

# **Detección y pronóstico de floraciones algales nocivas (FANs) en la región de los golfos Norpatagónicos**

Silvia Inés Romero.<sup>1,2,3</sup>, Valeria D'Agostino<sup>4</sup> y Juan Pablo Pisoni J. P.<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> Dinámica Oceánica, Departamento de Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval (SHN)

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEN/UBA)

<sup>3</sup> Escuela de Ciencias del Mar (ESCM/FADARA/UNDEF)

<sup>4</sup> Centro para el Estudio de Sistemas Marinos (CESIMAR- CCT CONICET CENPAT). Puerto Madryn, Argentina

<sup>5</sup> Universidad Nacional de La Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB), Puerto Madryn, Argentina

**Resumen.** Se propone un enfoque socio-ecosistémico para abordar el alerta temprana de las FANs en los golfos norpatagónicos, basado en factores de riesgo y estrés. Esto requiere equipos inter- y transdisciplinarios con compromiso a largo plazo y recursos adecuados. Los saberes locales y regionales, como los de pescadores artesanales y operadores de avistaje de ballenas, son fundamentales. El proyecto en curso desarrolla herramientas para detectar FANs y condiciones ambientales propicias. Se busca generar alertas tempranas que anticipen ubicación, tamaño y trayectoria de floraciones nocivas, utilizando plataformas interoperables para visualizar productos satelitales y series de tiempo del ecosistema.

**Palabras Clave:** Golfos Norpatagónicos, FAN, ecosistemas marinos, defensa y soberanía.

## **1 Introducción**

### **1.1 Las floraciones algales nocivas (FANs) y su impacto en la Pcia. de Chubut**

Las mareas rojas, como suelen llamarse, deben su nombre al cambio de color en cuerpos de agua dulce o marina, debido a la proliferación extraordinaria de determinadas microalgas. Se trata de eventos naturales, que se producen en todas partes del mundo y generalmente son estacionales, pero con diferencias regionales. Generan impactos económicos, socio-ecosistémicos y sobre la salud de las poblaciones. Estos eventos pueden generar o no toxicidad, sin embargo, el nombre Floraciones Algas Nocivas (FANs, HAB por sus siglas en inglés) hace referencia a los daños en el socio-ecosistema terrestre y marino. Consecuentemente, sus efectos adversos han sido registrados en predadores superiores como aves marinas, lobos marinos, ballenas, delfines y seres humanos, los cuales han sufrido diferentes tipos de

daños gastrointestinales, neurológicos e inclusive la muerte. En particular, se espera que la eutrofización costera aumente en un 20% en los ecosistemas marinos para el año 2050. En el Mar Argentino las FANs han sido ampliamente investigadas e.g. [1], [2]. En [3] mencionan que los síndromes más graves tanto por extensión, frecuencia, toxicidad, y seres vivos afectados, son los provocados por la intoxicación paralizante que produce la proliferación del dinoflagelado *Alexandrium catenella*. En cuanto al ácido domoico, recientemente se demostró que existe transferencia de esta neurotoxina desde el fitoplancton al mesozooplancton y de ellos a las ballenas francas australes cuando se encuentran en el área de cría y reproducción de Península Valdés [4]. Estos autores documentaron que la ruta más importante del ácido domoico a través de la trama trófica fueron los copépodos calanoideos, principal presa de estas ballenas mientras se encuentra en Península Valdés.

En la provincia de *Chubut*, existe un *Plan Provincial para la Prevención y Control de Mareas Rojas* en el Litoral Marítimo de la provincia, aprobado bajo el Decreto N° 309/2011, que establece medidas para prevenir la intoxicación humana causada por el consumo de moluscos bivalvos y gasterópodos marinos. Se lleva a cabo un monitoreo que involucra la recolección y análisis de muestras de fitoplancton, agua, y moluscos, con especial atención en especies nocivas de fitoplancton y en la evaluación de parámetros ambientales. Estos análisis y estudios in situ y de laboratorio se vienen realizando en forma efectiva y continua desde hace más de 2 décadas para la determinación de *vedas por presencia de FANs* (Fig. 1). El Plan establece la participación de los organismos provinciales de Salud, Pesca, Ambiente y Turismo, el Instituto de Investigación de Hidrobiología (FCNyCS – UNPSJB) y el Centro para el Estudio de Ecosistemas Marinos (CENPAT - CONICET).



**Fig 1.** Golfos Norpatagónicos (Golfo Nuevo GN y Golfo San José GSJ). La imagen fue extraída del mapa interactivo de la página oficial de la provincia de Chubut que informa a la población sobre la ocurrencia de vedas al consumo de especies tóxicas,

## **1.2 Eventos de Mortalidad Masivos**

El 24 de septiembre de 2022, comenzó en los Golfos Norpatagónicos, un evento de Mortalidad Masivo (EMM por sus siglas en inglés) que incluyó hasta enero de 2023 (momento en el que se propuso el proyecto) un total de 30 ballenas francas australes (*Eubalaena australis*), siendo 26 de ellas adultas y 4 juveniles. Casi en simultáneo, se desarrolló un evento de marea roja, con unidades ratón muy altas, fuera de lo común y concentraciones de clorofila satelital extremadamente altas para la región. Por este motivo, la hipótesis que se manejó desde un comienzo fue que las ficotoxinas podrían ser las responsables de tales decesos. A enero de 2023, todos los institutos (que se mencionan en el párrafo siguiente y a lo largo del presente) que intervinieron en los análisis de las 6 necropsias iniciales sostenían la hipótesis de que la mortandad se debió a una floración algal nociva ocurrida en el Golfo Nuevo entre fines de septiembre y principios de octubre de 2022. Tanto el trabajo de [5] como así también aquellos de [6] evidencian la co-ocurrencia de floraciones de *Pseudo-nitzschia* con la producción de ácido domoico y la acumulación de esta neurotoxina en organismos del zooplancton. En [7] hacen una descripción detallada y multivariada de los eventos de muertes de ballenas en Península Valdés (GSJ y GN), demostrando que a partir de 2005 y hasta su publicación, las muertes fueron aumentando en cantidad y frecuencia, en su mayoría (90%) se trataron de crías menores de 3 meses de edad. También demostraron que hubo relación estadística positiva entre las muertes y la densidad mensual de diatomeas del género *Pseudo-nitzschia* (no así de *A. catenella*). A pesar de que la medición de ficotoxinas en bivalvos es el enfoque estándar para el monitoreo y la protección de la salud pública y que la identificación microscópica de floraciones nocivas y el recuento de organismos es el método estándar para evaluar el estado de las FANs, un protocolo operativo y muy efectivo en la provincia de Chubut, se están desarrollando cada vez más una variedad de nuevos métodos de detección remota, usando no solo satélites sino aviones, drones y sensores que van sumergidos en el agua.

## **2 Objetivo del Proyecto**

Desarrollar nuevas herramientas para detectar satelitalmente las FANs y las condiciones oceanográficas propicias para que se produzcan en la región de los golfos norpatagónicos. Generar pronósticos operativos que permitan anticipar las floraciones nocivas, su potencial ubicación, tamaño y trayectoria. El proyecto tiene una duración de dos años, comenzando en noviembre de 2023 y finalizando en julio/noviembre de 2025.

## **3 Región de Estudio e Instituciones participantes**

Los golfos Norpatagónicos, ubicados en la costa atlántica de Argentina, comprenden principalmente los golfos San Matías, San José y Nuevo. Estas áreas son de gran importancia ecológica debido a su alta productividad biológica, que sustenta una diversidad de especies marinas, incluyendo aves, mamíferos marinos, y peces comerciales. Además, estos ecosistemas desempeñan un rol crucial en la economía

regional, apoyando actividades como la pesca, la acuicultura, y el turismo, particularmente el avistaje de ballenas y otras especies. La combinación de su valor ecológico y económico convierte a estos golfos en áreas prioritarias para la conservación y gestión sostenible. Para abordar el problema de la alerta temprana de las FANs, es necesario un enfoque socio-ecosistémico regional basado en factores de riesgo o estrés. Estos problemas requieren, debido a su complejidad, alcanzar un nuevo nivel de comprensión y abordaje del tema. Hacen falta equipos de investigación (Fig 2 y Tabla 1) inter- y transdisciplinarios y *un compromiso significativo de recursos a largo plazo*, suficiente para respaldar las prioridades regionales y nacionales e impulsar futuras decisiones de gestión costera.



**Fig 2.** Logotipo del proyecto incluyendo los logos de todas las instituciones provinciales y nacionales participantes. La figura central representa una especie de fitoplancton. El color rojo en el centro representa la marea roja o FAN, el amarillo arriba representa al Sol, fuente de energía para la fotosíntesis, el verde abajo indica el cambio de coloración en el agua cuando hay presencia de fitoplancton que contiene clorofila, el celeste azulado a ambos lados, representa el cielo y el agua clara.

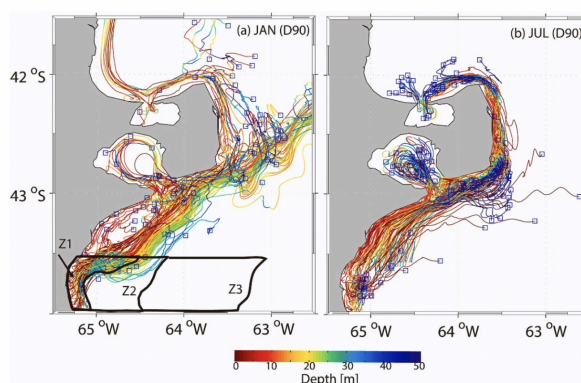
**Tabla 1.** Los expertos de las diferentes instituciones nacionales y provinciales que participan del proyecto están listados en la presente tabla.

NOMBRE	INSTITUCIÓN-Especialidad
Mariano Coscarella	CESIMAR - Ballena Franca Austral
Gabriela Williams y equipo	CESIMAR - Bio-óptica y nutrientes
Paula Bermejo	CESIMAR - Bio-óptica y nutrientes
Juan Gabriel Vazquez	CESIMAR - CTD/salinidad
Juan Pablo Pisoni	CESIMAR - CTD/salinidad - Oceanografía Física
Leilén Gracia Villalobos	CESIMAR - Fitoplancton/ficotoxinas
Mariana Degrati	CESIMAR - Zooplancton/ficotoxinas
Valeria D'Agostino	CESIMAR - Zooplancton/ficotoxinas
Carolina Tauro y Equipo	CONAE - Sensoramiento remoto
Emiliano A. Crippa	Dirección de Salud Ambiental (Ministerio de Salud) - Chubut
Diego Saban	análisis de toxinas en moluscos
Equipo técnico Ministerio de Ambiente (Chubut)	Equipo técnico del Ministerio de Ambiente y Control del Desarrollo Sustentable (MAyCDS)
Juan Emilio Sala	IBIOMAR - Pampa Azul - Sistemas socio-ecológicos costeros
A. Viviana Sastre	IIH-UNPSJB - Programa Marea Roja Chubut

NOMBRE	INSTITUCIÓN-Especialidad
Noelia Uyua	IIH-UNPSJB - Programa Marea Roja Chubut
Norma Santinelli	IIH-UNPSJB - Programa Marea Roja Chubut
Maria Guillermina Ruiz, Nora Montoya y equipo	INIDEP - Programa Química Marina y Marea Roja
Ezequiel Cozzolino	INIDEP - Sensoramiento Remoto
Mariano Tonini	IPATEC - modelado numérico Dinámica oceánica
Secretaria de Pesca	PESCA - CHUBUT
Axel Toledo	SHN-Oceanografía. Dinámica Oceánica
Celeste Antieco	SHN-Oceanografía. Dinámica Oceánica
Fernando Becker	SHN-Oceanografía. Dinámica Oceánica
Marcela Charo	SHN-Oceanografía. Dinámica Oceánica
Silvia Romero	SHN-Oceanografía. Dinámica Oceánica
Sandra Torrusio y equipo	UNLP - Sensores Remotos Información Geoespacial

### 3.1 La circulación de los golfos Norpatagónicos

Según resultados de un modelo numérico de alta resolución [8] el golfo de San José presenta una gran conectividad e intercambio con el golfo San Matías. El Golfo Nuevo muestra un mayor intercambio y conectividad con toda la costa de la Península de Valdés. Ambos golfos presentan un nivel de conectividad muy bajo entre sí, de menos del 10%. El Golfo Nuevo es más retentivo, posee un tiempo de residencia de más de 180 días. El golfo de San José en cambio, presenta tiempos de residencia de solo 20 días, mostrando que sus aguas se renuevan mucho más.



**Fig 3.** Fig 9 de [8] Trayectorias de partículas después de 90 días de simulación. Las partículas se liberaron sobre la región costera de la Plataforma Patagónica y se distribuyeron uniformemente con la profundidad. (a) Liberación en enero (b) Liberación en julio. Los colores indican la profundidad de las partículas. Solo se muestran el 25% de las trayectorias. La posición final está indicada por un pequeño rectángulo azul.

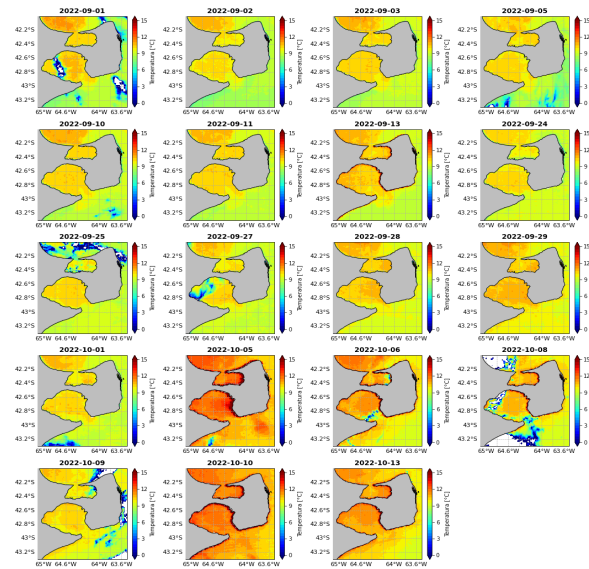
## 4 Datos Técnicos y Metodológicos

El proyecto se basa en la combinación de múltiples sistemas de observación del océano, con un enfoque significativo en la teledetección. Se utilizarán distintos sensores y satélites para obtener variables ambientales. Además, se integrarán datos meteorológicos provenientes de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en Puerto Madryn y Rawson, así como datos de campo obtenidos de programas de monitoreo de FANs provinciales y nacionales, de las campañas propias del presente proyecto y datos publicados por organismos no gubernamentales y de conservación.

### 4.1 Sistemas de Observación

#### 4.1.1. Teledetección Satelital

Se utilizarán diversos sensores y satélites (MODIS, VIIRS, Sentinel 3, entre otros) para obtener datos sobre variables bio-ópticas como la concentración de clorofila-a, la radiación fotosintéticamente disponible (PAR), el coeficiente de atenuación difusa en 490 nm y la turbidez. Además, se trabajará con la temperatura superficial del mar (Fig.4) proveniente de sensores infrarrojos y de microondas. Los datos in situ recopilados contribuirán a la calibración de los sensores de la misión satelital SABIA-Mar, desarrollada por la CONAE, cuyos principales objetivos incluyen proveer información y productos para el estudio de ecosistemas marinos, el ciclo del carbono, la dinámica costera y los hábitats marinos.

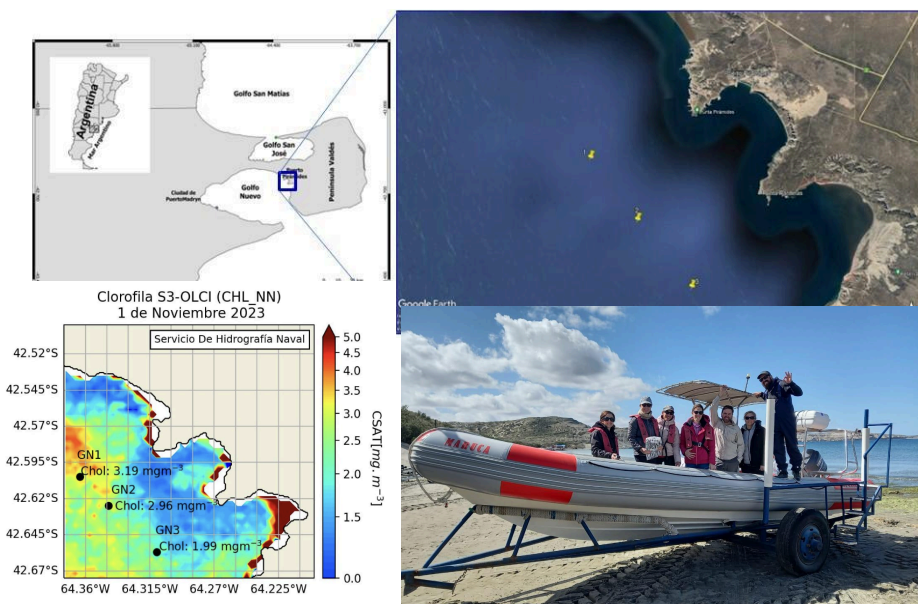


#### 4.1.2 Datos In Situ

Las mediciones in situ de fitoplancton en zonas de frecuente muestreo para FANs se realizan en forma sistemática desde el plan de monitoreo para vedas. En ese marco, se llevarán a cabo mediciones extra con fluorómetros, radiómetros y perfiladores de temperatura y conductividad, montados con sensores de oxígeno. Las mediciones de nutrientes, ácidos domoico y okadaico en organismos bioacumuladores como caracoles, mejillones y vieiras, las viene realizando la provincia. Se planea integrar toda la información disponible del evento 2022 para estudiar satelitalmente las condiciones previas, durante el evento y posteriores y así encaminar el pronóstico a futuro alimentando la plataforma inicialmente con datos satelitales de temperatura y clorofila. Se dispone además de una serie de tiempo de 10 años de temperatura superficial del mar en el Muelle Luis Piedra Buena de Puerto Madryn.

##### 4.1.2.1 Campañas Cortas

Se ha planificado llevar adelante 10 campañas de medición cortas, con recolección de variables biogeoquímicas y físicas en distintos sitios durante los meses de septiembre/octubre. El área seleccionada para iniciar la integración de la información multidisciplinaria abarca a los Golfos Nuevo y San José vinculada a la región de mortandad masiva de ballenas en 2022 (Golfo Nuevo).



**Fig 5.** Área de estudio. Estaciones de muestreo en el márgen NE del Golfo Nuevo frente a Bahía Pirámides. Integrantes campaña 1 (Paula Bermejo, Valeria D'Agostino, Mariana Degradi, Leilén Gracia Villalobos, Juan Gabriel Vázquez, Gabriela Williams) realizada el 1/11/2023.

## 4.2 Desarrollo de Herramientas y Productos

*Plataforma Interoperable:* Se creará una plataforma en el Geoportal del SHN, para el procesamiento rutinario y automatizado de productos satelitales derivados de sensores ópticos. Esta plataforma cargará imágenes y datos de diferentes satélites y generará un semáforo o barómetro en el que, combinando estas variables y la interpretación experta, se asignen 3 ó 4 clases (Moderada-Abundante-Alta-Muy Alta) para caracterizar a la potencial presencia e intensidad de la floración nociva. *Modelos Hidrodinámicos:* Se utilizarán modelos de trayectorias de partículas. Los modelos existentes en la región serán clave para este análisis. *Procesamiento y Corrección de Datos:* Se aplicarán algoritmos especiales para zonas abiertas y costeras, la corrección atmosférica es diferente. Se tendrán en cuenta los datos faltantes por cobertura nubosa. Cada satélite y cada sensor, tienen características diferentes, y deben ser tratados por separado (Modis, Viirs, Sentinel, etc.)

## 4.3 Tecnologías Complementarias

Imágenes SAR y Radares. Uso de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) de la misión SAOCOM y otras misiones internacionales para monitorear la rugosidad de la superficie del mar, detectar manchas oscuras (derrames de hidrocarburos y aceites biogénicos) y la presencia de barcos que pueden potencialmente afectar al desarrollo de estas floraciones. Datos de Clorofila-a. Aunque el producto clorofila-a satelital no detecta directamente especies/géneros nocivos, permite identificar floraciones anómalas por la cantidad inusual de células. La cuantificación de la extensión espacial, intensidad y duración de estos eventos se realiza con datos de clorofila-a, mientras que el muestreo in situ de fitoplancton y otros organismos es fundamental para interpretar los datos y lograr pronósticos precisos. Uso de Drones para Monitoreo Ambiental en Patagonia. Sensores Ópticos Hiperespectrales. Estos sensores permiten la captura de imágenes en múltiples longitudes de onda, proporcionando una detallada información sobre la composición y salud de las distintas coberturas (por ejemplo, cobertura vegetal y características del agua). Cámaras Infrarrojas: Utilizadas para detectar variaciones de temperatura y características no visibles en el espectro óptico visible, como el estrés en la vegetación o la presencia de contaminantes. Deben tenerse muy en cuenta los vientos intensos en la Patagonia, que pueden afectar la estabilidad y el rendimiento de los drones, es decir asegurarse de que el dron pueda operar en las condiciones de viento típicas de la región. La operación segura del dron en condiciones desafiantes debe tener en cuenta también baterías de repuesto y sistemas de estabilización.

## 5 Avances del Proyecto

Salidas de Campo: Se realizaron dos salidas de muestreo en el Golfo Nuevo el 1 y 23 de noviembre de 2023, donde se llevaron a cabo diversas actividades de recolección de datos y análisis en estaciones específicas. Participantes: Paula Bermejo, Valeria D'Agostino, Mariana Degradi, Leilén Gracia Villalobos, Juan Gabriel Vázquez y



Gabriela Williams. Incluyen expertos en bio óptica, nutrientes, fitoplancton, zooplancton y salinidad. Se recolectaron muestras en superficie, máximo de clorofila y fondo, evaluando turbidez, sólidos suspendidos, clorofila-a, absorción por material particulado, pigmentos y nutrientes. Los datos de la primera campaña ya están listos para su integración junto con las imágenes satelitales. Se están planificando tres salidas adicionales en septiembre y octubre de 2024. Al momento de la generación de este documento ya han aparecido en el GSJ (15/8/24) especies tóxicas (Alexandrium) en las muestras de red vivas sin fijar en proporción significativa (V. Sastre comunicación personal). Información satelital: se está trabajando sobre la generación de índices basados en la bibliografía de trabajos internacionales para zonas que la provincia de Chubut tiene como puntos destacados como Playa Pardelas, Playa Paraná (GN) y Larralde, Riacho, y Playa Bengoa (GSJ). Instrumental adquirido con el proyecto: Actualizarse y comenzar a utilizar el instrumental adquirido, que cuenta con tecnología y capacidades mejoradas respecto a aquellos con los que se contaba en CESIMAR. La idea es poder comparar mediciones de las 2 primeras salidas con las que siguen que ya contarán con los equipos modernos. Próximos Pasos: Procesar y analizar las muestras recolectadas para integrar toda la información ambiental y biológica, además de la información histórica y de las vedas. Trabajar en el geoportal del SHN y en el barómetro de FANs.

## **6 Conclusiones y Perspectivas Futuras**

El proyecto avanza conforme a lo previsto, con la realización de campañas de muestreo y el análisis de datos iniciales. La integración de datos de campo y satelitales está en desarrollo, y se continúa trabajando para cumplir con los objetivos establecidos y mejorar la capacidad de pronóstico de las FANs en la región de los Golfos Norpatagónicos. Tenemos desafíos financieros: Los fondos disponibles se agotan con las próximas 3 campañas debido a la inflación y a la recepción solo del 75% del monto total solicitado. Se están buscando activamente nuevos fondos para asegurar la realización de las 10 salidas de campo previstas.

## **7 Agradecimientos**

Agradecemos a IF-2023-62680912-APN-DNAEII#MCT. Pampa Azul, MINCyT. Resolución 411/2023. A las instituciones a las que pertenecemos y a todos los colaboradores que contribuyen con este proyecto, incluyendo al Servicio de Hidrografía Naval, CESIMAR/CENPAT, y todas las entidades participantes.

## **8 Referencias**

1. Gracia Villalobos, L., Santinelli, N.H., Sastre, A.V., Marino, G., Almandoz, G.O., 2019. Spatio-temporal distribution of paralytic shellfish poisoning (PSP) toxins in shellfish from Argentine Patagonian coast. *Heliyon* 5 (6), 1-9
2. Sastre, A. V., Santinelli, N. H., Solís, M. E., Pérez, L. B., Ovejero, S. D., Villalobos, L. G., ... & D'Agostino, V. C. (2018). Harmful marine microalgae in coastal waters of Chubut (Patagonia, Argentina). In *Plankton Ecology of the Southwestern Atlantic* (pp. 495-515). Springer, Cham.

3. Montoya, N. G., Carignan, M. O., & Mattera, M. B. (2020). Toxinas Algales en el Mar Argentino: nuevos hallazgos, nuevos desafíos. *Acta toxicológica argentina*, 28(3), 21-30.
4. D'Agostino, V.C., Krock, B., Degradi, M., Sastre, V., Santinelli, N., Krohn, T., Hoffmeyer, M.S. 2019. Occurrence of toxigenic microalgal species and phycotoxin accumulation in mesozooplankton in Northern Patagonian Gulfs, Argentina. *Environmental toxicology and chemistry* 38(10), 2209-2223.
5. Hoffmeyer, M. S., Dutto, M. S., Berasategui, A. A., Garcia, M. D., Pettigrosso, R. E., Almandoz, G. O., ... & Krock, B. (2020). DOMOIC acid, *Pseudo-nitzschia* spp and potential vectors at the base of the pelagic food web over the northern Patagonian coast, Southwestern Atlantic. *Journal of Marine Systems*, 212, 103448.
6. D'Agostino, V.C., Degradi, M., Sastre, V., Santinelli, N., Krock, B., Krohn T., et al., 2017. Domoic acid in a marine pelagic food web: Exposure of southern right whales *Eubalaena australis* to domoic acid on the Península Valdés calving ground, Argentina. *Harmful algae* 68, 248-257.
7. Wilson, C., Sastre, A. V., Hoffmeyer, M., Rowntree, V. J., Fire, S. E., Santinelli, N. H., ... & Uhart, M. M. (2016). Southern right whale (*Eubalaena australis*) calf mortality at Península Valdés, Argentina: Are harmful algal blooms to blame? *Marine Mammal Science*, 32(2), 423-451.
8. Tonini, M.H., E. D. Palma, J. P. Pisoni., 2022. Modeling the seasonal circulation and connectivity in the North Patagonian Gulfs, Argentina. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 271.