales, composición de la comunidad fitoplanctónica, entre otros (ej. Testa et al., 2018, Matsumoto et al. 2020).

Desviaciones en las proporciones N:P Redfieldianas (i.e. 16:1; Redfield, 1934), han sido asociadas con cambios en la estructura comunitaria fitoplanctónica, pasando, por ejemplo, desde ensamblajes dominados por diatomeas a otros dominados por dinoflagelados formadores de floraciones algales nocivas (FAN), en varias regiones del océano global. Por ejemplo, en la zona china del Mar Amarillo, se han reportado proporciones de N:P inorgánico el doble más altas comparadas con las proporciones de Redfield, lo que ha conllevado a un aumento significativo en las ocurrencias de FAN (Ning et al. 2009). Del mismo modo, en la región del Mar de China Meridional, las relaciones N:P inorgánico de la columna de agua aumentaron de 2 a 20 desde mediados de la década de 1980 hasta principios de la década de 2000 (Wang et al., 2007, Ning et al. 2009). En el caso del ecosistema de la Corriente de Humboldt frente a la zona centro-sur de Chile, Anabalon et al (2016) reportaron que los cambios interanuales en la comunidad de microfitoplancton se asociaron principalmente a cambios en la salinidad y temperatura superficiales (cambios en la intensidad del afloramiento), pero también a cambios en Si/N y N/P, relacionados con otros procesos derivados de la tierra.

En el Sistema de Corriente de Humboldt se han descrito relaciones N/P significativamente inferiores a los valores valores de Redfield en la columna de

agua con valores que oscilan entre 7 y 12,5 (ej. Guillén et al. 1977, Davies & Morales 1998, Quiñones et al.2010).

Las bajas relaciones N/P en sistemas de surgencia se han asociado con la presencia de desnitrificación (Chen et al. 2003), que es un proceso importante en las aguas subóxicas del Sistema de la Corriente de Humboldt (ej. Codispoti et al. 1986, Codispoti et al. 1989, Castro-González & Farías 2004, Farías et al. 2004).

En el balance de nutrientes realizado en esta investigación, estimar la razón inorgánica disuelta N:P es, por lo tanto, muy importante para comprender el estado de salud y sostenibilidad del golfo de Arauco frente a la presión antrópica y los cambios globales. Nuestra hipótesis plantea que, en el golfo de Arauco, durante el periodo primavera-verano la proporción N/P en la capa superficial de la columna de agua será menor que en el periodo de invierno, producto de la influencia de las aguas ecuatoriales subsuperficiales.

5 RESULTADOS

5.1 Capítulo: 1 Aportes de nitrógeno y fósforo terrestre de origen fluvial y antropogénico en el golfo de Arauco, Chile.

**Aportes de nitrógeno y fósforo terrestre de origen fluvial y antropogénico
en el golfo de Arauco, Chile.**

**Terrestrial nitrogen and phosphorus inputs of fluvial and anthropogenic
origin in the gulf of Arauco, Chile**

Yasser Fernández Perera ^{1,2}, Rodrigo M. Montes^{2,3}, Benjamín Srain², Marcus
Sobarzo ^{2,3} y Renato A. Quiñones ^{*1,2,3}

¹ Programa de Graduados en Oceanografía, Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas. Universidad de Concepción. Concepción. Chile.

² Programa de Estudios Ecosistémicos del golfo de Arauco (PREGA), Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción.

³Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuícola (INCAR), Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

*Corresponding author: rquinone@udec.cl

Manuscrito enviado a Gayana

RESUMEN

El desarrollo socioeconómico y la creciente ocupación y uso del borde costero de la zona centro-sur de Chile, han alterado los aportes de nutrientes continentales hacia las aguas marinas costeras, intensificando los procesos de eutrofización. El golfo de Arauco ($37^{\circ}10'S$ - $36^{\circ}45'S$), con casi medio millón de personas, y donde se llevan a cabo diversas actividades económicas, no ha estado ajeno a esta problemática. El objetivo de la presente investigación fue estimar la variabilidad espacio-temporal de los aportes de nitrógeno y fósforo provenientes desde el continente que ingresan al Golfo de Arauco. Se delimitaron espacialmente tres sectores en el borde costero del golfo, de acuerdo a las ubicaciones geográficas de las comunas: i) Sector norte (Hualpén y San Pedro de la Paz), el cual aporta el 63% del total de los nutrientes; ii) Sector central (Coronel y Lota) aporta el 20% y iii) Sector sur (Arauco) que aporta el 17%. La mayor parte de los nutrientes que llegan a las aguas costeras del golfo de Arauco provienen de los ríos, aportando el 65% (56.897 kg d^{-1}) de los aportes totales (87.390 kg d^{-1}). Estos aportes de nutrientes son mayores durante los meses de invierno y primavera, mientras que disminuyen en otoño y verano. Las fuentes antropogénicas no-fluviales más relevantes en cuanto a aportes de nutrientes fueron, en primer lugar, la industria y procesamiento de la pesca, seguido de la industria forestal y producción de pulpa y celulosa, aguas servidas, producción de energía y, finalmente, otras industrias.

Palabras claves: Aportes de nutrientes, eutrofización, fuentes emisoras, golfo de Arauco.

ABSTRACT

Socio-economic development and increased settlement and use of the coastal area of south-central Chile have altered the input of inland nutrients into the coastal marine waters, intensifying eutrophication processes. The Gulf of Arauco (37°10'S - 36°45'S), home to almost half a million people and a wide range of economic activities, has not been immune to this problem. The objective of this study was to estimate the spatio-temporal variability of nitrogen and phosphorus inputs from the continent to the Gulf of Arauco. Three sectors were spatially delimited along the coastal edge of the gulf, according to the geographical location of the districts: i) the northern sector (Hualpén and San Pedro de la Paz), which contributes 63% of the total nutrients; ii) the central sector (Coronel and Lota), which contributes 20%; and iii) the southern sector (Arauco), which contributes 17%. Most of the nutrients entering the coastal waters of the Gulf of Arauco come from rivers, contributing 65% (56,897 kg d⁻¹) of the total inputs (87,390 kg d⁻¹). These nutrient inputs are highest in the winter and spring months, while they decrease in the autumn and summer. The main anthropogenic non-fluvial sources of nutrient inputs were the fishing industry and processing, followed by the forestry industry and pulp and cellulose production, sewage, energy production and, finally, other industries.

Keywords: Nutrient inputs, eutrophication, pollution emitting sources, gulf of Arauco.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los aportes antropogénicos de nutrientes y contaminantes derivados de efluentes industriales y domiciliarios que ingresan en las aguas marinas costeras han aumentado significativamente en los últimos cincuenta años (Halpern 2009, Van Drecht et al. 2009, Ramesh et al. 2015, Mateo-Sagasta et al. 2015, Tuholske 2021). Como resultado, los ecosistemas marinos costeros están recibiendo un enriquecimiento de nutrientes, que sobrepasa las tasas naturales de producción y asimilación de estos ecosistemas (Vitousek 1997, Romero 2005, Camargo & Alonso 2007, Glibert et al. 2005, Díaz & Rosenberg 2008; CEPAL 2022), lo cual puede gatillar procesos de eutrofización.

La eutrofización es el proceso de enriquecimiento de aguas marinas y continentales, con altas concentraciones de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo (Kitsiou & Karydis 2011), cuya principal fuente son los aportes antropogénicos asociados a la descarga de aguas residuales industriales y servidas, el uso de fertilizantes ricos en nitrógeno en la agricultura, y deforestación, entre otros (Gladyshev & Gubelit 2019).

Como resultado de este proceso, se produce un aumento en la biomasa de microalgas en ríos, lagos, estuarios y aguas marinas costeras, que puede desencadenar episodios de agotamiento severo de oxígeno y floraciones de algas nocivas (Harper 1992, Smith 2003). En este contexto, la calidad de las aguas costeras a nivel global presenta un deterioro de su calidad producto de la eutrofización (Maure et al. 2021) y se prevé que las cargas de nutrientes sigan aumentando con la consecuente formación de aguas hipóxicas en las zonas costeras alrededor del mundo (Rabalais et al. 2009). Así, la eutrofización de las

aguas costeras está considerada como una de las mayores amenazas a la salud de los ecosistemas marinos (Bachmann et al. 2006, Le Moal 2019).

Los flujos de nutrientes en la zona centro sur de Chile, están claramente influenciado por el uso del suelo (EULA 1993, Pérez et al. 2015), sin embargo, no se conoce con exactitud los impactos ecológicos de estos aportes en los ecosistemas costeros. Testa et al. (2018), cuantificaron los aportes de nutrientes fluviales del río Itata frente a Chile central; no obstante, no existe ningún estudio a la fecha referente al golfo de Arauco, cuyo borde costero está sometido a una considerable presión antropogénica (Dalba 1993, EULA 1993, Farías 2002, Cid-Aguayo 2019, Lincura 2021).

Existen cinco comunas cuyas divisiones administrativas forman parte del borde costero del golfo de Arauco, de norte a sur: Hualpén, San Pedro de la Paz, Coronel, Lota y Arauco. Estas comunas juntas albergan una población total de 419.595 habitantes (INE 2017). Durante el siglo XX, la Región del Biobío tuvo un importante desarrollo vinculado a la minería del carbón. Sin embargo, en los últimos 40 años, la industria de monocultivos forestales se impuso como actividad productiva dominante (Cid-Aguayo 2019), representando el 36 % de plantaciones a nivel nacional, siendo la mayor parte de ellas pino (*Pinus radiata*; 40 %) y eucaliptos (*Eucalyptus globulus*; 38 %) (ODEPA 2022). En este contexto, el proyecto “Modernización y Ampliación de la Planta Arauco” (MAPA), de Celulosa Arauco y Constitución S.A., ubicado en la comuna de Arauco, proyecta una capacidad de producción de 2.100.000 toneladas anuales de celulosa, presentándose como una de las plantas de mayor capacidad productiva a nivel mundial (SEIA 2022).

Por otra parte, la extracción, transformación, y comercialización de recursos pesqueros constituyen actividades que le han otorgado por años, al sector

pesquero de la Región del Biobío, una alta importancia económica a nivel nacional (SERNAPESCA 2021). Existen en la Región del Biobío, 106 plantas de procesamiento de pescado y sus derivados en operación y los desembarques de la pesca artesanal e industrial fueron de 1.105.968 toneladas anuales en el año 2020 (SERNAPESCA 2021). La flota pesquera total de la Región del Biobío está compuesta por un total de 3356 embarcaciones y el total de pescadores inscritos en el Registro Pesquero Artesanal es de 21.571 pescadores (Registro Pesquero Artesanal 2022), posicionándose en el segundo lugar a nivel nacional con el 21 %.

Por su parte la comuna de Coronel, ubicada en el centro del borde costero del golfo de Arauco, es considerada como una “Zona de Sacrificio” (Lincura 2021), por lo que desde el año 2015 el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) se encuentra liderando el desarrollo de una estrategia de intervención multisectorial, la cual tiene como objetivo apoyar la recuperación ambiental del territorio (Programa para la Recuperación Ambiental y Social; PRAS).

La actividad económica del golfo de Arauco se focaliza en la industria pesquera, maderera/producción de celulosa, y energética, poseyendo dos barrios industriales de gran importancia económica: el Parque Empresarial Escuadrón y el Parque Industrial Coronel. El golfo de Arauco presenta, además, una importante actividad de importación y exportación, gracias al complejo de terminales de carga de las empresas Froward, Puerto Coronel y OXIQUM (Cid-Aguayo 2019).

La presencia de tres centrales termoeléctricas, la descarga de aguas servidas tratadas, así como las vertidas por emisarios submarinos (efluentes) y los residuos líquidos provenientes de pesqueras, aumentan la presión ambiental en el territorio, cuyos impactos reales para la salud humana y para las aguas

continentales y marinas aún se desconocen (MMA 2022). Además, el golfo de Arauco es un territorio que ha presentado importantes conflictos socioambientales (Agustín 2020).

Ante lo anteriormente expuesto, la presente investigación se enfocó en cuantificar y describir el comportamiento temporal y espacial de los aportes máxicos de nutrientes (nitrógeno y fósforo) antropogénicos terrestres, tanto de origen fluvial como desde los efluentes industriales que ingresan al ecosistema costero marino del golfo de Arauco, así como, esclarecer la importancia relativa de los suministros fluviales versus los efluentes industriales durante los años comprendidos entre el 2015 y 2022.

MATERIALES Y MÉTODOS

Antecedentes generales de la zona de estudio

El golfo de Arauco está orientado hacia el norte, respecto a la línea de costa, limitando al norte con punta Cullinto y al sur con punta Lavapié. Entre ambas puntas se localiza la isla Santa María que corresponde al límite oeste y el punto de contacto directo con el océano Pacífico (Fig. 1).

Aspectos generales de la hidrografía del golfo de Arauco indican que desde septiembre a mayo (finales de primavera a principios de otoño en el hemisferio sur), la surgencia costera inducida por vientos del sur y suroeste, influencia significativamente la hidrodinámica del golfo mediante el ingreso de Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS) de alta salinidad ($S > 34,4$ psu), elevados niveles de nutrientes y bajo contenido de oxígeno disuelto ($< 1 \text{ ml L}^{-1}$) (Sobarzo et al. 1994). Entre finales de mayo y agosto (finales de otoño e invierno), el viento predominante del norte favorece la presencia de agua superficial subantártica (ASAA) dentro del golfo con salinidades inferiores a 34,4 psu (Sobarzo et al. 1994, Wong et al. 2021).

Cuatro ríos desembocan directamente al golfo de Arauco (Fig. 1). El más caudaloso es el río Biobío, el cual es un cuerpo receptor de aguas domésticas e industriales de la cuenca hidrográfica del Biobío (Farías 2002, Ortega 2018). El impacto invernal del río Biobío sobre el área costera, provoca una reducción de la salinidad de las aguas superficiales ($< 33,8$ psu) desde la línea de costa hasta los 70 km llegando, incluso, a 233 km costa afuera (Saldías et al. 2012). Los otros ríos (Laraquete, Carampangue, Tubúl y Raqui) son menos caudalosos y se ubican hacia el centro y sur del golfo (Constabel 1993, Salinas 2017, Veloso et al. 2022).

El golfo de Arauco posee una importante concentración y diversidad de actividades económicas e industriales, el desarrollo socioeconómico en su borde costero ha experimentado un crecimiento acelerado desde los años cincuenta (EULA 1993). Entre las principales industrias se encuentran: i) industria de la pesca, dedicada a la captura y el faenamiento de los recursos marinos (Cartes 2018), ii) industria forestal y de producción de celulosa, iii) producción de energía eléctrica, y iv) otras industrias tales como minería, industria química, transporte marítimo, vivienda e inmobiliarias, turismo y recreación (Tabla 1 y Tabla Suplementaria 1). Cabe destacar, respecto de la generación de energía eléctrica durante el período de estudio, estaban funcionando las plantas generadoras Bocamina I (ENEL), Bocamina II (ENEL) y Santa María (Colbun). No obstante, a partir de diciembre de 2020 y octubre de 2022 las centrales Bocamina I y Bocamina II, respectivamente, han finalizado su operación.

Obtención y procesamiento de datos

En el diagnóstico y clasificación de cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad del agua, realizado por la Dirección General de Agua (DGA 2004), se estima que solo la cuenca del Biobío recibe más de 27000000 m³ de aguas servidas y 76380192 m³ aguas de procesos industriales anuales cargadas de materia orgánica, contaminantes y nutrientes. Además, la cuenca del Biobío tiene alrededor de 17 centrales hidroeléctricas (Abanico, El Toro, Antuco, Quilleco, Rucúe, Laja, Diuto, Mampil, Peuchén, Pangué, Ralco, Angostura, Boquiamargo, Los Padres, Malpucho y Renaico); sin embargo, la principal carga industrial que evacua al río corresponde a la industria forestal y de producción de celulosa, localizada desde Negrete hasta la desembocadura con tres plantas de celulosa (Pacífico, Santa Fe y Lajas) (EULA 2020). Por su parte, se estimó que el 72% del agua potable producida en la cuenca corresponde a fuentes superficiales y un 28% a fuentes subterráneas (EULA 2020).

Dicho lo anterior y, a efectos de la presente investigación, dividimos operativamente dos grupos de fuentes emisoras de nutrientes en el golfo de Arauco: (i) efluentes industriales, concebidos como los aportes máscicos antropogénicos mediante emisarios submarinos que tributan directamente al golfo de Arauco y, (ii) aportes fluviales*; considerando los ríos: Biobío, Laraquete, Carampangue y Tubúl-Raqui, como fuentes fluviales* que transportan nutrientes terrestres, tanto de origen natural como antropogénicos en el golfo de Arauco. Cabe destacar que el uso del símbolo * es para remarcar el hecho de que los aportes fluviales de nutrientes considerados corresponden a una mezcla de origen natural y antropogénico.

Para las estimaciones de los aportes de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y fosforo inorgánico disuelto (PID) de origen fluvial*, se utilizaron mediciones de caudales y concentraciones de nitrito, nitrato, amonio y fosforo (fosfato) en los ríos Biobío, Laraquete, Carampangue y Tubúl-Raqui. El NID, fue considerado como la suma de las concentraciones de nitrito, nitrato y amonio; mientras que para el PID se utilizaron los contenidos de fosfato reportado en cada efluente. También se utilizaron las mediciones del nitrógeno total de Kjeldahl, que corresponde a la sumatoria entre los contenidos de nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico (Sáez 2019).

Las unidades de medidas utilizadas en los cálculos máscicos de nutrientes fueron: metros cúbicos por unidad de tiempo ($m^3 s^{-1}$) en el caso de los caudales, mientras que, para las concentraciones de nutrientes se utilizó miligramos por litro de agua ($mg L^{-1}$). En el caso del río Biobío, los informes con los reportes de concentraciones de nutrientes se descargaron desde la página de Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea, disponible en <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>, de la Dirección General de Agua (DGA). Por su parte, los reportes de nutrientes de los ríos Laraquete y

Carampangue se obtuvieron desde los informes del Programa de Vigilancia Ambiental (PVA), los cuales forman parte del Programa de Monitoreo del Medio Marino y Estuarino, “Proyecto: Mejoramiento Ampliación Planta Arauco” (MAPA), disponibles en la página del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA) <https://snifa.sma.gob.cl/UnidadFiscalizable/Ficha/2734>. Dichos informes reportan datos de concentraciones de nutrientes de ambos ríos desde el año 2015 hasta la actualidad, con una frecuencia trimestral.

Por lo que se refiere a los datos obtenidos de los ríos Tubúl-Raqui, estos fueron adquiridos del “Programa de Observación del Ambiente Litoral de la Armada de Chile” (POAL, DIRECTEMAR), disponibles en https://www.directemar.cl/directemar/site/edic/base/port/datos_poal.html. Cabe señalar que, los reportes de nutrientes en las bases de datos consultadas para los ríos Tubúl-Raqui, solo incluyen información para los años 2015, 2016, 2017 y 2018. Tampoco se encontraron reportes de caudales, razón por la cual se utilizaron los caudales reportados por Daniel et al. (2013).

La obtención de información acerca de los contenidos de nutrientes, caudales y ubicación (coordenadas geográficas) de los efluentes industriales y las estaciones de monitoreo en el cuerpo receptor, ubicadas en el área de influencia de las respectivas descargas, fue llevada a cabo copilando e integrando informes de los PVA, Estudios de Impacto Ambiental (EIA), Declaración de Impacto Ambiental (DIA), Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) e informes de fiscalización ambientales pertenecientes a cada titular de un efluente.

A excepción de las aguas servidas, los expedientes e informes consultados son dispuestos a todo público en las páginas oficiales del Servicio de Evaluación Ambiental (SEIA) <https://www.sea.gob.cl/sea/que-es-seia> y del SNIFA <https://snifa.sma.gob.cl/>. Por su parte, los caudales y los contenidos de

nutrientes de los efluentes pertenecientes a la Empresa de Servicios Sanitarios de Biobío S.A (ESSBIO), fueron facilitados por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), mediante Ley de Transparencia, con Folio: AM011T0002736-11/09/2019.

De esta forma, se consultó un universo de 2095 documentos, entre informes y expedientes, de potenciales fuentes emisoras de nutrientes ubicadas en el borde costero del golfo de Arauco. Según el SEIA, el universo de proyectos aprobados entre 2013 y 2022 da cuenta de la existencia de 263 proyectos ubicados en el borde costero del golfo de Arauco (Tabla suplementaria 1). Sin embargo, no todos ellos cuentan con un efluente industrial. Por lo tanto, y según la descripción de las RCA asociadas a cada proyecto, se establecieron tres criterios como filtro de información: i) proyectos con tenencia y/o titularidad de al menos un efluente industrial; ii) que viertan residuos líquidos derivados de procesos industriales hacia la zona costera del golfo de Arauco, asumiendo 500 metros desde la línea de costa hacia mar adentro y/o hacia tierra en los casos de las plantas de tratamiento de aguas servidas de Concepción y Arauco (Essbio) y, iii) que cuenten con una factible trazabilidad a la hora de recopilar información de caudales y nutrientes. De acuerdo a estos criterios se identificaron y seleccionaron 21 proyectos en el golfo de Arauco (Tabla suplementaria 2).

Finalmente, se utilizaron los siguientes conceptos descritos en el Decreto Supremo 90 del año 2001 (DS90; Ministerio de Secretaría General de la Presidencia) y en el SNIFA:

(i) Unidad fiscalizable: Unidad física en la que se desarrollan obras, acciones o procesos, relacionados entre sí y que se encuentran regulados por uno o más instrumentos de carácter ambiental de competencia de la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) (SNIFA 2022).

(ii) Carga de contaminantes media diaria: Masa o volumen de un contaminante y el número de días en que se descarga el residuo líquido al cuerpo de agua. La masa se determina mediante el producto del volumen de las descargas por su concentración (Ministerio de Secretaría General de la Presidencia 2001).

(iii) Efluentes industriales: Aguas residuales que se descargan a uno o más cuerpos receptores como resultado de un proceso, actividad o servicio de una fuente emisora (Ministerio de Secretaría General de la Presidencia 2001).

(iv) Fuentes Emisoras: Establecimiento que descarga residuos líquidos a uno o más cuerpos de agua receptores, como resultado de su proceso, actividad o servicio (Ministerio de Secretaría General de la Presidencia 2001).

Respecto a los nombres de los titulares, es importante señalar que se utilizaron los mismos nombres que aparecen en las bases de datos oficiales del SEIA, a modo de evitar una pérdida de trazabilidad de los datos (Tabla suplementaria 2).

Cuantificación de los aportes másicos de nutrientes

En la literatura científica existen diferentes métodos para cuantificar los aportes de nutrientes en los flujos de agua que ingresan a la zona costera, ya sea a través de fuentes fluviales* (ríos) o efluentes industriales (emisarios submarinos) (Lebo & Sharp 1992, Farfán et al. 1983; Ministerio de Secretaría General de la Presidencia 2001, Testa et al. 2018).

En la presente investigación, los aportes diarios de nitrógeno inorgánico disuelto (NID), fósforo inorgánico disuelto (PID) y nitrógeno total Kjeldahl (NTK) se calcularon multiplicando los caudales de los ríos y de los efluentes industriales por la concentración del nutriente específico [nitrito, nitrato, amonio, fosfato, y NTK].

$$F_{(r)} = C \cdot Q \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$F_{(ef)} = C \cdot Q \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde (**F**) es el aporte de nutrientes, dado en una tasa diaria de flujo (kg día^{-1}). (**r**) denota los aportes desde fuentes fluviales (ríos) mientras que, (**ef**) son los aportes desde ductos, canales o emisarios industriales. (**C**) es la concentración de nutrientes en (mol L^{-1}) tanto de los flujos naturales como desde los efluentes industriales y (**Q**) los caudales de agua (m^3s^{-1}). Cabe destacar que fue necesario convertir de cantidad de sustancia a masa, utilizando el peso molar de cada elemento (nitrito, nitrato, fosfato y amonio).

Dicho lo anterior y, a efectos de la presente investigación, dividimos operativamente dos grupos de fuentes emisoras de nutrientes en el golfo de Arauco: (i) Efluentes industriales, con los aportes máxicos antropogénicos mediante emisarios submarinos y, (ii) Aportes fluviales*. Estos incluyen aportes de nutrientes de origen antropogénico y natural transportados por los ríos enclavados en el golfo de Arauco.

Factor de dilución y cálculo teórico de las concentraciones de NID en los efluentes industriales

Dado que de las 21 empresas titulares seleccionadas en este estudio, solo 3 (Food-Corp Coronel, Fiordo Austral S.A y Central Termoeléctrica Santa María) informan contenidos de NID en sus efluentes, se procedió a calcular un valor teórico de contenidos de NID en estos efluentes, utilizando las concentraciones de NID en los puntos de monitoreo ambiental más cercanos al área de influencia de las descargas ($< 100 \text{ m}$) y los factores de dilución del cuerpo de agua receptor promedio reportados en los EIA y RCA de nueve titulares de efluentes, desde los cuales se obtuvo un valor promedio. Según estos reportes, el factor de dilución promedio es de 41% en el cuerpo receptor (golfo de Arauco). El factor de dilución

promedio obtenido para las aguas receptoras del golfo de Arauco es consistente con el factor de dilución para la descarga de emisarios submarinos en aguas costeras reportado por Inan (2019). Como resultado, la Tabla suplementaria 3 muestra valores de NID; i) valor teórico, hace referencia al valor descrito en la RCA; ii) valor estimado a partir del factor de dilución en el cuerpo receptor y iii) valor medido directamente en el efluente.

Cálculo de la razón N:P

Las razones N:P fueron calculadas utilizando los contenidos máxicos de NID y PID (fosfato) obtenidos en los efluentes fluviales e industriales analizados durante el desarrollo de este estudio.

Caracterización del aporte de nitrógeno y fosforo y agrupación espacial de los emisarios

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de la base de datos de NID y PID utilizando “gráficos de cajas” (“boxplots” o “box-and-whisker plots”; Bolker 2008, MacFarland 2014). Esta base de datos se encuentra expresada en kg d^{-1} para todas las fuentes emisoras ($N=25$, 4 de origen natural y 21 antropogénicas; (Tabla suplementaria 2) que realizan un aporte de nutrientes al golfo de Arauco. Luego, se determinó la presencia (o ausencia) de agrupaciones espaciales (clústeres) de los emisarios considerando el aporte de NID y PID mediante un análisis de clúster jerárquico (Legendre & Legendre 2003, Kassambara 2017, James et al. 2021), utilizando la distancia euclidiana y el método de aglomeración denominado “complete”, implementado en el paquete “dendextend” (Galili 2015) para el software estadístico y de programación R (R Development Core Team 2019). Los datos fueron normalizados previo al análisis de clúster (media=0, desviación estándar=1). Se escogió el método de aglomeración denominado “complete” ya que este tiende a arrojar un número de clústeres (NC) de carácter

balanceado (James et al. 2021). Para validar la formación del número de clústeres que se obtienen, se utilizó el Índice de Dunn (Dunn 1974, Handl et al. 2005) comparando un amplio número de clústeres entre sí ($NC=2\dots6$) y seleccionando el NC para el cual se obtiene el índice de Dunn de más alto valor. El índice de Dunn, equivalente a la razón entre la mínima distancia entre observaciones que no pertenecen al mismo clúster y la máxima distancia entre observaciones que sí pertenecen al mismo clúster, fue estimado utilizando el paquete estadístico “clValid” (Brock et al. 2008) implementado para R.

Elaboración y análisis de las series de tiempo de nitrógeno y fósforo inorgánico disuelto para los ríos Laraquete y Carampangue

Para caracterizar la dinámica temporal y la posible existencia de patrones y/o componentes periódicas en el aporte de nitrógeno y fosforo al golfo de Arauco proveniente de los ríos Laraquete y Carampangue, se procedió a elaborar series de tiempo continuas interpolando las observaciones faltantes mediante la función “cubic splines” (Lancaster & Salkauskas 1986) perteneciente al paquete estadístico “pastecs” (Grosjean et al. 2022). Luego, se procedió a evaluar la significancia estadística de la(s) componente(s) periódica(s) detectada(s) utilizando sólo las observaciones efectivamente registradas para cada río (NID = 24, PID = 22), no incluyéndose los valores interpolados y evitar de esta manera la introducción de señales espurias. Para tal efecto, se utilizó el períodograma de Lomb-Scargle (Trauth 2015, VanderPlas 2018), el cual ha demostrado ser eficiente en la detección de componentes periódicas en series de tiempo reales y simuladas no igualmente espaciadas (Ruf 1999).

Finalmente, se establecieron tres sectores en el borde costero del golfo de Arauco, tomando en cuenta solamente las ubicaciones geográficas de las comunas enclavadas en el borde costero del golfo de Arauco, de norte a sur: Hualpén, San Pedro de la Paz, Coronel, Lota y Arauco; tanto de las estaciones fluviales* como antropogénicas. El objetivo de dicha sectorización espacial fue describir y esclarecer la cantidad de fuentes emisoras y el origen de los aportes de nutrientes para cada comuna; Sector I Norte, Sector II centro y Sector III sur (Fig. 2).

RESULTADOS

Aportes máxicos de nutrientes

Se estimó que el 65 % de los aportes netos de nitrógeno y fósforo que llegan diariamente al golfo de Arauco tiene un origen fluvial* (Fig. 3), por lo que los ríos Biobío, Laraquete, Carampangue y Tubúl-Raqui pueden ser considerados como la principal fuente de nutrientes de origen terrestre hacia el golfo de Arauco. De la fracción restante (35%), la industria pesquera da cuenta del 18%, la industria forestal y producción de celulosa el 11%, las aguas servidas el 5%, mientras que la producción de energía y otras industrias representan el 1%.

Adicionalmente, se evidenció que la variabilidad temporal observada en los aportes de NID, PID y NTK de origen fluvial*, esta modulada por la ocurrencia de mayores aportes de nutrientes durante las estaciones de invierno y primavera austral, y por la disminución de estos durante los meses de verano y otoño, sugiriendo la ocurrencia de un patrón cuasi estacional.

Nitrito

El aporte promedio diario de nitrito de origen fluvial* durante el período de estudio fue de 903 kg d⁻¹ durante la primavera; 58 kg d⁻¹ en verano; 98 kg d⁻¹ en otoño y 566 kg d⁻¹ en invierno (Tabla 1). El suministro promedio anual de nitrito de origen fluvial* durante el periodo de tiempo estudiado fue de 156 T año⁻¹, con un valor mínimo de 33 T año⁻¹, alcanzado durante el 2019 y llegando a un máximo de 313 T año⁻¹ en el año 2021 (Fig. 4). En términos máxicos los aportes de nitrito de origen fluvial* mostraron ser la forma inorgánica de nitrógeno de menor relevancia en comparación al nitrato, fosfato, amonio y NTK (Fig. 4).

Nitrato

En invierno y primavera los aportes promedios diarios de nitrato estimados que ingresaron al golfo de Arauco fueron de 42.987 kg d⁻¹ y 16.422 kg d⁻¹ respectivamente, mientras que, en verano y otoño, se estimaron flujos de 5.316 kg d⁻¹ y 5.013 kg d⁻¹ respectivamente (Tabla 1). Anualmente, el aporte masico promedio de nitrato desde el continente hacia las aguas del golfo de Arauco fue de 7.033 T año⁻¹, siendo el valor máximo anual de 9.456 T año⁻¹ registrado durante 2017, mientras que el mínimo alcanzó 627 T año⁻¹, durante 2021 (Fig. 4). Nuestros resultados evidenciaron que el nitrato es la forma inorgánica de nitrógeno más abundante en los aportes fluviales* (Fig. 4).

Amonio

Los aportes diarios de amonio hacia el golfo de Arauco fueron mayores durante los meses de primavera e invierno con 8.508 kg d⁻¹ y 2.756 kg d⁻¹ respectivamente, mientras que disminuyeron en las estaciones de otoño y verano con 89 kg d⁻¹ y 734 kg d⁻¹ (Tabla 1). El promedio interanual fue de 1.028 T año⁻¹, con un mínimo de 398 T año⁻¹ durante el año 2019 y un aporte máximo anual de 2.370 T año⁻¹ en el año 2017 (Fig. 4).

Nitrógeno Inorgánico Disuelto Total

Los aportes diarios de NID (Σ (nitrito, nitrato y amonio), hacia el golfo de Arauco, fueron más altos durante los meses de primavera e invierno, cuando alcanzaron valores promedio de 14.388 kg d⁻¹ y 38.356 kg d⁻¹ respectivamente (Tabla 1). Del mismo modo, se evidenció que los menores aportes ocurrieron durante las estaciones de otoño y verano, con cargas másicas que variaron entre 3.941 kg d⁻¹ y 5.972 kg d⁻¹. El aporte promedio interanual calculado fue de 10.753 T año⁻¹, con valores que oscilaron entre las 4.772 T año⁻¹ y las 14.962 T año⁻¹ (Fig. 4).

Fosfato

Los mayores aportes de fosfato de origen fluvial* hacia el golfo de Arauco, ocurrieron durante los meses de invierno y primavera, alcanzando descargas máxicas diarias de 6.449 kg d⁻¹ y 3.064 kg d⁻¹, respectivamente (Tabla 1). Durante los meses de verano y otoño, estos aportes disminuyeron, llegando a valores de 931 kg d⁻¹ y 1.373 kg d⁻¹, respectivamente. El aporte promedio interanual de fosfato, tanto de origen fluvial* como industrial fue de 1.219 T año⁻¹, con un aporte máximo de 1.405 T año⁻¹ alcanzado durante 2017 y un mínimo de 1.131 T año⁻¹ durante el 2016 (Fig. 4).

Nitrógeno total de Kjeldahl

Los aportes diarios de NTK hacia el golfo de Arauco fueron mayores durante los meses de primavera e invierno, registrando aportes máxicos de 53.549 kg d⁻¹ y 46.237 kg d⁻¹ respectivamente (Tabla 1). Durante las estaciones de otoño y verano estos aportes disminuyeron ostensiblemente llegando a valores de hasta 9.895 kg d⁻¹ y 8.871 kg d⁻¹, respectivamente. El promedio interanual de los aportes netos de NTK, tanto de origen fluvial*, como desde los efluentes industriales y aguas servidas fue de 20.827 T año⁻¹ (Fig. 4).

Razones N/P en fuentes fluviales* y en efluentes industriales

Las estimaciones de las razones N/P en los aportes máxicos previamente calculados arrojaron que las estaciones fluviales* (ríos) presentaron una relación N/P igual a 4,8. En tanto, la proporción N/P estimada en los efluentes industriales en el golfo de Arauco asociados a la industria de la pesca fue de 4,8; producción de energía 5,4, aguas servidas 13, forestal y producción de pulpa y celulosa de 117 y otras industrias de 4,8 (Tabla 2).

Agrupación espacial de los emisarios

Los gráficos de cajas (boxplots) detectan claramente observaciones extremas o “outliers”, (i.e. ubicadas fuera del rango intercuartílico), tanto para los aportes NID y PID (Figura 5 y 6). Dentro del grupo de observaciones extremas para el NID, los mayores aportes corresponden al Río Biobío (16.561 kg d^{-1}), seguido por el Complejo Celco Planta Arauco (3.995 kg d^{-1}) (Fig. 5). Si excluimos estas dos fuentes emisoras (Río Biobío y Complejo Celco Planta Arauco) de nuestro análisis, las restantes presentan una distribución que las posiciona a todas dentro del rango intercuartílico (fuentes emisoras $< 3.990 \text{ kg d}^{-1}$, Fig.5). Es necesario destacar que los aportes de NID detectados para el río Biobío y Complejo Celco Planta Arauco, superan en más de 40 y 10 veces el valor de la mediana (392 kg d^{-1}), respectivamente, la cual fue estimada considerando todas las fuentes emisoras tanto fluviales*, naturales como antropogénicas.

Para el PID, dentro del grupo de observaciones “outliers”, las mayores tasas en orden descendente son: río Biobío (3.458 kg d^{-1}), río Carampangue (321 kg d^{-1}), Orizon S.A. (259 kg d^{-1}) y Planta Gran Concepción Essbio (258 kg d^{-1}) (Fig. 6). En este caso, las tasas de aporte de PID no son tan altas como aquellas detectadas para el NID, sin embargo, se detectaron también marcadas diferencias respecto a su mediana (22 kg d^{-1}). La mediana calculada para el fósforo inorgánico disuelto es superada, en orden decreciente, por las siguientes fuentes emisoras: río Biobío (154 veces), río Carampangue (14 veces), Orizon S.A. (11 veces) y Planta Gran Concepción Essbio (11 veces) (Fig. 6).

La relación que se establece entre el NID (kg d^{-1}) y el PID (kg d^{-1}) nos indica, en forma preliminar, la presencia de 3 fuentes emisoras que se distancian marcadamente del resto, las cuales corresponden a los números 1 (río Biobío),

número 2 (Complejo Celco Planta Arauco) y número 3 (río Carampangue). Una cuarta agrupación se encuentra conformada por las 12 fuentes emisoras restantes (Fig. 7a). El análisis de clúster jerárquico (James et al. 2021) aplicado a todas las fuentes emisoras analizadas considerando el aporte conjunto de nitrógeno y fósforo inorgánico disuelto detectó la formación de sólo 2 clústers: Clúster 1 (río Biobío) y Clúster 2 (14 fuentes emisoras restantes) (Fig. 7b). Al validar la formación de este número de clústeres (NC) con el índice de Dunn (Handl et al. 2005), se obtuvo para $NC = 2$ el más alto valor (3.26), en comparación con los índices obtenidos para un número de agrupaciones que fluctuó en valores de NC entre 2 y 6. Estos resultados son consistentes con lo observado en los diagramas de cajas, ya que para el río Biobío se observan las dos más altas concentraciones tanto de nitrógeno como fósforo inorgánico disuelto, cuyos valores se distancian marcadamente de aquellos correspondientes al resto de las fuentes emisoras analizadas. Para las fuentes emisoras N°11 (Complejo Celco Planta Arauco) y N° 24 (río Carampangue) se observa en el dendrograma 22 una altura h superior, en comparación con la agrupación que presentan las demás fuentes emisoras (Fig. 7b). No obstante, la prueba e Índice de Dunn obtenido en la etapa de validación identifica sólo la formación de los 2 clústeres anteriormente señalados.

Análisis de las series de tiempo de nitrógeno y fósforo inorgánico disuelto

Al analizar las series de tiempo de nitrógeno y fosforo inorgánico disuelto asociadas a los ríos Laraquete y Carampangue utilizando el periódograma de Lomb-Scargle, no se identificaron componentes periódicas de carácter significativo ($p < 0.05$). Para el río Laraquete, es posible observar valores recurrentes alcanzando máximos niveles de NID (no interpolados) durante la época de invierno de los años 2016, 2021 y 2022 (Fig. 8). Lamentablemente, no fue posible obtener registros de nitrógeno inorgánico disuelto durante los meses

de invierno para los años 2015 y 2020, lo que pudiera haber afectado en la formación y detección de un patrón recurrente en la tasa de aporte de NID al golfo de Arauco, ya que sólo se analizaron las observaciones efectivamente registradas. Un patrón similar se obtuvo para el río Carampangue, observándose valores muy altos en las tasas de aporte de NID al golfo de Arauco durante la época de invierno (julio y agosto, Fig.9) durante 2016, 2018 y 2022, en comparación las otras estaciones del año, llegando a sobrepasar los 5000 kg d⁻¹. Durante otoño (abril), se presentan tasas de aporte de NID bastante elevadas asociadas al río Carampangue (Fig.9).

En el caso de las tasas de aporte de PID, para el río Laraquete, no se identifican estaciones del año con valores máximos recurrentes, sin embargo, pareciera ser que la época de verano es la que registra los menores aportes de PID al golfo de Arauco (Fig. 10). Las estaciones de invierno (julio) y otoño (abril) presentan las mayores tasas de aporte de fosforo asociadas al río Carampangue (Fig. 11). En términos generales, podemos señalar que el aporte de NID del río Carampangue al golfo de Arauco (mediana = 1070) supera en más de 15 veces el aporte realizado por el río Laraquete (mediana = 66,5). Para el caso del PID, el aporte realizado por el río Carampangue (mediana = 175,2) supera en más de 14 veces a aquel realizado por el río Laraquete (mediana = 12) (Figuras suplementarias 1 y 2).

Distribución espacial de aportes de nutrientes antropogénicos por comunas

Tomando en cuenta las ubicaciones geográficas de las estaciones fluviales* y antropogénicas, se identificaron tres zonas o sectores en el borde costero del golfo de Arauco, las cuales difieren considerablemente en cuanto a la ubicación,

cantidad de nutrientes exportados hacia las aguas del golfo y el origen de estos: Sector (I) norte, sector (II) centro y sector (III) sur (Fig. 2).

Sector (I) norte: Se ubica en el norte del borde costero del golfo de Arauco y comprende las comunas de Hualpén y San Pedro de la Paz. El sector aportó hacia las aguas del golfo el 63 % de los nutrientes netos, o sea, la suma total de NID, PID y NTK. El aporte másico diario estimado fue de 54.010 kg d^{-1} , siendo el río Biobío la fuente emisora de mayor connotación, exportando 96% (51.973 kg d^{-1}), seguido del 4% (1.966 kg d^{-1}) aportado por un efluente de aguas servidas perteneciente a la Planta Essbio del Gran Concepción (Fig.2).

Sector (II) centro: Se ubica en la porción central del borde costero del golfo de Arauco y abarca las costas de las comunas de Coronel y Lota. El flujo neto diario de nutrientes totales es de 16.995 kg d^{-1} , lo que representa el 20% de los aportes totales al golfo desde el continente. La característica más relevante del sector es que concentra la mayor cantidad y variedad de actividades industriales, por lo que los aportes de nutrientes tienen su origen asociado principalmente a actividades antropogénicas. Además, abarca la mayor densidad de efluentes industriales. Por ejemplo, en la porción septentrional de la bahía de Coronel confluyen diez efluentes industriales asociados a los rubros de la pesca, producción de energía, tratamiento de aguas servidas y transporte marítimo. En este sector se ubica la Bahía de Coronel, donde coexisten diferentes actividades económicas y la presión antropogénica es significativa (Cid-Aguayo 2019, Agustín 2020, Lincura 2021). La industria de la pesca es la actividad que ingresó más nutrientes en este sector, con aportes estimados diarios de 14.149 kg d^{-1} (83%), mientras que las aguas servidas aportaron el 13% (2.141 kg d^{-1}). En el tercer lugar se posiciona la producción de energía, la cual suministró 704 kg d^{-1} , representando el 4% (Fig. 2).

Sector (III) sur: Es el sector meridional ubicado en el borde costero de la comuna de Arauco y el que mayor extensión ocupa en cuanto a superficie. Los aportes de nutrientes son tanto de origen fluvial* como industrial, siendo estos últimos de mayor envergadura. Diariamente ingresaron al golfo cerca de 14.916 kg d⁻¹ de nitrógeno y fósforo, representado el 17% del total de ingreso de nutrientes de origen terrestre al golfo de Arauco, en comparación con los sectores I y II. El Sector III posee solo dos efluentes industriales pertenecientes a la actividad forestal y el tratamiento de aguas servidas, respectivamente, ambos ubicados en la comuna de Arauco. Por otra parte, los aportes de nutrientes de origen fluvial* provienen de los ríos Laraquete, Carampangue y Tubúl-Raqui, ubicados al sur del golfo de Arauco. Se estimaron aportes de 9.979 kg d⁻¹ (67%) relacionado con la industria forestal y producción de pulpa y celulosa; mientras que las fuentes fluviales aportaron en conjunto 4.923 kg d⁻¹ (33%). Finalmente, el tratamiento de aguas servidas aportó 14 kg d⁻¹ de nutrientes, ocupando el último lugar (Fig. 2).

DISCUSIÓN

El golfo de Arauco enfrenta una serie de presiones antropogénicas (MMA 2022), como resultado del acelerado crecimiento demográfico y del incremento de actividad industrial que ha tenido lugar durante los últimos 40 años (Cid-Aguayo 2019). Las actividades económicas están principalmente relacionadas con la captura, procesamiento y comercialización de recursos marinos, producción de energía, industria forestal y producción de celulosa, y la construcción de grandes parques industriales (Lincura 2021). Hasta la fecha, no se contaba con un inventario global de aportes de nutrientes continentales al golfo de Arauco, incluyendo además un análisis del comportamiento temporal y espacial de los mismos.

En el presente estudio, se logró identificar que en el golfo de Arauco existen 21 fuentes emisoras de nutrientes relacionadas con diferentes actividades o procesos industriales, incluyendo las aguas servidas, además de 4 entradas fluviales* (ríos Biobío, Laraquete, Carampangue y Tubúl-Raqui).

Los aportes interanuales de NID, y PID y NTK de origen terrestre, tanto fluviales* como industriales al golfo de Arauco, han experimentado un discreto aumento durante el año 2022 en comparación con el 2015. El incremento más significativo fue el amonio, con un crecimiento de un 34%, mientras que las formas inorgánicas de nitrógeno y fósforo experimentaron crecimientos del 7% y 10%, respectivamente. Esta condición, podría ser el resultado de la sostenida condición de sequía que ha golpeado a la zona centro sur de Chile, lo cual ha mantenido descargas fluviales bajas de forma relativamente constante durante los últimos años (Garreaud et al., 2019).

A nivel global, se espera que en los próximos 50 años los aportes de NID y PID de origen fluvial y antropogénico hacia las aguas costeras se incrementen considerablemente (Seitzinger et al. 2010), pronosticándose aumentos de un 29% de NID y 17% de PID a nivel global (Tuholske et al. 2021). En el golfo de Arauco, particularmente considerando las estimaciones desarrolladas en esta investigación, es probable que estos aumentos de NID y PID lleguen asociados al proceso de desarrollo socioeconómico de cada uno de los territorios enclavados en su borde costero, así como también por variaciones drásticas en el régimen hídrico y pluviométrico de la región, modulado por oscilaciones y teleconexiones climáticas de macroescala, tales como ENOS, la Oscilación Decadal del Pacífico y la aceleración e intensificación climática global de origen antropogénico (Saavedra & Foppiano 1992, Espino & Yamashiro, 2012, Garreaud et al., 2019).

En este contexto, se han detectado niveles crecientes de aportes de NID y PID en aguas costeras de otras regiones del mundo, por ejemplo, en el Mar Mediterráneo cuyos aportes estaban estrechamente relacionados con entradas de agua dulce procedente de ríos y aguas residuales continentales (Alventosa 2015). En el caso de Bahía Santa Marta (Caribe Colombiano), los aportes fluviales de nutrientes resultaron ser de una magnitud mayor que los provenientes de fuentes antropogénicas directas (Bonilla 2009), igual comportamiento detectado en el golfo de Arauco. Por su parte, el modelo geoespacial de aportes de nitrógeno en aguas residuales en cien cuencas del mundo de Tuholske et al. (2021), describe aumentos en los aportes de nutrientes, lo cual sería una particularidad de cuencas que presentan algún grado de presión antropogénica en su borde costero y recibe nutrientes tanto de fuentes puntuales (ej. emisarios, riles) como difusas (ej. lavado de suelos agrícolas) (Jones et al. 2021).

Las aguas costeras del golfo de Arauco reciben nutrientes, tanto de origen fluvial* como antropogénico, durante las diferentes estaciones del año, sin embargo, los mayores aportes de NID, PID y NTK se producen durante los meses de invierno y primavera y son menores durante las estaciones de otoño y verano (Tabla 4). Este comportamiento obedece a que la principal fuente de nutrientes tiene un origen fluvial* (río Biobío) y como consecuencia se asocian positivamente con la fluctuación temporal del régimen hídrico pluvio-nival que caracteriza esta cuenca (DGA 2004).

En tal sentido, nuestros resultados muestran que es evidente una posible relación entre la variabilidad temporal de los caudales de los ríos y los aportes máxicos de nutrientes de los mismos, resultado observado también en otras zonas costeras del mundo en el océano Pacífico, Atlántico, Índico y en el Mar Mediterráneo (Cloern et al. 1983, Sabater 2005, Gómez et al. 2006, Hickey et al. 2010). Cabe señalar que, durante el período de máximas precipitaciones (invierno), ocurre el lavado natural del suelo y, en consecuencia, los nutrientes son arrastrados hacia las cuencas, mediante la escorrentía, incrementando los aportes de nutrientes hacia la zona costera.

En la literatura científica, es ampliamente reportado que los ríos reciben todo el año aportes de contaminantes y nutrientes derivados de actividades humanas (Wen et al. 2017); por lo que han sido considerados como uno de los sistemas más contaminados antropogénicamente a nivel global (Nguyen et al. 2021). Por su parte, Leniz et al. (2012), determinaron que los aportes de nutrientes de origen fluvial, junto con los eventos de surgencia costera, sustentan buena parte de la productividad biológica en el golfo. Adicionalmente, se ha evidenciado también que la dinámica de los caudales de ríos en la zona centro-sur de Chile afectan el reclutamiento y/o los desembarques de recursos pesqueros tales como el robalo

(Quiñones & Montes 2001), almejas (Montes & Quiñones 1999), y anchoveta (*Engraulis ringens*) (Zunguza et al. 2022).

En este contexto, cabe resaltar que, el nitrato fue la forma inorgánica de nitrógeno más abundante en los aportes continentales. Leah et al. (1999) plantearon que el aumento de los aportes de nitrógeno continentales hacia la zona costera es producto del creciente uso de compuestos nitrogenados principalmente fertilizantes y abonos utilizados para la producción agrícola. En tal sentido la Región del Biobío concentra el 28 % de la superficie nacional dedicada a los cultivos y es considerada como el centro forestal del país (MINAGRI 2022). Dicha actividad económica demanda 10 toneladas métricas de nitrógeno diarias y 11 toneladas métricas diarias de fósforo en la Región del Biobío (ODEPA 2022).

Por su parte, el estudio llevado a cabo por Ortega (2018), evidenció que el aporte estimado total de PID hacia el río Biobío fue de 900 toneladas durante el año 2015, siendo la industria pesquera, seguida por el tratamiento de aguas servidas e industria forestal las de mayor connotación en cuanto a aportes de dicho elemento. Además, concluyó que la industria forestal y el tratamiento de aguas servidas aportaron 2600 toneladas de NTK en ese mismo año. Al comparar nuestros resultados con Valeska (2018), podemos inferir que el 95% de todo el PID aportado por fuentes fluviales tienen un origen antropogénico; mientras que en el caso del NTK representa el 13 %.

Basándonos en la investigación realizada por Tuholske et al. (2021), se puede hipotetizar que los aportes de nutrientes continentales de origen antropogénico en la zona costera de Chile central tienen cierta similitud con las dinámicas de transferencias continentales de nutrientes hacia cuencas ubicadas en regiones como Europa (Países Bajos y España), Norteamérica (Canadá), América del Sur (Perú, Colombia y Argentina) y Asia (Japón y Taiwán). En tanto; los aportes

desde fuentes fluviales son comparables con las cuencas de los ríos Ganges en Bangladés, Danubio, el cual fluye por Europa Oriental y desemboca en el Mar Negro y Chang Jiang en el norte de China. Los aportes de nutrientes de origen terrestre en el golfo de Arauco son de una magnitud menor comparado con cuencas de países en América (Estados Unidos, Brasil y México), Europa (Italia, Alemania) y Asia (Egipto, Pakistán e Indonesia).

Razones N:P de los efluentes de descargas industriales

Otro aspecto importante a considerar, con respecto a las descargas de nutrientes hacia zonas costeras, es la razón N/P presente en ellas, dado que desviaciones en estas proporciones pueden gatillar cambios en las comunidades de fitoplancton, incluyendo la potencial promoción de floraciones algales nocivas (FAN) (Brandenburg et al. 2017, Diatta et al. 2020). Existe evidencia que alteraciones mediadas antropogénicamente en las razones N/P, en lugar de sus concentraciones absolutas, se asocian al inicio de FAN (Ferreira et al. 2011), a una escala local (Davidson et al., 2014).

Desviaciones en las proporciones N:P Redfieldianas (i.e. 16:1; Redfield, 1934), han sido correlacionadas con cambios en la estructura comunitaria fitoplanctónica, pasando desde ensamblajes dominados por diatomeas a otros dominados por dinoflagelados formadores de FAN en varias regiones del océano global. Por ejemplo, en la zona china del Mar Amarillo, se han reportado proporciones de N:P inorgánico el doble más altas comparadas con las proporciones de Redfield, lo que ha conllevado a un aumento significativo en las ocurrencias de FAN (Ning et al. 2009). Del mismo modo, en la región del Mar de China Meridional, las relaciones N:P inorgánico de la columna de agua aumentaron de 2 a 20 desde mediados de la década de 1980 hasta principios de la década de 2000 (Wang et al., 2007, Ning et al. 2009).

En el Sistema de Corriente de Humboldt se han descrito relaciones N/P significativamente inferiores a los valores de Redfield en la columna de agua con valores que oscilan entre 7 y 12,5 (ej. Guillén et al. 1977, Davies & Morales 1998, Quiñones et al. 2010). Las bajas relaciones N/P en sistemas de surgencia se han asociado con la presencia de desnitrificación, el cual es un proceso importante en las aguas subóxicas del Sistema de la Corriente de Humboldt (ej. Codispoti et al. 1986, Codispoti et al. 1989, Castro-González & Farías 2004, Farías et al. 2004).

En este contexto, es relevante destacar que algunos efluentes industriales que descargan al interior del golfo de Arauco presentan desviaciones significativas en sus razones N/P con respecto a la estequiometría de Redfield. Por ejemplo, las descargas de la actividad forestal y producción de celulosa presentaron una proporción N/P de 118, siendo ésta siete veces mayor a la proporción de Redfield. Por ejemplo, en el Mar del Norte, a medida que se desarrollaba un aumento de las razones N/P en la columna de agua, se observó un concomitante incremento en las abundancias de dinoflagelados mixotróficos, incluyendo especies nocivas (Burson et al. 2016). Por otra parte, la limitación de fósforo y el concomitante aumento de la razón N/P en las aguas descargadas en los efluentes industriales, pueden tener consecuencias sobre el grado de toxicidad de las potenciales FAN que puedan desarrollarse. Bajo condiciones limitadas de nitrógeno, se ha demostrado que la producción de toxinas ricas en nitrógeno generalmente disminuye. Por el contrario, condiciones de limitación de fósforo y exceso de nitrógeno estimulan la producción y acumulación de toxinas ricas en nitrógeno, las cuales tienen efectos perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana (Brandenburg et al. 2020).

En contraste a lo observado en los efluentes vinculados a la industria forestal y de producción de celulosa, bajas razones N/P fueron evidenciadas en los

efluentes descargados por la industria pesquera y en los aportes fluviales*, es decir, presentaron aportes ricos en fósforo y más bien limitados en nitrógeno. Razones N/P bajas, pueden conducir también a cambios en la estructura comunitaria fitoplanctónica, favoreciendo la dominancia de cianobacterias, dada su capacidad de fijar el nitrógeno molecular y absorber el fósforo inorgánico disuelto, superando así competitivamente a otras especies de fitoplancton (Huber & Hammel 1985, Mulholland et al. 2002).

En el Golfo de Arauco, y específicamente las emisiones de fósforo y nitrógeno que llegan a las aguas marinas corresponden en primer lugar, a los aportes fluviales*, siendo el río Biobío el de mayor importancia, seguido por los aportes directos de origen industrial y aguas servidas.

En resumen, las aguas costeras del golfo de Arauco reciben importantes aportes alóctonos de nitrógeno y fósforo. Estos aportes son dominados por descargas de origen fluvial* (naturales y antropogénicos), principalmente por aquellos provenientes desde la cuenca del río Biobío. Los aportes directos de origen industrial representan un tercio del total de los nutrientes de origen alóctono descargados en el golfo, siendo la industria de la pesca la principal tributaria, seguida por la forestal/producción de celulosa y las aguas servidas. Dado que las descargas terrígenas de nitrógeno y fósforo son dominadas por fuentes fluviales*, sus variaciones temporales e interanuales siguen un patrón cuasi estacional, reflejando el régimen hídrico pluvio-nival que caracteriza a la zona centro-sur de Chile. A escala interanual, no se observaron tendencias de variaciones periódicas ni seculares en cuanto a los aportes de nutrientes naturales y antropogénicos alóctonos, durante el periodo de estudio. En este contexto, es esperable que potenciales variaciones futuras en los aportes de nutrientes alóctonos hacia el golfo de Arauco estén asociados con el proceso de desarrollo socioeconómico de cada uno de los territorios enclavados en su borde

costero, así como también por variaciones en el régimen hídrico y pluviométrico de la región, modulado por anomalías, oscilaciones y teleconexiones atmosféricas y climáticas tanto de escalas regionales, así como planetarias.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Programa de Estudios Ecosistémicos del Golfo de Arauco (PREGA) de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas de la Universidad de Concepción financiada por Celulosa Arauco y Constitución S.A. Y. Fernández, and R. Montes recibieron también financiamiento del Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuícola (INCAR) (ANID, FONDAP 15110027 y 1522A0004).

REFERENCIAS

- Agustín, I. 2020. Evaluación de la acción del estado por la salud y justicia ambiental en Coronel (Chile). Tesis de Maestría. Universidad de Concepción, Concepción, Chile. URL : <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/6209>.
- Alventosa, J. 2015. Calidad de las aguas costeras del municipio de Dénia. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia, España. URL : <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/55161>.
- Bachmann, R. W., Cloern, J. E., Heckey, R. 2006. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnol. Oceanogr* 51 (1) : 351–800.
- Bolker, B.M. 2008. *Ecological Models and Data in R*. Princeton University Press, Princeton, NJ.408.
- Bonilla, H .2009. Inventario de Fuentes terrestres de contaminación emitidas a la Bahía de Santa Marta, Caribe Colombiano. Tesis de Maestría. Universidad de Magdalena, Colombia.URL : <https://repositorio.unimagdalena.edu.co/items/79a30800-8834-499a-8420-3904f25f502a>.
- Brandenburg, M., Senerpont D., Wohlrab, S., Krock, B., John, U., Van Scheppingen, Y .2017. Combined physical, chemical and biological factors shape *Alexandrium ostenfeldii* blooms in the Netherlands. *Harmful Algae*. 63 : 146-153.
- Brandenburg, K., Siebers, L., Keuskamp, J., Jephcott, T. G., van de Waal, D. B. 2020. Effects of nutrient limitation on the synthesis of N-rich phytoplankton toxins : A meta-analysis. *Toxins (Basel)*. 12(4) : 221.

- Brock, G., Pihur, V., Datta, S., Datta, S. 2008. clValid: an R package for cluster validation. *Journal of Statistical Software* 25(4): 1-22.
- Burson, A., Stomp, M., Akil, L., Brussaard, C. P., Huisman, J. 2016. Unbalanced reduction of nutrient loads has created an offshore gradient from phosphorus to nitrogen limitation in the North Sea. *Limnology and Oceanography*, 61(3): 869-888.
- Camargo, J., Alonso, A. 2007. Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos : Problemas medioambientales, criterios de calidad del agua e implicaciones del cambio climático. *Ecosistemas* 16 (2) : 98-110.
- Cartes A. 2018. La Ciudad del hollín. Desarrollo industrial y deterioro ambiental en la Cuenca del Carbón. *Historia* 396 8(2) : 27-53.
- Castro-González, M., Farías, L. 2004. N₂O recycling at the core of the oxygen minimum zone off northern Chile. *Mar Ecol Prog Ser* 280:1–11
- Davies, A.G., Morales, C.E. 1998. An appraisal of the stoichiometry of nutrient interrelationships in the upwelling system off northern Chile. *J Mar Biol Assoc UK* 78:697–706
- EULA. 1993. Programa Gestión de los recursos hídricos de la cuenca del río Biobío y del área marina costera adyacente, Oceanografía del golfo Arauco, Centro de Ciencias Ambientales (EULA), Universidad de Concepción, Concepción, Chile. Editorial EULA. 57.
- EULA 2020. Eula-Chile Centro de Ciencias Ambientales (EULA). 2020. Evolución y perspectivas a 30 años de su creación. <http://www.eula.cl/wp->

content/uploads/2020/04/LIBRO-30-A%C3%91OS-EULA.pdf

CEPAL. 2022. Citado Recurso Electrónico. Panorama de los océanos, los mares y los recursos marinos en América Latina y el Caribe. Conservación, desarrollo sostenible y mitigación del cambio climático. Unidad de Agricultura y Biodiversidad de la División de la Comisión Económica para América Latina - CEPAL, Naciones Unidas-ONU. URL : <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/47737> Acceso: 30 de noviembre de 2020.

Cid-Aguayo, B., Vanhulst, J., Rojas, C. 2019. Peasant raw cheese production in the Arauco Gulf : retro-innovative processes towards socio-ecologically sustainability. *Mundo Agrario* 20 (44) : 32-46.

Cloern, J., Alpine, A., Cole, B., Wong, R., Arthur, J., Ball, M. 1983. River Discharge controls phytoplankton dynamics in Northern San Francisco Bay. *Estuarine, Coast and Shelf Science* 16(4) : 415-429.

Codispoti, L.A., Friederich, G.E., Packard, T.T., Glover, H.E., Kelly, P.J., Spinrad, R.W., Barber, R.T., Elkins, J.W., Ward, B.B., Lipschultz, F., Lohanau, N. 1986. High nitrite levels off Northern Peru: a signal of instability in the marine denitrification rate. *Science* 233:1200–1202

Codispoti, L.A., Barber, R.T., Friederich, G.E. 1989. Do Nitrogen transformations in the Poleward Undercurrent off Peru and Chile have a globally significant influence? En: Neshyba, S.J., Mooers, C.N.K., Smith, R.L., Barber, R. (eds) *Poleward flows along eastern ocean boundaries. Coastal and Estuarine Studies*. Springer, New York, pp 281–310

- Constabel, S .1993. Ambientes sedimentarios de los estuarios Tubul y Raqui, VIII Región, Chile. Tesis de Doctorado. Universidad de Concepción, Concepción, Chile. URL : <http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/2401/3/Tesis>.
- Dalba, N .1993. Emisiones de carga global de nutrientes y metales traza del río Biobío al golfo de Arauco, Concepción, Chile. Tesina de diploma, Escuela de Graduados Universidad de Concepción, Chile.
- Daniel, I., Michael, G., Farías, L. 2013. Greenhouse gas emissions from the Tubúl-Raqui estuary (central Chile 36°S), Estuarine, Coastal and Shelf Science (134): 31-44.
- Davidson, K., Gowen, R.J., Harrison, P.J., Fleming, L.E., Hoagland, P., Moschonas, G. 2014. Anthropogenic nutrients and harmful algae in coastal waters. *Journal of Environmental Management* 146: 206-216.
- Diatta, J., Waraczewska, Z., Grzebisz, W., Niewiadomska, A., Tatuśko-Krygier, N. 2020. Eutrophication Induction Via N/P and P/N Ratios Under Controlled Conditions—Effects of Temperature and Water Sources. *Water, Air, Soil Pollut* (231): 149.
- Díaz, R. J., Rosenberg, R. 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321 : 926–929.
- Dirección General de Agua 2004. Citado Recurso Electrónico. Ministerio de Obras Públicas. URL: <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx> Acceso: 25 de junio de 2019.
- Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. 2004. Citado Recurso Electrónico. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad.

URL:chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mma.gob.cl/wpcontent/uploads/2017/12/BioBio.pdf Acceso: 5 de septiembre de 2020.

Dunn, J.C. 1974. Well-separated clusters and optimal fuzzy partitions. *Journal of Cybernetics* 4(1): 95-104.

Espino, M., Yamashiro, C. 2012. La variabilidad climática y las pesquerías en el Pacífico suroriental. *Latin American Journal of Aquatic Research* 40(3): 705-721.

Farfán, C., Alvares, B. 1983. Variability and fluxes of nitrogen and organic carbon at the mouth of a coastal lagoon. *Estuarine, Coast and Shelf Science* 17 (6) : 599-612.

Farías, L. 2002. The golf of Arauco (37°S) a Coastal Upwelling Embayment. Páginas 46-52, En *Estuarine Systems of the Latin American Region (Regional workshop V) and Estuarine Systems of the Arctic region: Carbon, Nitrogen and phosphorus fluxes*. LOICZ Report & Studies N°23. LOICZ, Texel, the Netherlands. 103 pp.

Farías, L., Graco, M., Ulloa, O. 2004. Temporal variability of nitrogen cycling in continental-shelf sediments of the upwelling ecosystem off central Chile. *Deep-Sea Res Pt II* 51(20–21): 2491–2505

Ferreira, J.G., Andersen, J.H., Borja, A., Bricker, S.B., Camp, J., Cardoso da Silva, M., Garcés, E., Heiskanen, A-S., Humborg, C., Ignatiades, L., Lancelot, C., Menesguen, A., Tett, P., Hoepffner, N., Claussen, U. 2011. Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 93: 117-131.

- Galili, T. 2015. Dendextend: An R package for visualizing, adjusting, and comparing trees of hierarchical clustering. *Bioinformatics* 31(22).
- Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D. 2020. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Gladyshev, M., Gubelit, Y. 2009. Green Tides: New Consequences of the Eutrophication of Natural Waters (Invited Review). *Contemp Probl Ecol* 12. 109–125.
- Glibert, P. M., Seitzinger, S., Heil, C. A., Burkholder, J. M., Parrow, M. W., Codispoti, L. A., Kelly, V. 2005. The role of eutrophication in the global proliferation of harmful algal blooms. *Oceanography* 18 : 198–209.
- Gómez, A., Jover, E., Bodineau, L., Albaiges, J., Bayona, J. 2006. Organic contaminant loads into the Western Mediterranean Sea: Estimate of Ebro River inputs. *Chemosphere* 65(2) : 224-236.
- Guillén, O., Calienes, R., Rondan De, R. 1977. Medio ambiente y producción primaria frente al área Pimentel-Chimbote. *Boletín del Instituto del Mar del Perú* (3):107–159
- Grosjean, P., Ibañez, F., Etienne, M. 2022. Citado Recurso Electrónico. Package ‘pastecs’. Package for analysis of space-time ecological time series. UR: <https://cran.r-project.org/web/packages/pastecs/pastecs.pdf> Acceso 12 enero de 2023.
- Halpern, B., Ebert, M., Kappel, C., Madin, M., Matthew, M., Walbridge S. 2009. Global priority areas for incorporating land-sea connections in marine conservation. *Conservation Letters* 149 : 189-196.
- Handl, J., Knowles, K., Kell, D. 2005. Computational cluster validation in post-

- genomic data analysis. *Bioinformatics* 21(15): 3201-3212.
- Harper, D. 1992. What is eutrophication? *Eutrophication of Freshwaters: Principles problems* Springer Netherlands (1): 1-28.
- Hickey, B., Kudela, R., Nash, D., Bruland, J., Peterson, W., Cready, P., Lessard, E., Jay, D., Banas, N., Baptista, A., Kosro, P., Kilcher, L. 2010. River influences on Shelf Ecosystem : Introduction and synthesis. *Journal of Geophysical Research Oceans* 115 (C2) : 1-26.
- Huber, A. L., Hamel, K. S. 1985. Phosphatase activities in relation to phosphorus nutrition in *Nodularia spumigena* (Cyanobacteriaceae). *Hydrobiología* (123): 145-152.
- Inan, A. 2019. Modeling of Hydrodynamics and Dilution in Coastal. *Waters* 11 (1): 83.
- INE. 2017. Censo de población y vivienda (2017). Cuadros estadísticos. Instituto Nacional de Estadística, Chile. URL: <https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda/censo-de-poblacion-y-vivienda> Acceso: 6 de junio de 2020.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. 2021. *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*. Second edition, Springer Science+Business Media, 607.
- Jones, E., Frei, J., Lee, R., Maxwell, D., Shoemaker, R., Follett, A., Lawson, G., Maimfeldt, M., Watts, R., Aanderud, Z., Alired, C., Asay, A., Buhman, M., Burbidge, H., Cali, A., Crandall, T., Errigo, I., Griffin, N., Hansel, N., Howe, J.,

- Meadows, E., Kujanpaa, E., Lange, L., Nelson, M., Norris, A., Ostlund, E., Suiter, N., Tanner, K., Tolworthy, J., Camila, V., Abbott, B. 2021. Citizen science reveals unexpected solute patterns in semiarid river networks. PLOS ONE 16 (8) : 44-72.
- Kassambara, A. 2017. Practical guide to multivariate analysis in R. Unsupervised machine learning. STHDA, 187.
- Kitsiou, D., Karydis, M. 2011. Coastal marine eutrophication assessment: A review on data analysis, Environment International 37 (4): 778-801.
- Koh, D., Ko, K., Kim, Y., Lee, S., Chang, H .2007. Effect of agricultural land use on the chemistry of groundwater from basaltic aquifers, Jeju Island, South Korea. Hydrogeology Journal 15 :727-743.
- Lancaster, P., Salkauskas, M. 1986. Curve and Surface Fitting. Academic Press. San Diego, California. 280.
- Le Moal, M., Gascuel-Oudou, C., Ménesguen, A., Souchon, Y., Étrillard, E., Levain, A., Moatar, F., Pannard, A., Souchu, P., Lefebvre, A., Pinay, G. 2019. Eutrophication: A new wine in an old bottle?. Science of The Total Environment, 651, Part 1: 1-11.
- Leah May, B., Fred, T., Lerman, A. 1999. Biogeochemical responses of the carbon cycle to natural and human perturbations : Past, present and future. American Journal of Science 299: 7-9.
- Lebo, M., Sharp, J. 1992. Modelado del ciclo del fósforo en un estuario de llanura costera bien mezclado. Estuarine, Coastal and Shelf Science 35 (3): 235-252.

- Legendre, P., Legendre, L. 2003. Numerical Ecology. Developments in Environmental Modelling 20, Elsevier, second English edition, 853.
- Léniz, B., Vargas, A., Ahumada, R. 2012. Characterization and comparison of microphytoplankton biomass in the lower reaches of the Biobio River and the adjacent coastal area off Central Chile during autumn-winter conditions. Latin American of Aquatic Research 40 (4) :847-857.
- Lincura, O., Díaz Crovetto., G. 2021. Reconociendo Riesgos Invisibles en una Zona de Sacrificio : El Caso de la Organización Trabajadores Unidos Contra el Asbesto (TUCA) de la Comuna de Coronel, Chile. Papeles de Trabajo (40) : 59-94.
- MacFarland, T.W .2014. Introduction to Data Analysis and Graphical Presentation in Biostatistics with R. Statistics in the Large. Springer Science+Business Media, 167.
- Mateo-Sagasta, J., Raschid-Sally, L., Thebo, A. 2015. Global Wastewater and Sludge Production, Treatment and Use. In: Drechsel, P., Qadir, M., Wichelns, D. (eds) Wastewater. Springer, Dordrecht. 15-38.
- Maúre, E.d.R., Terauchi, G., Ishizaka, J., Clinton, N., DeWitt, M. 2021. Globally consistent assessment of coastal eutrophication. Nat Commun 12, 6142.
- MINAGRI. 2022. Citado Recurso Electrónico. Región del Biobío. Ministerio de Agricultura. URL: <https://www.minagri.gob.cl/region/viii-region-de-biobio/> Acceso : 6 de mayo de 2020.

- MINSEGPRES. 2000. Decreto 90. Establece Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Ministerio Secretaría General de la Presidencia de Chile. (MINSEGPRES). URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637> Acceso: 11 de abril de 2019.
- MMA. 2022. Programa para la Recuperación Ambiental y Social de Coronel PRAS. Ministerio de Medio Ambiente. URL: <https://mma.gob.cl/pras/> Acceso: 24 septiembre de 2022.
- Montes, R., Quiñones, R.A. 1999. Efecto de la pluviosidad y del caudal de los ríos sobre los desembarques de las almejas *Protothaca thaca* (Molina,1782) y *Venus antiqua* (King & Broderip, 1835) en la zona centro-sur de Chile. Revista Chilena de Historia Natural 72(1) :13-30.
- Mulholland, M. R., Floge, S., Carpenter, E. J., Capone, D. G. 2002. Phosphorus dynamics in cultures and natural populations of *Trichodesmium* spp. Marine Ecology Progress. (45) : 55.
- Ning, X., Lin, C., Hao, Q., Liu, C., Le, F., and Shi, J. 2009. Long term changes in the ecosystem in the northern South China Sea during 1976–2004, Biogeosciences, 6 (10), 2227–2243.
- Nguyen, A., Nemery, J., Gratiot, N., Garnier, J., Dao, T., Thieu, V., Larulle, G. 2021. Biogeochemical functioning of an urbanized tropical estuary : Implementing the generic C-GEM (reactive transport) model. Science of The total Environment, (784).

- ODEPA. 2022. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias ODEPA. Información Regional 2018. URL: <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines> Acceso 8 de diciembre de 2022.
- Ortega, C. 2018. Evaluación de la información disponible asociada a la Cuenca del río Biobío para identificar los peligros antrópicos que afectan a la planta La Mochita, en el contexto de planes de seguridad del agua. Tesis de Ingeniero Ambiental, Universidad de Concepción, Chile. URL :<http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/3388>
- Perez, C., Grandpre, M., Lagos, N., Saldias, G., Cascales, E., Vargas, C. 2015. Influence of climate and land use in carbon biogeochemistry in lower reaches of rivers in central southern Chile: Implication for the carbonate system in river-influenced rocky shore environments. *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences* 120 (4): 673-692.
- Quiñones, R., Montes, R. 2001. Relationship between freshwater input to the coastal zone and the historical landings of the benthic/demersal fish *Eleginops maclovinus* in central-south Chile. *Fisheries Oceanography* 10 (4) : 311-328.
- Quiñones, R. A., Gutiérrez, M., Daneri, G., Gutiérrez D.A., González, H., Chávez, F. 2010. Pelagic carbon fluxes in the Humboldt Current System. Páginas 44-64, En: *Carbon and nutrient fluxes in global continental margins: A global synthesis*. K.K. Liu, L. Atkinson, R. A. Quiñones, L. Talaue-McManus (eds.), IGBP Series Book, Springer-Verlag New York. 741 pp
- R Core Team. 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R version 3.6.1. The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

- Rabalais, R., Eugene Turner, J., Díaz, D 2009. Global change and eutrophication of coastal waters, ICES Journal of Marine Science 66 (7): 1528–1537.
- Ramech, R., Chen, Z., Cummin, V., Delias, C., Day, J., Dennison, B., Forbes, D., Glaeser, B., Glaser, M., Glavovic, B., Kremer, H., Lange, M., Larsen, J., Tissier, M., Newton, A., Purvaja, R., Wolanski, E. 2015. Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone : Past, present and future. *Anthropocene* 12:85-98.
- Redfield, A. 1934. Alfred Clarence. "On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton." James Johnstone memorial volume (1934): 176-192.
- Registro Pesquero Artesanal 2022. Citado Recurso Electrónico. Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura. URL: http://prod.registropublico.sernapesca.cl/reportes/regpesca_publico/index.php Acceso: 18 de enero de 2022.
- Romero, H., Vásquez, A. 2005. Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *Revista EURE* 31 (94) : 97-117.
- Ruf T. 1999. The Lomb-Scargle Períodogram in Biological Rhythm Research: Analysis of Incomplete and Unequally Spaced Time-Series. *Biological Rhythm Research* (30): 178-201.
- Saavedra, N., Foppiano, A.J. 1992. Contribución a la cinemática del anticiclón del Pacífico sur. *Geoacta*, 19: 95-110
- Sabater, S., Acuña, V., Giorgi, A., Guerra, E., Muñoz, I., Romani, A. 2005. Effects of nutrient inputs in a forested Mediterranean stream under moderate light availability. *Hydrobiologie* 163 (4) : 479-496.

- Sáez Plaza, P., García Asuero, A. y Martín Bueno, J. 2019. Una anotación sobre el método de Kjeldahl. *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* 85 (1): 14-19.
- Saldías, G. S., Sobarzo, M., Largier, J. L., Moffat, C., Letelier, R. 2012. Seasonal variability of turbid river plumes off central Chile based on high-resolution MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment* (123): 220-233.
- Salinas, J.A. 2017. Estimación de caudales mínimos en cuencas del secano costero de la Región del Biobío. Tesis de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad del Biobio, VIII Región, Chile. URL: <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/3239>.
- SEIA. 2022. Sistema de evaluación del impacto Ambiental. URL: <http://seia.sea.gob.cl> Acceso: 21 de agosto de 2019.
- Seitzinger, S., Mayorga, E., Bouwmna, A., Krose, C., Beusen, A., Billen, G., Van, G., Dumont, E., Fekete, B., Garnier, J. 2010. Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends. *Advancing Earth and Space Science* 24 (4): 1-16.
- SERNAPESCA. 2021. Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura. Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura, Ministerio de Economía, Chile. URL: <http://www.sernapesca.cl/-informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura> Acceso: 4 de enero de 2021.
- Smith V. H. 2003. Eutrofización de los ecosistemas marinos de agua dulce y costeros: un problema global. *Environmental Science and pollution research international* 10 (2): 126–139.

- Snifa. 2022. Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental y Seguimiento Ambiental. Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de Chile. <https://snifa.sma.gob.cl/> Acceso: 30 de enero de 2019.
- Sobarzo, M. 1994. Oceanografía Física entre Punta Nugurne (35°57'S; 72°47'W) y Punta Manuel (38°30'S; 73°31'W), Chile: una revisión histórica (1936-1990). *Gayana* 2(1): 5-17.
- Testa, G., Masotti, I., Laura, F. 2018. Temporal Variability in Net Primary Production in an Upwelling Area off Central Chile (36°S). *Frontiers in Marine Science* (5): 2296-7745.
- Trauth, M.H. 2015. MATLAB® Recipes for the Earth Sciences. Fourth ed., Springer, 427 pp.
- Tuholske, C., Halpern, B., Blasco, G., Frzier, M. 2021. Mapping global inputs impacts of human sewage in coastal ecosystems. *PLOS ONE* 16(11).
- VanderPlas, J.T. 2018. Understanding the Lomb-Scargle Periodogram. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 236 (16): 55 pp.
- Van Drecht, G., A. F. Bouwman, J. Harrison, and J. M. Knoop. 2009. Global nitrogen and phosphate in urban wastewater for the period 1970 to 2050, *Global Biogeochem. Cycles* 23.
- Veloso, C., Flores, E., Noguera, I., Faúndez, R., Arriagada, P., Rojas, O., Carrasco, J.A., Link, O. 2022. Preparedness against floods in nearly pristine socio-hydrological systems, *Hydrological Sciences Journal* 67(3), 319-327.
- Vitousek, P., Aber, J., Howarth, R., Likens, G., Matson, P., Schindler., Schesinger,

- W., Tilman, G. 1997. Human alteration on the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *ecological* 7, 737-750.
- Wang, J. H., Qin, Y. T., Liu, C. C., Sun, Y., Cheng, X., Xu, R. 2007. A background investigation of toxic algae and bio-toxin in the Yangtze Estuary. *Trans. Oceanol. Limnol.* 53(1), 52-61.
- Wen, Y., Schoups, G., van de Giesen, N. 2017. Organic pollution of rivers: Combined threats of urbanization, livestock farming and global climate change. *Sci Rep* 7 (1) : 1-9.
- Wong, Z., Saldías, G. S., Largier, J.L., Strub, P. T., & Sobarzo, M. 2021. Surface thermal structure and variability of upwelling shadows in the Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 126 (4).
- Zunguza, A., Montes, R., Cubillos, L., Quiñones, R. A. 2022. River runoff as a major driver of anchovy (*Engraulis ringens*) recruitment but not of common sardine (*Strangomera bentincki*) in Central-South Chile. *Front Mar Sci* (9).

FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio. Efluentes industriales [(Aguas residuales que se descargan a uno o más cuerpos receptores como resultado de un proceso, actividad o servicio de una fuente emisora (SMA 2022)) y fluviales ubicadas en el borde costero del golfo de Arauco. Los símbolos fuera de escalas de color verde denotan la ubicación de las estaciones fluviales de norte a sur: ríos Biobío, Carampangue, Laraquete y Tubúl-Raqui mientras que, los símbolos de color negro denotan la ubicación de efluentes industriales. /

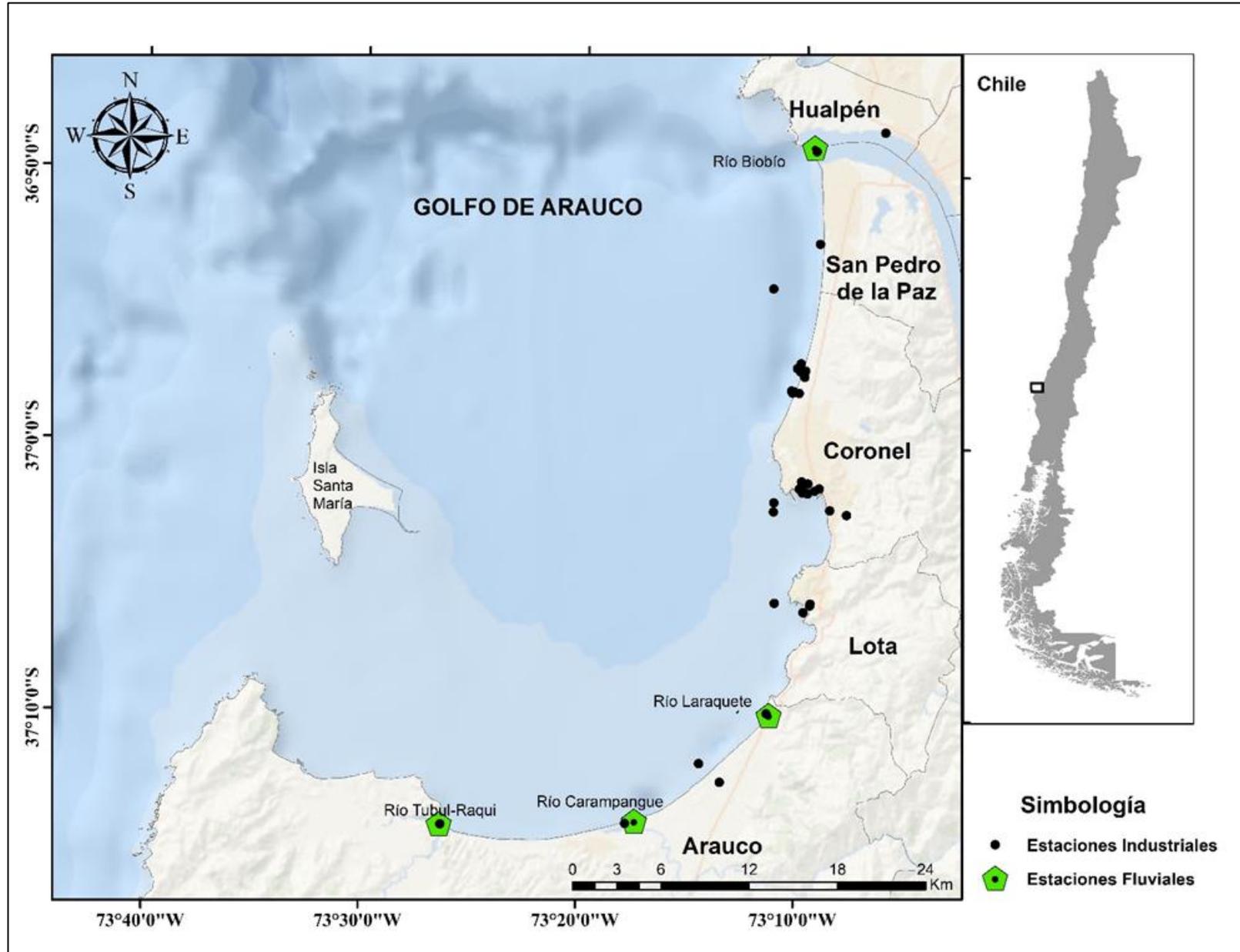


Figura 2. Sectorización establecida a partir de los aportes de nutrientes por comunas en el golfo de Arauco. De norte a Sur: Sector I (Hualpén y San Pedro de la Paz); sector II (Coronel y Lota) y sector III (Arauco). Los gráficos de pastel denotan el origen de los principales aportes de nutrientes según tipo de fuente establecida en el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA): Fluviales (ríos) o antropogénicas (Industria de la pesca, aguas servidas, producción de energía, industria forestal y producción de pulpa y celulosa y otras industrias)./

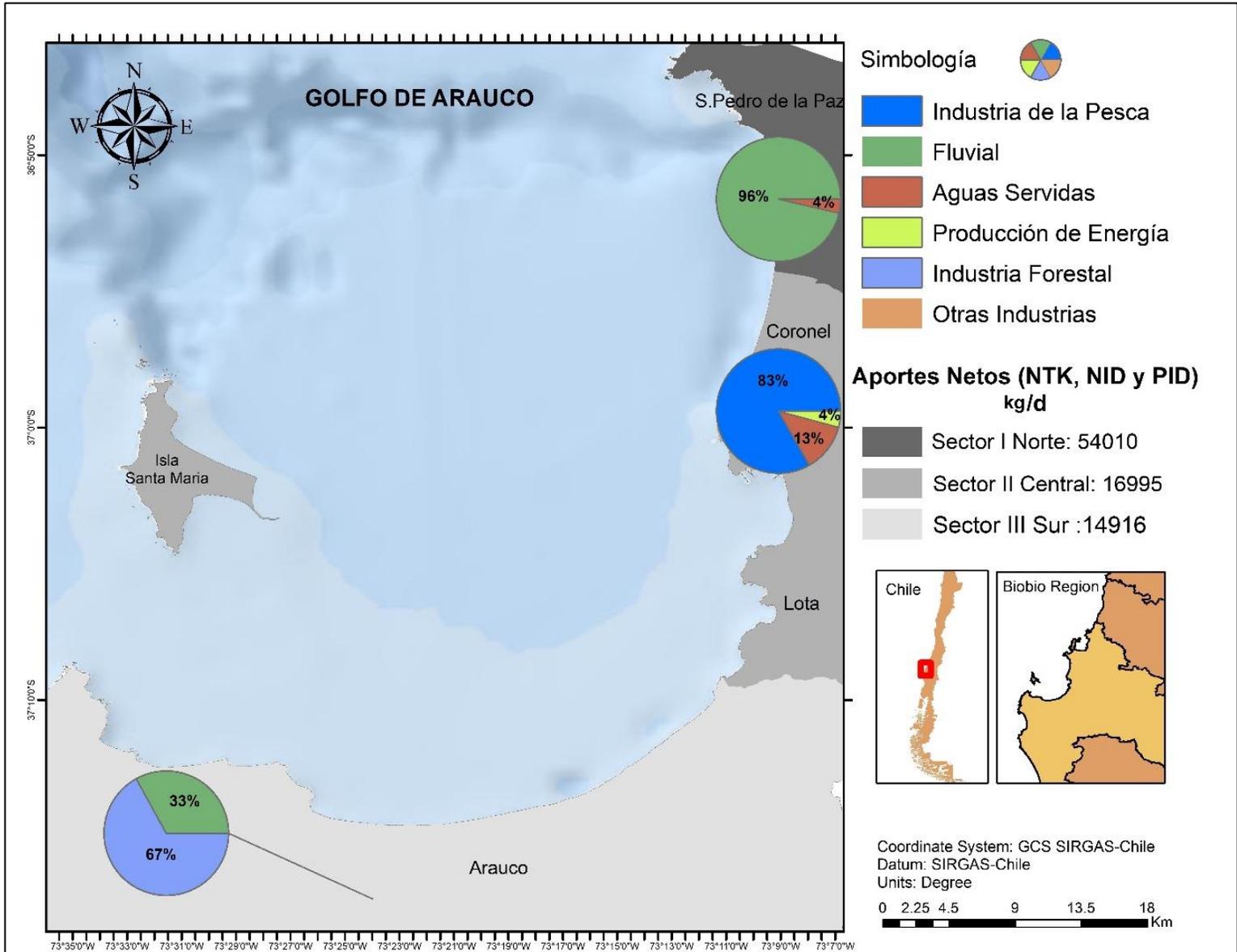


Figura 3. Aportes relativos totales (%) de nitrógeno y fósforo (NTK+NID+PID) para cada fuente emisora, tanto fluviales* como industriales en el golfo de Arauco.
/

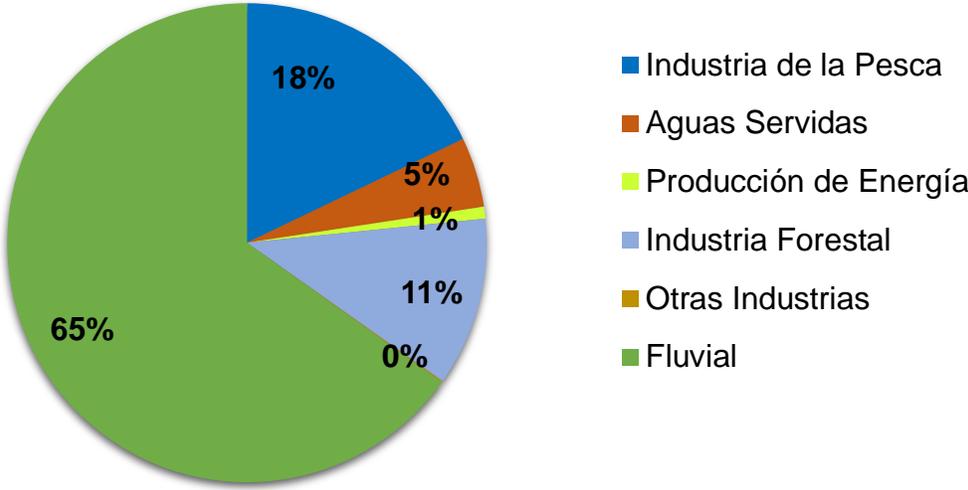


Figura 4. Aportes interanuales (promedio) de nitrato, nitrato, amonio, fosfato, NID y NTK de origen fluvial* y antropogénico hacia el golfo de Arauco durante el periodo de estudio (2015-2022)./

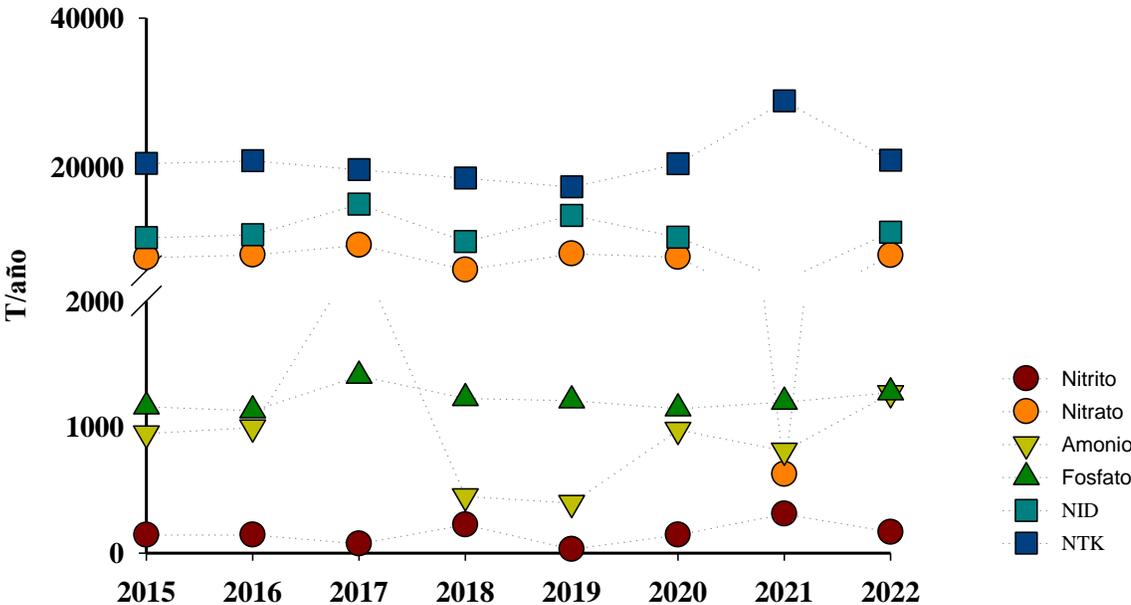


Figura 5. Gráficos de caja o “boxplots” para las tasas de emisión de nitrógeno inorgánico disuelto (NID, kg d⁻¹). En el lado izquierdo se presentan las tasas de NID para todas las fuentes emisoras analizadas. En el lado derecho, sólo se presentan aquellas fuentes con tasas inferiores a 3990 kg d⁻¹. Para cada grafico de caja, los círculos de color negro representan el promedio para ese grupo, y los triángulos de color rojo corresponden a valores extremos o “outliers”. La mediana corresponde a la línea negra horizontal localizada dentro de cada caja. Los valores del promedio y mediana de las tasas de emisión de NID, considerando todas las fuentes emisoras, equivalen a 1773 kg d⁻¹ y 392 kg d⁻¹, respectivamente. Compl. Celco Pl. Arauco=Complejo Planta Celco Arauco. /

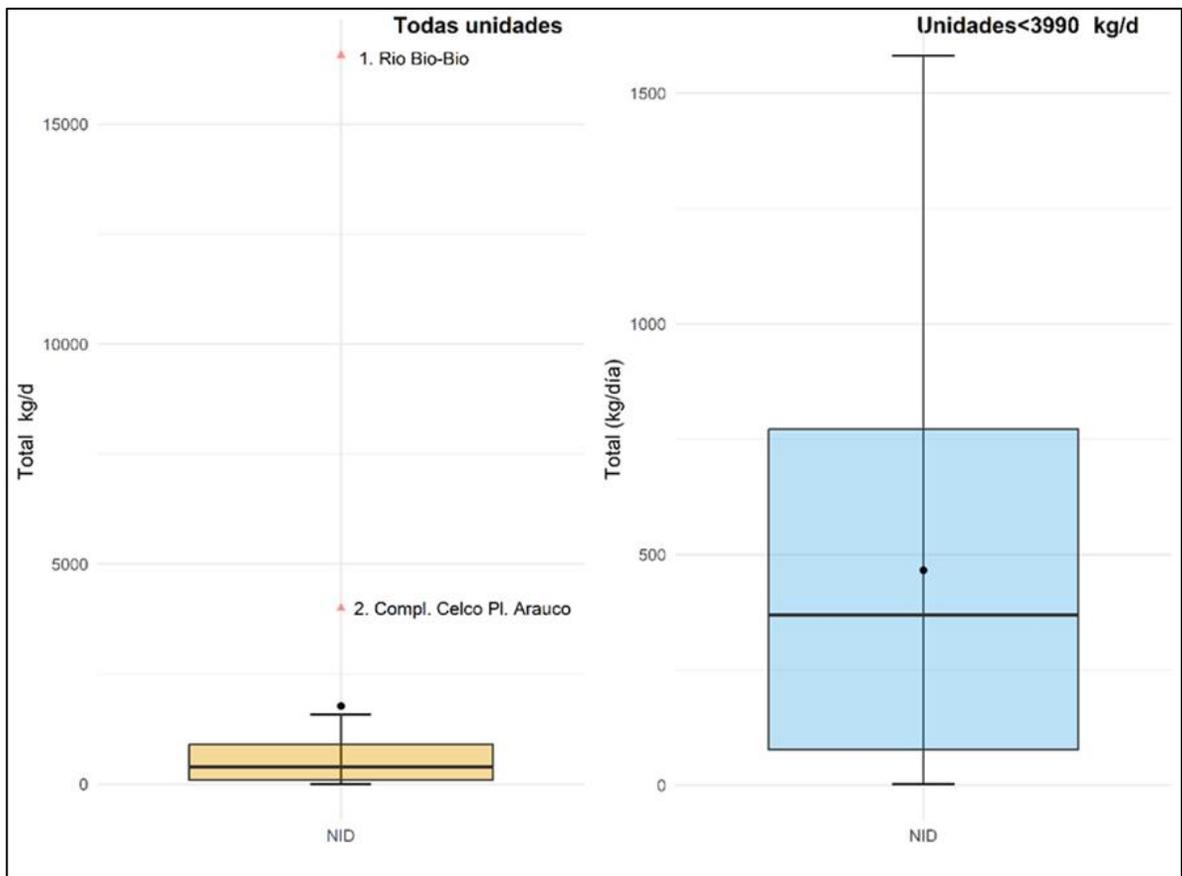


Figura 6. Gráficos de caja o “boxplots” para las tasas de emisión de fósforo inorgánico disuelto (PID, kg d⁻¹). En el lado izquierdo se presentan las tasas para todas las fuentes analizadas. En el lado derecho, sólo se presentan aquellas fuentes con tasas inferiores a 250 kg d⁻¹. Para cada grafico de caja, los círculos de color negro representan el promedio para ese grupo, y los triángulos de color rojo corresponden a valores extremos o “outliers”. La mediana corresponde a la línea negra horizontal localizada dentro de cada caja. Los valores del promedio y mediana de las tasas de emisión de fósforo, considerando todas las fuentes emisoras, equivalen a 190 kg d⁻¹ y 22 kg d⁻¹, respectivamente. Pl. Gran Concepción. Essbio = Planta Gran Concepción Essbio. /

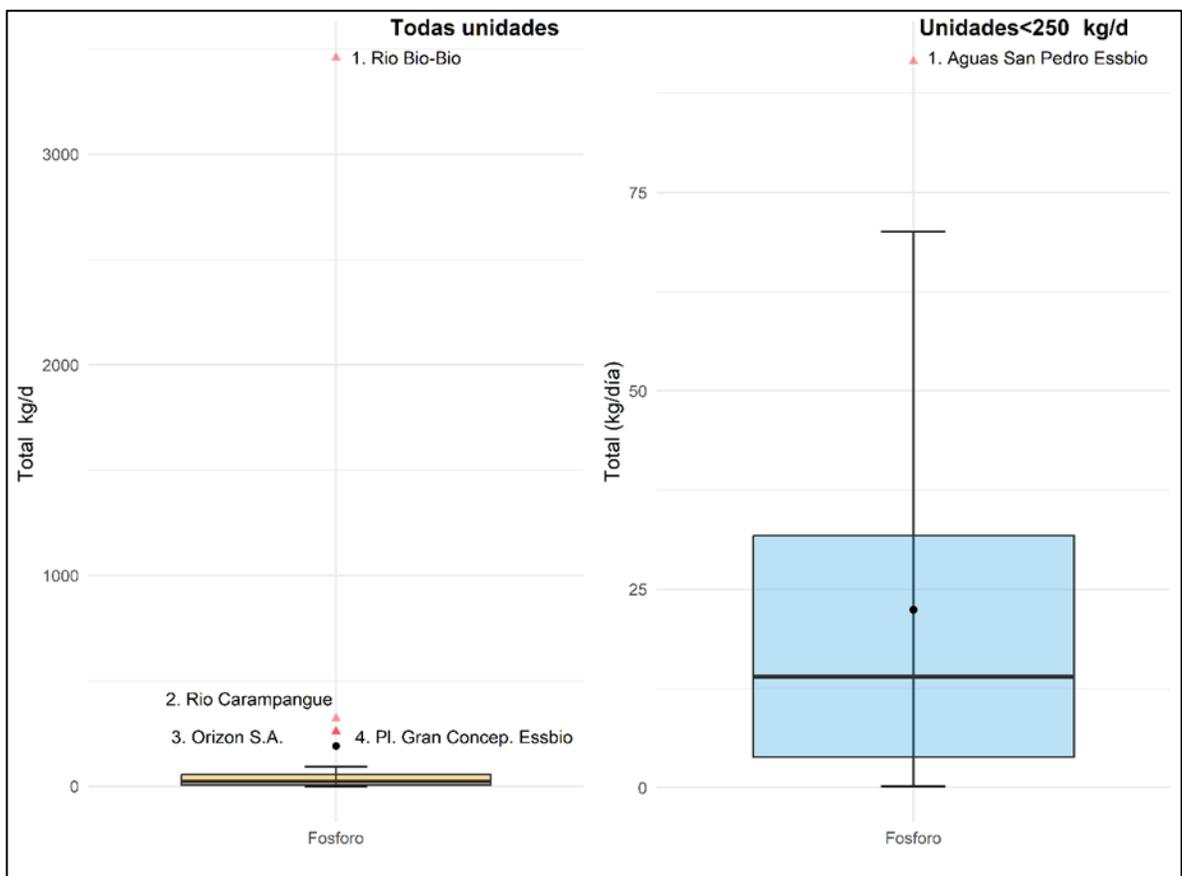


Figura 7. a) Relación entre nitrógeno inorgánico disuelto (NID; kg d^{-1}) y fósforo inorgánico disuelto (PID; kg d^{-1}) en donde se visualiza en forma preliminar la formación de 3 grupos, entre los cuales destacan aquellos con mayores aportes de nutrientes al golfo de Arauco y que se componen de una sola fuente emisora. Grupo 1: Río Biobío (círculo de color negro); grupo 2: Complejo Celco Planta Arauco (círculo de color rojo); grupo 3: Río Carampangue (círculo de color verde). El grupo 4 está formado por las restantes 12 fuentes emisoras (círculos de color azul sobrepuestos entre sí.). b) Dendrograma obtenido de las 15 fuentes emisoras analizadas para las cuales se obtuvieron registros de ambos nutrientes, PID y NID (N=15). La altura (h) representa el grado de disimilitud entre fuentes emisoras. Se identifican 2 clusters que corresponden a Clúster 1 formado por fuente emisora 22 (río Biobío) y Clúster 2 formado por las 14 fuentes restantes (11, 24, 18, 16, 10, 15, 2, 4, 25, 1, 23, 20, 13, 14). /

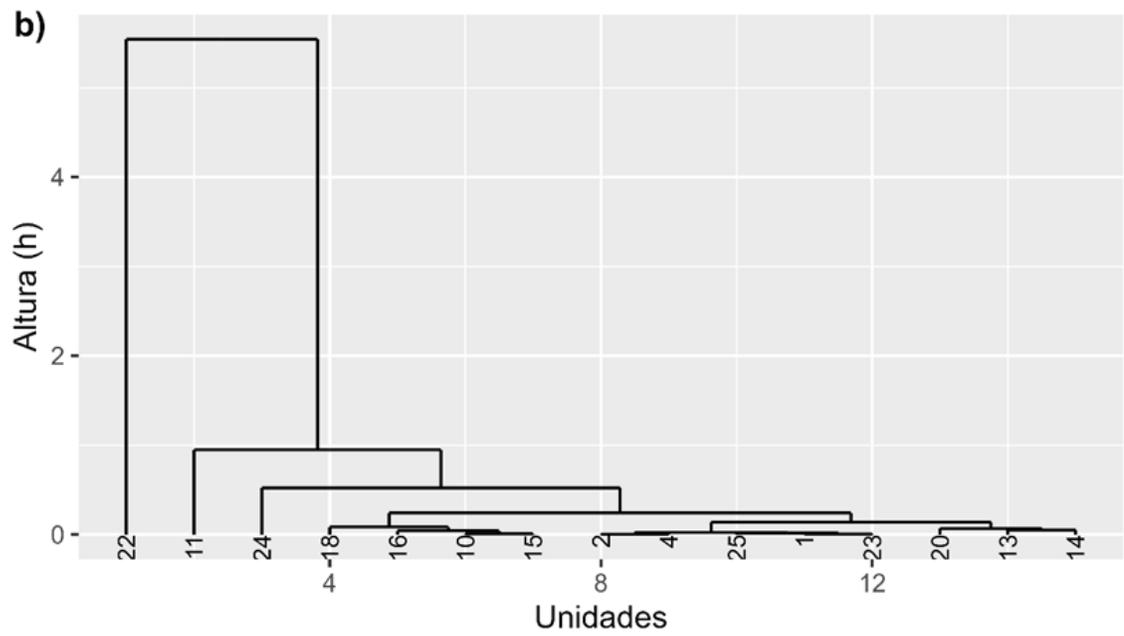
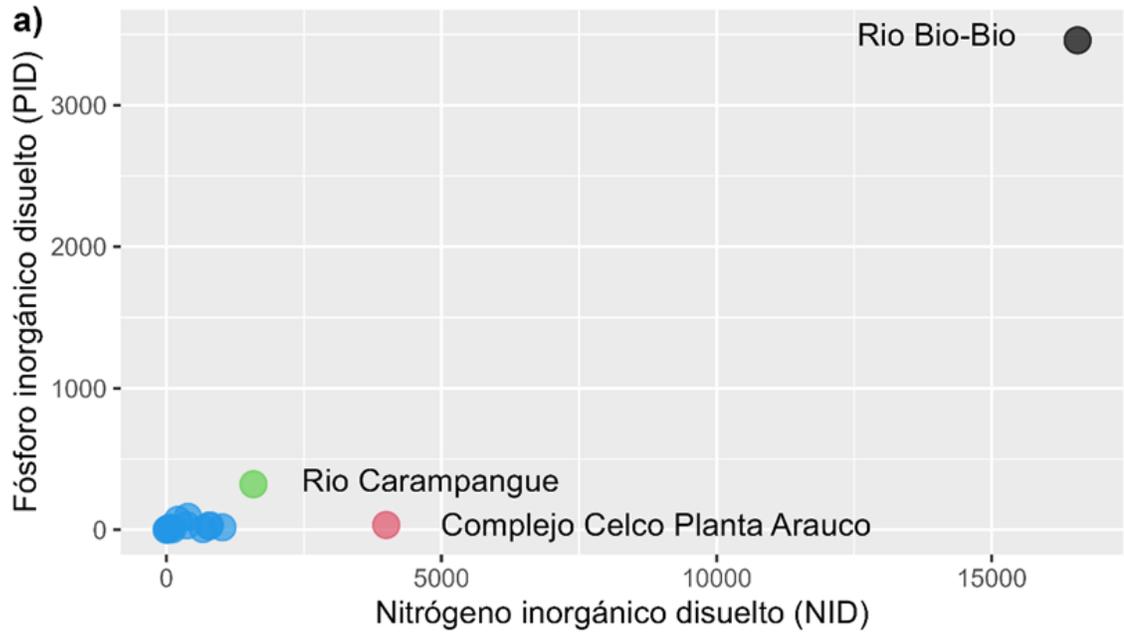


Figura 8. a) Nitrógeno inorgánico disuelto (NID; kg d^{-1}) proveniente de río Laraquete a escala estacional entre verano de 2015 y primavera de 2022. Los triángulos de color rojo en el eje de las abscisas señalan la posición (estación del año) para los cuales no se registran observaciones; **b)** registros de NID (círculos negros) observados en a) incorporando valores interpolados de las observaciones faltantes (círculos rojos) para conformar una serie de tiempo continua. /

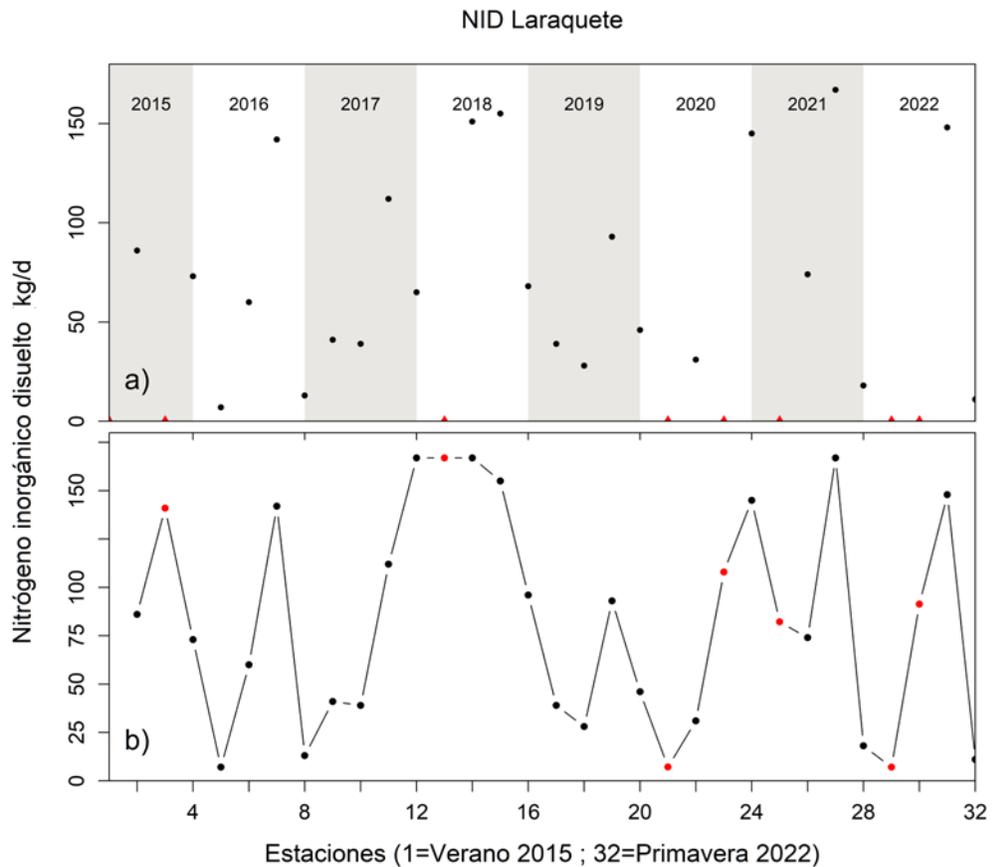


Figura 9. a) Nitrógeno inorgánico disuelto (NID; kg d^{-1}) proveniente de río Carampangue a escala estacional entre verano de 2015 y primavera de 2022. Los triángulos de color rojo en el eje de las abscisas señalan la posición (estación del año) para los cuales no se registran observaciones; **b)** registros de NID (círculos negros) observados en a) incorporando valores interpolados de las observaciones faltantes (círculos rojos) para conformar una serie de tiempo continua. /

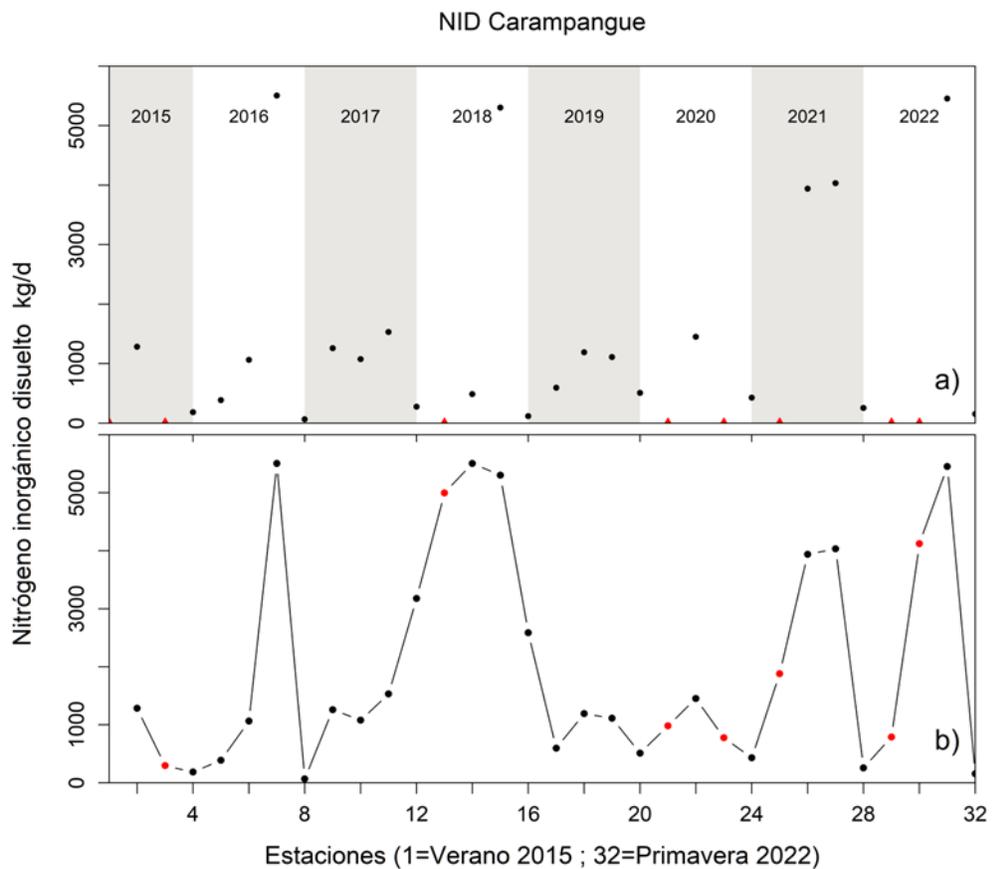


Figura 10. a) Fósforo inorgánico disuelto (PID; kg d^{-1}) proveniente de río Laraquete a escala estacional entre verano de 2015 y primavera de 2022. Los triángulos de color rojo en el eje de las abscisas señalan la posición (estación del año) para los cuales no se registran observaciones; **b)** registros de PID (círculos negros) observados en a) incorporando valores interpolados de las observaciones faltantes (círculos rojos) para conformar una serie de tiempo continua. /

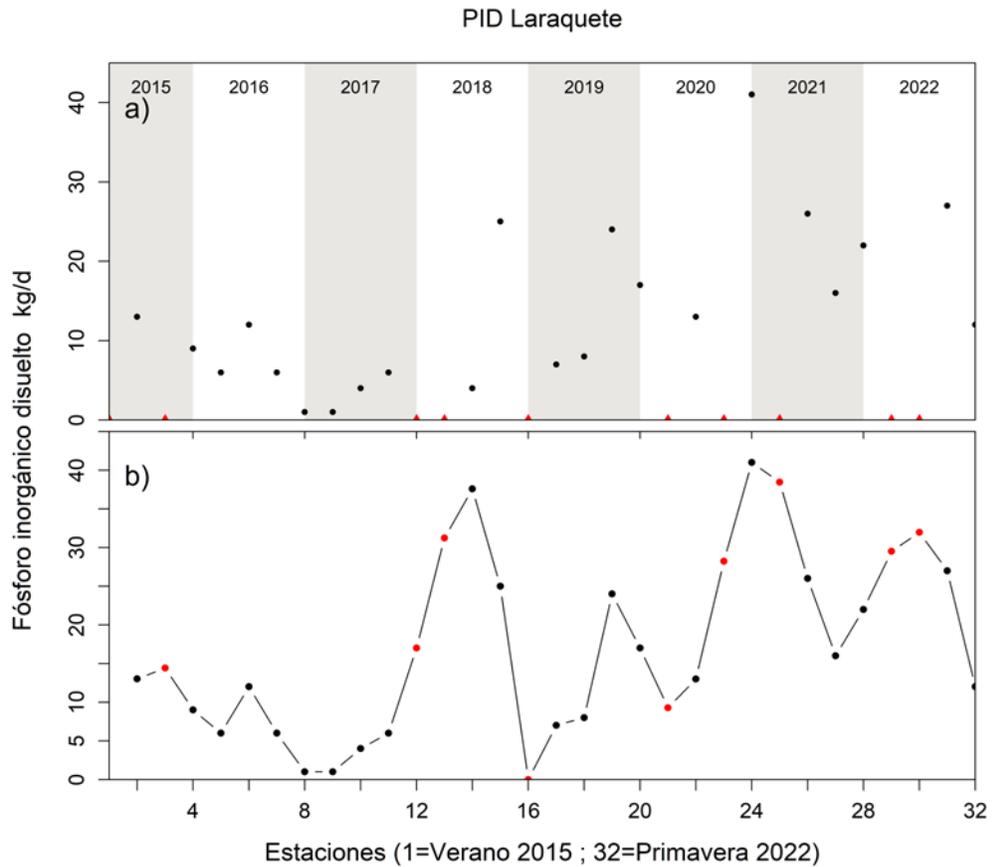
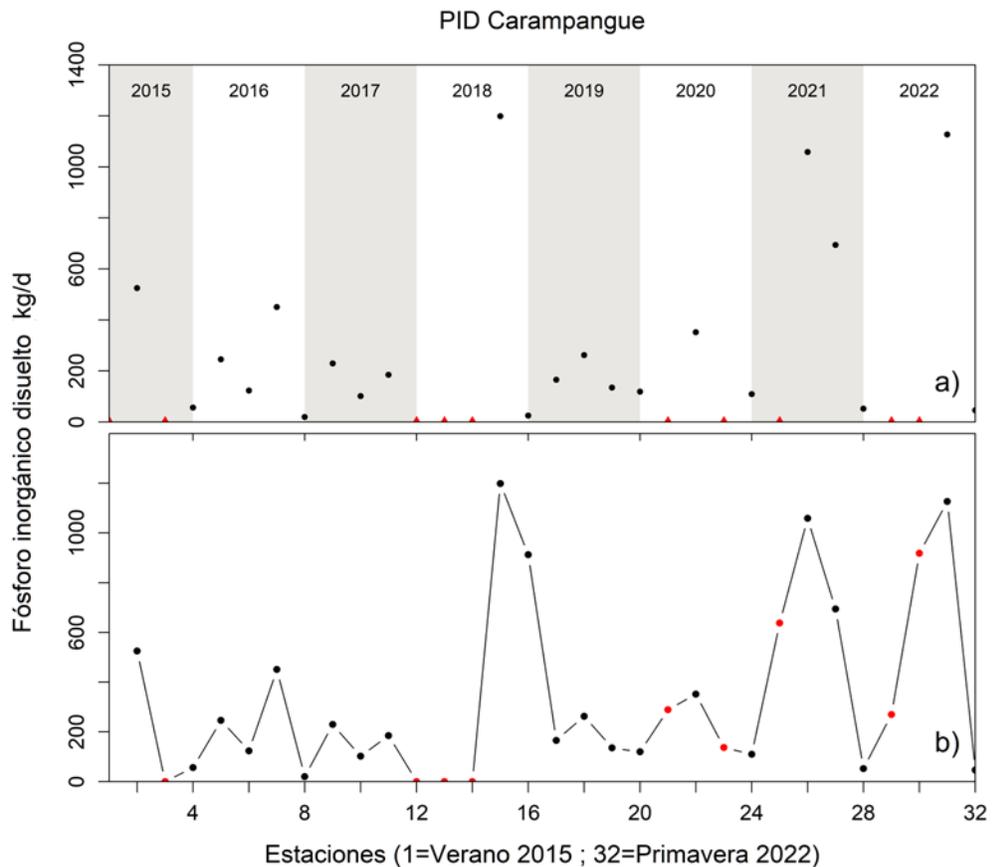


Figura 11. a) Fósforo inorgánico disuelto (PID; kg d^{-1}) proveniente de río Carampangue a escala estacional entre verano de 2015 y primavera de 2022. Los triángulos de color rojo en el eje de las abscisas señalan la posición (estación del año) para los cuales no se registran observaciones; **b)** registros de PID (círculos negros) observados en a) incorporando valores interpolados de las observaciones faltantes (círculos rojos) para conformar una serie de tiempo continua. /



TABLAS

Años	Estaciones	Nitrato kg	Desviación	Nitrato kg	Desviación	Fosfato	Desviación	Amonio	Desviación	NID kg	Desviación	NTK kg	Desviación
		d ⁻¹	Estándar	d ⁻¹	Estándar	kg d ⁻¹	Estándar	kg d ⁻¹	Estándar	d ⁻¹	Estándar	d ⁻¹	Estándar
2015-	Primavera	903	1047	16422	8228	3064	1541	8508	10081	14388	15195	53549	56827
2022	Verano	58	2	5316	689	931	333	734	465	3941	4208	8871	1625
	Otoño	98	91	5013	2112	1373	743	895	282	5972	2348	9895	8637
	Invierno	566	515	42987	31250	6449	5129	2756	1298	38356	34386	46237	29548

Tabla 1. Promedios de aportes máxicos diarios de nitrógeno y fósforo (kg d⁻¹) de origen fluvial* en diferentes estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno) en el golfo de Arauco. Período 2015-2022. /

Fuentes Emisoras	NTK kg d ⁻¹	NID kg d ⁻¹	PID kg d ⁻¹	N/P
Industria de la Pesca	12983	2177	456	4,8
Aguas Servidas	1604	2057	158	13
Producción de Energía	616	N. D	8	5,4
Industria Forestal	5950	3995	34	117
Otras Industrias	5	51	13	4,8
Aportes Fluviales*	34771	18328	52	4,8
Totales	55930	26610	722	-

Tabla 2. Aportes máxicos de NTK (kg d⁻¹), NID (kg d⁻¹) y PID (kg d⁻¹), obtenidos a partir de la sumatoria de cada fuente emisora según su actividad económica (Industria de la Pesca, Aguas servidas, Producción de Energía, Industria Forestal) así como las fuentes fluviales (ríos Biobío, Laraquete, Carampangue y Tubúl-Raqui). /

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Comunas	Unidades Fiscalizables	Saneamiento Ambiental	Vivienda e Inmobiliarias	Instalación Fabril	Minería	Industria Pesca	Producción Energía	Industria Forestal	Transporte	Infraestructura Portuaria	Agroindustria	Otros
Hualpén	32	1	3	2	3	-	4	-	3	1	-	15
San Pedro de la Paz	44	3	19	3	3	-	-	2	3	-	1	10
Coronel	123	15	11	19	6	21	10	10	14	3	4	10
Lota	18	4	1	-	-	8	1	1	1	1	-	1
Arauco	46	8	7	6	5	5	3	3	1	-	-	8
Total	263	31	41	30	17	34	18	16	21	5	5	45

Tabla suplementaria 1. Unidades fiscalizables ubicadas en el borde costero de las comunas de Hualpén, San Pedro de la Paz, Coronel, Lota y Arauco. Unidad Fiscalizable se define como una unidad física en la que se desarrollan obras, acciones o procesos, relacionados entre sí y que se encuentran regulados por uno o más instrumentos de carácter ambiental de competencia de la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA 2022).

Unidad Fiscalizable	Actividad	Latitud	Longitud
Matadero Agrolomas	Agroindustria	36° 52' 30998" S	73° 9' 17217" W
EWOS Chile Alimentos Ltada	Pesca	36° 57' 14426" S	73° 9' 56878" W
Pesquera Grimar	Pesca	36° 57' 24981" S	73° 9' 53269" W
Planta Rico Foods S.A	Pesca	36° 57' 56653" S	73° 10' 22917" W
CT Bocamina	Producción de Energía	37° 1' 16087" S	73° 9' 56413" W
Pesquera FOOD-CORP Coronel	Pesca	37° 1' 40705" S	73° 9' 53676" W
ORIZON S.A	Pesca	37° 1' 21852" S	73° 9' 49395" W
Pesquera Bahía de Coronel S.A	Pesca	37° 1' 41843" S	73° 9' 3916" W
Planta Industria Isla Quihua Lota	Pesca	37° 5' 49103" S	73° 9' 27516" W
Pesquera Fiordo Austral S.A	Pesca	36° 57' 11351" S	73° 9' 51049" W
Complejo Celco Planta Arauo	Forestal	37° 11' 41725" S	73° 14' 25781" W
Planta Gran Concepción-ESSBIO	Aguas Servidas	36° 48' 22903" S	73° 6' 2382" W
Aguas San Pedro	Aguas Servidas	36° 54' 11676" S	73° 11' 23154" W
Coronel Norte	Aguas Servidas	37° 2' 3097" S	73° 11' 11978" W
Coronel Sur	Aguas Servidas	37° 2' 23509" S	73° 11' 1218" W
Planta Lota ESSBIO	Aguas Servidas	37° 5' 44937" S	73° 11' 564" W
Planta Arauco ESSBIO	Aguas Servidas	37° 12' 22356" S	73° 13' 276" W
Pesquera Lota Protein	Pesca	37° 6' 4279" S	73° 9' 45742" W
CT Santa María	Producción de Energía	37° 2' 28083" S	73° 7' 5139" W
Planta Camanchaca-Coronel	Pesca	37° 1' 3603" S	73° 9' 20038" W
PLANTA BLUMAR-EX ITATA CORONEL	Pesca	37° 1' 30642" S	73° 9' 742" W
Río Biobío	Fluvial	36 49' 6693" S	73° 9' 31086" W
Río Laraquete	Fluvial	37° 9' 48905" S	73° 11' 22553" W

Río Carampangue	Fluvial	37° 13' 56655" S	73° 17' 46637" W
Río Tubúl-Raqui	Fluvial	37° 14' 4625" S	73° 26' 16235" W

Tabla suplementaria 2. Inventario de las unidades fiscalizables consultadas para la estimación de aportes de nutrientes terrestres, tanto de origen natural como antropogénicos en el golfo de Arauco. Coordenadas Geográficas, Chile (GMS). Unidades Fiscalizables (SNIFA).

Unidad Fiscalizable	Actividad	Caudal m ³ d ⁻¹	Obtención de Datos	RCA Asociada	NTK mg/l	NTK (kg d ⁻¹)	Fosfato mg/l	Fosfato (kg d ⁻¹)	NID (mg/l)	NID (kg d ⁻¹)	Relación N/P Descarga
Matadero Agrolomas	Agroindustria	600	https://seia.sea.gob.cl/documentos/docum		7,75	5	22	13	86	52	4
EWOS Chile Alimentos Ltada	Pesca	68	Modificación y mejoramiento del proyecto construcción de una c https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSE		79	5	6,7	0	40	3	6
Pesquera Grimar	Pesca	2544	Instalación y Puesta en Marcha de Nueva Línea de Producción, https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSE		62,5	159	2,5	6	N.D	N.D	N.D
Planta Rico Foods S.A	Pesca	1440	Descarga conjunta de residuos industriales líquidos descargac https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedie		32	46	1,7	2	10	15	6
CT Bocamina	Producción de Energía	1082304	Planta de tratamiento de agua de mar de la empresa Rico Food http://datosretc.mma.gob.cl/dataset/emisio		0,57	617	0,005	5	N.D	N.D	N.D
Pesquera FOOD-CORP Coronel	Pesca	19200	Ampliación Central Termoeléctrica Bocamina (Segunda Unidad) https://snifa.sma.gob.cl/UnidadFiscalizabl		46	883	3	58	N.D	N.D	N.D
ORIZON S.A	Pesca	72000	Modificación descarga de RIL limpio de Planta Congelados Des https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedie		64	4608	3,61	260	N.D	N.D	N.D
Pesquera Bahía de Coronel S.A	Pesca	7176	Regularización ambiental reconstrucción de proyecto consolida https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSE		17,46	125	3,11	22	N.D	N.D	N.D
Planta Industria Isla Quihua Lota	Pesca	48000	Sistema de disposición final de residuos industriales líquidos https://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fic		135	6480	0,7	34	N.D	N.D	N.D
Pesquera Fiordo Austral S.A	Pesca	14664	Regulación ambiental reconstrucción industria IslaQuihua S.A https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSE		6,91	101	1,73	25	53	772	30
Complejo Celco Planta Arauco	Forestal	170000	Planta de tratamineto de riles chrome-extension://efaidnbmnnpbpcjpcg		35	5950	0,2	34	24	3995	118
Planta Gran Concepción-Essbio	Aguas Servidas	93065	Estudio de impacto ambiental proyecto Modernización Ampliaci Ley de Transparencia. Respuesta Folio: A		9,58	892	2,78	259	N.D	N.D	N.D
Aguas San Pedro-Essbio	Aguas Servidas	20899	AM011T0002736-11/09 Ley de Transparencia. Respuesta Folio: A		15,89	332	4,38	92	19	393	4
Coronel Norte-Essbio	Aguas Servidas	12655	AM011T0002736-11/09 Ley de Transparencia. Respuesta Folio: A		17,93	227	5,54	70	16	208	3
Coronel Sur - Essbio	Aguas Servidas	13807	AM011T0002736-11/09 Ley de Transparencia. Respuesta Folio: A		9,31	129	2,3	32	57	792	25
Planta Lota-Essbio	Aguas Servidas	8778	AM011T0002736-11/09 Ley de Transparencia. Respuesta Folio: A		1,68	15	0,6	5	76	664	126
Planta Arauco-Essbio	Aguas Servidas	3659	AM011T0002736-11/09 Ley de Transparencia. Respuesta Folio: A		2,84	10	1,05	4	N.D	N.D	N.D
Pesquera Lota Protein	Pesca	13050	AM011T0002736-11/09 Ley de Transparencia. Respuesta Folio: A https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSE		8,4	110	1,32	17	78	1018	59
CT Santa María	Producción de Energía	1080000	Califica Ambientalmente favorable el proyecto Sistema de Trata https://snifa.sma.gob.cl/Fiscalizacion/Fich		0,074	80	0,002	2	N.D	N.D	N.D
Planta Camanchaca-Coronel	Pesca	8016	Informe de fiscalización ambiental CT Santa María dfz-2015-19 https://seia.sea.gob.cl/documentos/docum		17,8	143	3,88	31	46	369	12
Planta BLUMAR-ex Itata Coronel	Pesca	19200	Declaración de Impacto Ambiental Planta Elaboradora de Harin https://seia.sea.gob.cl/documentos/docum		16,8	323	0,01	0	N.D	N.D	N.D
			Sistema de Tratamiento y Disposición de los Residuos Industria								

Tabla suplementaria 3. Inventario de los 21 efluentes industriales utilizado en las estimaciones de los aportes de PID, NID y NTK en el golfo de Arauco. La tabla describe los caudales de los ríos (m³ d⁻¹), concentraciones de NTK (mg l⁻¹), NID

(mg l⁻¹), PID (mg l⁻¹), fuente de obtención de los datos, RCA asociada a cada Unidad Fiscalizable y relación N/P en el efluente. Los valores de color rojo representan datos teóricos obtenidos en las RCA; valores de color negro corresponden a mediciones reales obtenidas en los PVA y los valores de color azul son estimados empíricos obtenidos a partir del factor de dilución.

Figura suplementaria 1. Gráficos de caja o “boxplots” para las tasas de emisión de nitrógeno inorgánico disuelto (NID, kg d⁻¹) de los ríos Carampangue y Laraquete. La mediana se representa a través de la línea horizontal localizada dentro de cada caja.

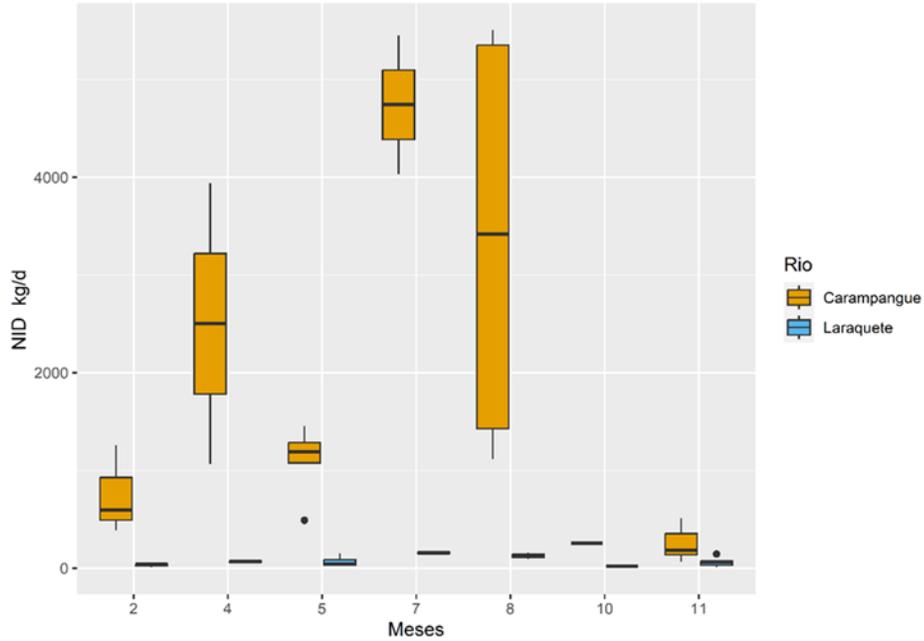
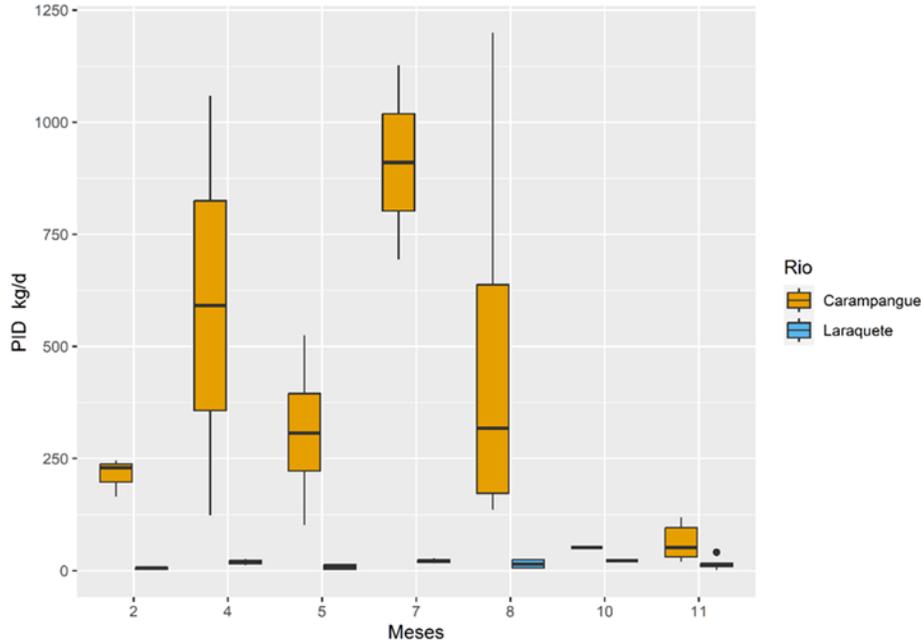


Figura suplementaria 2. Gráficos de caja o “boxplots” para las tasas de emisión de fósforo inorgánico disuelto (PID, kg d^{-1}) de los ríos Carampangue y Laraquete. La mediana se representa a través de la línea horizontal localizada dentro de cada caja.



5.2 Capítulo: 2 Balance de nutrientes y metabolismo neto del ecosistema golfo de Arauco en Chile-central mediante la modelación biogeoquímica LOICZ

5.2.1 RESUMEN

Se estimó el balance de nitrógeno inorgánico disuelto, fósforo inorgánico disuelto y el metabolismo neto del ecosistema golfo de Arauco (37°10'S - 36°45'S), ubicado en la zona centro sur de Chile. Se realizó un análisis estacional e interanual de flujos de agua, sal y nutrientes para el período comprendido entre los años 2015-2019, mediante el modelo biogeoquímico Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ) del programa Future Earth, utilizando un diseño de una caja y doble capa.

Los resultados indicaron que el sistema recibe flujos de agua, sal y nutrientes desde el océano adyacente hacia la capa profunda durante todo el año, con máximas entradas de nutrientes durante la primavera y el verano mientras que, los suministros de origen continental, tanto de origen fluvial como antropogénicos hacia la capa superficial son mayores durante el invierno y primavera. Desde el punto de vista interanual, los flujos de nutrientes desde el océano abierto disminuyeron durante los episodios cálidos (El Niño) reportados durante los años 2015 y 2019, mientras que durante los episodios fríos (La Niña) o neutros no se evidenciaron diferencias significativas.

Los tiempos de residencia del sistema se estimaron en 20 días para la primavera, 35 en verano, 64 en otoño y 40 en invierno. Además, se obtuvieron flujos negativos de Δ PID y Δ NID en la capa superficial y positivos en la capa profunda, indicando producción de materia orgánica suficiente como para ser exportada al océano abierto o ser enterrada en el sedimento

marino.

El ecosistema del golfo de Arauco funciona como un sumidero de carbono con predominio de la fijación de nitrógeno y un estado autótrofo en la capa superficial. La capa profunda, no obstante, mostró heterotrofia en las estaciones de primavera de 2015 y 2017, verano de 2017 y 2019 y otoño de 2017.

5.2.3 ABSTRACT

The balance of dissolved inorganic nitrogen, dissolved inorganic phosphorus and net metabolism of the Gulf of Arauco ecosystem (37°10'S - 36°45'S), located in south-central Chile, was estimated. A seasonal and interannual analysis of water, salt and nutrient fluxes was carried out for the period 2015-2019, using the Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ) biogeochemical model of the Future Earth software, using a single-box, double-layer design.

The results indicated that the system receives fluxes of water, salt and nutrients from the adjacent ocean to the deep layer throughout the year, with maximum nutrient inputs during spring and summer. Continental, fluvial and anthropogenic inputs to the surface layer are highest during winter and spring. Interannually, nutrient fluxes from the open ocean decreased during the warm (El Niño) events reported during 2015 and 2019, while no significant differences were evident during cold (La Niña) or neutral events.

Residence times of the system were estimated to be 20 days in spring, 35 in summer, 64 in autumn and 40 in winter. In addition, negative fluxes of Δ PID and Δ NID were obtained in the surface layer and positive fluxes in the deep layer, indicating production of organic matter sufficient to be exported to the open ocean

or buried in the marine sediment.

The ecosystem of the Gulf of Arauco functions as a carbon sink with a predominance of nitrogen fixation and an autotrophic state in the surface layer. The deep layer, however, showed heterotrophy in the spring 2015 and 2017, summer 2017 and 2019 and autumn 2017 seasons.

Keywords: Biogeochemistry, nutrient fluxes, net ecosystem metabolism, eutrophication.

5.2.4 INTRODUCCIÓN

La dinámica y variabilidad atmosférica, hidrográfica y oceanográfica del ecosistema costero de la zona centro-sur de Chile es modulada por múltiples forzantes que acontecen en la zona a diferentes escalas espaciales y temporales (Fonseca & Farías 1987; Sobarzo 1999; Parada et al. 2001; Valle-Levinson et al. 2003, Vergara et al. 2016; Gómez et al. 2018; Costa et al. 2019), las cuales interactúan con la batimetría de la zona costera (Figuroa & Moffat 2000; Mesias et al. 2003 y Sobarzo et al. 2016) y con importantes aportes fluviales (Sobarzo et al. 2007; Saldías et al. 2019).

El golfo de Arauco forma parte de un conjunto de bahías situadas en la zona de surgencia costera centro-sur de Chile, con una orientación hacia el norte con respecto a la línea de costa (Fig. 1). El golfo alberga una importante actividad antropogénica (EULA 1994) caracterizada por el desarrollo de diversas actividades urbanas y económicas, entre las que se destacan industrias como la pesca y acuicultura, energía, transporte, forestal, producción de celulosa y

minería, lo que se traduce en una fuerte presión antropogénica, la cual impacta directa e indirectamente en el medio acuático bajo su área de influencia, tanto continental como marina (Cartes 2018).

A escala estacional, la dinámica atmosférica e hidrográfica al interior del golfo de Arauco, sigue los patrones descritos para la costa de Chile central, forzada por el desplazamiento estacional del anticiclón del Pacífico Sur (Rahn & Garreaud 2013). El movimiento meridional del anticiclón (Ancapichún & Garcés-Vargas 2015), se traduce en vientos del sur y sur-oeste, favorables a un marcado transporte de Ekman superficial costa afuera, predominantemente durante las estaciones de primavera y verano austral (Bakun & Nelson 1991; Sobarzo et al. 2007).

En primavera-verano, el desplazamiento de agua superficial costa afuera genera el afloramiento o surgencia de Agua Ecuatorial Subsuperficial (AEES) más fría y salada, rica en nutrientes y con bajo contenido de oxígeno disuelto (Quiñones et al. 2010; Schneider et al. 2017), lo cual es considerado como la principal fuente de nutrientes hacia las aguas superficiales costeras de Chile (Thiel et al. 2007; Montecino & Lange, 2009; Quiñones et al. 2010). Por el contrario, durante el invierno, el centro del anticiclón se ubica más al norte provocando una predominancia de los vientos del norte que inducen el hundimiento de agua costera (Ancapichún & Garcés-Vargas, 2015; Schneider et al. 2017). Esta condición permite que el Agua Superficial Subantártica (SASW), menos salina, más oxigenada y con menos contenido de nutrientes ocupe el golfo.

El debilitamiento de la presencia del anticiclón del Pacífico en esta zona, permite la entrada de sistemas frontales y ciclones extratropicales que propician un sustancial aumento de las precipitaciones durante el otoño tardío e invierno austral (Rutllant 1972). Esto se traduce en una mayor descarga fluvial durante

las estaciones de otoño-invierno, principalmente proveniente desde el río Biobío, el principal cuerpo receptor de aguas domésticas e industriales de la cuenca hidrográfica del río Biobío (Farías 2002; Ortega 2018), el cual modifica los patrones de circulación y estratificación de la columna de agua (Parada et al. 2001; Valle-Levinson et al. 2003; Vergara et al. 2016; Saldías et al. 2019), aportando importantes cantidades de nutrientes hacia el interior del golfo de Arauco (Leniz et al. 2012; Yévenes et al. 2015).

Este marcado patrón estacional en las condiciones atmosféricas, hidrográficas y oceanográficas descritas para el golfo de Arauco, puede ser modificado por las variaciones interanuales generadas por el establecimiento de fases cálidas (El Niño) y frías (La Niña) de El Niño Oscilación del Sur (ENOS). Durante la ocurrencia de eventos ENOS, el estrés de viento a lo largo de la costa y el transporte de Ekman persisten o incluso se intensifican, generando afloramiento costero de aguas cálidas y agotadas en nutrientes por sobre una termoclina más profunda, como resultado de la propagación de ondas ecuatoriales Kelvin hacia el polo, lo cual puede interrumpir o debilitar episódicamente los flujos e intercambios de nutrientes, modulados por la surgencia costera, hacia las aguas costeras superficiales (Barber & Chavez, 1983; Escribano et al. 2004).

Resultados de modelos climáticos y datos observacionales han evidenciado una disminución en la temperatura superficial del mar frente al centro-sur de Chile (Shaffer et al. 1999), relacionado a una intensificación tipo La Niña del Anticiclón del Pacífico Sur, lo cual ha incrementado el gradiente de presión a lo largo de la costa, aumentando así la frecuencia e intensidad de la surgencia costera frente a Chile central (Falvey & Garreaud 2009).

Estudios recientes han encontrado asociaciones significativas entre variaciones climáticas interanuales y/o interdecadales del sistema océano-atmósfera y los

flujos e intercambios de nutrientes en diferentes ecosistemas (Kaushal et al. 2008; Pizarro et al. 2010; Vegas-Vilarrúbia et al. 2012; Yévenes et al. 2015), evidenciando así, el impacto de estas perturbaciones climáticas sobre los flujos y los presupuestos de nutrientes, además de su rol modulador sobre las fuentes y los sumideros involucrados en la dinámica de estos microelementos.

Los nutrientes son elementos traza, claves para la producción primaria y los servicios ecosistémicos de los océanos por los que su estudio es importante para la estimación de presupuestos y balances ecosistémicos (Broecker 1974), así como para monitoreos de procesos de eutrofización (Jessen et al. 2015) y procesos biogeoquímicos (Falkowski et al. 1998).

Durante los últimos años se han realizado más de 200 presupuestos de nutrientes y estimaciones de metabolismo neto del ecosistema alrededor del mundo, siguiendo el enfoque de modelación biogeoquímica del proyecto Interacciones Tierra-Océano en la Zona Costera (LOICZ, Gordon et al. 1996), abarcando zonas costeras (Delgadillo et al. 2008; Padedda et al. 2010); estuarios (Marone et al. 2005; Boonphakdee & Fujiwara 2008) y golfos y bahías (Camacho-Ibar et al. 2003; Smith & Hollibaugh, 2006; Yuk & Aoki 2011). En Chile, esta aproximación metodológica ha sido aplicada principalmente en fiordos y canales patagónicos (Guzmán 2000, 2004; Silva et al. 2000; Pantoja et al. 2010; Salcedo et al. 2020), aunque también a la totalidad del sistema de la corriente de Humboldt (Quiñones et al. 2010)

En el presente estudio se estimaron balances de agua, sal, flujos de nutrientes (nitrógeno y fósforo inorgánico disuelto) y metabolismo neto del ecosistema en el golfo de Arauco (37°10'S - 36°45'S), para el periodo que cubre los años 2015-2019, siguiendo el enfoque de la modelación biogeoquímica (LOICZ).

Los objetivos de este trabajo fueron: i) Cuantificar a escala estacional e interanual los flujos, intercambios y presupuestos de nitrógeno y fósforo inorgánico disuelto y carbono en el golfo de Arauco y ii) describir y determinar variaciones estacionales e interanuales de estos intercambios y su relación con los principales forzantes físicos y biogeoquímicos que modulan la dinámica hidrográfica y oceanográfica del golfo a diferentes escalas temporales (surgencia costera y ENSO).

5.2.5 METODOLOGÍA

Modelo LOICZ

Se construyó el modelo siguiendo las tres etapas descritas en Gordon et al. (1996) “*Future Earth Coasts*” disponible en (<https://www.futureearthcoasts.org/>; anteriormente LOICZ), y consisten en: balance de agua $\frac{dV}{dt}$ (Ec. 1.1), balance de sal $\frac{dVS}{dt}$ (Ec. 1.2) y balance de materiales no conservativos $\frac{dVY}{dt}$ (Ec. 1.3). (Fig. 2).

$$\frac{dV}{dt} = V_Q + V_P + V_G + V_0 - V_E + V_R \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

$$\frac{dVS}{dt} = V_P S_P - V_E S_E + V_R S_R + V_x (S_{OCN} - S_{sis}) \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

$$\frac{dVY}{dt} = V_R Y_R + V_x (Y_{OCN} - Y_{sis}) + \Delta Y \quad (\text{Ecuación 1.3.})$$

donde:

VS es el flujo de sal, (**VY**) es el presupuesto de materiales no conservativos (nitrógeno y fósforo disuelto) y (**V**) denota flujos de agua dado en $10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$.

V_Q denota el flujo de agua dulce (flujos desde ríos), **V_P** es la precipitación, **V_G** son los flujos de aguas subterráneas (en nuestro caso se asumió cero), **V₀** son los flujos de agua suministrados por los efluentes de las industrias ubicadas en el borde costero del golfo de Arauco), **V_E** es la pérdida de agua por evaporación diaria, estimada mediante el nomograma de (Penman 1948) y **V_R** es el flujo residual que contiene el volumen en el sistema.

S_{ocn} y **S_{sis}** son las salinidades del océano y del sistema, respectivamente. **S_P**, **S_E**

y S_R es el promedio de salinidad que se debe a la precipitación, evaporación y flujo residual entre dos fronteras, por ejemplo: entre el océano abierto y el sistema (S) viene dado en $10^3 \text{ psu m}^3\text{d}^{-1}$.

ΔY es el flujo de material no conservativo (nitrógeno inorgánico, fósforo inorgánico disuelto). Y_R es el valor promedio del material no conservativo entre dos fronteras. Y_{ocn} e Y_{sis} , son los valores promedio del material no conservativo del océano y sistema. Y viene dado en mol d^{-1} . En ambos casos se utilizó el promedio de las mediciones efectuadas en las diferentes estaciones del año.

Balance de Agua

La ecuación 1.4 describe la conservación del volumen de agua. En nuestro caso el balance de agua fue estimado a partir del flujo residual V_R de agua por la ecuación:

$$V_R = V_{entra} - V_{sale} = -(V_P - V_E) \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

donde V_P y V_E son los flujos de las precipitaciones y de evaporación y V son los flujos de agua que entran y salen del golfo de Arauco ($V_{entra} - V_{sale}$). En este sentido se asume que el volumen de agua en el sistema golfo de Arauco se conserva en el tiempo (estado estacionario).

Balance de Sal

La mezcla de agua proveniente desde diferentes compartimientos genera a la vez una mezcla de sal y otros materiales, por tanto, al realizar el balance de sal se multiplica el volumen de agua por las salinidades de cada tipo de agua (Gordon et al.1996). La ecuación 1.5 describe la sal que es adicionada o removida del sistema por circulación del agua:

$$V_X = \frac{V_R S_R}{(S_{sis} - S_{ocn})} \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

S_R es la salinidad asociada al flujo residual y representa el promedio entre la salinidad (S_{sis}) y la salinidad del mar adyacente (S_{ocn}). El tiempo de intercambio total de agua dado en días (τ) fue estimado por la razón:

$$\tau = \frac{V_{sis}}{(V_x + |V_R|)} \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

donde V_{sis} , es el volumen de agua del golfo de Arauco.

Balance de Nutrientes (materiales no conservativos)

La cantidad de nutrientes que entra o sale del sistema se calculó a partir de la multiplicación de la concentración de nutrientes por el respectivo volumen de agua que, de igual forma, entra o sale del sistema. La ecuación 1.7 describe el balance de masa de cualquier material no conservativo (Y). En nuestro caso, el nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y el fósforo inorgánico disuelto (PID) que se intercambian entre el mar adyacente y el sistema golfo de Arauco sobre la base de los criterios establecidos en el balance de agua y sal (Gordon et al. 1996).

$$\Delta DIP = -V_R Y_R - V_X (Y_{oce} - Y_{sist}) \quad (\text{Ecuación 1.7})$$

donde, Y_{ocn} y Y_{sis} representan las concentraciones del fósforo y/o nitrógeno inorgánico disuelto en el mar adyacente y en el sistema, Y_R es la concentración asociada al flujo residual (promedio entre el Y_{sis} y Y_{ocn}).

Metabolismo neto del ecosistema ($p-r$)

La producción primaria menos la respiración ($p-r$), a veces también designado como el metabolismo neto del ecosistema (NEM) (Gordon et al. 1996), se estimó a partir de la ecuación 1.8

$$(p - r) = -\Delta DIP (C/P)_{PARTE} \quad (\text{Ecuación 1.8})$$

Donde p representa la producción primaria de la materia orgánica (MO), r la respiración comunitaria y $(C:P)$ es la razón estequiométrica de (Redfield 1934). La suposición detrás de este cálculo es que la producción neta del sistema o la oxidación de la materia orgánica es la principal vía de absorción no conservadora para el ΔPID dentro del sistema (Gordon et al. 1996). El metabolismo neto del ecosistema se consideró autotrófico o heterotrófico si $(p-r)$ resulta ser mayor o menor que cero, respectivamente. El metabolismo neto del ecosistema viene dado en $10^3 \text{ mol C d}^{-1}$.

Fijación de nitrógeno vs Desnitrificación

Con el valor obtenido para el ΔNID a través del modelo, menos el esperado por producción y descomposición de la materia orgánica, se estimó si el sistema fija nitrógeno o lo pierde por desnitrificación. Si el sistema fija nitrógeno o predomina la desnitrificación, se determinó con $(Nfix-denit)$ mayor o menor a cero, respectivamente. Las unidades son dadas en mol d^{-1} . Ecuación 1.8

$$(Nfix - denit) = \Delta DIN_{obs} - \Delta DIP(N/P)_{PARTE} \quad (\text{Ecuación 1.8})$$

Análisis estadístico y obtención de datos

Los datos de las concentraciones de nutrientes y caudales de los ríos Biobío, Laraquete, Carampangue y Tubúl-Raqui se obtuvieron de la Dirección General de Aguas (DGA), disponible en línea en: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes> para cada estación del año y durante el período que cubre los años 2015-2019 mientras que, los parámetros de las industrias de la recopilación bibliográfica de los expedientes de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) de industrias que tributan flujos de riles y aguas servidas directamente a las aguas del golfo mediante efluentes, programa de fiscalización ambiental del Ministerio de Medio Ambiente (SINFA), Informes de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SSIS) y monitoreos propios de las industrias. El resto de los parámetros estimados para la alimentación del modelo se muestran en la Tabla 1.

Por otra parte, los datos de salinidad y concentración de nutrientes del sistema golfo de Arauco fueron obtenidos de los informes de monitoreos derivados del proyecto Modernización y Ampliación de la Planta Arauco (MAPA), disponibles al público en la página del SINFA, <https://snifa.sma.gob.cl/UnidadFiscalizable/Ficha/2734> mientras que, los parámetros del océano adyacente fueron facilitados por el programa de monitoreo de la zona de Llico llevado a cabo por el Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuícola (INCAR) durante los años 2015-2019.

Se subdividieron los datos de alimentación del modelo en tres reservorios y separados por estaciones del año, según las pautas escritas por (Gordon et al. 1996): reservorio de tierra, reservorio del sistema y reservorio externo al sistema o del océano adyacente, completado así los intercambios, entradas y salidas de los respectivos flujos de nutrientes, agua y sal por estación del año. Se empleó

el estadístico de correlación de Spearman con un 95% de confianza y N=42 para medir la relación entre los flujos de nutrientes fluviales y los caudales de los ríos (m³/día) durante el período de estudio (2015-2019) (Fig.3).

Posteriormente se calculó la sensibilidad relativa o proporcional (Swaney & Hong 2009), efectuándose cambios en los parámetros de entrada del modelo, es decir, disminuyendo y aumentando un 10% su valor original (o base), asignándose de esta manera 3 valores a cada parámetro: (i) valor mínimo, (ii) valor máximo y (iii) mejor estimación. Con este enfoque se ejecutaron $2p + 1$ realizaciones o simulaciones (donde p es el número de parámetros evaluados) considerando el valor mínimo y el valor máximo de cada parámetro, más la simulación en que todos los parámetros adoptan su valor base (original) (Swaney & Hong 2009). Para evaluar los cambios S en la variable de salida, se utilizó la siguiente ecuación:

$$S(y|x, x_b, y_b) = \frac{\frac{(y - y_b)}{y_b}}{\frac{(x - x_b)}{x_b}} = \frac{(y - y_b)x_b}{(x - x_b)y_b} \quad \text{(Ecuación 1.9)}$$

Donde (y) es la variable perturbada de salida, (x) es la variable de entrada y (S) son los cambios expresados como porcentajes. El sub-índice b representa la variable de entrada x o salida y y evaluada en su valor de referencia o base. Por ejemplo, si un 10% de incremento en el parámetro x produce un cambio de un 10% en el parámetro y relativo a su nivel base o de referencia, entonces $S=1$. De esta forma, respuestas en y menores y mayores que un 10%, generaran valores S menores y mayores que 1, respectivamente.

Finalmente se estimó el grado de incertidumbre de las variables de entrada (V_o , V_p , V_q y V_{oce}) lo cual permitió calcular los errores asociados al modelo LOICZ (Swaney & Giordani 2007). Para ello, se utilizó un proceso estocástico numérico

de simulación de Monte Carlo (Manly 2001), el cual implica la generación repetida de muestras dentro de las funciones de densidad de probabilidad, mediante la utilización de algoritmos que generan valores aleatorios (*Randomization*) (Kendall & Buckland 1982). El cálculo del error del modelo LOICZ mediante la simulación Monte Carlo se llevó a cabo considerando las etapas descritas por Manly (1997). Finalmente se obtuvo el grado de incertidumbre (en porcentaje) del modelo usando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de incertidumbre} = \frac{\frac{1}{2} \times (\text{Amplitud del intervalo de confianza})}{\text{Estimaciones}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1.10})$$

Escala espacial y temporal utilizadas en el modelo LOICZ

Una de las consideraciones más importantes al elegir un sistema para presupuestar es la escala espacial y los límites con los que se van a realizar los balances de sal, agua y materiales no conservativos (Gordon et al. 1996). En este sentido y, siguiendo las directrices metodológicas del modelo, se consideró el golfo de Arauco como un sistema semicerrado de una sola caja y dos capas. La profundidad de la capa superficial se consideró de 0-15 m y la capa profunda de 16-30 m.

Consideramos, además, el golfo como un único sistema donde el equilibrio de sal se mantiene mediante un flujo de intercambio (V_z) entre capas, bien mezclado que recibe entradas de agua producto de la escorrentía fluvial de los ríos y la precipitación. En tanto, las salidas se deben a pérdidas netas de flujos de agua por concepto de evaporación, así como por el intercambio que se produce entre el sistema y el océano adyacente (flujo superficial). También presenta reacciones biogeoquímicas internas y estas son

compartidas hacia y desde el océano a través de la boca Chica y boca Grande sectores de un ancho aproximado de 8 km y 36 km respectivamente.

Desde el punto de vista temporal, se realizaron balances de agua, sal y nutrientes para el período que cubre los años 2015-2019, y en diferentes estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno). Dicha consideración se tomó en cuenta con el objetivo de cuantificar a escala estacional e interanual los flujos, intercambios y presupuestos de nitrógeno y fósforo inorgánico disuelto en el golfo de Arauco, así como, para determinar las variaciones estacionales e interanuales de estos intercambios y su relación con los principales forzantes físicos y biogeoquímicos que modulan la dinámica hidrográfica y oceanográfica del golfo (surgencia costera y ENSO).

Los episodios fríos y cálidos mensuales del Índice Oceánico del Niño (ONI), se obtuvieron de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y se graficaron en una serie de tiempo con el objetivo de identificar y conocer las condiciones existentes durante los presupuestos interanuales de nutrientes en el golfo de Arauco. En tal sentido, los años 2015 y 2019 estuvieron bajo la influencia de una fase cálida (El Niño) y, durante el 2016, 2017 y 2018 fluctuaron entre condiciones neutras y frías (La Niña) (Fig. 4).

5.2.6 RESULTADOS

Balance de agua y sal

La entrada diaria de agua dulce estimada (V_Q) derivada de las escorrentías de los ríos Biobío, Laraquete, Carampangue y Tubúl-Raqui fue en promedio de $51,75 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1} \pm 33,23$, con de $66 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ durante la primavera, $26 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ en verano, $23 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ en otoño y $92 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ en el invierno. Los volúmenes de agua caídos por concepto de precipitación (V_P) alcanzaron un promedio de $2,13 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1} \pm 1,45$; siendo los máximos durante los meses de invierno con $4,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$. En cambio, como se esperaba, las precipitaciones mínimas se reportan durante los meses de primavera-verano con $1,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ y $0,21 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$, respectivamente.

Los cálculos obtenidos en la estimación de la evaporación, mediante el nomograma de (Penman 1948) mostraron que las pérdidas de volúmenes desde la superficie libre de agua en el golfo de Arauco se cuantificaron en $-4,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ durante la primavera y verano. Sin embargo, durante el otoño e invierno, la evaporación fue de $-4,52 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ y $-0,75 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$, respectivamente. Los volúmenes de entrada de otras fuentes (V_O) que recargan el sistema se cuantificaron en $16,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1} \pm 0,57$.

Las salidas del modelo revelaron que para compensar las entradas netas de agua y equilibrar el sistema, la recarga de agua desde el océano hacia la capa profunda (V_d) ocupa el sistema durante todo el año, es decir, el golfo de Arauco recibe un flujo profundo y, evidentemente, resulta en una salida de flujo superficial. Los flujos profundos durante los meses de primavera-

verano mostraron ser de una magnitud mayor respecto a los meses que comprenden el otoño e invierno. El modelo arrojó flujos de $2402 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \pm 1511$ en primavera y $1170 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \pm 606,26$ durante el verano en tanto, se estimaron flujos de $599 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \pm 295$ en otoño y $807,66 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \pm 342,24$ durante el invierno. Los tiempos promedios de residencia (t) estimados fueron en primavera de 20 días; verano 35 días, otoño 64 días e invierno 40 días.

La distribución temporal de la salinidad presentó valores entre 29 y 33,5 psu cerca de la superficie; mientras que, la capa profundidad mostró salinidades entre 33,01 y 34,69 psu (Fig.5). El cambio de la salinidad con la profundidad varía temporalmente, presentándose una haloclina que osciló entre los 10 y 20 metros de profundidad (Fig. 5). Los resultados indicaron que el sistema recibe pulsos salinos en la capa profunda desde el mar abierto, resultando ser más elevados durante los meses de primavera-verano con flujos promedios de $84143 \cdot 10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1} \pm 52815$ y $40956 \cdot 10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1} \pm 21351$, respectivamente mientras que, son menores en el otoño-invierno con flujos promedios de $20837 \cdot 10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1} \pm 10254$ y $28076 \cdot 10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1} \pm 12093$ respectivamente.

Balance de materiales no conservativos

Los suministros de nutrientes terrestre (NID+PID), tanto de origen natural como antropogénico, presentaron sus mayores aportes durante las estaciones de invierno y primavera con 106 mol d^{-1} y 83 mol d^{-1} , mientras que; durante el otoño y verano se cuantificaron 39 mol d^{-1} y 36 mol d^{-1} respectivamente. En tal sentido se encontró una correlación positiva entre los flujos de nutrientes diarios y los gastos de agua (caudales) con un valor de $r= 0,74$ y $p=0,00$ para el DIN y $r=0.85$ y $p=0,00$ para el caso del PID.

Como es de esperar en zonas con un fuerte transporte de Ekman costa afuera, el balance de materiales no conservativos mostró suministros de nutrientes desde el océano adyacente hacia la capa profunda del golfo durante el predominio de vientos favorables a surgencia costera. Sin embargo, los resultados mostraron que durante los meses de primavera desde 2015 al 2019 el golfo recibió flujos de $33851 \text{ mol d}^{-1} \pm 31100$ de NID y $6541 \text{ mol d}^{-1} \pm 6095$ de PID; $11645 \text{ mol d}^{-1} \pm 9980$ de NID y $3369 \text{ mol d}^{-1} \pm 3873$ de PID en verano; $5817 \text{ mol d}^{-1} \pm 4238$ de DIN y $1254 \text{ mol d}^{-1} \pm 1036$ de PID en otoño y $10635 \text{ mol d}^{-1} \pm 6073$ de NID y $1413 \text{ mol d}^{-1} \pm 748$ de PID durante el invierno (Figs. 7, 8, 9, 10 y 11).

Por otra parte, el presupuesto mostró valores negativos de flujos de Δ PID y Δ NID en la capa superficial para todos los balances estacionales presupuestados desde el 2015 al 2019; con excepción de valores positivos de Δ PID en las estaciones de otoño de 2015 e invierno de 2016 (Fig.7). En el caso del Δ NID, solo se observó un valor positivo durante el otoño de 2015 (Fig.7).

A diferencia de la capa superficial, en la capa profunda los resultados del presupuesto mostraron predominio de valores positivos de Δ PID y Δ NID. Sin embargo, los valores negativos de Δ PID se detectaron en los presupuestos de otoño de 2015, verano y otoño de 2016, otoño de 2017, invierno y primavera de 2018 y otoño y primavera de 2019. Por su parte los valores negativos de Δ NID se observaron en los presupuestos de primavera de 2015; primavera, verano e invierno de 2018 y otoño de 2019. La proporción N:P en la columna superficial mostró ser menor durante la primavera-verano en contraposición del otoño-invierno (Figs. 7, 8, 9, 10 y 11).

5.2.7 Variaciones estacionales e interanuales de los flujos de nutrientes y su relación con los principales forzantes físicos que modulan la dinámica hidrográfica y oceanográfica del golfo a diferentes escalas temporales (surgencia costera y ENSO).

Nuestros resultados evidenciaron, que los flujos de nutrientes que se suministraron desde el océano abierto hacia la capa profunda del golfo durante los años estudiados presentaron un ciclo estacional, dichos flujos son mayores durante las estaciones de primavera-verano y menores durante el otoño e invierno. Dicha condición coincide con las fluctuaciones temporales del transporte de Ekman costa afuera y los procesos de surgencia costera que ocurren en la zona centro-sur de Chile.

Por otra parte, los resultados de los balances interanuales realizados en la modelación arrojaron un mínimo de suministros de nutrientes (NID+PID) desde el mar abierto hacia la capa profunda del golfo durante el episodio de El Niño fuerte ocurrido en el año 2015, con un flujo de 2864.4 mol d⁻¹ de NID y 454.3 mol d⁻¹ de PID mientras que el máximo ocurrió durante el año 2018 con 24874 mol d⁻¹ de NID y 6083.4 mol d⁻¹ de PID, año bajo condiciones de Niña débil (Fig.12). El resto de los años la modelación (2016,2017,2019) cuantificó flujos de 24408.4 mol d⁻¹ de NID y 3985 mol d⁻¹ de PID en el 2016; 6334.8 mol d⁻¹ de NID y 2169.3 mol d⁻¹ de PID en el 2017 y 22633.3 mol d⁻¹ de NID y 4006.4 mol d⁻¹ de PID en el 2019. El promedio interanual de flujos profundos de nutrientes desde océano hacia el sistema fue de 16223 mol d⁻¹ NID y 3339 mol d⁻¹ PID.

5.2.8 Derivaciones estequiométricas de flujos no conservativos

El modelo arrojó que gran parte de las estaciones del año modeladas presentan un estado autotrófico, produciendo (MO) y consumiendo carbono inorgánico disuelto. Sin embargo, la capa profunda mostró estado heterótrofo en las estaciones de primavera de 2015 y 2017, verano de 2017 y 2019 y otoño de 2017 (Tabla 2).

La segunda variable derivada en el modelo es la relación (*nfix-denit*). Los resultados obtenidos en este caso, mostraron valores positivos en buena parte de los presupuestos, implicando un predominio de N-fijación en el sistema. Por otra parte, el proceso de desnitrificación se observó en la capa profunda durante la primavera de 2015 y 2017, verano de 2017, 2018 y 2019 y otoño de 2017 (Tabla 2).

DISCUSIÓN

Con los resultados obtenidos mediante el balance de agua concluimos que los mayores flujos de agua de origen terrestre (V_q y V_o) hacia el golfo mostraron ser de una magnitud mayor durante los meses de invierno y primavera y menores en verano y otoño. Existen varios estudios que concuerdan con dicha conclusión. Entre estos, las descargas fluviales de origen terrestre observadas en los océanos Pacífico, Atlántico, Índico y el Mar Mediterráneo (Cloern et al. 1983; Sabater 2005; Gómez et al. 2006; Hickey et al. 2010). Además, esta conclusión es consistente ya que los ríos que descargan en el golfo de Arauco presentan un régimen hidrológico pluvio-nival, o sea, sus mayores caudales aumentan durante las lluvias (pluvial) y los deshielos (nival), siendo la cuenca del Biobío la de mayor esorrentía e importancia (DGA 2004).

Por otra parte, el balance de agua y sal mostró que en el sistema existe un flujo de salida que se produce en la capa superficial (V_{surf}), desplazando agua, sal y nutrientes hacia el océano adyacente, en tanto un flujo de agua oceánica (V_d) entra por la capa profunda y fluye hacia la capa superficial, siendo este último la combinación de V_r y V_a . Esto se traduce en que, el equilibrio de sal en el sistema se mantiene mediante un flujo de intercambio vertical, denominado V_z en el modelo, entre la capa profunda y la capa superficial. Estos resultados son consistentes con los estudios previos realizados, sobre la dinámica e hidrografía del golfo de Arauco (Fonseca & Farías 1987; Sobarzo 1994, 1999; Parada et al. 2001; Farías 2002; Valle-Levinson et al. 2003; Vergara et al. 2016; Gómez et al. 2018; Costa et al. 2019).

En tal sentido, un modelo conceptual sobre la circulación en el interior del golfo realizado por (Parada et al. 2001), indicaron que las entradas de agua en la capa profunda se deben a la intensificación del viento sur-oeste y los procesos de surgencia costera durante los meses de primavera y verano.

El balance de materiales no conservativo demostró que el sistema recibe nutrientes no solo desde el océano sino también, desde el continente. En tal sentido (Djurfeldt 1989; Dalba 1993; EULA 1993), postularon que las concentraciones, distribución espacial y los flujos de nutrientes hacia capas superficiales no responden exclusivamente a eventos de surgencia costera sino también a los aportes continentales. También concluyeron que las exportaciones de nutrientes continentales de origen natural y antropogénico desempeñaban un rol significativo en el mantenimiento y la alta producción biológica en el golfo de Arauco, fundamentalmente los suministros por parte del río Biobío.

Nuestros resultados, muestran evidencias concluyentes de las fluctuaciones estacionales e interanuales de los flujos de nutrientes desde el océano abierto hacia la capa profunda del golfo de Arauco. Estos flujos son modelados bajo dos escenarios o forzantes físicos. Por un lado, la estacionalidad de la surgencia costera y el afloramiento de Agua Ecuatorial Subsuperficial durante las estaciones de verano y primavera repercute directamente en las variaciones estacionales de los suministros oceánicos y, desde el punto de vista interanual inferimos forzantes de mayor escala como la Oscilación del Sur (ENSO) y las afectaciones derivadas de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la cual modifica las características del anticiclón del Pacífico, repercutiendo en la dinámica estacional oceanográfica de la cuenca del Pacífico sur oriental (Farías et al. 2021).

En este contexto, Escribano et al. (2014) concluyeron que el ecosistema de surgencia costera del Sistema de la Corriente de Humboldt frente a Chile exhibía una fuerte variabilidad interanual debido a los cambios en las condiciones oceanográficas relacionadas con el ENOS. Durante la fase cálida la introducción de agua desde el océano presenta bajo contenido de nutrientes, son aguas más cálidas y más oxigenadas, al tiempo que se observa una reducción de la productividad primaria como consecuencia de la disminución de afloramiento costero. Por su parte Maturana et al. (2004) postuló que durante la fase cálida del ciclo ENOS, el nivel del mar aumenta en las costas del Pacífico este y disminuye en el oeste, lo cual produce afloramiento de agua con bajo contenido en nutrientes mientras que, durante La Niña se produce una intensificación de la celda de Walker y el fortalecimiento de la surgencia frente a las costas de Ecuador, Perú y Chile.

Los valores negativos encontrados en el balance de Δ PID y Δ NID reflejan que en el golfo de Arauco probablemente sea más expedito el proceso de conversión hacia el material particulado que la remineralización. Además, surgiere de que la absorción neta de Δ PID por parte del fitoplancton predomina durante todo del año. Quiñones et al. (2010), también encontraron valores negativos de Δ NID y Δ PID en el Sistema de la Corriente de Humboldt y concluyeron que, una vez que los nutrientes ingresan a la capa de mezcla, son removidos por procesos no conservativos como la producción primaria, describiendo flujos negativos de Δ PID y Δ NID en las capas superficiales. En cuanto a los valores positivos de Δ PID y Δ NID obtenidos en la capa profunda (15-30 metros) asumimos que, el sistema dispone de fuentes internas de nutrientes y, probablemente sean el resultado de la oxidación de la materia orgánica, resuspensión de nutrientes desde el lecho marino y el aporte de nutrientes desde el mar abierto.

Con estos resultados podemos inferir que en la capa superficial (0-15 m) del sistema, coexisten la producción de materia orgánica y el consumo de carbono inorgánico disuelto en buena parte del año, quedando suficiente material disponible para ser transferido hacia el océano adyacente o sedimento. La capa profunda, en tanto, nutre y ventila la columna de agua mediante procesos físicos-químicos como la resuspensión y las entradas de flujos desde el mar abierto.

Las derivaciones estequiométricas de flujos no conservativos indicaron que el metabolismo neto del ecosistema durante el período de estudio, tanto en la capa superficial como profunda, fue autótrofo. Desde el punto de vista químico significa que los productores suministran el oxígeno necesario para la oxidación de la (MO) producida y, por tanto, mantienen el equilibrio del ecosistema. Modelaciones realizadas por Farías (2002) en el golfo de Arauco, Pantoja et al. (2010) en fiordos patagónicos, Montecinos (2015) en Bahía de Coliumo, y Salcedo et al. (2020) en el Seno Gallegos (Tierra del Fuego), mostraron también un estado autótrofo en la capa superficial de los sistemas estudiados.

Finalmente, con el supuesto de que los procesos metabólicos son impulsados principalmente por el fitoplancton (C: 106 N:16 P:1) en el golfo de Arauco, la relación (*nfix-denit*) es positiva en buena parte del año en la capa superficial, implicando predominio de N-fijación. La desnitrificación, por otra parte, predomina en menor escala y solo se observó en la capa profunda. Este resultado implica la absorción y transformación del nitrógeno molecular a través de la reducción enzimática en la capa superficial para luego ser incorporada en el sistema, mientras que, en la capa profunda ocurre la conversión microbiana en condiciones anaeróbicas al tiempo que se oxida la materia orgánica.

CONCLUSIONES

El sistema golfo de Arauco funciona como un sumidero de carbono y predomina un metabolismo autótrofo junto a la N-fijación durante todas las estaciones del año, tanto en la capa superficial como profunda. Sin embargo, se propone que el sistema es variable y no se puede definir un patrón temporal concluyente referente a los procesos biogeoquímicos que en él ocurren.

Durante los episodios cálidos del ENOS, el golfo de Arauco, al parecer, recibe menos suministros de nutrientes desde el mar abierto mientras que, durante los años con fase frías o neutras dicha condición se revierte y en consecuencia los flujos oceánicos de nutrientes se recuperan considerablemente. Esta descripción se ajusta solamente a las modelaciones realizadas bajo los efectos de esta investigación, es decir, el período comprendido entre los años 2015 y 2019. En tal sentido, no se observaron diferencias significativas entre los intercambios y flujos de materiales y nutrientes entre los años con eventos débiles de La Niña o neutros.

Los flujos de materiales conservativos y no conservativos (nutrientes) en el golfo de Arauco sufren importantes cambios temporales e interanuales. Inferimos que es resultado de: (i) las variaciones temporales de los suministros y flujos desde el continente, fundamentalmente los aportes desde los ríos y las fuentes antropogénicas, (ii) las variaciones estacionales de los suministros desde el océano adyacente durante el afloramiento costero y la intrusión profunda de agua más fría y rica en contenido de nutrientes y (iii) los procesos biogeoquímicos internos del sistema. A su vez, todos estos factores son modulados y modificados en mayor o menor

medida por variaciones interanuales generadas por los principales forzantes físicos y biogeoquímicos que determinan la dinámica hidrográfica y oceanográfica del golfo a diferentes escalas temporales tales como la surgencia costera y ENSO, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Programa de Estudios Ecosistémicos del Golfo de Arauco (PREGA) de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas de la Universidad de Concepción, el cual es financiado por Celulosa Arauco y Constitución S.A., y por el Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuícola (INCAR) (ANID, FONDAF 15110027 y 1522A0004).

REFERENCIAS

- Ancapichún, S., Garcés-Vargas, J. 2015. Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile. *Ciencias Marinas*, (41)1: 1-20
- Bakun, A., Nelson, S. 1991. The Seasonal Cycle of Wind-Stress Curl in Subtropical Eastern Boundary Current Regions. *Journal of Physical Oceanography*, (21) 12:1815-1834.
- Barber, R., Chavez, P. 1983. Biological Consequences of El Niño. *Science*, 222(4629), 1203–1210.
- Boonphakdee, T., Fujiwara, T. 2008. Temporal Variability of Nutrient Budgets in a Tropical River Estuary: The Bangpakong River Estuary, Thailand. *Environment Asia*, 1, 7-21.
- Broecker, W. S. 1974. A conservative water-mass tracer. *Earth Planet. Sci. Lett.* 23: 100-107.
- Camacho, V., Carriquiry, J., Smith, V. 2003. Non-conservative P and N Fluxes and Net Ecosystem Production in San Quintin Bay, México. *Estuaries*, 26 (5), 1220-1237.
- Cartes A. 2018. La Ciudad del Hollín. Desarrollo industrial y deterioro ambiental en la Cuenca del Carbón. *Historia* 396, 8(2), 27-53.
- Centro Universitario Internacional Europa-América Latina de Investigación y Formación de Ciencias Ambientales (EULA). 1993. Programa Gestión

de los recursos hídricos de la cuenca del río Biobio y del area marina costera adyacente, Oceanografía del golfo Arauco (1st edición).

Cloern, J., Alpine, A., Cole, B., Wong, R., Arthur, J., Ball, M. 1983. River Discharge controls phytoplankton dynamics in Northern San Francisco Bay. *Estuarine, Coast and Shelf Science* 16(4): 415-429

Costa, P., Silva, R., Figueirinhas, D., Lario, J. 2019. The Importance of Coastal Geomorphological Setting as a Controlling Factor on Microtextural Signatures of the 2010 Maule (Chile) Tsunami deposit. *Geologica Acta*, 17 (4), 1-10.

Dalba, N. 1993. Emisiones de carga global de nutrientes y metales traza del río Biobío al golfo de Arauco, Concepción, Chile. Tesina de Diploma, Escuela de Graduados Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 40p.

Delgadillo, J., Zirino, A., Holm, O., Hernández, M., Boyd, T., Chadwik, B., & Rivera, I. 2008. Dissolved Nutrient Balance and net Ecosystem Metabolism in a Mediterranean-Climate Coastal Lagoon: San Diego Bay. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 76, 594-607.

Djurfeldt, L. 1989. Circulation and Mixing in the Coastal Upwelling Embayment; Gulf of Arauco, Chile. *Continental Shelf Research*, 9 (11) 1003-1016.

Easdale, T. A., Sabaté, S., Grau, A. 2005. Don't camp beside the river: structure and dynamics of Andean alder (*Alnus acuminata*) forests affected by river floods, northwestern Argentina. *Revista chilena de historia natural*, 78(4): 711-722.

- Escribano, R., G. Daneri, L. Farías, V. A. Gallardo, H.E. González, D. Gutierrez, C. Lange, C. E. Morales, O. Pizarro, O. Ulloa & M. Braun. 2004. Biological and chemical consequences of the 1997–1998 El Niño in the Chilean coastal upwelling system: a synthesis. *Oceanography*, (41): 2389–2411.
- Falkowski, P. G., Barber, R. T., & Smetacek, V. (1998). Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *science*, 281(5374): 200-206.
- Falvey, M., Garreaud, M. 2009, Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979 –2006). *Journal Of Geophysical Research* 114, D04102, doi:10.1029/2008JD010519.
- Farías, L. 2002. The golf of Arauco (37°S) a Coastal Upwelling Embayment. In *Estuarine Systems of the Latin American Region (Regional workshop V) and Estuarine Systems of the Arctic region: Carbon, Nitrogen and phosphorus fluxes*. Netherlands : LOICZ Report and Studies ,46-52.
- Figueroa, D., Moffat, C. 2000. On the influence of topography in the induction of coastal upwelling along the Chilean Coast. *Geophysical Research Letters*, (27) 23, 3905-3908.
- Fonseca, T., Farías, M. 1987. Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción Remota. *Investigación Pesquera (Chile)*, 34, 33-46.
- Gómez, A., Jover, E., Bodineau, L., Albaiges, J., Bayona, J. 2006. Organic

contaminant loads into the Western Mediterranean Sea : Estimate of Ebro River inputs. *Chemosphere* 65(2): 224-236.

Gómez, M., Villagran, M., Martinez, C. 2018. Characterizing the Longshore Sediment Transport Pattern on Beaches in the Gulf of Arauco Chile to Assess Morphological Shoreline Evolution. *Journal of Coastal Research* 85: 656-660.

Gordon, D. C., Boudreau, P. R., Mann, K. H., Ong, J. E., Silvert, W. L., Smith, S. V., Wattayakorn, G., Wulff, F., Yanagi, T. 1996. LOICZ Biogeochemical Modeling Guidelines. LOICZ Reports & Studies 95-5. LOICZ, Texel, The Netherlands. 96 pp.

Guzmán, D. 2004. Caracterización Hidrográfica, oceanográfica y Balance de Nitrógeno y Fósforo del Fiordo de Aysén. Tesis para optar al Título de Magíster en Oceanografía, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile, 76 pp.

Hickey, B., Kudela, R., Nash, D., Bruland, J., Peterson, W., Cready, P., Lessard, E., Jay, D., Banas, N., Baptista, A., Kosro, P, Kilcher, L. 2010. River influences on Shelf Ecosystem : Introduction and synthesis. *Journal of Geophysical Research Oceans* 115 (C2) : 1-26.

Jessen, C., Bednarz, V. N., Rix, L., Teichberg, M., Wild, C. 2015. Marine eutrophication. *Environmental indicators*, 177-203.

Kaushal, S., Groffman, P., Mayer, P., Striz, E., Gold, A. (2008). Efectos de la restauración de arroyos en la desnitrificación en una cuenca hidrográfica urbanizada. *Aplicaciones ecológicas*, 18(3), 789-804.

- Kendall, M. G., Buckland, W. R. 1982. A dictionary of statistical terms (Vol. 10). Longman Publishing Group, UK. 213 pp.
- Léniz, B., Vargas, A., Ahumada, R. 2012. Characterization and comparison of microphytoplankton biomass in the lower reaches of the Biobio River and the adjacent coastal area off Central Chile during autumn-winter conditions. *Latin American of Aquatic Research* 40 (4) :847-857.
- Manly, B. 1997. Randomization, bootstrap and Monte Carlo. *Methods in Biology*. Second Edition, Chapman Hall, London.
- Manly, Bryan. 2001. *Statistics for Environmental Science and Management* / B.F.J. Manly. 10.1201/9781420057744.
- Marone, E., Machado, E. C., Lopes R. M., Teixeira da Silva, E. 2005. Land-Ocean Fluxes in the Paranaguá Bay Estuarine System, Southern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 53(3-4), 169-181.
- Mesias, J ; Matano, R y Strub P. 2003. Dynamical analysis of the upwelling circulation off central Chile. *Journal of Geophysical Research*, (108), 3085.
- Montecino, V., Lange, C. 2009. The Humboldt Current System : Ecosystem components and processes, fisheries and sediment studies. *Progress in Oceanography*, (83) : 65-79.
- Montecino, V; Strub, P; Tarazona, J; Chavez, F; Thomas, A y Baumgartner, T. 2006. Bio-physical interations off western South America. *The Harvard*

Press, 14: 329-390.

Ortega, C. 2018. Evaluación de la Información Disponible Asociada a la Cuenca del río Biobío para identificar los peligros antrópicos que afectan a la planta La Mochita, en el contexto de planes de seguridad del agua. Habilitación presentada para optar al título de Ingeniero Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 145 pp.

Padedda, B. M., Lugliè, A., Ceccherelli, G., Trebini, F., Sechin, N. 2010. Nutrient-flux evaluation by the LOICZ Biogeochemical Model in Mediterranean lagoons: the case of Cabras Lagoon (central-western sardinia). *Chemistry and ecology*, 26(2), 147-162.

Pantoja, S., Iriarte, J.L., Gutierrez, M. H., Calvete, C. 2010. The Southern Chile Continental Margin. In : Carbon and nutrient fluxes in global continental margins: A global synthesis. Liu, K., Atkinson, L., Quiñones, R. A., Talaue-McManus, L. New York : Autores, 265-273.

Parada, E. et al. 2001. Circulation del golfo de Arauco en un período de transición estacional: Un nuevo enfoque. *Investigaciones marinas*, 29(1), 11-23.

Parada, E ; Sobarzo, M ; Figueroa, D y Castro C. 2001. Circulación del golfo de Arauco en un período de transición estacional: Un nuevo enfoque. *Investigaciones marinas*, 29(1), 11-23.

Penman, H.L. 1948. Evaporación natural de aguas abiertas, suelo desnudo y hierba. *Proc. Roy. Soc. London A193* :120-146.

- Pizarro, J., Vergara, P., Rodríguez, J., Sanhueza, J., and Castro, J.: Nutrients dynamics in the 5 main river basins of the centre-southern region of Chile, *J. Hazards Mater.*, 175, 608–613, 2010.
- Quiñones, R. A., Gutiérrez, M., Daneri, G., Gutiérrez D.A., González, H., Chávez, F. 2010. Pelagic carbon fluxes in the Humboldt Current System. Páginas 44-64, En: Carbon and nutrient fluxes in global continental margins: A global synthesis. K.K. Liu, L. Atkinson, R. A. Quiñones, L. Talaue-McManus (eds.), IGBP Series Book, Springer-Verlag New York. 741 pp
- Rahn, D ; Garreaud, D. 2013. A synoptic climatology of the near-surface wind along the west coast of South America. *International Journal of Climatology*, (34)3 : 792-780.
- Redfield, A. 1934. Alfred Clarence. "On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton." James Johnstone memorial volume (1934): 176-192.
- Rutllant, J. 1972. Synoptic Meteorology of the Southern Hemisphere. *Meteorological Monographs*. (13) 35 : 139-211.
- Salcedo, J., Montiel, A., Barría, K. 2020. LOICZ nitrogen and phosphorus budget in proglacial marine area : Influence of pluviometric variation on nutrients flux. *Revista de biología marina y oceanografía*. 55, 191-201.
- Saldías, G ; Sobarzo, M., Quiñones, R. 2019. Freshwater structure and its seasonal variability off western Patagonia. *Progress in Oceanography*, 174 : 143-153.

- Schneider, W. 2017. Physical oceanography and measured on water bottle sample during METEOR cruise. Earth and Environmental Science.
- Shaffer, G ; Hormazabal, G ; Pizarro, O., Salinas, S. 1999. Seasonal and interannual variability of currents and temperature off central Chile. Journal of Geophysical Research, (104) 29 : 951-961.
- Silva, N. D., Guzmán., Valdenegro, A. 2000. Water and salt budget for Aysén Sound, Chile. Smith, S. V., V. Dupra region : carbon, nitrogen and phosphorus fluxes. Netherlands : LOICZ Reports & Studies, 55 – 64 pp.
- Smith, S., Hollibaugh, J. 2006. Water, salt, and nutrient exchanges in San Francisco Bay. Limnology and Oceanography 51(1): 504-517.
- Sobarzo, M ; Bravo, L ; Donoso, D ; Garcés-Vargas, J., Schneider, W. 2007. Coastal upwelling the water column over the continental shelf off central Chile. Progress in Oceanography 75 (3): 362-382.
- Sobarzo, M ; Saldías, G ; Tapia, F ; Bravo, L ; Moffat, C., Largier L. 2016. On subsurface cooling associated with the Biobío river canyon (Chile). Journal of Geophysical Research 121: 4568-4584.
- Sobarzo, M. 1994. Oceanografía Física entre Punta Nugurne (35°57'S; 72°47'W) y Punta Manuel (38°30'S; 73°31'W), Chile: una revisión histórica (1936-1990). Gayana Oceanografía. 2(1): 5-17.
- Sobarzo, M. 1999. Surgencia costera sobre una plataforma continental limitada por cañones submarinos, Concepción, Chile central (36 ° 40'S - 73 °

15'W). Tesis para optar al grado de Doctor en Oceanografía, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Swaney, D., Giordani, G. 2007. Proceedings of the LOICZ. Workshop on Biogeochemical budget methodology and applications. Providence, Rhode Island: LOICZ Report & Studies, 205.

Swaney, D., Hong, B. 2009. The LOICZ budget toolbox documentation- LOICZ- Biogeochemical Modelling Node. Disponible en <http://nest.su.se/mnode/index.htm>.

Thiel, M ; Macaya, E ; Batista, O ; Castro, L ; Escribano, R. 2007. The Humboldt Current System of Northern and Central Chile. *Oceanography and Marine Biology* (45): 145-344.

Valle-Levinson, A., Atkinson, L., Figueroa, D., y Castro, L. 2003. Flow induced by upwelling winds in an equatorward facing bay : Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 108 (2), doi :10.1029/2001JC00127263.

Vegas-Vilarrúbia, T., Sigró, J., Giralt, S. 2012. Connection between El Niño– Southern Oscillation events and river nitrate concentrations in a Mediterranean river, *Sci. Total Environ.* 426: 446–453.

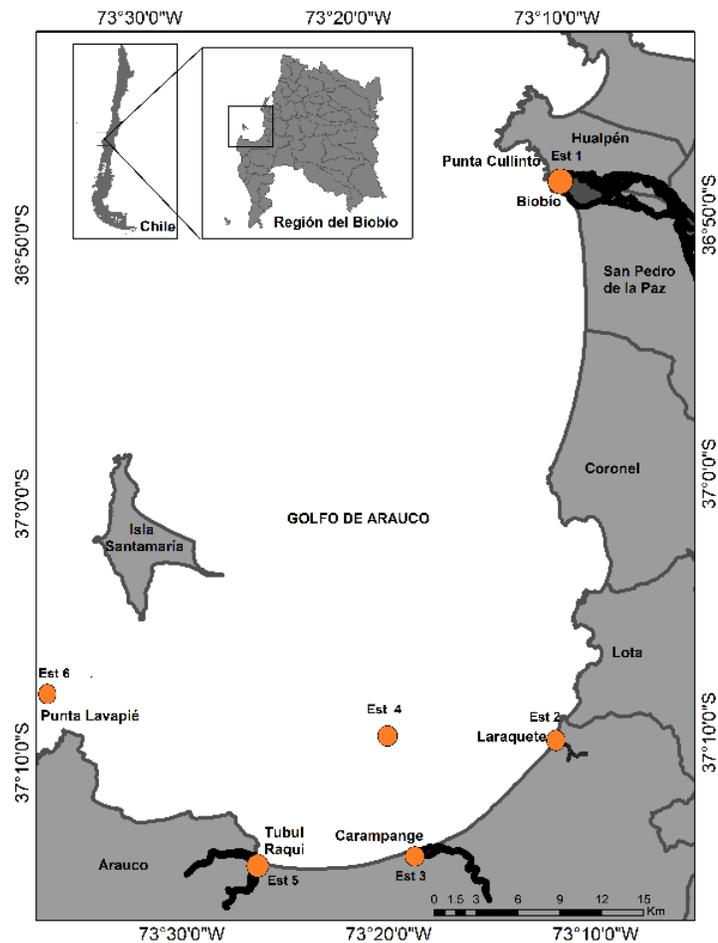
Vergara, O.A., Echevin, V., Sepúlveda, H.H., Colas, F., Quinones, R. A. 2016. Modelling the seasonal dynamics of the Peru-Chile Undercurrent off Central Chile (30–40°S). *Continental Shelf Research* 123 : 61-79.

Yévenes, M., Figueroa, R., Parra, O., Farías, L. 2015. Inter-annual variability of

dissolved inorganic nitrogen in the Biobío River, Central Chile: an analysis base on a decadal database along with 1-D reactive transport modeling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 12(1): 705-738.

Yuk, J., Aoki, S. 2011. Nitrogen and Phosphorus Budgets of Hamana Bay, Japan. *Journal of Coastal Research* 64 : 1510 - 1514.

FIGURAS Y TABLAS DEL CAPITULO II



Capítulo 2 Figura 1 Ubicación del área de estudio y las estaciones utilizadas en los presupuestos de sal, agua y nutrientes. Las estaciones 1, 2, 3 y 5 corresponden a fuentes fluviales mientras que, las estaciones 4 y 6 corresponden al interior del golfo de Arauco y el océano adyacente respectivamente.

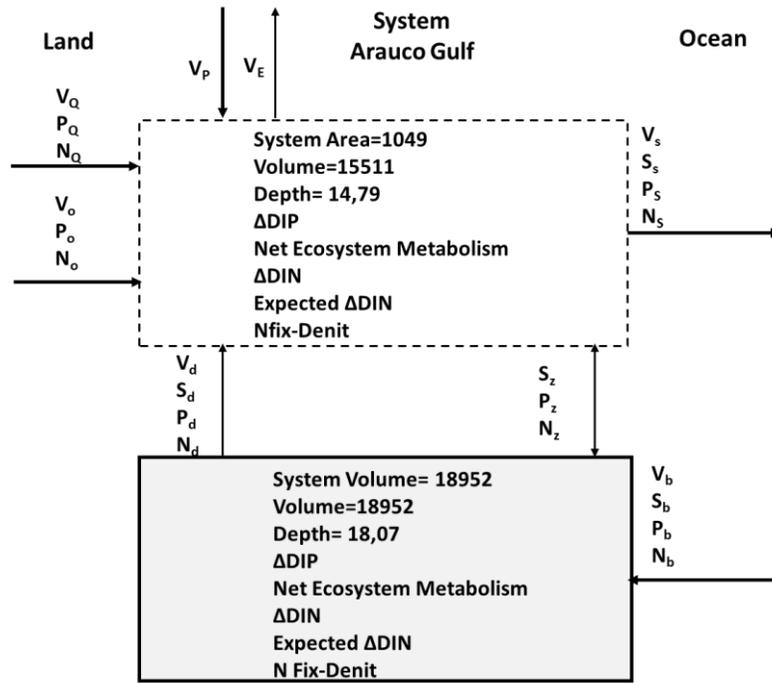


Figura 2. Modelo de una caja y dos capas utilizadas en el presupuesto de agua (V), sal (S) y materiales no conservativos (P y N) en el golfo de Arauco: Unidades de medida: área (Km²); volumen (10⁶ m³); tiempo (días); flujos de agua (10⁶ m³d⁻¹); flujos de sal (10³ psu m³d⁻¹); flujos de nutrientes (mol d⁻¹), Metabolismo neto del Ecosistema (10³ mol C d⁻¹).

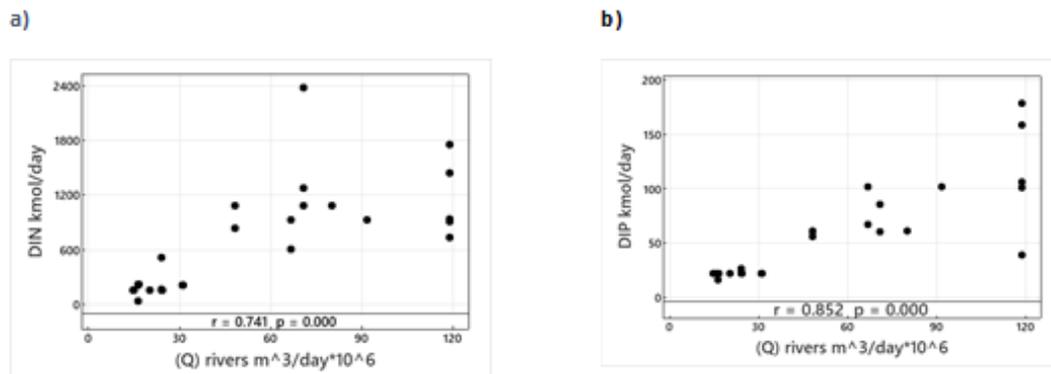


Figura 3. Coeficiente de correlación de Spearman. El eje y representa los aportes de nutrientes, dado en kmol/día (1 kilomol= 10³ mol). El eje x denota el volumen de agua total que fluye hacia la zona costera del golfo de Arauco, m³ d⁻¹ (10⁶). a) Flujos de DIN fluvial y caudales. b) Flujos de PID fluvial y caudales.

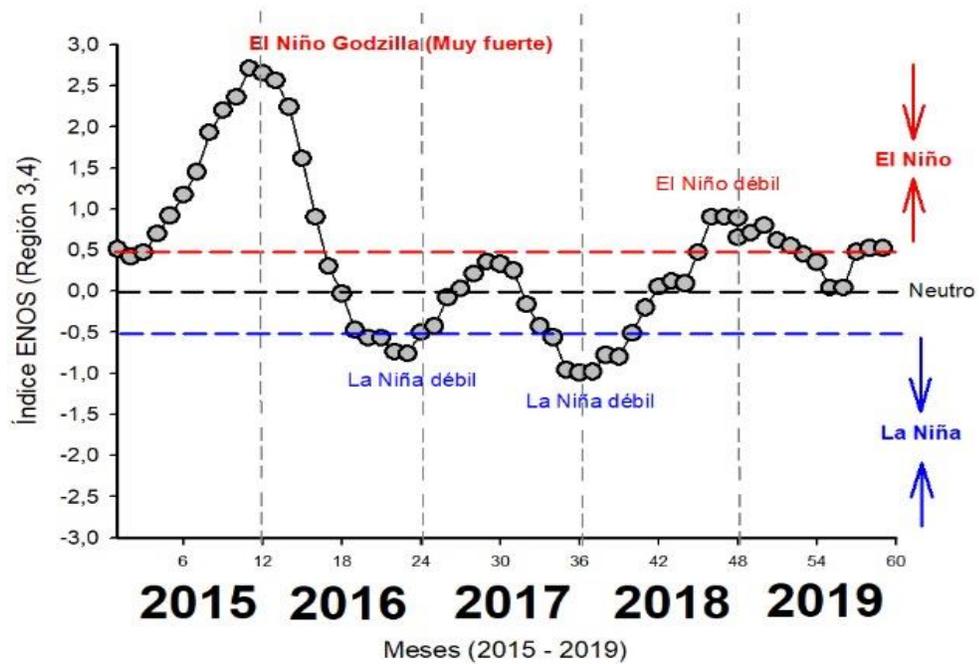


Figura 4. Índice ENOS con las condiciones cálidas (positivas) y frías (negativas) (NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Universidad de Colorado en Boulder) desde 2015 al 2019.

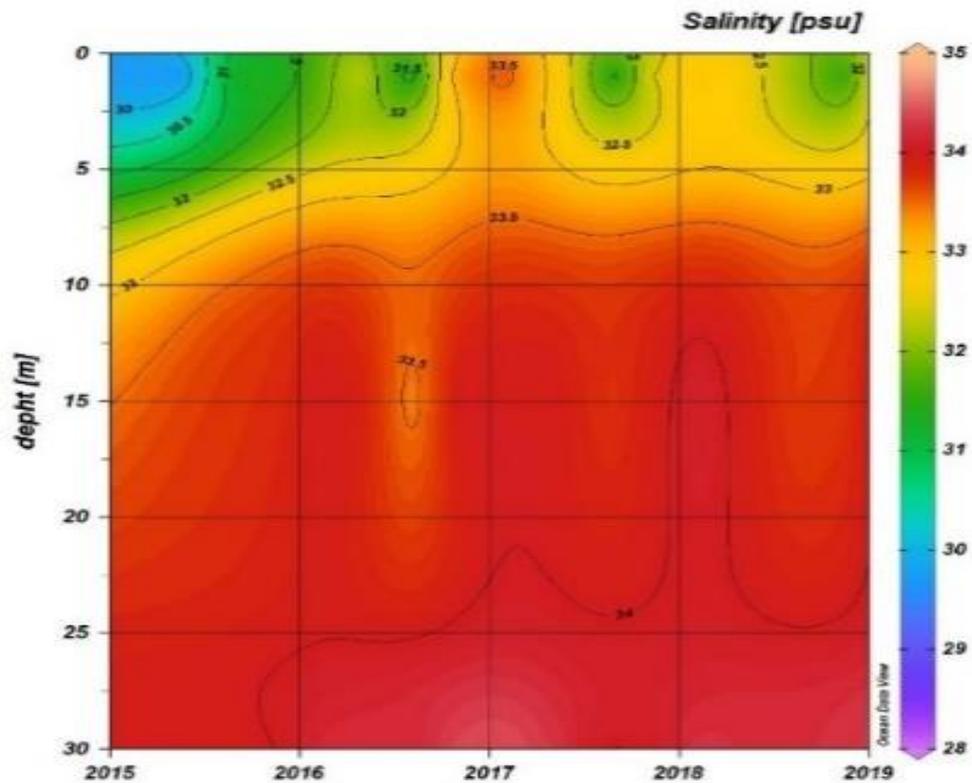


Figura 5. Salinidad promedio en la columna de agua (0-30 m) en el golfo de Arauco (2015-2019). Las mediciones de salinidad corresponden a los monitoreos realizados por el Programa de Monitoreo Medio Marino y Estuarino Planta Arauco, MAPA, específicamente la estación 4 (Ver Fig.1). Dichas mediciones presentan una frecuencia trimestral.

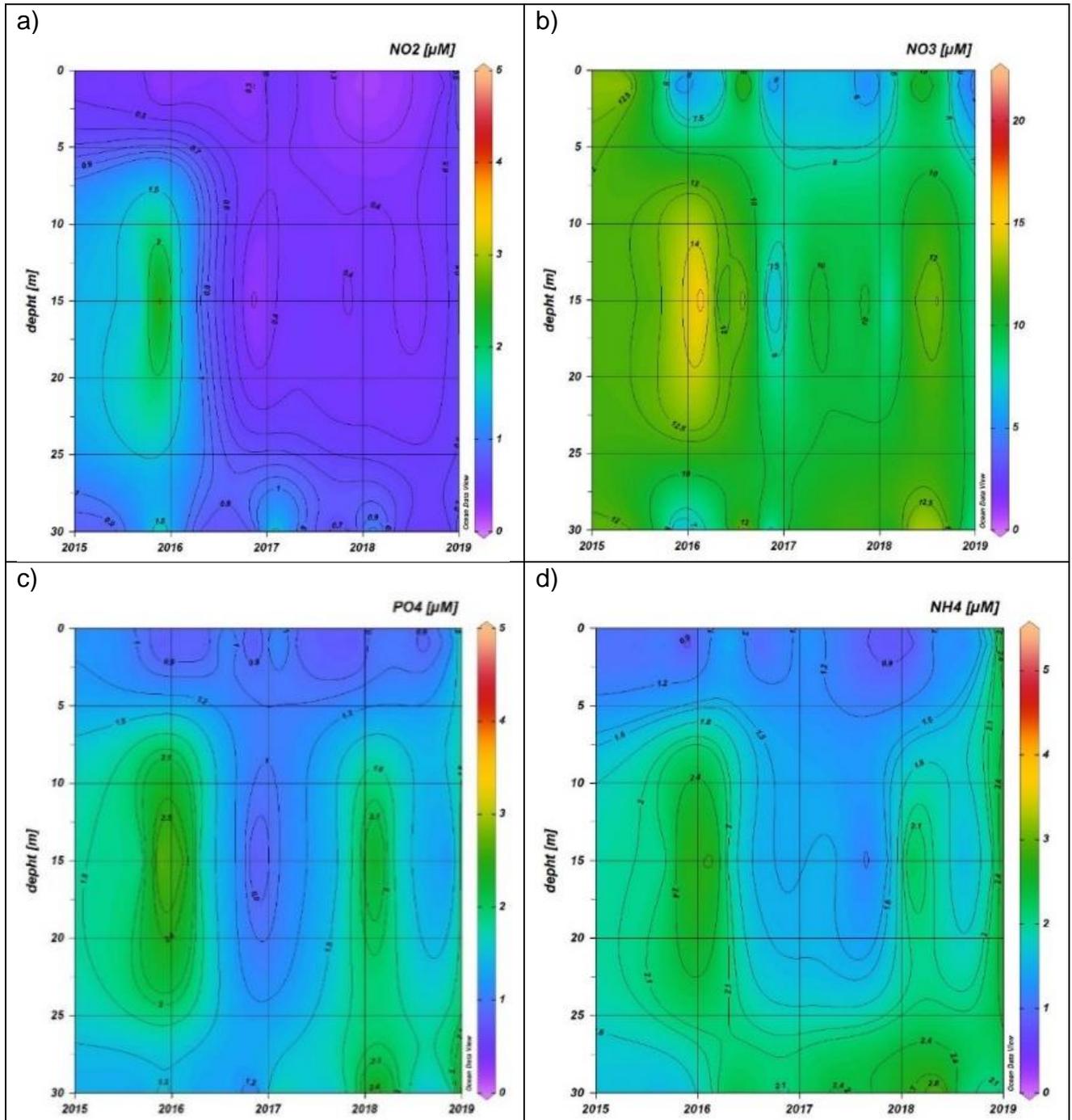


Figura 6. Concentración promedio de nutriente (μM) medidos en el golfo de Arauco entre los años 2015-2019. a) nitrito; b) nitrato c) fosfato y d) amonio. Las mediciones de nutrientes corresponden a los monitoreos realizados por el Programa de Monitoreo Medio Marino y Estuarino Planta Arauco, MAPA, específicamente la estación 4 (Ver Fig.1). Dichas mediciones presentan una frecuencia trimestral.

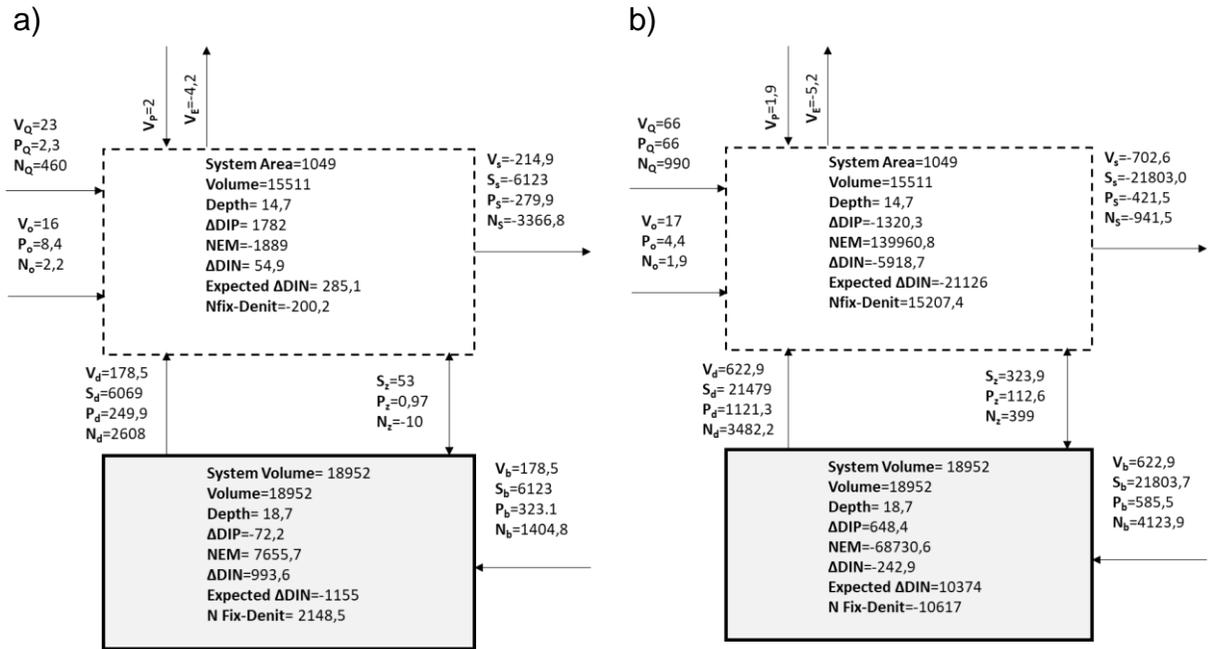


Figura 7. Presupuesto de agua, sal y materiales no conservativos, año 2015. Los cuadros discontinuos representan la capa superior del sistema (0-15 m) y los sólidos la capa inferior (16-30 m). a) otoño y b) primavera. Las flechas denotan la dirección de los flujos de entrada y salida de agua, sal y materiales no conservativos (q , o , s , b , d y z), así como el intercambio entre el sistema y el océano adyacente. (V) denota los flujos de agua en $10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$; (S) son los flujos de sal en $10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1}$; ΔDIP y ΔDIN denota materiales no conservativos mol d^{-1} ; NEM es el Metabolismo neto del ecosistema en mol C d^{-1}

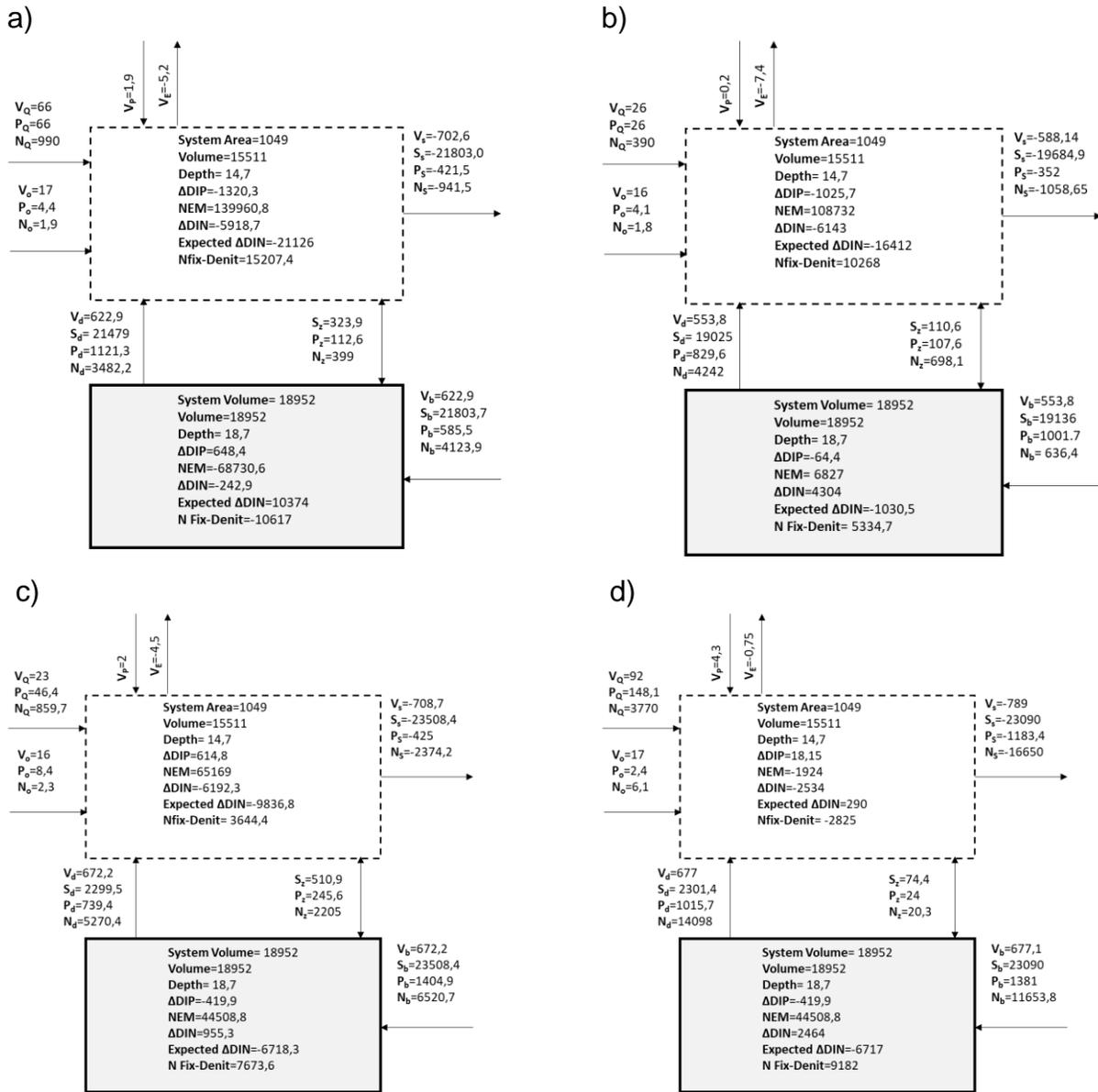


Figura 8. Presupuesto de agua, sal y materiales no conservativos en el año 2016. Los cuadros discontinuos representan la capa superior del sistema (0-15 m) y los sólidos la capa inferior (16-30 m). Las figuras revelan los resultados obtenidos en los presupuestos de agua, sal y materiales no conservativos para el año 2016; a) primavera, b) verano, c) otoño y d) invierno. Las flechas denotan dirección de los flujos de entrada y salida de agua, sal y materiales no conservativos (q , o , s , b , d y z), así como el intercambio entre el sistema y el océano adyacente. (V) denota los flujos de agua en $10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$; (S) son los flujos de sal en $10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1}$; P y N denota materiales no conservativos mol d^{-1} ; NEM es el Metabolismo neto del ecosistema en mol C d^{-1} . El tiempo que denota cada gráfico es de 91,25 días.

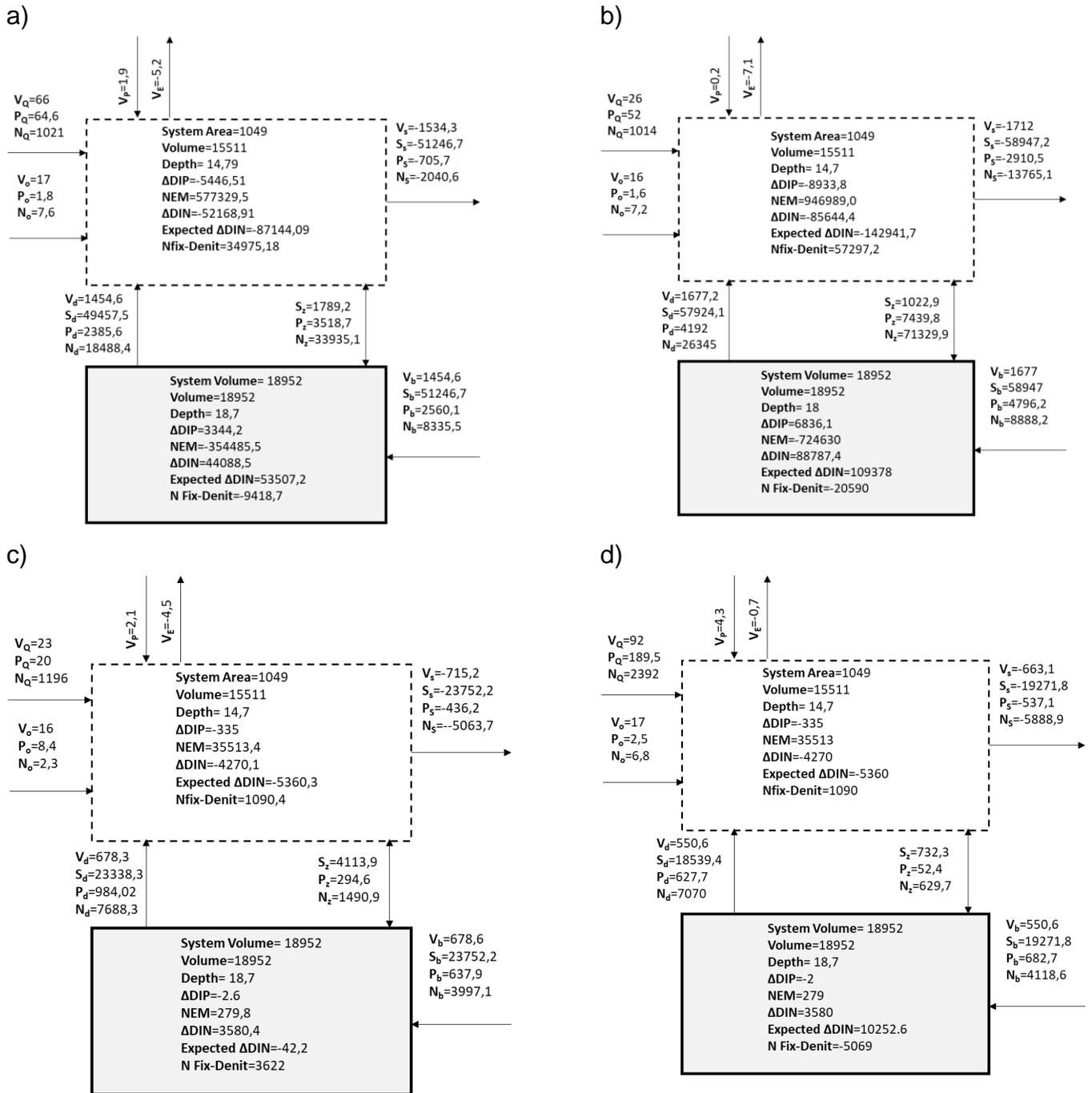


Figura 9. Presupuesto de agua, sal y materiales no conservativos del año 2017. Los cuadros discontinuos representan la capa superior del sistema (0-15 m) y los sólidos la capa inferior (16-30 m). Las flechas denotan dirección de los flujos de entrada y salida de agua, sal y materiales no conservativos ($q_{o,s,b,d}$ y z), así como el intercambio entre el sistema y el océano adyacente. (V) denota los flujos de agua en $10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$; (S) son los flujos de sal en $10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1}$; PID y NID denota materiales no conservativos mol d^{-1} ; NEM es el Metabolismo neto del ecosistema en mol C d^{-1} . El tiempo que denota cada gráfico es de 91,25 días.

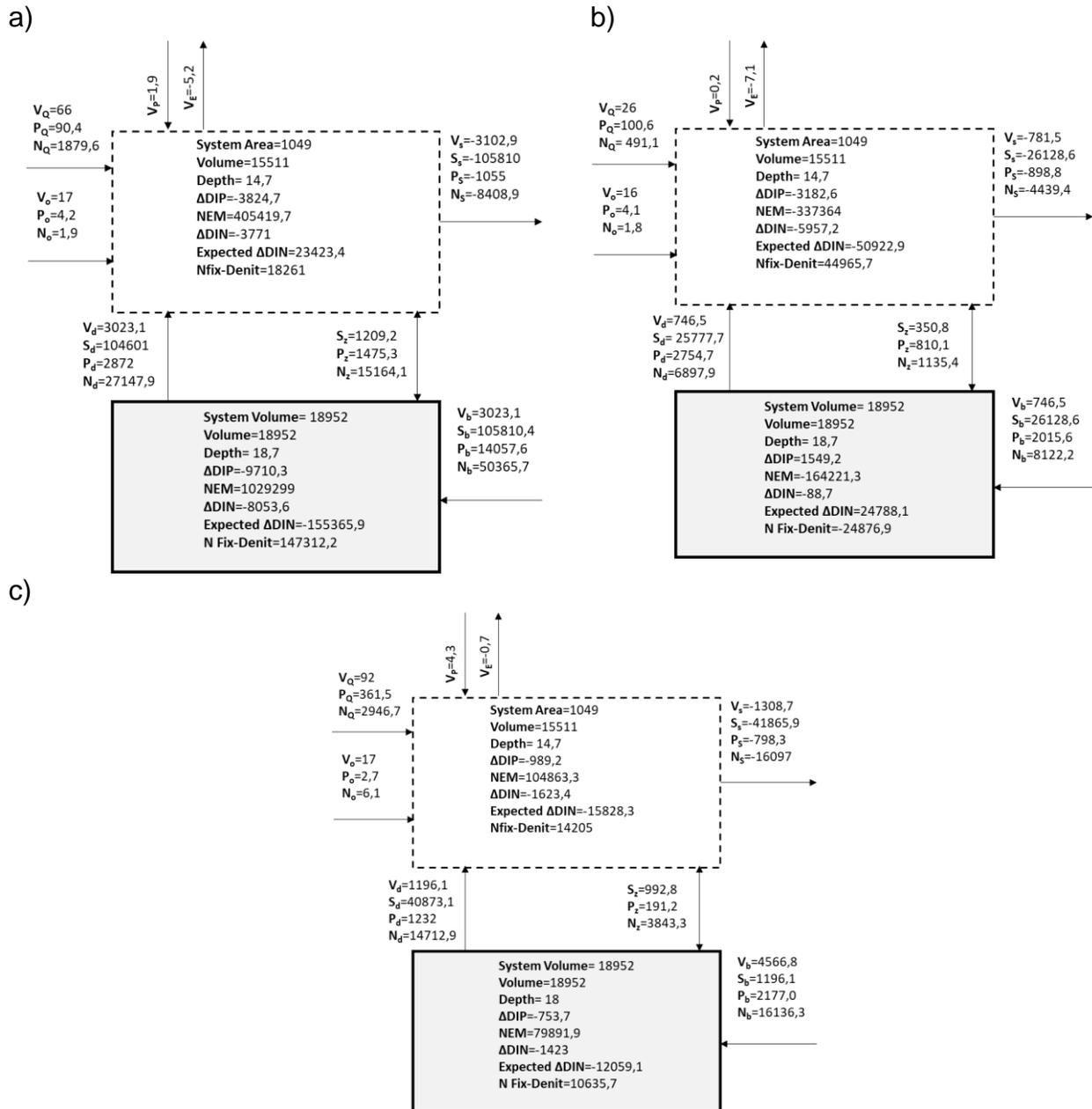


Figura 10. Presupuesto de agua, sal y materiales no conservativos del año 2018. Los cuadros discontinuos representan la capa superior del sistema (0-15 m) y los sólidos la capa inferior (16-30 m). Las flechas denotan dirección de los flujos de entrada y salida de agua, sal y materiales no conservativos (q, o, s, b, d y z), así como el intercambio entre el sisma y el océano adyacente. (V) denota los flujos de agua en $10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$; (S) son los flujos de sal en $10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1}$; PID y NID denota materiales no conservativos mol d^{-1} ; NEM es el Metabolismo neto del ecosistema en mol C d^{-1} . El tiempo que denota cada gráfico es de 121 días.

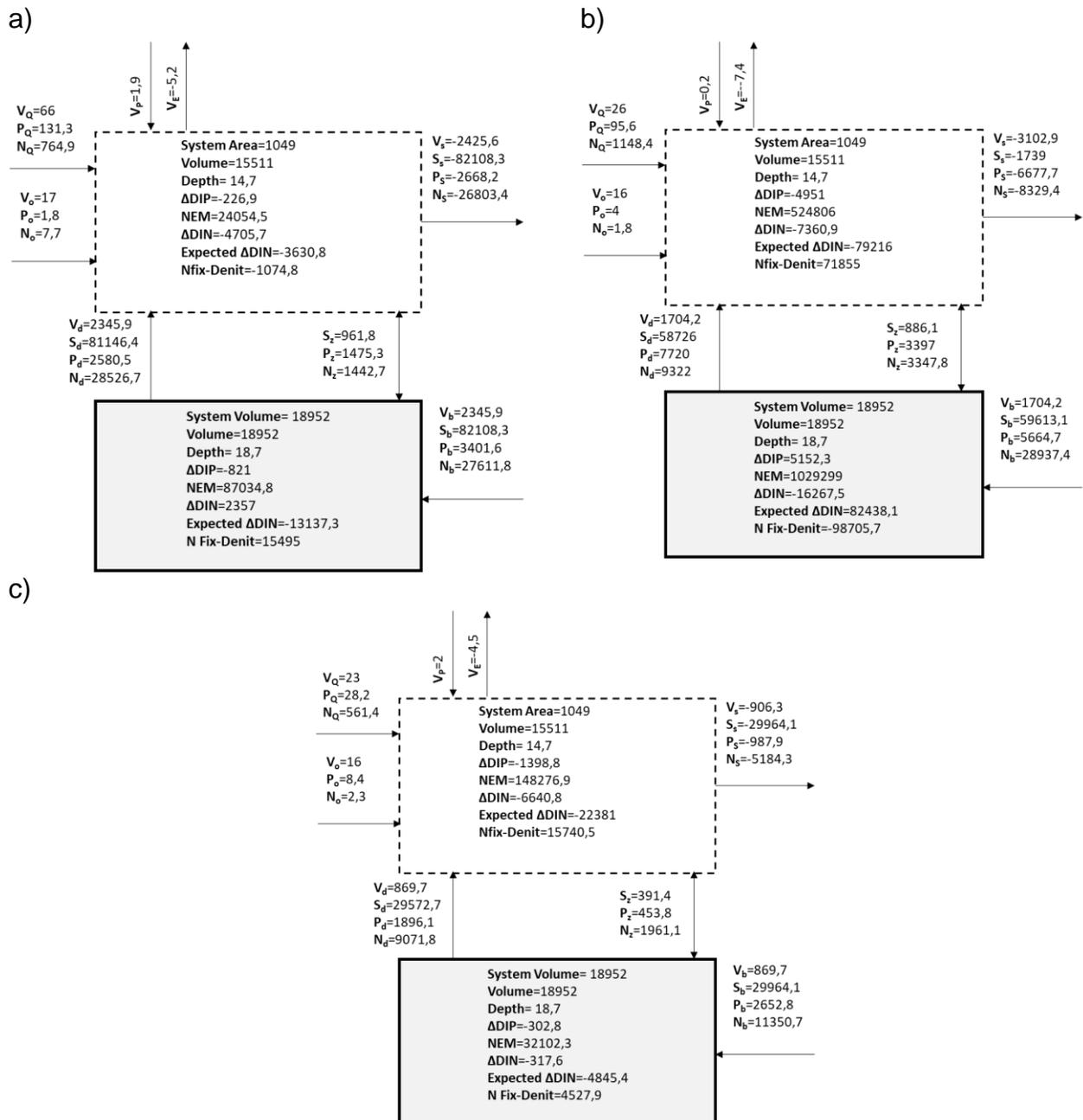


Figura 11. Presupuesto de agua, sal y materiales no conservativos del año 2019. Los cuadros discontinuos representan la capa superior del sistema (0-15 m) y los sólidos la capa inferior (16-30 m). Las figuras revelan los resultados obtenidos en los presupuestos de agua, sal y materiales no conservativos para el año 2019; a) primavera, b) verano y c) otoño. Las flechas denotan dirección de los flujos de entrada y salida de agua, sal y materiales no conservativos (q , o , s , b , d y z), así como el intercambio entre el sistema y el océano adyacente. (V) denota los flujos de agua en $10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$; (S) son los flujos de sal en $10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1}$; PID y NID denota materiales no conservativos mol d^{-1} ; NEM es el Metabolismo neto del ecosistema en mol C d^{-1} . El tiempo que denota cada gráfico es de 121 días.

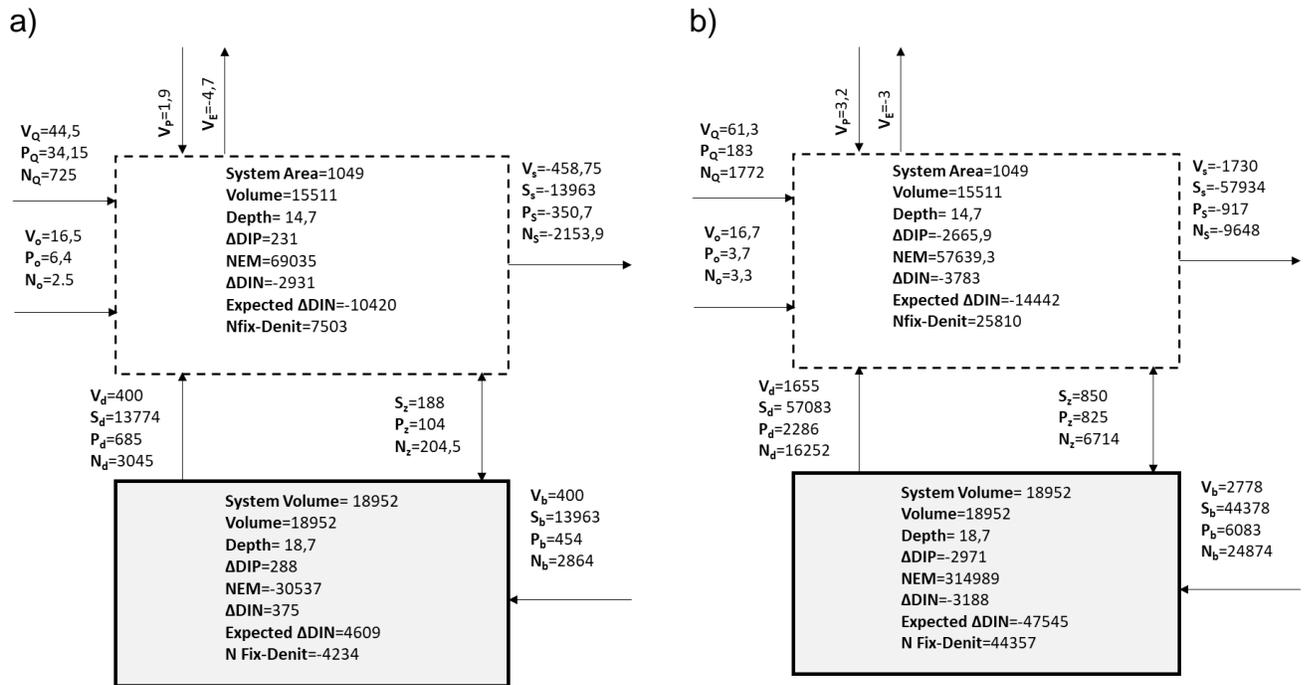


Figura 12. Modelo de una caja y dos capas utilizadas en el presupuesto anual de agua (V), sal (S) y materiales no conservativos de dos años contrastantes (2015 y 2018). Los flujos anuales del sistema golfo de Arauco muestran un contraste marcado entre el año 2015 (a, derecha) con un episodio cálido (El Niño) y el año 2018 (b, izquierda) con un episodio frío (La Niña). Volumen (10^6 m^3); tiempo (días); flujos de agua ($10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$); Flujos de sal ($10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1}$); flujos de nutrientes (mol d^{-1}), Metabolismo neto del Ecosistema ($10^3 \text{ mol C d}^{-1}$).

Tablas:

Capítulo 2 Tabla 1. Parámetros utilizados en el modelo biogeoquímico LOIZC en el golfo de Arauco (2015-2019).

PARÁMETROS	UNIDADES	PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO	INVIERNO
Área del sistema (A)	10 ³ m ²	1049	1049	1049	1049
Volumen capa 1 (V)	10 ³ m ³	15519	15519	15519	15519
Volumen capa 2 (V)	10 ³ m ³	18952	18952	18952	18952
Profundidad capa 1	m	15	15	15	15
Profundidad capa 2	m	18	18	18	18
Precipitación (Vp)	10 ³ m ³ d ⁻¹	1.9	0.2	2	4.3
Evaporación (Ve)	10 ³ m ³ d ⁻¹	-5.2	-7.1	-4.5	-0.7
Escurrecimiento (Vq)	10 ³ m ³ d ⁻¹	66	26	23	92
Otros flujos de agua (Vo)	10 ³ m ³ d ⁻¹	17	16	16	17

Tabla 2. Metabolismo neto del ecosistema (ENM) y (n-fix-denit) estimados en la capa superficial y profunda en el golfo de Arauco por estaciones del año (2015-2019).

años	Capa superficial (0-14m) Capa profunda (15-30m)	primavera		verano		otoño		invierno	
		N (n-fix - denit)	Estado trófico neto	N (n-fix - denit)	Estado trófico neto	N (n-fix - denit)	Estado trófico neto	N (n-fix - denit)	Estado trófico neto
2015	Capa superficial	N-fijación	Autótrofo	N.D	N.D	Desnitrificación	Heterótrofo	N.D	N.D
	Capa profunda	Desnitrificación	Heterótrofo	N.D	N.D	N-fijación	Autótrofo	N.D	N.D
2016	Capa superficial	N-fijación	Autótrofo	N-fijación	Autótrofo	N-fijación	Autótrofo	Desnitrificación	Heterótrofo
	Capa profunda	N-fijación	Autótrofo	N-fijación	Autótrofo	N-fijación	Autótrofo	N-fijación	Autótrofo
2017	Capa superficial	N-fijación	Autótrofo	N-fijación	Autótrofo	N.D	N.D	N-fijación	Autótrofo
	Capa profunda	Desnitrificación	Heterótrofo	Desnitrificación	Heterótrofo	Desnitrificación	Heterótrofo	N-fijación	Autótrofo
2018	Capa superficial	N-fijación	Autótrofo	N-fijación	Autótrofo	N.D	N.D	N-fijación	Autótrofo
	Capa profunda	N-fijación	Autótrofo	Desnitrificación	Heterótrofo	N.D	N.D	N-fijación	Autótrofo
2019	Capa superficial	N-fijación	Autótrofo	N-fijación	Autótrofo	N-fijación	Autótrofo	N.D	N.D
	Capa profunda	N-fijación	Autótrofo	Desnitrificación	Heterótrofo	N-fijación	Autótrofo	N.D	N.D

5.3 Capítulo 3. Aportes de nutrientes que ingresan al golfo de Arauco por la surgencia producida por vientos suroeste

El análisis del ciclo anual de vientos acumulados, reveló un predominio de vientos favorables a la surgencia ($\geq 0,05 \text{ Nm}^{-2}$) de septiembre a abril (65,8 % del año). Por otra parte, los vientos favorables al hundimiento o relajación dominaron entre junio y agosto (33.89 % del año).

La Tabla 1 muestra en detalle las fechas de los diferentes cruceros realizados entre los años 2015 y 2019 en el golfo de Arauco, intensidad de vientos favorables o no a la surgencia costera y los aportes diarios oceánicos de nitrito, nitrato, fosfato y amonio.

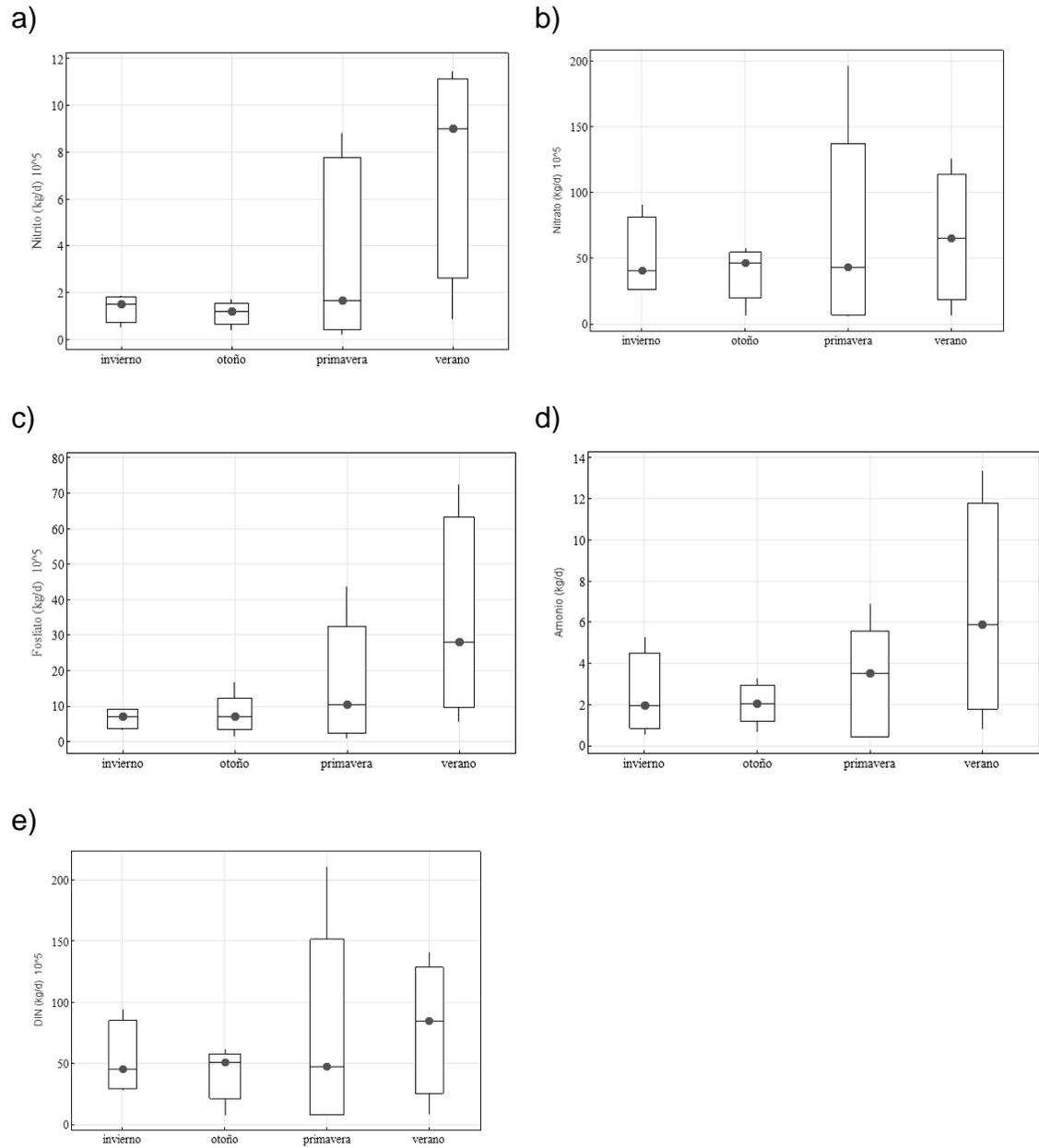
Capítulo 3 Tabla 1. Aportes de nutrientes que ingresan al golfo de Arauco (kg d^{-1}) por la surgencia producida por vientos suroeste, entre el período comprendido entre los años 2015 y 2019. IS: Índice de surgencia de Bakun (Bakun 1975) estimado para el golfo de Arauco.

Fechas de Cruceros	Estrés de viento acumulado 3 días Nm ⁻²	Favorable a surgencia	IS-Nitrito (kg d ⁻¹)	IS-Nitrato (kg d ⁻¹)	IS-Fosfato (kg d ⁻¹)	IS-Amonio (kg d ⁻¹)	IS-NID (kg d ⁻¹)	IS-PID (Kg d ⁻¹)
18/05/2015	0.03	No favorable	138006.2	5138327.2	712229.4	203434.7	5479768.0	712229.4
03/09/2015	0.06	Favorable a Surgencia	740868.9	19672849.2	2870990.2	688037.6	21101755.7	2870990.2
23/11/2015	0.06	Favorable a Surgencia	180298.4	575687.2	295394.7	45819.1	801804.7	295394.7
23/02/2016	0.08	Favorable a Surgencia	789640.1	12622689.7	3544490.1	703575.5	14115905.3	3544490.1
28/04/2016	0.03	No favorable	41139.5	665367.1	156641.2	66668.8	773175.4	156641.2
01/08/2016	0.03	No favorable	53660.2	2748255.6	325672.6	52837.7	2854753.5	325672.6
08/11/2016	0.09	Favorable a surgencia	46744.0	976514.7	434230.2	383562.5	1406821.2	434230.2
01/02/2017	0.07	Favorable a surgencia	1011078.0	7669936.7	2087209.6	470404.0	9151418.7	2087209.6
03/05/2017	0.01	No favorable	118291.0	3281620.7	534172.1	168768.7	3568680.4	534172.1
03/08/2017	0.06	Favorable a Surgencia	187810.8	5411331.3	844336.5	185395.4	5784537.5	844336.5
13/11/2017	0.07	Favorable a Surgencia	150725.6	7677222.5	1659461.7	320822.3	8148770.4	1659461.7
13/02/2018	0.12	Favorable a Surgencia	86452.6	668313.6	580532.6	82765.8	837532.0	580532.6
15/05/2018	0.01	No favorable	87486.1	5808140.9	792314.2	262216.8	6157843.7	792314.2
08/08/2018	0.02	No favorable	165551.8	9084511.5	947150.2	201360.0	9451423.3	947150.2
12/11/2018	0.04	No favorable	23372.0	754886.3	91326.2	38933.0	817191.4	91326.2
11/02/2019	0.1	No favorable	1147136.5	5339973.1	7231754.3	1335994.5	7823104.1	7231754.3
14/05/2019	0.04	No favorable	172746.2	4616747.9	1678662.4	327531.9	5117026.0	1678662.4
22/08/2019	0.02	No favorable	137449.7	2603289.1	560019.1	531569.8	3272308.6	560019.1
18/11/2019	0.04	No favorable	882929.4	11765051.8	4378159.5	515531.6	13163512.8	4378159.5

5.3.1 Flujos de nutrientes oceánicos y su variabilidad anual e interanual.

Las estimaciones de afloramientos de nutrientes por surgencia costera variaron entre $8 \cdot 10^5 \text{ kg d}^{-1}$ y $211 \cdot 10^5 \text{ kg d}^{-1}$ para el caso del NID, con un promedio de $76,6 \pm 71,8$ y entre $2,9 \cdot 10^5 \text{ kg d}^{-1}$ y $35,4 \cdot 10^5 \text{ kg d}^{-1}$ en relación al PID con un promedio de $15,3 \pm 12,1$, durante el período comprendido entre los años 2015-2019.

La variabilidad anual muestra que los mayores flujos de nutrientes advectados a la capa superficial son de una connotación mayor durante las estaciones de primavera-verano; justo cuando soplan vientos desde sur y suroeste favorables a surgencia costera, mientras que, los aportes de nutrientes durante las estaciones de otoño e invierno resultaron ser cuantitativamente menor que en primavera- verano (Fig. 1).



Capítulo 3 Figura 1. Gráficos de caja para los flujos de nutrientes advectados a la capa superficial en diferentes estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno), durante los años comprendidos entre 2015 y 2019. La mediana se representa a través de la línea horizontal localizada dentro de cada caja: a) nitrito, b) nitrato, c) fosfato, d) amonio y e) NID, es sumatoria de nitrito, nitrato y amonio.

Desde el punto de vista interanual se observó un máximo de NID y PID durante

el año 2017 con $24,3 \cdot 10^5$ y $4,7 \cdot 10^5$ T/año respectivamente, mientras que se registraron mínimos de NID y PID durante el año 2019 con $8,9 \cdot 10^5$ y $1,7 \cdot 10^5$ respectivamente (Fig. 2).

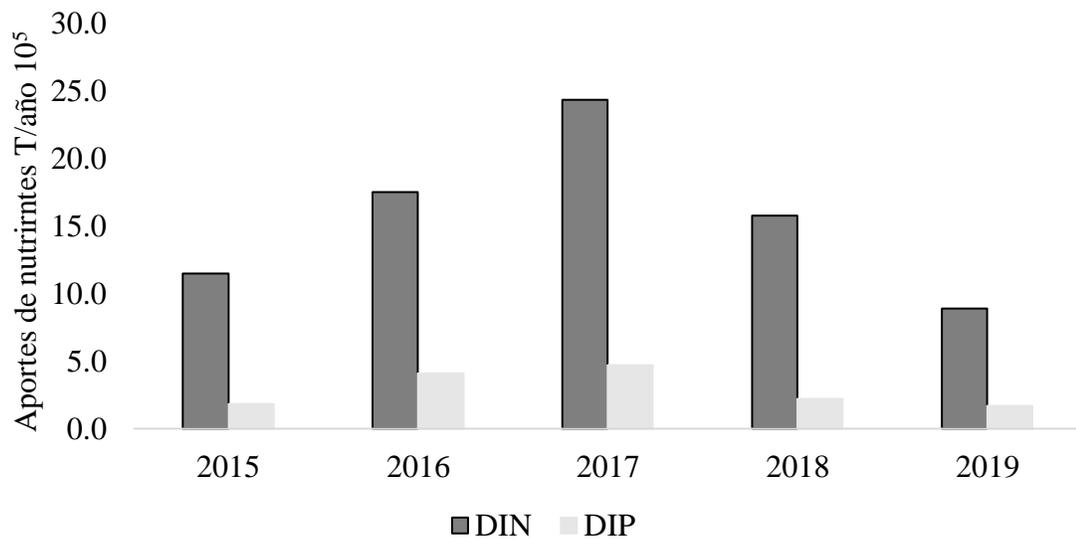


Figura 2. Gráfico de barras para los aportes interanuales de NID y PID. Período 2015-2019.

5.3.2 Aportes de nutrientes producto a la surgencia costera vs aportes de nutrientes terrestre, tanto de origen natural como antropogénicos en el golfo de Arauco

Los aportes estimados a partir del IS mostraron que en el golfo de Arauco la entrada de NID corresponde en promedio a 2049 veces más que de los de origen continental, tanto fluviales como antropogénicos. Por otra parte, el PID vía surgencia corresponde en promedio a 102 veces más que los aportes continentales. Con dicho resultado se acepta **H1**, ya que los ingresos de nutrientes vía surgencia costera son considerablemente mayores que los ingresos de origen terrestre, tanto fluviales como antropogénicos.

Cabe destacar, que a lo largo del año observamos una marcada estacionalidad en los aportes oceánicos y continentales, siendo los aportes oceánicos de un orden de magnitud superior durante las estaciones de primavera-verano y menores durante el otoño-invierno; mientras que, en invierno y primavera las entradas de NID y PID de origen continental son mayores y menores en verano y otoño (Fig.3).

Independientemente de la época del año, concluimos que la coexistencia de los aportes continentales y oceánicos juega un papel importante en el reciclaje y entrada de nutrientes a la capa fótica, al tiempo que sustentan, en gran medida, la productividad en el golfo de Arauco.

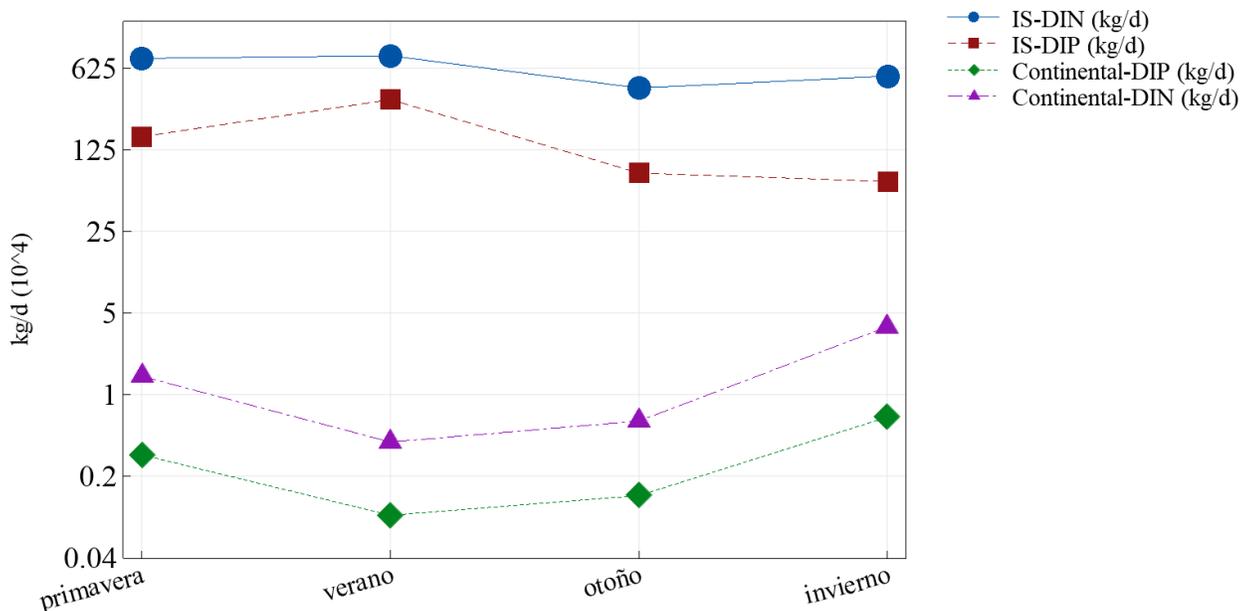


Figura 3. Serie de aportes diarios de nitrógeno y fósforo en primavera, verano, otoño e invierno (2015-2019). Los círculos azules y cuadros marrones representan los aportes diarios de nutrientes vía IS; mientras que, los triángulos rosas y cuadros verdes representan los aportes continentales de nutrientes. El eje y indica los flujos totales diarios kg d^{-1} (10^4) y el eje x las diferentes estaciones del año.

5.3.3 Relación N:P en la capa superficial

Durante el período comprendido entre los años 2015-2019, en la capa superficial de la columna de agua (0 y 15 metros de profundidad), el nitrito mostró una concentración promedio de $0,37 \mu\text{M/l} \pm 0,31$ con un mínimo absoluto de $0,04 \mu\text{M/l}$ en primavera y un máximo de $1,56 \mu\text{M/l}$ en verano. Por su parte, la concentración de nitrato evidenció un promedio de $6,98 \mu\text{M/l} \pm 4,91$ con un mínimo en primavera de $0,6 \mu\text{M/l}$ y un máximo durante el invierno de $20,34 \mu\text{M/l}$. En tanto, las concentraciones de fosfato en promedio fueron del orden de los $1,39 \mu\text{M/l} \pm 0,86$ durante el período de estudio; siendo el mínimo absoluto reportado en la estación de primavera con $0,2 \mu\text{M/l}$ y un máximo de $3,13 \mu\text{M/l}$ en otoño. Finalmente, el

amonio presentó concentraciones de 1,37 $\mu\text{M/l} \pm 1,14$ siendo el mínimo reportado en primavera con 1,84 $\mu\text{M/l}$ y el máximo de 5,46 $\mu\text{M/l}$ en verano (Tabla 2).

Tabla 2. Concentraciones de nutrientes en diferentes niveles de profundidad (capa superficial y profunda) en golfo de Arauco (2015-2019).

Estadístico	Capa superficial 0-15 metros				Capa profunda 16-30 metros			NH_4^+ ($\mu\text{M/l}$)
	NO_2^- ($\mu\text{M/l}$)	NO_3^- ($\mu\text{M/l}$)	PO_4^{3-} ($\mu\text{M/l}$)	NH_4^+ ($\mu\text{M/l}$)	NO_2^- ($\mu\text{M/l}$)	NO_3^- ($\mu\text{M/l}$)	PO_4^{3-} ($\mu\text{M/l}$)	
Mínimo	0.04	0.6	0.2	0.57	0.1	0.9	0.3	1.5
Máximo	1.56	20.34	3.84	2.94	2.9	21.9	5.3	4.5
Promedio	0.37	6.98	1.39	1.37	0.73	10.18	2.02	2.34
Desviación Estándar	0.31	4.91	0.86	1.14	0.71	4.87	1.06	0.79

La relación N:P estimada a partir de regresión simple en la capa superficial (0-14 metros), reveló una relación N:P de 7,9 en primavera-verano y 12,4 en otoño-invierno; mientras que la capa profunda (15 a 30 metros) mostró valores de 6,8 en primavera-verano y 11,6 en otoño-invierno (Anexo 1). Dicho lo anterior, se acepta **H2** ya que durante el periodo primavera-verano la relación N:P en la capa superficial de la columna de agua es menor que en el periodo de invierno, producto de la influencia de las aguas ecuatoriales subsuperficiales.

6 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El golfo de Arauco enfrenta a una serie de presiones antropogénicas (MMA 2022) resultado del acelerado crecimiento demográfico y el incremento de actividad industrial desarrollada durante los últimos 40 años (Cid-Aguayo 2019). Hasta ahora, no se contaba con un inventario global de aportes de nutrientes continentales hacia el golfo de Arauco, incluyendo además un análisis del comportamiento temporal y espacial de los mismos. A su vez, en la presente investigación se logró identificar que en el golfo existen 21 fuentes emisoras puntuales de nutrientes relacionadas con diferentes actividades o procesos industriales, incluyendo las aguas servidas y 4 entradas fluviales.

Los aportes diarios de nutrientes de origen terrestre, tanto fluviales como industriales, han experimentado un discreto aumento durante año 2019 en comparación con el 2015 en el golfo de Arauco, como indicaron las estimaciones realizadas durante el período de estudio (Capítulo 1). A nivel internacional, se han detectado niveles altos de nutrientes de NID y PID en aguas costeras, como es el caso del Mar Mediterráneo donde los aportes de nutrientes están estrechamente relacionados con entradas de agua dulce procedente de ríos y aguas residuales continentales (Alventosa 2015) y en bahía Santa Marta (Caribe Colombiano) donde los aportes fluviales de nutrientes resultaron ser de una magnitud mayor que los provenientes de fuentes antropogénicas (Bonilla 2009). Tuholske et al. (2021), mediante un modelo geoespacial de aportes de nitrógeno en aguas residuales en cien cuencas del mundo, describieron aumentos en los aportes de nutrientes, lo cual sería una particularidad de cuencas que presentan algún grado de presión antropogénica en su borde costero y que reciben nutrientes, tanto de fuentes puntuales (emisarios, riles) como difusas (lavado de suelos

agrícolas) (Jones et al. 2021).

Las aguas costeras del golfo de Arauco recibieron nutrientes, tanto de origen fluvial como antropogénico durante todo el año, sin embargo, los mayores aportes de NID y PID se producen durante los meses de invierno y primavera y son menores durante las estaciones de otoño y verano. Este comportamiento obedece, a que la principal fuente de nutrientes tiene un origen fluvial (ríos) y, como consecuencia, se asocian positivamente con las fluctuaciones temporales de los regímenes hídricos que caracterizan las cuencas fluviales de la zona centro-sur de Chile (pluvio-nival) (DGA 2004).

En tal sentido, nuestros resultados mostraron una correlación positiva entre la variabilidad temporal de los caudales de los ríos y los aportes de nutrientes de los mismos, resultado observado también en otras cuencas del mundo como el océano Pacífico, Atlántico, Índico y en el Mar Mediterráneo (Cloern et al. 1983; Sabater 2005; Gómez et al. 2006; Hickey et al. 2010). En la literatura científica, es ampliamente reportado que los ríos reciben todo el año aportes derivados de actividades humanas cargados de contaminantes y nutrientes (Wen et al. 2017); de hecho, se han considerado como entre los sistemas más contaminados por las actividades humanas (Nguyen et al. 2021).

Por otra parte, el nitrato fue el parámetro más abundante en los aportes continentales. Leah et al. (1999) plantearon que el aumento de los aportes de nitrógeno continentales hacia la zona costera es producto del creciente uso de compuestos nitrogenados, principalmente fertilizantes y abonos utilizados para la producción agrícola. En tal sentido, la región del Biobío concentra el 28,1% de la superficie nacional dedicada a los cultivos y es considerada como el centro forestal del país (MINAGRI 2022). Dicha actividad

económica demanda 10,020 toneladas métricas de nitrógeno diarias y 11,299 toneladas métricas diarias de fósforo en la región del Biobío (ODEPA 2022).

A nivel global, se espera que en los próximos 50 años los aportes de NID y PID de origen fluvial y antropogénico hacia las aguas costeras crecerán considerablemente (Seitzinger et al. 2010), pronosticándose aumentos de un 29% de NID y 17% de PID (Tuholske et al. 2021). En el golfo de Arauco particularmente, considerando los resultados de esta investigación, es probable que estos aumentos sean altos y lleguen aparejados con el proceso de desarrollo socioeconómico de cada uno de los territorios enclavados en su borde costero.

Una limitante de nuestro estudio, es que no se pudo incluir en el análisis el contenido de nitrógeno y fósforo inorgánico que puede ser transportado al golfo de Arauco mediante la descarga submarina de aguas subterráneas. El intercambio de aguas subterráneas entre la tierra y el océano es un fenómeno ampliamente extendido, que tiene importantes repercusiones en los ciclos biogeoquímicos del océano costero (ej. Moore 2010; Santos et al. 2021). Desafortunadamente, no existen a la fecha estimaciones de las aguas subterráneas que ingresan al golfo de Arauco. Un balance total de aportes de nutrientes asociado al agua subterránea hacia la zona costera requiere no solo cálculos generales de recarga, sino también mediciones directas o estimaciones empíricas de dichos aportes (Romero & Vázquez 2005). Existen diversos métodos para realizar estas mediciones que son complejas, tales como trazadores químicos, diferentes tipos de medidores de filtraciones, enfoques hidrogeológicos, entre otros (Kirsch 2006, Arévalo-Martínez et al. 2023). Dichas metodologías y mediciones escapan al marco temporal y financiero de esta Tesis de maestría, y requieren un equipo

multidisciplinario (incluyendo geofísica, hidrología, oceanografía y biogeoquímica) para enfrentar el desafío de realizar dichas estimaciones. Existe actualmente, a nivel global, una importante necesidad por avanzar en estimaciones sólidas del aporte de las aguas subterráneas a los ecosistemas costeros (ej. Arévalo-Martínez et al. 2023).

El balance de agua y sal mostró que en el sistema existe un flujo de salida que se produce en la capa superficial (V_{surf}), desplazando agua, sal y nutrientes hacia el océano adyacente, en tanto un flujo de agua oceánica (V_d) entra por la capa profunda y fluye hacia la capa superficial, siendo este último la combinación de V_r y V_d . Esto se traduce en que, el equilibrio de sal en el sistema se mantiene mediante un flujo de intercambio vertical, denominado V_z en el modelo, entre la capa profunda y la capa superficial. Estos resultados son consistentes con los estudios previos realizados acerca de la dinámica e hidrografía del golfo de Arauco (Fonseca & Farías 1987; Sobarzo 1993, 1999; Parada et al. 2001; Farías 2003; Valle-Levinson et al. 2003; Vergara et al. 2016; Gómez et al. 2018; Costa et al. 2019). En tal sentido, el modelo conceptual sobre la circulación en el interior del golfo realizado por Parada et al. (2001), indica que las entradas de agua en la capa profunda se deben a la intensificación del viento suroeste y los procesos de surgencia costera durante los meses de primavera y verano.

El balance de materiales no conservativo demostró que el golfo de Arauco recibe nutrientes no solo desde el océano sino también, desde el continente. En tal sentido, varios investigadores (Djurfeldt 1989; Dalba 1993; EULA 1993) han planteado que las concentraciones, distribución espacial y los flujos de nutrientes hacia capas superficiales no responden exclusivamente a eventos de surgencia costera sino también a los aportes continentales. También concluyeron que las exportaciones de nutrientes continentales de

origen natural y antropogénico desempeñaban un rol significativo en el mantenimiento y la alta producción biológica en el golfo de Arauco, fundamentalmente los suministros por parte del río Biobío.

Nuestros resultados muestran evidencias concluyentes de las fluctuaciones estacionales e interanuales de los flujos de nutrientes desde el océano abierto hacia la capa profunda del golfo de Arauco. Estos flujos son modelados bajo dos escenarios o forzantes físicos; por un lado, la estacionalidad de la surgencia costera y el afloramiento de agua Ecuatorial subsuperficial durante las estaciones de verano y primavera repercute directamente en las variaciones estacionales de los suministros oceánicos y, desde el punto de vista interanual, inferimos forzantes de mayor escala como la Oscilación del Sur (ENSO) y las afectaciones derivadas de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la cual modifica las características del anticiclón del Pacífico, repercutiendo en la dinámica estacional oceanográfica de la cuenca del Pacífico sur oriental (Farías et al. 2021).

En este contexto, Escribano et al. (2014) concluyeron de que el ecosistema de surgencia costera del Sistema de la Corriente de Humboldt frente a Chile exhibía una fuerte variabilidad interanual debido a los cambios en las condiciones oceanográficas relacionadas con el ENOS, ya que durante la fase cálida la instrucción de agua desde el océano presenta bajo contenido de nutrientes, son aguas más cálidas y más oxigenadas, al tiempo que se observa una reducción de la productividad primaria como consecuencia de la disminución de afloramiento costero. Por su parte, Maturana et al. (2004) plantearon que durante la fase cálida del ciclo ENOS, el nivel del mar aumenta en las costas del Pacífico este y disminuye en el oeste, lo cual produce afloramiento de agua con bajo contenido en nutrientes mientras que, durante La Niña se produce una intensificación y fortalecimiento de la

surgencia frente a las costas de Ecuador, Perú y Chile.

Los valores negativos encontrados en el balance de Δ PID y Δ NID reflejan que, en el golfo de Arauco, probablemente sea más expedito el proceso de conversión hacia el material particulado que la remineralización; además, sugiere que la absorción neta de Δ PID por parte del fitoplancton predomina durante todo del año. Quiñones et al. (2010) también encontraron valores negativos de Δ NID y Δ PID en el Sistema de la Corriente de Humboldt frente a la zona centro sur de Chile y concluyeron que, una vez que los nutrientes ingresan a la capa de mezcla, son removidos por procesos no conservativos como la producción primaria, describiendo flujos negativos de Δ PID y Δ NID en las capas superficiales. En cuanto a los valores positivos de Δ PID y Δ NID obtenidos en la capa profunda (15-30 metros), asumimos que el sistema dispone de fuentes internas de nutrientes y, probablemente sean el resultado de la oxidación de la materia orgánica, resuspensión de nutrientes desde el lecho marino y el aporte de nutrientes desde el mar abierto.

Con estos resultados podemos inferir que los aportes de nutrientes continentales desempeñan un rol importante en la ecología del sistema golfo de Arauco. En la capa superficial (0-15 m) del sistema, coexisten la producción de materia orgánica y el consumo de carbono inorgánico disuelto en buena parte del año, quedando suficiente material disponible para ser transferido hacia el océano adyacente o enterrado mediante la sedimentación; mientras que la capa profunda nutre y ventila la columna de agua mediante procesos físicos-químicos como la resuspensión y las entradas de flujos desde el mar abierto.

Las derivaciones estequiométricas de flujos no conservativos indicaron que el metabolismo neto del ecosistema durante el período de estudio, tanto en

la capa superficial como profunda, fue autótrofo por lo cual inferimos que los productores suministran el oxígeno necesario para la oxidación de la (MO) producida y, por tanto, mantienen el equilibrio del ecosistema. Modelaciones realizadas por Farías (2002) en el golfo de Arauco, Pantoja et al. (2010) en fiordos patagónicos, Montecino (2015) en Bahía de Coliumo y Salcedo et al. (2020) en el Seno Gallegos (Tierra del Fuego) mostraron también un estado autótrofo en la capa superficial de los sistemas estudiados. Por otra parte, es conocido que el sistema pelágico de la corriente de Humboldt frente a la zona centro-sur de Chile presenta muy altos valores de productividad primaria (Daneri et al. 2000, Iriarte et al. 2012, Testa et al. 2018).

En la mayor parte del año, hay un predominio de N-fijación en el golfo de Arauco; mientras que, la desnitrificación predomina en menor escala y solo se observó en la capa profunda. Este resultado implica la absorción y transformación del nitrógeno molecular a través de la reducción enzimática en la capa superficial para luego ser incorporada en el sistema, mientras que, en la capa profunda ocurre la conversión microbial en condiciones anaeróbicas al tiempo que se oxida la materia orgánica.

Basándonos en la investigación realizada por Tuholske et al. (2021), podemos inferir que los aportes de nutrientes continentales de origen antropogénico hacia la zona costera de Chile central tienen cierta similitud con cuencas ubicadas en regiones como Europa (Países Bajos y España), Norteamérica (Canadá), América del Sur (Perú, Colombia y Argentina) y Asia (Japón y Taiwán). Por otra parte, los aportes desde fuentes fluviales son comparables con las cuencas de los ríos Ganges en Bangladés, Danubio el cual fluye por Europa Oriental y desemboca en el Mar Negro y Chang Jiang en el norte de China (Tuholske et al. 2021). Los aportes de

nutrientes terrestres en el golfo de Arauco son de una magnitud menor comparado con cuencas de países como Estados Unidos, Brasil y México en América; Italia y Alemania en Europa del Este y Egipto, Pakistán e Indonesia en Asia.

En el presente estudio se pudo determinar que, en el golfo de Arauco, particularmente los suministros autóctonos de nutrientes hacia las aguas marinas corresponden en primer lugar, a entradas vía surgencia inducida por transporte de Ekman; el segundo lugar se atribuye a las fuentes fluviales, siendo el río Biobío el de mayor importancia, seguido por los aportes de origen antropogénico. Las entradas de NID producto de la surgencia, corresponde en promedio a 2049 veces más que de los de origen continental, tanto fluviales como antropogénicos; mientras que el PID es 102 veces mayor que los aportes continentales.

Finalmente, los resultados de la presente investigación muestran que la coexistencia entre los aportes continentales y oceánicos juega un papel importante en el reciclaje e input de nutrientes en la columna de agua, al tiempo que sustentan, en gran medida, la productividad en el golfo de Arauco.

8.- REFERENCIAS

- Agustín, I. 2020. Evaluación de la acción del estado por la salud y justicia ambiental en Coronel (Chile). Tesis de Maestría. Universidad de Concepción, Concepción, Chile. URL: <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/6209>.
- Alventosa, J. 2015. Calidad de las aguas costeras del municipio de Dénia. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia, España. URL :<https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/55161>.
- Anabalón, V., Morales, C., González, E., Menschel, W., Schneider, W., Hormazabal, L., Valencia, R., Escribano, B. 2016. Micro-Phytoplankton Community Structure in the Coastal Upwelling Zone off Concepción (central Chile) : Annual and inter-annual fluctuations in a highly dynamic environment. *Progress in Oceanography*149 : 174-188.
- Ancapichún, S Garcés-Vargas, J. 2015. Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea Surface temperature off north-central Chile. *Ciencias Marinas* (41)1: 1-20
- Arcos, D., Peña, H., Núñez, S., Ortiz, J., Furet, L., Figueroa, F., Sepúlveda, A., Rebolledo, A., Castillo, J., Turner, A., González, H., Valenzuela, G. Menschel, E. 2002. Determinación de la capacidad de carga de las zonas estuarinas de los ríos Valdivia y Bueno, X Región (Río Valdivia). Informe Técnico FIP N° 2000-29. Instituto de Investigación Pesquera. Fondo de Investigación Pesquera, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, Ministerio de Economía, Gobierno de Chile.75 pp.

Arévalo-Martínez, D. L., Haroon, A., Bange, H. W., Erkul, E., Jegen, M., Moosdorf, N., Schneider von Deimling, J., Berndt, C., Böttcher, M. E., Hoffmann, J., Liebetrau, V., Mallast, U., Massmann, G., Micallef, A., Michael, H. A., Paasche, H., Rabbel, W., Santos, I., Scholten, J., Schwalenberg, K., Szymczycha, B., Thomas, A. T., Virtasalo, J. J., Waska, H., Weymer, B. A. 2023. Ideas and perspectives: Land–ocean connectivity through groundwater, *Biogeosciences*, 20, 647–662, <https://doi.org/10.5194/bg-20-647-2023>.

Bachmann, R. W., Cloern, J. E., Heckey, R. 2006. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnol. Oceanogr* 51 (1) : 351–800.

Bakun, A., Nelson, S. 1991. The Seasonal Cycle of Wind-Stress Curl in Subtropical Eastern Boundary Current Regions. *Journal of Physical Oceanography*, (21) 12 :1815-1834.

Bakun, A. 1975. Daily and weekly upwelling indices, west coast of North America, 1967-73 (Vol. 693). Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service.

Barber, R., Chavez, P. 1983. Biological Consequences of El Niño. *Science*, 222(4629), 1203–1210.

Bolker, B.M. 2008. *Ecological Models and Data in R*. Princeton University Press, Princeton, NJ. 408.

Bonilla, H. 2009. Inventario de Fuentes terrestres de contaminación emitidas a la Bahía de Santa Marta, Caribe Colombiano. Tesis de Maestría. Universidad de Magdalena, Colombia. URL :

<https://repositorio.unimagdalena.edu.co/items/79a30800-8834-499a-8420-3904f25f502a>.

Boonphakdee, T., Fujiwara, T. 2008. Temporal Variability of Nutrient Budgets in a Tropical River Estuary : The Bangpakong River Estuary, Thailand. *Environment Asia* 1: 7-21.

Brandenburg, K., Siebers, L., Keuskamp, J., Jephcott, T. G., and van de Waal, D. B. 2020. Effects of nutrient limitation on the synthesis of N-rich phytoplankton toxins : A meta-analysis. *Toxins (Basel)* 12(4) : 221.

Brandenburg, M., Senerpont D., Wohlrab, S., Krock, B., John, U., Van Scheppingen, Y. 2017. Combined physical, chemical and biological factors shape *Alexandrium ostenfeldii* blooms in the Netherlands. *Harmful Algae*. 63 : 146-153.

Brock, G., Pihur, V., Datta, S., Datta, S. 2008. *clValid*: an R package for cluster validation. *Journal of Statistical Software* 25(4): 1-22.

Broecker, W. S. 1974. A conservative water-mass tracer. *Earth Planet. Sci. Lett.* 23: 100-107.

Burson, A., Stomp, M., Akil, L., Brussaard, C. P., Huisman, J. 2016. Unbalanced reduction of nutrient loads has created an offshore gradient from phosphorus to nitrogen limitation in the North Sea. *Limnology and Oceanography*, 61(3): 869-888.

Camacho, V., Carriquiry, J., Smith, V. 2003. Non-conservative P and N Fluxes and Net Ecosystem Production in San Quintin Bay, México. *Estuaries*,

26 (5): 1220-1237.

Camargo, J., Alonso, A. 2007. Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos : Problemas medioambientales, criterios de calidad del agua e implicaciones del cambio climático. *Ecosistemas* 16 (2): 98-110.

Cartes A. 2018. La Ciudad del Hollín. Desarrollo industrial y deterioro ambiental en la Cuenca del Carbón. *Historia* 396, 8(2) : 27-53.

Castro-González, M., Farías, L. 2004. N₂O recycling at the core of the oxygen minimum zone off northern Chile. *Mar Ecol Prog Ser* 280:1–11

Centro Universitario Internacional Europa-América Latina de Investigación y Formación de Ciencias Ambientales (EULA). 1993. Programa Gestión de los recursos hídricos de la cuenca del río Biobio y del area marina costera adyacente, *Oceanografía del golfo Arauco* (1st edición). Santiago : Sobarzo, M. et al.

CEPAL. 2022. Citado Recurso Electrónico. Panorama de los océanos, los mares y los recursos marinos en América Latina y el Caribe. Conservación, desarrollo sostenible y mitigación del cambio climático. Unidad de Agricultura y Biodiversidad de la División de la Comisión Económica para América Latina -CEPAL, Naciones Unidas-ONU. URL : <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/47737> Acceso: 30 de noviembre de 2020.

Chen C-TA, Liu, K-K., Macdonald, R. 2003. Continental margin exchanges. In: Fasham MJR (ed) *Ocean Biogeochemistry: The role of the ocean carbon cycle in global change*. Springer, Berlin, pp 53–97

- Cid-Aguayo, B., Vanhulst, J., Rojas, C. 2019. Peasant raw cheese production in the Arauco Gulf : retro-innovative processes towards socio-ecologically sustainability. *Mundo Agrario* 20 (44) : 32-46.
- Cloern, J., Alpine, A., Cole, B., Wong, R., Arthur, J., Ball, M. 1983. River Discharge controls phytoplankton dynamics in Northern San Francisco Bay. *Estuarine, Coast and Shelf Science* 16(4) : 415-429
- Cloern, J., Alpine, A., Cole, B., Wong, R., Arthur, J., Ball, M. 1983. River Discharge controls phytoplankton dynamics in Northern San Francisco Bay. *Estuarine, Coast and Shelf Science* 16(4) : 415-429.
- Codispoti, L.A., Friederich, G.E., Packard, T.T., Glover, H.E., Kelly, P.J., Spinrad, R.W., Barber, R.T., Elkins, J.W., Ward, B.B., Lipschultz, F., Lohanau, N. 1986. High nitrite levels off Northern Peru: a signal of instability in the marine denitrification rate. *Science* 233:1200–1202
- Codispoti, L.A., Barber, R.T., Friederich, G.E. 1989. Do Nitrogen transformations in the Poleward Undercurrent off Peru and Chile have a globally significant influence? En: Neshyba, S.J., Mooers, C.N.K., Smith, R.L., Barber, R. (eds) *Poleward flows along eastern ocean boundaries. Coastal and Estuarine Studies*. Springer, New York, pp 281–310
- Costa, P., Silva, R., Figueirinhas, D., & Lario, J. 2019. The importance of coastal geomorphological setting as a controlling factor on microtextural signatures of the 2010 Maule (Chile) tsunami deposit. *Geologica Acta*, 17 (4): 1-10.
- Dalba, N. 1993. Emisiones de carga global de nutrientes y metales traza del río

Biobío al golfo de Arauco, Concepción, Chile. Tesina de Diploma, Escuela de Graduados Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 40p.

Daneri, G., Dellarossa, V., Quiñones, R. A., Jacob, B., Montero, P., Ulloa, O. 2000. Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas. *Marine Ecology Progress Series* 197: 41-49.

Daniel, I., Michael, G., Farías, L. 2013. Greenhouse gas emissions from the Tubúl-Raqui estuary (central Chile 36°S), *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (134): 31-44.

Davidson, K., Gowen, R.J., Harrison, P.J., Fleming, L.E., Hoagland, P., Moschonas, G. 2014. Anthropogenic nutrients and harmful algae in coastal waters. *Journal of Environmental Management* 146: 206-216.

Davies, A.G., Morales, C.E. 1998. An appraisal of the stoichiometry of nutrient interrelationships in the upwelling system off northern Chile. *J Mar Biol Assoc UK* 78:697–706

Delgadillo, J., Zirino, A., Holm, O., Hernández, M., Boyd, T., Chadwick, B., Rivera, I. 2008. Dissolved Nutrient Balance and net Ecosystem Metabolism in a Mediterranean-Climate Coastal Lagoon : San Diego Bay. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 76, 594-607.

Diatta, J., Waraczewska, Z., Grzebisz, W., Niewiadomska, A., and Tatuśko-Krygier, N. 2020. Eutrophication Induction Via N/P and P/N Ratios Under

Controlled Conditions—Effects of Temperature and Water Sources. *Water. Air. Soil Pollut* (231): 149.

Díaz, R. J., Rosenberg, R. 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321 : 926–929.

Dirección General de Agua 2004. Citado Recurso Electrónico. Ministerio de Obras Públicas. URL: <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx>
Acceso: 25 de junio de 2019.

Djurfeldt, L. 1989. Circulation and Mixing in the Coastal Upwelling Embayment ; Gulf of Arauco, Chile. *Continental Shelf Research*, 9 (11) 1003-1016.

Dunn, J.C. 1974. Well-separated clusters and optimal fuzzy partitions. *Journal of Cybernetics* 4(1): 95-104.

Easdale, T., Sabaté, s., Grau, a. 2005. Don't camp beside the river: structure and dynamics of Andean alder (*Alnus acuminata*) forests affected by river floods, northwestern Argentina. *Revista chilena de historia natural*, 78(4), 711-722.

Escribano, R., G. Daneri, L. Farías, V. A. Gallardo, H.E. González, D. Gutierrez, C. Lange, C. E. Morales, O. Pizarro, O. Ulloa M. Braun. 2004. Biological and chemical consequences of the 1997–1998 El Niño in the Chilean coastal upwelling system : à synthesis. *Oceanography*, (41) : 2389–2411.

Espino, M. y Yamashiro, C. 2012. La variabilidad climática y las pesquerías en el Pacífico suroriental. *Latin American Journal of Aquatic Research* 40(3):

705-721.

Falkowski, P. G., Barber, R. T., Smetacek, V. 1998. Biogeochemical controls and feedback on ocean primary production. *science*, 281(5374), 200-206.

Falvey, M., Garreaud, M. 2009. Regional cooling in a warming world : Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979 –2006). *Journal of geophysical research*, 114.

Farfán, C., Alvares, B. 1983. Variability and fluxes of nitrogen and organic carbon at the mouth of a coastal lagoon. *Estuarine, Coast and Shelf Science* 17 (6) : 599-612.

Farías, L. 2002. The golf of Arauco (37°S) a Coastal Upwelling Embayment. Páginas 46-52, En *Estuarine Systems of the Latin American Region (Regional workshop V) and Estuarine Systems of the Arctic region: Carbon, Nitrogen and phosphorus fluxes. LOICZ Report & Studies N°23. LOICZ, Texel, the Netherlands. 103 pp.*

Farías, L., Graco, M., Ulloa, O. 2004. Temporal variability of nitrogen cycling in continental-shelf sediments of the upwelling ecosystem off central Chile. *Deep-Sea Res Pt II* 51(20–21): 2491–2505

Ferreira, J.G., Andersen, J.H., Borja, A., Bricker, S.B., Camp, J., Cardoso da Silva, M., Garcés, E., Heiskanen, A-S., Humborg, C., Ignatiades, L., Lancelot, C., Menesguen, A., Tett, P., Hoepffner, N., Claussen, U. 2011. Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuar. Coast.*

Shelf Sci., 93: 117-131.

Figuerola, D., Moffat, C. 2000. On the influence of topography in the induction of coastal upwelling along the Chilean Coast. *Geophysical Research Letters*, (27) 23, 3905-3908.

Fonseca, T & Farías, M. (1987). Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción Remota. *Investigación Pesquera (Chile)*, 34, 33-46.

Galili, T. 2015. Dendextend: An R package for visualizing, adjusting, and comparing trees of hierarchical clustering. *Bioinformatics* 31(22).

García, R.M., Largier L.J., William J. 2014. Synoptic-scale upwelling indices and predictions of phyto- and zooplankton populations. *Progress in Oceanography*, 120,177-188.

Gómez, A., Jover, E., Bodineau, L., Albaiges, J., Bayona, J. 2006. Organic contaminant loads into the Western Mediterranean Sea : Estimate of Ebro River inputs. *Chemosphere* 65(2) : 224-236.

Gómez, M., Villagran, M., Martinez, C. 2018. Characterizing the Longshore Sediment Transport Pattern on Beaches in the Gulf of Arauco Chile to Assess Morphological Shoreline Evolution. *Journal of Coastal Research*, 85, 656-660.

Gordon, D. C., Boudreau, P. R., Mann, K. H., Ong, J. E., Silvert, W. L., Smith, S. V., Wattayakorn, G., Wulff, F., Yanagi, T. 1996. LOICZ biogeochemical modeling guidelines, LOICZ Reports & Studies, 5.

- Guillén, O., Calienes, R., Rondan De, R. 1977. Medio ambiente y producción primaria frente al área Pimentel-Chimbote. Boletín del Instituto del Mar del Perú (3):107–159
- Guzmán, D. 2004. Caracterización Hidrográfica, oceanográfica y Balance de Nitrógeno y Fósforo del Fiordo de Aysén. Tesis para optar al Título de Magíster en Oceanografía, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile, 76 pp.
- Halpern, B., Ebert, M., Kappel, C., Madin, M., Matthew, M., Walbridge S. 2009. Global priority areas for incorporating land-sea connections in marine conservation. *Conservation Letters* 149 : 189-196.
- Harper, D. 1992. What is eutrophication? *Eutrophication of Freshwaters: Principles problems* Springer Netherlands (1): 1-28.
- Hickey, B., Kudela, R., Nash, D., Bruland, J., Peterson, W., Cready, P., Lessard, E., Jay, D., Banas, N., Baptista, A., Kosro, P., Kilcher, L. 2010. River influences on Shelf Ecosystem : Introduction and synthesis. *Journal of Geophysical Research Oceans* 115
- INE. 2017. Citado Recurso Electrónico. Censo de población y vivienda. 2017. Cuadros estadísticos. Instituto Nacional de Estadística, Chile. URL : <https://www.ine.cl/es-tadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda/censo-de-poblacion-y-vivienda> Acceso : 6 de junio de 2020.
- Iriarte, J. L., Vargas, C. A., Tapia, F. J., Bermúdez, R., Urrutia, R. E. 2012. Primary production and plankton carbon biomass in a river-influenced upwelling area off Concepción, Chile. *Prog. Oceanogr.* 92–95, 97–109. doi: 10.1016/j.pocean.2011.07.009

- Jacob, B., Tapia, F., Quiñones, R. A., Montes, R., Sobarzo, M., Schneider, W., Daneri, G., Morales, M., Montero, P., González, H. 2018. Major changes in diatom abundance, productivity, and net community metabolism in a windier and dryer coastal climate in the southern Humboldt Current. *Progress in Oceanography*, 168, 196-209.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. 2021. *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*. Second edition, Springer Science+Business Media, 607.
- Jessen, C., Bednarz, V. N., Rix, L., Teichberg, M., Wild, C. 2015. Marine eutrophication. *Environmental indicators*, 177-203.
- Jones, E., Frei, J., Lee, R., Maxwell, D., Shoemaker, R., Follett, A., Lawson, G., Maimfeldt, M., Watts, R., Aanderud, Z., Alired, C., Asay, A., Buhman, M., Burbidge, H., Cali, A., Crandall, T., Errigo, I., Griffin, N., Hansel, N., Howe, J., Meadows, E., Kujanpaa, E., Lange, L., Nelson, M., Norris, A., Ostlund, E., Suiter, N., Tanner, K., Tolworthy, J., Camila, V., Abbott, B. 2021. Citizen science reveals unexpected solute patterns in semiarid river networks. *PLOS ONE* 16 (8) : 44-72.
- Kaushal, S., Groffman, P., Mayer, P., Striz, E., Gold, A. 2008. Efectos de la restauración de arroyos en la desnitrificación en una cuenca hidrográfica urbanizada. *Aplicaciones ecológicas*, 18(3), 789-804.
- Kendall, M. G., Buckland, W. R. 1982. *A dictionary of statistical terms* (Vol. 10). Longman Publishing Group.
- Kirsch, R. (Ed.). 2006. *Groundwater Geophysics, A Tool for Hydrogeology*. Springer Science & Business Media, NY. 493 pp.

- Kitsiou, D., Karydis, M. 2011. Coastal marine eutrophication assessment: A review on data analysis, *Environment International* 37 (4): 778-801.
- Leah May, B., Fred, T., Lerman, A. 1999. Biogeochemical responses of the carbon cycle to natural and human perturbations : Past, present and future. *American Journal of Science* 299 : 7-9.
- Léniz, B., Vargas, A., Ahumada, R. 2012. Characterization and comparison of microphytoplankton biomass in the lower reaches of the Biobio River and the adjacent coastal area off Central Chile during autumn-winter conditions. *Latin American of Aquatic Research* 40 (4) :847-857.
- Lincura, O., Díaz Crovetto., G. 2021. Reconociendo Riesgos Invisibles en una Zona de Sacrificio : El Caso de la Organización Trabajadores Unidos Contra el Asbesto (TUCA) de la Comuna de Coronel, Chile. *Papeles de Trabajo* (40) : 59-94.
- Manly, B. 1997. Randomization, bootstrap and Monte Carlo. *Methods in Biology*. Second Edition, Chapman Hall, London
- Marone, E., Machado, E. C., Lopes R. M., Teixeira da Silva, E. 2005. Land-Ocean Fluxes in the Paranaguá Bay Estuarine System, Southern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 53(3-4), 169-181.
- Masotti, I., Aparicio-Rizzo, P., Yevenes, M.A., Garreaud, R., Belmar, L., Farías L. 2018. The Influence of River Discharge on Nutrient Export and Phytoplankton Biomass Off the Central Chile Coast (33°–37°S): Seasonal

- Cycle and Interannual Variability. *Front. Mar. Sci.* 5:423. doi: 10.3389/fmars.2018.00423
- Matsumoto, K., Tanioka, T., Rickaby, R. 2020. Linkages between dynamic phytoplankton C:N:P and the ocean carbon cycle under climate change. *Oceanography* 33(2):44–52. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.203>
- Mesias, J ; Matano, R., Strub P. 2003. Dynamical analysis of the upwelling circulation off central Chile. *Journal of Geophysical Research*, (108), 3085.
- MINAGRI. 2022. Citado Recurso Electrónico. Región del Biobío. Ministerio de Agricultura. URL : <https://www.minagri.gob.cl/region/viii-region-de-biobio/> Acceso : 6 de mayo de 2020.
- MINSEGPRES. 2000. Decreto 90. Establece Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Ministerio Secretaría General de la Presidencia de Chile. (MINSEGPRES). URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637> Acceso: 11 de abril de 2019.
- MMA. 2022. Citado Recurso Electrónico. Programa para la Recuperación Ambiental y Social de Coronel PRAS. Ministerio de Medio Ambiente. URL : <https://mma.gob.cl/pras/> Acceso : 24 septiembre de 2022.
- Moore, W. S. 2020. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2 : 59–88.
- Montecino, V., Lange, C. (2009). The Humboldt Current System : Ecosystem components and processes, fisheries and sediment studies. *Progress*

in *Oceanography*, (83) : 65-79.

Montecino, V; Strub, P; Tarazona, J; Chavez, F; Thomas, A., Baumgartner, T. 2006. Bio-physical interactions off western South America. *The Harvard Press*, 14: 329-390.

Montes, R., Quiñones, R.A. 1999. Efecto de la pluviosidad y del caudal de los ríos sobre los desembarques de las almejas *Protothaca* (Molina, 1782) y *Venus antiqua* (King Broderip, 1835) en la zona centro-sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 72(1) :13-30.

Nguyen, A., Nemery, J., Gratiot, N., Garnier, J., Dao, T., Thieu, V., Larulle, G. 2021. Biogeochemical functioning of an urbanized tropical estuary : Implementing the generic C-GEM (reactive transport) model. *Science of The total Environment*, 784, 147261.

ODEPA. 2022. Citado Recurso Electrónico. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias ODEPA. Información Regional 2018. URL: <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines> Acceso 8 de diciembre de 2022.

Ortega, C. 2018. Evaluación de la Información Disponible Asociada a la Cuenca del río Biobío para identificar los peligros antrópicos que afectan a la planta La Mochita, en el contexto de planes de seguridad del agua. Habilitación presentada para optar al título de Ingeniero Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 145 pp.

Padedda, B. M., Lugliè, A., Ceccherelli, G., Trebini, F., & Sechin, N. 2010.

Nutrient-flux evaluation by the LOICZ Biogeochemical Model in Mediterranean lagoons : the case of Cabras Lagoon (central-western sardinia). *Chemistry and Ecology*, 26(2), 147-162.

Pantoja, S., Iriarte, J.L., Gutierrez, M. H., & Calvete, C. 2010. The Southern Chile Continental Margin. Páginas 265-273, en : Carbon and nutrient fluxes in global continental margins : A global synthesis. Liu, K., Atkinson, L., Quiñones, R. A., Talaue-McManus, L. (Eds.). Springer-Verlag, New York.

Parada, E., Sobarzo, M., Figueroa, D., Castro, C. 2001. Circulación del golfo de Arauco en un período de transición estacional: Un nuevo enfoque. *Investigaciones marinas*, 29(1) ,11-23.

Penman, H.L. 1948. Evaporación natural de aguas abiertas, suelo desnudo y hierba. *Proc. Roy. Soc. London A193* :120-146.

Pizarro, J., Vergara, P., Rodríguez, J., Sanhueza, J., and Castro, J.2010. Nutrients dynamics in the 5 main river basins of the centre-southern region of Chile, *J. Hazards Mater.*, 175, 608–613.

Quiñones, R. A., Gutiérrez, M., Daneri, G., Gutiérrez D.A., González, H., Chávez, F. 2010. Pelagic carbon fluxes in the Humboldt Current System. Páginas 44-64, En: Carbon and nutrient fluxes in global continental margins: A global synthesis. K.K. Liu, L. Atkinson, R. A. Quiñones, L. Talaue-McManus (eds.), IGBP Series Book, Springer-Verlag New York. 741 pp

Quiñones, R., Montes, R. 2001. Relationship between freshwater input to the

coastal zone and the historical landings of the benthic/demersal fish *Eleginops maclovinus* in central-south Chile. *Fisheries Oceanography* 10 (4) : 311-328.

R Core Team. 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R version 3.6.1. The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rabalais, N. N., Turner, R. E., Díaz, R. J., Justić, D. 2009. Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science*, 66(7), 1528–1537. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp047>

Rabouille, C., Mackenzie, F. T., Ver, L. M. 2001. Influence of the human perturbation on carbon, nitrogen, and oxygen biogeochemical cycles in the global coastal ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(21), 3615–3641. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00760-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00760-8)

Rahn, D ; Garreaud, D. 2013. A synoptic climatology of the near-surface wind along the west coast of South America. *International Journal of Climatology*, (34)3: 792-780.

Redfield, A. 1934. Alfred Clarence. "On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton." James Johnstone memorial volume (1934): 176-192.

Registro Pesquero Artesanal 2022. Citado Recurso Electrónico. Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura. URL:<http://prod.registropublico.sernapesca.cl/reportes/regpescaadorespublico/index.php> Acceso: 18 de enero de 2022.

- Romero, H., Vásquez, A. 2005. Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. Revista EURE 31 (94) : 97-117.
- Rutllant, J.1972. Synoptic Meteorology of the Southern Hemisphere. Meteorological Monographs. (13) 35 : 139-211.
- Sabater, S., Acuña, V., Giorgi, A., Guerra, E., Muñoz, I., Romani, A. 2005. Effects of nutrient inputs in a forested Mediterranean stream under moderate light availability. Hydrobiologie 163 (4) : 479-496.
- Salcedo, J., Montiel, A., Barría, K. 2020. LOICZ nitrogen and phosphorus budget in proglacial marine area : Influence of pluviometric variation on nutrients flux. Revista de biología marina y oceanografía. 55, 191-201.
- Saldías, G ; Sobarzo, M y Quiñones, R.2019. Freshwater structure and its seasonal variability off western Patagonia. Progress in Oceanography, 174 : 143-153.
- Saldías, G. S., Sobarzo, M., Largier, J. L., Moffat, C., Letelier, R.2012. Seasonal variability of turbid river plumes off central Chile based on high-resolution MODIS imagery. Remote Sensing of Environment 123, 220-233.
- Salinas, J.A. 2017. Estimación de caudales mínimos en cuencas del secano costero de la Región del Biobío. Tesis de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad del Biobío, VIII Región, Chile. URL : <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/3239>.

- Santos, I. R., Chen, X., Lecher, A. L., Sawyer, A. H., Moosdorf, N., Rodellas, V., Tamborski, J., Cho, H.-M., Dimova, N., Sugimoto, R., Bonaglia, S., Li, H., Hajati, M.-C., Li, L.: 2021. Submarine groundwater discharge impacts on coastal nutrient biogeochemistry, *Nat. Rev. Earth. Environ.* 2: 307–323,
- Schneider, W. 2017. Physical oceanography and measured on water bottle sample during METEOR cruise. *Earth and Environmental Science*.
- SEIA. 2022. Citado Recurso Electrónico. Sistema de evaluación del impacto Ambiental. URL : <http://seia.sea.gob.cl> Acceso : 21 de agosto de 2019.
- SERNAPESCA. 2021. Citado Recurso Electrónico. Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura, Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura. URL : <http://www.sernapesca.cl/-informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura> Acceso : 4 de enero de 2021.
- Shaffer, G ; Hormazabal, G ; Pizarro, O., Salinas, S. 1999. Seasonal and interannual variability of currents and temperature off central Chile. *Journal of Geophysical Research*, (104) 29 : 951-961.
- Silva, N. D., Guzmán, & Valdenegro, A. 2000. Water and salt budget for Aysén Sound, Chile. En : Smith, S. V., V. Dupra region : carbon, nitrogen and phosphorus fluxes. Netherlands : LOICZ Reports & Studies, 55 – 64 pp.
- Smith, S., Hollibaugh, J. 2006. Water, salt, and nutrient exchanges in San Francisco Bay. *Limnology and Oceanography*, 51(1), 504-517.
- SNIFA. 2022. Citado Recurso Electrónico. Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental y Seguimiento Ambiental. Ministerio de Medio

Ambiente, Gobierno de Chile. <https://snifa.sma.gob.cl/> Acceso : 30 de enero de 2019.

Sobarzo, M. 1994. Oceanografía Física entre Punta Nugurne (35°57'S; 72°47'W) y Punta Manuel (38°30'S; 73°31'W), Chile: una revisión histórica (1936-1990). *Gayana* 2(1): 5-17.

Sobarzo, M. 1999. Surgencia costera sobre una plataforma continental limitada por cañones submarinos, Concepción, Chile central (36 ° 40'S - 73 ° 15'W). Tesis para optar al grado de Doctor en Oceanografía, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Sobarzo, M ; Bravo, L ; Donoso, D ; Garcés-Vargas, Schneider, W. 2007. Coastal upwelling the water column over the continental shelf off central Chile. *Progress in Oceanography* 75 (3): 362-382.

Sobarzo, M ; Saldías, G ; Tapia, F ; Bravo, L ; Moffat, C y Largier L. 2016. On subsurface cooling associated with the Biobío river canyon (Chile). *Journal of Geophysical Research* 121: 4568-4584.

Swaney, D., Giordani, G. 2007. Proceedings of the LOICZ. Workshop on Biogeochemical budget methodology and applications. Providence, Rhode Island: LOICZ Report & Studies, 205.

Swaney, D., Hong, B. 2009. The LOICZ budget toolbox documentation- LOICZ- Biogeochemical Modelling Node. Disponible en <http://nest.su.se/mnode/index.htm>.

Testa, G., Masotti, I., Laura, F. 2018. Temporal variability in net primary

- production in an upwelling area off central Chile (36°S). *Frontiers in Marine Science* (5) : 2296-7745.
- Thiel, M.; Macaya, E ; Batista, O ; Castro, L ; Escribano, R. 2007. The Humboldt Current System of Northern and Central Chile. *Oceanography and Marine Biology*, (45), 145-344.
- Tuholske, C., Halpern, B., Blasco, G., Frzier, M. 2021. Mapping global inputs impacts of human sewage in coastal ecosystems. *PLOS ONE* 16(11).
- Valle-Levinson, A., Atkinson, L., Figueroa, D., Castro, L. 2003. Flow induced by upwelling winds in an equatorward facing bay : Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 108 (2), doi :10.1029/2001JC00127263.
- Vegas-Vilarrúbia, T., Sigró, J., and Giralt, S. 2012. Connection between El Niño–Southern Oscillation events and river nitrate concentrations in a Mediterranean river, *Sci. Total Environ.*, 426, 446–453.
- Vergara, O., Echevin, V., Sepúlveda, H., Colas, F., Quinones, R. A. 2016. Modelling the seasonal dynamics of the Peru-Chile Undercurrent off Central Chile (30–40°S). *Continental Shelf Research*, 123, 61-79.
- Wen, Y., Schoups, G., van de Giesen, N. 2017. Organic pollution of rivers : Combined threats of urbanization, livestock farming and global climate change. *Sci Rep* 7 (1) : 1-9.
- Wong, Z., Saldías, G. S., Largier, J. L., Strub, P. T., & Sobarzo, M. 2021. Surface thermal structure and variability of upwelling shadows in the Gulf of Arauco,

Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016194.
<https://doi.org/10.1029/2020JC016194>

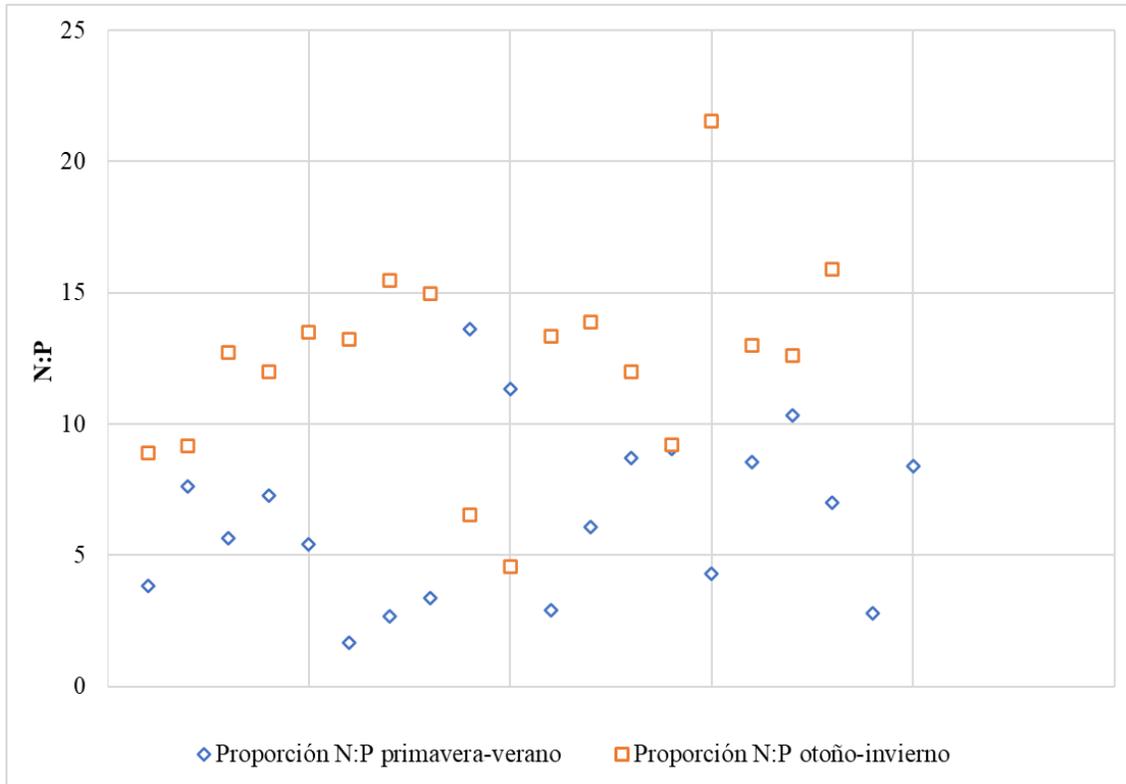
WRI. 2013. Citado Recurso Electrónico. Interactive map of eutrophication and hypoxia. World Resources Institute. URL : <http://www.wri.org/resource/interactive-map-eutrophication-hipoxia>
Acceso : 5 enero de 2019.

Wu, J. 1982. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *Journal of Geophysical Research*, 87 (12) 9704-9706.

Yévenes, M., Figueroa, R., Parra, O., Farías, L. 2015. Inter-annual variability of dissolved inorganic nitrogen in the Biobío River, Central Chile: an analysis base on a decadal database along with 1-D reactive transport modeling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12(1), 705-738.

Yuk, J., Aoki, S. 2011. Nitrogen and Phosphorus Budgets of Hamana Bay, Japan. *Journal of Coastal Research*, 64, 1510 - 1514.

ANEXOS



Variable	N	Méda	Desv.Est	Mín	Máx
N:P (p-v)	20	6.52	3.23	1.65	13.61
N:P (o-i)	23	12.36	3.08	4.56	21.55

Anexo 1

Relación N/P en el golfo de Arauco durante las estaciones primavera-verano (cuadrados naranjas) y otoño-invierno (rombos azules).