

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y GEOGRAFÍA
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

Variación vertical y temporal en la concentración de isotopos
estables de Nitrógeno durante eventos de surgencia, frente a
Punta Ángeles, Valparaíso.

Trabajo de Titulación para optar al Título de Oceanógrafo

Gabriela Polanco Cabrera

Valparaíso, 2017

Comisión de Titulación:

Profesor Guía: Dra. Marcela Cornejo D'Ottone

Profesor: Dr. Eduardo Quiroga Jamett

Profesor: Dr. Samuel Hormazábal Fritz

AUTORIZACIÓN DE USO

Autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente de este Trabajo de Titulación. Además, autorizo la reproducción parcial o total de este documento sólo con fines académicos.

Gabriela Polanco Cabrera

Dedicatoria

“No tengo talentos especiales, pero sí soy profundamente curioso”

Albert Einstein.

Eres quien me hace llenar de orgullo, te amo, nunca habrá forma de devolverte todo lo que hiciste por mí, gracias infinitas, hasta por lo que ni se imagina. Esta tesis es un logro más que llevo a cabo, y sin lugar a dudas ha sido en gran parte gracias a ti; no sé en donde me encontraría de no ser por tu ayuda, tu compañía, y tu amor.

Te doy mis sinceras gracias, mamita hermosa, mi Chechi.

AGRADECIMIENTOS.

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo de titulación, en especial a mi profesora guía Marcela Cornejo por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa de la misma, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido durante este año.

A los profesores, Eduardo, Samuel y Juan por cada sugerencia y correcciones realizadas en mis avances, gracias por enriquecer este trabajo.

A mis compañeros de carrera y también a mis amigos de la vida, Nina eres espectacular, gracias por el apoyo moral, sin tus memes no hubiera sido lo mismo. Paulita, Pía, Dani, Cony, André, Aylin, Paty, Chico gracias por tenerme Fe, por sacarme siempre una risa y sus tardes-noches recreativas (si alguien queda en el tintero, no se sientan, mil gracias a todos los que me vieron en esto).

A mis padres, Renzo, Ro, Kathy, tía Titi, tía Chana, abuela, gracias por todo el apoyo, son los mejores, no los cambiaría por nada en este mundo.

Pablo le agradezco tantas ayudas y aportes, no solo para el desarrollo de este trabajo sino también para mi vida, por mostrarme más allá de lo que otros no ven, por su inmensa paciencia y por su tiempo concedido, Te Amo mi negrito hermoso.

TABLA DE CONTENIDO

Comisión de Titulación:	i
AUTORIZACIÓN DE USO	iii
Dedicatoria	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
TABLA DE CONTENIDO	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	5
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECIFICOS	6
MATERIALES Y METODOS	7
RESULTADOS	12
Variables Oceanográficas	12
Variables biogeoquímicas	14
Índice de surgencia	23
Estadística	25
DISCUSIÓN	29
CONCLUSIÓN	34
REFERENCIAS	35
ANEXOS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la zona de estudio donde se encuentra la posición de las estaciones de la Serie de Tiempo Oceanográfica de Valparaíso.....	4
Figura 2. Estaciones de STOV frente a Punta Ángeles, con un mapa de la batimetría de la zona.....	7
Figura 3. Serie de tiempo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y salinidad de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV ($32,92^{\circ}\text{ W}$ y $71,87^{\circ}\text{W}$).....	13
Figura 4. Serie de tiempo de densidad (kg m^{-3}) y oxígeno disuelto (mL L^{-1}) de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^{\circ}$ y $-71,87^{\circ}$).....	14
Figura 5. Serie de tiempo fosfato y silicato en μM , de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^{\circ}$ y $-71,87^{\circ}$).....	15
Figura 6. Serie de tiempo nitrato y nitrito en μM , de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^{\circ}$ y $-71,87^{\circ}$).....	16
Figura 7. Serie de tiempo del consumo aparente de oxígeno (AOU, en mL L^{-1}) y óxido nítrico (nM), de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^{\circ}$ y $-71,87^{\circ}$)..	17
Figura 8. Serie de tiempo N^* (μM), de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^{\circ}$ y $-71,87^{\circ}$).....	18
Figura 9. Serie de tiempo de ^{15}N y ^{13}C de la MOP, de enero 2015 a noviembre 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^{\circ}$ y $-71,87^{\circ}$).....	19
Figura 10. Serie de tiempo de ^{15}N y ^{13}C de la MOP hasta los 50 m, de enero 2015 a noviembre 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^{\circ}$ y $-71,87^{\circ}$).....	20
Figura 11 Serie de tiempo de la razón C/N (MOP) y N/P (nutrientes), de enero 2015 a noviembre de 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^{\circ}$ y $-71,87^{\circ}$).....	21
Figura 12. Serie de tiempo de la razón C/N (MOP) y N/P (nutrientes) hasta los 50 m de profundidad, de enero 2015 a noviembre de 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^{\circ}$ y $-71,87^{\circ}$).....	22
Figura 13. Transporte perpendicular (línea azul) y paralelo (línea roja) a la costa en $\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$, entre enero del 2015 y diciembre del 2016.....	23
Figura 14. Tensión acumulativa del viento a lo largo de la costa en Nm, entre agosto del 2014 y julio del 2017.....	24

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{15}\text{N}$ en la capa de mezcla entre periodos son y sin surgencia costera.....	25
Tabla 2. Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{15}\text{N}$ en la oxiclina entre periodos son y sin surgencia costera.....	26
Tabla 3. Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{15}\text{N}$ en la ZMO entre periodos son y sin surgencia costera.....	26
Tabla 4: Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{13}\text{C}$ en la capa de mezcla entre periodos con y sin surgencia costera.....	27
Tabla 5; Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{13}\text{C}$ en la oxiclina entre periodos con y sin surgencia costera.....	27
Tabla 6: Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{13}\text{C}$ en la ZMO entre periodos con y sin surgencia costera.....	28
Tabla 7: Test de normalidad Shapiro-Wilk, para periodos con y sin surgencia, para las capas de mezcla, oxiclina y zona mínima de oxígeno para el ^{15}N	40
Tabla 8: Promedios y medias para cada la capa de mezcla, oxiclina y zona mínima de oxígeno para periodos con y sin surgencia para el ^{15}N	40
Tabla 9: Test de normalidad Shapiro-Wilk, para periodos con y sin surgencia, para las capas de mezcla, oxiclina y zona mínima de oxígeno para el ^{13}C	41
Tabla 10: Promedios y medias para cada la capa de mezcla, oxiclina y zona mínima de oxígeno para periodos con y sin surgencia, para el ^{13}C	41

RESUMEN

El sistema costero de Chile central se identifica por presentar una surgencia estacional asociada al forzante local del viento S y SW, la cual cambia la estructura vertical de la columna de agua y es responsable de la variabilidad temporal y vertical de las características oceanográficas y biogeoquímicas de la zona. Cuyo efecto es notorio en la capa superficial y de mezcla, que se renueva con el ascenso de aguas subsuperficiales ricas en nutrientes, causando la alta productividad primaria, y como consecuencia una alta carga de materia orgánica partícula al sistema, donde esta última es sujeta a un fraccionamiento de los isotopos de nitrógeno, los cuales depende en gran medida de la concentración de nitrato y nitrógeno orgánico disponible en la columna de agua (Holmes, 2002). En este trabajo se analiza la variabilidad temporal y vertical de las variables oceanográficas y biogeoquímicas, con un enfoque en los cambios que se presentan en la columna de agua de la señal de ^{15}N de la MOP durante eventos con y sin surgencia costera, muestras y datos obtenidos de la serie de tiempo oceanográfica de Valparaíso (STOV) entre enero 2015 y octubre 2016, frente a Punta Ángeles, Valparaíso. Además se analizan datos de viento, estrés y transporte superficial de Ekman, con el propósito de poder abordar la hipótesis, y determinar si la señal de ^{15}N cambia de manera significativa entre periodos con y sin surgencia costera.

Los resultados muestran que las variables oceanográficas y biogeoquímicas poseen una variabilidad estacional bien definida, marcada por la surgencia costera durante el periodo primavera-verano. También hubo anomalías muy marcadas en las variables biogeoquímicas, en especial en la concentración de nitrato, óxido nitroso, en el ^{15}N , en la C/N (MOP) y en el trazador N^* , asociadas al meteotsunami, las cuales duraron meses en la columna de agua. Mientras que la señal isotópica del nitrógeno asociado a la capa de mezcla y a la oxiclina tuvo diferencias significativas entre los periodos con y sin surgencia (p (normal) $<0,02$), empobreciendo su señal durante los periodos con surgencia costera. Mientras que para la ZMO no hubo diferencias significativas en la señal isotópica en los meses con y sin surgencia costera (p (normal) $>0,1$).

ABSTRACT

The coastal system of Chile was identified by presenting an emergency associated with the local wind forcing S and SW, which changes the vertical structure of the water column and is responsible for the temporal and vertical variability of the oceanographic and biogeochemical characteristics of the area. The effect is noticeable in the surface layer and the mixture, which is renewed with the rise of subsurface waters, in organic substances, in the transmission of organic matter, in the last load of organic matter to the system a fractionation of the stable isotopes of nitrogen, which depend to a large extent on the concentration of nitrate and the organic acid available in the water column (Holmes, 2002). In this paper, the temporal and vertical variability of the oceanographic and biogeochemical variables is analyzed, with a focus on the changes that occur in the water column of the ^{15}N MOP signal during events with and without coastal upwelling, and the data obtained from the Valparaíso Oceanographic Time Series (STOV) between January 2015 and October 2016, in front of Punta Ángeles, Valparaíso. Ekman wind, stress and surface transport data are also analyzed, in order to be able to approach the hypothesis, and determine if the ^{15}N signal changes significantly between periods with and without coastal upwelling.

The results show that the oceanographic and biogeochemical variables have a well-defined seasonal variability, marked by the coastal upwelling during the spring-summer period. There were also very marked anomalies in the biogeochemical variables, especially in the concentration of nitrate, nitrous oxide, in ^{15}N , in C/N (MOP) and in tracer N^* , associated with meteotsunami, which lasted for months in the water column. While the isotopic signal of the nitrogen associated with the mixture layer and the oxycline had significant differences between the periods with and without upwelling (p (normal) < 0.02), impoverishing its signal during the periods with coastal upwelling. While for the ZMO there were no significant differences in the isotopic signal in the months with and without coastal upwelling (p (normal) > 0.1).

INTRODUCCIÓN

El Sistema de Corriente de Humboldt (SCH) es uno de los más productivos, se extiende a lo largo del Pacífico Sur oriental frente a Chile y Perú. La alta productividad del SCH se debe a los afloramientos costeros inducidos por el viento que producen un efecto fertilizador en la capa superficial, más conocido como surgencia (Graco *et al.*, 2006).

La surgencia costera se presenta de forma frecuente a lo largo de la costa de Chile (en especial entre los 18°S y 38°S), marcándose con mayor frecuencia durante la primavera en la zona central de Chile. La intensidad de la surgencia está influenciada por la orientación de la costa y el régimen de vientos, los cuales son predominantes del sur y suroeste, como resultado de la localización del anticiclón subtropical del Pacífico sur oriental (Bakun & Nelson, 1991). Las fluctuaciones del viento, tanto en dirección como en magnitud, generan una alta variabilidad de los procesos de surgencia, tanto espacial como temporalmente. Se ha observado que la variabilidad espacial de la surgencia, está estrechamente asociada a la topografía de la costa, predominando en zonas específicas, tales como bahías, puntas y cabos (Fonseca & Farías, 1987). En cambio, la variabilidad temporal de la surgencia, está asociada a las fluctuaciones del régimen de vientos. Así, en Chile central la surgencia presenta una fuerte variación estacional, la cual es intensificada en los meses de primavera-verano (Strub *et al.*, 1998), donde además se presentan con periodos de 3-4 días. El viento a través de la surgencia costera promueve la producción primaria que constituye la base de la cadena trófica, por el bombeo de nutrientes desde las capas sub-superficiales de la columna de agua hacia la zona eufótica (Barber & Smith, 1981).

Por otra parte, la capa subsuperficial del SCH se caracteriza por presentar una Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO), definida como aguas que presentan concentraciones de oxígeno menores a 1 mL/L (Morales *et al.*, 1999; Naqvi *et al.*, 2010). En la zona costera frente al Norte y Centro de Chile, como resultado de las altas tasas de respiración de la materia orgánica, se han registrado concentraciones de oxígeno menores a 0,5 mL/L que pueden alcanzar niveles de anoxia (Revsbech *et al.*, 1999),

Las ZMO presentan un ciclo del nitrógeno activo, en donde se presentan diferentes especies químicas (N-MOP , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , NO , N_2O , N_2 y urea) que abarcan un amplio rango de estados de oxidación (-III a +V). Las reacciones redox que transforman estas especies de nitrógeno son mediadas biológicamente por microorganismos marinos, como parte de su metabolismo asociado a procesos asimilativos como desasimilativos. Algunos de estos procesos producen una pérdida de nitrógeno reactivo del océano (i.e., utilizable por la mayoría de los procesos autótrofos), al generar N_2 (e.g., desnitrificación y anammox). Otros procesos, en cambio, son una fuente de nitrógeno reactivo al océano, a partir de una especie inerte como N_2 (e.g., fijación de N_2) (Gruber, 2008). La ocurrencia de estos procesos biogeoquímicos está determinada principalmente por las concentraciones de oxígeno disuelto en la columna de agua, así como también por la disponibilidad de sustratos y fuentes de energía.

Clasificación de los isotopos de nitrógeno.

Los isótopos son átomos de un mismo elemento que difieren en el número de neutrones en el núcleo, con un mismo número de protones. Los neutrones adicionales en el núcleo de un elemento suelen producir sutiles diferencias químicas, entre ellas su número másico, siendo el más pesado el que tiene más neutrones (i.e., en el caso del nitrógeno ^{15}N) (Fry, 2006).

En la naturaleza encontramos 2 tipos de nitrógeno (^{14}N y ^{15}N), siendo el más común el ^{14}N . Los organismos prefieren asimilar o utilizar la especie de nitrógeno que contenga en su composición ^{14}N , antes de ^{15}N . Esta preferencia genera una diferenciación en la razón de $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ sobre la especie de nitrógeno que resulta de la transformación redox. Esta diferenciación se conoce como fraccionamiento isotópico. Conocer este fraccionamiento de la razón entre el $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, permite determinar con mayor exactitud el proceso que está ocurriendo en la columna de agua respecto al ciclo del N, en presencia de alguna fuente o sumidero de nitrógeno en el océano, cambios en la concentración de oxígeno, y cambios en la concentración de nutrientes entre otros factores (como ocurre en los eventos de surgencia

con presencia de una ZMO), los valores en esta razón isotópica deberían variar (Fry, 2006). Esta variabilidad de la composición isotópica de las diferentes especies de nitrógeno en la zona de surgencia frente a Valparaíso no es conocida, así como tampoco sus forzantes físicos y biológicos.

Los procesos de remineralización dejan un pool de la materia orgánica particulada (MOP) menos enriquecido en ^{15}N . La intensidad de la ZMO que se presenta en la zona central de Chile, hace que la desnitrificación sea un proceso activo, en donde se utiliza frecuentemente nitrato enriquecido con ^{14}N . Este fraccionamiento produce nitrato enriquecido en ^{15}N en particular en la ZMO. Cuando los procesos de surgencia bombean hacia la capa superficial estas aguas ricas en nitrato con menor señal de ^{15}N , la producción primaria se utilizará y generará materia orgánica con menos ^{15}N . Este fraccionamiento gradual durante los eventos de surgencia y períodos con presencia de ZMO producen una materia orgánica en la columna de agua con una fracción de ^{15}N más pobre lo cual no ocurriría en periodos sin eventos de surgencia y sin presencia de ZMO. En la zona de surgencia de Benguela se ha observado que este fraccionamiento gradual que ocurre durante los eventos de surgencia con presencia de aguas de la ZMO, hace que el pool de materia orgánica presente en la columna de agua tenga una fracción ^{15}N más pobre que durante periodos sin eventos de surgencia y sin presencia de ZMO (Holmes *et al.*, 2002).

Las mediciones del fraccionamiento isotópico permiten caracterizar el ciclo de elementos en los ecosistemas. Los isotopos estables, a diferencia de los isotopos radioactivos, persisten en la misma forma por eones después de que se forman, son seguros, y son parte natural de los seres vivos (Fry, 2006).

En este trabajo se propone realizar una comparación de la variabilidad temporal de la concentración de isotopos estables de Nitrógeno en la materia orgánica particulada en la columna de agua en zonas de surgencia con presencia de una zona mínima de oxígeno durante los años 2015 y 2016, basada en la información recolectada de la Serie de Tiempo Oceanográfica de Valparaíso (STOV).

Transecta STOV

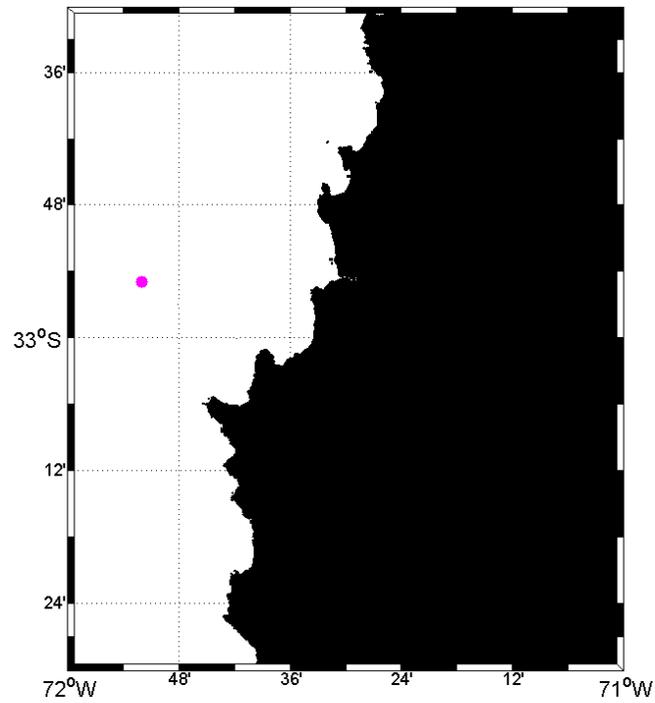


Figura 1. Mapa de la zona de estudio donde se encuentra la posición de las estaciones de la Serie de Tiempo Oceanográfica de Valparaíso.

HIPÓTESIS

La surgencia costera con presencia de una zona mínima de oxígeno frente a Valparaíso, favorece el incremento de la producción primaria y a su vez la ocurrencia de procesos anaeróbicos asociados a la degradación de la materia orgánica particulada de la columna de agua, provocando una disminución en el enriquecimiento de ^{15}N de la MOP de la columna de agua, en relación a los periodos sin surgencia en presencia de una zona mínima de oxígeno.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el impacto de la surgencia costera con presencia de una zona mínima de oxígeno en las fluctuaciones de isotopos estables de Nitrógeno presentes en la materia orgánica particulada en la columna de agua, durante los años 2015 y 2016.

OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Describir la variabilidad vertical y temporal de las condiciones oceanográficas frente a Punta Ángeles, Valparaíso (STOV).
- Caracterizar los periodos de medición poniendo énfasis en la presencia/ausencia de eventos de surgencia.
- Determinar la variabilidad biogeoquímica vertical y temporal (oxígeno disuelto, nutrientes, isotopos estables en la MOP, N₂O).
- Comparar la concentración de isotopos estables (¹⁵N) de la MOP de la columna de agua, en periodos con y sin presencia de eventos de surgencia activos.

MATERIALES Y METODOS.

Diseño de muestreo

La información oceanográfica y muestras fueron obtenidos de manera mensual entre la superficie y una profundidad máxima de 900 m, en una sección perpendicular a la costa frente a Valparaíso (figura 1), específicamente en la estación 5 (-32,9° y -71,8°) de STOV, realizado entre enero del 2015 y noviembre de 2016.

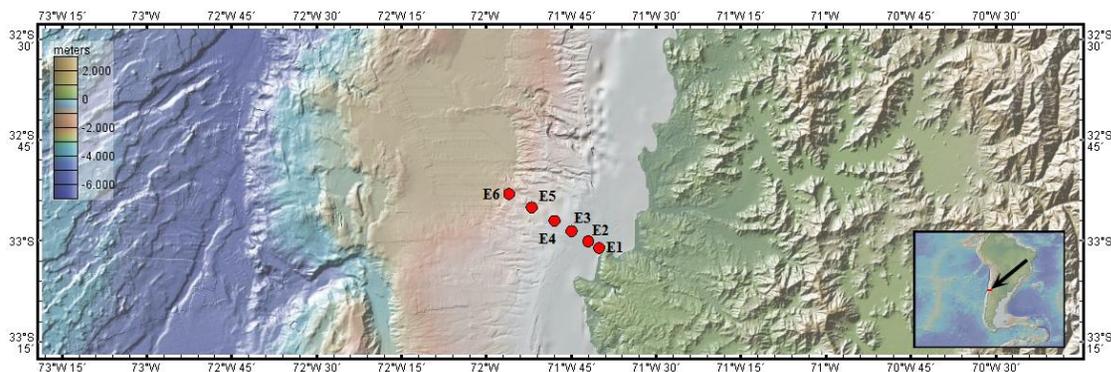


Figura 2. Estaciones de STOV frente a Punta Ángeles, con un mapa de la batimetría de la zona.

Muestreo.

Con el fin de describir la variabilidad vertical y temporal de las condiciones oceanográficas frente a Punta Ángeles en la estación 5 de STOV, se realizó un registro vertical continuo de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto con un CTD-OF (Seabird Modelo SBE25) hasta una profundidad máxima de 900 m

Para determinar la variabilidad biogeoquímica (oxígeno disuelto, nutrientes, N_2O , isotopos estables en la MOP), se recolectaron muestras con una botella Niskin a profundidades estándares (0, 5, 10, 15, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 750 y 900 m).

Para el análisis de la concentración de oxígeno disuelto, las muestras fueron almacenadas en matraces de determinación Yodo de 125 mL, para su posterior análisis en el laboratorio.

Las muestras de N₂O, fueron almacenadas en viales de 20 mL, a las cuales se les agrego inmediatamente Cloruro de Mercurio (HgCl₂), con el propósito de evitar cualquier actividad biológica. Los viales fueron sellados herméticamente hasta ser analizados en el laboratorio.

Las muestras para el análisis de nutrientes fueron colectadas filtrando 50 ml de agua de mar (GF/F 0,45 µm) y almacenadas en botellas asépticas de polietileno de alta densidad, y congeladas hasta su posterior análisis en laboratorio.

Las muestras para la determinación de ¹³C y ¹⁵N de la MOP, se filtró 1000 mL de agua de mar utilizando filtros de fibra de vidrio de 0,7 µm premuflados (Whatman GF/F). Los filtros fueron almacenados a -20°C hasta su análisis en laboratorio.

Análisis Químicos.

Para el análisis de oxígeno disuelto las muestras fueron fijadas y analizadas de acuerdo al método Winkler modificado por Carpenter (1965) en el Laboratorio de Biogeoquímica Marina, PUCV.

La concentración de nitrato, nitrito, fosfato y silicato se realizó mediante análisis colorimétricos en un autoanalizador (Alpkem RFA/2) utilizando la metodología de (Strickland and Parsons 1972) en el Laboratorio de Biogeoquímica Marina, PUCV.

Las muestras de N₂O se determinaron a través de la técnica de headspace (McAullife 1971) y analizadas por cromatografía gaseosa en un cromatógrafo de gases (Greenhouse GC-2014, Shimatzu) equipado con un Detector de Captura de Electrones (ECD) para la determinación de N₂O en el Laboratorio de Gases de Efecto Invernadero, PUCV.

El análisis de isótopos estables de C y N se realizó mediante de espectrometría de masas con un espectrómetro IRMS, Finnigan Delta Plus, se realizó una acidificación previa con ácido clorhídrico fumante, con el fin de eliminar el carbonato de calcio que hubiera en las muestras. Luego los filtros fueron introducidos en capsulas de estaño (10 x 10 mm) y sellados de manera homogénea. La medición de la relación isotópica se realizó mediante espectrometría de masa con relación de isótopos de flujo continuo (IRMS, Finnigan Delta Plus). Primero la muestra en base al método de flash combustión, pasa a una cámara en donde son incineradas a una temperatura por sobre los 1000°C, con el propósito de que todo el carbono orgánico pase a dióxido de carbono y el nitrógeno pase a nitrógeno gaseoso, estos gases son transportados mediante un gas inerte (Helio) hasta el espectrómetro de masa, el cual separa los átomos e incluso iones según la masa que estos posean y así medir su respectiva abundancia. Los gases de dióxido de carbono y nitrógeno gaseoso son ionizados, causando un incremento de la velocidad en los iones positivos, los cuales, al llegar a un campo magnético, originan que su trayectoria se torne circular, esto ocurre producto a la fuerza de Lorentz, esta fuerza establece que el radio de la trayectoria es directamente proporcional a la masa del ion. De esta forma los iones son separados y recolectados en las cajas de Faraday, las cuales están espaciadas específicamente para recoger los isotopos estables pertinentes (Reyes, 2004). Para el cálculo del delta isotópico (δ) y calibración del equipo se utilizó como blanco el gas Helio, además 5 estándares internos previamente normalizados, los cuales son de concentración conocida, de alta pureza y porcentaje de carbono y nitrógeno conocido, estos estándar son: Acetanilida, Atropina, Cafeína, Sediment High organic y Acido Glutámico (Hoefs, 2015). La variación de la abundancia isotópicas se expresa utilizando δ en partes por mil, la cual se obtiene utilizando las ecuaciones 1 y 2 (Reyes, 2004).

$$R = \frac{\text{abundancia de isotopo pesado}}{\text{abundancia de isotopo livano}} \quad (1)$$

Donde R corresponde a una razón entre la cantidad de isotopo con mayor masa respecto a la cantidad de isotopo con menor masa, ya sea en una muestra o estándar (Reyes, 2004).

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estandar}}} - 1 \right) * 1000 \quad (2)$$

Donde delta corresponde a la razón entre el R de la muestra y el R del estándar, y delta se multiplica por mil para entregar resultados en partes por mil ‰ (Reyes, 2004).

Variabilidad de la surgencia.

Para identificar los periodos con y sin presencia de surgencia costera, se obtuvieron los registros de viento (dirección y magnitud) de la página web de OGIMET (de libre acceso, <https://www.ogimet.com>), la cual posee registros de la estación meteorológica ubicada en Punta Ángeles (-33,02° y -71,64°, Altitud 44 m) que pertenece al servicio meteorológico de la armada (SERVIMET), con mediciones cada 3 horas. Estos datos se utilizaron para calcular el transporte superficial de Ekman mediante la ecuación:

$$E = \frac{1}{f} (\tau k) \quad (3)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante del viento superficial, k es el vector unitario hacia la superficie del mar, f es el parámetro de Coriolis.

El viento acumulado a lo largo de la costa (sur-norte) se obtuvo para la temporada de surgencia a partir de la transición de primavera austral (generalmente de septiembre a octubre, de acuerdo con Barth et al. (2007).

Análisis de datos.

Para determinar si las concentraciones de $\delta^{15}\text{N}$ (MOP) durante eventos de surgencia son menores que sin ellos, se realizó un análisis de varianza de una vía, utilizando el programa PAST versión 3.0 (Hammer *et al.*, 2001), para ver si las diferencias de $\delta^{15}\text{N}$ (MOP) son significativas en la capa de mezcla, oxiclina y en ZMO.

La capa de mezcla se determinó mediante el método de umbrales (Thompson & Fine, 2003). Donde la intención es encontrar la profundidad de la capa de mezcla (MLD) en base a una diferencia del gradiente de temperatura vertical. Esto se realiza comparando el gradiente teórico con el gradiente calculado, cuando este último es mayor que el teórico, entonces se determina que esa profundidad es el límite interior de la capa de mezcla (Brainerd & Gregg, 1995). En este caso, se utilizó el criterio de temperatura de Montégut *et al.* (2004), que corresponde a 0,05 °C/z y una profundidad de referencia de 10 m.

RESULTADOS.

Variables Oceanográficas.

La distribución temporal de temperatura (figura 3a), muestra que la temperatura superficial presentó máximos registrados durante el mes de enero en ambos años llegando 19,33 °C, mientras que el mínimo fue registrado durante los meses de invierno (junio-julio) del año 2015, alcanzando los 11°C aproximadamente. La temperatura disminuye a medida que la profundidad incrementa, llegando a 3°C alrededor de los 800 m de profundidad.

La salinidad superficial (figura 3b) presentó mayores concentraciones en los meses de verano (34,4) mientras que en invierno este valor disminuyó a 34,2. Entre 200 y 500 m se presentó un máximo de salinidad (hasta 34,7), luego fue disminuyendo con la profundidad hasta 700 m en donde se observó un mínimo de 34,3. Bajo este mínimo, la salinidad aumento con la profundidad.

La densidad superficial presentó un mínimo de 24,4 kg/m³ en los meses de verano de la serie, mientras que las máximas densidades se observaron en invierno (25,8 kg/m³; e.g., julio 2015 y septiembre 2016). En profundidad los valores superaron los 27 kg/m³.

La concentración de oxígeno disuelto en superficie (figura 4b) fluctuó entre 5 mL L⁻¹ y 5,9 mL L⁻¹. La concentración de oxígeno disuelto disminuyó con la profundidad formando una oxiclina con un gradiente promedio de 0,038 mL/Lm. Toda la serie de tiempo presento una ZMO, la cual se localizó entre 150 y 450 m de profundidad, alcanzando un valor mínimo de 0,036 mL L⁻¹. En los meses de primavera-verano, la ZMO fue más marcada, en especial durante enero del 2015, donde la ZMO abarcaba entre 100-500 m de profundidad.

En general bajo 450 m de profundidad hubo un incremento paulatino del oxígeno disuelto alcanzando valores de 3,5 mL L⁻¹ de profundidad.

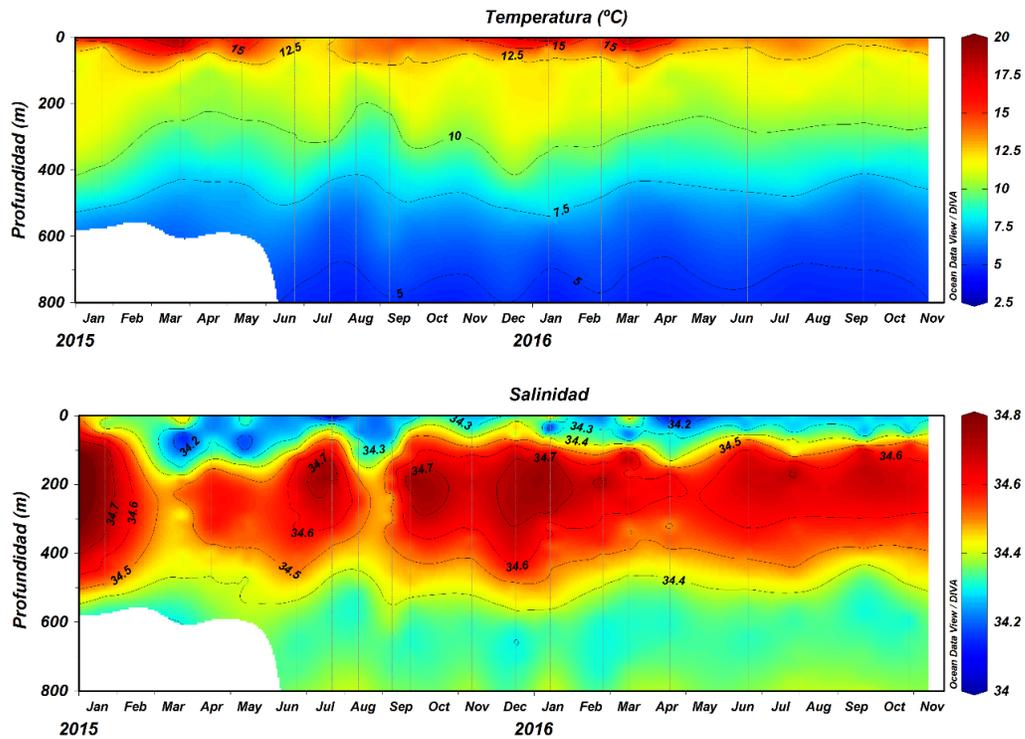


Figura 3. Serie de tiempo de temperatura (°C) y salinidad de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV (32,92° W y 71,87°W)

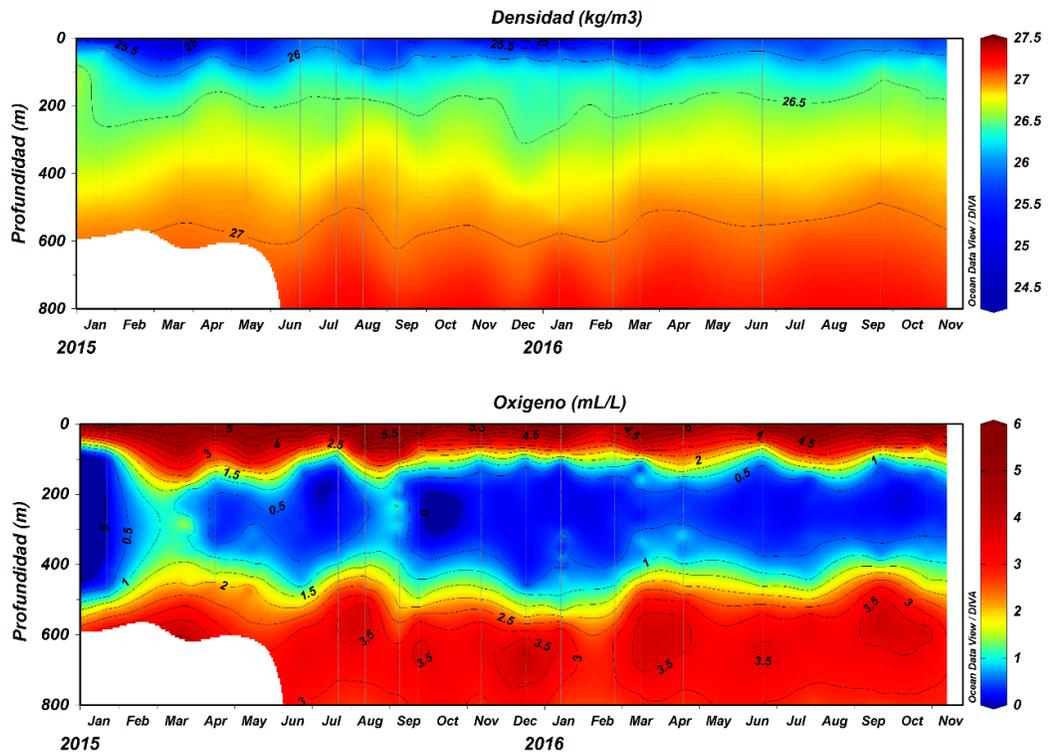


Figura 4. Serie de tiempo de densidad (kg m^{-3}) y oxígeno disuelto (mL L^{-1}) de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^\circ$ y $-71,87^\circ$)

Variabes biogeoquímicas.

El fosfato (figura 5) en la capa superficial presenta concentraciones bajas, menores a $0,75 \mu\text{M}$. Las menores concentraciones de fosfato se observaron en los meses de primavera-verano (e.g., $0,5 \mu\text{M}$ durante diciembre del 2015). Algunos meses, sin embargo, se presentaron concentraciones más altas como $1,83 \mu\text{M}$ (e.g., entre los 0-15 m en septiembre 2016). En general en toda la serie se observó un aumento en la concentraciones de fosfato con la profundidad.

La concentración de silicato superficial (figura 5) vario entre los 0,3-4,5 μM . Las máximas concentraciones de silicato se presentaron en los meses de otoño-invierno (e.g., 21,7 μM entre los 0-50 m de profundidad durante el mes de julio 2015), mientras que los valores mínimos se registraron en la época de primavera-verano, con valores menores a 0,5 μM .

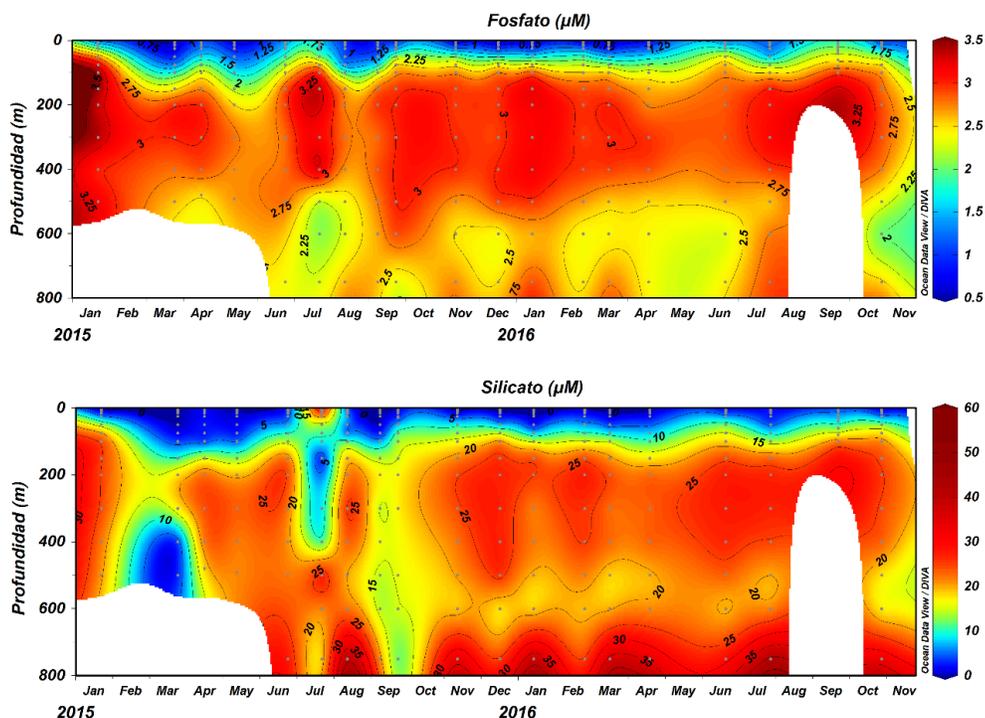


Figura 5. Serie de tiempo fosfato y silicato en μM , de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^\circ$ y $-71,87^\circ$).

La distribución superficial de nitrato (figura 6a) presentó bajas concentraciones con un mínimo de 0,4 μM , hubo un máximo superficial de 21,1 μM entre 0-25 m de profundidad en el periodo de julio 2015, se registraron otros dos máximos superficiales de 11,3 μM y 15,3 μM en julio y septiembre respectivamente del año 2016. La concentración de nitrato aumentó con la profundidad, presentando máximos que variaron entre los 30-40 μM bajo 400 m. Algunos meses (septiembre 2015) se registraron mínimos de nitrato que variaron entre 10-20 μM ubicados entre 100-700 m de profundidad.

La concentración de nitrato (figura 6b) presentó valores bajos y otros más elevados ($\sim 0,5 \mu\text{M}$). A $\sim 50 \text{ m}$ se presentó un máximo primario de nitrato con concentraciones llegaron a $0,6-1 \mu\text{M}$. La concentración de nitrato disminuyó con la profundidad, con valores de $0,1 \mu\text{M}$ (excepto octubre del 2015, donde se observaron concentraciones de $\sim 0,2 \mu\text{M}$ hasta 500 m).

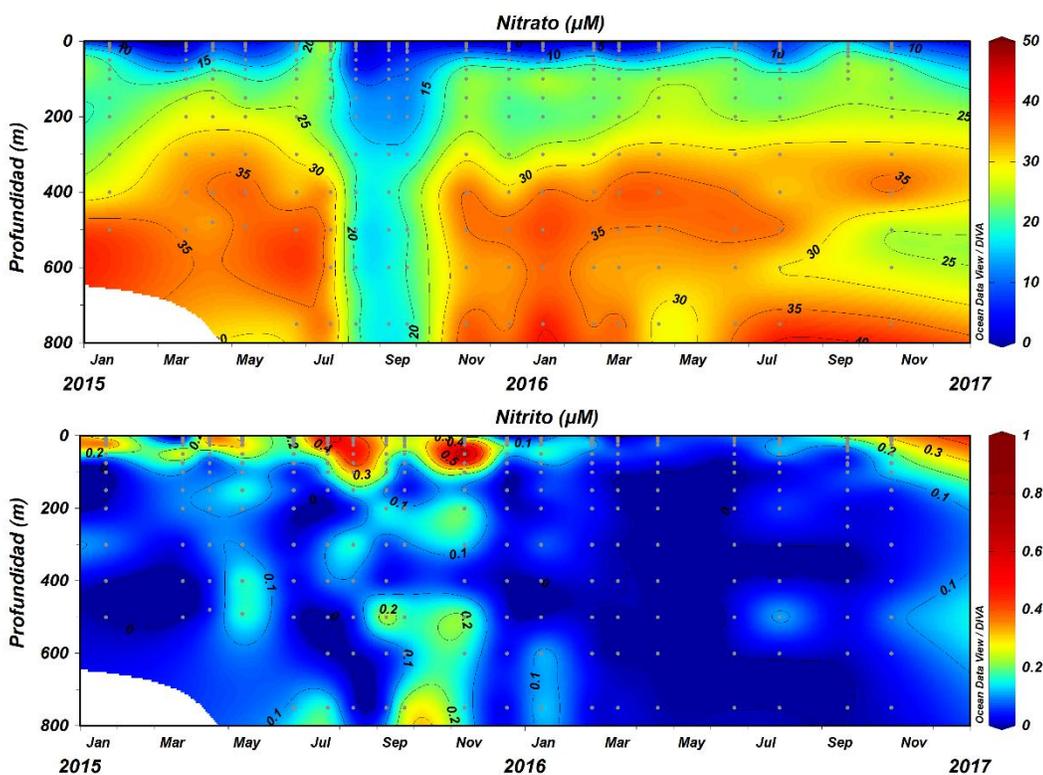


Figura 6. Serie de tiempo nitrato y nitrito en μM , de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^\circ$ y $-71,87^\circ$).

En la capa superficial el Consumo Aparente de Oxígeno (AOU, figura 7a) presentó valores negativos (mínimo de $-0,46 \text{ mL L}^{-1}$ a 3 m en enero 2015). Con el aumento de la profundidad el AOU incrementó, en donde los valores máximos $\sim 6 \text{ mL L}^{-1}$, entre $150-400 \text{ m}$ de profundidad. Bajo 400 m el AOU disminuyó, llegando a mínimos de 3 mL L^{-1} cerca de 700 m de profundidad.

La concentración de óxido nítrico (figura 7b) superficial presentó valores cercanos al equilibrio (~ 10 nM). Con el aumento de la profundidad la concentración de óxido nítrico incrementó formando un máximo entre 200-600 m de profundidad con concentraciones tan altas como 46,5 nM a 400 m (septiembre 2015). Bajo 600 m de profundidad se observó una disminución considerable de la concentración de óxido nítrico, llegando a valores de 20 nM.

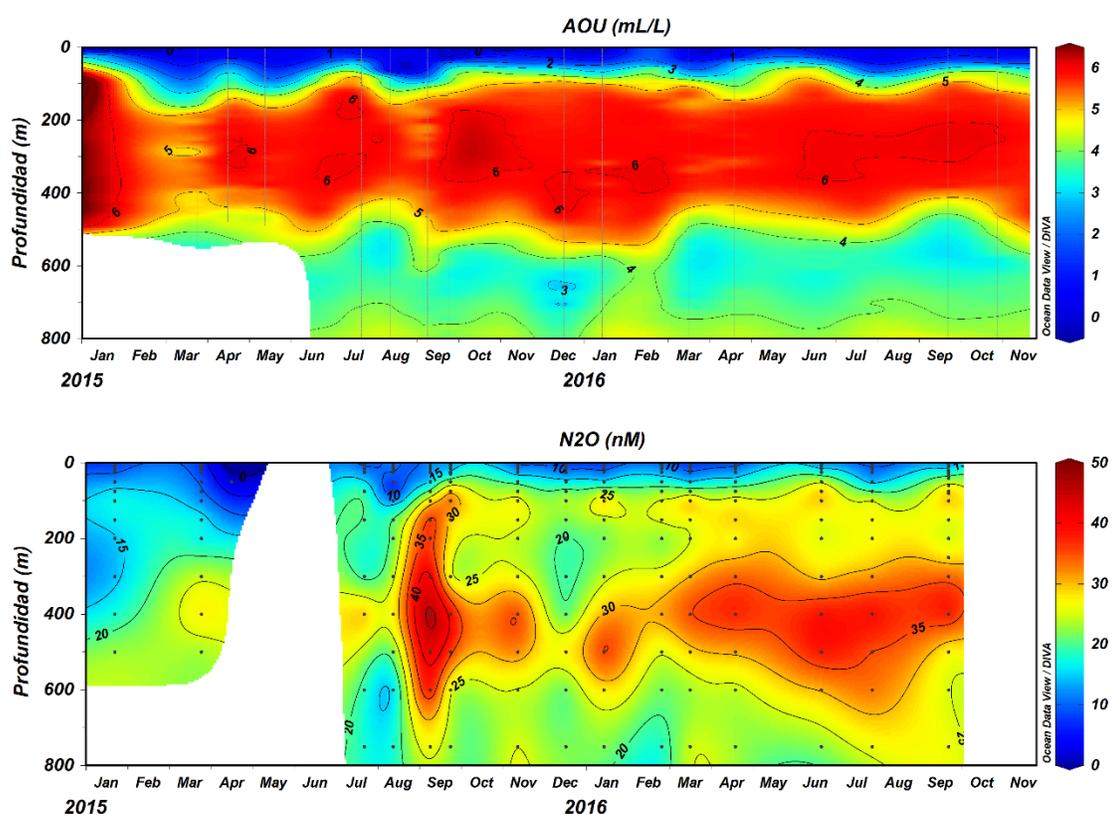


Figura 7. Serie de tiempo del consumo aparente de oxígeno (AOU, en mL L^{-1}) y óxido nítrico (nM), de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^\circ$ y $-71,87^\circ$).

Respecto al N^* (figura 8a) la serie de tiempo presentó una variabilidad estacional, los meses de primavera-verano, se registraron valores mínimos, mientras que en otoño-invierno valores máximos. En general, valores negativos indican una zona deficitaria de nitrógeno. En superficie se registraron valores tan bajos como $-15,03 \mu\text{M}$ (enero, 2015) y un máximo de $-2,71 \mu\text{M}$ (julio, 2015). A los 50 m, el N^* disminuyó con la profundidad, alcanzando un mínimo de $-33,26 \mu\text{M}$, a 200 m durante el mes de septiembre del 2015. Luego Bajo de los 400 m el N^* incrementó levemente llegando a máximos de $-5 \mu\text{M}$, excepto durante el mes de septiembre del 2015, en donde hubo valores que bordeaban los -20 y $-30 \mu\text{M}$, bajo 200 m de profundidad.

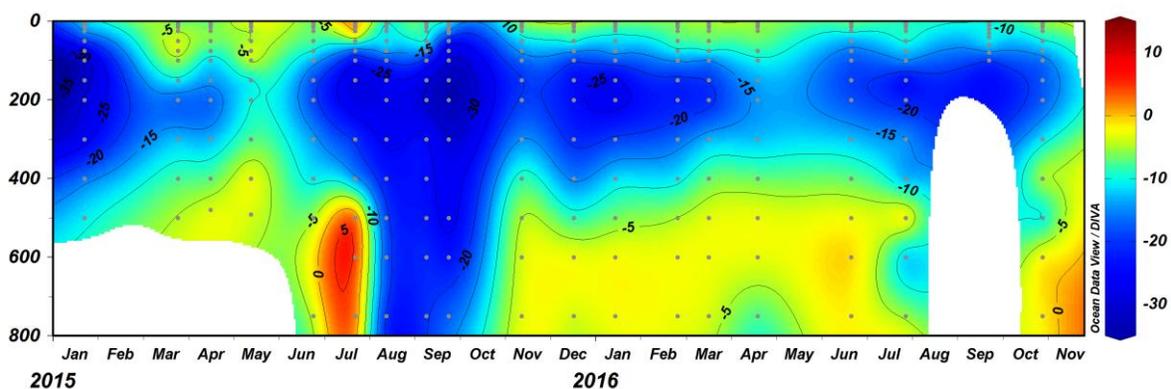


Figura 8. Serie de tiempo N^* (μM), de los años 2015 y 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^\circ$ y $-71,87^\circ$).

El $\delta^{15}\text{N}$ (figura 9a) durante el año 2015 se observó que la señal de $\delta^{15}\text{N}$ fue mínima en la época de primavera-verano $0,16 \text{‰}$ (e.g., agosto-diciembre $5-0,16 \text{‰}$), mientras que en otoño- verano la señal incremento, con valores $10-13 \text{‰}$ (marzo-junio). Sin embargo, durante el mes de enero los valores de $\delta^{15}\text{N}$ fueron similares a los de la época de otoño-invierno. Respecto al año 2016 la situación es diferente a la del año 2015, exceptuando al mes de enero el cual, tuvo valores similares al del año anterior. Lo que respecta a los meses de otoño-invierno presentaron valores bajos de $\delta^{15}\text{N}$ que variaron entre $1-6,5 \text{‰}$, mientras que el mes de septiembre incrementaron los valores de $\delta^{15}\text{N}$ entre $7-16 \text{‰}$, pero en octubre los valores bajan abruptamente, siendo similares a los de la época otoño-invierno.

El $\delta^{13}\text{C}$ (figura 9b) en la superficie presentó bajos valores que fluctuaron en general entre -26 ‰ y -25 ‰. Sin embargo, se presentó un mínimo de -26,49 ‰ en julio del 2015 y un máximo de -17,34 ‰ en enero del 2015. Se registró un máximo de 5,55 ‰ a los 50 m de profundidad, en abril 2015. Otro máximo fue de -14,03 ‰ a 300 m de profundidad durante mayo del 2015. La señal más baja que se registro fue de 26,48 ‰ a los 750 m de profundidad durante julio del 2015. En julio del 2015 hasta agosto 2016 no hubo un incremento significativo de la señal de $\delta^{13}\text{C}$, en todas las profundidades los valores variaron entre -24 a -26,48 ‰.

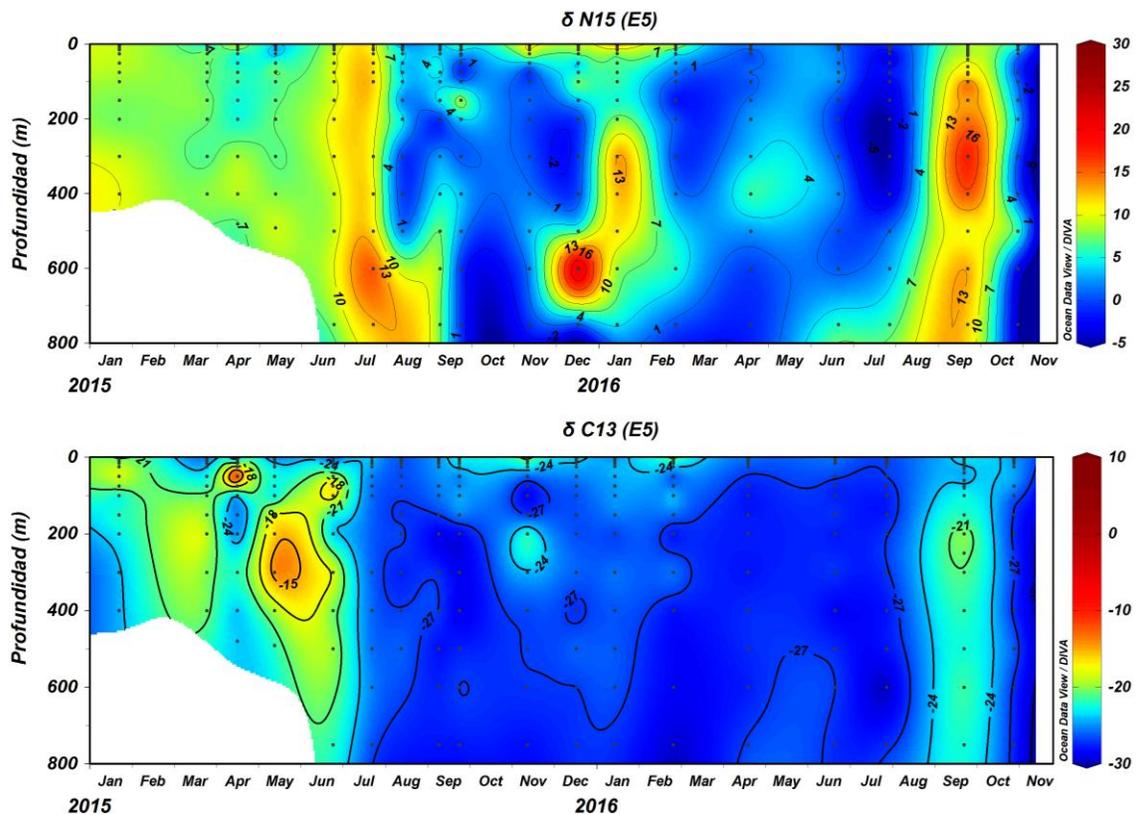


Figura 9. Serie de tiempo de ^{15}N y ^{13}C de la MOP, de enero 2015 a noviembre 2016, de la estación 5 de STOV (-32,92° y -71,87°).

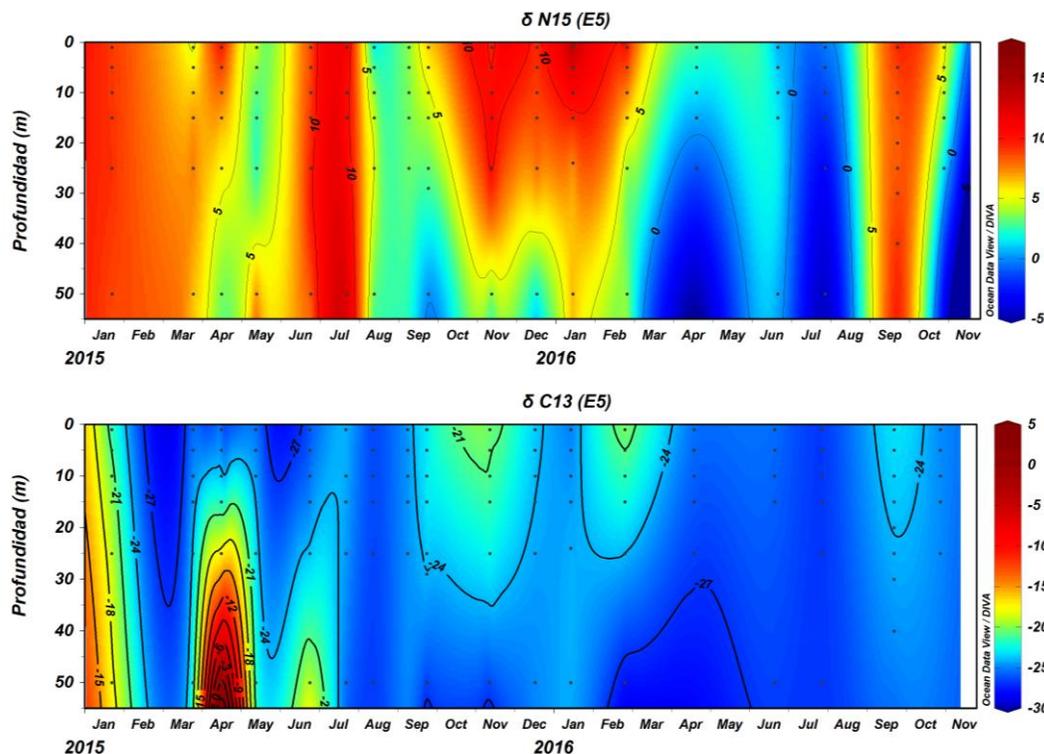


Figura 10. Serie de tiempo de ^{15}N y ^{13}C de la MOP hasta los 50 m, de enero 2015 a noviembre 2016, de la estación 5 de STOV ($-32,92^\circ$ y $-71,87^\circ$).

La razón de C/N (MOP) (figura 9a) cercano a la superficie presentó un comportamiento estacional, donde los valores mínimos ocurrieron en primavera-verano, mientras que los máximos fueron en otoño-invierno (e.g., 4,30 en septiembre 2015 y 8,7 a en junio 2016). Este comportamiento estacional se en profundidad. En los meses de enero, marzo 2015 y septiembre-octubre 2016 la relación redfield se mantuvo con valores - 6,6.

La razón N/P (nutrientes, figura 9b) en la capa superficial presentó un mínimo de 0 en marzo del 2015 y un máximo de 12,4 durante julio. Al aumentar la profundidad la razón N/P también incremento, excepto durante agosto y septiembre del 2015, en donde el incremento de la razón N/P con la profundidad fue mínimo, ya que bajo 300 m los valores fueron de 7 aproximadamente.

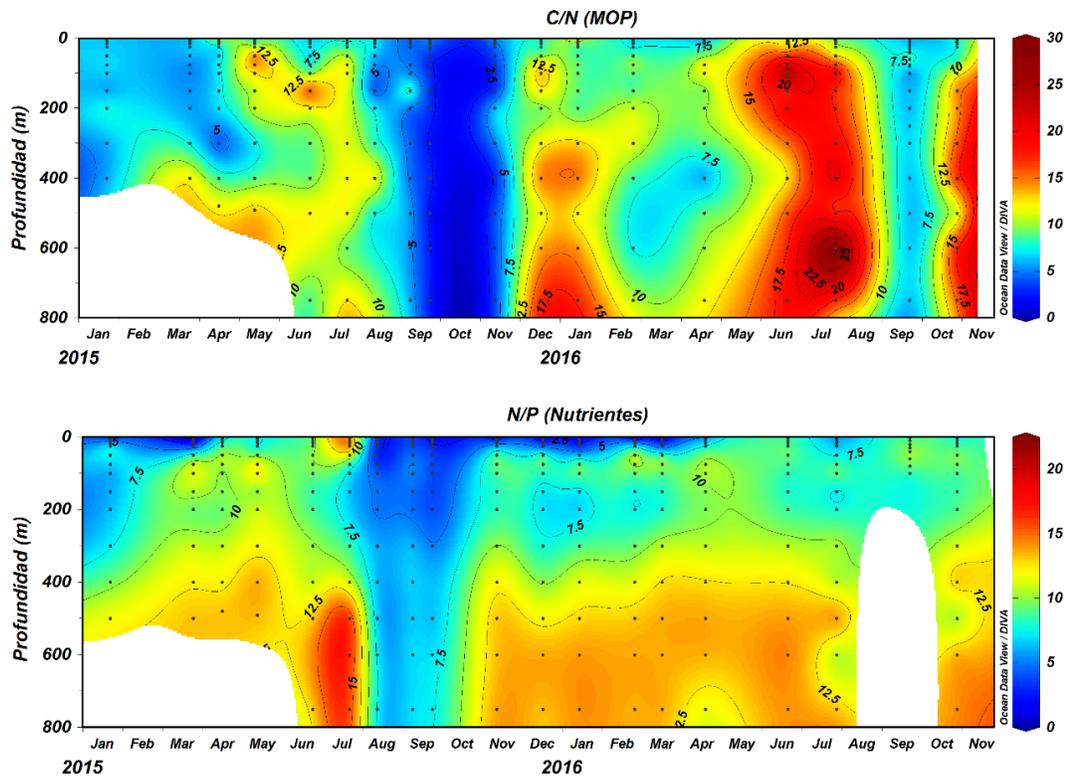


Figura 11 Serie de tiempo de la razón C/N (MOP) y N/P (nutrientes), de enero 2015 a noviembre de 2016, de la estación 5 de STOV (-32,92° y -71,87°).

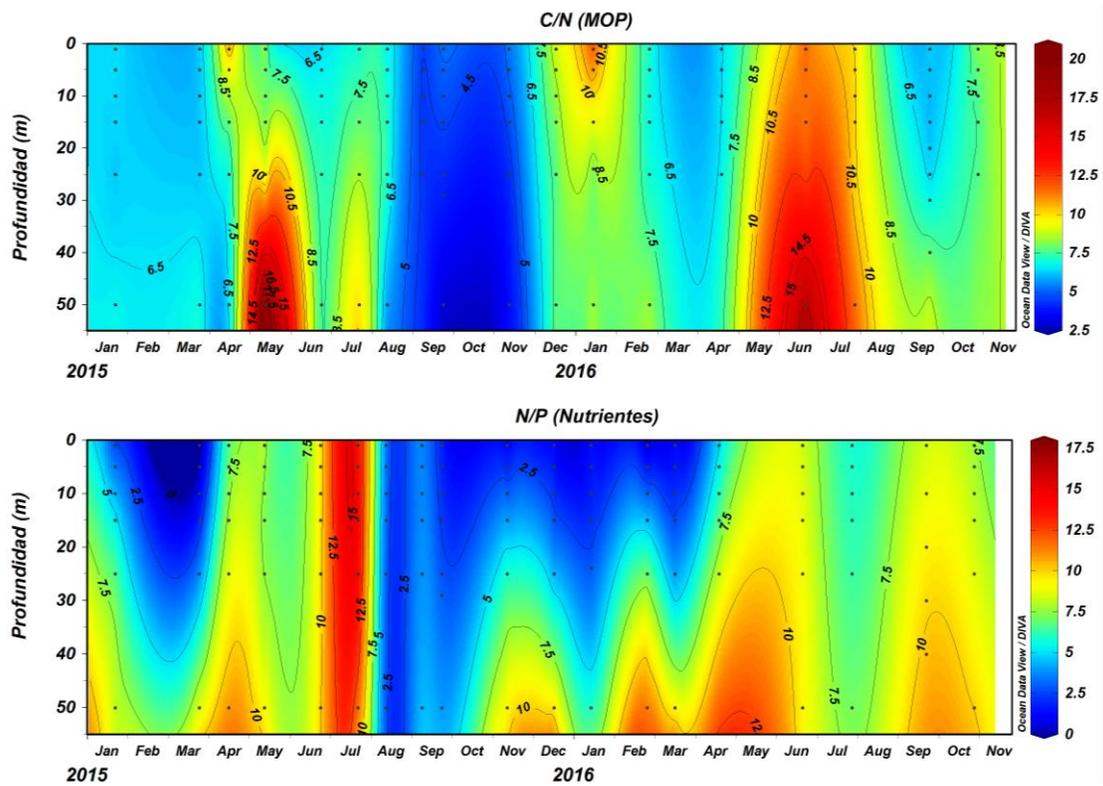


Figura 12. Serie de tiempo de la razón C/N (MOP) y N/P (nutrientes) hasta los 50 m de profundidad, de enero 2015 a noviembre de 2016, de la estación 5 de STOV (-32,92° y -71,87°).

Índice de surgencia.

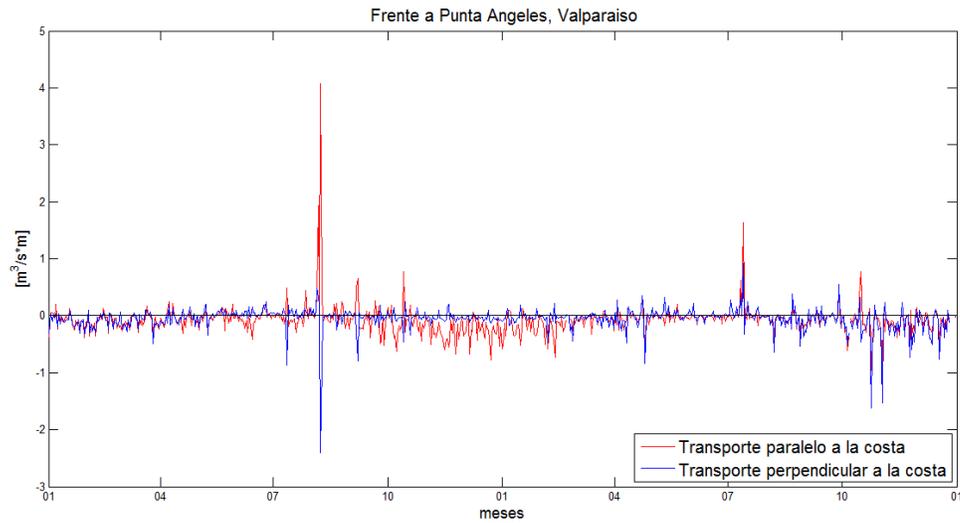


Figura 13. Transporte perpendicular (línea azul) y paralelo (línea roja) a la costa en $m^3s^{-1}m^{-1}$, entre enero del 2015 y diciembre del 2016.

En la figura 13 se observó el transporte de Ekman paralelo y perpendicular a la costa (líneas roja y azul, respectivamente). Se observó un transporte que indica la presencia de surgencia entre agosto-octubre 2015, se observa una situación similar para el mes de octubre 2016.

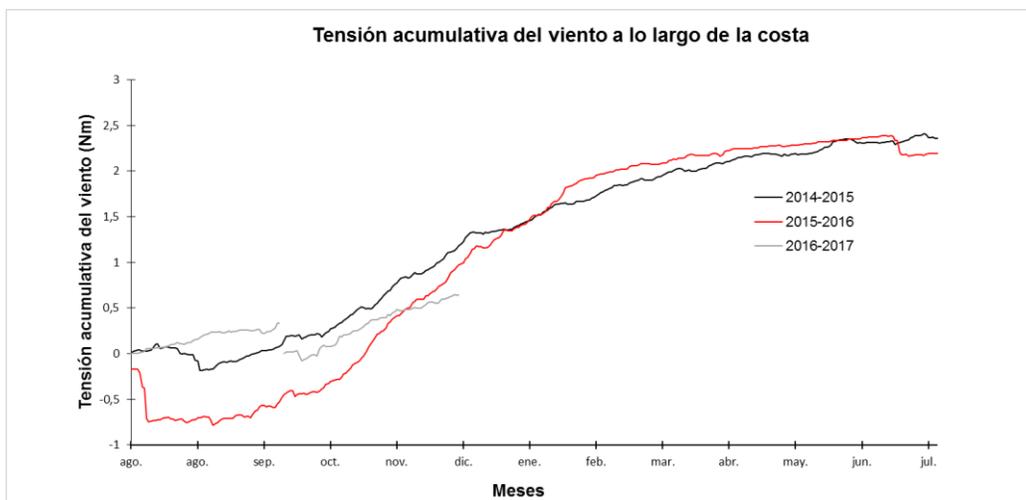


Figura 14. Tensión acumulativa del viento a lo largo de la costa en $m^3s^{-1}m^{-1}$, entre agosto del 2014 y julio del 2017.

La figura 14 se puede observar la tensión acumulativa del viento perpendicular a la costa (dirección sur-norte). Se observó que los vientos favorables a la surgencia tuvieron una acumulación significativa que comenzó diferenciada en cada periodo primaveral-estival de cada año. En el año 2014, la acumulación de vientos favorables a la surgencia fue significativa a partir de fines de agosto, mientras que en el año 2015, esta acumulación fue significativa a partir de mediados de octubre. El 2016, en cambio la acumulación significativa se observó recién a mediados de noviembre, por lo que sus efectos podrían no observarse en la biogeoquímica de la columna de agua de la serie de tiempo considerada en el presente estudio. La surgencia fue más fuerte entre mediados de septiembre del 2015 hasta finales de enero del 2016. En lo que respecta al resto del año 2016 se observa una leve tendencia a incrementar la tensión acumulativa del viento a partir de mediados de octubre pero debido a la falta de datos no se puede aseverar completamente.

Estadística.

La estadística utilizada para determinar las diferencias en las razones isotópicas de la materia orgánica partícula entre los periodos de surgencia y sin surgencia, ocurridos entre enero del 2015 y octubre del 2016, se dividió en tres capas, capa de mezcla, la oxiclina y la capa subsuperficial.

En la capa de mezcla los valores de $\delta^{15}\text{N}$ poseen una distribución no normal (tabla 7, anexos) por lo que se realizó un ANOVA entre periodos con y sin surgencia, mediante el test de Kruskal-Wallis (Tabla 1) el cual arrojó un p (normal)=0,00437. Estos resultados indican que existe una diferencia significativa entre la señal de $\delta^{15}\text{N}$ durante periodos con surgencia en comparación a los periodos sin presencia de surgencia.

Tabla 1. Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{15}\text{N}$ en la capa de mezcla entre periodos con y sin surgencia costera.

Kruskal-Wallis test for equal medians	
H (chi2):	5,48
Hc (tie corrected):	5,48
p (same):	0,01924

En la oxiclina los valores de $\delta^{15}\text{N}$ poseen una distribución no normal (tabla 4, anexos), por lo que se realizó un ANOVA entre periodos con y sin surgencia mediante el test de Kruskal-Wallis (Tabla 2) en el cual se obtuvo un p (normal)= 0,011. Estos resultados indican que existe una diferencia significativa entre la señal de $\delta^{15}\text{N}$ durante periodos con surgencia en comparación a los periodos sin presencia de surgencia.

Tabla 2. Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{15}\text{N}$ en la oxiclina entre periodos son y sin surgencia costera.

Kruskal-Wallis test for equal medians	
H (chi2):	5,941
Hc (tie corrected):	5,941
p (same):	0,0148

En la zona mínima de oxígeno los valores de $\delta^{15}\text{N}$ poseen una distribución no normal (tabla 4, anexos) por lo que se realizó un ANOVA entre periodos con y sin surgencia mediante el test de Kruskal-Wallis (Tabla 3) en el cual dio un p (normal)= 0,1128. Estos resultados indican que no existe una diferencia significativa entre la señal de $\delta^{15}\text{N}$ durante periodos con surgencia en comparación a los periodos sin presencia de surgencia.

Tabla 3. Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{15}\text{N}$ en la ZMO entre periodos son y sin surgencia costera

Kruskal-Wallis test for equal medians	
H (chi2):	2,515
Hc (tie corrected):	2,515
p (same):	0,1128

Por lo que en la capa de mezcla y la oxiclina se encontró una diferencia significativa en la señal de $\delta^{15}\text{N}$, la cual disminuyó en presencia de eventos de surgencia en comparación a periodos sin surgencia. En cambio en la ZMO no se encontraron diferencias significativas en la señal de $\delta^{15}\text{N}$, entre los periodos con surgencia y sin surgencia (tabla 8, anexos).

En la capa de mezcla los valores de $\delta^{13}\text{C}$ poseen una distribución no normal (tabla 9, anexos) por lo que se realizó un ANOVA entre periodos con y sin surgencia, mediante el test de Kruskal-Wallis (Tabla 4) el cual arrojó un p (normal)=0,2948. Estos resultados indican que no existe una diferencia significativa entre la señal de $\delta^{13}\text{C}$ durante periodos con surgencia en comparación a los periodos sin presencia de surgencia.

Tabla 4: Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{13}\text{C}$ en la capa de mezcla entre periodos con y sin surgencia costera

Kruskal-Wallis test for equal medians	
H (chi2):	1,097
Hc (tie corrected):	1,097
p (same):	0,2948

En la oxiclina los valores de $\delta^{13}\text{C}$ poseen una distribución no normal (tabla 10), anexos) por lo que se realizó un ANOVA entre periodos con y sin surgencia, mediante el test de Kruskal-Wallis (Tabla 7) el cual arrojó un p (normal)=0,8171. Estos resultados indican que no existe una diferencia significativa entre la señal de $\delta^{13}\text{C}$ durante periodos con surgencia en comparación a los periodos sin presencia de surgencia.

Tabla 5: Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{13}\text{C}$ en la oxiclina entre periodos con y sin surgencia costera

Kruskal-Wallis test for equal medians	
H (chi2):	0,05349
Hc (tie corrected):	0,05349
p (same):	0,8171

En la ZMO los valores de $\delta^{13}\text{C}$ poseen una distribución no normal (tabla 10, anexos) por lo que se realizó un ANOVA entre periodos con y sin surgencia, mediante el test de Krustal-Wallis (Tabla 7) el cual arrojó un p (normal)=0,00112. Estos resultados indican que existe una diferencia significativa entre la señal de $\delta^{13}\text{C}$ durante periodos con surgencia en comparación a los periodos sin presencia de surgencia.

Tabla 6: Análisis de varianza no paramétrico para la señal de $\delta^{13}\text{C}$ en la ZMO entre periodos con y sin surgencia costera

Kruskal-Wallis test for equal medians	
H (chi2):	10,62
Hc (tie corrected):	10,62
p (same):	0,00112

Por lo que en la capa de mezcla y la oxiclina no se encontró una diferencia significativa en la señal de $\delta^{13}\text{C}$. En cambio en la ZMO se encontraron diferencias significativas en la señal de $\delta^{13}\text{C}$, entre los periodos con surgencia y sin surgencia (tabla 10, anexos).

DISCUSIÓN.

Variabilidad de las condiciones oceanográficas.

En general se pudo observar una variabilidad estacional en el registro de las variables oceanográficas frente a Valparaíso, donde se puede destacar la temperatura superficial del agua, la cual presentó valores máximos durante el verano y mínimos durante invierno, coincidiendo con el trabajo realizado por Palma (1995). Se registró que el ciclo estacional fue más notorio en las aguas superficiales, donde se observaron fluctuaciones más marcadas a lo largo del año, por efecto de los cambios en la intensidad de luz (Sobarzo & Djurfeldt, 2004), mientras que la diferencia entre los valores en invierno entre la superficie y el fondo de la columna de agua fueron más pequeños, caso contrario ocurrió en el periodo de primavera-verano, en donde las diferencias fueron más significativas entre la capa superficial y la capa de fondo (Besoain, 2013).

También la estacionalidad se ve reflejada en la salinidad, se observó una mayor salinidad superficial-subsuperficial durante los periodos de primavera-verano (en especial durante enero del 2015) en comparación a invierno, la cual coincide con los datos registrados por Palma (1995), ya que registro valores de salinidad superficial inferiores a 34 al igual que el trabajo de Besoain (2013) en la zona central de Chile.

El O₂ en la capa superficial (< 15 m) no presentó una estacionalidad muy definida, ya que su concentración se encontró en condiciones oxicas durante toda la serie de tiempo (≥ 5 mL L⁻¹). Durante la época de primavera-verano, la concentración de oxígeno superficial fue ~ 6 mL L⁻¹, que sería consecuencia de la producción de oxígeno de la producción primaria, inducida por el ascenso de nutrientes de aguas subsuperficiales (surgencia) (Molina *et al.*, 2004), siendo esto último corroborado con valores AOU obtenido en la capa superficial en

la época de primavera-verano ($\sim -0,46 \text{ mL L}^{-1}$) los valores fueron menores a la época de otoño-invierno ($> 0 \text{ mL L}^{-1}$). La distribución de O_2 presentó una disminución en profundidad. En toda la serie de tiempo se observó una marcada ZMO durante todo el año, generada por el efecto combinado de la circulación lenta y la alta productividad marina que es sostenida por el afloramiento costero, generando un consumo de oxígeno disuelto por respiración aeróbica de la materia orgánica (Paulmier *et al.*, 2006).

Variabilidad de las condiciones biogeoquímicas.

En la serie de tiempo correspondiente al Nitrato (figura 6 a) se observó en la mayor parte del registro bajas concentraciones en superficie las cuales fueron aumentando con la profundidad ($35 \mu\text{M}$), exceptuando los meses de septiembre-octubre 2015, ya que en estos meses se registró bajas concentraciones de Nitrato en toda la columna de agua ($10\text{-}20 \mu\text{M}$) en comparación al resto del registro.

Las bajas concentraciones de nitrato registradas en toda la columna de agua en el periodo ya mencionado, podrían asociarse a la alta productividad primaria que ocurrió en estos meses por el incremento de la magnitud de los vientos. Esto, ya que durante esta época el régimen de vientos es predominante del SW, favoreciendo la surgencia y a su vez la producción primaria (Besoain, 2013), las cuales conllevan a una alta carga de MOP. Al degradarse la MO se utiliza el oxígeno disuelto disponible en la columna de agua, disminuyendo la concentración de oxígeno a niveles $\sim 0,5 \text{ mL L}^{-1}$. Luego, se favorece la respiración por bacterias desnitrificadoras, usando el nitrato disponible en la columna de agua como oxidante (procesos de desnitrificación). En este proceso se reduce el NO_3^- a NO_2^- , el cual es subsecuentemente reducido a N_2 . En este caso, el N_2O puede ser liberado como un intermediario de la reducción de NO_2^- a N_2 (Wrage *et al.* 2001), en especial con niveles de $\text{O}_2 > 0,5 \text{ mL L}^{-1}$ ya que se han observado altas concentraciones de N_2O (Castro, 2004). No obstante, las bajas concentraciones de nitrato también podrían estar asociadas a la

nitrificación desnitrificante, ya que en la oxidación del NH_4^+ a NO_2^- se genera como subproducto el N_2O en aguas hipóxicas y óxicas (Bonin *et al.*, 2002). De hecho, la distribución de N_2O en el océano es poco uniforme debido a que el reciclamiento de N_2O está ligado a factores ambientales, en especial, la distribución de O_2 a muy bajos niveles (Codispoti *et al.*, 1989).

Respecto a las concentraciones de N_2O de enero del 2015, las cuales fueron bajas en profundidad (~15 nM a los 100-400 m) comparadas con el resto de la serie de tiempo, podría estar asociado a los niveles de oxígeno que fueron ~ 0 mL L^{-1} , ya que los niveles de N_2O descienden producto de la fuerte desnitrificación (Elkins *et al.*, 1978, Liu & Kaplan 1982).

Respecto al N^* , en la serie de tiempo se registraron valores entre -30 a 0 μM , por lo que indicarían un desequilibrio significativo en la relación Redfield ($\text{N/P}=16$). Si bien en el Océano Pacífico en superficie se presenta este desequilibrio, a causa de la surgencia, la cual transporta agua subsuperficial con una señal empobrecida de nitrógeno debido a los procesos de desnitrificación/anammox en la columna de agua, los valores en los meses de septiembre-octubre 2015 fueron demasiado bajas en comparación al resto del registro, además de presentarse en toda la columna de agua, no solo en la superficie ni en la ZMO. Por otra parte cual el trabajo de Gruber & Sarmiento (1997), mencionan que los valores de N^* en el océano Pacífico Oriental Sur y Norte, los valores del trazador N^* son generalmente negativos o cercanos a cero, de tal manera indicando que esta zonas actúan como sumideros de nitrógeno.

Respecto a la razón C/N en la MOP se presentó una anomalía en los datos de los meses de agosto-octubre del 2015, lo cual se vio reflejado en la relación C/N con valores que fueron entre 4,5-2,5 lo cual es inferior a lo que debiera encontrarse en esta época de producción primaria (6,6), ya que Redfield *et al.* (1963) supone que la MOP se produce en proporciones de elementos molares constantes de C: N: P: O de 106: 16: 1: -138, es decir,

durante la producción de partículas, el carbono inorgánico disuelto, nitrógeno y fósforo se fijan en partículas orgánicas mientras se libera oxígeno. Esta anomalía en los valores de la razón C/N coincide con el meteotsunami ocurrido el 8 de agosto del mismo año entre los 30°-35° S, con vientos que llegaron a los 110 km/hr (Carvajal *et al.*, 2017)

En toda la serie de tiempo la relación N/P de los nutrientes inorgánicos (16, nutrientes), se observó concordancia con la relación C/N (MOP), ya que si $N/P < 16$, disminuye el nitrato en la columna de agua, y si $C/N < 6,6$ aumenta el nitrógeno en la MOP, ambas razones tuvieron una variabilidad estacional. La relación C/N (6,66) en la capa superficial (0-50 m) en la época de primavera-verano tuvo valores cercanos al equilibrio, lo que es un indicativo de que hubo producción primaria. Sin embargo, los meses de septiembre-noviembre 2015 la razón disminuyó, como ya se había mencionado anteriormente. En contraste, los meses de otoño-invierno los valores aumentaron, con valores de ~ 20 , lo que implica que la MOP, se empobreció en nitrógeno, debido a la baja producción primaria en esta época, por lo que el nitrógeno se degrada más rápido.

Para el ^{15}N presente en la MOP en la capa superficial (0-50 m), durante los periodos con surgencia la señal disminuyó en comparación a los periodo sin surgencia, para el primer caso la media fue de 3,7 ‰ y para el segundo caso la media fue de 7,2 ‰. Holmes (2002) describe que la señal de ^{15}N en Benguela presentó cambios temporales, con valores mínimos (e.g., 2,5 ‰) cuando la disponibilidad de nitrato fue alta, por el ascenso de aguas superficiales (surgencia), en cambio la señal de ^{15}N incrementó (13,1 ‰) cuando la concentración de nitrato disminuyó. En la oxiclina, la media para los periodos con surgencia fue de 1,737 ‰ mientras que para los periodos sin surgencia fue de 6,015 ‰, y también es posible asociarlo a las concentraciones de nitrato en la columna de agua.

El ANOVA realizado para el ^{15}N presente en la MOP en la ZMO dio como resultados que no existía una diferencia significativa entre los periodos con surgencia y sin surgencia, lo cual podría asociarse a los resultados obtenidos en el trabajo de Libes & Deuser (1988) en la zona de surgencia de Perú. Estos autores mencionan que los bajos valores isotópicos de ^{15}N de materia orgánica de aguas profundas anóxicas en la zona de surgencia en Perú, se debían a la presencia de altas proporciones de biomasa bacteriana, lo que podría explicar que en la ZMO no existan diferencias significativas en las muestras recolectados para la serie de tiempo. Esta paradoja puede explicarse en parte por experimentos de laboratorio que sugieren que el fraccionamiento por bacterias durante la absorción de nitrógeno inorgánico disuelto en aguas anóxicas puede dar como resultado la disminución de ^{15}N con la profundidad (Holmes *et al.*, 1999). Sin embargo, también cabe considerar el hecho de que la baja señal de ^{15}N pudo ser advectada de latitudes más bajas, ya que si se considera la productividad en la zona norte del país, no posee una estacionalidad tan marcada como la de la zona centro, por ejemplo en el trabajo de Marín & Olivares (1993) en la Bahía Mejillones del Sur ($\sim 23^\circ$ S), en donde la información oceanográfica obtenida en Bahía Mejillones durante 1989-1991, mostró la presencia durante todo el año de agua fría ($< 14^\circ\text{C}$) con bajo contenido de oxígeno ($< 3,0 \text{ ml L}^{-1}$) y rica en nitrato ($> 10,0 \text{ mg-at N-NO}_3 \text{ m}^{-3}$). Estas características corresponden a aguas originadas en eventos de surgencia costera, también Marín *et al.* (1993) postularon que el principal factor que controla el nivel de la productividad primaria en escala diaria es la surgencia costera, y los resultados encontrados en el análisis agrupando los datos por estación del año (ANOVA), confirmaron que los procesos más importantes en el control de la productividad primaria en Mejillones operan en escalas inferiores a la estacional, a la vez que dificultan el uso de este análisis en el estudio del proceso de productividad primaria a escala estacional.

CONCLUSIÓN.

Los cambios de las variables oceanográficas y biogeoquímicas, estuvieron asociadas al régimen de vientos provenientes del S y SW, los cuales marcaron su estacionalidad en otoño-invierno y primavera- verano, es decir, las fluctuaciones del viento influyen significativamente la estructura vertical de la columna de agua, en particular la capa superficial y capa de mezcla, la cual es gobernada por los procesos de surgencia costera manejada por el viento local.

Existen diferencias significativas en la señal de ^{15}N en la capa de mezcla y oxiclina durante los periodos con surgencia y sin surgencia, en los periodos con surgencia costera se observó una disminución de la señal isotópica, caso contrario en los periodos sin surgencia.

No se encontraron diferencias significativas en la señal de ^{15}N en la ZMO durante los periodos con surgencia y sin surgencia, por lo que se recomienda, realizar un estudio más en detalle de la zona, con el fin de tener una serie de tiempo más larga, y poder determinar de mejor manera si esto se debe a una advección de latitudes más bajas o bien si llegara a existir una estacionalidad en la señal de ^{15}N asociada a los periodos con y sin surgencia, para toda la columna de agua.

Por lo que la hipótesis planteada se cumple, existe una disminución de la señal de ^{15}N con periodos de surgencia costera con presencia de una zona mínima de oxígeno frente a Valparaíso, exceptuando a la ZMO.

REFERENCIAS

Bakun, A. 1975. Daily and weekly upwelling indices, west coast of North America 1967–73. U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Rep. NMFS SSRF-693, 114 pp.

Bakun, A. & C. Nelson. 1991. The seasonal cycle of wind stress curl in sub-subtropical eastern boundary current regions. *J. Phys. Oceanogr.*, 21: 1.815-1.834.

Barber RT, Smith, R.L., 1981. Coastal upwelling ecosystems. In: A.R. Longhurst (ed) *Analysis of Marine Ecosystems*. Academic Press, San Diego. 31-68.

Barth, J.A., Menge, B.A., Lubchenco, J., Chan, F., Bane, J.M., Kirincich, A.R., McManus, M.A., Nielsen, K.J., Pierce, S.D., Washburn, L., 2007. Delayed upwelling alters nearshore coastal ocean ecosystems in the northern California current. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104, 3719–3724 pp.

Besoain, V. 2013. Variabilidad estacional y descripción de eventos de “hotspot” de óxido nítrico (N_2O) en la zona de surgencia de Chile Central ($\sim 36,5^\circ$): Un estudio de serie de tiempo (2002-2011). Tesis de pregrado de Oceanografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso.

Bonin P, C Tamburini & V Michotey 2002. Determination of the bacterial processes which are sources of nitrous oxide production in marine samples. *Water Research* 36(3):722-732

Brainerd, K. E., & M. C. Gregg, 1995. Surface mixed and mixing layer depths. *Deep-Sea Res.*, 42A:1521–1543.

Carpenter, J.H. 1965. The Chesapeake Bay Institute Technique for the Winkler dissolved oxygen method. *Limnology and oceanography*, 10: 141-143.

Carvajal, M., Contreras-López, M., Winckler, P., & Sepúlveda, I. 2017. Meteotsunamis Occurring Along the Southwest Coast of South America During an Intense Storm. *Pure and Applied Geophysics*, 174(8), 3313–3323. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1584-0>.

Codispoti LA, RT Barber & GE Friederich 1989. Do nitrogen transformations in the poleward undercurrent off Peru and Chile have a globally significant influence? In: *Coastal and Estuarine Studies. Poleward flows along eastern ocean boundaries*. Neshyba SJ et al. (eds). Springer-Verlag, Berlin, 281-310.

Elkins JW, SC Wofsy, MB McElroy, CE Kolb & WA Kaplan 1978. Aquatic sources and sinks for nitrous oxide. *Nature* 275:602-606

Fonseca, T. & M. Farías. 1987. Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. *Invest. Pesq.*, 34: 33-46.

Fry, B. 2006. *Stable Isotope Ecology*. Springer, New York. 308 pp.

Graco, Michelle et al. 2007. “Nutrients, Oxygen and Biogeochemical Processes in the Humboldt Upwelling Current System off Peru Nutrientes, Oxígeno Y Procesos Biogeoquímicos En El Sistema de Surgencias de La Corriente de Humboldt Frente a Perú.” *Rev. peru. biol* 14(August): 117–28.

Gruber, N., & Sarmiento, J. L. 1997. Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2), 235–266. <https://doi.org/10.1029/97GB00077>.

Gruber, N. 2008. *The marine nitrogen cycle: Overview and challenges*. Academic Press, San Diego. 50 pp.

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.* 4:1–9.

Hoefs, J. 2015. Stable isotope geochemistry. Springer, New York. 402 pp.

Holmes, M.E., Eichner, C., Struck, U., Wefer, G., 1999. Reconstruction of surface ocean nitrate utilization using stable nitrogen isotopes in sinking particles and sediments.

Holmes, E., Lavik, G., Fischer, G., Segl, M., Ruhland, G., & Wefer, G. 2002. Seasonal variability of $\delta^{15}\text{N}$ in sinking particles in the Benguela upwelling region. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers., 49(2), 377-394.

Libes, S.M., and W.G. Deuser. 1988. "The Isotope Geochemistry of Particulate Nitrogen in the Peru Upwelling Area and the Gulf of Maine." Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers 35(4): 517-33.

Liu KK & IR Kaplan 1982. Nitrous oxide in the sea off southern California. In: The Environment of the Deep Sea. Ernst WG & JG Marin (eds). Prentice Hall, New York. 74-92 pp.

Marín, V. H., & Olivares, G. R. 1999. Estacionalidad de la productividad primaria en Bahía Mejillones del Sur (Chile): una aproximación proceso-funcional. Revista Chilena de Historia Natural, 72: 629-641.

Marín V, L Rodríguez, L Vallejo, Fuenteseca & E Oyarce. 1993. Efectos de la surgencia costera sobre la productividad primaria primaveral de Bahía Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile). Revista Chilena de Historia Natural 66: 479- 491.

McAuliffe C. 1971. GC determination of solutes by multiple phase equilibrium. Chem. Technol. 1:46-51.

Molina, V., L. Farías, M. Graco, C. Rivera. L. Pinto & V. Gallardo. 2004. Benthic nitrogen regeneration under oxygen and organic matter spatial variability off Concepción (36°S), central Chile. Deep-Sea Research II 51 2507-2522.

Montégut, B. C., Madec, G., Fischer, A. S., Lazar, A., and Iudicone, D.: Mixed. 2004. Layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology, *J. Geophys. Res.*, 109, C12003, doi: 10.1029/2004JC002378.

Morales, C. S, Hormazábal & J.L. Blanco. 1999. Interannual variability in the mesoscale distribution of the upper boundary of the oxygen minimum layer off northern Chile (18- 24S): Implications for the pelagic system and biogeochemical cycling. *J. Mar. Res.*, 57: 909-932.

Naqvi, S. W. A., Bange, H. W., Farías, L., Monteiro, P. M. S., Scranton, M. I., & Zhang, J. 2010. Marine hypoxia/anoxia as a source of CH₄ and N₂O. *Biogeociencias*, 7: 2159-2190.

Palma, S., & Rosales, S. 1995. Composición, distribución y abundancia estacional del macroplankton de la bahía de Valparaíso. *Investigaciones Marinas*, 23, 49–66. <https://doi.org/10.4067/S0717-71781995002300003>

Paulmier, A., D. Ruiz-Pino, V. Garçon & L. Farias. 2006. Maintaining of the Eastern South Pacific Oxygen Minimum Zone (OMZ) Chile. *Geophys. Res. Let.*, 33:1-6.

Redfield, A. C., B. C. Ketchum, and F. A. Richards. 1963. The influence of organisms on the composition of sea water, in *The Sea*, edited by N. Hill, Wiley Intersci., New York, (2): 26–77.

Reyes, E. 2004. Geoquímica de Isótopos Estables: Fundamentos, Técnicas y Aplicaciones. *Geoquímica Isotópica Aplicada al Medioambiente, Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía.*, 1-19.

Revsbech, N. P., Pedersen, O., Reichardt, W., & Briones, A. 1999. Microsensor analysis of oxygen and pH in the rice rhizosphere under field and laboratory conditions. *Biology and Fertility of soils*. 29(4): 379-385.

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). 2002. Glosario de marea y corrientes. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, Valparaíso, 59 pp.

Sobarzo, M. & L. Djurfeldt. 2004. Coastal upwelling process on a continental shelf limited by submarine canyons, Concepción, central Chile. *J. Geophys. Res.*, 109:C12012.

Strickland, J and R, Parsons.1972. A practical handbook of seawater analysis (2nd Edition), Bulletin 167, Ottawa, Canada. 310 pp.

Strub, P. J, Mesías. V, Montecino. J, Rutllant & S, Salinas. 1998. Coastal ocean circulation off Western South America. In: Robinson, B. (Ed.), *The Sea Wiley*. 11: 273–313.

Thompson, R. E. & I. V. Fine. 2002. Estimating Mixed Layer Depth from Oceanic Profile Data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20:319 – 329.

Wrage N, GL Velthof, ML Van Beusichem & O Oenema 2001. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology and Biochemistry* 33:1723-1732.

ANEXOS

Tabla 7: Test de normalidad Shapiro-Wilk, para periodos con y sin surgencia, para las capas de mezcla, oxiclina y zona mínima de oxígeno para el ¹⁵N.

	C/Surgencia	S/Surgencia
N	23	52
Shapiro-Wilk W	0,9682	0,8108
Capa de mezcla p(normal)	0,6455	1,08E-06
N	24	52
Shapiro-Wilk W	0,9257	0,9736
Oxiclina p(normal)	0,07819	0,2986
N	20	52
Shapiro-Wilk W	0,9505	0,9559
ZMO p(normal)	0,3751	0,05217

Tabla 8: Promedios y medias para cada la capa de mezcla, oxiclina y zona mínima de oxígeno para periodos con y sin surgencia para el ¹⁵N.

	C/ surgencia CM	S/ surgencia CM	C/ surgencia oxi	S/surgencia oxi	C/ surgencia ZMO	S/surgencia ZMO
Promedio	4,119	6,793	2,232	5,518	2,763	5,573
Media	3,707	7,270	1,737	6,015	3,099	6,483

Tabla 9: Test de normalidad Shapiro-Wilk, para periodos con y sin surgencia, para las capas de mezcla, oxiclina y zona mínima de oxígeno para el ¹³C.

	C/Surgencia	S/Surgencia
N	16	59
Shapiro-Wilk W	0,9634	0,912
Capa de mezcla p(normal)	0,7234	4,17E-04
N	14	55
Shapiro-Wilk W	0,9588	0,6105
Oxiclina p(normal)	0,7033	7,88E-11
N	14	56
Shapiro-Wilk W	0,9208	0,8996
ZMO p(normal)	0,2256	0,000212

Tabla 10: Promedios y medias para cada la capa de mezcla, oxiclina y zona mínima de oxígeno para periodos con y sin surgencia, para el ¹³C.

	C/ surgencia CM	S/ surgencia CM	C/ surgencia oxi	S/surgencia oxi	C/ surgencia ZMO	S/surgencia ZMO
Promedio	-24,786	-23,913	-25,071	-23,964	-27,483	-24,541
Media	-24,409	-24,229	-25,019	-25,130	-27,300	-25,724