



FACULTAD DE
CIENCIAS

UDELAR | fcien.edu.uy



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Tesis para obtener el grado:
Licenciado en Ciencias Biológicas

Variabilidad de la salinidad en la zona media del Río de la Plata y su relación con la clorofila superficial en la costa Atlántica Uruguaya.

Trabajo presentado por Agustina Brum Garcia

Orientador: Marcelo Barreiro, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos (DCAFO), Facultad de Ciencias, Universidad de la República

Co-orientador: Gaston Manta, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego

Lugar de realización: Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos (DCAFO)
Instituto de Física, Facultad de Ciencias,
Universidad de la República

Junio de 2024

1. Introducción	4
1.1 La circulación en el Atlántico Sudoccidental.	4
1.2 La circulación en la plataforma continental uruguaya	5
1.3 Forzantes de variación de salinidad en el Río de la Plata.	6
1.4. Clorofila en las áreas influenciadas por el Río de la Plata.	8
2. Objetivo	8
2.1 Objetivos específicos	8
3. Materiales y métodos	9
3.1 Área de estudio	9
3.2 Instrumentación para la toma de datos	9
3.3 Análisis de datos in situ	10
Construcción de la serie de datos	10
Control de calidad de la serie de salinidad y temperatura en Isla de Flores.	11
3.3 Análisis de datos complementarios.	12
Análisis estadísticos:	13
Ciclo estacional y anomalías	14
Periodograma	14
Correlaciones	14
4. Resultados	14
4.1 Caracterización de la salinidad y temperatura en Isla de Flores y mecanismos que explican su variabilidad.	15
4.1.1 Control de calidad para la serie de datos y ciclo estacional.	15
4.1.2 Ciclo estacional y análisis de frecuencia de temperatura y salinidad.	16
4.1.3 Variabilidad interanual de temperatura y salinidad en Isla de Flores y su relación con ENOS.	20
4.1.4 Descarga del Río de la Plata y su relación con la salinidad en Isla de Flores	22
4.2 Relación entre salinidad en Isla de Flores y clorofila en la plataforma Atlántica.	26
4.2.1 Ciclo estacional y variabilidad de la clorofila en la plataforma atlántica	26
4.2.2 Variabilidad de la clorofila y su relación con la salinidad en Isla de Flores	30
4.2.3 Modelo predictivo de salinidad mensual en la plataforma	35
5. Discusión	37
6. Conclusiones	39
6. Bibliografía	40
7. Anexo	43
Diseño de soporte	43

RESUMEN

La generación de series temporales de variables oceanográficas son necesarias para poder comprender la compleja interacción de los procesos atmosféricos y oceánicos en áreas costeras. El objetivo de este trabajo es crear una serie temporal con datos in situ recolectados en la Isla de Flores y describir la variabilidad de la salinidad del Río de la Plata, así como también determinar su relación con las variaciones de clorofila en la costa Atlántica uruguaya. La Isla de Flores ubicada a 11 km de Montevideo se encuentra en un área con gradiente de temperatura y salinidad máximos, influenciados por el Río de la Plata y por el Océano Atlántico. Mediante sensores de conductividad, temperatura y profundidad (CTD por su sigla en inglés) se obtuvieron medidas diarias de profundidad, conductividad y temperatura. Se generó la serie temporal de salinidad y temperatura con 5 años de datos desde Noviembre 2018 hasta Noviembre 2023. Luego se tomaron datos del índice del Niño 3.4, datos satelitales de clorofila y datos de descarga del Río de la Plata y se calcularon los ciclos estacionales, las anomalías y las correlaciones entre estas funciones. Se obtuvo como resultado que la temperatura del agua en Isla de Flores tiene un ciclo estacional muy marcado, con mínimos en el mes de julio de 11,66 °C y máximos en el mes de febrero que ascienden hasta 23,23 °C mientras que la salinidad presenta mayor variabilidad de alta frecuencia (días, semanas) y un ciclo menos marcado, con un mínimo de 14,47 psu a fines del mes de mayo y un máximo de 22,36 psu para el mes de enero. Por otro lado, la salinidad varía no solo en escalas sinópticas debido a los vientos, sino que también en escalas interanuales debido a la influencia del Río de la Plata. Mediante análisis de regresión lineal se identificó que la salinidad puede predecir la clorofila con un desfase de 2 días debido a las aguas advectadas y 20 días por respuestas biológicas del sistema con un $r=-0,60$ y ENOS al ser persistente e influenciar las lluvias de un trimestre puede predecir la clorofila con desfase de dos meses. Por último se observó que la clorofila está correlacionada negativamente con la salinidad en Isla de Flores, debido a que las lluvias asociadas al fenómeno del Niño genera una mayor descarga del RdIP, lo cual provoca que haya aguas estratificadas en la costa Atlántica uruguaya con nutrientes en superficie provocando blooms de clorofila. Se destaca la importancia de crear una serie con control de calidad de 5 años de datos que puede ser relevante para diferentes estudios ambientales.

1. Introducción

1.1 La circulación en el Atlántico Sudoccidental.

La circulación en superficie del océano y la atmósfera están estrechamente vinculadas. La circulación en el océano Atlántico Sudoccidental (ASO) tiene dos componentes, una debido a los gradientes de densidad que ocupa toda la columna, también llamada circulación termohalina, y otra restringida a las capas por encima de la termoclina debido al viento, predominantemente influenciado por el anticiclón semipermanente del Atlántico Sur (Sverdrup et al., 1942; Peterson y Stramma 1991).

El giro subtropical del Atlántico Sur domina la circulación oceánica de superficie y está delimitado en el borde oeste por la Corriente de Brasil, al norte por la corriente Sud Ecuatorial, al sur por la corriente del Atlántico Sur y al este por la corriente de Benguela, que cierra el giro. Por un lado, la Corriente de Brasil (CB), caracterizada por ser somera, salina y cálida, se forma como resultado de la corriente Ecuatorial Sur y se extiende hacia el sur a lo largo de la plataforma. Transporta dos masas de agua: aguas tropicales y aguas subtropicales. Por otro lado, la corriente de Malvinas (CM) se origina a partir de la Corriente Circumpolar Antártica y, por lo tanto, presenta características de una corriente fría y menos salina. Se desplaza hacia el norte a lo largo del talud Argentino (Matano et al., 1993).

Estas dos corrientes se encuentran en la zona de confluencia Brasil-Malvinas, que se ubica alrededor de los 38° S. Este punto de convergencia, conocido como Confluencia Brasil-Malvinas (CBM), presenta varios frentes con valores específicos de temperatura y salinidad (Severov et al., 2012), los cuales generan inestabilidades oceánicas que dan lugar a remolinos de mesoescala ("eddies") y, como resultado, a una zona de alta actividad energética, productividad primaria y notable variabilidad espacial y temporal (Gordon, 1986; Machado et al., 2013). El principal patrón de variabilidad del intenso frente generado por la confluencia se da en un ciclo estacional como consecuencia del movimiento norte-sur del anticiclón semipermanente (Lumpkin y Garzoli 2011). Por ejemplo en invierno la confluencia se encuentra más al norte (37°S) y en verano se da más al sur (39°S). Por otro lado, en escalas interanuales, la posición de la confluencia puede variar por eventos como El Niño-Oscilación Sur (ENOS).

Sobre la plataforma continental del Atlántico Sudoccidental se da un flujo de aguas frías hacia el Ecuador y un flujo de aguas cálidas hacia el Polo. Las corrientes en plataforma están influenciadas por los gradientes de presión generados por la Corriente de Malvinas y la Corriente de Brasil. Se pueden identificar dos grandes tipos de masas de agua en la plataforma del ASO basándonos en su temperatura y salinidad: el Agua Subantártica de Plataforma (SASW) y el Agua Subtropical de Plataforma (STSW). La SASW se genera a partir de la dilución del agua subantártica en el Pacífico Sur debido a un exceso de precipitación y escorrentía continental, y luego ingresa al ASO a través del estrecho de Magallanes. Por otro lado, la STSW se forma cuando el agua subtropical se mezcla con la escorrentía proveniente de la costa de Brasil. Cerca de los 36°S se puede detectar el efecto que provoca la descarga del Río de la Plata en la dilución de las aguas de plataforma. Se observa una lengua de salinidad baja que en invierno se extiende más hacia el norte arrastrada principalmente por los vientos predominantes del suroeste y en verano se retrae más hacia el sur (Piola et al., 2000). Esta pluma se intensifica durante eventos ENOS cálidos ya que los mismos provocan una alta descarga del Río de la Plata por las intensas precipitaciones en la cuenca (Piola, 2005). Como consecuencia de la existencia de las masas de agua antes descritas, en la plataforma se distingue un frente llamado Frente Subtropical de Plataforma (STSF), que separa la plataforma sudoccidental en dos regiones.

La región norte tiene aguas cálidas, salinas y oligotróficas de origen tropical y subtropical, mientras que la región sur cuenta con aguas más frías, de menor salinidad y ricas en nutrientes, provenientes de fuentes subantárticas (Piola et al., 2000).

1.2 La circulación en la plataforma continental uruguaya

La plataforma continental de Argentina y Uruguay alberga uno de los ecosistemas marinos más productivos del Hemisferio Sur con una alta concentración de clorofila y juegan un papel clave en el suministro de nutrientes a los ecosistemas adyacentes a la plataforma continental (Berden et al., 2020). Estudiar la influencia del Río de la Plata es de suma importancia para comprender la circulación en la plataforma.

En la circulación de la plataforma podemos encontrar Agua Subantártica de Plataforma (SASW) con una salinidad media de 33,8, Agua Subtropical de Plataforma (STSW) con una salinidad media de 36,77 y las aguas descargadas por el Río de la Plata con una salinidad media de 27,73, si bien suelen utilizarse rangos de salinidad para caracterizar estas masas de agua. Se utiliza comúnmente la isohalina 33,5 como límite exterior de la influencia del Río de la Plata. A su vez las aguas del Río de la Plata se exportan a mar abierto en la Confluencia Brasil-Malvinas 34,5°S y 35,5°S (Berden et al., 2020).

El Río de la Plata es un estuario extenso y somero que descarga en promedio alrededor de 22.000 m³/s de agua dulce al océano (Borus et al., 2017), con gran cantidad de sedimentos. Se pueden diferenciar 3 zonas; la zona interna con aguas dulces y someras que va desde el inicio hasta la línea que une a Colonia con La Plata, la zona media con aguas más salobres que va de la línea de Punta Piedras hasta Punta Brava y la zona estuarial con aguas salinas y profundas que va hasta la línea que une Punta del Este con Punta Rasa (Nagy et al., 1987).

El estudio de la variabilidad de la salinidad en el Río de la Plata es interesante por varias razones, ayuda a comprender las dinámicas estuarinas y sus efectos en la ecología y los procesos físicos del sistema, también es relevante para evaluar el impacto en la biodiversidad y la pesca, ya que la salinidad influye en la distribución y abundancia de las especies marinas, brindando información crucial para comprender y conservar este ecosistema (Jaureguizar, 2004). Un ejemplo de conocer la importancia de la salinidad es por la pesquería artesanal de la corvina en Uruguay que es fuertemente dependiente de la salinidad del agua de fondo para la captura de los mismos. Comprender la dinámica de esta variable podría favorecer el desarrollo de esta actividad con una importancia social y económica para nuestro país (Norbis, 1995).

La clorofila-a es un pigmento que poseen las algas que absorbe y refleja la luz y por ende las mediciones satelitales de este pigmento son utilizadas para estudiar el comportamiento del fitoplancton en los ambientes marinos. El fitoplancton tiene una relevancia biológica fundamental ya que es el primer eslabón de la red trófica marina y por lo tanto, los ecosistemas y las pesquerías mundiales dependen de estos organismos. Además, cumplen un rol fundamental en los ciclos biogeoquímicos convirtiendo el carbono inorgánico en orgánico a través de la fotosíntesis (Falkowski et al., 1998). Por lo tanto, resulta importante poder estudiar y monitorear los procesos físicos que impactan en su distribución y

abundancia como es la salinidad (Dogliotti, 2007).

Los cambios en las propiedades físico-químicas del océano como la temperatura, salinidad, turbidez, nutrientes, etc. se relacionan directamente con la concentración de clorofila a. Más específicamente, la salinidad puede provocar estratificación en la columna de agua a través de los cambios en la densidad, pudiendo determinar condiciones propicias para el aumento del fitoplancton (Vasquez et al., 2012). Existen casos de productores primarios como las cianobacterias que pueden adaptarse a condiciones ambientales cambiantes dado sus características fisiológicas y morfológicas (Borowitzka, 1995)., y estudiar la relación de salinidad y la clorofila podría ayudar a determinar e interpretar más eficientemente posibles floraciones de las mismas (Rosales et al., 2005).

1.3 Forzantes de variación de salinidad en el Río de la Plata.

Los frentes de salinidad son controlados por la descarga del río y los vientos; verticalmente podemos observar una cuña salina donde las aguas profundas son más salinas y las superficiales menos salinas (Fossati et al., 2014). Por otro lado, las variaciones en la salinidad están influenciadas en diferentes escalas de tiempo por diferentes procesos regionales y globales que controlan las precipitaciones y los vientos de la región, lo cual se describe a continuación.

Para entender las causas de la variabilidad en la salinidad en el área de estudio, se deben analizar los forzantes que impactan sobre esta variable en diferentes escalas de tiempo. Por ejemplo, a nivel estacional, los cambios de salinidad están influenciados por el ciclo estacional de los vientos (dirección e intensidad) (Guerrero, 1998) y mientras que a nivel interanual, las anomalías de precipitación en la cuenca provocadas por eventos ENOS juegan un rol preponderante en determinar la salinidad en el RdIP (Piola et al., 2000).

Los vientos medios en superficie varían según la estación. En verano, en Uruguay predominan los vientos del NE, provocando una variación en la posición de la isohalina 33,5, que puede llegar a ubicarse hasta la latitud 31°S con penetraciones mínimas del frente salino hacia el Río de la Plata, mientras que en invierno predominan los vientos de componente SW y la posición de la isohalina puede llegar a ubicarse en la latitud 27°S, con penetraciones máximas hacia el noroeste. En las estaciones de transición (primavera y otoño) también se dan vientos medios del NE, aunque más débiles debido a una mayor variación; otoño es la estación con menor intensidad de viento y predominan del NW (Piola et al., 2005). Por otro lado, en primavera-verano existe un ciclo diario de vientos marcado por la brisa marina: predominan vientos de tierra en la mañana y desde el mar en la tarde (Manta, Barreiro y Renom 2021). En escalas sinópticas (7-10 días) los vientos muestran gran variabilidad debido a la existencia de transientes atmosféricos como centros de alta y baja presión y sus frentes asociados. A escalas más largas, interanuales, los vientos son controlados por ENOS, de tal forma que por ejemplo en años La Niña aumenta la frecuencia de ocurrencia de los vientos con componente este durante el verano (Barreiro, 2021).

En cuanto al caudal del Río de la Plata, es necesario tener en cuenta el régimen de precipitaciones de la cuenca del Plata. La misma cubre un área de 3.600.000 km², siendo la quinta cuenca más grande del mundo y abarca territorios de cinco países: Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay. Los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay juntan las

precipitaciones para luego verter sus aguas en el Río de la Plata y desembocar finalmente en el Océano Atlántico. La media anual de precipitaciones en la cuenca del Plata es de 1100 mm de las cuales solo el 20 % efectivamente alcanza el océano. La otra porción se evapora e infiltra en la tierra. La precipitación anual tiende a decrecer desde el Norte al Sur y desde el Este al Oeste, siendo las precipitaciones más abundantes al Norte con una media acumulada de 1800 mm, en los tramos superiores sobre los ríos Paraguay y Paraná con máximas de precipitación en verano. La región central (noreste de Argentina y sur de Brasil) tiene máximos de precipitaciones en primavera y otoño, mientras que en el límite suroeste de la cuenca puede llegar a tener un acumulado de tan solo 200 mm anuales (Moreira y Simionato, 2019). La variabilidad en las lluvias en la escala interanual se relaciona fuertemente con eventos ENOS. Las anomalías en el noreste de Argentina, sureste de Brasil y Uruguay tienden a ser positivas desde noviembre hasta febrero en los años Niño y negativas desde julio a diciembre de los años Niña (Ropelewski y Halpert, 1987), lo cual provoca cambios en el caudal de descarga del Río de la Plata.

Como se dijo anteriormente, el fenómeno de ENOS altera las precipitaciones en la cuenca del Plata y por ende provoca variaciones en la descarga del Río de la Plata que influyen directamente los parámetros físicos como la salinidad y biológicos como la clorofila. Para monitorear la influencia de ENOS en Uruguay se utiliza el Índice Niño 3.4. Este se calcula comparando las temperaturas actuales de la superficie del mar en la región ecuatorial del Pacífico central (Niño 3.4) con las temperaturas históricas. Un Índice Niño 3.4 más cálido de lo normal indica condiciones El Niño, donde se espera mayores precipitaciones en el sudeste de Sudamérica, mientras que temperaturas más frías indican condiciones La Niña, donde se espera menores precipitaciones en la zona de Uruguay (Pisciottano et al., 1994; Barreiro, 2010).

Como se mencionó anteriormente, la combinación de cambios en la descarga y los vientos durante ENOS genera modificaciones en la pluma de descarga del Río de la Plata. Durante La Niña hay una menor descarga de agua dulce debido a las pocas precipitaciones en la zona, acompañado por vientos anómalos provenientes del sector este dando como resultado un movimiento hacia el oeste del frente de salinidad, limitándose al estuario. Por otro lado, El Niño provoca un aumento en la descarga de agua dulce que da como resultado que el frente de salinidad se mueva más hacia el este, extendiéndose por la costa oceánica. Para analizar la variabilidad de la salinidad en el Río de la Plata es necesario contar con series de datos largas que permitan considerar diferentes escalas de tiempo. En ese sentido, desde 2018 el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos de Facultad de Ciencias junto al Ministerio de Ambiente, lleva a cabo un monitoreo continuo de las variables oceanográficas (temperatura y salinidad) de la zona externa Río de la Plata (Trinchin et al., 2021). Esta tesis propone utilizar los datos obtenidos para caracterizar las variaciones de salinidad en el Río de la Plata y vincularlas con variaciones de clorofila en las áreas influenciadas.

1.4. Clorofila en las áreas influenciadas por el Río de la Plata.

La concentración de clorofila-a se puede estimar debido a un principio físico que posee el fitoplancton. Permite alterar las características ópticas del agua (color del mar), y esta radiación reflejada por la capa superficial del mar puede ser medida haciendo uso de algún

instrumento como los satélites. La técnica se la conoce como radiometría del color del mar (Dogliotti, 2007).

Las variaciones de salinidad en la Isla de Flores pueden tener un impacto significativo en la concentración de clorofila en las áreas adyacentes de la costa Atlántica Uruguaya, donde las aguas dulces continentales se mezclan con las aguas saladas del océano. La relación entre la salinidad y la clorofila está modulada por el estrés del viento y la descarga del Río de la Plata en diferentes escalas de tiempo, entre otros forzantes. Diferentes salinidades pueden llevar a la estratificación vertical de la columna de agua. Esto puede limitar la mezcla de nutrientes desde las profundidades del océano hacia la superficie, afectando la producción de clorofila. En la plataforma continental, al norte de 37°S en invierno, se observa una columna de agua estable verticalmente por la descarga del Río de la Plata y con altas concentraciones de clorofila. En una escala interanual, la concentración de clorofila más alta para el área de estudio elegida, se ha encontrado en años Niño. En condiciones normales la mayoría de los nutrientes traídos por la descarga son consumidos por el fitoplancton dentro del estuario del Río de la Plata. Sin embargo, Machado et al (2013) muestran que la mayor descarga durante años Niño genera un mayor flujo de nutrientes que pasan a estar disponibles para las comunidades fitoplanctónicas de la plataforma. Asimismo, los autores encuentran que este aumento de clorofila durante años Niño es transportado por los vientos hacia el norte los meses subsiguientes.

Es importante tener en cuenta algunas de las limitaciones que tiene la clorofila satelital en el Río de la Plata, como por ejemplo la dificultad de estimar la concentración de clorofila en áreas costeras debido a la presencia de sedimentos y materia orgánica coloreada que también modifica las propiedades ópticas del agua, la presencia de nubes y los algoritmos utilizados para calcular valores. Pero a pesar de estas dificultades, es una información invaluable para realizar diferentes estudios, también para compararse con medidas in situ e integrar modelos (Dogliotti, 2007).

En resumen, estudios previos muestran una relación entre la descarga y la clorofila en escalas interanuales moderada por ENOS, lo cual sugiere también una relación con la salinidad. Asimismo, no se ha estudiado comportamientos similares en otras escalas de tiempo más cortas. Este trabajo busca relacionar una señal de incremento o de descenso de la clorofila en la costa Atlántica Uruguaya en escalas de días a interanual a partir de las variaciones de salinidad medidas en Isla de Flores.

2. Objetivo

Describir la variabilidad de la salinidad del Río de la Plata y determinar su relación con la variación de clorofila en la costa Atlántica uruguaya.

2.1 Objetivos específicos

- Colaborar en el diseño de la estación de medición y en la obtención de datos
- Realizar un tratamiento de los datos obtenidos, incluyendo control de calidad, para construir una serie completa de la salinidad en Isla de Flores.
- Realizar un análisis exploratorio de la serie de salinidad y calcular las principales frecuencias de variabilidad mayores a la escala sinóptica.

- Determinar la relación entre variaciones de salinidad en Isla de Flores y datos satelitales de clorofila en plataforma en diferentes escalas de tiempo.

3. Materiales y métodos

3.1 Área de estudio

Para el estudio de la variación de salinidad en el Río de la Plata se colocan sensores en el Parque Nacional Isla de Flores (PNIF), ubicada a 11 km de la costa frente a Montevideo (34 56 '00.7"S - 55 ' 02.8"W) (Figura 1). El PNIF abarca un área total de 5.749 hectáreas, siendo la superficie terrestre aproximadamente de 35 hectáreas. En este parque se encuentra un faro en funcionamiento que cuenta con personal encargado, el cual realiza turnos que se cambian cada 15 días. Esta dinámica facilita un acceso frecuente a la isla, permitiendo realizar la limpieza y la descarga de datos de forma quincenal con el apoyo de la armada. Debido a su ubicación en la zona exterior del Río de la Plata y su distancia a la costa, el PNIF desempeña un papel clave en el monitoreo, ya que se encuentra en una área con gradientes de temperatura y salinidad máximos (Guerrero et al., 2010). Además, este sitio tiene la ventaja de no verse directamente afectado por la aportación de aguas pluviales de la ciudad, lo que podría disminuir la salinidad, en comparación con otros puntos costeros (Trinchin et al., 2021).

3.2 Instrumentación para la toma de datos

El equipo utilizado consta de sensores DST-CTDs (Figura 2ab) fabricados por la marca STAR ODDI, junto con su data logger que es un registrador de datos específico para programación y descarga en una computadora. El registrador de datos incluye un dispositivo de comunicación que lee la información del sensor, y un programa dedicado para el preprocesamiento y descarga de los datos en formato digital llamado SeaStar. Los DST-CTDs son dispositivos que registran las variables de conductividad, temperatura y presión. Estos dispositivos son adecuados para su utilización en áreas costeras, ya sea anclados a un lugar o conectados a redes, lo que los hace altamente resistentes y versátiles. El rango de medición de conductividad de diferentes equipos es de 3 a 53 mS/cm, y el rango de profundidad para el cual están diseñados es de 1 a 500 metros; se debe seleccionar la versión del sensor que se ajuste al rango óptimo según las características del sistema. El software calcula automáticamente la salinidad (PSS-78) a partir de las mediciones de conductividad y temperatura, presentándola en unidades prácticas de salinidad (psu). La frecuencia de muestreo puede variar desde un segundo hasta horas, y puede ser preestablecida por el usuario según los objetivos del estudio. Los registros se almacenan en una memoria interna con una marca de tiempo en tiempo real que indica el momento en que se realizó la medición (Trinchin et al., 2021). Actualmente, se cuenta con un sitio donde están colocados dos sensores con diferentes rangos de conductividad (3-37 mS/cm ; 13-53 mS/cm) programados para tomar mediciones cada 30 minutos.

3.3 Análisis de datos in situ

Construcción de la serie de datos

Los datos utilizados vienen siendo recolectados desde Noviembre del 2018 en el marco del proyecto “Hacia un monitoreo continuo de variables oceanográficas en el Parque Nacional Isla de Flores, Uruguay”. Se utilizaron los datos en el período Noviembre 2018 a Noviembre del 2023, obteniendo así una serie completa de 5 años de datos (Figura 1).



Figura 1. a) Ubicación del Parque Nacional Isla de Flores, b) Vista de imagen satelital tomada de Copernicus Sentinel-2 misson y c) Vista aérea de una parte de la isla. En letra mayúscula los sensores en distintos puntos del muelle (A, B y C), los colores semáforo indican la preferencia del sitio, siendo el verde el más adecuado. Tomado de Trinchin et al., (2021).

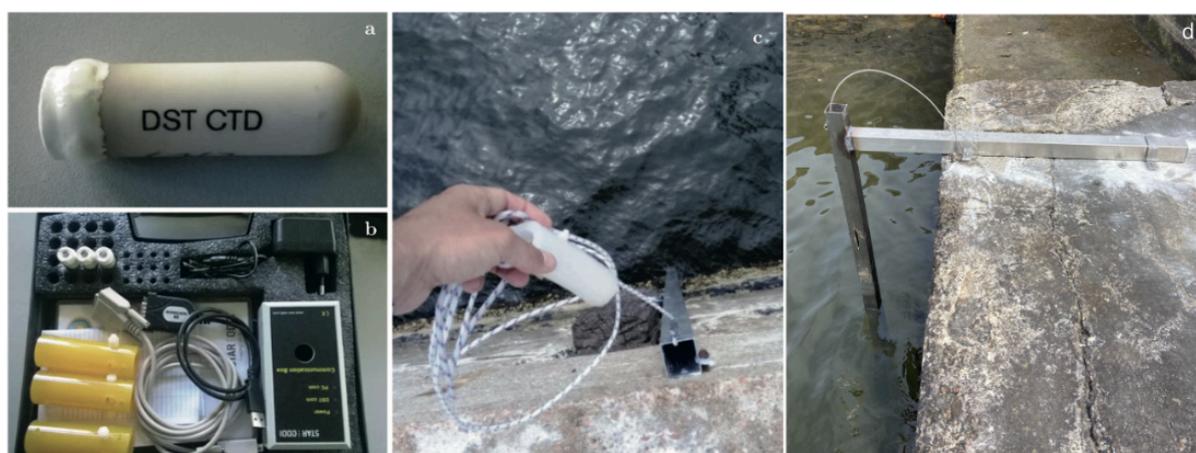


Figura 2. a) Sensor DST-CTD, b) Equipo data logger y cápsulas de protección de sensores, c) Sistema de amarre al muelle tipo “cachimba”, d) Sistema de amarre al muelle tipo “soporte en L” (Anexo). Modificado de Trinchin et al., (2021).

Control de calidad de la serie de salinidad y temperatura en Isla de Flores.

Se realizó un procesamiento de los datos obtenidos a modo de filtrar los datos fuera de rango y construir la serie temporal que se analizará posteriormente. Primero se generó una base de datos en función del tiempo a partir de los registros obtenidos cada media hora desde Noviembre del 2018 hasta Noviembre del 2023. Segundo, se quitaron los datos donde la temperatura era menor a 2°C y mayor a 40°C. En cuanto a la salinidad, se mantuvo en un rango de 0 a 34 psu. Se quitaron los datos donde el sensor potencialmente podría estar fuera del agua, lo cual consideramos ocurre para valores de conductividad es < 3 mS/cm, que es el límite de conductividad inferior alcanzado por los sensores utilizados. Cuando se registraba un dato en una variable por fuera del rango establecido se eliminaban todos los datos para ese periodo de tiempo. Se realizó una mediana móvil de 3 horas para remover los picos de salinidad y temperatura que también se generan cuando el sensor queda fuera del agua. Luego se utiliza la salinidad máxima medida por hora y la temperatura media. Se utiliza la salinidad máxima debido a que existen dos sensores diferentes, uno de 3-37 mS/cm y otro de 13-53 mS/cm. El de rango 3-37, en verano se puede saturar y no lograr medir la salinidad observada. Esto se debe a la ecuación de estado que tiene la salinidad con la conductividad y la temperatura del agua de mar. Como se puede observar en la Figura (3), en el caso de verano cuando el agua asciende por encima de los 20°C, el sensor de agua estuarino nos dejaría medir hasta 26 psu de salinidad sin saturarse, pero es sabido que se pueden registrar valores más altos de salinidad, y de esta manera se justifica añadir un sensor con un rango de conductividad más amplio (13-53 mS/cm). A su vez, cuando se registraron diferentes medidas de salinidad en el mismo día pero en diferentes sensores, el dato que se toma como válido es el de mayor salinidad registrada y así no correr riesgo de que el valor de salinidad no sea el verdadero debido a que el sensor esté saturado.

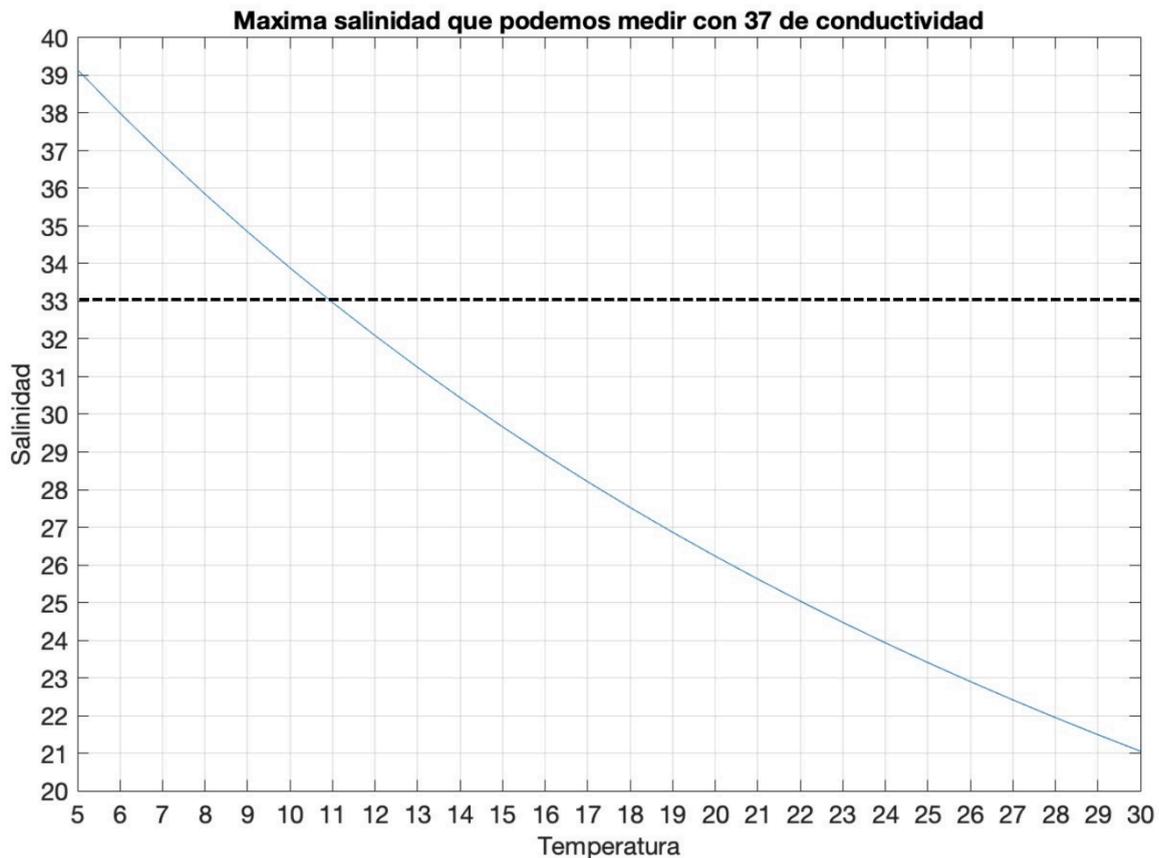


Figura 3. Curva salinidad vs temperatura para conductividad 37. El máximo esperado de salinidad para Isla de Flores es 33 psu por lo tanto a temperaturas mayores a 11°C el sensor ya no podría medir el máximo de salinidad.

3.3 Análisis de datos complementarios.

Los datos del Índice Niño 3.4 se descargaron de https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Niño34/. El índice Niño 3.4, en la región Niño 3.4, es una medida utilizada para monitorear y pronosticar el fenómeno El Niño y La Niña. La región Niño 3.4 se encuentra en el Océano Pacífico central ecuatorial y abarca desde los 5°N hasta los 5°S y desde los 120°O hasta los 170°O. La NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos) utiliza datos de satélites y boyas oceánicas para medir las temperaturas de la superficie del mar en esta región específica. El índice Niño 3.4 se calcula tomando el promedio de las anomalías de temperatura en esa área durante un período de tiempo determinado (Trenberth et al., 2001). La anomalía de temperatura se refiere a la diferencia entre la temperatura actual del mar y la temperatura promedio a largo plazo en esa ubicación. Se descargó una matriz de datos desde 1980 hasta 2023 inclusive con datos mensuales, luego se tomaron los datos de temperatura superficial del mar desde noviembre del 2018 hasta septiembre del 2023 mensuales. Se representaron gráficamente las anomalías mensuales del índice Niño 3.4 y luego se superpusieron con anomalías de salinidad, temperatura y clorofila.

Los datos satelitales de clorofila fueron descargados de https://data.marine.copernicus.eu/product/OCEANCOLOUR_GLO_BGC_L4_MY_009_104/download?dataset=cmems_obs-oc_glo_bgc-plankton_my_l4-gapfree-multi-4km_P1D_20220

7. Se obtuvieron del programa Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) que provee datos oceanicos libres y abiertos, utiliza satélites de observación de la Tierra equipados con sensores ópticos para detectar la clorofila en los océanos. Estos satélites utilizan sensores específicos para medir la concentración de clorofila en el agua. Se utilizan los datos de los multi sensores los cuales miden la reflectancia en varias longitudes de onda, lo que permite estimar la concentración de clorofila. Más específicamente estos sensores recopilan datos sobre la radiación solar reflejada por la superficie del océano en diferentes bandas del espectro electromagnético. A partir de estas mediciones, se pueden calcular índices espectrales que proporcionan información sobre la concentración de clorofila en el agua.

Se realizó un corte de batimetría para utilizar los datos menores a 200 metros de profundidad, entre Punta del Este y Chuy, para así obtener únicamente los datos de plataforma, filtrando los datos oceánicos y los datos del Río de la Plata de clorofila. El producto satelital utilizado tiene una resolución espacial de 4km y temporal diaria con un procesamiento L4 proveniente de múltiples sensores. Luego se realizó la serie temporal de clorofila para los datos desde 2018 hasta 2023 con un dato diario en función del tiempo. Luego se realizó la serie temporal a raíz de las medias mensuales. Por último se calcularon las anomalías diarias y con esto se realizaron figuras para superponer anomalías de salinidad, temperatura, descarga del Río de la Plata y Niño 3.4.

Los datos diarios de descarga del Río de la Plata se obtuvieron a partir de Borús, J., (2022). desde 1980 hasta 2022. Luego se plantearon las medias mensuales en función de todos los datos para realizar una serie temporal. Se calculó el ciclo estacional a partir de las medias mensuales de todos los datos y las anomalías. Para esto se utilizaron solo los datos desde noviembre de 2018 hasta julio 2022.

La Tabla 1 resume los diferentes datos utilizados incluyendo la frecuencia de muestreo de cada uno de ellos y el período considerado.

Tabla 1. Datos utilizados y periodo de tiempo que cubre cada variable. Análisis estadísticos:

Dato	Frecuencia	Periodo de tiempo	Fuente
Temperatura	Horaria	Nov 2018 - Nov 2023	In situ IF
Salinidad	Horaria	Dic 2018 - Nov 2023	In situ IF
Clorofila	Diaria	Nov 2018 - Set 2023	Satelital MC
Descarga del Río de la Plata	Diaria	Nov 2018 - Julio 2022	INA, Borus J
Niño 3.4	Mensual	Nov 2018 - Nov 2023	NOAA Index

Ciclo estacional y anomalías

- *Temperatura y salinidad*

Para el ciclo estacional de temperatura y salinidad se utilizaron datos diarios, para lo cual se promediaron todos los datos obtenidos en un día. Luego se calculó el ciclo estacional promediando todos los años.

Las anomalías se calcularon como las desviaciones entre los valores diarios observados y el ciclo estacional.

- *Niño 3.4.*

La serie del Niño 3.4 se descargó utilizando la temperatura de la superficie del mar entre las latitudes 5°N y 5°S y las longitudes 170°W y 120°W, luego se tomaron las medias mensuales y se graficó la anomalía para los años de interés, que son desde el 2018 a 2023.

- *Clorofila*

Se calculó el ciclo estacional de la clorofila, a partir de los datos diarios y se realizó un suavizado con una media móvil de 30 días.

Las anomalías de clorofila se calcularon como las desviaciones entre los valores diarios observados y el ciclo estacional.

- *Descarga del Río de la Plata*

Para el ciclo estacional de descarga del Río de la Plata se utilizaron las medias mensuales por año y se realizó la climatología. Las anomalías en la descarga del Río de la Plata se calcularon como las desviaciones entre los datos mensuales y la climatología.

Periodograma

A los efectos de estudiar las frecuencias que caracterizan la variabilidad de la salinidad, se realizó un análisis de Fourier y se graficó un periodograma. Esto permitió identificar los períodos más importantes en los que varía la salinidad en el punto de muestra y enfocar el estudio en aquellos más representativos.

Correlaciones

Se realizaron análisis de correlación de Pearson con y sin desfase temporal. La correlación desfasada se utilizó para examinar las relaciones entre dos variables a lo largo del tiempo, considerando posibles retrasos temporales. Se realizó la correlación desfasada entre clorofila y salinidad para la escala diaria y luego se realizó la correlación desfasada entre clorofila y Niño para la escala mensual. Por último se realizó un modelo de regresión lineal entre el caudal y la salinidad para luego reconstruir la salinidad de Isla de Flores a partir de datos históricos de caudal,

4. Resultados

Los resultados se dividen en dos partes. En la primera parte se construye las series de datos de temperatura y salinidad en Isla de Flores y se realiza un análisis exploratorio de su variabilidad, mientras que en la segunda parte se investiga la relación entre la salinidad en la isla y la clorofila en la plataforma, atendiendo así los objetivos específicos planteados.

4.1 Caracterización de la salinidad y temperatura en Isla de Flores y mecanismos que explican su variabilidad.

4.1.1 Control de calidad para la serie de datos y ciclo estacional.

Se registraron un total de 434.109 mediciones en Isla de Flores. En este conjunto de datos crudos un 75% de los mismos eran válidos para utilizar en la serie de datos (Figura 4a).

Luego, se calcularon las medias horarias a partir de los datos registrados cada 30 minutos para temperatura y la salinidad, y por último se realizó la mediana móvil de 3 horas para remover los valores fuera de rango. Como resultado se obtuvo las series mostradas en la Figura 4b. De este primer análisis se desprende que hubo en total 1826 días de mediciones desde el 28 de Noviembre del 2018 hasta el 28 de Noviembre del 2023, con un 94% de cobertura diaria.

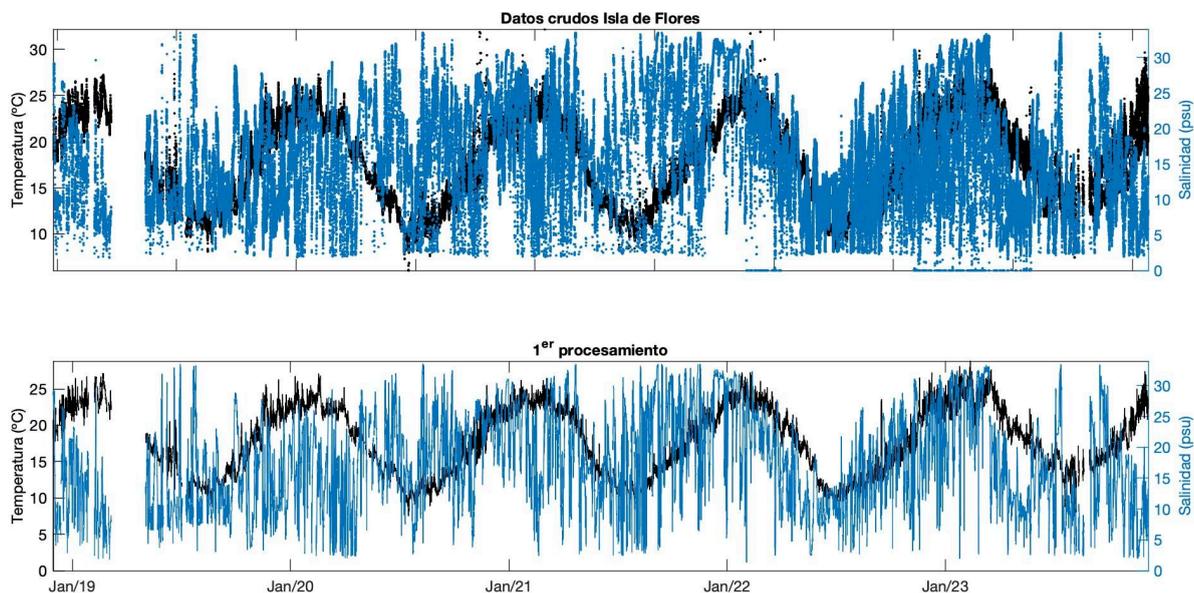


Figura 4. Panel superior: Datos crudos donde cada punto significa una medición de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y salinidad (psu) para Isla de Flores. Tomados cada 30 minutos, en 3 sensores diferentes como máximo y 1 sensor como mínimo. Panel inferior: Primer procesamiento de datos de temperatura y salinidad de Isla de Flores desde Noviembre del 2018 a Noviembre del 2023.

La temperatura tiene un comportamiento estacional, siendo el valor mínimo de temperatura registrada es de $8,8^{\circ}\text{C}$ y el valor máximo de $26,8^{\circ}\text{C}$. Por otro lado, la salinidad durante los primeros 3 años no tiene un marcado ciclo estacional sino que muestra un aumento progresivo de la salinidad año a año, hasta septiembre del 2021. A partir de esa fecha hasta comienzos de 2023 la salinidad muestra un ciclo estacional con picos máximos de 33,2 psu y mínimos de 2,5 psu, similar al de la temperatura. En 2023 el comportamiento de la salinidad vuelve a no presentar un ciclo estacional marcado. Notar que el valor mínimo registrado de salinidad se corresponde con sección 3.2 tiene un rango de medición de 3-37 mS/cm (Figura 4b).

4.1.2 Ciclo estacional y análisis de frecuencia de temperatura y salinidad.

Se calculó el ciclo estacional climatológico de la temperatura con los cinco años de datos medidos, se realizó primero las medias diarias a partir de las medias horarias y el suavizado (línea negra) se realiza a partir de una media móvil de 30 días de las medias diarias (Figura 5a). La mayor temperatura coincide con la estación de verano en los meses de diciembre a marzo y el mes con mayor promedio de temperatura es febrero con $23,23^{\circ}\text{C}$. Asimismo, los meses más fríos coinciden con el invierno y comienzos de la primavera, de junio a septiembre, siendo julio el mes de menor temperatura con $11,66^{\circ}\text{C}$.

Por otro lado, la salinidad muestra un ciclo estacional mucho menos marcado. Comienza con una mayor salinidad en los meses de verano (diciembre, enero y febrero) con valores de salinidad máximos de $22,36$ psu para el mes de enero. A medida que avanza el otoño la salinidad disminuye hasta llegar a su punto de menor valor en mayo con un valor de $14,47$ psu, para luego volver a ascender en primavera hasta llegar a su salinidad máxima en verano. Igualmente se puede observar que el comportamiento calculado para la salinidad es mucho más variable que el de la temperatura (Figura 5b), lo cual sugiere que es necesario tener una serie mucho más larga para lograr una buena estimación. La tabla 2 indica las medias mensuales climatológicas.

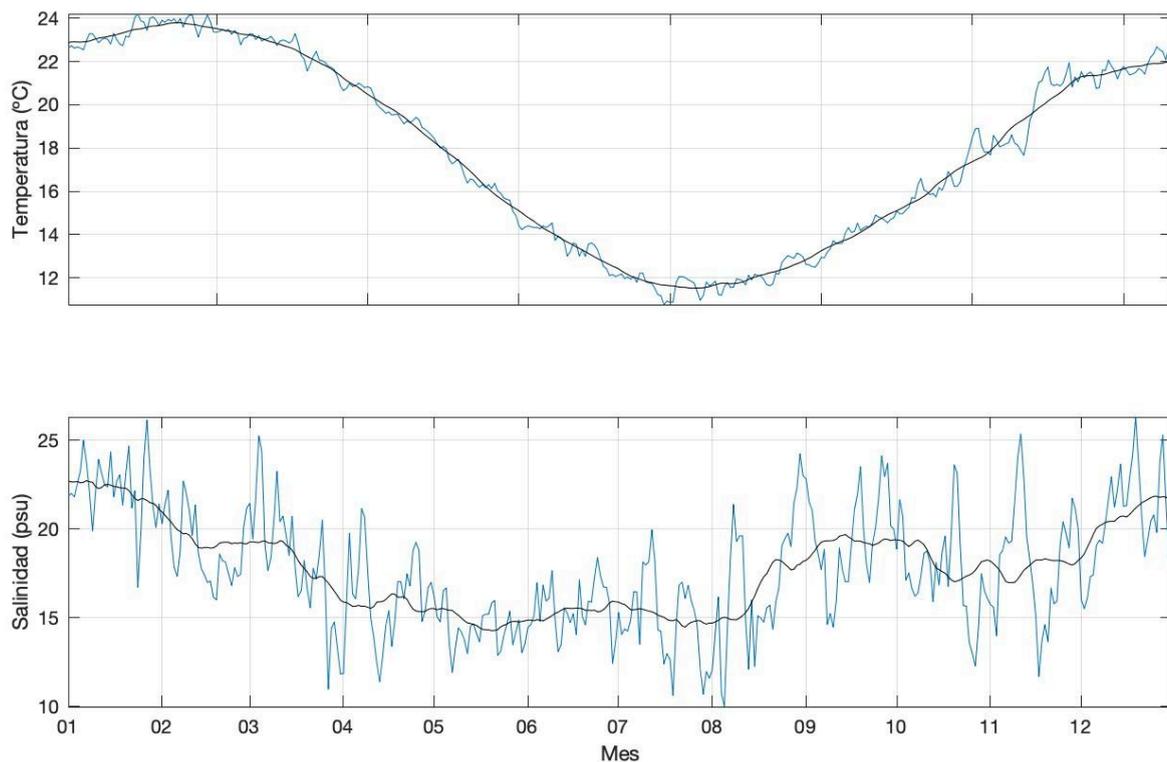


Figura 5. Ciclo estacional en Isla de Flores a nivel diario (azul). Temperatura (panel superior), salinidad (panel inferior). La curva negra es un suavizado de 30 días.

Tabla 2. Medias climatológicas mensuales de temperatura y salinidad.

Mes	Salinidad (psu)	Temperatura (°C)
1	22,36	23,23
2	18,79	23,62
3	18,58	22,57
4	16,13	19,93
5	14,47	16,54
6	15,57	13,58
7	14,90	11,66
8	16,57	12,08
9	19,43	13,84
10	17,65	16,46
11	18,29	19,67
12	20,51	21,69

Para estudiar la variación del ciclo estacional año a año, se grafican los datos diarios con una mediana móvil de 30 días para cada año, y se superpone en negro la climatología. Se observa que para la temperatura todos los años tienen un ciclo estacional bien definido, con algunos años más cálidos que otros como puede ser en 2023 donde hay picos de temperatura más altos en invierno entre los días 180 y 200 del año. También podemos ver que en el año 2022 ocurre lo contrario, es decir, el ciclo estacional de ese año se encontró por debajo de lo normal (Figura 6a).

En el caso de la salinidad encontramos un ciclo estacional que no parece ser tan evidente donde en invierno es del orden de 15 psu y en verano de 20 psu, pero que cuenta con una variabilidad mucho mayor que la temperatura dentro de las estaciones y año a año. La característica más evidente es un descenso de salinidad en otoño-invierno (Figura 6b).

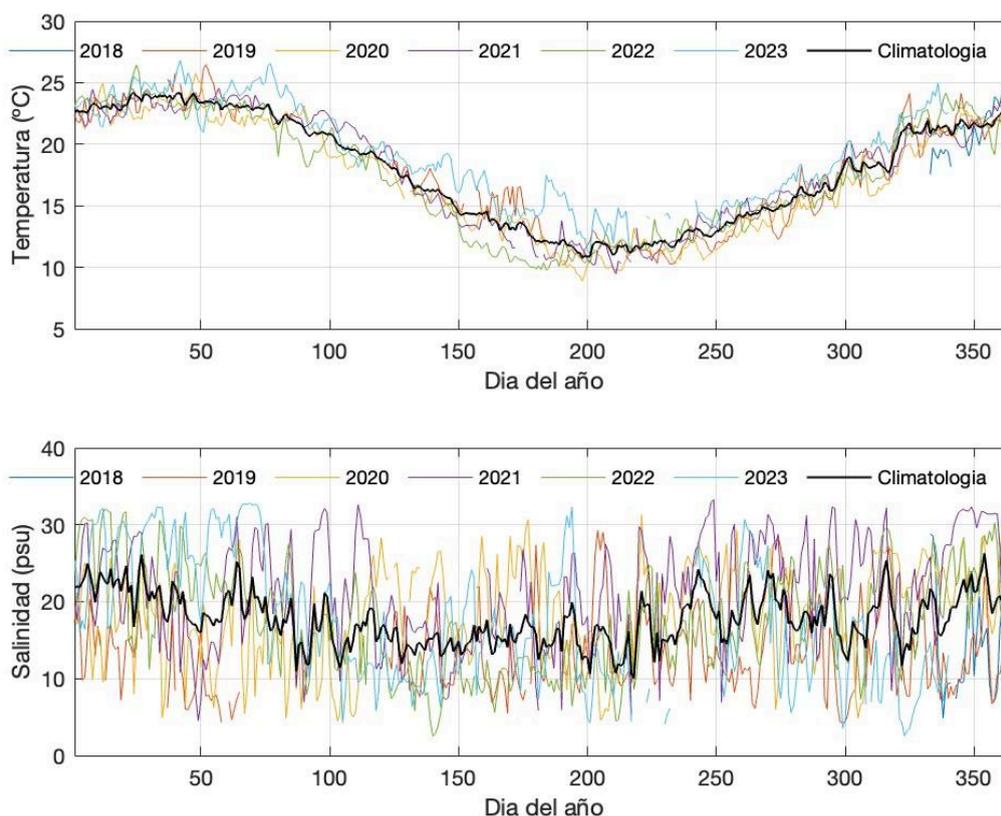


Figura 6. Datos diarios para los diferentes años de temperatura en el panel superior y salinidad en el panel inferior. La curva negra es la climatología calculada como el promedio de todos los años.

Se observa que el año 2023 fue el que registró una temperatura mayor al resto, siendo el pico de temperatura a los 75 días, es decir a mitad de Marzo, con un valor de 27 °C y el mínimo de temperatura el día 210, en Julio, con un valor de 12°C. Por otro lado, el año 2022 comenzó siendo más frío que la media, registrando una temperatura mínima de 10 °C para el día 170 fines de mayo, principios de junio, pero en la segunda parte del año la temperatura comienza a aumentar para pasar a ser uno de los más calurosos cerca del día 350 (fines de noviembre principios de diciembre) con una temperatura cercana a 23°C. El mínimo de temperatura registrada fue de 9 °C en julio de 2020 (Figura 6a). La figura 7a muestra el comportamiento para cada año con un suavizado de 30 días lo cual permite ver más claramente que 2023 fue un año cálido durante todos los meses con anomalías cercanas a los 2°C durante la época fría. Es de resaltar que el 2023 fue el año más cálido a nivel global desde que se tienen registros instrumentales.

En el caso de la salinidad no se observa un ciclo estacional tan marcado, y todos los años parecen comportarse de diferente manera (Figura 6b). La característica más evidente es un descenso de salinidad en otoño-invierno, pero con una alta variabilidad entre diferentes años. Al suavizar las series temporales con un promedio de 30 días se desprenden algunas observaciones. Por ejemplo, el año más salino para la época de verano, es decir entre el día 1 (Enero) al día 60 (Marzo), es el 2023 con un máximo de 28 psu; luego podemos ver que cerca del día 200 (mediados de Junio) hay un pico de salinidad mínima de 5 psu para ese mismo año. Por otro lado, el año 2019 comienza con una salinidad muy baja hasta los primeros 75 días del año (mediados de Marzo) cuando llega a 6 psu; luego comienza a

subir y queda cerca de la climatología pero para el final del año vuelve a ser el año con menor salinidad. Otra observación a destacar es que entre los días 150 y 200 (Mayo y Junio) la salinidad tiene el menor rango de variación interanual de 10 a 20 psu, mientras que a principio y fines de año la salinidad varía desde 15 a 30 psu, es decir el rango es mayor (Figura 7b).

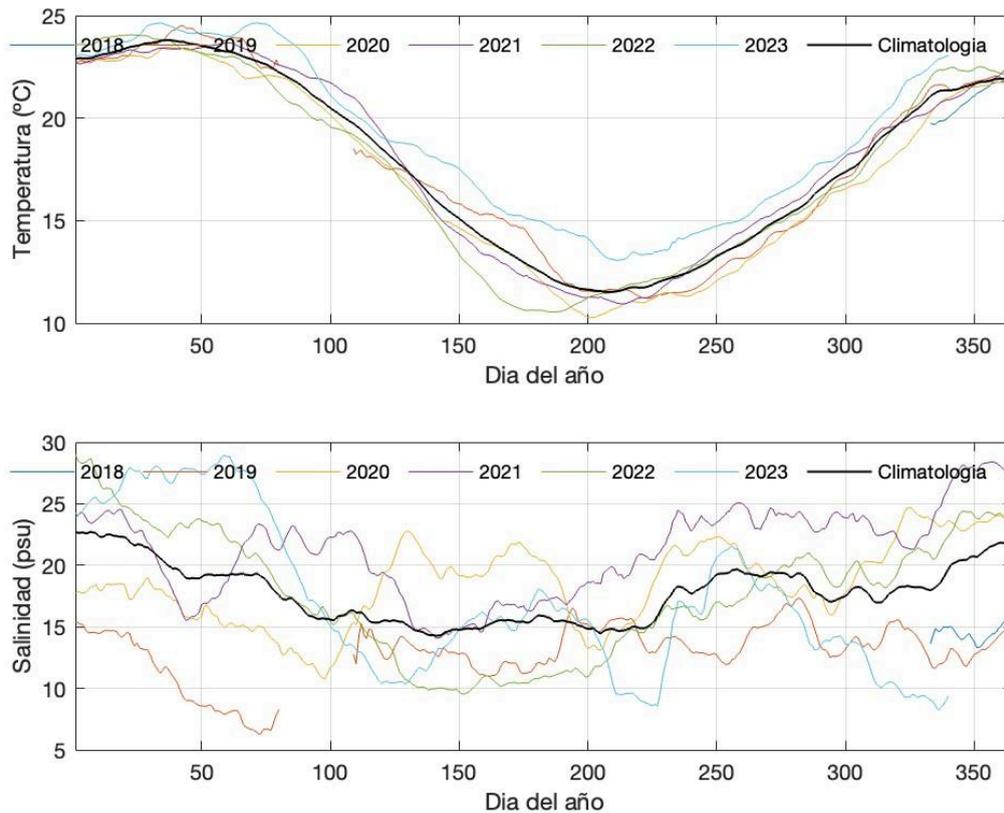


Figura 7. Evolución diaria año a año promediada con un suavizado de 30 días para temperatura en el panel superior y salinidad en el panel inferior. La curva negra es el promedio de las series de todos los años.

Uno de los objetivos de este trabajo es analizar los datos para encontrar las frecuencias más marcadas en la serie temporal, es decir, las principales escalas de tiempo en la cual la salinidad varía. Para eso se realizó un análisis de frecuencia de las series temporales. Como se observa en la Figura 6 la salinidad tiene un ciclo estacional poco marcado y su evolución está caracterizada por variaciones de período más corto. En forma consistente el periodograma muestra picos en varios períodos, uno cerca de las 3 semanas, y varios en el rango de los 30 a 60 días. Asimismo, muestra un pico a los 100 días y otros en escalas aún más largas que dado la longitud total de la serie tienen poca significancia. En comparación, la temperatura tiene el mayor pico en escalas largas asociadas al ciclo estacional, pero también tiene importancia el pico cercano a los 100 días, al igual que para la salinidad. Comparativamente, las variaciones de entre 30 y 60 días tienen menos importancia para la temperatura que para la salinidad, excepto para la escala de 35 días (Figura 8). Por último, es destacable que para la temperatura se observa un pico marcado en 6 días, probablemente asociado a la variabilidad atmosférica de escala sinóptica, que no se distingue en la salinidad. El hecho de que las series temporales de salinidad y temperatura

presenten periodicidades de variabilidad comunes y diferentes resalta que en ciertas escalas de tiempo estas variables están controladas por procesos físicos distintos.

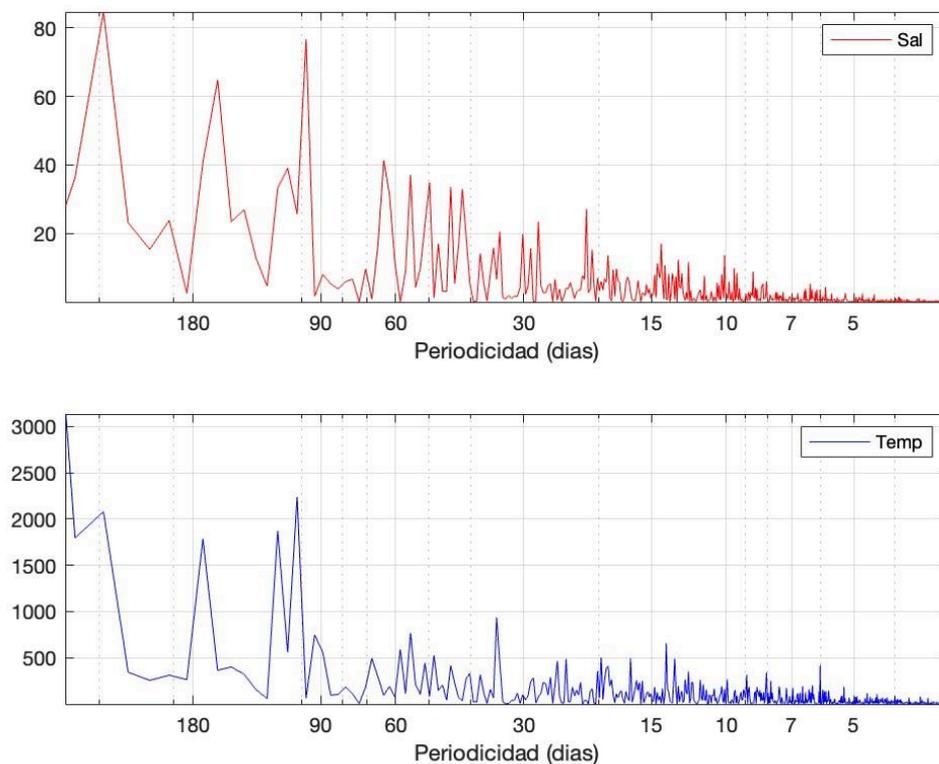


Figura 8. Periodograma para anomalías diarias de: salinidad (panel superior) y temperatura (panel inferior). En el eje horizontal se representan los períodos, y es tal que períodos largos muestran variaciones lentas a lo largo del tiempo y períodos cortos variaciones más rápidas.

4.1.3 Variabilidad interanual de temperatura y salinidad en Isla de Flores y su relación con ENOS.

Se calcularon las anomalías diarias de temperatura y salinidad para el período a los efectos de estudiar su posible relación con ENOS. A diferencia de la salinidad, las anomalías de temperatura son de una amplitud relativa menor, y varían entre 1 y 2°C de los valores esperados. En el periodo de noviembre del 2018 hasta principios del 2022 se pueden ver anomalías pequeñas, caracterizadas por cortos períodos de tiempo, pero predominando anomalías negativas, con algunos picos positivos a mediados del 2019 y fines del 2021. A mediados del 2022 se observa una gran anomalía negativa de temperatura que llega hasta los - 3°C y por un periodo de tiempo mayor a lo que se venía observando. A fines del 2022 hasta noviembre del 2023 se puede observar una anomalía positiva mayor en amplitud y significativamente más larga que las del resto de la serie que llega hasta 5°C. Para la anomalía de temperatura y la serie Niño 3.4 no parece existir una correlación. En la primera parte de la serie, que se encuentra en un periodo de El Niño ($Niño3.4 > 0$), se encuentran anomalías de diferente signo y lo mismo ocurre en el periodo de La Niña ($Niño3.4 < 0$), las variaciones de las anomalías de temperatura no parecen seguir un patrón determinado por la presencia de Niño o Niña (Figura 9a).

Por otro lado para la salinidad, la serie comienza con una anomalía negativa con una amplitud relativamente grande que abarca hasta mediados del 2020, con una interrupción de anomalía positiva por un periodo muy breve de tiempo a mediados del 2019. En este periodo se puede observar una anomalía negativa de salinidad de más de 15 psu siendo la anomalía más grande de toda la serie al principio del año 2019. Luego, desde mediados del 2020 hasta principios del 2022 comienza un período de anomalías generalmente positivas, donde se observan picos de anomalías de más de 10 psu, interrumpido por algunos picos de anomalías negativas pero de muy corta duración. Luego de este largo período de anomalía positiva, le sigue uno de anomalía negativa relativamente corto comparado al anterior pero con picos que llegan hasta -12 psu entre el 2022 al 2023. Luego le sigue un último periodo de anomalía positiva de una amplitud que abarca desde mediados del 2022 y principios del 2023 que llega hasta 15 psu de anomalía positiva en los primeros meses del 2023. La serie termina con una anomalía negativa hasta noviembre del 2023 (Figura 9b).

En la superposición del índice Niño3.4 y las anomalías de salinidad para Isla de Flores se observa que ambas funciones se comportan de manera opuesta. Desde el comienzo de la serie hasta mediados del 2020 se observa una anomalía negativa de salinidad, mientras que la serie del Niño 3.4 marca una anomalía positiva de temperatura, es decir está sucediendo el fenómeno del Niño. Luego, a mediados del 2020 se comienzan a observar anomalías positivas de salinidad hasta mediados del 2021, y de la misma manera se observa anomalía negativa de temperatura para el Niño 3.4, es decir está ocurriendo el fenómeno de La Niña. Luego hay un periodo breve de neutralidad de anomalías de salinidad y Niño a mediados del 2021, para seguir nuevamente con una anomalía positiva de salinidad desde mediados del 2021 hasta mediados del 2022, que a su vez le corresponde una anomalía negativa de temperatura. A mediados del 2023 comienza un evento El Niño, (Niño3.4 se vuelve positivo) y se desarrolla una anomalía de negativa de salinidad (Figura 9b).

Se puede concluir entonces que el fenómeno de ENOS controla la variabilidad interanual de la salinidad en la Isla de Flores, mientras que en estas escalas la temperatura parece obedecer a otros factores.

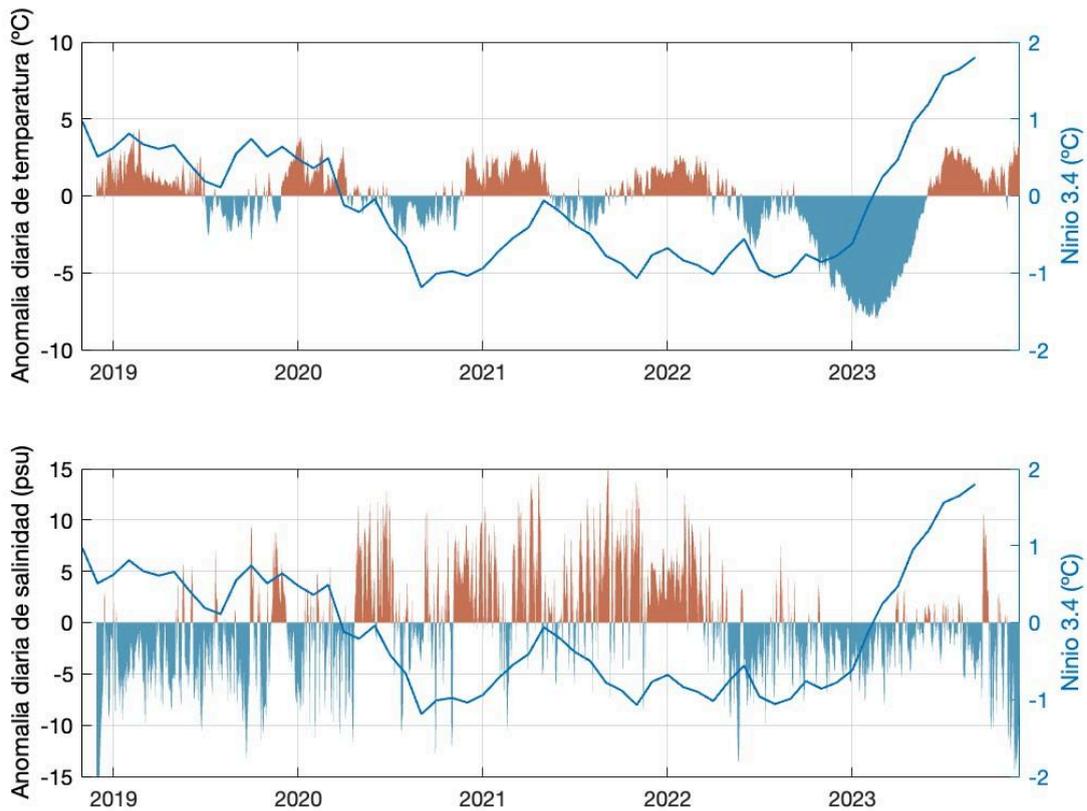


Figura 9. Anomalías diarias de temperatura en el panel superior y salinidad en el panel inferior de Nov 2018 a Nov 2023. En ambos paneles se superpone la serie mensual del índice Niño 3.4 (línea azul) para el mismo periodo de tiempo.

4.1.4 Descarga del Río de la Plata y su relación con la salinidad en Isla de Flores

La sección anterior mostró la relación inversa entre ENOS y la salinidad en Isla de Flores. Por otro lado, como se mencionó más arriba, ENOS afecta las lluvias en la cuenca del Río de la Plata de forma tal que la descarga aumenta durante años El Niño. Por lo tanto, las variaciones en la descarga del Río de la Plata es un mecanismo a través del cual ENOS puede afectar la salinidad.

La descarga del Río de la Plata muestra gran variabilidad interanual, en gran parte debido a ENOS. En particular, al final de la serie, desde el 2020 en adelante, se puede observar una disminución en la descarga en comparación con el resto de los años que por intensidad y duración no tiene precedentes desde 1980 (Figura 10).

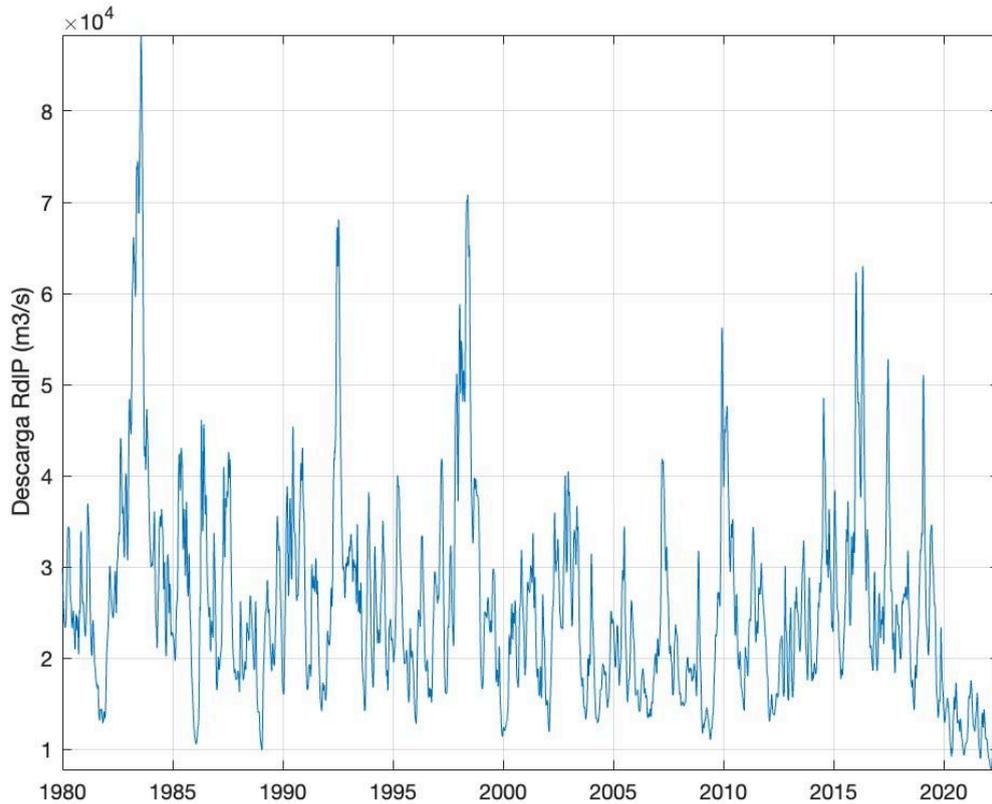


Figura 10. Serie temporal mensual de descarga del Río de la Plata desde 1980 hasta 2022. Los datos se obtuvieron de Borús, J., (2022). Evaluación de Caudales Mensuales Descargados por los Grandes Ríos del Sistema del Plata al Estuario del Río de la Plata. Ezeiza: Alerta Hidrológico-Instituto Nacional del Agua y el Ambiente.

Para estudiar el rol de las anomalías de descarga se utilizaron únicamente los datos que se solapan temporalmente con las mediciones de salinidad y temperatura en Isla de Flores. Desde noviembre de 2018 hasta principios de 2019 se observa una anomalía positiva de descarga de más $15000 \text{ m}^3/\text{s}$. Luego a mediados del 2019 se observa una anomalía negativa de $-2000 \text{ m}^3/\text{s}$ seguida por una anomalía positiva también de alrededor de los $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ para luego a mediados del 2019 hasta fines del 2022 tener una anomalía negativa de gran amplitud. Hay picos máximos de descarga negativa que llaman la atención, como a mediados del 2020, principios del 2021, mediados del 2021 y el mayor pico de descarga anómala negativa es a principios del 2022 que llega hasta $20000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 11).

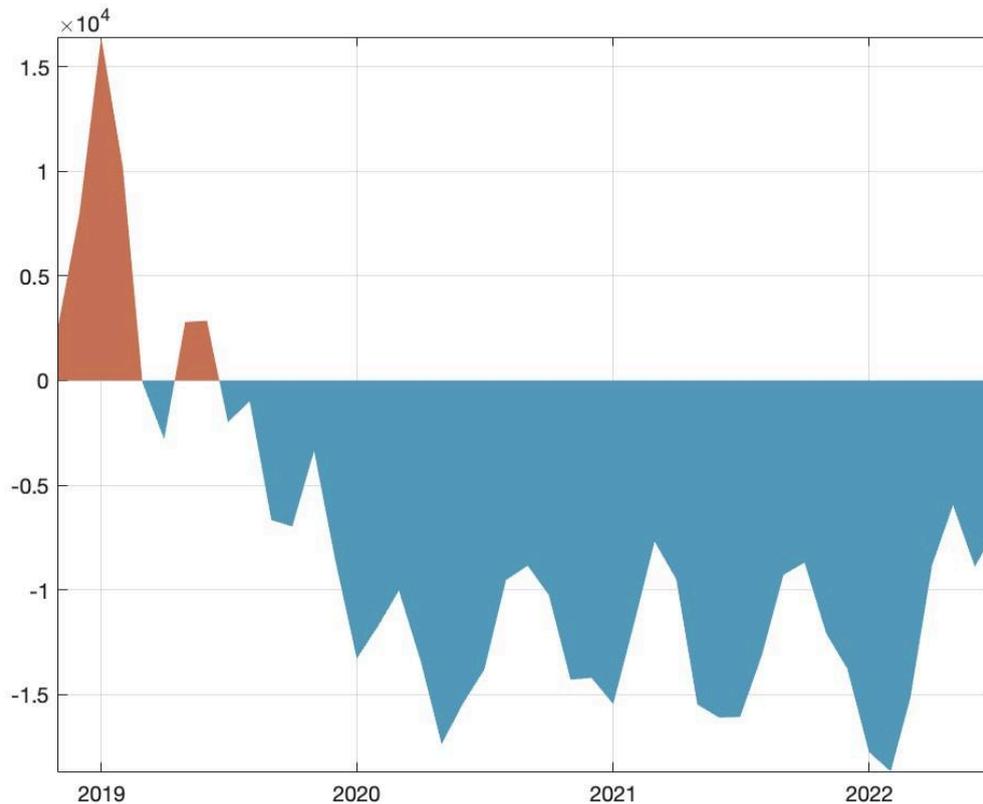


Figura 11. Serie de anomalías mensuales para descarga del Río de la Plata (m^3/s) desde 2018 hasta 2022.

La figura 12 muestra el ciclo estacional de descarga del Río de la Plata, se utilizaron los datos mensuales de cada año. Se puede ver que hay un ciclo estacional donde en los primeros meses del año, enero y febrero, la descarga es baja con alrededor de $24000 m^3/s$, en mayo ocurre el pico máximo de descarga con $29000 m^3/s$, y existe un segundo mínimo en la descarga durante el mes de setiembre donde la descarga disminuye hasta $22000 m^3/s$. Luego vuelve a subir y en el mes de noviembre llega a alrededor de $25500 m^3/s$. Es decir que la máxima descarga se registra en la estación de otoño, mientras que la mínima es en primavera y verano.

Es notable observar que si bien la salinidad muestra alta variabilidad en escalas cortas (por ej. Figura 6), se puede distinguir un comportamiento opuesto entre ambos ciclos estacionales. La salinidad tiene un mínimo en Mayo de 14 psu, al mismo momento del máximo de descarga del Río de la Plata y tiene un máximo de salinidad en verano de 22 psu, mientras que la descarga presenta un mínimo (Figura 12).

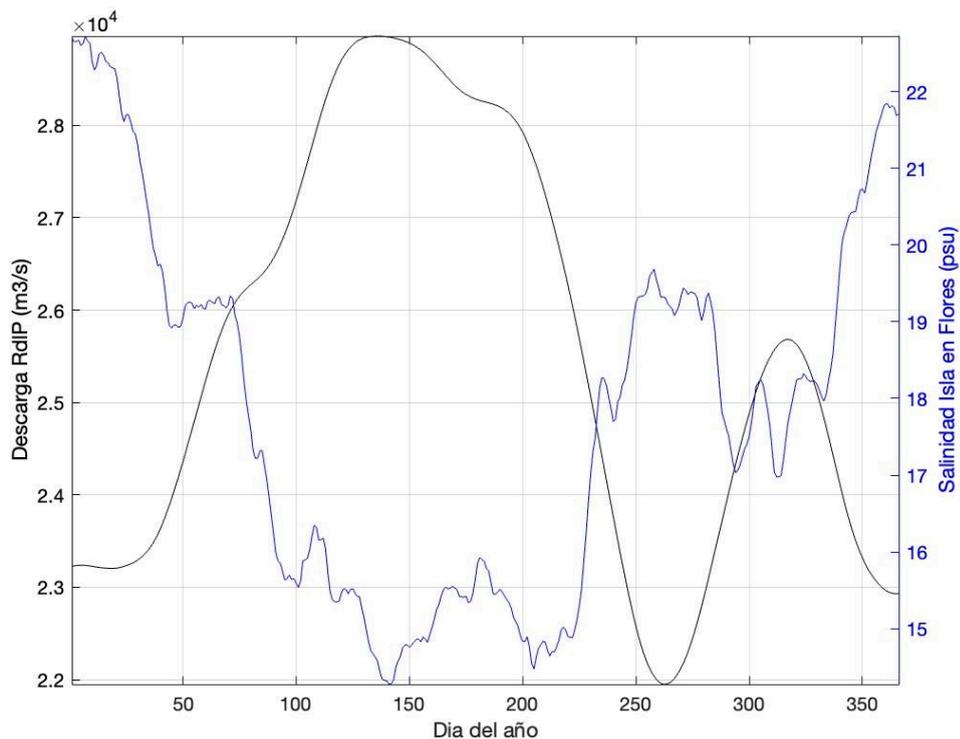


Figura 12. Ciclo estacional de la descarga del Río de la Plata superpuesta con el ciclo estacional de salinidad para Isla de Flores. Esta figura se realizó a partir de los datos diarios y luego se realizó la climatología.

A continuación se graficaron los datos mensuales de descarga del Río de la Plata y de salinidad para estudiar su comportamiento. Se observa cómo las funciones se comportan de manera opuesta, es decir cuando hay un máximo de descarga, hay un mínimo de salinidad, y así sucesivamente en toda la gráfica. El máximo de salinidad se dio en Enero del 2022 que llegó a 27 psu, mientras que en esa misma fecha se encontró un mínimo de descarga de $10000 \text{ m}^3/\text{s}$. La correlación encontrada entre salinidad y descarga es de $r=-0,57$ (Figura 13).

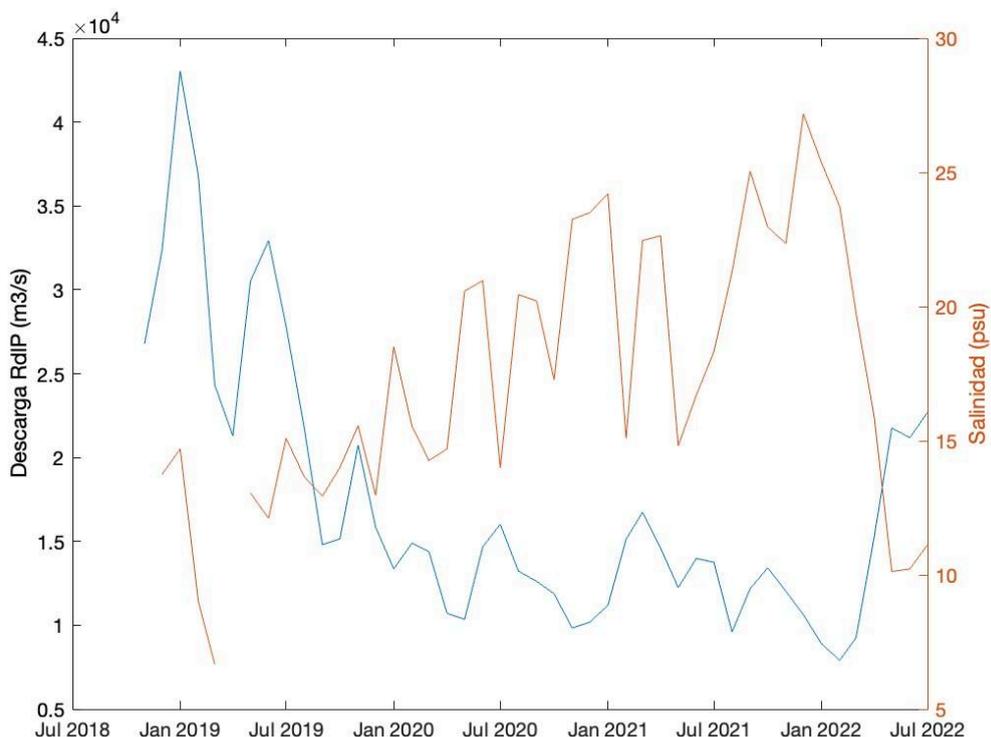


Figura 13. Salinidad y descarga del Río de la Plata desde diciembre del 2018 hasta julio del 2022 calculado a partir de las medias mensuales.

4.2 Relación entre salinidad en Isla de Flores y clorofila en la plataforma Atlántica.

En esta sección capítulo se vincula la variabilidad en la clorofila de la plataforma atlántica uruguaya con la salinidad en la Isla de Flores y se desarrolla un modelo predictivo de salinidad basado en la descarga del Río de la Plata.

4.2.1 Ciclo estacional y variabilidad de la clorofila en la plataforma atlántica

El área de estudio para la clorofila es la plataforma continental Atlántica de Uruguay considerada por el polígono comprendido entre Punta del Este y Chuy y perpendicular a la costa hasta los 200 metros de profundidad (Figura 14). Las condiciones medias muestran que la concentración de clorofila disminuye a medida que nos alejamos de la costa: mientras que cerca a la costa hay una concentración de 8 mg/m³, a medida que se acerca a la zona media de la plataforma la concentración disminuye a 4 mg/m³ y en la zona externa de la plataforma la clorofila desciende hasta por debajo de los 4 mg/m³. La Isla de Flores se encuentra en la zona costera de la plataforma continental uruguaya justo en la zona exterior del estuario del Río de la Plata (Figura 14).

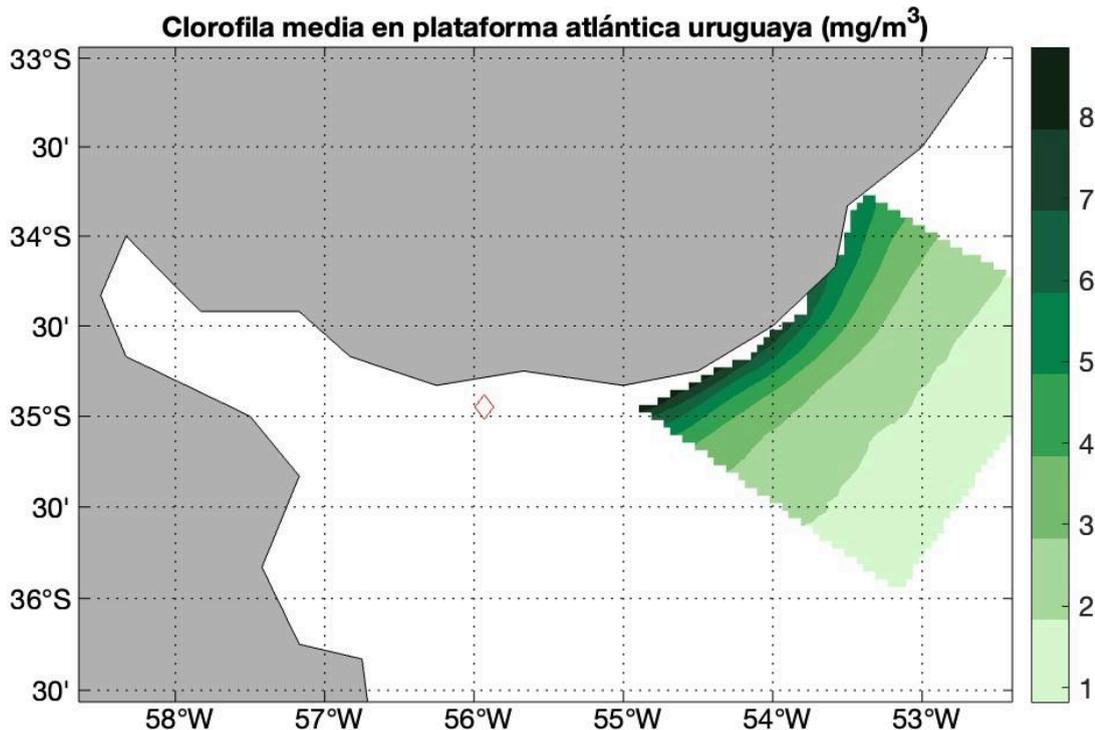


Figura 14. Clorofila promedio a partir de datos satelitales para la plataforma continental Atlántica uruguaya (Copernicus Marine Service). Se realizó un corte de la plataforma entre Punta del Este y Chuy hasta la isobata de 200m perpendicular a la costa. En el punto rojo está marcada la Isla de Flores.

A partir de los datos satelitales diarios desde 2018 hasta 2023 se construyó la serie temporal de la clorofila para la plataforma continental uruguaya indicada en la Figura 10. El comportamiento de la concentración de clorofila sigue un ciclo estacional muy marcado. A su vez, a mediados del 2019 y mediados del 2021, se observaron picos de concentración de clorofila, siendo los años con concentraciones más altas, mientras que a principios del 2021 y 2022 fue cuando se registraron los valores más bajos. Otra observación que se desprende del análisis de la figura es que el año 2019 fue el que tuvo máyor variación en la concentración (Figura 15).

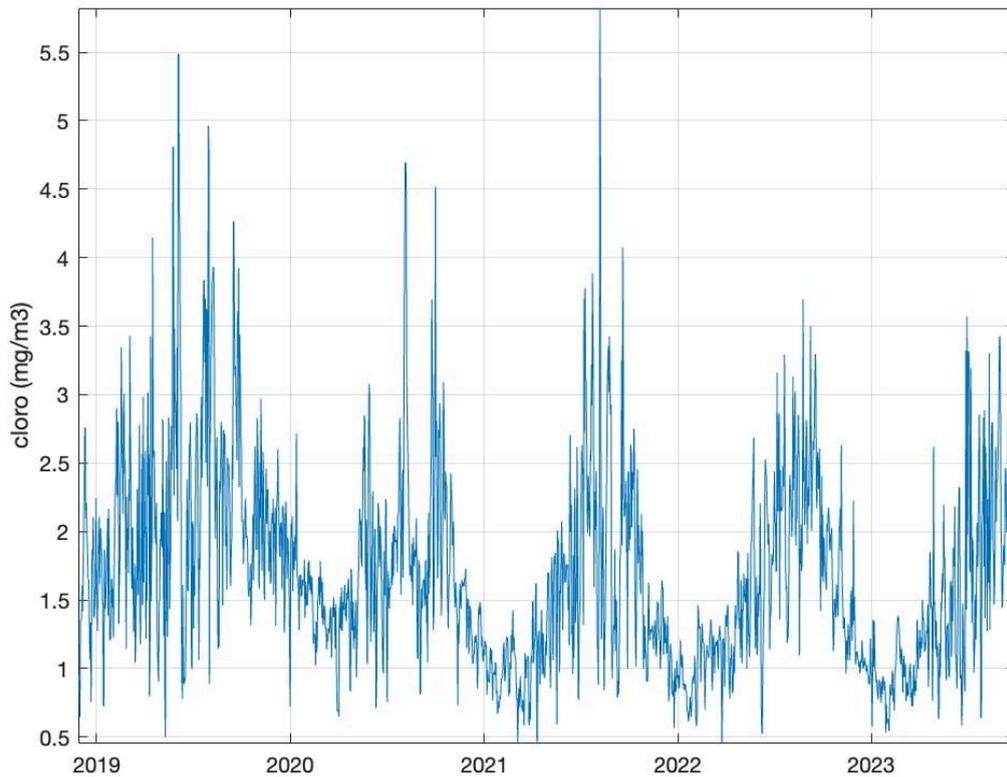


Figura 15. Serie temporal diaria de clorofila promediada sobre la plataforma continental uruguaya descargada de datos satelitales de Copernicus Marine Service desde Noviembre 2018 hasta Diciembre del 2023.

La climatología de la clorofila se muestra en la Figura 16. Se muestra el promedio diario de los 5 años considerados, así como el resultante de suavizar con una media móvil de 30 días. De la línea negra se puede observar que el comportamiento de la clorofila sigue un ciclo estacional con máximos y mínimos muy marcados entre estaciones del año pero también cuenta con una variabilidad de más corto plazo. Los meses de verano, es decir, diciembre, enero y febrero son los meses con menor concentración de clorofila, siendo fines de enero a principios de febrero cuando se encuentra el punto de menor concentración que es de $0,3 \text{ mg/m}^3$. El pico máximo ocurre a fin de julio-comienzos de agosto con un valor de $1,15 \text{ mg/m}^3$. Luego la curva empieza a bajar nuevamente con otro pico de clorofila en plena primavera de $1,05 \text{ mg/m}^3$ hasta llegar a diciembre que es uno de los meses con menor concentración de clorofila con valores de $0,45 \text{ mg/m}^3$ (Figura 16).

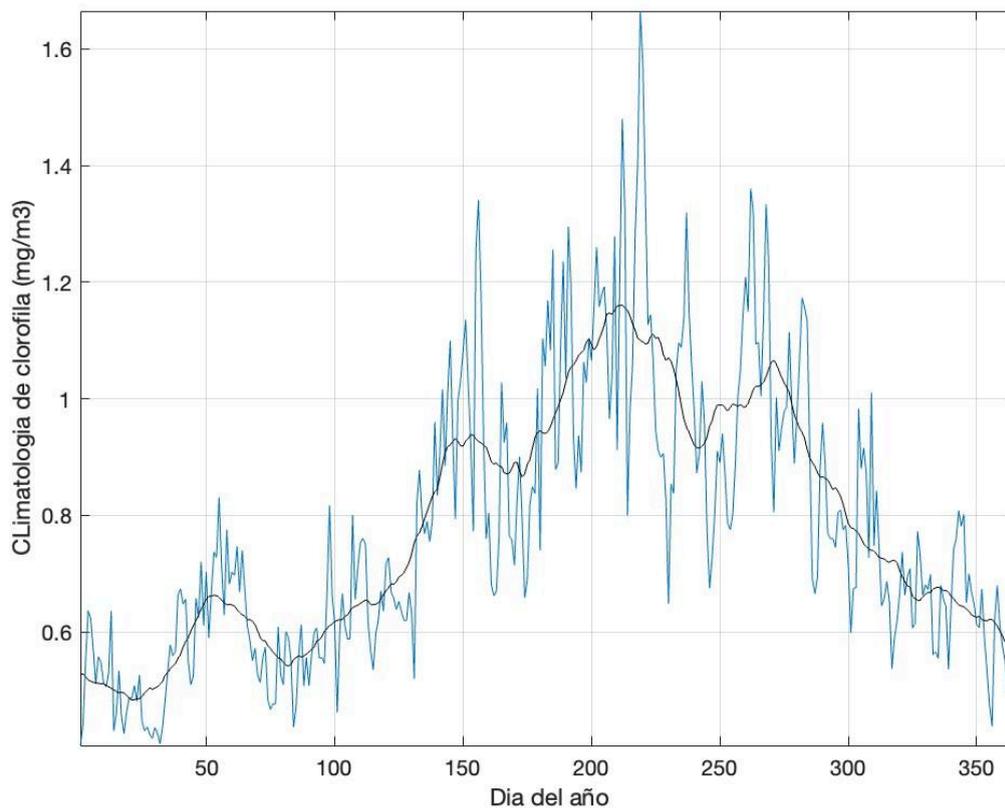


Figura 16. Ciclo estacional de clorofila en la plataforma continental Atlántica uruguaya. La curva azul es el promedio diario de los 5 años considerados, mientras que la curva negra resulta de suavizar con una media móvil de 30 días.

La serie de anomalías de concentración de clorofila comienza con una anomalía positiva muy marcada que alcanza valores de hasta 2 mg/m³ por encima de la media, que va hasta principios del 2020, es decir casi un año y medio de mayor concentración. Luego comienza un largo periodo de anomalía negativa de concentración de clorofila que va desde mediados del 2020 hasta mediados del 2023, interrumpido por anomalías positivas de menor duración: por ejemplo a mediados del 2021, y en la primavera del 2022. Sin embargo, a grandes rasgos se puede decir que desde mediados del 2020 hasta mediados del 2023 la concentración de clorofila es menor a la media y oscila entre valores de -0,5 a -1 mg/m³ de diferencia (Figura 17).

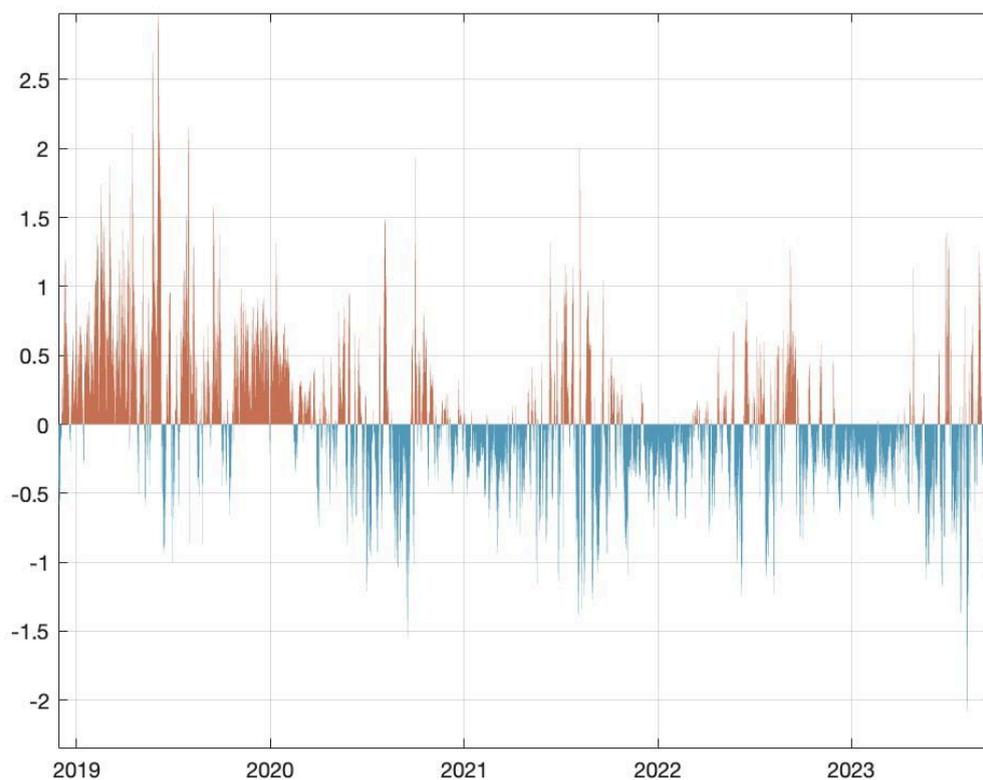


Figura 17. Anomalía diaria de clorofila en la plataforma continental Atlántica uruguaya para el periodo de noviembre 2018 hasta diciembre 2023.

4.2.2 Variabilidad de la clorofila y su relación con la salinidad en Isla de Flores

La figura 18 muestra juntas las anomalías de clorofila en la plataforma continental Atlántica uruguaya y las anomalías de salinidad en la Isla de Flores para comparar su comportamiento. Se observa que las variables se correlacionan negativamente. La figura comienza con una anomalía positiva de clorofila hasta principios del 2020 y al mismo tiempo en ese periodo hay una anomalía negativa de salinidad. Luego en el período de principios de 2020 hasta principios de 2022, las anomalías positivas de salinidad corresponden mayormente a anomalías negativas de clorofila y así sucesivamente en toda la serie. En los primeros meses del 2019 hay una anomalía de clorofila de más de $0,4 \text{ mg/m}^3$ que es la más alta registrada, mientras que la salinidad llega a tener una anomalía de hasta -15 psu . La anomalía negativa máxima registrada es a mediados del 2020 con un valor de $-0,3 \text{ mg/m}^3$, y la salinidad en ese periodo se encuentra en una anomalía positiva que llega hasta los 13 psu . El valor de la correlación entre clorofila y salinidad es de $r = -0,60$ (Figura 18).

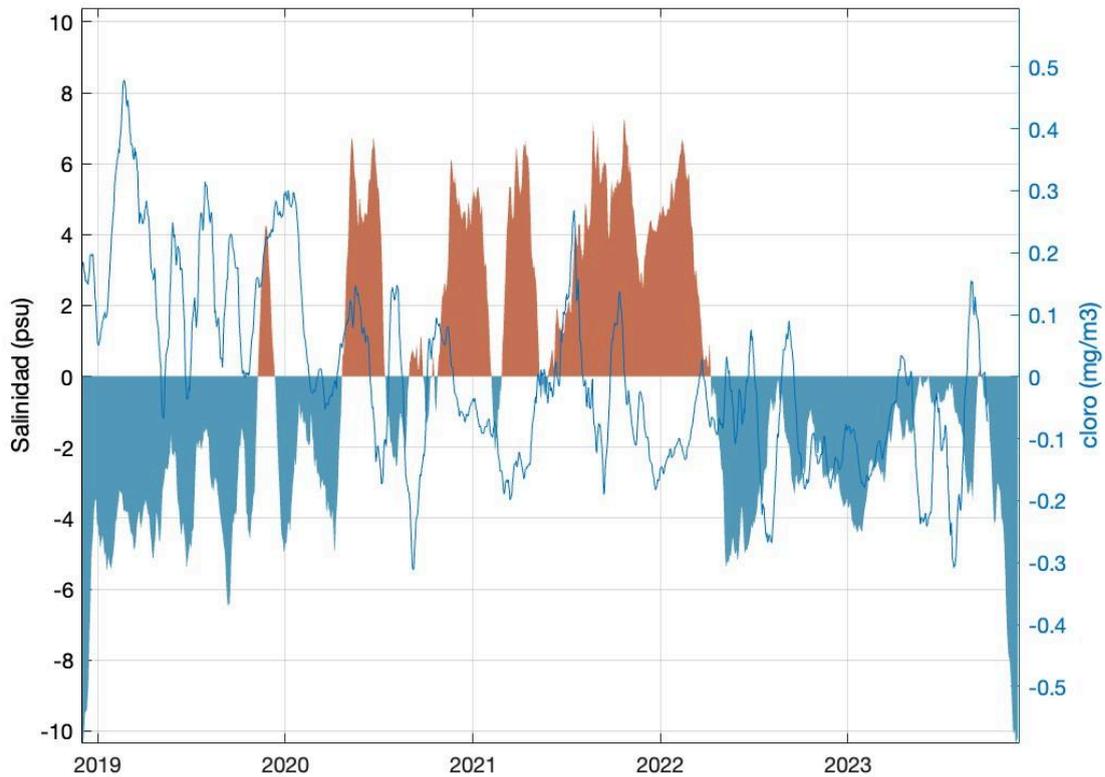


Figura 18. Serie de anomalías diarias de clorofila en la costa atlántica uruguaya (línea azul) y salinidad (en colores) con un suavizado de 30 días Isla de Flores.

A continuación se superpuso la serie del índice Niño 3.4 y la serie de anomalías de clorofila. El comportamiento de esta figura muestra, al contrario que la anterior, una correlación positiva ya que cuando una función aumenta la otra pareciera aumentar también, y cuando una disminuye la otra también lo hace. Así, períodos caracterizados por El Niño (por ej. 2019) están asociados a anomalías de clorofila positivas, mientras que durante La Niña las anomalías de clorofila en la plataforma atlántica uruguaya son mayormente negativas. La desviación más importante a este comportamiento se observa en 2023 cuando coexisten un evento Niño y anomalías negativas de clorofila (Figura 19).

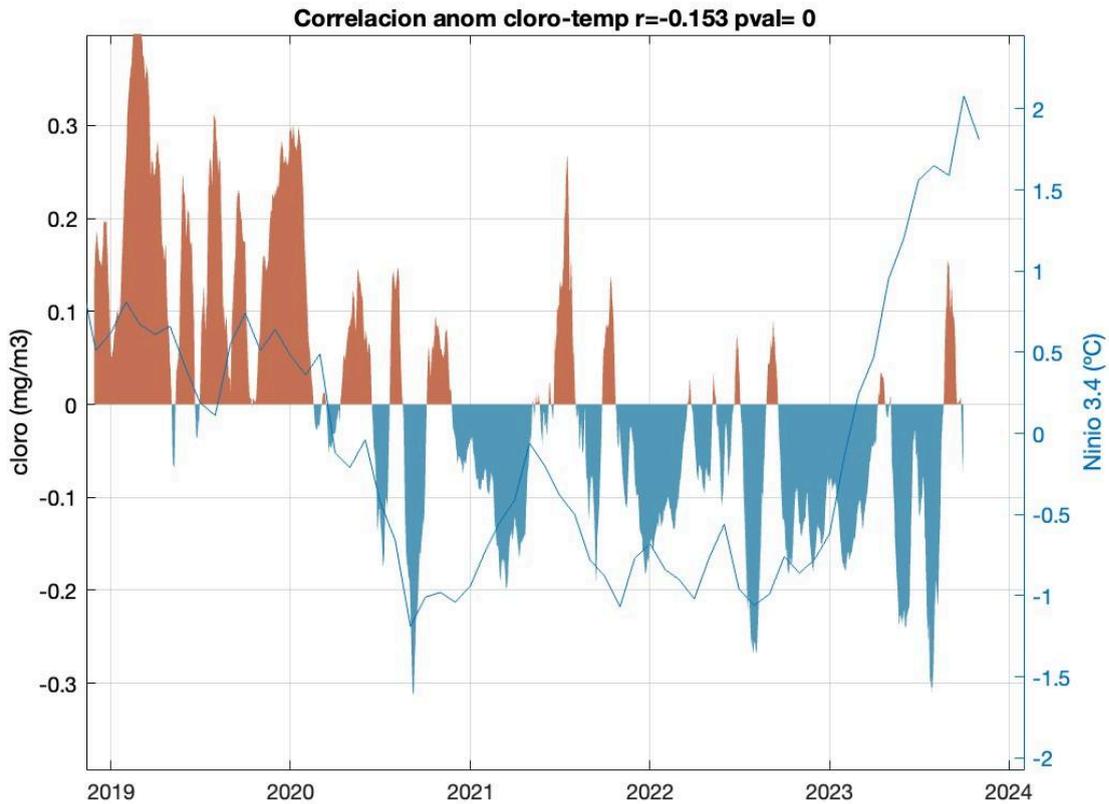


Figura 19. Serie de anomalías de clorofila con un suavizado de 30 días en la plataforma atlántica uruguaya (en colores) y Niño 3.4 (en azul).

Para cuantificar la relación a nivel diario entre la salinidad y la clorofila se realizó un diagrama de dispersión entre estas variables y se calculó la correlación. La correlación entre el ciclo estacional de salinidad y clorofila tiene un $r=-0,28$ y un $p\text{-valor}<0.05$ (Figura 20a). La correlación entre las anomalías de clorofila y salinidad es $r=-0,15$ y un $p\text{-valor}<0.05$ (Figura 20b). La correlación entre los ciclos estacionales de temperatura y clorofila tiene un $r=-0,79$ y un $p\text{-valor}<0.05$ (Figura 20c). Por último, la correlación entre las anomalías de clorofila y temperatura es $r=0,131$ y un $p\text{-valor}<0.05$.(Figura 20d).

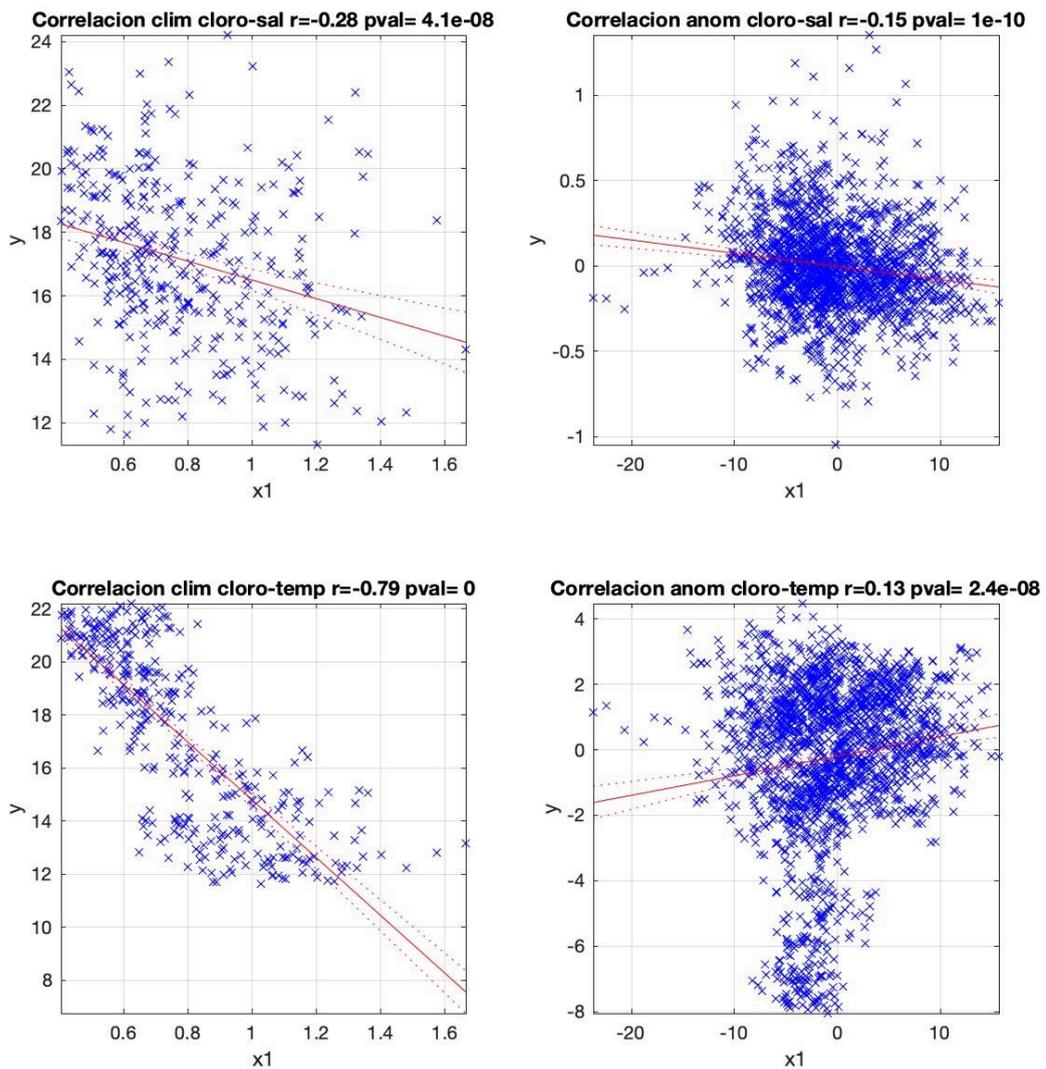


Figura 20. Diagramas de dispersión de datos diarios. Ciclo estacional de clorofila y de salinidad (panel superior izquierda). Anomalía de clorofila y anomalía de salinidad (panel superior derecha). Ciclo estacional de clorofila y temperatura (panel inferior izquierda) Anomalía de clorofila con anomalía de temperatura (panel inferior derecha).

La figura 21 explora un posible desfase en la evolución de la clorofila y la salinidad. Se observa que la correlación negativa es máxima cuando el máximo de clorofila ocurre 2 días después del máximo de salinidad, lo cual se podría interpretar como debido al transporte de clorofila por la descarga. Adicionalmente, se encontró un máximo de correlación negativa a los 20 días, el cual podría hipotetizar que es una respuesta biológica a los nutrientes transportados por la descarga (Figura 21).

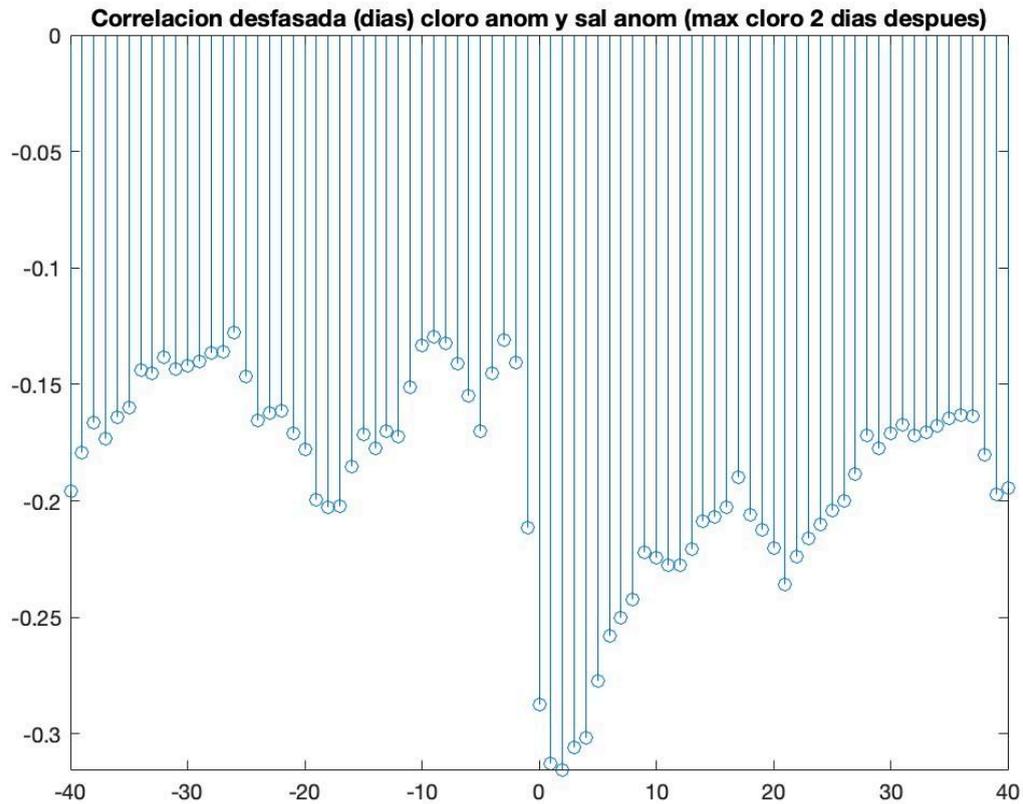


Figura 21. Correlación desfasada en días entre las anomalías de clorofila y salinidad. La correlación máxima negativa es tal que un mínimo de salinidad en Isla de Flores ocurre dos días antes del máximo de clorofila.

A nivel de medias mensuales, las correlaciones entre las variables fueron todas estadísticamente significativas (p -valor $< 0,05$) y se muestran en la tabla 3. Como era esperable de los análisis anteriores, la clorofila está negativamente correlacionada con la salinidad, mientras que lo está positivamente correlacionada con Niño 3.4 y el caudal del Río de la Plata (Tabla 3).

Tabla 3. Coeficiente de correlación de Pearson. Correlaciones entre las variables de clorofila, salinidad, Niño 3.4 y caudal. Los datos son calculados a partir de datos mensuales.

	Clorofila	Salinidad	Niño 3.4	Caudal
Clorofila	X	-0.60	0.54	0.36
Salinidad	X	X	-0.51	-0.57
Niño 3.4	X	X	X	0.58
Caudal	X	X	X	X

A nivel mensual, la correlación entre clorofila y el Niño 3,4 es máxima con el máximo de clorofila ocurriendo 2 mes después del fenómeno del Niño o simultáneamente (Figura 22).

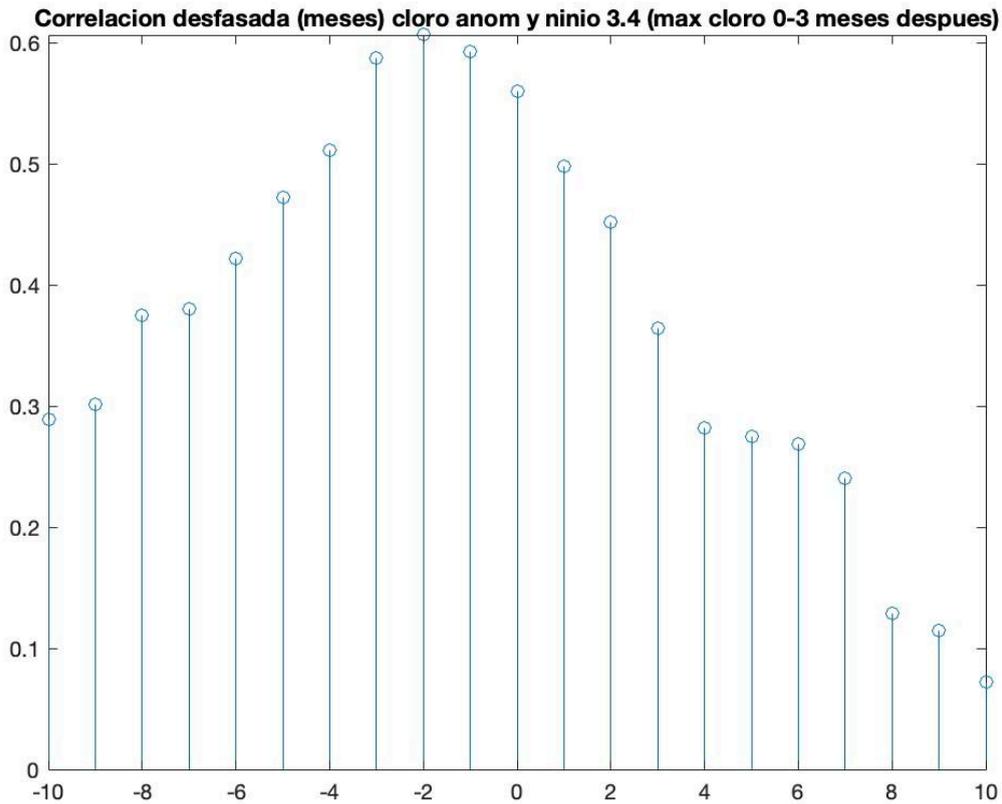


Figura 22. Correlación desfasada entre anomalía de clorofila y Niño 3.4, el máximo de clorofila se registra entre 1 y 3 meses después que la serie del Niño.

4.2.3 Modelo predictivo de salinidad mensual en la plataforma

En esta sección construimos un modelo predictivo sencillo para la clorofila basado en su relación con la descarga del Río de la Plata. La correlación entre salinidad y descarga del río de la plata a nivel mensual es estadísticamente significativa con un valor de $r=-0,54$ ($p<0.05$). La correlación negativa es razonable en base a los resultados anteriormente encontrados, pero es importante resaltar que el valor específico depende fuertemente de los casos de alta descarga (Figura 23). La ecuación de la recta correspondiente es $y=-0,00034726x + 23,584$.

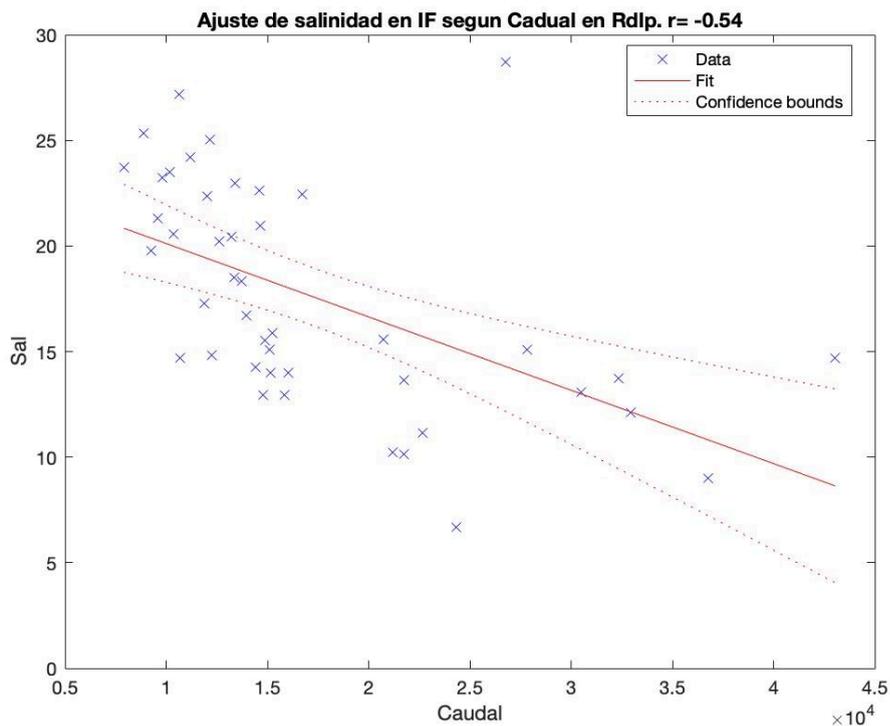


Figura 23. Ajuste de salinidad en Isla de Flores según el caudal del Río de la Plata.

La relación encontrada permite construir un modelo para predecir la salinidad en base a la descarga y, en particular, reconstruir la evolución mensual de la salinidad desde 1980 a la fecha a partir de los datos históricos de caudal. La serie resultante muestra una importante variabilidad mensual y anual, observándose además que la serie reconstruida captura la tendencia observada en los últimos 5 años, pero no la amplitud de la variabilidad mensual (Figura 24).

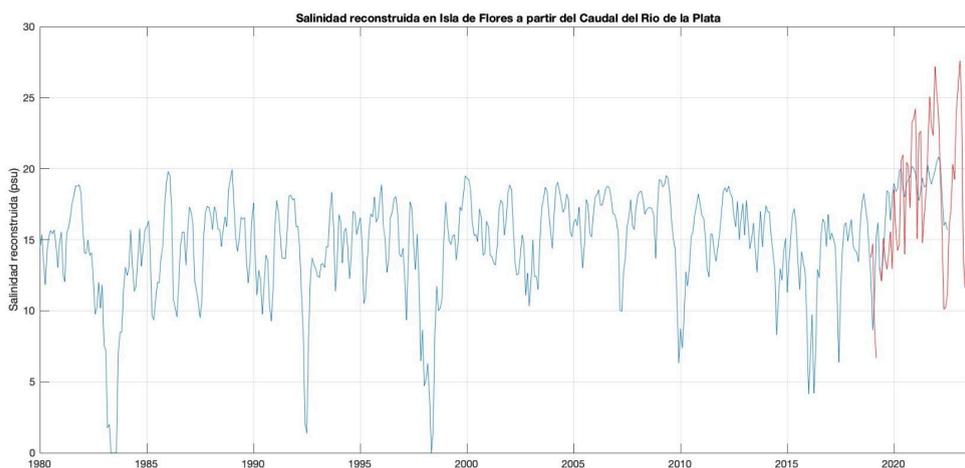


Figura 24. Salinidad reconstruida a partir de los datos del caudal del Río de la Plata (color azul) y se superpone la serie con datos in situ (color rojo).

5. Discusión

En esta tesina se construyó la serie temporal de salinidad y temperatura para la Isla de Flores con datos in situ de muestras horarias de temperatura y conductividad para el periodo de tiempo 2018-2023. Un 25% de los datos fueron descartados ya que los muestreos in situ implican tomar mediciones directas en el área de estudio y se enfrentaron a varios desafíos como por ejemplo, sensores con calibraciones incorrectas, problemas de medición a partir de la manipulación de los mismos, pérdida de sensores debido a tormentas, sensores expuestos al aire, entre otros.

Con los datos obtenidos se caracterizó el ciclo estacional de temperatura, el cual se observa como un ciclo muy definido consecuencia de que en latitudes medias contamos con estaciones bien marcadas donde podemos observar máximos de temperatura en los meses de verano (Dic-Ene-Feb) y mínimos en los meses de invierno (Jun-Jul-Ago). Por otro lado, la salinidad muestra un ciclo estacional menos evidente, y esto se debe a que la salinidad varía mucho en el Río de la Plata tanto en escalas cortas de tiempo como en escalas largas. El frente de turbidez, que está relacionado con la salinidad, varía con la descarga del Río de la Plata y los vientos (Maciel et al., 2021). La descarga del Río de la Plata depende de ENOS y por ende tiene una variabilidad año a año y los vientos tienen una fuerte variación en la escala sinóptica (Moller et al., 2008), lo cual resulta en variabilidad dentro de las estaciones, pero también entre estaciones. Asimismo es importante notar que la serie de datos no es lo suficientemente larga como para poder obtener una climatología suavizada de salinidad y además nos encontramos en un contexto climático inusual, donde ocurrieron 3 eventos Niña seguidos lo cual provocó sequías extremas y puede haber generado un sesgo positivo en la salinidad. Por último, el rango de los sensores que miden la conductividad nunca llega a ser 0 ya que el límite inferior que mide es de 3 mS/cm, no permitiendo así mediciones con salinidad 0.

En el periodograma se pudo observar que la salinidad tiene una frecuencia de variabilidad en varias escalas de tiempo, con picos en 3 semanas, de 30 a 60 días y de 100 días. Por otro lado, la temperatura tiene un pico a los 100 días y en escalas más largas, que debido al tamaño de la serie, no es significativo. También se observa un pico de 6 días en la temperatura que probablemente está asociado a la variación atmosférica en escala sinóptica, que está ausente en la salinidad.

Para estudiar cómo varía la salinidad a escala interanual en el Río de la Plata es importante considerar el contexto climático del área de estudio. El primer año fue Niño, luego ocurrieron tres Niñas consecutivas 2020, 2021 y 2022, y en 2023 se desarrolla otro evento Niño. Al comparar ENOS con las anomalías de temperatura en Isla de Flores no se encontró que las variables tengan un comportamiento acoplado, sino que las anomalías de temperatura se comportan de manera independiente a ENOS. Sin embargo, al comparar ENOS con las anomalías de salinidad se puede ver que las evoluciones tienen un comportamiento inverso, es decir que para los años Niño las anomalías de salinidad fueron negativas mientras que para los años Niña las anomalías de salinidad fueron positivas, esto coincide con otros estudios realizados para comparar las variaciones de salinidad en el Río de la Plata y ENOS.

En cuanto a la relación de la descarga del Río de la Plata y ENOS, se recupera la relación

conocida, es decir que en los años Niño hay una mayor precipitación en la cuenca del Plata y esto se traduce en una mayor descarga del Río de la Plata (Piola 2005). Por otro lado, en los años Niña, hay menor lluvia y por ende menor descarga. Al relacionar estas 3 variables podemos concluir que la salinidad en Isla de Flores varía de forma tal que durante El Niño hay una mayor descarga de agua dulce acompañada de menor salinidad, y viceversa.

Con respecto a la clorofila, se observa un ciclo estacional marcado, donde la menor concentración de clorofila se registra en los meses de verano y el pico de clorofila se encuentra en invierno. Esto se debe a que las precipitaciones sobre la cuenca del Plata provocan una descarga de agua dulce cargada de nutrientes, es decir las lluvias influyen el frente de turbidez del Río de la Plata. A su vez esta descarga modifica la salinidad estratificando la columna de agua donde el agua dulce llena de nutrientes queda en la superficie expuesta a la radiación solar y provoca los blooms de clorofila. El factor luz es importante para que puedan ocurrir estos blooms: en primavera empieza a haber más horas de luz y sumado a los nutrientes ocurren la mayoría de los blooms de clorofila. Martínez y Ortega muestran como la concentración de clorofila depende de la disponibilidad de la luz en el estuario del Río de la Plata. La disponibilidad mejora a partir de la influencia oceánica ya que el agua es menos turbia y permite mayor penetración. Se dice que esta influencia es la que modula el crecimiento de fitoplancton en la zona más baja del RdIP (Martínez y Ortega 2015). Por otro lado, para el verano los nutrientes fueron consumidos más allá de que el pico de luz sea en esta estación.

En este trabajo, se estudió también la relación entre la salinidad y la clorofila, es decir, cómo afectan los cambios de salinidad en la concentración de clorofila en la plataforma continental uruguaya. Se observó que también las anomalías de salinidad y clorofila se comportan de manera inversa, es decir que a mayor salinidad menor clorofila y viceversa. Asimismo, la clorofila y la salinidad tienen una correlación desfasada tal que cuando se obtiene el máximo de salinidad en Isla de Flores, se obtiene un máximo de clorofila 2 días después en la plataforma continental, lo cual se puede interpretar como debido al transporte realizado por la descarga del RdIP. El correlograma no sólo tiene el máximo desfasado 2 días, sino que es asimétrico para desfasajes mayores. En particular, existe otro pico en la correlación cuando la clorofila está retrasada 20 días con respecto a la salinidad que podría deberse a una respuesta biológica del sistema al aumento de nutrientes que trae la descarga. Como hipótesis para estudios futuros se plantea que ese segundo pico de correlación es más significativo para alguna estación del año en particular como la primavera. Según un estudio realizado sobre la correlación de las variables ambientales y la clorofila en el Río de la Plata, se muestra como en escalas espaciales de medias a chicas la variación de la clorofila está relacionada a procesos biofísicos como la salinidad, la disponibilidad de la luz y los nutrientes disponibles. En las estaciones costeras dentro de la plataforma atlántica uruguaya donde se realizó este estudio se observa que hay floraciones de algas causadas por dinoflagelados y diatomeas moduladas por el frente de salinidad (Calliari et al., 2005). Lo relevante de este estudio para este trabajo es que la correlación entre la salinidad y los nutrientes es negativa para los nitratos, fosfatos y silicatos. Es decir que a medida que aumenta la salinidad, aumentan estos nutrientes y favorecen el bloom de clorofila. Se podría explicar el pico de clorofila 20 días después, como respuesta biológica del sistema que utiliza los nutrientes y la disponibilidad de luz para proliferar.

La relación entre el máximo mensual de clorofila y los eventos ENOS tiene un desfase entre -2 y 0 meses, o sea que ocurre dentro de una estación y eso está relacionado con que ENOS persiste y tiende a influenciar durante varios meses consecutivos. Considerando las estaciones de mayor impacto y la literatura disponible, es esperable que ENOS influya en las lluvias de octubre, noviembre y diciembre y la señal llegue a la clorofila en noviembre, diciembre y enero. Es decir mientras se está manifestando El Niño, también está lloviendo y afectando las descargas y a su vez afectando en la clorofila. Por ende, es importante analizarlo por trimestre y no meses por separado. En esos tres meses ocurre el impacto sobre las lluvias y termina impactando en la clorofila. Tiene un cierto desfase en promedio de 1 mes y luego se ve el impacto de la clorofila. La correlación baja mucho más rápido del lado de los meses positivos que el de meses negativos y esto sugiere que el Niño está liderando el comportamiento de la clorofila.

En suma, se puede predecir el comportamiento de la clorofila en la plataforma Atlántica en dos escalas de tiempo diferentes. Una es en una escala de meses debido a eventos ENOS y otra en escala de días y anticipable por los cambios en la salinidad de IF.

Para el futuro es de suma importancia poder comparar los datos in situ con información recopilada a través de satélites y otras mediciones in situ cercanas para poder compensar las limitaciones de cada método. Podría ser que la señal sea porque a mayor descarga la zona donde se analiza la clorofila está más influenciada por turbidez alta. Se deben hacer estudios in situ para comprobar que las mediciones de clorofila sean correctas.

6. Conclusiones

- Se generó una serie temporal de temperatura y salinidad en IF con control de calidad de 5 años.
- La temperatura del agua en Isla de Flores tiene un ciclo estacional muy marcado mientras que la salinidad presenta un ciclo estacional mucho más variable. El máximo estacional de temperatura es de 26,5°C y el mínimo es de 8,8 °C, mientras que el máximo de salinidad es de 33,2 psu y el mínimo de 2,5 psu.
- La salinidad en IF varía en escalas sinópticas de acuerdo al periodograma y en escalas interanuales debido a la descarga del Río de la Plata. Se observa una serie mucho más ruidosa con más variabilidad que la temperatura. La temperatura varía mayoritariamente en escalas largas debido a las estaciones y en escalas cortas del orden de una semana debido a la variación atmosférica.
- ENOS provoca alteraciones en el ciclo normal de lluvias en la cuenca del plata, lo cual provoca anomalías de descarga del Río de la Plata. Esto provoca cambios en la salinidad de las aguas de Isla de Flores y que luego son advectadas a la costa atlántica uruguaya. Estas aguas que provienen del Río de la Plata están acompañadas de muchos nutrientes y, una vez que se encuentran con las aguas oceánicas provoca que la columna de agua se estratifique dejando en la superficie agua dulce y con nutrientes provocando una sobreproducción de clorofila. Se observan dos procesos. Mientras que cuando hay menos descarga, el agua está más mezclada con mayor salinidad y con menos nutrientes por ende no provoca picos de clorofila.
- La salinidad se puede usar para predecir la clorofila con un desfase de 2 días, debido al transporte de aguas con clorofila y de 20 días debido a la respuesta

biológica del sistema por los nutrientes que pueden haber llegado con la descarga, mientras que basado en la ocurrencia de ENOS es posible predecir la clorofila con un desfase de 2 meses.

- La Clorofila en la costa atlántica está correlacionada negativa y significativamente con la salinidad en IF, de modo que las aguas del Río de la Plata fertilizan la costa Atlántica.

6. Bibliografía

Barreiro, M., Arizmendi, F., Díaz, N., & Trinchin, R. (2021). Análisis de la variabilidad y tendencias observadas de los vientos en Uruguay. CONVENIO PNUD-UDELAR Proyecto URU/18/002 “Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay”.

Barreiro, M. (2010). Influence of ENSO and the South Atlantic Ocean on climate predictability over Southeastern South America. *Climate dynamics*, 35, 1493-1508.

Berden, G., Charo, M., Möller Jr, O. O., & Piola, A. R. (2020). Circulation and hydrography in the western South Atlantic shelf and export to the deep adjacent ocean: 30° S to 40° S. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(10), e2020JC016500.

Borowitzka, M. A. (1995). Microalgae as sources of pharmaceuticals and other biologically active compounds. *Journal of applied phycology*, 7, 3-15.

Borús, J., Uriburu Quirno, M., & Calvo, D. (2017). Evaluación de caudales mensuales descargados por los grandes ríos del sistema del plata al estuario del Río de la Plata. *Alerta Hidrológico–Instituto Nacional del Agua y el Ambiente, Ezeiza*.

Borús, J., (2022). Evaluación de Caudales Mensuales Descargados por los Grandes Ríos del Sistema del Plata al Estuario del Río de la Plata. Ezeiza: Alerta Hidrológico-Instituto Nacional del Agua y el Ambiente

Calliari, D., Gómez, M., & Gómez, N. (2005). Biomass and composition of the phytoplankton in the Río de la Plata: large-scale distribution and relationship with environmental variables during a spring cruise. *Continental Shelf Research*, 25(2), 197-210

Dogliotti, A. I. (2007). *Estimación de la biomasa fitoplanctónica mediante el sensoramiento remoto del color del mar y datos de campo en la Plataforma Continental Patagónica* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).

Dogliotti, A. I., Ruddick, K., & Guerrero, R. (2016). Seasonal and inter-annual turbidity variability in the Río de la Plata from 15 years of MODIS: El Niño dilution effect. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 182, 27-39.

Fernández Mantero, P. (2020). Variación interdecadal de la influencia de El Niño sobre la precipitación en Uruguay.

- Fossatia, M., Santoroa, P., Mosqueraa, R., Martíneza, C., Ghiardoa, F., Ezzattib, P., ... & Piedra-Cuevai, I. (2014). Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata. *Ribagua*, 1(1), 48-63.
- Falkowski, P. G., Barber, R. T., & Smetacek, V. (1998). Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *science*, 281(5374), 200-206.
- Gordon, A. L., & Greengrove, C. L. (1986). Geostrophic circulation of the Brazil-Falkland confluence. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 33(5), 573-585.
- Guerrero, R. A. (1998). Oceanografía física del estuario del Río de la Plata y el sistema costero de El Rincón. Noviembre, 1994.
- Guerrero, R. A., Piola, A. R., Molinari, G., Osiroff, A. P., & Jáuregui, S. I. (2010). Climatología de temperatura y salinidad en el Río de la Plata y su Frente Marítimo, Argentina-Uruguay. *Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP): Mar del Plata, Argentina.* Available at <http://www.inidep.edu.ar/publicaciones/publicaciones-especiales/climatologia-de-temperatura-y-salinidad/>[Verified 25 June 2016].
- Jaureguizar, A. J. (2004). Patrón espacial y temporal de las áreas de asociaciones ícticas demersales costeras (34° S-41° S) y su relación con los factores ambientales.
- Lumpkin, R., & Garzoli, S. (2011). Interannual to decadal changes in the western South Atlantic's surface circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C1).
- Machado, I., Barreiro, M., & Calliari, D. (2013). Variability of chlorophyll-a in the Southwestern Atlantic from satellite images: Seasonal cycle and ENSO influences. *Continental Shelf Research*, 53, 102-109.
- Maciel, F. P., Santoro, P. E., & Pedocchi, F. (2021). Spatio-temporal dynamics of the Río de la Plata turbidity front; combining remote sensing with in-situ measurements and numerical modeling. *Continental Shelf Research*, 213, 104301.
- Manta, G., Barreiro, M., & Renom, M. (2021). CLIMATOLOGÍA DE LA BRISA MARINA EN URUGUAY. *Meteorologica*, 46(1)
- Martínez, A., & Ortega, L. (2015). Delimitation of domains in the external Río de la Plata estuary, involving phytoplanktonic and hydrographic variables. *Brazilian Journal of Oceanography*, 63, 217-227.
- Matano, R. P., Schlax, M. G., & Chelton, D. B. (1993). Seasonal variability in the southwestern Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(C10), 18027-18035
- Moreira, D., & Simionato, C. (2019). The Río de la Plata estuary hydrology and circulation. *Meteorologica*, 44(1), 1-30.

Möller Jr, O. O., Piola, A. R., Freitas, A. C., & Campos, E. J. (2008). The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. *Continental shelf research*, 28(13), 1607-1624.

Nagy, G. J., J. López-Laborde, and L. Anastasia. "Caracterización de ambientes en el Río de la Plata Exterior (salinidad y turbiedad óptica)." *Investigaciones Oceanológicas*1 (1987): 31-56.

Norbis, W. (1995). Influence of wind, behaviour and characteristics of the croaker (*Micropogonias furnieri*) artisanal fishery in the Río de la Plata (Uruguay). *Fisheries Research*, 22(1-2), 43-58.

Peterson, R. G., & Stramma, L. (1991). Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in oceanography*, 26(1), 1-73.

Piola, A. R., Campos, E. J., Möller Jr, O. O., Charo, M., & Martinez, C. (2000). Subtropical shelf front off eastern South America. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C3), 6565-6578.

Piola, A. R., Matano, R. P., Palma, E. D., Möller Jr, O. O., & Campos, E. J. (2005). The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, 32(1).

Pirez, M., Gabito, L., Alcántara, I., Yannicelli, B., Kruk, C., Martínez, A., ... & Fabiano, G. (2019). Floración excepcional de cianobacterias tóxicas en la costa de Uruguay, verano 2019. *Innotec*, (18), 36-68.

Pisciottano, G., Díaz, A., Cazess, G., & Mechoso, C. R. (1994). El niño-southern oscillation impact on rainfall in Uruguay. *Journal of Climate*, 7(8), 1286-1302.

Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly weather review*, 115(8), 1606-1626.

Rosales, N., Ortega, J., Mora, R., & Morales, E. (2005). Influencia de la salinidad sobre crecimiento y composición bioquímica de la cianobacteria *Synechococcus* sp. *Ciencias marinas*, 31(2), 349-355.

Severov, D. N., Pshennikov, V., & Remeslo, A. V. (2012). Fronts and thermohaline structure of the Brazil–Malvinas Confluence System. *Advances in space research*, 49(9), 1373-1387.

Sverdrup, H. U., Johnson, M. W., & Fleming, R. H. (1942). *The Oceans: Their physics, chemistry, and general biology* (Vol. 1087, No. 8). New York: Prentice-Hall.

Trenberth, K. E., & Stepaniak, D. P. (2001). Indices of el Niño evolution. *Journal of climate*, 14(8), 1697-1701.

Trinchin, R., Manta, G., Santana, R., Rubio, L., Horta, S., Passadore, C., ... & Barreiro, M. (2021). Hacia un monitoreo continuo de variables oceanográficas en el Parque Nacional Isla de Flores, Uruguay. *Innotec*, (21).

Vásquez, O., Pineda, S., Quiroga, E., Jara, B., & Montiel, A. (2012). Relación entre Clorofila-A y las variables oceanográficas en el área preglaciar del Seno Gallegos (Cordillera Darwin, Chile): bajo condiciones invernales. In *Anales del Instituto de la Patagonia* (Vol. 40, No. 1, pp. 139-151). Universidad de Magallanes.

7. Anexo

Diseño de soporte

