

# Relación entre frentes de convergencia y localización de la flota pesquera durante la ocurrencia de surgencia costera en Uruguay

Relationship between convergence fronts and location of the coastal fleet during the occurrence of coastal upwelling in Uruguay

Relação entre frentes de convergência e localização da frota costeira durante a ocorrência de ressurgência costeira no Uruguai

 CAMILA DE MELLO (1)

 MARCELO BARREIRO (1)

 YAMANDÚ MARIN (2)

 LEONARDO ORTEGA (2)

 ROMINA TRINCHIN (1)

 GASTON MANTA (1)

(1) Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

(2) Dirección Nacional de Recursos Acuáticos, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 8/8/2022 → APROBADO: 1/10/2022 ✉ [camidemello@gmail.com](mailto:camidemello@gmail.com)

## RESUMEN

La costa uruguaya presenta eventos de surgencia durante el verano. Sus implicancias en la distribución, el transporte de nutrientes y organismos, y los efectos sobre la trama trófica no han sido previamente analizados. Este trabajo explora la relación entre los eventos de surgencia y la localización de la flota industrial costera uruguaya (Categoría B). Se realizó una aproximación lagrangiana analizando un evento particular de surgencia. A partir de campos de velocidad de corrientes superficiales se calcularon los Exponentes de Lyapunov de Tamaño Finito (ELTF). Los promedios temporales de estos exponentes, que indican la intensidad de mezcla, presentaron mayores valores sobre la región de surgencia más intensa. Los valores máximos de ELTF identifican frentes de convergencia. Así, en este trabajo se identificaron el frente de turbidez, cercano a Montevideo, y frentes de temperatura asociados a la surgencia. Durante el evento, los frentes migraron desde la costa hacia el suroeste y mar adentro. Su localización fue comparada con la posición satelital (VMS) de la flota Categoría B. En general los buques se posicionaron sobre las

zonas frontales, sugiriendo una relación entre los procesos de retención y la localización de especies objetivo que evidencia la necesidad de profundizar en el estudio de estos procesos.

**Palabras clave:** modelo numérico CROCO, esfuerzo de pesca, exponentes de Lyapunov.

## ABSTRACT

The Uruguayan coast presents upwelling events during the summer, its implications on the distribution, transport of nutrients and organisms; and their effects on the entire food web, have not been previously analyzed. This work seeks to understand the relationship between the upwelling events and the location of the Uruguayan coastal industrial fleet (B Category). Finite Size Lyapunov Exponents (FSLE) were computed from surface current velocity fields. The temporal averages of these exponents indicate the mixing intensity and presented higher values over the region of more intense upwelling. On the other hand, the maximum FSLE values identify convergence fronts. The fronts identified by this methodology correspond to the turbidity front and close to Montevideo, and temperature fronts directly associated with the upwelling event. During the event, these fronts migrated from the coast, to the southwest and offshore. The location of the frontal regions detected was compared with the satellite position (VMS) of B Category coastal vessels of the Uruguayan fishing fleet. In general, the vessels were positioned on the frontal zones, suggesting a relationship between retention processes and the location of target species; and evidencing the need to deepen the study of these processes.

**Keywords:** CROCO model, fishing effort, Lyapunov exponents.

## RESUMO

A costa uruguaia apresenta eventos de ressurgência durante o verão. Suas implicações na distribuição, transporte de nutrientes e organismos; e efeitos na teia alimentar não foram previamente analisados. Este trabalho busca compreender a relação entre eventos de ressurgência e a localização da frota industrial costeira uruguaia (Categoria B). Uma aproximação lagrangiana foi feita analisando um evento particular de ressurgência. Os expoentes de Lyapunov de tamanho finito (ELTF) foram calculados a partir de campos de velocidade de corrente de superfície. As médias temporais desses expoentes indicam a intensidade da mistura e apresentaram valores mais elevados ao longo da região de ressurgência mais intensa. Os valores máximos de ELTF identificam frentes de convergência. Assim, neste trabalho foram identificadas a frente de turbidez, próximo a Montevideu, e as frentes de temperatura associadas à ressurgência. Durante o evento, as frentes migraram do litoral, para o sudoeste e offshore. A sua localização foi comparada com a posição do satélite (VMS) da frota da Categoria B. Em geral, as embarcações foram posicionadas nas zonas frontais, sugerindo uma relação entre os processos de retenção e a localização das espécies alvo; e evidenciando a necessidade de aprofundar o estudo desses processos.

**Palavras-chave:** modelo CROCO, esforço de pesca, expoentes de Lyapunov.

## INTRODUCCIÓN

La zona costera y estuarina uruguaya se caracteriza por una elevada productividad y variabilidad espaciotemporal (Guerrero y Piola, 1997; Acha, et al., 2008; Ortega y Martínez, 2007; Martínez y Ortega, 2015). La región costera, principalmente en los departamentos de Montevideo, Canelones y Maldonado, concentra la mayor parte de la población y la actividad económica del país. Montevideo cuenta con el mayor puerto de intercambio comercial marítimo de Uruguay y la zona circundante es muy activa para la pesca tanto industrial como artesanal. En este sentido, la flota artesanal (aproximadamente 190 embarcaciones < 10 Toneladas de Registro Bruto, T.R.B.) opera en una franja de 7 millas náuticas, capturando corvina (*Micropogonias furnieri*) y otras especies costeras. La flota industrial costera (33 embarcaciones > 10 TRB) opera a distancias mayores en el Río de la Plata con la misma especie objetivo que la flota artesanal y conforma una categoría denominada Categoría B (Uruguay, 1997).

Las unidades agrupadas en la Categoría B comparten la modalidad de pesca y el área de operación, además de la especie objetivo. En este sentido, el área de operación de los buques de esta categoría abarca el Río de la Plata y parte del frente oceánico. La mayor parte se realiza en profundidades < 50 m, en el Río de la Plata y el sector Atlántico de la zona económica exclusiva uruguaya. Los buques uruguayos no operan dentro de la franja de jurisdicción exclusiva de Argentina (Uruguay, 1974), y se han definido áreas de exclusión en base a criterios de ordenación pesquera que limitan la operación al oeste de Montevideo y a lo largo de la costa uruguaya en una franja de 7 y 5 millas náuticas (Uruguay, 2018). Existen estudios en Uruguay que vinculan las condiciones físicas del ambiente con la actividad pesquera artesanal (Norbis, 1995; Horta y Defeo, 2012; Jaureguizar, et al., 2015); sin embargo, no existe ninguno que relacione las condiciones físicas del ambiente con la actividad pesquera industrial.

Desde el punto de vista hidrológico, el área costera y marina uruguaya es parte de un complejo sistema que comprende la zona frontal del estuario del Río de la Plata (RdP) y el Océano Atlántico. El RdP se localiza en los 35° S y drena hacia el Océano Atlántico, tiene aproximadamente 280 km de largo y su ancho aumenta desde unos 20 km en su porción superior hasta unos 220 km en su límite exterior. Presenta una descarga media de 23.000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y drena la segunda mayor cuenca de Sudamérica (Guerrero, et al., 1997; Nagy, et al., 2002; Guerrero, et al., 2010). La descarga del estuario presenta variabilidad a distintas escalas de tiempo. A nivel estacional presenta un mínimo durante el verano y valores máximos en general sobre otoño-invierno (Guerrero, et al., 1997; Nagy et al., 2002; Piola, et al., 2005; Guerrero, et al., 2010). Adicionalmente presenta gran variabilidad interanual, asociada particularmente con el fenómeno de El Niño-Oscilación Sur, de forma tal que episodios cálidos inducen una mayor precipitación sobre la cuenca del RdP respectivamente, determinando así mayores descargas. Episodios fríos del fenómeno inducen una menor precipitación sobre la cuenca del RdP, determinando menores descargas (Pisciottano, et al., 1994; Barreiro, 2010).

Por su parte, los patrones de viento observados en esta región presentan variabilidad estacional, siendo predominantemente del sector S-SO durante el invierno y del sector N-NE durante el verano (Simionato, et al., 2005). En la región, los vientos presentan también variabilidad diaria asociada al pasaje de sistemas sinópticos, modificando

la posición de la pluma de descarga del RdP y del frente de salinidad (generado en el encuentro de agua del RdP con aguas oceánicas). La dinámica de la zona en relación con el frente salino, junto con el aporte de nutrientes de origen continental, genera una actividad biológica relevante que se traduce en una elevada productividad primaria y zona de cría de juveniles de especies costeras (Gómez-Erache, et al., 2001; Mesones, et al., 2001; Norbis, et al., 2006).

Asociados a vientos del sector N y NE ocurren procesos de surgencia a lo largo de la costa uruguaya, cuyo mecanismo básico es el siguiente: debido a la orientación de la costa, los vientos del sector N y NE inducen un transporte de Ekman hacia mar adentro en la superficie, un transporte hacia la costa en el fondo y una surgencia a lo largo de la costa (Austin y Lentz, 2002). Estos eventos han sido reportados como frecuentes y persistentes, así como estacionalmente variables en estructura espacial, duración e intensidad, reportándose más frecuentemente durante el verano (Simionato, et al., 2010, Meccia, et al., 2013; Moira, et al., 2013; Trinchin, et al., 2019, de Mello, et al., 2022). La estructura espaciotemporal de estos eventos ha sido descrita en detalle recientemente a partir de aproximaciones satelitales y numéricas (Trinchin, et al, 2019; de Mello, et al., 2022).

Adicionalmente a los vientos y a la descarga de agua continental como factores determinantes, la batimetría del fondo también podría jugar un rol sobre el desarrollo de surgencias costeras (Pimenta, et al., 2008). Finalmente, otros posibles forzantes no son de importancia significativa a escala sinóptica y en la generación de procesos de surgencia. En particular, las mareas en la región presentan amplitudes menores a 1 m (Framiñan, et al., 1999; D'Onofrio, et al., 1999; Simionato, et al., 2004).

El estudio de los procesos de transporte y dispersión de aguas costeras relacionadas a los procesos de surgencia es de interés debido a la importancia ecológica y económica de estas regiones. En este sentido, la generación de frentes de convergencia de aguas de distintas características termohalinas relacionadas a los procesos de surgencia podría favorecer o inhibir *blooms* fitoplanctónicos, transporte de organismos y su acumulación en determinadas regiones, con consecuencias sobre toda la trama trófica (Largier, 2020); en particular, sobre las asociaciones pesqueras.

Las trayectorias que siguen las parcelas de agua han sido estudiadas mediante aproximaciones lagrangianas en varias regiones (Özgökmen, et al., 2000; Molcard, et al., 2006; Galan, et al., 2012; Berta, et al., 2014). Los descriptores Lagrangianos Exponentes de Lyapunov de Tamaño Finito (ELTF) proveen la existencia de patrones que resultan un *proxy* para el movimiento del flujo. Estos exponentes se calculan integrando las trayectorias de parcelas de agua y permiten identificar las estructuras dinámicas que organizan el transporte en un campo de velocidades (Hernández-Carrasco, et al., 2011). Los ELTF están especialmente diseñados para estudiar las propiedades de estiramiento y contracción en fluidos geofísicos y han demostrado ser adecuados para estudiar los procesos de transporte horizontal (d'Ovidio, et al., 2004). Adicionalmente, los promedios espaciales de los ELTF pueden definir una medida de la mezcla horizontal en un área determinada, de forma tal que a mayores promedios mayor es la actividad de mezcla. Además, sirven para caracterizar el transporte de estructuras en la superficie marina, así como su posición se ha correlacionado con trazadores tales como temperatura, clorofila y otras variables biológicas (d'Ovidio, et al., 2004; d'Ovidio, et al., 2009; Rossi, et al., 2008; Prants, et al., 2014; Cotté, et al., 2015). Los valores máximos de ELTF identifican las

Estructuras Coherentes Lagrangianas (ECL). Estas líneas caracterizan el flujo y modulan los movimientos del fluido actuando como barreras de transporte (Joseph y Legras, 2002; Koh y Legras, 2002), constituyendo así una herramienta poderosa para la predicción de frentes generados por advección pasiva (d'Ovidio, et al., 2004, 2009; Lehahn, et al., 2007; Rossi, et al., 2008).

A pesar de la importancia en la descripción de los procesos físicos y biológicos asociados a las surgencias costeras, este tipo de aproximaciones es aún muy incipiente. Así, este trabajo busca contribuir a comprender desde una aproximación lagrangiana la relación entre los eventos de surgencia y la localización de la pesquería industrial costera (Categoría B) en el área costera uruguaya, mediante el análisis de los campos de ELTF durante un evento particular de surgencia ocurrido en febrero de 2008.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Modelo numérico e identificación de eventos de surgencia intensa sobre la costa uruguaya

Para el presente estudio se utilizaron salidas diarias del modelo numérico Coastal and Regional Ocean Community Model (CROCO) (Debreu, et al., 2012), que se encuentra diseñado para simular tanto los procesos mar adentro como la dinámica costera en dominios regionales (Shchepetkin y McWilliams, 2005; Debreu, et al., 2012). El CROCO es un modelo oceánico de coordenadas verticales  $\sigma$  (que siguen la topografía del terreno). La configuración utilizada para este análisis presentó una resolución horizontal de  $1/36^\circ$  (aproximadamente 2.5 km en la región de interés) y 40 niveles  $\sigma$  en la vertical. Se seleccionaron los parámetros:  $\sigma_s = 6$  (parámetro que determina el estiramiento en superficie de la coordenada vertical  $\sigma$ ),  $\sigma_b = 0$  (parámetro que determina el estiramiento en el fondo de la coordenada vertical  $\sigma$ ) y  $h_c = 2$  m (parámetro que representa aproximadamente la profundidad de transición entre los niveles de la superficie y los niveles del fondo). Estos parámetros resultan en una mayor resolución vertical para los niveles cercanos a la superficie.

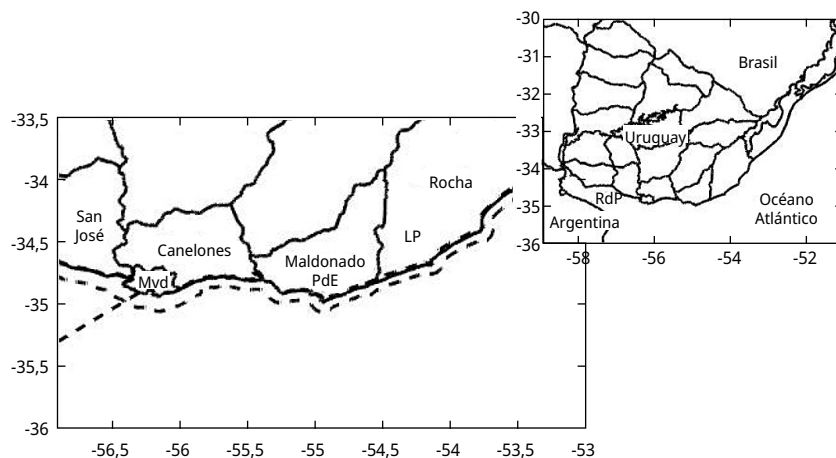
La batimetría utilizada en las configuraciones del modelo analizadas proviene de 1 min Gridded Global Relief Data (ETOPO1) (Amante y Eakins, 2009), interpolada a la grilla del modelo y modificada para reducir los gradientes horizontales de presión. Un factor de suavizado de  $r = 0.1$  ( $r = \text{gradiente}(h/h)$ ) fue aplicado a la topografía de manera de prevenir errores de los gradientes horizontales de presión asociado con las coordenadas sigma (Haney, 1991). El dominio considerado para las simulaciones contiene el área definida por  $31^\circ$  S -  $36^\circ$  S y  $50^\circ$  O -  $59^\circ$  O, la cual incluye la costa uruguaya. Tiene fronteras abiertas en los lados Este, Oeste y Sur. Todas las condiciones oceánicas laterales fueron obtenidas del reanálisis GLORYS (Lellouche, et al., 2018), que tiene  $1/12^\circ$  de resolución horizontal, para el período 2003-2012.

La descarga interanual diaria del Río de la Plata fue cedida por el Instituto Nacional del Agua de Argentina, e introducida en el modelo en 2 puntos de descarga en el RdP sobre la región de la confluencia de los ríos Paraná y Uruguay. Como forzantes de superficie del modelo se utilizaron vientos diarios provenientes del reanálisis NCEP-DOE 2 (Kanamitsu,

et al., 2002), así como flujos mensuales de calor y agua dulce (precipitación menos evaporación) derivados del Ocean Atmosphere Data Set, COADS (Da Silva, et al., 1994).

Previo a la simulación interanual se realizó una simulación climatológica de 5 años como *spin up*, de manera de alcanzar un estado estable de todas las variables, donde el modelo fue forzado con flujos medios mensuales de los forzantes superficiales y con condiciones laterales medias mensuales provenientes del World Ocean Atlas 2009 (WOA, 2009) (Levitus, et al., 2010). Las condiciones iniciales fueron obtenidas del WOA 2009 para el mes de enero. Durante la simulación de *spin up*, el modelo también fue forzado con descargas constantes del RdP con un volumen total de  $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  ubicadas en la misma posición que en las simulaciones interanuales. Adicionalmente, el modelo fue forzado con mareas provenientes del modelo global de mareas TPX07.

Luego de 5 años de simulación climatológica de *spin up*, una vez alcanzado un estado estable se realizó una simulación interanual desde el 1 de enero de 2003 hasta el 31 de diciembre de 2012. Esta configuración del modelo ha demostrado reproducir adecuadamente las condiciones oceanográficas medias y su variabilidad durante el verano (de Mello, et al., 2022). Para realizar el análisis se utilizaron los campos diarios de velocidad horizontal y vertical promedio e instantáneos, así como los campos de temperatura y salinidad.



**FIGURA 1.** Área de estudio considerada para el cómputo de los exponentes de Lyapunovs a partir de velocidades numéricamente simuladas y su relación con la distribución de la flota pesquera. Mvd = Montevideo, PdE = Punta del Este y LP = La Paloma. Las líneas punteadas representan los límites de las áreas de veda pesquera.

Las fechas de surgencia intensa durante el verano se identificaron mediante el análisis de las Temperaturas de Superficie del Mar (TSM), simuladas siguiendo el análisis realizado por de Mello y otros (2022). En dicho trabajo se realizó un Análisis de Máxima Covarianza (Wallace, et al., 1992) entre las anomalías de TSM (aTSM) y la componente zonal de anomalías de vientos (obtenidos de NCEP-DOE Reanalysis 2, Kanamitsu, et al., 2002). Se consideraron los días de surgencia intensa a aquellas fechas en las que la serie de tiempo de las aTSM simulada fue negativa y mayor a +1 desvío estándar. Se identificaron así 15

eventos de surgencia intensa adecuadamente representados por el modelo. Se seleccionó el evento del 20 al 28 febrero de 2008 para realizar la aproximación lagrangiana y comparar los resultados con la posición disponible de la flota pesquera costera.

## Aproximación lagrangiana

En este trabajo el análisis lagrangiano ha sido realizado por medio del cálculo de los ELTF (Aurell, et al., 1997). La técnica fue aplicada para cuantificar los procesos de mezcla y transporte horizontal. Esta técnica implica calcular el tiempo ( $\tau$ ) en que dos parcelas de fluido inicialmente separadas a una distancia  $\delta_i$  alcanzan una separación final  $\delta_f$ , siguiendo sus trayectorias en un campo de velocidades 2D. En la posición  $x$  y tiempo  $t$ , el ELTF se calcula como:

$$\lambda(x, t, \delta_0, \delta_f) = \frac{1}{\tau} \log \frac{\delta_f}{\delta_0}$$

Se seleccionan así los puntos iniciales  $x$  sobre los nodos de una grilla cuya separación coincide con la separación inicial de las partículas  $\delta_0$ . Así los valores  $\lambda$  se obtienen en una grilla con separación  $\delta_0$ . La escala del proceso de interés determina el valor de los parámetros a seleccionar (d'Ovidio, et al., 2004; Hernández-Carrasco, et al., 2011). La integración temporal de la trayectoria de las partículas puede ser realizada hacia adelante o hacia atrás en el tiempo. Cuando se realiza hacia atrás en el tiempo, los valores máximos de los ELTF indican las áreas de máxima convergencia, identificando barreras en el transporte para las trayectorias de las partículas.

En este trabajo se calcularon los ELTF diarios utilizando el campo de velocidad superficial obtenido del modelo numérico CROCO (Debreu, et al., 2012), durante el evento de surgencia intensa ocurrido del 20 al 28 de febrero de 2008. Para el cálculo solamente se consideraron las velocidades horizontales superficiales del modelo.

La aplicación del algoritmo para el cálculo de los ELTF requiere definir los parámetros que determinan las separaciones iniciales y finales entre las parcelas. La distancia inicial afecta la visibilidad de los detalles, mientras que las estructuras detectadas dependen de la separación final: si  $\delta_f$  se selecciona mayor a la distancia de separación que pueden alcanzar las parcelas advectadas dentro del dominio durante el tiempo de integración seleccionado, no se van a detectar estructuras. En este estudio se trabajó con un valor de  $\delta_i = 0.01^\circ$  y de  $\delta_f = 0.3^\circ$ , que presentan un adecuado compromiso entre las estructuras a detectar y la resolución de los datos de velocidad (de Mello, et al., 2022, en prensa).

Los exponentes se calcularon liberando un ensamble de partículas sintéticas sobre la grilla definida para el cómputo de los ELTF y siguiendo su evolución. En cada nodo de la grilla se inicializaron 5 partículas, una en el centro del nodo y las otras 4 a una distancia  $\delta_i$ . Se retuvieron las parejas de más rápida divergencia (Boffetta, et al., 2001). Se realizó una integración numérica aplicando un esquema standard Runge-Kuta de cuarto orden con un tiempo de integración de 6 horas, siguiendo las parcelas durante 7 días (comparable con la duración de los eventos de surgencia intensos). Así, si  $\tau$  fuera mayor a 7 días,  $\lambda = 0$ . La interpolación espaciotemporal de los datos de velocidad se logró mediante interpolación bilineal. Finalmente, la integración temporal fue realizada hacia atrás en el tiempo de manera de identificar las regiones de máxima compresión, es decir,

frentes de convergencia (Haller y Yuan, 2000; d'Ovidio, et al., 2004; Hernández-Carrasco, et al., 2011). Estos frentes son las regiones donde se encuentran aguas con características termohalinas contrastantes.

## Posición de buques Categoría B durante operaciones pesqueras VMS

Los datos de posición de la flota pesquera dirigida a recursos costeros fueron cedidos por el Laboratorio de Tecnología Pesquera (LTP), de la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos (DINARA). La información proporcionada para este trabajo comprende las emisiones de monitoreo satelital de VMS diarias de los buques Categoría B, sin identificar, durante las operaciones de pesca entre los días 20 y 28 de febrero de 2008. Es decir, aquellas emisiones registradas cuando los buques presentaron velocidades en el rango de 3 a 4,6 nudos, en el cual queda comprendida la mayor parte de las operaciones de pesca con red de arrastre de fondo. Esta información fue comparada con la localización de los frentes de convergencia (máximos de ELTF) detectados mediante la aproximación lagrangiana.

## Información satelital

Se obtuvieron datos de TSM de un producto de imágenes satelitales provenientes de Group of High Resolution Sea Surface Temperature (MUR-GHRRST) (Chin, et al., 2017) durante las fechas de surgencia. Este producto consiste en datos satelitales diarios de 1 km de resolución horizontal. La información fue comparada con la distribución de SST del modelo numérico utilizado durante las fechas en que ocurrió la surgencia analizada.

Adicionalmente, se analizó la información de imágenes satelitales (obtenidas del satélite MODIS-AQUA) de color del agua para las fechas de la surgencia analizada de manera de inferir, a partir de imágenes, la posición de zonas frontales y compararlas cualitativamente con el resto de la información analizada.

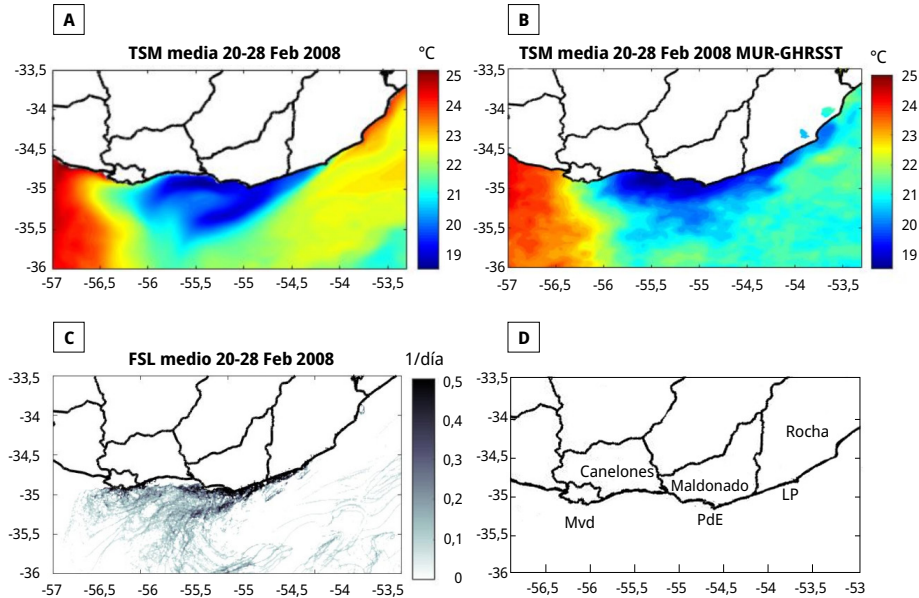
## RESULTADOS

El evento simulado por CROCO y analizado en este trabajo (20 al 28 de febrero de 2008) también fue observado por las imágenes de MUR-GHRSST. La región donde ocurrió la surgencia abarcó el área costera comprendida por las costas de Rocha hacia el Oeste, alcanzando Montevideo. En promedio, los menores valores de TSM se encontraron frente al límite de las costas de Canelones y Maldonado. Si bien el modelo simula las principales características del evento, se observaron diferencias con los datos observados principalmente hacia el Este de la Paloma, encontrándose en promedio un mayor gradiente de TSM en los datos simulados. Estas diferencias pueden deberse a diferencias en la simulación de corrientes costeras que influirían en los patrones de temperatura.

Durante el evento analizado de acuerdo con las velocidades simuladas, los mayores niveles de mezcla horizontal se observaron en las regiones costeras de Maldonado y Rocha. Se constató un patrón en el que elevados niveles de mezcla horizontal se

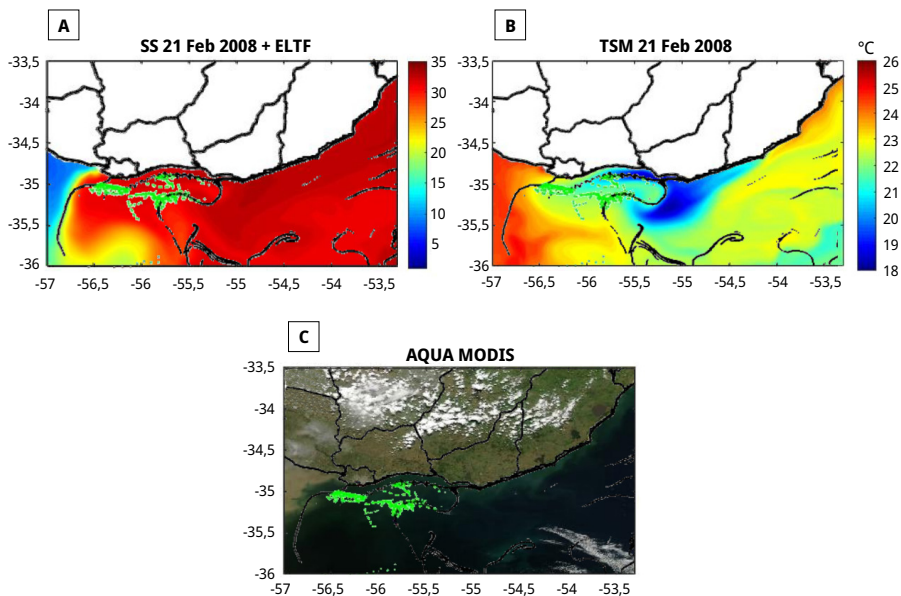


extendieron desde la costa oceánica hacia mar adentro. Este patrón coincidió con el patrón simulado de TSM. También fueron observados elevados niveles de mezcla horizontal sobre a la costa de Montevideo (Figura 2).



**FIGURA 2.** Promedio de temperatura de superficie del mar (TSM) simulada (A) y observada (B) durante el evento de surgencia analizado. C- Promedio de los Exponentes de Lyapunov de Tamaño Finito (ELTF) calculados durante el evento de surgencia analizado. D- Área de estudio: Mvd = Montevideo, PdE = Punta del Este, LP = La Paloma.

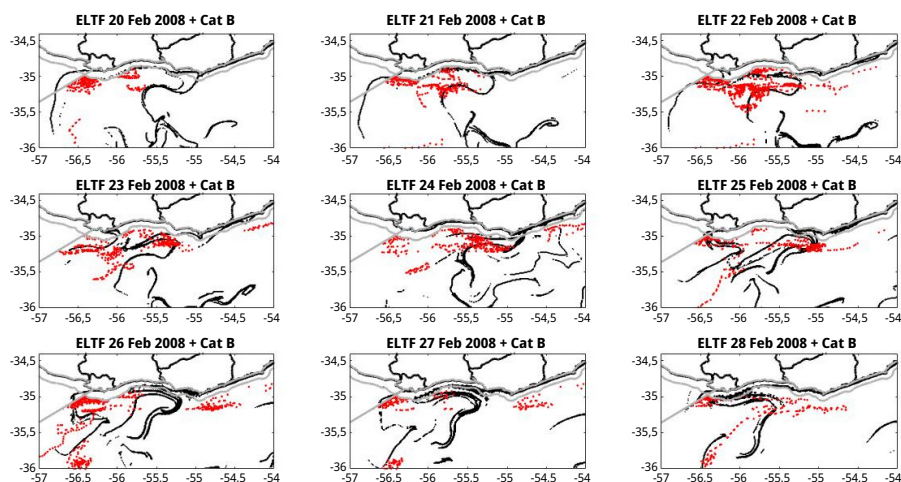
Los valores máximos de los Exponentes de Lyapunov representan los frentes de convergencia. En este análisis se encontraron 2 tipos de frentes: I) los frentes de surgencia (debidos al encuentro de aguas frías y más profundas que llegan a superficie durante la surgencia con aguas más cálidas de superficie); II) el frente halino al Oeste del área de estudio, correspondiente a la descarga del Río de la Plata y su encuentro con aguas oceánicas (que coincidió sobre la región más costera con la posición del frente de turbidez, de acuerdo con las imágenes de color del océano, Figura 3). En este sentido, cabe mencionar que durante el evento de surgencia analizado las condiciones atmosféricas presentaron una cobertura nubosa en la región de estudio que impidió ver las características de color del agua, a excepción del día 21 de febrero. De esta manera se resalta la ventaja del uso de aproximaciones lagrangianas en la detección de la posición del frente de turbidez frente a las aproximaciones satelitales que requieren la ausencia de nubosidad para su aplicación.



**FIGURA 3.** Salinidad y temperatura superficial (SS y TSM, A y B) e imagen de color True Color de Modis Aqua (C) para el día 21 de febrero de 2008. Superpuestas se encuentran las líneas de máximo de ELTF (calculados iniciando las trayectorias de las partículas hacia atrás en el tiempo el 21 de febrero) y las posiciones de buques categoría B registradas por VMS para esa fecha.

Al analizar la evolución de la surgencia se observaron frentes de convergencia que fueron cambiando su posición, desplazándose hacia el Oeste y hacia el Sur, juntándose con otros, y que eventualmente salieron del área de estudio hacia mar adentro o desaparecieron. Estos frentes representan barreras físicas al transporte de partículas. En cuanto a la ubicación de la flota pesquera, se encontró limitada hacia la costa y al Oeste por las áreas de veda (líneas grises de la Figura 4). Las emisiones de VMS tendieron a concentrarse sobre el Oeste, sobre el frente de convergencia halino donde se vieron limitadas por la zona de veda en la región más costera y sobre el Este, asociadas a los frentes de convergencias derivados de las surgencias (Figura 4).

Si bien la posición de la flota resultó concordante con la posición de los frentes de convergencia computados a partir de las velocidades simuladas, no fue exacta. En este sentido, algunas de las diferencias entre las posiciones de la flota y los frentes de convergencia podrían deberse a que las corrientes simuladas por el modelo presentan algunas diferencias con las corrientes reales existentes sobre la costa. En este sentido, ajustes en los parámetros del modelo, una mayor resolución, así como la adición de variabilidad interanual en los flujos de calor, podrían ayudar a simular de manera más precisa los procesos costeros.



**FIGURA 4.** Evolución de los máximos de ELTF (líneas negras, las fechas indican el inicio de las trayectorias hacia atrás en el tiempo) durante el evento de surgencia de febrero de 2008. Se muestran las emisiones satelitales (VMS) de la flota pesquera Categoría B durante las actividades de pesca. Las líneas grises representan las zonas de veda pesquera.

## DISCUSIÓN

Es reconocido que las regiones de grandes surgencias costeras son las zonas biológicamente más productivas del planeta, contribuyendo con hasta el 20 % de las capturas pesqueras (Pauly y Christensen, 1995). Los procesos explicativos del aumento de la productividad pesquera en las grandes zonas de surgencia se basan en el aumento de la productividad primaria relacionada al aporte de nutrientes de aguas frías y profundas que alcanzan la zona eufótica con la surgencia, con consecuencias en el resto de la trama trófica.

Asociadas a las grandes surgencias costeras se desarrollan frentes, áreas de retención y *eddies* que interactúan con la distribución espacial de los organismos planctónicos. Estos procesos de turbulencia modulan la estructura y biomasa de los ecosistemas ya que pueden estimular la productividad primaria, afectar la composición del plancton y de toda la trama trófica, y juegan un importante rol de intercambio entre las áreas costeras y el océano mediante el transporte de material orgánico de la costa hacia mar adentro (Oschlies y Garçon, 1998; Mackas, et al., 2005).

En nuestra costa, asociados a la predominancia de vientos con componente N, se dan procesos de surgencia climatológica durante el verano sobre la región oceánica entre Punta del Este y La Paloma (de Mello, et al., 2022). Adicionalmente, durante el verano ocurren eventos particularmente intensos de surgencias sobre la costa estuarina entre Montevideo y Punta del Este asociados a vientos anómalos desde el sector Este, lo que es más frecuente durante La Niña (Trinchin, et al., 2019; de Mello, et al., 2022). Ni el efecto de las surgencias en el aporte de nutrientes a las aguas superficiales en la productividad primaria (las cuales presentan de por sí un alto contenido de nutrientes debido al aporte del Río de la Plata), ni alguna otra implicancia ecológica de las surgencias costeras en Uruguay han sido previamente estudiadas.

En ese sentido, este trabajo representa una primera aproximación al estudio de las implicancias ecológicas de las surgencias mediante el análisis cualitativo de la relación entre los frentes derivados de las surgencias y la ubicación de los recursos pesqueros en la costa uruguaya, utilizando como *proxy* de la localización de los recursos las posiciones de la flota durante las actividades de pesca. La flota se encontró en posiciones concordantes con los frentes de convergencia, tanto con los relacionados a la surgencia como con el frente relacionado a las descargas del Río de la Plata, sugiriendo así una relación entre los procesos de retención y la posición de los recursos pesqueros.

Los frentes de convergencia retienen material en suspensión y organismos planctónicos, y tienen efectos en toda la trama trófica. Esto explicaría una mayor concentración de recursos pesqueros en sus cercanías, los cuales se estarían acercando a los frentes a alimentarse o a utilizarlos como áreas de reproducción y cría donde huevos y larvas quedarían retenidos. La relación entre los frentes de convergencia lagrangianos y la pesca ha sido previamente estudiada en otras regiones. Así, por ejemplo, las mayores capturas en el Pacífico Noroeste se encontraron principalmente a lo largo de frentes lagrangianos con condiciones favorables para la pesca (Prants, et al., 2014).

En particular, durante la surgencia analizada, el esfuerzo pesquero se concentró cercano al frente halino al Oeste de Montevideo, y cercano a los frentes térmicos derivados de la surgencia. En este sentido, en los períodos sin ocurrencias de eventos de surgencia sería esperable que los recursos y las actividades de pesca asociadas se concentren en la región cercana al frente halino del Río de la Plata. Sería importante entonces contar con información de localización de la flota durante períodos más largos, con y sin surgencia. De esta manera sería posible estudiar la importancia relativa de los frentes derivados de la surgencia y de los derivados del encuentro del RdP con aguas oceánicas sobre la concentración de los recursos pesqueros.

En general, la posición de la flota resultó concordante con la posición de los frentes de convergencia, pero no fue exacta. En este sentido, algunas de las diferencias entre las posiciones de la flota y la localización de los frentes lagrangianos identificados podrían deberse a limitantes en la operativa pesquera. Recorrer grandes trayectos y alejarse de las regiones cercanas a los puertos sin la certeza de la localización de recursos podría ser un riesgo económico no rentable.

Cabe destacar también que si bien los frentes identificados representan las regiones donde ocurre la máxima convergencia, las implicancias ecológicas de esta convergencia de agua podrían estar relacionadas a la duración de estos frentes antes de desaparecer. Tal es así que frentes lagrangianos de corta duración (que podrían ser derivados de eventos de surgencia no tan intensos) podrían tener menor impacto sobre la concentración de recursos. El material en suspensión, los nutrientes y los organismos planctónicos que se concentren allí podrían ser rápidamente dispersados al desaparecer el frente y no tener mayores consecuencias sobre la concentración de los recursos pesqueros que utilicen regiones de convergencia para alimentarse o desovar. Por lo tanto, la posición de la flota podría no encontrarse asociada a frentes de convergencia de corta duración. Esta sería una hipótesis para evaluar en futuros trabajos, reforzando así la importancia de estudiar series de tiempo mayores de la posición de la flota y su relación con los frentes de convergencia, así como la importancia de estudios ecológicos y

oceanográficos *in situ* en las regiones en las que usualmente se encuentran estos frentes durante los eventos de surgencia intensa.

Adicionalmente, las diferencias entre la localización de la flota y la localización de los frentes de convergencia también podrían deberse a que las corrientes simuladas por el modelo presentan diferencias con las corrientes reales existentes sobre la costa, por lo cual, aunque la flota se ubicara sobre los frentes a partir de nuestra aproximación detectaríamos algunas diferencias. Así, ajustes en el modelo podrían ayudar a simular de manera más realista la posición de los frentes de convergencia. De esta manera, la aproximación lagrangiana considerada en este análisis puede ser aplicada a la predicción de la localización de las zonas de convergencia, constituyendo así una herramienta para optimizar tiempos de búsqueda de áreas operativas de la flota. En este sentido, esta técnica podría ser utilizada también como un insumo por la administración pesquera.

Finalmente, considerando la cantidad y diversidad de actividades humanas adicionales a las actividades pesqueras que ocurren en la costa uruguaya y el área marina adyacente (exploración de hidrocarburos, transporte, turismo), es importante resaltar que las aproximaciones lagrangianas, en general, y la técnica de ELTF, en particular, son herramientas importantes que se deberían incorporar en estudios de evaluación de impacto ambiental, de planificación ambiental y de diseño de áreas marinas protegidas; de manera de lograr una adecuada gestión ambiental del territorio marino del Uruguay.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos por la información satelital brindada. Camila de Mello agradece al programa de doctorado Pedeciba Geociencias y a la Comisión Académica de Posgrado.

## REFERENCIAS

- Acha, E.M., Mianzan, H., Guerrero, R., Carreto, J., Giberto, D., Montoya, N. y Carignan, M., 2008. An overview of physical and ecological processes in the Rio de la Plata Estuary. En: *Continental Shelf Research*, 28(13), pp.1579-1588.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.01.031>
- Amante, C. y Eakins, B., 2009. *ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis* [En línea]. Colorado: NOAA. (NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24). [Consulta: 22 de octubre de 2022].  
Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Christopher-Amante/publication/228077300\\_ETOPO1\\_1\\_Arc-Minute\\_Global\\_Relief\\_Model\\_procedures\\_data\\_sources\\_and\\_analysis/links/59f77930458515547c24c805/ETOPO1-1-Arc-Minute-Global-Relief-Model-procedures-data-sources-and-analysis.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Christopher-Amante/publication/228077300_ETOPO1_1_Arc-Minute_Global_Relief_Model_procedures_data_sources_and_analysis/links/59f77930458515547c24c805/ETOPO1-1-Arc-Minute-Global-Relief-Model-procedures-data-sources-and-analysis.pdf)
- Aurell, E., Boffetta, G., Crisanti, A., Paladin, G. y Vulpiani, A., 1997. Predictability in the large: an extension of the concept of Lyapunov exponent. En: *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 30(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/0305-4470/30/1/003>

- Austin, J.A. y Lentz, S.J., 2002. The inner shelf response to wind-driven upwelling and downwelling. En: *Journal of Physical Oceanography*, 32(7), pp.2171-2193.  
DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032%3C2171:TISRTW%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032%3C2171:TISRTW%3E2.0.CO;2)
- Barreiro, M., 2010. Influence of ENSO and the South Atlantic Ocean on climate predictability over Southeastern South America. En: *Climate Dynamics*, 35(7-8), pp.1493-1508. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0666-9>
- Berta, M., Ursella, L., Nencioli, F., Doglioli, A.M., Petrenko, A.A. y Cosoli, S., 2014. Surface transport in the Northeastern Adriatic Sea from FSLE analysis of HF radar measurements. En: *Continental Shelf Research*, 77(1), pp.14-23.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.01.016>
- Boffetta, G., Lacorata, G., Redaelli, G. y Vulpiani, A., 2001. Detecting barriers to transport: a review of different techniques. En: *Physica D*, 158, pp.58-70.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(01\)00330-X](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(01)00330-X)
- Chin, T.M., Vazquez-Cuervo, J. y Armstrong, E.M., 2017. A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature. En: *Remote Sensing of Environment*, 200, pp.154-169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.029>
- Cotté, C., d'Ovidio, F., Dragon, A.C., Guinet, C. y Lévy, M., 2015. Flexible preference of southern elephant seals for distinct mesoscale features within the Antarctic Circumpolar Current. En: *Progress in Ocean*, 131, pp.46-58.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.11.011>
- Da Silva, A.M., Young, C.C. y Levitus, S., 1994. *Atlas of surface marine data*. s.l.: NOAA [Consulta: 05 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.croco-ocean.org/download/datasets/>
- Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P. y Cambon, G., 2012. Two-way nesting in split-explicit ocean models: algorithms, implementation and validation. En: *Ocean Modelling*, 49, pp.1-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.03.003>
- de Mello, C., Barreiro, M., Ortega, L., Trinchin, R. y Manta, G., 2022. Coastal upwelling along the Uruguayan coast: Structure, variability and drivers. En: *Journal of Marine Systems*, 230, 103735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103735>
- de Mello, C., Barreiro, M., Hernández-García, E., Trinchin, R. y Manta, G., en prensa. A Lagrangian study of summer upwelling along the Uruguayan coast. En: *Continental Shelf Research*.
- D'Onofrio, E.E., Fiore, M.M. y Romero, S.I., 1999. Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires. En: *Continental Shelf Research*, 19(13), pp.1681-1693. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(98\)00115-0](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(98)00115-0)
- d'Ovidio, F., Fernández, V., Hernández-García, E. y López, C., 2004. Mixing structures in the Mediterranean Sea from finite size Lyapunov exponents. En: *Geophysical Research Letters*, 31(17), L17203. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004GL020328>
- d'Ovidio, F., Isern-Fontanet, J., López, C., Hernández-García, E. y García-Ladona, E., 2009. Comparison between Eulerian diagnostics and finite-size Lyapunov exponents computed from altimetry in the Algerian basin. En: *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(1), pp.15-31.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2008.07.014>
- Framiñan, M.B., Etala, M. Acha, R., Guerrero, R., Lasta, C. y Brown, O., 1999. Physical characteristics and processes of the Río de la Plata Estuary. En: Perillo, G., Piccolo, M.

- y Quivira, M., ed. *Estuaries of South America: their morphology and dynamics*. Berlin: Springer. pp.161–194. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-60131-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-60131-6_8)
- Galan, A., Orfila, A., Simarro, G., Hernández-Carrasco, I. y López, C., 2012. Wave mixing rise inferred from Lyapunov exponents. En: *Environmental Fluid Mechanics*, 12(3), pp.291-300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10652-012-9238-3>
- Gómez-Erache, M., Vizziano, D., Nuñez, Nagy, G. y Lagomarsino, J., 2001. Producción fitoplanctónica en la zona frontal del Río de la Plata. En: Vizziano, D., Puig, P., Mesones, C., Nagy, G.J., ed. *Río de la Plata: investigación para la gestión del ambiente, los recursos pesqueros y la pesquería en el frente salino*. Montevideo: Programa EcoPlata.
- Guerrero, R.A. y Piola, A.R., 1997. Masas de agua en la plataforma continental. En: Boschi, E.E., ed. *El mar Argentino y sus recursos pesqueros. Tomo 1. Antecedentes históricos de las exploraciones en el mar y las características ambientales* [En línea]. Mar del Plata: INIDEP. pp.107-118. [Consulta: 5 de agosto de 2022]. Disponible en: [https://www.inidep.edu.ar/wordpress/?page\\_id=846](https://www.inidep.edu.ar/wordpress/?page_id=846)
- Guerrero, R.A., Acha, E.M., Framin, M.B. y Lasta, C.A., 1997. Physical oceanography of the Río de la Plata Estuary, Argentina. En: *Continental Shelf Research*, 17(7), pp.727–742. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(96\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(96)00061-1)
- Guerrero, R.A., Piola, A.R., Molinari, G.N., Osiroff A.P. y Jáuregui, S.I., 2010. *Climatología de temperatura y salinidad en el Río de la Plata y su frente marítimo Argentina-Uruguay*. Mar del Plata: Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP). 95 p. ISBN 978-987-1443-03-1
- Haller, G. y Yuan, G., 2000. Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence. En: *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 147(3-4), pp.352-370. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(00\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(00)00142-1)
- Haney, R.L., 1991. On the pressure gradient force over steep topography in sigma coordinate ocean models [En línea]. En: *Journal of physical Oceanography*, 21(4), pp.610-619. [Consulta: 22 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://calhoun.nps.edu/handle/10945/46807>
- Hernández-Carrasco, I., López, C., Hernández-García, E. y Turiel, A., 2011. How reliable are finite-size Lyapunov exponents for the assessment of ocean dynamics? En: *Ocean Modelling*, 36(3-4), pp.208-218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.12.006>
- Horta, S. y Defeo, O., 2012. The spatial dynamics of the whitemouth croaker artisanal fishery in Uruguay and interdependencies with the industrial fleet. En: *Fisheries Research*, 125–126, pp.121-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.02.007>
- Jaureguizar, A., Cortés, F., Milessi, A., Cozzolino, E. y Allegra, L., 2015. A trans-ecosystem fishery: Environmental effects on the small-scale gillnet fishery along the Río de la Plata boundary. En: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 166, Part A, pp.92-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.11.003>
- Joseph, B. y Legras, B., 2002. Relation between kinematic boundaries, stirring, and barriers for the Antarctic polar vortex. En: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(7), pp.1198-1212. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059%3C1198:RBKBSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059%3C1198:RBKBSA%3E2.0.CO;2)
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.K., Hnilo, J.J., Fiorino, M. y Potter, G.L., 2002. En: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(11), pp.1631-1643. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>

- Koh, T.Y. y Legras, B., 2002. Hyperbolic lines and the stratospheric polar vortex. En: *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 12(2), pp.382-394. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1480442>
- Largier, J.L., 2020. Upwelling bays: how coastal upwelling controls circulation, habitat, and productivity in bays. En: *Annual Review of Marine Science*, 12, pp.415-447. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-011020>
- Lehahn, Y., d'Ovidio, F., Lévy, M. y Heifetz, E., 2007. Stirring of the northeast Atlantic spring bloom: A Lagrangian analysis based on multisatellite data. En: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C8). DOI: <https://doi.org/10.1029/2006JC003927>
- Lellouche, J.M., Le Galloudec, O., Greiner, E., Garric, G., Regnier, C., Drevillon, M. y Le Traon, P. Y., 2018. The Copernicus Marine Environment Monitoring Service global ocean 1/12° physical reanalysis GLORYS12V1: description and quality assessment [En línea]. En: EGU. *20th EGU General Assembly, EGU2018. Proceedings from the conference held 4-13 April, 2018 in Vienna, Austria*. p.19806. [Consulta: 22 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..2019806L/abstract>
- Levitus, S., Locarnini, R.A., Boyer, T.P., Mishonov, A.V., Antonov, J.I., Garcia, H.E., Baranova, O., Zweng, M., Johnson, D. y Seidov, D., 2010. *World ocean atlas 2009, WOA2009* [En línea]. Washington: NOAA. [Consulta: 05 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.croco-ocean.org/download/datasets/>
- Mackas, D.L., Tsurumi, M., Galbraith, M.D. y Yelland, D.R., 2005. Zooplankton distribution and dynamics in a North Pacific Eddy of coastal origin: II. Mechanisms of eddy colonization by and retention of offshore species. En: *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(7-8), pp.1011-1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2005.02.008>
- Martínez, A. y Ortega, L., 2015. Delimitation of domains in the external Río de la Plata estuary, involving phytoplanktonic and hydrographic variables. En: *Brazilian Journal of Oceanography*, 63(3), pp.217-227. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1679-87592015086106303>
- Meccia, V.L., Simionato, C.G. y Guerrero, R.A., 2013. The Rio de la Plata Estuary response to wind variability in synoptic timescale: salinity fields and salt wedge structure. En: *Journal of Coastal Research*, 29(1), pp.61-77. DOI: <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00063.1>
- Mesones, C., Puig, P. y Martínez, A., 2001. Relación de especies costeras con las características ambientales. En: Vizziano, D., Puig, P., Mesones, C. y Nagy, G.J., ed. *Río de la Plata: investigación para la gestión del ambiente, los recursos pesqueros y la pesquería en el frente salino*. Montevideo: Programa EcoPlata.
- Moira, L.C., Simionato, C., Campetella, C., Moreira, D. y Guerrero, R., 2013. Surgencia, ¿Un fenómeno común en la costa norte del Río de la Plata exterior? En: *Frente Marítimo*, 23, pp.275-290.
- Molcard, A., Poje, A.C. y Özgökmen, T.M., 2006. Directed drifter launch strategies for Lagrangian data assimilation using hyperbolic trajectories. En: *Ocean Modelling*, 12(3-4), pp.268-289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2005.06.004>
- Nagy, G.J., Gómez-Erache, M., López, C.H. y Perdomo, A.C., 2002. Distribution patterns of nutrients and symptoms of eutrophication in the Río de la Plata River Estuary System. En: *Hydrobiologia*, 475/476, pp.125-139. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1020300906000>



- Norbis, W., 1995. Influence of wind, behaviour and characteristics of the croaker (*Micropogonias furnieri*) artisanal fishery in the Rio de la Plata (Uruguay).  
En: *Fisheries Research*, 22(1-2), pp.43-58. ISSN 0165-7836.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-7836\(94\)00310-5](https://doi.org/10.1016/0165-7836(94)00310-5)
- Norbis, W., Paesch, L. y Galli, O., 2006. Los recursos pesqueros de la costa de Uruguay: ambiente, biología y gestión. En: Menafra, R. Rodríguez-Gallego, L. Scarabino, F. y Conde, D., eds. *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya*. Montevideo: Vida Silvestre Uruguay. 668 p.
- Ortega, L. y Martínez, A., 2007. Multiannual and seasonal variability of water masses and fronts over the Uruguayan shelf. En: *Journal of Coastal Research*, 23(3), pp.618-629.  
DOI: <https://doi.org/10.2112/04-0221.1>
- Oschlies, A. y Garçon, V., 1998. Eddy-induced enhancement of primary production in a model of the North Atlantic Ocean. En: *Nature*, 394(6690), pp.266-269.  
DOI: <https://doi.org/10.1038/28373>
- Özgökmen, T.M., Griffa, A., Mariano, A.J. y Piterbarg, L.I., 2000. On the predictability of Lagrangian trajectories in the ocean [En línea]. En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(3), pp.366-383. [Consulta: 10 de agosto de 2022].  
Disponible en: <http://www.tamayozgokmen.org/ftp-pub/jmr04.pdf>
- Pauly, D. y Christensen, V., 1995. Primary production required to sustain global fisheries. En: *Nature*, 374(6519), pp.255-257. DOI: <https://doi.org/10.1038/374255a0>
- Pimenta, F., Garvine, R. W. y Münchow, A., 2008. Observations of coastal upwelling off Uruguay downshelf of the Plata estuary, South America. En: *Journal of Marine Research*, 66(6), pp.835-872.
- Piola, A.R., Matano, R.P., Palma, E.D., Möller Jr, O.O. y Campos, E.J., 2005. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. En: *Geophysical Research Letters*, 32(1). DOI: <https://doi.org/10.1029/2004GL021638>
- Pisciottano, G., Díaz, A., Cazess, G. y Mechoso, C.R., 1994. El niño-southern oscillation impact on rainfall in Uruguay. En: *Journal of Climate*, 7(8), pp.1286-1302.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)07%3C1286:ENSOIO%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1994)07%3C1286:ENSOIO%3E2.0.CO;2)
- Prants, S.V., Budyansky, M.V. y Uleysky, M.Y., 2014. Identifying Lagrangian fronts with favourable fishery conditions. En: *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 90, pp.27-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.04.012>
- Rossi, V., López, C., Sudre, J., Hernández-García, E. y Garçon, V., 2008. Comparative study of mixing and biological activity of the Benguela and Canary upwelling systems. En: *Geophysical Research Letters*, 35(11). DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GL033610>
- Shchepetkin, A.F. y McWilliams, J.C., 1998. Quasi-monotone advection schemes based on explicit locally adaptive dissipation. En: *Monthly Weather Review*, 126(6), pp.1541-1580.  
DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<1541:QMASBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<1541:QMASBO>2.0.CO;2)
- Simionato, C.G., Dragani, W., Meccia, V. y Nuñez, M., 2004. A numerical study of the barotropic circulation of the Río de la Plata estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth's rotation and low frequency wind variability. En: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61(2), pp.261-273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.05.005>
- Simionato, C.G., Vera, C.S. y Siegmund, F., 2005. Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Río de la Plata area. En: *Journal of Coastal Research*, 21(4), pp.770-783. DOI: <http://dx.doi.org/10.2112/008-NIS.1>

- Simionato, C.G., Tejedor, M.L.C., Campetella, C., Guerrero, R. y Moreira, D., 2010. Patterns of sea surface temperature variability on seasonal to sub-annual scales at and offshore the Río de la Plata estuary. En: *Continental Shelf Research*, 30(19), pp.1983-1997. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.09.012>
- Trinchin, R., Ortega, L. y Barreiro, M., 2019. Spatiotemporal characterization of summer coastal upwelling events in Uruguay, South America. En: *Regional Studies in Marine Science*, 31, 100787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100787>
- Uruguay. Decreto Ley 14145, de 25 de enero de 1974. *Diario Oficial* [En línea], 07 de febrero de 1974. [Consulta: 22 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-ley/14145-1974/1>
- Uruguay. Decreto 149/997, de 7 de mayo de 1997. *Diario Oficial* [En línea], 20 de mayo de 1997. [Consulta: 10 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/149-1997>
- Uruguay. Decreto 115/018, de 24 de abril de 2018. *Diario Oficial* [En línea], 04 de mayo de 2018. [Consulta: 10 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/115-2018>
- Wallace, J.M., Smith, C. y Bretherton, C.S., 1992. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies. En: *Journal of Climate*, 5(6), pp.561-576. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<0561:SV DOWS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<0561:SV DOWS>2.0.CO;2)