

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud

Tesis de Grado para acceder al título de Licenciatura en Ciencias Biológicas



“Dinámica del plancton asociada a la brisa marina en la costa oeste del Golfo Nuevo”

Alumno: Adrián Gustavo Lohse

Director: Dr. Rodrigo Gaspar Soria

Co-director: Dr. Juan Pablo Pisoni

Puerto Madryn

Agosto de 2024

# Índice

Índice .....	2
Agradecimientos .....	3
Introducción .....	5
Objetivo general.....	7
Materiales y métodos.....	8
Resultados.....	17
Discusión .....	26
Conclusiones.....	29
Referencias .....	30

## Agradecimientos

**A la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, sede de Puerto Madryn:** Por ser mi casa, el lugar que me vio crecer y el nido que impulsa a volar a todos y cada uno de nosotros, los estudiantes empujándonos a ser la mejor versión de nosotros mismos.

**A los profesores de esta casa:** Que hacen de esta carrera una experiencia humana, dejándonos no solo conocimiento, pero sino también enseñanzas de vida.

**A la cátedra de Zoología General:** A Laurita, Sergio, Clarita, Marian, Cande, Cami, Ayu, Sofi: ¡Gracias! Por abrirme las puertas de su cátedra, por confiar en lo que tenía para aportar a mis compañeros y por dejarme descubrir que la docencia es algo que se puede disfrutar entre risas y buenos momentos inculcando buenas prácticas y transmitiendo el conocimiento con paciencia y conciencia.

**A la cátedra de Diversidad Animal I:** Por aceptarme en ese equipo que entre renegadas de José y chistes del Juli la hemos pasado muy bien.

**Al departamento de alumnos:** Gaby y Lore. Eternamente agradecido por su presencia y proveer siempre soluciones cuando he llegado con mis problemas académicos, por hacer su trabajo con amor y paciencia para con todos los estudiantes. Se han ganado un lugar en el corazón de todos nosotros.

**A mis directores:** Gaspar y Juan Pablo, por el enorme e increíble apoyo que me han dado para que esta tesis llegue a ser lo que es hoy. Que entre enojos y risas han hecho de este proceso algo que disfruté de transitar y voy a recordar toda mi vida con una gran sonrisa.

**Al jurado de esta tesis:** Lic. J. Klaich, Dra. E Barbieri y Dr. A. Crespi. A ellos muchas gracias por el tiempo dedicado y las correcciones realizadas que ayudaron a mejorar e interpretar con mayor claridad los resultados presentados en esta tesis. Muchas gracias!!

**Al equipo del muelle:** Gaspar, Juan Pablo, Fer, Flavio, Andrés, Leo, Agustín y otros como Oscar Frumento que han sido parte del proceso. Por haber hecho que la experiencia de una simple pasantía haya sido una gran anécdota que terminó convirtiéndose en mi tesis. Por esos partidos de truco y los asados en la punta del muelle.

**A mi Familia:** Por su confianza y apoyo incondicional, con mis idas y vueltas, con sus consejos y retos. Acompañando en los momentos más complicados y en los más felices siempre como un equipo.

**A mi familia Madrynense:** Gina, Ceci, Juli, Ari, la colo Viky, Cami, Agus, Julito, Andres, Hailant, Pablo Gallego, Santi Biaso, Juli y Dinito, Gastón Garcia, el Colo, Gustavito, Flor Van Gelderen, Fefe, Mari Matos, Cande, Marti, Abi, Facu, Juanchi, Marchu, Deby, Gaby Chara, Martin Goity, Kata, y TANTOS OTROS que me han acompañado durante esta carrera, que hemos vivido los momentos más lindos de mi vida, tantos fogones, campamentos, buceos y fiestas. Ojalá que la vida siempre nos encuentre cerca y disfrutando como lo hemos hecho en esta etapa.

**Al Agus:** El hermano que me regalo la vida, el que me acompañó desde el inicio de esta carrera y que codo a codo la hemos sabido llevar compartiendo tantos mates y horas sentados frente a cuadernos y libros. Acompañándome y motivándome tanto para el estudio como para todas las aventuras que hemos compartido.

**Al Área Náutica:** Y a toda la banda que la conforma: Santi, Néstor, Luqueti, Marcos, Mari, Deby P, Javi, Juli, Fran, Cami, Guada, Martin, Pablito, Anna. Por ser mi universidad de la náutica en la que lograron que un pibe de Plaza Huincul haga del mar hoy un estilo de vida en donde viví mis mayores felicidades.

**A Abramar Buceo:** Marian y Fer, por formarme y confiar en mí dándome un lugar para crecer laboralmente mientras también comprendieron y me acompañaron dándome el lugar para que pueda seguir avanzando con este proceso.

**A la familia Aquaturiana:** Helga, Marian, Beduin, Ernest, Lauti, Nahue. Por TANTISIMOS grandes momentos, por esa libertad que me dieron haciendo que un trabajo se vuelva una risa constante y llenando los días de grandes momentos y profundas conversaciones entre birras.

**A la gente del Club Andino Puerto Madryn:** Albert, Pela, Santi, Iva, la negra Leila, Chirtophe, Fede y Gaston Arribere, Berni, Gero y Neri, Garri, Juancito Cuneo, Carancho, Fede A, Oscar, Tom, Juan Martin, Bruno y Sabri, Caren, Chinita, Gero y cuantos más. Gracias por hacerme parte de esa familia que entre viajes, asados y pegues tanto hemos disfrutado.

**A la banda surfera:** Lucas, Facu, Gonza, Juli, Javi, Agus, Kang y Flor, Cande, Enano: Por tantas risas, gritos, enojos y cagadas de olas en el agua, campamentos, fogones y comidas.

**Al Dr. Flavio Papparazzo:** Por la gentileza de cederme los datos de química para utilizarlos en esta tesis.

**Al Conicet CENPAT:** Por brindarme el espacio para la realización del procesamiento de los datos y el análisis de los mismos.

**A la Administración Portuaria de Puerto Madryn:** Por brindar el lugar de buena voluntad para la realización de este y tantos otros muestreos.

Esta tesis fue financiada parcialmente por los proyectos PICT 2013-1295 y PICT 2017 1715 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. Investigadores Responsables: Dr. J. P. Pisoni y Dr. G. Soria, respectivamente.



De Izquierda a derecha: Gaspar Soria, Agustin Biasotti, Fernando Dellatorre, el autor, Juan Pablo Pisoni, Andrés Rivas y Flavio Papparazzo. Foto tomada durante el trabajo de campo en la cabecera del muelle Cte. L. Piedrabuena. Verano 2015-2016.

## Introducción

El estudio de los mecanismos de transporte en el mar que se dan de forma perpendicular a la costa es esencial para entender el intercambio de organismos planctónicos, materia orgánica, inorgánica y cambios en las propiedades físicas y químicas del agua entre zonas costeras y de plataforma (Pineda, 1991). En zonas costeras no estuariales, como la costa de la ciudad de Puerto Madryn, en el Golfo Nuevo, los fenómenos oceanográficos que ocurren a escalas temporales breves (del orden de horas), gobiernan procesos locales minimizando la influencia de otros procesos que ocurren a mayores escalas temporales y espaciales (Dellatorre, 2009). La circulación entonces, está dominada principalmente por la marea, el viento y la interacción de las mismas con la topografía (Rivas & Ripa, 1989). En ciertas regiones costeras, los frentes de marea interna (*internal tidal bores*) generan variación en la temperatura del agua por medio de su dinámica relacionada con los ciclos de la marea (Pineda, 1991). A su vez, los vientos son generadores de transporte perpendicular a la costa (*cross-shore*) pueden producir ciertas condiciones surgencia (*upwelling*) y/o hundimiento (*downwelling*) de masas de agua con el consiguiente transporte de plancton, nutrientes, contaminantes, etc.

Sobre las regiones costeras, el calentamiento diurno durante los meses de primavera y verano favorece el desarrollo de movimiento de masas de aire a escala local conocido como brisa marina (Haurwitz, 1947; Gille et al., 2003). En este proceso la circulación de aire en capas bajas de la atmósfera se desarrolla desde el mar hacia la tierra y es impulsada por un gradiente de presión generado por diferencias de temperatura entre la tierra y el agua de mar haciendo que su intensidad llegue a su máximo al mismo tiempo que el gradiente de temperatura es mayor (Haurwitz, 1947; Gille et al., 2003). En zonas costeras, la brisa marina se constituye como uno de los principales componentes que generan movimiento de agua. En nuestra región, la brisa marina se observa como una rotación en la dirección del viento alrededor del mediodía desde el sector oeste al sector este-noreste. Este fenómeno, como también vientos provenientes del mar (de intensidades medias mayores a  $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) generan apilamiento de agua sobre la costa y hundimiento de la masa de agua superficial, haciendo que ésta desplace la capa de agua de fondo hacia afuera de la costa, evidenciándose como un aumento de temperatura de las capas más profundas. Por el contrario, a escalas temporales cortas, los vientos provenientes desde el continente generan surgimiento de aguas de la capa de fondo impulsando las aguas superficiales lejos de la costa, evidenciándose como un descenso en la temperatura del agua superficial (Dellatorre, 2009; Getino Mamet, 2022; Sayavedra, 2024). Estos procesos son evidentes cuando la columna de agua presenta estratificación térmica entre el fondo y la superficie y cuando el fenómeno de la brisa se hace presente, ocurriendo en la zona de Puerto Madryn principalmente en primavera y verano (Dellatorre et al., 2012).

En latitudes medias durante el verano, la columna de agua muestra una capa superficial cálida y menos densa y una capa subyacente fría y más densa. Un gradiente intenso de densidad (picnoclina) en la columna de agua es lo que mantiene separadas estas capas, actuando como una barrera de intercambio de propiedades entre ambas capas. En este contexto, el fitoplancton queda restringido a la capa superficial, lumínica, pero con escasos nutrientes, mientras que la mayor concentración de nutrientes se ubica en la capa profunda (Mann et al., 2006).

El crecimiento del fitoplancton está influenciado por factores de control y factores limitantes. Los factores de control están relacionados entre otras cosas con la temperatura del agua, el balance iónico y el pH, gobernando el ritmo de la fotosíntesis. Por otro lado, entre los factores limitantes se encuentran la intensidad de la luz, las horas de luminosidad y la concentración de nutrientes como limitantes de las reacciones químicas necesarias para el crecimiento del fitoplancton (McCombie, 1953). Para que el crecimiento del fitoplancton se desarrolle de forma exitosa, la proporción necesaria de nutrientes debe ser próxima a 1:16:106 de P: N: C (Redfield et al., 1958). En el caso del fitoplancton que presenta paredes celulares “duras” como las diatomeas, el silicio cumple un rol fundamental para su crecimiento (Bristow, 2017). Debido a esto, Brzezinski (1985) incluye silicio a esta relación estequiométrica y por lo tanto la proporción es próxima a C:Si:N:P = 106:15:16:1. De acuerdo a estas proporciones la ley de mínimos de Leibig establece que cualquier constituyente del agua de mar presente en cantidades mínimas relativas a lo requerido para el crecimiento de los organismos se convertirá en factor limitante para el crecimiento del fitoplancton. En la mayoría de los mares del mundo el factor limitante es el nitrógeno inorgánico disuelto en agua (Bristow, 2017). Esto enfatiza aún más la importancia que cobran los procesos oceanográficos en el desarrollo del plancton en general y el fitoplancton en particular, haciendo que cualquier ruptura en la estabilidad de la columna de agua, como procesos de mezcla vertical, surgencia, descarga de ríos, mezcla por corrientes de marea u ondas internas, genere reabastecimiento de nutrientes en la capa eufórica (Pickard & Emery, 1990; Lucas et al., 2011).

Muchos invertebrados costeros y peces tienen ciclos de vida complejos con fases larvianas planctónicas, como también existen organismos que desarrollan su ciclo de vida completamente en el plancton. Los procesos de transporte *cross-shore* son críticos para las poblaciones bentónicas costeras y comunidades a distintas escalas espacio-temporales. Estos procesos influyen el transporte de organismos entre poblaciones disjuntas y son el principal mecanismo para reaprovisionar (demográficamente) poblaciones cercanas a la costa luego de, por ejemplo, eventos reproductivos, migraciones estacionales o recuperación poblacional en caso de grandes disturbios, entre varios procesos ecológicos y evolutivos. La migración vertical es una característica común en las comunidades de zooplancton. Los migrantes verticales (como los copépodos) normalmente se encuentran más profundos durante el día y menos profundos durante la noche (Hays, 1995). La hipótesis de evasión de depredadores sugiere que ciertas especies de zooplancton pueden ser fácilmente percibidas y consumidas si están cerca de la superficie durante el día. Por lo tanto, puede haber una ventaja selectiva para que tales especies descendan durante el día para que estén menos disponibles para los depredadores visuales (Hays, 1995). El transporte horizontal es modulado por la interacción entre la dinámica del agua y los rasgos de comportamiento de las larvas (Dellatorre et al., 2014). El comportamiento de natación vertical de las larvas puede cambiar a lo largo de la ontogénesis, las diferentes etapas larvales pueden mostrar patrones de dispersión diferentes dependiendo de la velocidad de las distintas capas de agua (Tankersley & Forward Jr., 2007) y es aquí donde evolutivamente los procesos de transporte *cross-shore* puede operar facilitando el retorno-alejamiento de los organismos hacia y desde el borde costero (Tankersley & Forward Jr., 2007; Dellatorre et al., 2014).

Forzantes físicos como el viento y la marea pueden generar cambios significativos en las corrientes de una bahía en escala temporal de horas, pudiendo hacer que las migraciones verticales propias de los ciclos de luz-oscuridad del plancton se vean afectadas y modificadas por las corrientes generadas por los cambios en estos forzantes (Dellatorre et al., 2012). El uso de medición de alta frecuencia (siguiendo ciclos de marea a escala de horas) es clave para entender la dinámica del plancton más allá de los ciclos estacionales que responden a patrones oceanográficos de mayor escala y magnitud (Baleani et al., 2024). En este contexto, en el presente trabajo se propone como objeto de estudio la interacción entre el zooplancton y los movimientos de masas de agua producidos en el borde costero debida a los forzantes ambientales que ocurren a escala temporales cortas (horarias, semidiurnas y diurnas).

## Objetivo general

Estudiar el efecto de forzantes físicos como el viento y la marea sobre la distribución y abundancia del plancton en la columna de agua en la costa oeste del Golfo Nuevo durante la temporada de verano.

## Objetivos específicos

- Analizar datos de viento, temperatura del agua y marea como forzantes físicos de la dinámica costera.
- Analizar la composición y abundancia de plancton marino en la columna de agua.
- Evaluar la dinámica del plancton en la columna de agua relacionado a los forzantes físicos.

En los objetivos de este trabajo el plancton analizado se basó principalmente en el zooplancton, y en particular se utilizaron a los copépodos como indicador principal del mismo dada la alta abundancia relativa de Copepoda en relación a otros grupos taxonómicos y como un proxy para describir los fenómenos de distribución y abundancia asociados a los forzantes ambientales.

## Materiales y métodos

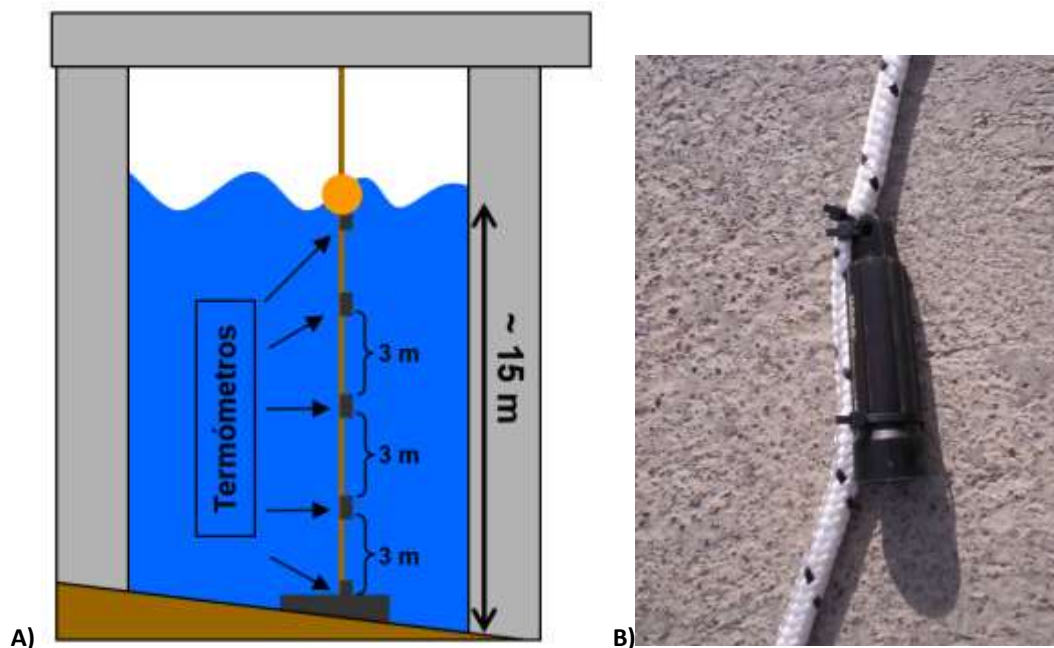
El presente estudio fue realizado durante los días 17 y 20 de enero de 2016 en el Muelle Comandante Luis Piedrabuena ubicado en la Bahía Nueva, frente a las costas de Puerto Madryn. El sitio de muestreo se emplazó en la cabecera del muelle, ubicado a 700 m de la costa y a 15 metros de profundidad media (Fig. 1). La Bahía Nueva se encuentra ubicada en la costa oeste del Golfo Nuevo, un golfo relativamente pequeño de forma elíptica, con una superficie de 2440 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima de 184 m, y que se conecta a la plataforma continental por una boca de unos 17 km de ancho (Mouzo et al., 1978). El mismo cuenta con una variación térmica media de 8°C entre la temporada de invierno y la de verano contando con temperaturas de alrededor de 9°C en la temporada invernal y llegando a 22°C en la temporada estival (Pisoni, 2017; Biasotti, 2024). El régimen de mareas es semidiurno con amplitudes de 1,83 m en mareas de cuadratura y 5,73 m con mareas de sicigia (Servicio de Hidrografía Naval). Los vientos predominantes están caracterizados por ser fuertes y constantes del oeste debido a dos anticiclones ubicados en el Océano Atlántico y el Océano Pacífico y un cinturón de baja presión ubicado alrededor de los 60°S (Paruelo et al., 1998). En latitudes medias, como el área de interés de la presente Tesis, es esperable que en ciertas regiones la columna de agua se estratifique en primavera-verano y durante el invierno se mezcle completamente por pérdida de calor superficial y convección vertical (Rivas & Ripa, 1989).



Figura 1: Área de estudio, ubicación de la estación oceanográfica en la cabecera del muelle Comandante Luis Piedra Buena y de la estación meteorológica en el predio del CENAPT, Puerto Madryn, Chubut.

## Medición de variables físicas

**Temperatura del agua de mar:** para medir la temperatura del agua se utilizaron 5 termómetros (Fig. 2B) los cuales se encontraban fijados a un cabo anclado al fondo con un muerto de cemento y en su extremo superior se encontraba amarrado al muelle (Fig. 2A). La profundidad media en el sitio de muestreo fue de 15 metros. El fondeo consistió de 5 termómetros, 4 dispuestos a 0, 3, 6, 9 m respecto al fondo y uno colocado a 30 cm por debajo de una boya de superficie para tomar datos de forma independiente de la altura de la marea u oleaje. Cada termómetro fue programado para registrar la temperatura cada 10 minutos. Posteriormente se trabajó con promedios horarios para cada profundidad.



**Figura 2:** Diagrama de la distribución de los termómetros en la columna de agua. A) Sistema conformado por un cabo ubicado en la cabecera del muelle Cte. Luis Piedrabuena (Fig. 1) con 5 termómetros (cuadrados negros) fijados a un cabo (línea marrón), 4 dispuestos a 0, 3, 6, 9 m respecto al fondo y uno colocado a 30 cm por debajo de una boya (círculo amarillo) de superficie. Ciudad de Puerto Madryn, Argentina. B) Detalle del termistor utilizado, marca HOBO, modelo Pro v2 U22-001 de 0.02 °C de resolución.

A partir de los valores horarios se creó una nueva variable ( $\Delta T/\Delta d$ ) para relacionar la variación de la temperatura en función de la distancia entre los termómetros de superficie y fondo (Ec. 1):

$$\frac{\Delta T}{\Delta d} = \frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{fdo}}}{12 + H_{\text{marea}}} \text{ Ec. 1.}$$

Dónde:  $T_{\text{sup}}$  es la temperatura en superficie,  $T_{\text{fdo}}$  es la temperatura en el fondo,  $H_{\text{marea}}$  representa la altura de la marea y el valor 12 se agrega porque en los momentos de marea baja extraordinaria ambos sensores están a 12 m de distancia.

El objetivo de esta nueva variable fue obtener un índice de homogeneidad vertical, el cual tiende a 0 cuando la columna de agua se encuentra verticalmente homogénea mientras que valores positivos indican distintos grados de estratificación térmica en la columna de agua. El dividendo de la ecuación (Ec. 1) permite hacer inferencias sobre estas diferencias de temperatura teniendo en cuenta la diferencia de profundidad existente en la columna de agua dado que, si bien el termómetro de superficie permanece una profundidad constante, el que está en el fondo ira cambiando de profundidad conforme la altura de marea para un momento determinado.

## Viento

Registros horarios de intensidad ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y dirección (grados) de viento fueron obtenidos de la estación meteorológica del Servicio de Oceanografía y Meteorología del Centro Nacional Patagónico (CENPAT). La serie temporal incluyó registros de intensidad ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y dirección (en grados respecto del norte en sentido horario) del viento en promedio horario a partir de registros realizados cada 10 minutos. A los datos se les efectuó una corrección por convención oceanográfica en la cual se grafica la dirección hacia donde se dirige el viento, al contrario de cómo se mide la dirección del viento usualmente que es según la dirección de la cual proviene el viento. Esta corrección se realiza sumando  $180^\circ$  al valor registrado por el anemómetro del ángulo del cual proviene el viento. En el caso que el viento provenga de direcciones mayores a  $180^\circ$  y menores a  $360^\circ$ , al ángulo registrado se le resta  $180^\circ$ .

## Detección de eventos oceanográficos

Para la utilización de los datos de viento se realizó una media móvil tanto a la intensidad como a la dirección del viento, promediando la hora determinada con las 2 horas previas con la finalidad de captar los cambios sucedidos en la capa baja de la troposfera (hasta 1000 metros del suelo). Esta media se realiza debido a que los muestreos se realizaron cada 3 horas.

A partir de los datos de temperatura de agua y viento se realizó una caracterización de los procesos oceanográficos que se observaron durante el trabajo de campo. Para esto se consideraron dos situaciones que incluyen procesos de surgencia (*upwelling*) y de hundimiento (*downwelling*).

En la costa oeste del Golfo Nuevo procesos de *downwelling* de masas de agua pueden desarrollarse cuando hay viento del sector este-noreste, evidenciado por un aumento en la temperatura en las capas más profundas, la que se acerca a la temperatura de superficie. A partir de ello se definió a su vez si el proceso de *downwelling* es parcial o total según la diferencia de temperatura entre superficie y fondo ( $\Delta T/\Delta d$ ).

Cuando los valores de  $\Delta T/\Delta d$  tienden a 0 corresponde a un proceso de homogeneización total de la columna de agua. Valores entre 0,05 y 0,1  $^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$  indican procesos parciales, mientras que valores superiores a 0,1  $^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$  se los considera como momentos de calma, con estratificación de la columna de agua.

Para la clasificación del *upwelling*, algunos de los procesos se clasificaron de forma visual sobre la serie de tiempo de temperaturas en la columna de agua y viento, dado que no se evidenció claramente como cambio de temperatura en la superficie, pero si en capas más profundas, por lo que el indicador  $\Delta T/\Delta d$  no resultó óptimo para la clasificación de este fenómeno.

## Marea

Las predicciones de altura horaria de marea para Puerto Madryn fueron obtenidas mediante el software WXTide (<http://www.wxtide32.com/>).

## Clorofila y Nutrientes

Se tomaron muestras de agua en superficie y fondo para obtener las concentraciones de Clorofila-a, como estimación indirecta de abundancia de fitoplancton, y de nutrientes esenciales para el crecimiento del fitoplancton: nitrato, fosfato, silicato y amonio. La toma de muestras de agua de fondo se realizó por medio de una botella Van Dorn (Fig. 3) y el de superficie por medio de un balde plástico.



**Figura 3: Botella Van Dorn utilizada para la toma de muestras de agua de mar.**

En el laboratorio de campaña (Fig. 4) montado en la cabecera del muelle, se filtraron 1000 ml de cada muestra utilizando una bomba de vacío Cole Parmer, a pistón sin aceite por filtros GFF marca Whatman (0,7  $\mu\text{m}$  de poro de 47 mm de diámetro) para la determinación de clorofila-a. Con el agua filtrada se llenaron dos botellas plásticas de 50 ml y de 250 ml (previamente lavadas con ácido clorhídrico al 5% y agua destilada) para la determinación de nitrato, fosfato, silicato y amonio. Tanto los filtros como las botellas fueron conservados en papel de aluminio a  $-20^{\circ}\text{C}$  en freezer. Los resultados de los análisis de las muestras de agua obtenidas en este trabajo fueron cedidos por el Dr. F. Paparazzo para su utilización de esta tesis.



**Figura 4: Laboratorio de campaña montado en la cabecera del muelle Cte Piedrabuena donde se procesaron muestras de agua.**

## Zooplankton

Los muestreos de zooplankton fueron realizados con el objetivo de captar fenómenos que ocurren en cortos periodos de tiempo utilizando métodos de alta resolución temporal. Para lograr esto, se tomaron muestras de agua a intervalos de 3 horas, siguiendo el ciclo de marea iniciando en marea subiente intermedia, obteniendo las muestras durante las pleamares, bajamares y momentos intermedios. De esta forma se obtuvieron un total de 23 muestreos y 46 muestras de zooplankton y de química (23 de fondo y 23 de superficie) durante 3 días de trabajo continuo.

Las muestras de zooplankton fueron tomadas mediante bombeo por Sorbona y filtrado (Figs. 5 y 6) a 2 m del fondo y en superficie durante 30 minutos, obteniendo un volumen de bombeo de 2853 litros para cada muestra. El método de bombeo se realizó utilizando una manguera plástica de 2" (5 cm de diámetro) y una manguera de aire conectada a un compresor sobre el muelle que inyectaba aire a presión directamente en la boca del tubo generando de esa forma succión de agua. El agua succionada desemboca en una red de zooplankton de 104  $\mu\text{m}$ . Luego el material biológico colectado fue depositado en botellas de 500 ml con agua de mar y preservadas en formol al 2 %, rotulado y llevado al laboratorio para posterior análisis. Este método a diferencia de una bomba de agua tradicional permite que el material biológico fluya a través del conducto sin toparse con ningún elemento mecánico de la propia bomba, el cual pueda causar retención o bien destrucción de los mismos individuos (Boltovskoy, 1981).

El volumen de bombeo fue estimado a partir del tiempo que tardaba la Sorbona en llenar un balde de 100 L (Fig. 6). A partir de este dato de tiempo obtiene un valor de flujo (L/min) con el cual se obtiene el volumen total filtrado en cada repetición dado que en cada uno el tiempo de filtrado fue el mismo (30 min).

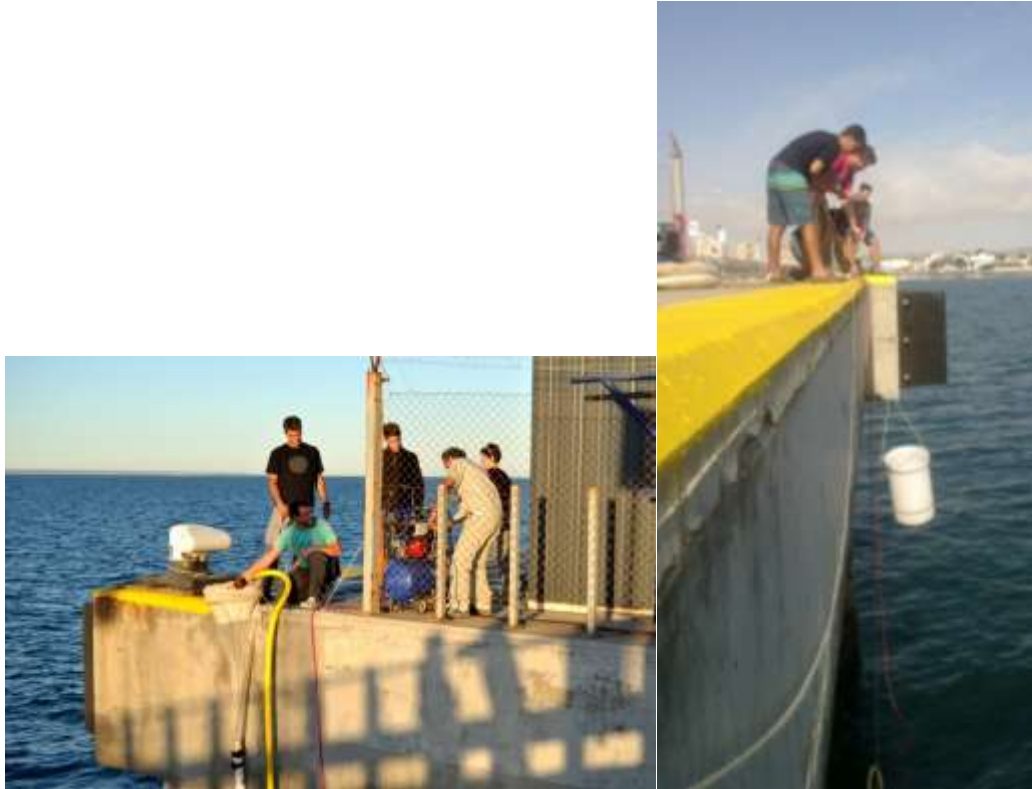
Las muestras tomadas fueron almacenadas en botellas de 500ml hasta su posterior análisis en el laboratorio del Centro Nacional Patagónico (CENPAT-CONICET) de la localidad de Puerto Madryn. Una vez en laboratorio se procedió a identificar a los organismos que la componían. Para esto se trabajó de a una botella por vez. Se tamizó el contenido de la botella bajo campana para evitar intoxicación con el formol. Este tamizado fue vertido en vaso de precipitado de 500 mL completando el volumen de 500 mL con agua de mar del cual se tomaron 3 sub muestras de 5 mL cada una para ser analizadas bajo lupa.

Para la toma de las sub muestras se homogeneizó el contenido del vaso de precipitados utilizando una varilla metálica con una lámina plástica agujereada, 2 cm menor del diámetro del vaso de precipitado, moviendo la varilla de forma ascendente y descendente las veces necesarias hasta observar homogeneidad en el líquido. Una vez logrado esto se tomaron 3 sub muestras utilizando una pipeta Pasteur de 5 mL cada una. Estas sub muestras fueron trasladadas en un disco de petri grillado para ser analizadas bajo lupa (marca Zeiss). El análisis bajo lupa se realizó recorriendo el grillado , clasificando y contabilizando todos los organismos que se encontraban en la submuestra analizada.

Se identificaron y cuantificaron distintos taxones llegando al nivel taxonómico de mayor nivel clase/familia registrando estos en una planilla con el nombre del taxón (Boltovskoy, 1981), la profundidad, la fecha y la hora en que fue tomada la muestra, para luego ser volcados en planillas Excel.



**Figura 5:** A la izquierda se puede ver el mecanismo de bombeo fuera del agua, compresor, manguera de aire (roja), manguera de bombeo (amarilla) y red con vaso colector para el material biológico. A la derecha se puede ver el mecanismo funcionando durante un bombeo.



**Figura 6: Procedimientos de muestreo de zooplancton llevado a cabo por el equipo.**

### Análisis del efecto de los forzantes físicos sobre la abundancia relativa de copépodos.

Para evaluar el efecto de los forzantes físicos sobre la dinámica del plancton en la columna de agua se planteó la utilización de modelos lineales generalizados (GLM) (Zuur et al. 2009) se utilizó como variable respuesta (VR) a la abundancia relativa de copépodos y a las siguientes variables explicatorias (VE):

- H.Marea: Altura de marea para el momento dado del muestreo. Variable continua (m)
- Luz: con 2 niveles; Día y Noche. Variable categórica
- Nutrientes: Concentración de Nitrato ( $\mu\text{M}$ ). Variable continua
- Clorofila: Concentración de clorofila-a  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Variable continua
- Estrato: Estrato en el cual se tomó la muestra. Variable categórica con 2 niveles; Superficie y Fondo
- Dinámica: Procesos de la dinámica costera definida según las condiciones establecidas de viento y temperatura del agua. Variable categórica con 4 niveles: Nada (condición neutra), *upwelling* parcial, *upwelling* total, *downwelling* parcial y *downwelling* total.
- Dt.Profundidad:  $\Delta T/\Delta d$ ; variación de la temperatura en función de la distancia entre los termómetros de superficie y fondo. Variable continua ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

- Cuadrante: Sector del cual proviene el viento. Variable categórica con 4 niveles: N, S, E y O. Categorizado utilizando los 360° de la rosa de los vientos dividiéndolo en 4.
- Intensidad: Media móvil de las ultimas 3h de la velocidad del viento. Variable continua medida en m.s<sup>-1</sup>

Se eligió como VR la abundancia relativa del taxon Copepoda dada amplia superioridad que se encuentra en la abundancia de este taxon comparado al resto de los taxones encontrados en las muestras. A su vez, se eligió el Nitrato como nutriente modelo para la VE “nutrientes” dado que este es el que en menor concentración se encuentra en las muestras y actúa como reactivo limitante para el crecimiento del fitoplancton cobrando así mayor importancia.

A las variables continuas se le realizó una estandarización debido a la alta variabilidad que presentaron y se obtuvieron de esta manera variables continuas con media = 0 y varianza = 1 utilizando la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{x-\mu}{\sigma} \text{ Ec. 2}$$

Donde Z es el valor estandarizado, X es el valor original,  $\mu$  es la media de los valores originales y  $\sigma$  es la desviación estándar de los valores originales.

Para datos de conteos, el GLM más simple a utilizar es una distribución Poisson. Sin embargo, esta regresión puede no ser la mejor ante la presencia de datos con alta variabilidad ya que esta limita la expresión de su varianza a la media ( $\mu$ ), la cual es igual a la esperanza de la regresión (Zuur et al., 2007). Por esto resulta más apropiado la utilización de un GLM del tipo de distribución Binomial Negativa en donde a la varianza agrega un término de sobre dispersión ( $\theta$ ) haciendo que la estimación del error estándar sea una función de la media, pero que no dependa directamente de esta, resultando en un cálculo de la misma más preciso, evitando de esta forma la sub o sobre estimación por parte del modelo (McCullagh y Nelder, 1989).

La variable respuesta se distribuye según:

$$Y \sim \text{NegBin}(\mu, \theta) \text{ Ec.3}$$

La media  $\mu$  y la varianza  $\sigma^2$  de la distribución son:

$$E(Y) = \mu \text{ Ec. 4}$$

$$\text{Var}(Y) = \mu + \theta \mu^2 \text{ Ec 5}$$

Los modelos se seleccionaron utilizando el criterio de información de Akaike (AIC) el cual estima la calidad del modelo en base a un balance entre complejidad y la verosimilitud del mismo (Akaike, 1974) ( Ec. 3). Todos los modelos fueron implementados utilizando el paquete MASS del software de R (R Core Team, 2023).

$$AIC = 2K - 2 \ln(L) \text{ Ec.6}$$

Donde  $K$  es el número de parámetros en el modelo estadístico, y  $L$  es el máximo valor de la función de verosimilitud para el modelo estimado.

Al contar este estudio con un tamaño de muestra pequeño se utilizó una corrección al criterio de información de Akaike (AICc). El AICc añade un término de corrección que penaliza la complejidad del modelo de manera más fuerte cuando el tamaño de la muestra es pequeño utilizando la siguiente formula:

$$AICc = AIC + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad \text{Ec. 7}$$

Siendo AIC el valor del criterio de información de Akaike,  $k$  es el número de parámetros en el modelo y  $n$  es el tamaño de la muestra.

El AICc proporciona una medida para la selección de modelo. El modelo que menor AICc presente será el modelo que mejor equilibre la verosimilitud con la complejidad del mismo. (Zuur et al., 2007)

Entre los modelos que menor AICc presentan se utiliza el  $\Delta AICc$  en donde se busca evaluar la diferencia que existe entre el mejor modelo y los siguientes. Para esto se hace la diferencia entre el modelo que menor AICc presenta y el resto de los modelos, evaluando de esta forma el valor obtenido para cada uno de los modelos. Los modelos que se encuentren dentro de un  $\Delta AICc \leq 2$  serían igualmente elegibles y debido a la incertidumbre de muestreo, es probable que ante un remuestreo de los datos el orden de valores de AICc se vea alterado dando resultados levemente diferentes dentro de  $\Delta AICc \leq 2$ , pero que, sin embargo, pueden alterar el orden de selección. Por esto, para los modelos que se encuentren dentro del  $\Delta AICc \leq 2$  se utiliza el criterio de selección de máxima parsimonia, en donde se elige al modelo que menor cantidad de parámetros estime (Burham & Anderson, 2002).

Una vez seleccionado el mejor modelo se evalúa el ajuste de este a los datos mediante un test de bondad de ajuste. En el mismo se pone a prueba mediante un test de Chi-cuadrado la hipótesis nula de que los datos se ajustan al modelo, siendo los valores esperados iguales a los observados.

Los gráficos de las variables ambientales y biológicas se realizaron mediante el software Grapher v11.5.791 y los modelos fueron desarrollados mediante el paquete estadístico R versión 3.5.1.

## Resultados

### Análisis de variables físicas: Temperatura, marea y viento.

Durante el período del muestreo la temperatura del agua de mar mostró una gran variabilidad con valores máximos de 19,2°C y mínimos de 17,4°C en superficie, y máximos de 18,7°C y mínimos de 15,8°C en el fondo, alcanzando por momentos una diferencia de temperatura entre superficie y fondo máxima de 3°C y en otros evidenciándose la misma temperatura en fondo y superficie. Además, la temperatura varió notablemente en escalas semidiurna y diurna. Es decir, las variaciones de temperatura se dieron tanto en superficie como en el fondo con momentos donde la temperatura fue homogénea en toda la columna de agua y en otros donde se observó una marcada estratificación vertical evidenciada por el desarrollo de una termoclina (Fig.7a).

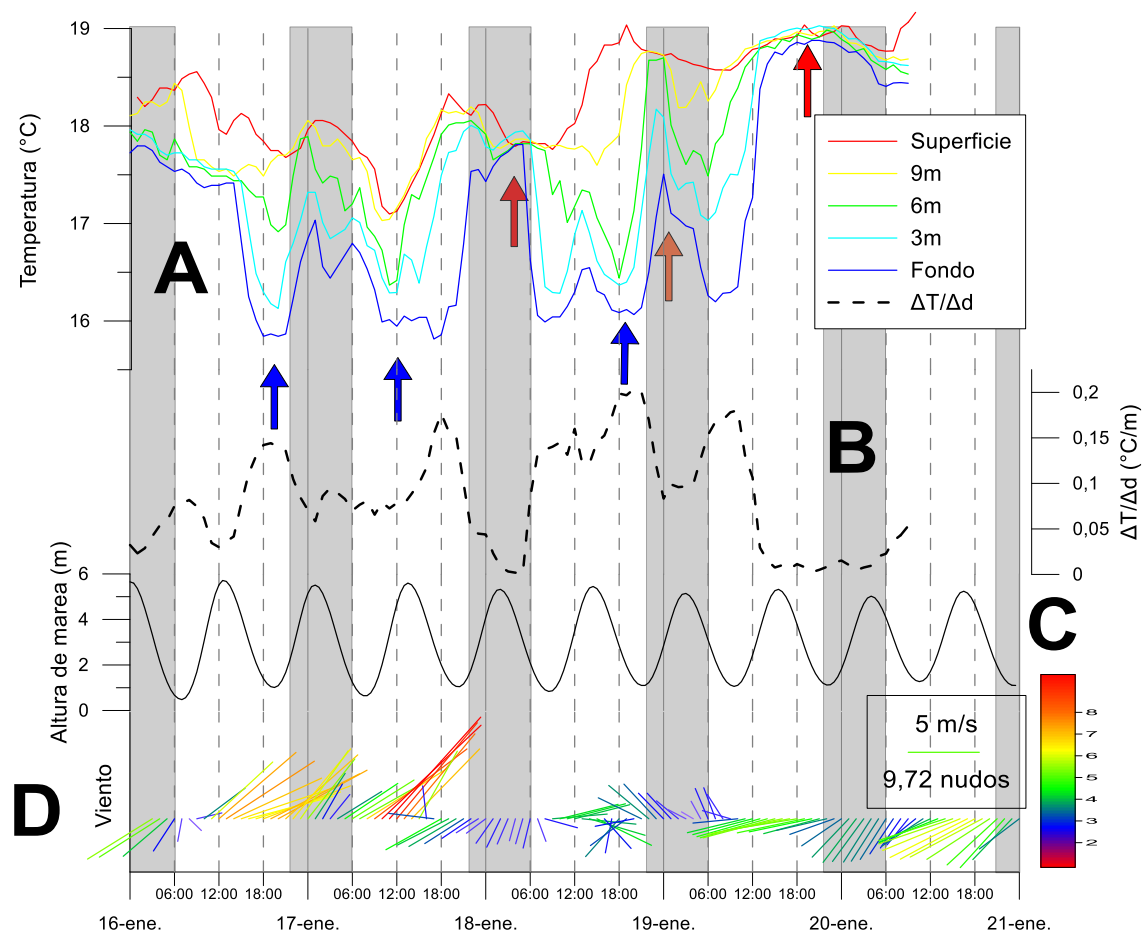


Figura 7: Variación temporal de las variables físicas: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), Diferencial de temperatura ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ ), Altura de marea (m) y viento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) para Puerto Madryn, Golfo Nuevo. A) Temperatura del agua según la distancia respecto al fondo. B)  $\Delta T/\Delta d$  (línea punteada negra). Las flechas azules representan eventos de *upwelling*, las rojas eventos de *downwelling total* y naranjas *downwelling parcial*. C) Altura de marea astronómica y D) vientos horarios indicando dirección mediante el ángulo de los vectores e intensidad (con largo y escala de color en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

El comportamiento de la temperatura en la columna de agua es reflejado por el índice  $\Delta T/\Delta d$  del cual, ante la homogenización de la temperatura en la columna de agua, tiende a 0 y en momentos de alta estratificación como los días 17 y 18 por la tarde, el indicador tiende a valores de entre 0,15 y 0,2 °C.m<sup>-1</sup> (Fig. 7B).

Mediante el criterio de clasificación según el  $\Delta T/\Delta d$  y el viento fue posible identificar 3 eventos de *downwelling* (flechas rojas en la Fig. 7A y 7B). El primero comienza por la tarde del día 17 y termina el 18 muy temprano por la mañana durando aproximadamente 6 h. Luego de este evento se desarrolla un evento de *downwelling* parcial el día 18 cercano a la medianoche, siendo muy débil (flecha naranja en Fig. 7A) con una duración aproximada de 5 h. Por último, existe el tercer evento que tiene por comienzo el día 19 al mediodía haciéndose presente hasta el fin del registro con una mínima duración de 24 h. A su vez, el  $\Delta T/\Delta d$  resulto ineficiente a la hora de detectar fenómenos de *upwelling*, clasificando este solamente al evento registrado el día 17 alrededor del mediodía ya que este evento afecta a toda la columna de agua por igual. El resto de los eventos de *upwelling* clasificados (día 16 por la tarde y 18 por la tarde) fueron realizados manualmente debido a la ausencia de cambio en la capa superficial de la columna de agua.

En cuanto a la altura de marea, la oscilación máxima correspondió al día 16 la cual varió entre 0,45 y 5,71 m. El resto de los días la amplitud fue levemente menor. Igualmente se puede observar que la variabilidad en las temperaturas parece estar más asociadas al viento que a la altura de marea, al menos durante el periodo de muestreo (Fig. 7C).

Con respecto al viento durante los días de campaña, se observó una gran variación tanto en la intensidad como en la dirección (Fig. 7D). El valor máximo de viento fue de 9,7 m.s<sup>-1</sup> provenientes del sector suroeste mientras que el valor mínimo fue de 0,9 m.s<sup>-1</sup> proviniendo del sector norte, pudiendo obtenerse a su vez registros de todas las direcciones (Fig. 7D).

Para entender la dinámica de la columna de agua como un conjunto es imperativo analizar las variables en su conjunto y cómo estas afectan posiblemente unas a las otras. Es claro que el viento es el forzante que mayor cambio realiza en la dinámica de la columna de agua, generando con poca intensidad importantes cambios en la estructura vertical. Por ejemplo, durante el día 17 por la noche y 18 por la mañana, un suave viento del sector N-NE fue suficiente como para homogeneizar totalmente la columna de agua ( $\Delta T/\Delta d$  tiende a 0) produciendo un fenómeno de *downwelling*. A su vez se aprecia que la marea también tiene un efecto sobre la dinámica de la columna de agua, generando pequeños cambios que difícilmente puedan ser explicados por la influencia del viento del momento, evidenciándose en el fondo un leve aumento de la temperatura el día 18 a partir del mediodía. Este aumento de temperatura se sincroniza perfectamente con la mayor altura de la marea. Aunque presente, el efecto de la marea es mínimo comparado al posible y rápido efecto del viento sobre la dinámica de la columna de agua.

## Clorofila y nutrientes

Los nutrientes muestran mayor concentración en fondo que en superficie durante casi todo el periodo de muestreo (Fig. 8). Se observó gran variabilidad con respecto a las concentraciones de nutrientes. Los silicatos presentaron valor máximo de  $4,72 \mu\text{M}$  en el fondo, mientras que el valor mínimo observado fue de  $2,20 \mu\text{M}$  en superficie con una media de  $2,64 \pm 0,23 \mu\text{M}$  (tabla 1). Los fosfatos presentaron máximos de concentración de  $1,96 \mu\text{M}$  en fondo y mínimos de  $0,93 \mu\text{M}$  en superficie con una media de  $1,0 \pm 0,06 \mu\text{M}$ . El amonio presentó concentraciones máximas de  $0,53 \mu\text{M}$  en el fondo, mientras que los mínimos registrados son de  $0,0 \mu\text{M}$  en superficie con una media de  $0,06 \pm 0,04 \mu\text{M}$ . Para el nitrato la máxima concentración registrada fue de  $0,98 \mu\text{M}$  en fondo, mientras que la mínima fue de  $0,05$  en superficie con una media de  $0,10 \pm 0,03 \mu\text{M}$ .

La concentración de clorofila-a en la columna de agua varió considerablemente, encontrándose un valor máximo de  $1,12 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en el fondo y un mínimo de  $0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en fondo (Fig. 8). Los valores medios en superficie y fondo resultaron similares ( $0,24 \pm 0,18 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en superficie y  $0,28 \pm 0,25 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en el fondo). Cabe destacar que cerca del fondo se observó mayor variabilidad en la concentración de clorofila-a.

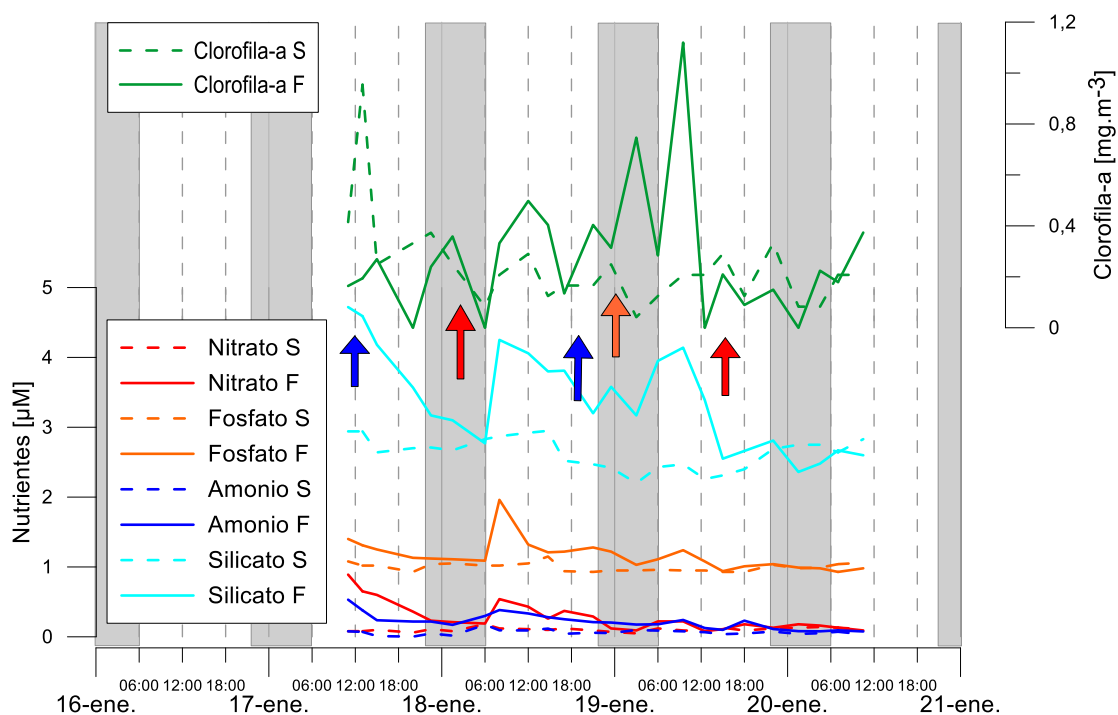


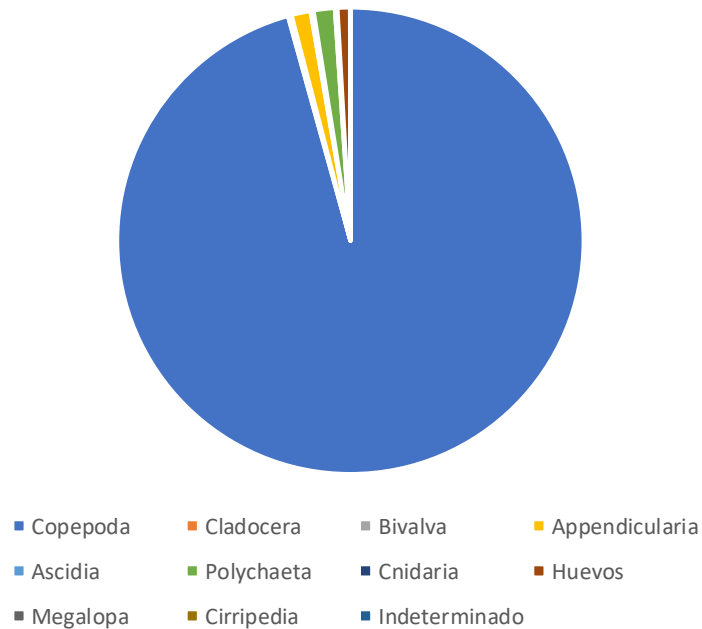
Figura 8: Concentración de clorofila-a para fondo (línea continua) y superficie (línea punteada) (panel superior). Concentración de nutrientes en superficie (línea punteada) y fondo (línea continua) (panel inferior). Clorofila-a (verde), Fosfato (naranja), Nitrato (rojo), Amonio (azul) y Silicato (celeste). Las flechas azules representan eventos de *upwelling*, las rojas eventos de *downwelling total* y naranjas eventos de *downwelling parcial*.

**Tabla 1: Valores promedio de concentración de distintos nutrientes según estrato superficie o fondo en unidades de  $\mu\text{M}$ .**

	SUPERFICIE		FONDO	
	Media	Error estándar	Media	Error estándar
<b>Silicato</b>	2,64	0,23	3,40	0,71
<b>Fosfato</b>	1,00	0,06	1,16	0,21
<b>Nitrato</b>	0,10	0,03	0,28	0,21
<b>Amonio</b>	0,06	0,04	0,22	0,11
<b>Clorofila</b>	0,24	0,18	0,28	0,25

## Zooplancton

En las muestras de agua analizadas fueron encontrados de forma representativa los siguientes taxones: Appendicularia, Polychaeta y Copepoda (Figs. 9 y 10). Copepoda fue el taxón con mayor densidad relativa habiendo encontrado máximos de 49.122 individuos por  $\text{m}^3$  (Fig. 11), mientras que los otros taxones representan densidades máximas de hasta 2.200 individuos por  $\text{m}^3$  en el caso de Appendicularia y 1.793 individuos por  $\text{m}^3$  en el caso de Polychaeta (Fig. 11).



**Figura 9: Frecuencia relativa de los taxones encontrados en las muestras de agua.**



Figura 10: De izquierda a derecha: Copepoda; Appendicularia; Polychaeta

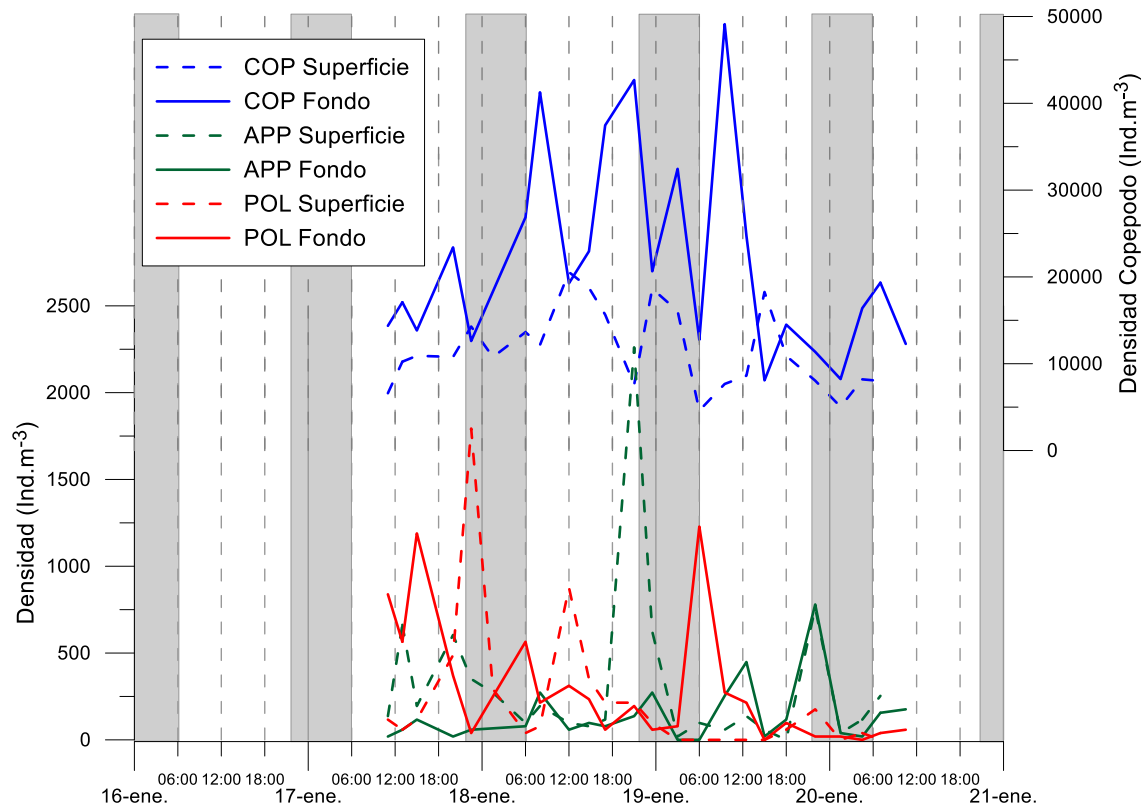
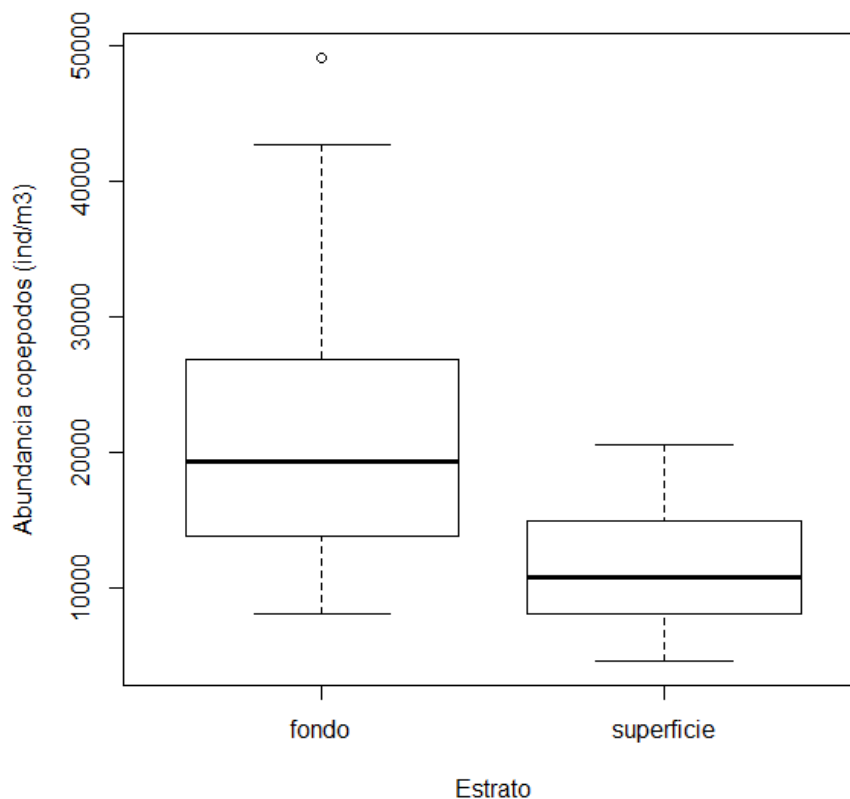


Figura 11: Densidad de zooplancton. Eje de la izquierda (inferior) corresponde a Polychaeta (POL), Appendicularia (APP), y el eje de la derecha (superior) a Copepoda (COP), las líneas punteadas representan cada grupo taxonómico en superficie y la línea continua para fondo. Notar la diferencia de escalas en los ejes Y.

## Copepoda

La densidad de Copepoda es mayor en el fondo que en la superficie de la columna de agua (Fig. 13), exceptuando pocas ocasiones donde se igualan o incluso la densidad de superficie supera a la de fondo (por ejemplo, los días 17 a las 23 h, el 18 a las 12 h y el 19 entre las 12 h y las 18 h). La abundancia máxima se obtuvo el día 19 a las 9.30 h siendo de 49.123 individuos.m<sup>-3</sup> y la mínima de 8.089 individuos.m<sup>-3</sup> el día 19 a las 15 h en el estrato de fondo, mientras que para el estrato de superficie la abundancia máxima registrada fue de 20.546 individuos.m<sup>-3</sup> durante el día 18 a las 12 h y la mínima de 4.600 individuos.m<sup>-3</sup> el día 19 a las 6 h. Para el resto de los taxones las abundancias son mucho menores. La máxima registrada se obtuvo para larvas de Appendicularia alcanzando una concentración de 2.261 ind.m<sup>-3</sup> el día 18 a las 21 h en superficie, seguido por larvas de Polychaeta con 1.793 ind.m<sup>-3</sup> el día 17 a las 22.30 h en superficie (Fig. 11). Copepoda abarcando entre el 95 y el 96% de toda la muestra. Los taxones subsiguientes fueron Appendicularia con alrededor de un 2% y Polychaeta con 1%, el 1% restante se dividió entre el resto de los taxones observados.



**Figura 12:** Abundancia de copépodos observada según estrato. La línea central indica la mediana, la caja muestra el rango intercuartílico (IQR), que va desde el primer cuartil (Q1) hasta el tercer cuartil (Q3). El 50% central de los datos se encuentra dentro de esta caja. El punto por encima del estrato fondo corresponde a un outlier. La altura de la caja representa la dispersión de estos datos.

## Análisis del efecto de los forzantes físicos sobre la abundancia relativa de copépodos.

En total se analizaron 60 modelos lineales generalizados (GLM) para evaluar la relación entre la variable respuesta (abundancia relativa de copépodos) y las variables explicatorias.

Los dos modelos mejor ponderados se ven por el criterio de información Akaike son el m59.bn y el m33.bn (Tabla 2) entrando estos dentro del  $\Delta AICc \leq 2$ . Según máxima parsimonia el modelo a elegir es el m33.bn ya que es el que cuenta con menor cantidad de parámetros estimados (2). Sin embargo, en este trabajo se toma la decisión de utilizar el modelo m59.bn, el cual, si bien cuenta con un término más haciendo que el modelo sea más complejo, este término aporta información valiosa y de interés a la hora de explicar y entender la dinámica que acompaña al movimiento de los copépodos en el agua.

**Tabla 2: Lista de los 10 mejores modelos lineales generalizados (GLM) contrastados, en orden decreciente de complejidad, con sus grados de libertad (GL), el criterio de información de Akaike (AIC) para cada uno, criterio de información de Akaike corregido (AICc) y la diferencia entre los mismos ( $\Delta AICc$ )**

	MODELO	GL	AICc	$\Delta AICc$
<b>M59.BN</b>	Dinámica + DT.profundidad * Estrato	38	910,47	0,00
<b>M33.BN</b>	Estrato * DT.profundidad	41	912,11	1,64
<b>M58.BN</b>	H.marea + DT.profundidad * Estrato	40	914,46	3,98
<b>M53.BN</b>	Cuadrante + DT.profundidad * Estrato	38	915,12	4,65
<b>M29.BN</b>	DT.profundidad + Estrato	42	916,19	5,71
<b>M60.BN</b>	Cuadrante + H.marea + DT.profundidad * Estrato	37	917,60	7,12
<b>M51.BN</b>	Cuadrante + H.marea + DT.profundidad * Estrato	37	917,60	7,12
<b>M54.BN</b>	Cuadrante + H.marea + Dinamica + DT.profundidad * Estrato	34	918,51	8,04
<b>M21.BN</b>	Estrato + DT.profundidad	39	919,39	8,92
<b>M30.BN</b>	Estrato + DT.profundidad + Cuadrante + Dinámica+ Clorofila	35	921,70	11,22

se observa para el modelo m59.bn (Tabla 3) que la ordenada al origen mostró un valor positivo (10,14) indicando la estimación de la abundancia de copépodos para los niveles de referencia. La variable Estrato en su nivel superficie muestra un efecto negativo (Tabla 3) sobre la abundancia de copépodos, a su vez el dT.Profundidad muestra efecto positivo (Tabla 3) sobre la abundancia de copépodos. El comportamiento del dT.Profundidad relacionado al estrato superficie es negativo (Tabla 3) indicando un incremento menor en la abundancia de copépodos en superficie al obtener valores más altos de dT.Profundidad (Fig. 13). A su vez se ve involucrada la variable Dinámica, con sus 4 niveles: *Downwelling* (parte del intercepto), *downwelling* parcial (coeficiente = 0,007 no significativo), Nada (coeficiente= -0,643) y *Upwelling* parcial (coeficiente = - 0,23, no significativo) (el nivel “*upwelling* total” no aparece dentro del modelo dada la ausencia de registros del mismo en las tablas de datos) en donde el nivel Nada es el único que presenta significancia con un coeficiente negativo indicando una disminución de la abundancia de copépodos en este nivel comparado con la presencia de la dinámica *downwelling* (Fig. 14).

### Bondad de ajuste:

A través de la prueba de bondad de ajuste para el modelo m59.bn, se obtuvo un valor  $P=0.1794902$ , de esta forma, no se rechaza la hipótesis nula que establece que los valores esperados arrojados por el modelo son iguales a los valores observados.

**Tabla 3: Efectos fijos con sus  $\beta$  estimados, errores estándar, valor Z y valor P obtenidos a partir del ajuste del modelo “m59.bn”.**

COEFICIENTES:	B ESTIMADO	ERROR ESTÁNDAR	VALOR Z	VALOR P	
INTERCEPTO:(DOWNWELLING, DT = 0, FONDO)	10.14839	0.16105	63.013	< 2e-16	***
DINAMICA DOWNWELLING PARCIAL	0.07552	0.22779	0.332	0.74024	
DINAMICA NADA	-0.643	0.29396	-2.187	0.02871	*
DINAMICA UPWELLING PARCIAL	-0.23184	0.21602	-1.073	0.28318	
DT.PROFUNDIDAD	0.59717	0.13153	4.54	5.62E-06	***
ESTRATO SUPERFICIE	-0.58058	0.09871	-5.882	4.07E-09	***
DT.PROFUNDIDAD:ESTRATO SUPERFICIE	-0.3239	0.09987	-3.243	0.00118	**

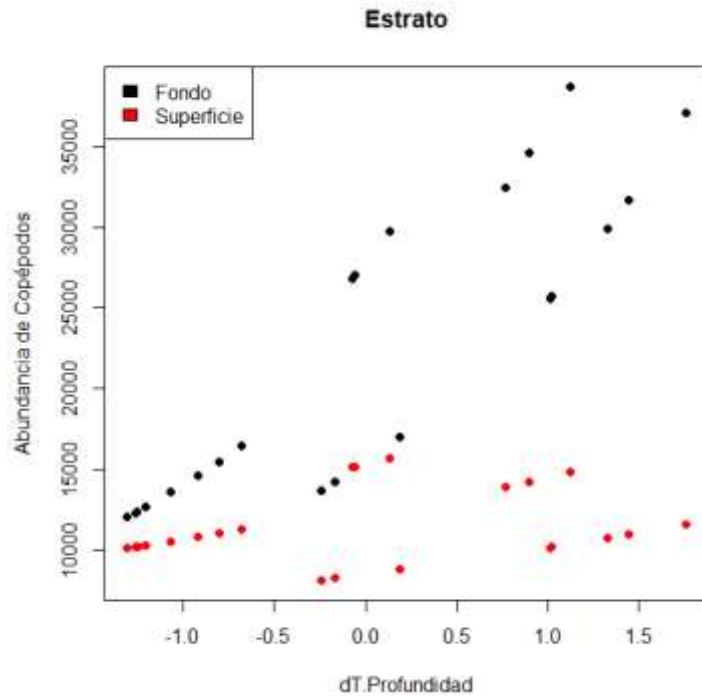


Figura 13: Abundancia de Copépodos en función del dT.Profundidad. Los puntos negros representan los valores correspondientes al estrato fondo y los puntos rojos a los valores predichos para el estrato Superficie. Gráfico generado a partir del modelo m59.bn.

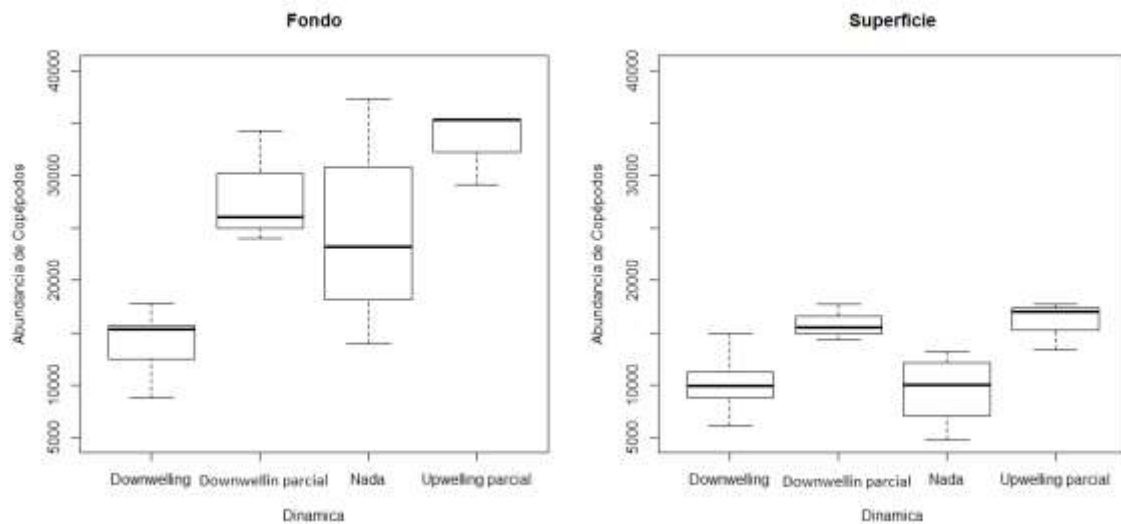


Figura 14: Gráfico de caja generada a partir de los datos predichos por el modelo m59.bn. Abundancia de copépodos según los distintos procesos oceanográficos para estrato de superficie y fondo. La línea central indica la mediana, la caja muestra el rango intercuartílico (IQR), que va desde el primer cuartil (Q1) hasta el tercer cuartil (Q3). El 50% central de los datos se encuentra dentro de esta caja. La altura de la caja representa la dispersión de estos datos.

## Parámetro $\Theta$ de sobredispersión

El parámetro de sobredispersión del modelo seleccionado presento valores de:

$$\Theta = 9.14$$

Esto indica un alto nivel de dispersión de los datos. Mostrando la gran variabilidad que estos poseen.

## Discusión

En la presente Tesis se evaluó el efecto de los forzantes físicos como el viento y la marea sobre la distribución y abundancia del zooplancton, nutrientes y clorofila-a en superficie y fondo en un sitio costero en la Bahía Nueva, Golfo Nuevo durante 3 días consecutivos, repitiendo el muestreo cada 3 horas. Para ello se utilizaron registros de la temperatura de la columna de agua como indicadores de movimientos de masas agua (*upwelling* y *downwelling*) a fin de poder estudiar la relación existente con la dinámica del zooplancton y los forzantes físicos.

Los vientos provenientes del sector norte o este generaron un evidente proceso de *downwelling*, aún con intensidades de viento relativamente bajas demostrando baja resistencia de las capas superficiales de agua de desplazarse a capas profundas al llegar a la costa. En el caso del *upwelling* es interesante la ausencia de eventos de homogeneidad en la columna de agua. Si bien en el período de tiempo en donde se realizó el muestreo se obtuvieron varios días de vientos del sector oeste y sur, incluso con intensidades relativamente altas en donde se podría suponer que se produciría un movimiento importante de la masa de agua, solamente se observó una disminución considerable de la temperatura de superficie el día 17 desde la mañana, generada por vientos del sector suroeste de intensidades de entre 8 y 10 m.s<sup>-1</sup>. En este caso, el  $\Delta T/\Delta d$  disminuyó solamente hasta valores cercanos a 0,07 °C.m<sup>-1</sup> mostrando, según lo clasificado por el criterio establecido para esta Tesis, un proceso de *upwelling* parcial. Esto sugiere que existe una resistencia mayor en las capas de agua superficiales a ser reemplazadas por el agua de la capa profunda. Esto coincide con lo encontrado por Getino (2022) donde evidenció que el efecto del *downwelling* en la columna de agua es de mayor magnitud que el del *upwelling*. A su vez, esto muestra que la utilización del indicador  $\Delta T/\Delta d$  para la clasificación de eventos de *upwelling* es ineficiente ya que ha sido necesario clasificar manualmente la mayoría de estos eventos.

Se evidenciaron 2 días de brisa según la clasificación de Dellatorre et al. (2012), los días 17 y 18 de enero. Ante estos eventos rápidamente se hizo presente el hundimiento (*downwelling*) de la capa superficial, haciendo que la columna de agua logre la homogeneidad en un corto periodo de tiempo, demostrando la eficiencia de este forzante para generar un reemplazo de agua en las capas profundas de la columna. Estas variaciones de temperatura en la columna de agua son de gran importancia no solo para los organismos pelágicos, sino que también para organismos bentónicos como los bivalvos. Estas variaciones desencadenan el mecanismo de desove en bivalvos como las vieiras (Bonardelli et al., 1996). En el golfo San José, a fines de la primavera y principios del verano estas variaciones de temperatura podrían tener un efecto aun mayor debido a que es el momento en donde las gónadas de vieiras se encuentran

más desarrolladas (Getino, 2022) y los organismos responden mediante desoves a calentamientos repentinos (escala de horas) en el agua, como los observados en este trabajo.

Durante el periodo muestreado no se evidenciaron efectos importantes asociados a la marea. En ciertos periodos de tiempo, Dellatorre et al. (2012) detectó descenso en la temperatura del agua cuando la marea subía mientras que en esta Tesis se evidenciaron pequeños ascensos de temperatura en la capa más profunda cuando ocurrió la pleamar el día 18, este máximo en la temperatura no se condice con el comportamiento del viento para ese momento. Esto mismo fue observado el día 19 entre las 3-4 am para los sensores ubicados a 3, 6 y 9 m mientras que en ese periodo se registró ausencia de viento. Esto probablemente podría explicarse por la presencia de ondas internas de marea (*Internal tidal bores*) descritas por Pineda (1991). El inconveniente es que para detectar este tipo de fenómeno se requieren condiciones de calma dado que en el sitio de estudio la columna de agua es fácilmente afectada por vientos, incluso de poca intensidad, haciendo que la variabilidad presentada por el viento enmascare el efecto de estas ondas de marea.

Propio de una distribución típica de nutrientes en la columna de agua, en esta Tesis se encontró mayor concentración en el fondo que en la superficie independientemente del nutriente que se observe (Fig. 9). Esto es esperable dado que los consumidores primarios (fitoplancton) se encuentran en su mayoría en la capa superficial de la columna de agua (Mann & Lazier, 2005). Es interesante como en el mismo momento que ocurre un *downwelling*, donde se logró la homogeneización completa de la columna de agua (día 19 al mediodía en adelante), se evidencia un gran descenso en la concentración de todos los nutrientes como así también de la clorofila-a. La concentración de clorofila que se mide en el agua sirve como indicador de la abundancia de fitoplancton, permitiendo un análisis de forma sencilla. Aun así, este análisis puede presentar errores dado que cualquier inclusión de clorofila no proveniente del fitoplancton, como por ejemplo el resurgimiento de microalgas provenientes del fondo que podría arrojar valores elevados de clorofila llevando a conclusiones erróneas. Sin embargo, contrastando lo obtenido con lo reportado por trabajos anteriores en la misma zona (Santinelli, 2008) se puede concluir que si bien se obtuvieron valores elevados de clorofila ( $1,12 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), estos rondan a valores registrados en el pasado en un muestreo de diciembre 1997 por Santinelli, registrando valores de  $0,91 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  (equivalente a  $0,91 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) (Santinelli, 2008), y con valores registrados cercanos a  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en muestras de fondo de la estación oceanográfica G-NEO1, que se encuentra en ese mismo muelle (Cdte. Luis Piedra Buena) (datos sin publicar 2020 y 2023, comunicado personal Antonella de Cian). En los valores registrados se observa mayor variabilidad en la capa de fondo que en superficie, encontrándose la mayor concentración en fondo (Fig. 9). Esta variabilidad en el fondo podría estar relacionada con los eventos de *downwelling* (Fig. 8A) ya que, al evidenciarse este proceso la concentración de clorofila-a en el fondo desciende instantáneamente como se observa el 18 a la madrugada, la noche del 18 y la madrugada del 19, y el gran evento de *downwelling* ocurrido a partir del 19 al mediodía en adelante (Fig. 8A). Es importante notar el máximo de clorofila-a superficial el día 17 al mediodía, en sincronía con un *upwelling* clasificado para la mañana de ese día.

Aunque durante la toma de muestras utilizadas en esta tesis se obtuvo buena representatividad de las condiciones típicas para la zona (Dellatorre et al., 2012), no se obtuvieron registros de ningún temporal (vientos mayores a 30 nudos o  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , según escala

Beaufort) lo que hace que se limite las predicciones que se puedan hacer a partir del modelo seleccionado para la dinámica de la abundancia del zooplancton. A su vez se observó gran variabilidad en la abundancia para los distintos taxones indistintamente el estrato en donde estos se encuentren. El taxón más abundante fue Copepoda abarcando entre el 95 y el 96% de toda la muestra. Los taxones subsiguientes fueron Appendicularia con alrededor de un 2% y Polychaeta con 1%, el 1% restante se dividió entre el resto de los taxones observados. Estos resultados difieren de lo encontrado por Baleani (2024) en la costa de la provincia de Buenos Aires donde el 37,1% de la muestra estaba representada por Copépodos y abundancias de alrededor de entre 1000 y 9000 ind.m<sup>-3</sup>. Debido a que, si bien Baleani estudia el borde costero, la zona de nuestro es sustancialmente diferente dado que sus muestreos se realizaron en la rompiente pudiendo esto generar diferencias entre las abundancias observadas para los distintos taxones.

Al analizar cada taxón en particular se observa alta variabilidad en su abundancia en el tiempo. Para el caso de copépodos, si bien existió esta alta variabilidad, la abundancia en superficie nunca superó a la de fondo, no respetándose lo predicho por la teoría de evasión de predadores propuesta por Hays, (1995). Esto posiblemente sea una observación sesgada, dado que el muestreo fue llevado a cabo en un muelle comercial el cual cuenta con fuerte iluminación durante el periodo de la noche, pudiendo alterar así el comportamiento de los individuos planctónicos por recrear condiciones de luminosidad artificiales, aparentando una situación diurna permaneciendo de esta manera en la capa más profunda de agua en las inmediaciones del muelle. Sería de interés poder comparar estos resultados con observaciones en distintos puntos del golfo para analizar la influencia de la luz sobre la abundancia de copépodos en distintos estratos de la columna de agua.

De esta forma, dada la alta variabilidad que poseen los datos de zooplancton y la complejidad de relacionar patrones de movimiento de agua con la distribución de los copépodos en la columna de agua fue que se planteó la utilización de un modelo estadístico de tipo GLM, con la idea de simplificar y esclarecer cuales son las variables que están afectando más fuertemente la distribución y abundancia de estos organismos en la columna de agua.

A partir del modelo seleccionado se observa que existe una interacción entre el estrato y la dT. Profundidad el cual muestra que el efecto de dT. Profundidad es diferente en los estratos de la columna de agua. Esto indica que existe un aumento mayor de la abundancia de copépodos en el fondo comparado a lo generado en superficie. Un dT. Profundidad alto implica una columna de agua más estratificada con alta diferencia de temperatura entre el estrato de superficie y el de fondo, en otras palabras, indica estabilidad en la columna de agua permitiendo su estratificación, lo que sugiere que ante estas condiciones los copépodos migran a la capa más profunda de la columna de agua. A su vez se presenta el término Dinámica, en donde se observa efecto negativo significativo del nivel "*nada*" con respecto al nivel de "*downwelling*". Si bien esto indicaría una disminución de la abundancia de Copépodos cuando la dinámica presente en el sistema es "*nada*" indicando la estratificación de la columna de agua, existen diferencias en lo predicho por el modelo para los estratos de superficie y fondo. En la superficie no se observan grandes cambios ante distintos niveles de la variable Dinámica mientras que para el estrato de fondo al haber presencia de *downwelling*, disminuye la abundancia de Copépodos con respecto a cuando la dinámica es "*nada*" y se encuentra estratificada la columna de agua. En este caso el

*downwelling* genera un desplazamiento de agua de fondo con mayor abundancia de Copépodos por agua superficial de menor abundancia de los mismos, evidenciándose una disminución de la abundancia de Copépodos cada vez que se hace presente el *downwelling* en el sistema. El modelo seleccionado resalta la importancia de la dinámica generada por el viento minimizando la influencia del estado de la altura de la marea, en concordancia con lo que sugieren Krepper & Rivas (1979).

## Conclusiones

Como conclusión general de esta tesis se puede destacar que los procesos de *downwelling* en la columna de agua generan cambios significativos en la abundancia de copépodos, evidenciando que estos se ven afectados por las corrientes que se produzcan en el borde costero.

Analizar datos de viento en relación a la temperatura de la columna de agua resultó altamente productivo, ayudando a comprender el movimiento de vertical de la masa de agua ante distintos escenarios de viento. Se evidenció que, ante eventos de brisa, muy comunes durante el verano en esta zona, se producen fuertes eventos de *downwelling*. Por otro lado, vientos provenientes del sector oeste – sudoeste producen fenómenos de *upwelling*, aunque vale la pena hacer una salvedad sobre estos, ya que el estrato superficial de la columna, no mostró cambios de temperatura en la superficie cuando si fueron registrados cambios en estratos más profundos, al menos durante el período de muestreo. Solamente ante situaciones de vientos fuertes ( $> 8 \text{ m.s}^{-1}$  o  $> 16$  nudos) se observaron alteraciones de casi  $1^\circ\text{C}$  en la capa superficial de la columna de agua. Por otro lado, el análisis de la marea no mostró una clara influencia sobre la dinámica de la columna de agua. En resumen, el forzante físico de mayor influencia sobre la dinámica de la columna de agua en la bahía Nueva es el viento, generando de eventos de *downwelling* y con algo más de resistencia eventos de *upwelling*.

A la hora de analizar la composición del plancton en esta tesis se tomó la decisión de realizar un análisis taxonómico del zooplancton, en donde se vió que, durante el periodo muestreado, la abundancia relativa de Copepoda fue de un 95%, mientras que para Appendicularia se registró un 2% y para Polychaeta un 1%, el 2% restante se repartió entre larvas de Megalopa, Ascidia, Cnidarios, Cirripedia y Bivalva, observándose estos en muy bajas abundancias relativas.

La abundancia de Copepoda se vió afectada por las corrientes generadas por los vientos. El *downwelling* generó un descenso significativo de la abundancia de Copepoda en ambos estratos muestreados. Sobre todo en fondo, donde se encontraron las mayores abundancias relativas de Copepodos durante todo el muestreo.

## Referencias

- Akaike, H., (1974). A new look at the statistical model identification. *Automatic Control, IEEE Transactions on* 19(6):716-723.
- Akaike, H., (1998). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle Selected Papers of Hirotugu Akaike. Springer, 199-213.
- Baleani C.A., Menéndez. M.C., Vitale A.J., Amodeo M.R., Perillo G.M.E., & Piccolo M.C. (2024), Assessing the role of tidal cycle, waves, and wind as drivers of surf zone zooplankton on a temperate sandy beach. *Regional Studies in Marine Science*, 73,103455. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103455>
- Biasotti A. (2024), Respuesta comportamental del mero (*Acanthistius patachonicus*) al buceo deportivo en el Golfo Nuevo. Tesis de Licenciatura en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. 36 p
- Boltovskoy, D. (1981). Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino. Argentina: Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero. 861-933.
- Bonardelli JC., Himmelman, J.H., & Drinkwater K. (1996), Relation of spawning of the giant scallop, *Placopecten magellanicus*, to temperature fluctuations during downwelling events. *Marine Biology* 124(4): 637-649. <https://doi.org/10.1007/BF00351045>
- Bristow, L. A., Mohr, W., Ahmerkamp, S., & Kuypers, M. M. (2017). Nutrients that limit growth in the ocean. *Current Biology*, 27(11), R474-R478. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.03.030>
- Brzezinski, M.A. (1985), The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. *Journal of Phycology*, 21: 347-357. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1985.00347.x>
- Brzezinski, M. A. (1985). The Si: C: N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables 1. *Journal of Phycology*, 21(3), 347-357. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1985.00347.x>
- Burnham K, Anderson D (2002) Model selection and multimodel inference: a practical information–theoretic approach. Springer Science & Business Media, 2003, New York. 488p
- Dellatorre F. G. (2009) Influencia de factores ambientales sobre la distribución y el asentamiento de larvas de cangrejos braquiuros y anomuros con potencial pesquero en Golfo Nuevo. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Comahue. 225p

- Dellatorre F. G., Lovrich G., Rojas L., Milano V., Figueroa N. D. & Barón P. J. (2014) Seasonal abundance and vertical distribution of crab larvae from northern Patagonia (Argentina): Implications for their transport in a biogeographic boundary region. *Mar. Biol. Res.* 10, 37–50. [DOI:10.1080/17451000.2013.793805](https://doi.org/10.1080/17451000.2013.793805)
- Dellatorre, F. G., Pisoni, J. P., Barón, P. J., & Rivas, A. L. (2012). Tide and wind forced nearshore dynamics in Nuevo Gulf (Northern Patagonia, Argentina): Potential implications for cross-shore transport. *Journal of Marine Systems*, 96, 82-89. [DOI:10.1016/j.jmarsys.2012.02.004](https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.02.004)
- Getino Marmet, L. N. (2022) Factores que modulan la variabilidad espacio-temporal en el reclutamiento de la vieira tehuelche, *Aequipecten tehuelchus*: Una aproximación desde la condición reproductiva y la conectividad biológica. Tesis doctoral. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. 159p
- Gille, S. T., Llewellyn Smith, S. G. & Lee, S. M. (2003) Measuring the sea breeze from QuikSCAT Scatterometry. *Geophysical Research Letters*. 30, 3–6. <https://doi.org/10.1029/2002GL016230>
- Haurwitz, B. (1947) Comments on the Sea-Breeze Circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 4, 1-8. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1947\)004%3C0001:COTSBC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1947)004%3C0001:COTSBC%3E2.0.CO;2)
- Hays, G. C. (1995). Ontogenetic and seasonal variation in the diel vertical migration of the copepods *Metridia lucens* and *Metridia longa*. *Limnology and Oceanography*, 40(8), 1461-1465. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.8.1461>
- Krepper, C.M & Rivas, A. L. (1979). Dinámica de las aguas superficiales del Golfo Nuevo. Parte I: medición de corrientes con superficies derivantes. *Acta Oceanographica Argentina*, 2 (2):83-106.
- Lucas, A. J., Franks, P. J., & Dupont, C. L. (2011). Horizontal internal-tide fluxes support elevated phytoplankton productivity over the inner continental shelf. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 1(1), 56-74. <https://doi.org/10.1215/21573698-1258185>
- Mann, K. H., & Lazier, J. R. (2005). *Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the oceans*. John Wiley & Sons. 510p. [DOI:10.1002/9781118687901](https://doi.org/10.1002/9781118687901)
- McCombie, A. M. (1953). Factors influencing the growth of phytoplankton. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 10(5), 253-282. <https://doi.org/10.1139/f53-019>
- McCullagh, P. y Nelder, J. A., (1989). *Generalized linear models* (2nd ed.), vol 37. Routledge, 532. <https://doi.org/10.1201/9780203753736>
- Mouzo, F., Garza, M. L., Izquierdo, J. F., & Zibecchi, R. O. (1978). Rasgos de la geología submarina del Golfo Nuevo (Chubut). *Acta Oceanographica Argentina*, 2(1), 69-91.

- Paruelo, J. M., Beltrán, A., Jobbágy, E., Sala, O. E., & Golluscio, R. A. (1998). The climate of Patagonia general patterns and controls on biotic processes. *Ecología austral*, 8(02). [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/ecologiaaustral/ecologiaaustral\\_v008\\_n02\\_p085.pdf](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/ecologiaaustral/ecologiaaustral_v008_n02_p085.pdf)
- Pickard, G. L., & Emery, W. J. (1990). *Descriptive physical oceanography: An introduction (fifth enlarged edition. (in SI units))*. Pergamon Press. Butterworth-Heinemann. 320p
- Pineda, J. (1991). Predictable upwelling and the shoreward transport of planktonic larvae by internal tidal bores. *Science*, 253(5019), 548-549. [DOI: 10.1126/science.253.5019.548](https://doi.org/10.1126/science.253.5019.548)
- Pisoni J. P., Dellatorre, F. G. & Rivas, A. L. (2017). Temperatura del mar en la estación oceanográfica muelle Luis Piedrabuena durante el periodo 2011-2016. Informe técnico interno CESIMAR CCT CONICET-CENPAT. 12p.
- R Core Team (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Redfield, A. C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46(3), 230A – 221. <http://www.jstor.org/stable/27827150>
- Rivas, A., & Ripa, P. (1989). Variación estacional de la estructura termo-halina de golfo Nuevo, Argentina. *Geofísica Internacional*, 28(1), 3-24. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1989.28.1.1014>
- Sandstrom, H., and J. A. Elliott (1984), Internal tide and solitons on the Scotian Shelf: A nutrient pump at work, *Journal of Geophysical Research.*, 89(C4), 6415–6426, [doi:10.1029/JC089iC04p06415](https://doi.org/10.1029/JC089iC04p06415).
- Santinelli, N, H. (2008) Fitoplancton de un ambiente costero sometido a perturbación antrópica: bahía Nueva, provincia de Chubut. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco 216 p
- Sayavedra S. (2024) Estudio de diferentes procesos de transporte de plancton y nutrientes en el Golfo San José, Patagonia Argentina. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. 78p
- Tankersley R. A. & Forward Jr R. B. (2007) *Environmental physiology. Blue Crab Callinectes sapidus*. Coll. Park A Maryland Sea Grant. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/46687>
- Zuur, A., Leno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A. y Smith, G. M., (2007). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer Science & Business Media.