

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA PLUMA DEL RÍO MERCHANT  
EN EL FIORDO DE MELIMOYU INTEGRANDO TELEDETECCIÓN Y DATOS IN  
SITU.**

**MARIA ANDREINA ARIAS A.<sup>1</sup>**  
**CRISTIÁN ESCAURIAZA.<sup>2</sup>**  
**MARCELO D. MIRANDA.<sup>3</sup>**  
**MEGAN E. WILLIAMS.<sup>4</sup>**

**RESUMEN**

Cuando un río desemboca en el mar se forma una pluma en la costa con el agua del río, que se mantiene en la superficie por las diferencias de densidad. Las plumas de río transportan sedimentos, nutrientes y contaminantes hacia el océano, influyendo en la circulación costera y la estratificación de la columna de agua. Si bien la atención científica se ha centrado en plumas generadas por grandes descargas de caudal, la distribución espaciotemporal en sistemas de caudales más bajos en fiordos está afectada de manera distinta por las fuerzas físicas que rigen su comportamiento, incluyendo el caudal, el viento, la precipitación, las mareas y la fuerza de Coriolis. Este trabajo integra datos satelitales espectrales, temporales y espaciales para entender el comportamiento de la pluma del río Marchant en el Fiordo de Melimoyu, en la región de Aysén, durante el verano 2024. Se utiliza clasificación supervisada de imágenes de Sentinel-2, Landsat 8 y Landsat 9, que se comparan con datos in-situ de temperatura y salinidad del agua en la costa de Melimoyu. Este enfoque nos permite entender y cuantificar la alta variabilidad espacial y temporal de la pluma de río mediante el área que ocupa a lo largo del fiordo, que puede variar entre 2.8 km<sup>2</sup> y 33.6 km<sup>2</sup>. A partir de un modelo de regresión lineal múltiple entre las variables, se estima que la lluvia y el estado de la marea son las variables que tienen mayor influencia en el área de la pluma a escala diaria. Por lo tanto, usando el área como variable observada, se determina la distribución de salinidad, turbidez y temperatura de esta masa de agua que influye en otros procesos costeros a nivel biológico, químico y ecológico.

---

<sup>1</sup>PhD (c), Ing. Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - email: maarias7@uc.cl

<sup>2</sup>Prof. Asociado, Ing. Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - email: cescauri@uc.cl

<sup>3</sup>Prof. Asociado, Ecosistemas y Medio Ambiente, Pontificia Universidad Católica de Chile - email: mmirandas@uc.cl

<sup>4</sup>Prof. Asistente, Ing. Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - email: megan.williams@uc.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Las plumas de río son el agua dulce boyante generada cuando un río desemboca al mar. Transportan nutrientes, sedimentos y contaminantes que afectan procesos costeros a nivel biológico, químico y ecológico, siendo objeto de estudio en distintas disciplinas. Desde la perspectiva física, interesa comprender cómo estas plumas se mueven y se expanden en la costa, debido a la interacción entre las fuerzas físicas del ambiente donde se forman. Generalmente, los estudios se enfocan en plumas de río formadas por grandes descargas de caudal, como por ejemplo los ríos Columbia  $\sim 10000 \text{ m}^3/\text{s}$  y Amazonas  $\sim 172000 \text{ m}^3/\text{s}$  (Kilcher & Nash, 2010; Molleri et al., 2010). Sin embargo, aún existe una brecha de conocimiento sobre las plumas de ríos formadas por bajas descargas de caudal, en parte debido a la alta variabilidad temporal que presentan y también por la dificultad de obtener datos hidrometeorológicos (Basdurak et al., 2020; Flores et al., 2022; Mendes et al., 2017).

En estuarios tipo fiordo, caracterizados por sus canales de agua largos, estrechos y profundos que tienen esta forma debido al retroceso de los glaciares (Castro et al., 2017; Palma & Silva, 2004), las plumas se encuentran también limitadas espacialmente. La Patagonia chilena es un lugar ideal para estudiar estas plumas de río formadas por ríos pequeños, es un sistema dinámico lleno de fiordos y canales que reciben agua dulce y material de la cuenca transportados hacia el mar (Flores et al., 2022; Lara et al., 2025). Por lo tanto, el fiordo de Melimoyu en la región de Aysén, se considera un lugar representativo para entender los procesos espaciales y temporales.

Generalmente, las fuerzas que intervienen en el comportamiento espacial y temporal de las plumas de río son el caudal, el viento y las mareas (Horner-Devine et al., 2015; Nash & Moum, 2005). Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo es comprender la dinámica superficial de la pluma del río Marchant en el tiempo y en el espacio, considerando las variables físicas mencionadas durante una campaña de terreno entre enero y febrero de 2024. El procedimiento de análisis se realiza en dos etapas: 1) Identificar la pluma del río Marchant con imágenes satelitales de Sentinel 2 (S2), Landsat 8 y Landsat 9 (L8/9). Para ello, se utilizó el método Random Forest, que consiste en separar por colores las propiedades ópticas del agua según datos de reflectancia espectral captada por los satélites (Ma et al., 2021). Estos datos se conocen como “*Remote sensing reflectance*” (Rrs), y representan la energía captada por estos sensores de alta resolución, clasificando el agua según su color. 2) Analizar la forma de la pluma de río correlacionando su área con las variables físicas que influyen en ella: lluvia, mareas, magnitud y dirección del viento.

Para comprender el movimiento y extensión de plumas de río, es necesario contar con mediciones en terreno: salinidad, turbidez y temperatura del agua. Sin embargo, es difícil medir en toda la pluma, implicando baja representatividad espacial (mediciones puntuales), y altos costos a largo plazo. Por lo tanto, los datos satelitales amplían el conocimiento de estas masas de agua, y permiten comprender su comportamiento a mayor escala. En esta investigación se muestra la alta variabilidad espacial y temporal que tienen las plumas de río formadas por caudales bajos. Se estima la importancia de la marea y la lluvia como variables predominantes en los cambios de área de la pluma, enriqueciendo el conocimiento de plumas de río en fiordos. La Figura 1 a) muestra la pluma del río Marchant el día 25-03-2025. La Figura 1 b) indica los puntos de medición superficial: “L10”, “L30A” y “L30N” con sensores de conductividad-temperatura-presión (CTD), sensores de presión y temperatura en “Costa”, “Transecta” y “T\_upRiver”, y un sensor de presión atmosférica en “Melimoyu” durante la campaña de terreno realizada entre enero y febrero 2024 (ene-feb2024).

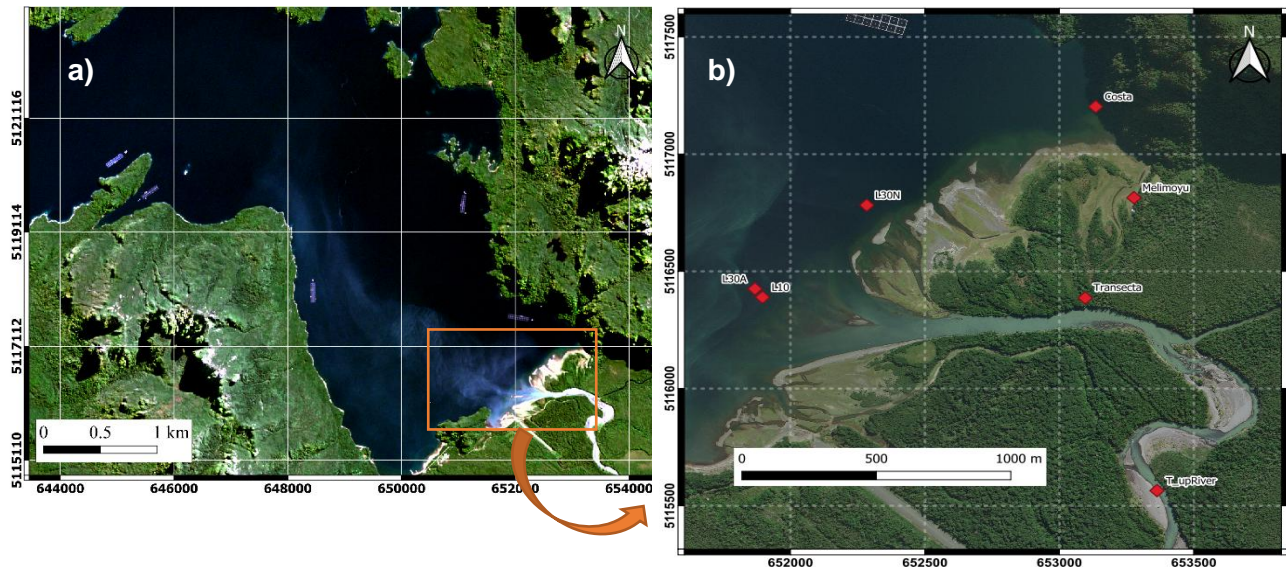


Figura 1: a) vista en planta pluma del río Marchant (S2). b) puntos de anclaje: CTDs instalados en “L10”, “L30N” y “L30A”. Leveloggers en “Costa”, “T\_upRiver” y “Transecta”, y Barlogger en “Melimoyu”.

## 2. METODOLOGÍA

Esta sección se divide en tres partes: primero se explican los datos satelitales utilizados y sus características; segundo, se detallan los datos de terreno y las variables físicas: precipitación ( $P$ ), viento ( $W$ ) y mareas ( $T$ ). Por último, se explican las técnicas de teledetección aplicadas y las herramientas estadísticas que contribuyen a los hallazgos.

### 2.1 Datos satelitales del color del océano y termales

Los datos satelitales de S2 y L8/9 se analizaron usando el Nivel 2 de procesamiento (datos por debajo de la atmósfera con corrección atmosférica). Los datos de S2 se obtienen desde el Sensor Instrumental Multiespectral (MSI), que captura imágenes con resolución espacial de 10 m por píxel pasando cada 3~5 días (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). Los satélites L8/9 pasan cada 16 días con un desfase de 8 días, y funcionan con el Operational Land Imager (OLI) para bandas de color verdadero (30 m por píxel) y el Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS) para las bandas infrarrojas térmicas (<https://www.usgs.gov/>). Aunque otros tipos de sensores satelitales tienen una mejor frecuencia temporal, el uso de S2 y L8/9 se debe a su mejor resolución espacial en el fiordo de Melimoyu, lo que es crucial para ver y analizar espacialmente la pluma del río Marchant.

Las imágenes utilizadas tenían un porcentaje de píxeles nublados menor al 20% durante ene-feb 2024. Se usaron 12 imágenes satelitales, siendo 9 imágenes de S2, 1 de L8 y 2 de L9. Si bien se trata de una muestra pequeña, existe una valiosa información al comparar las características espaciales de cada imagen con sus respectivas condiciones ambientales, lo que ayuda a explicar el comportamiento de la pluma de forma espacial y temporal. Los datos del color del océano se generaron usando las bandas espectrales en color verdadero (RGB), que son: banda roja ~ 665 nm, banda verde ~ 560 nm y la banda azul ~ 490 nm. Según Saldías et al. (2016), la banda verde actúa como un buen delineador de plumas de río debido a su alta correlación con la turbidez, siendo pertinente en esta investigación. No obstante, si la pluma no es turbia es posible usar los datos de la banda termal 10 de L8/9 (~10600 nm) para detectar donde se encuentra el agua de menor densidad. Para esta investigación, se usaron ambos productos satelitales mejorando el análisis en función de las propiedades del agua. Por lo tanto, se determinó la reflectancia espectral ( $Rrs$ ) mostrada en la Ecuación (1) para analizar la forma de la pluma de río según su turbidez.

$$R_{rs} = \frac{L_w(\lambda)}{E_{solar}} \left[ \frac{1}{s_r} \right] \quad (1)$$

- $L_w(\lambda)$ : radiancia espectral medida por el sensor en longitud de onda  $\lambda$  ( $W/m^2/s_r/\mu_m$ ).
- $E_{solar}$ : irradiancia solar en la parte superior de la atmósfera en longitud de onda  $\lambda$  ( $W/m^2/\mu_m$ ).

El rango geográfico de las 12 imágenes utilizadas está entre los 44°2'22" - 44°8'22" S y 73°10'44" - 73°2'18" O, desde el 10/01/2024 al 24/02/2024. La mayoría de los datos satelitales se obtuvieron y procesaron en Google Earth Engine (GEE), una plataforma en la nube que permite realizar análisis geoespaciales utilizando su propio catálogo de diferentes misiones satelitales (<https://earthengine.google.com/>).

## 2.2 Datos de terreno

Los datos de terreno se dividieron en dos grupos: meteorológicos y de la columna de agua. Los meteorológicos fueron tomados de las estaciones Melimoyu (-44.0855°, -73.0880°) y la Boya ACS34 (-44.053°, -73.188°). Mientras que para los datos de la columna de agua se usaron CTDs (*Conductivity-Temperature-Depth*), *leveloggers* y termistores. La ubicación de cada instrumento y el tipo de sensor se muestra en la Figura 1 b). La importancia de analizar estos datos radica en la influencia que tienen sobre el comportamiento espacial y temporal de la pluma de río, conduciendo a su análisis conjunto para cumplir con los objetivos planteados.

### 2.2.1 Precipitación ( $P$ ):

La cuenca del río Marchant tiene aproximadamente 328 km<sup>2</sup> con lluvia promedio en el verano de ~150 mm/mes. Esta cuenca pertenece al sistema de fiordos de la Patagonia chilena, caracterizados por presentar altas precipitaciones que van entre 2000 y 5000 mm/año (Lara et al., 2010). Con base en esto, se consideró razonable usar la lluvia acumulada de cinco días previos al paso del satélite para compararla con la forma de la pluma en cada imagen. Esto tomando en cuenta que a mayor precipitación se esperarí una pluma de mayor tamaño.

### 2.2.2 Viento ( $W$ ):

Se usaron datos horarios de velocidad y dirección del viento de la Estación Melimoyu y la Boya ACS34. Según Piñones et al. (2005), el viento puede analizarse en distintas ventanas temporales, ya que, dependiendo de la hora del día la velocidad del viento puede influir en la variabilidad espacial de una pluma fluvial (en el verano). Por lo tanto, se consideró la velocidad y dirección promedio del viento entre las 12 y 15 h (UTC), de acuerdo con el paso de cada satélite. Luego se calculó el esfuerzo de corte del viento zonal ( $\tau_u$ ) y meridional ( $\tau_v$ ) con un coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) de  $1 \times 10^{-3}$ , densidad del aire ( $\rho_a$ ) de  $1.2 \text{ Kg}/m^3$ , componentes zonal y meridional del viento ( $u$  y  $v$ ) y magnitud del viento a 10 m sobre la superficie ( $U_{10}$ ) (Bakun & Nelson, 1991; Piñones et al., 2005), según Ecuaciones (2) y (3).

$$\tau_u = \rho_a C_d u U_{10} \quad (2)$$

$$\tau_v = \rho_a C_d v U_{10} \quad (3)$$

Finalmente, el esfuerzo de corte total del viento ( $\tau$ ) y su dirección ( $\theta$ ) se calcularon con las Ecuaciones (4) y (5) respectivamente.

$$\tau = \sqrt{\tau_u^2 + \tau_v^2} \quad (4)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{\tau_v}{\tau_u}\right) \quad (5)$$

### 2.2.3 Marea (T):

Con datos del nivel de agua de la Estación Melinka (IOC, 2021), un *levellogger* en la costa del fiordo y punto de anclaje “Costa” (Figura 1), se ajustó un análisis armónico según método descrito por Pawlowicz et al. (2002). El análisis determinó la amplitud y fase de los componentes mareales en el Fiordo, lo que luego se comparó con la hora de cada imagen satelital para observar la forma de la pluma del río a través del ciclo mareal. Usando el signo de la derivada en el análisis armónico (pendiente de la curva), se compararon las mareas ascendentes y descendentes con cada imagen.

### 2.2.4 Datos de la columna de agua:

Se instalaron CTDs y termistores en líneas de amarre como se muestra en la Figura 1. Se utilizaron datos superficiales (<1 m) horarios para obtener la salinidad y temperatura del agua desde el 13-01-2024 al 12-02-2024. Además, en marzo 2025 se tomaron perfiles de salinidad, temperatura y turbidez a lo largo del fiordo con el mismo sensor, información usada para validar la reflectancia espectral ( $R_{rs}$ ) como dato satelital.

## 2.3 Técnicas de teledetección y herramientas estadísticas

### 2.3.1 Detección de la pluma de río mediante clasificación supervisada de imágenes satelitales

Una pluma fluvial puede identificarse según sus valores de  $R_{rs}$  ya que, el color del agua de menor densidad luce diferente al agua más densa en luz visible (Lihan et al., 2008). Para separar estas diferencias espectrales, la clasificación supervisada de imágenes utiliza la  $R_{rs}$  para clasificar de forma óptica el tipo de agua. En este caso se utilizó el *Normalized Difference Turbidity Index* (NDTI) como indicador de la turbidez del agua (bandas verde y roja), y la SST como detectores de pluma de río. Estudios previos han usado la  $R_{rs}$  de la banda verde o roja para detectar plumas y sus bordes (Flores et al., 2022; Saldías et al., 2016). Con base en esto, se determinó un valor umbral de reflectancia de  $0.005 sr^{-1}$  comparando dos imágenes contrastantes durante ene-feb 2024 con la precipitación como *proxy*. La Tabla 1 muestra las 4 clases ópticas de agua obtenidas.

Tabla 1 Criterios para el entrenamiento y clasificación de píxeles

Clase óptica de agua	Criterio de entrenamiento	Número de clase
Río	Área en el canal del río y la desembocadura	0
Agua de alta reflectancia	Área cerca de la desembocadura (área de la pluma)	1
Agua de media reflectancia	Área cerca de la costa, pero más lejos de la desembocadura asociada a la pluma (área de la pluma)	2
Agua de baja reflectancia	Área fuera de la costa asociada con agua de mayor densidad a la de la pluma	3

Se utilizaron bandas en color verdadero (RGB) para entrenar los píxeles que delinean la forma de la pluma de río según el número de clases seleccionado. Para obtener la clasificación de imágenes, se aplicó el método *Random Forest*, un algoritmo que trabaja con una colección de árboles de decisión que agrupan píxeles similares según los datos de entrenamiento (Ma et al., 2021). Así, utilizando los datos de la Tabla 1, se entrenaron los píxeles de cada clase, y se detectó la pluma del río para cada imagen durante ene-feb 2024. Por otro lado, este estudio utiliza productos satelitales de la temperatura superficial del mar (SST) captados por el Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS) de

L8/9, disponibles en el catálogo de Google Earth Engine (GEE): USGS Landsat 8 Nivel 2, Colección 2. Luego, se estimaron los valores de SST en cada píxel por imagen según la Ecuación 6 (Dyba et al., 2022; Garg et al., 2020).

$$SST = \frac{BT}{\left\{1 + \left[\left(\lambda \cdot BT / \rho\right) \ln(\epsilon)\right]\right\}} \quad (6)$$

$BT$  es la temperatura de brillo medida por el sensor TIRS en Kelvin,  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiancia emitida (11,5  $\mu\text{m}$  para L8/9 banda 10),  $\rho$  es una constante derivada de la Ley de Plank  $\sim 1.438 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ , y  $\epsilon$  es la emisividad superficial del agua  $\sim 0,98$  (Simon et al., 2014). La temperatura del agua es un parámetro importante que permite medir la calidad del agua (Das et al., 2022; Dyba et al., 2022; Saldías et al., 2021). Sin embargo, en este caso, se utiliza para detectar plumas fluviales, destacando que no se tiene conocimiento de ningún estudio hasta la fecha que lo utilice para este propósito. Sospechamos que este es un buen indicador para delinear plumas de río turbias y no turbias, especialmente en lugares con bajas temperaturas del agua asociadas con escorrentía glacial como el Fiordo Melimoyu.

### 2.3.2 Cuantificación del área de la pluma de río

Para cuantificar esta área, se utilizaron los resultados de la clasificación de imágenes. De acuerdo con cada clase de la Tabla 1, se agruparon las clases (1) y (2) como agua de menor densidad (mayor reflectancia), representando así la pluma de río. Este proceso, se llevó a cabo en GEE y en el software R versión 4.2.2 (R Core Team, 2022), contando el número de píxeles que pertenecía a cada clase y sumándolos para estimar el área total de la pluma de río.

### 2.3.3 Análisis de Regresión Lineal Múltiple (ARLM)

Esta técnica se utilizó para entender y cuantificar las variables con mayor influencia en la variabilidad espacial y temporal de la pluma del río Marchant. Las variables predictoras son la precipitación ( $P$ ), la amplitud de la marea ( $T_l$ ), el estado de la marea ( $T_s$ ), la velocidad del viento ( $W_s$ ) y su dirección ( $W_d$ ); mientras que la variable respuesta es el área de la pluma ( $A$ ). Los datos de entrada para el ARLM son: valor instantáneo de marea según la fecha y hora de cada imagen, precipitación acumulada cinco días antes del paso del satélite, velocidad y dirección del viento tres horas antes del paso del satélite. Matemáticamente, esto se refleja en la Ecuación (7).

$$A = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 T_l + \beta_3 T_s + \beta_4 W_s + \beta_5 W_d + \epsilon \quad (7)$$

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Detección de la pluma del río y clasificación supervisada de imágenes satelitales

La Figura 2 muestra como ejemplo la imagen de S2 en a) color verdadero, b) su clasificación y c) gráfico de firma espectral el día 20-01-2024. Los colores representan las clases de la Tabla 1, donde la mayor reflectancia la posee la clase (0), es decir, el río. Las clases (1) y (2) representan el área de la pluma, y observando el gráfico de firma espectral, la mayor reflectancia de esta masa de agua ocurre en las bandas B2 (azul), B3 (verde) y B4 (rojo). Además, el agua de mayor densidad que representa la clase (3) es de color más oscuro, la cual se distingue en la imagen en color verdadero.

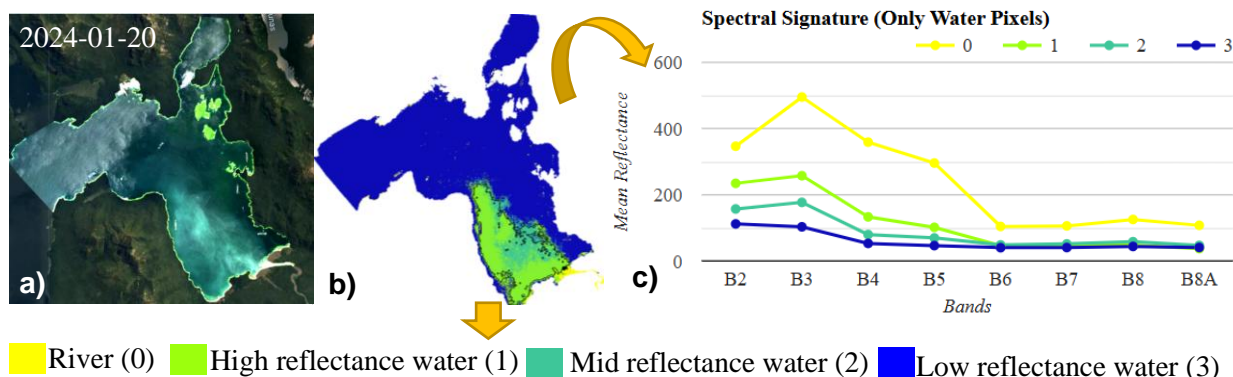


Figura 2: a) imagen en color verdadero, b) imagen clasificada, c) firma espectral de las clases de agua

Por otra parte, siguiendo el método descrito en la subsección 2.3.1, se estimaron las zonas de mayor a menor turbidez para cada imagen satelital, generando datos importantes y valiosos para la zona en estudio. La Figura 3 muestra tres fechas como ejemplo, donde el orden de las imágenes a), b) y c) indica lo que representa cada cuadro explicado a continuación.

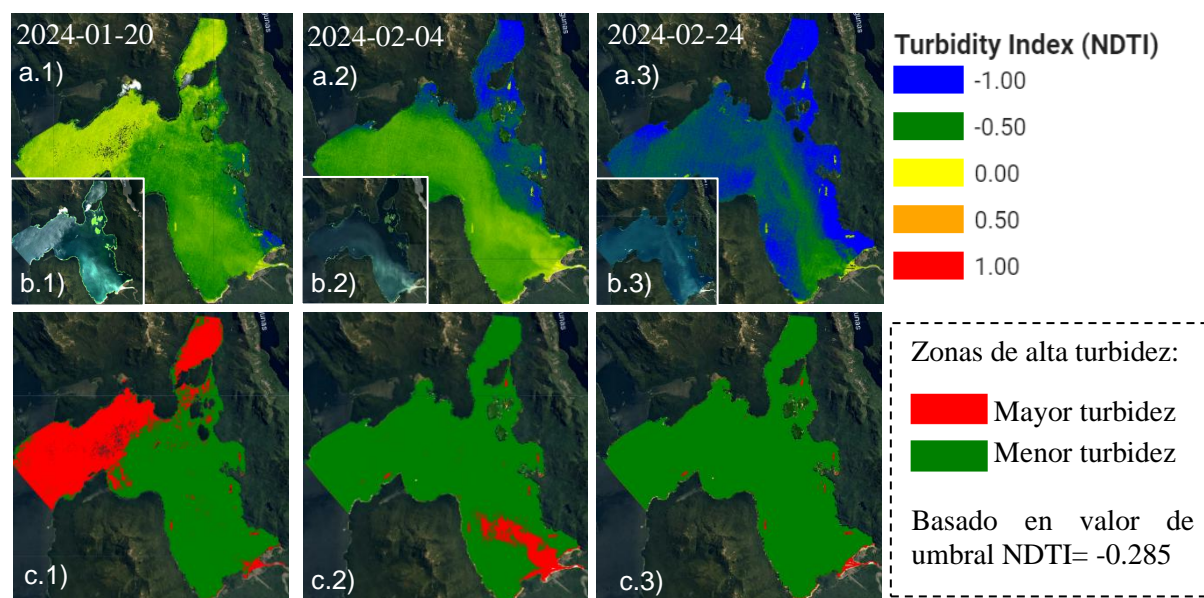


Figura 3 casos analizados de turbidez en el fiordo por fechas a) imagen con rango de valores del NDTI, b) imagen en color verdadero, c) imagen con zonas mas turbias a lo largo del fiordo (con base en umbral NDTI)

En la Figura 3 a) se observa la distribución de turbidez dentro del fiordo de acuerdo con el índice espectral NDTI, cuyo valor categoriza la turbidez entre valores adimensionales desde -1 (baja turbidez) a 1 (alta turbidez). La Figura 3 b) representa la imagen en color verdadero en cada fecha, y la Figura 3 c) es una representación de las zonas que superan un valor umbral de  $NDTI = -0.285$ , valor escogido según histograma de distribución de píxeles turbios que caracterizan las zonas de mayor turbidez en cada imagen. El color rojo representa las zonas más turbias, mientras que el verde las menos turbias. Lo interesante en estas imágenes es que la desembocadura del río siempre se mantiene en color rojo, indicando zona de alta turbidez, que hasta ahora se atribuye al sedimento glaciar, claramente visible por su color en las imágenes en color verdadero. La Figura 3 c) del 2024-01-20, es un caso particular ya que presenta alta turbidez en la salida del fiordo, y consideramos que se debe a corrientes de turbidez generadas por la velocidad del agua en esa zona. Este resultado implica que a través de la  $R_{rs}$  es posible estimar donde prevalecen las zonas de alta turbidez, lo que influye además en otros procesos costeros a nivel biológico y ecológico.

Por otra parte, la Figura 4 muestra como caso de estudio el seguimiento espacial y temporal de la pluma de río los días 20, 21, 22 y 23 de enero de 2024. Se presentan imágenes en color verdadero (a) para comparar con su clasificación (b) y, si es una imagen de L8/9 se muestra seguida con los valores de temperatura superficial del mar (c). Los cuadros debajo de cada fecha poseen información de las condiciones ambientales en cada imagen según lluvia acumulada por 5 días ( $P$ ), velocidad del viento en la hora cercana al paso del satélite 15:00 UTC ( $W_s$ ), dirección del viento ( $W_d$ ), nivel de la marea ( $T_l$ ) y estado de la marea ( $T_s$ ) instantáneos. El análisis visual permite evaluar la forma de la pluma de río en función de las fuerzas físicas que influyen en su variabilidad. En general, plumas más grandes se asocian con mayor precipitación, pero también el estado de la marea juega un papel importante, puesto que en marea ascendente la pluma de río se contrae hacia la desembocadura (es más pequeña), mientras que en marea descendente la pluma de río se extiende, con mayor área. El viento también juega un papel importante, pero su influencia es mayor si la velocidad supera los 4 m/s, y dependiendo de su dirección, puede guiar la pluma de río haciendo que se oriente hacia los costados del fiordo.

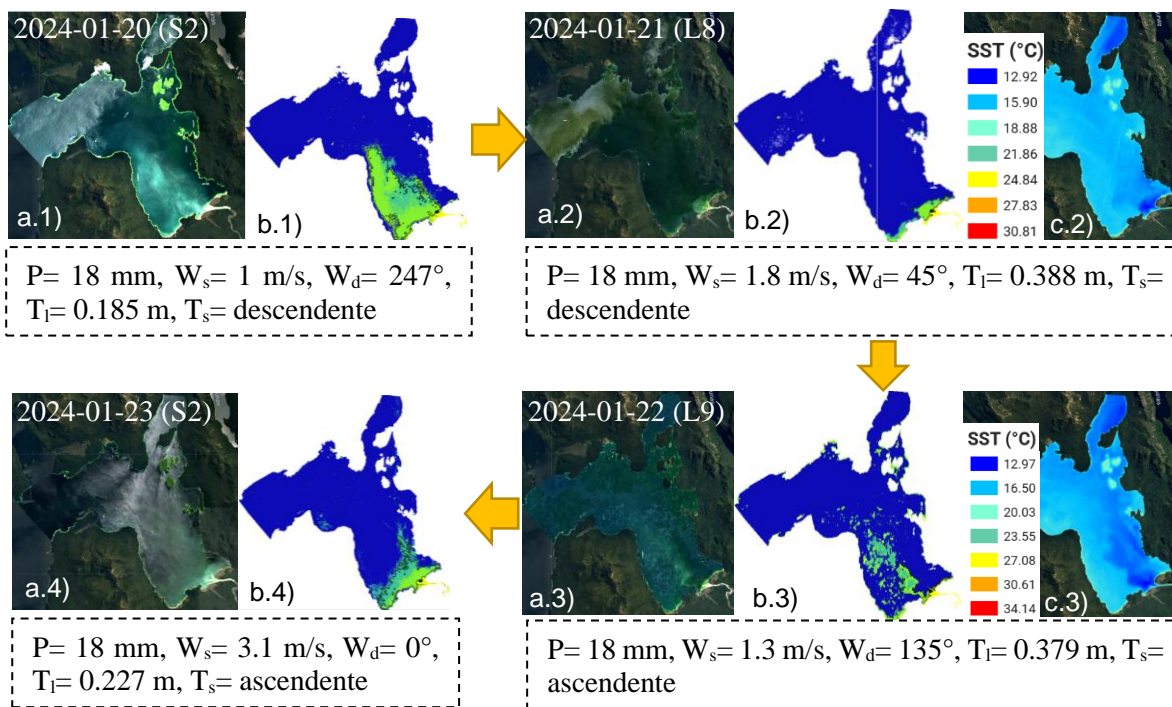


Figura 4 evolución espacial de la pluma de río durante 4 días consecutivos de imágenes satelitales

### 3.2 Análisis de correlación entre la forma de la pluma y las fuerzas físicas

El área de la pluma según cada fecha se utilizó como parámetro cuantitativo para compararse con las magnitudes de los mecanismos físicos que la afectan (ver subsección 2.2). Como primer resultado, la Figura 5 contiene de forma apilada ejemplos de imágenes en color verdadero según fecha (a), sus clasificaciones (b) y un gráfico con las magnitudes de las variables en estudio (c). Esta figura muestra la evolución temporal del área de la pluma con respecto a los datos de precipitación diaria, valores horarios de la marea, magnitud y dirección del viento durante ene-feb2024. El área de la pluma como variable dependiente ( $A$ ) responde a la influencia de las variables independientes ( $P$ ,  $W$ ,  $T$ ). Se sabe que el caudal determina en gran parte el tamaño de la pluma, sin embargo, al no tener registros en terreno decidimos usar la precipitación para representar esa variable. La Figura 5 es el punto de partida para el análisis espacial y temporal de la pluma,

ayudando a determinar las escalas temporales de las variables que influyen en el área cuantificada. Se observa que esta área es mayor cuando ocurren precipitaciones significativas. Sin embargo, el estado de la marea y el viento juegan también un rol importante. Generalmente,  $A$  se mantiene por debajo de  $10 \text{ km}^2$ , pero el caso extremo ocurrió el 04-02-2024 dónde  $A$  es mayor a  $30 \text{ km}^2$  con una  $P$  de  $65.6 \text{ mm}$  (5 días previos) y marea descendente (o vaciante).

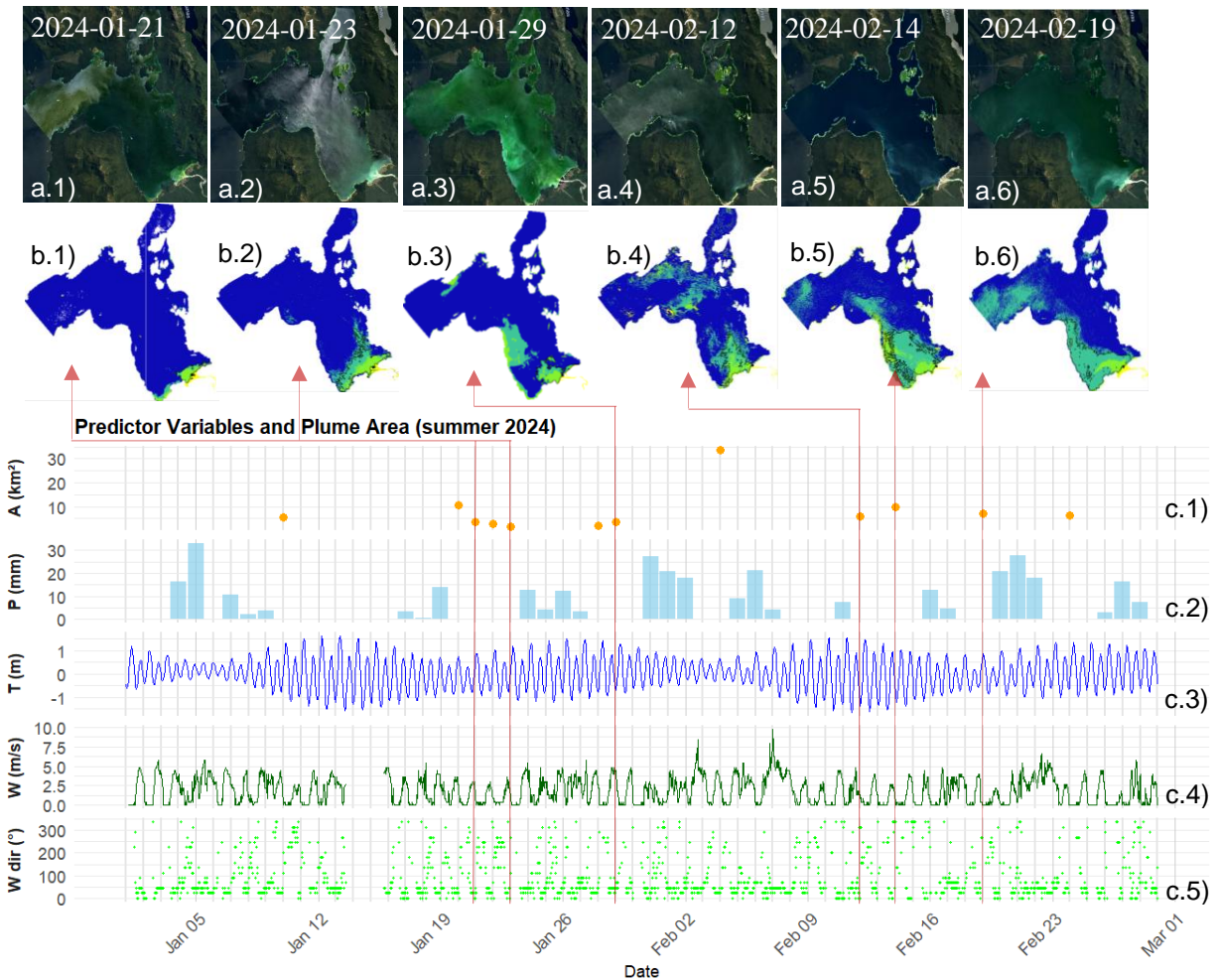


Figura 5 Comparación entre a) imágenes en color verdadero, b) imágenes clasificadas y c) magnitudes de las variables consideradas en el estudio ( $A$ ,  $P$ ,  $T$ ,  $W$ )

Varias fechas muestran un área mayor de la pluma cuando hay mayor precipitación, pero también durante la marea descendente. En contraste, la pluma presenta un área menor si la marea es ascendente (o llenante) y cuando la lluvia es menor a  $18 \text{ mm}$ . A partir de este análisis se determinó que para construir el modelo de regresión lineal múltiple (MRLM), era necesario entender qué la marea es un parámetro instantáneo, la lluvia debía ser acumulada, y el viento debía promediarse en un valor antes del paso del satélite. Físicamente tenía sentido estudiar la influencia de dichas variables sobre el área de la pluma considerando que hay procesos que ocurren y afectan a lo largo del tiempo, y otros de forma instantánea. La Figura 6 muestra la dispersión y coeficiente de Pearson entre el área de la pluma y la lluvia acumulada por 5 días seguidos ( $P$ ), nivel y estado instantáneo de la marea ( $T_l$  y  $T_s$ ), y magnitud y dirección del viento promedio 3 h antes del paso del satélite ( $W_s$  y  $W_d$ ).

Con estos datos, se construye el MRLM descrito en 2.3.3, utilizando dichas variables. El resumen de pruebas para encontrar el modelo con mejor ajuste se muestra en la Tabla 2, considerando el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$  ajust.), probabilidad (Valor p) y criterio de Akaike (AIC).

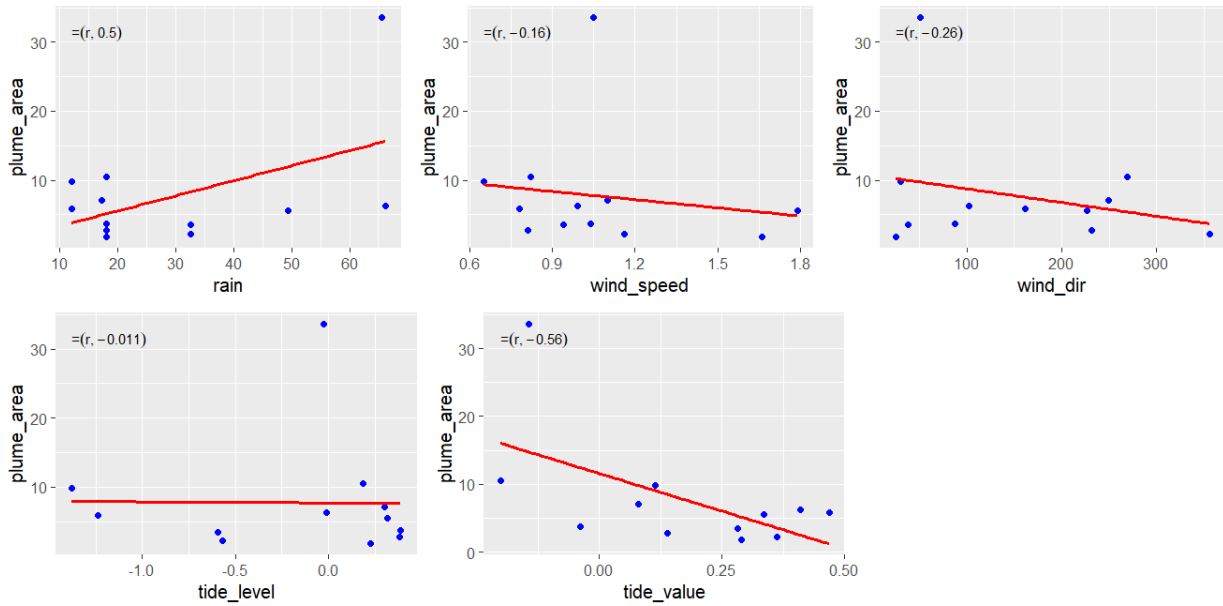


Figura 6 gráficos de dispersión entre la variable dependiente (A) y las variables predictoras (P, T, W)

Tabla 2 Combinación de variables usadas para explicar mejor ajuste del MRLM

Modelo	Combinación de variables	$R^2$	$R^2$ ajust.	Valor p	AIC
M1	P	0.254	0.179	0.0947	87.2
M2	P + $T_s$	0.628	0.545	0.0117	80.8
M3	P + $T_s$ + $W_s$	0.657	0.528	0.0290	81.9
<b>M4</b>	<b>P + <math>T_1</math> + <math>T_s</math> + <math>W_s</math></b>	<b>0.808</b>	<b>0.699</b>	<b>0.0118</b>	<b>76.9</b>
M5	P + $T_1$ + $T_s$ + $W_s$ + $W_d$	0.809	0.650	0.0362	78.8
M6	$T_1$ + $T_s$	0.374	0.235	0.1210	87.1
M7	$T_1$ + $T_s$ + $W_s$	0.415	0.196	0.2090	88.3
M8	P + $T_1$	0.270	0.108	0.2420	88.9
M9	P + $T_s$ + $W_d$	0.655	0.526	0.0296	81.9

Según criterio del  $R^2$  ajustado, criterio AIC e interpretando la física de plumas de río, el modelo que mejor explica el área de la pluma como variable dependiente, es el modelo M4 para las 12 imágenes analizadas. Las variables que influyen de forma significativa en el área de la pluma del río Marchant en orden de importancia son: el estado de la marea, la precipitación, el nivel de la marea y finalmente la velocidad del viento. Matemáticamente se expresa según la Ecuación (8).

$$A (km^2) = 7.72 + 5.70P - 7.54T_s - 4,86T_l + 1.39W_s + 4.72 \quad (8)$$

### 3.3 Validación de los datos satelitales con datos in situ

Los sensores instalados en los puntos de la Figura 1 midieron salinidad y temperatura, que se compararon con datos puntuales de reflectancia satelital en cada imagen. La Figura 7 muestra la

variación instantánea de la salinidad según cada anclaje, mientras que la  $R_{rs}$  se observa con puntos color verde, indicando generalmente que los valores más altos de  $R_{rs}$  ocurren cuando la salinidad es baja. Esto confirma el uso de datos espectrales satelitales en detección de plumas de río. Para reforzarlo, la Figura 8 muestra la correlación negativa entre ambas variables. Por lo tanto, el uso de datos de reflectancia para detectar y estudiar plumas de río en fiordos es robusto y confiable.

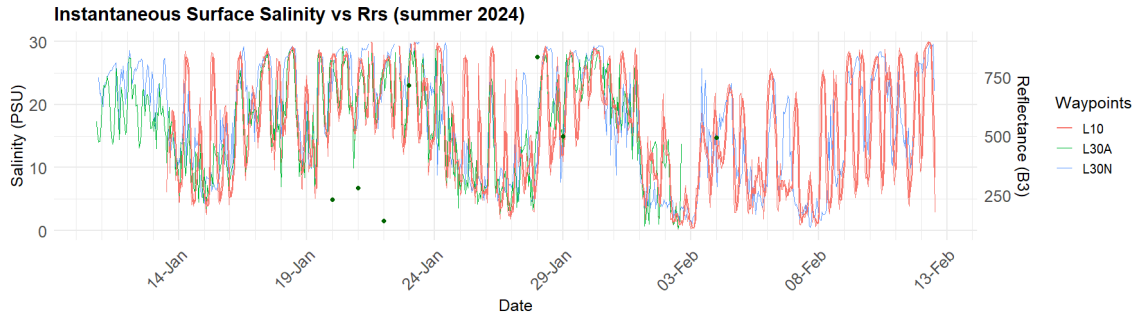


Figura 7 Valores instantáneos de salinidad en puntos de anclaje durante ene-feb 2024 contra valores de  $R_{rs}$

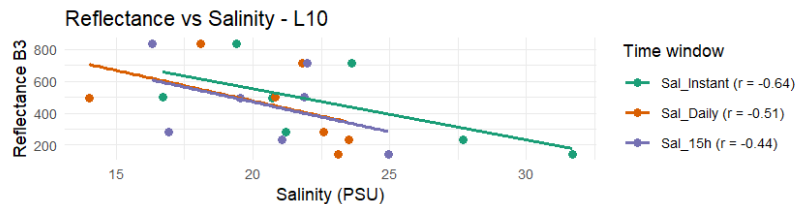


Figura 8 Correlación entre datos de salinidad para distintas ventanas temporales contra datos de reflectancia

## 4 CONCLUSIONES

Esta investigación entrega información cuantitativa de las características superficiales de una pluma de río en la Patagonia chilena, integrando información satelitales e in situ. Si bien era una muestra pequeña de imágenes satelitales, la aplicación de la metodología no está limitada al uso de S2, y L8/9. Sin embargo, el análisis del fiordo de Melimoyu requiere sensores de alta resolución espectral para lograr capturar espacialmente la pluma de río. Los resultados muestran la alta variabilidad espacial y temporal que tiene la pluma del río Marchant, capaz de modificar su forma espacial en días (e incluso en horas) según la interacción de las fuerzas físicas que influyen sobre ella. Este hallazgo es de gran relevancia en zonas de difícil acceso, donde la medición y monitoreo del transporte de agua dulce hacia el mar es costoso y poco representativo espacialmente. Entender la distribución espacial de la salinidad, la temperatura y la turbidez del agua en fiordos ayuda a cuantificar su influencia sobre procesos biológicos, químicos y ecológicos, además de cuantificar tasas de transporte de sedimentos, nutrientes y contaminantes que afectan el ecosistema costero. Este estudio es aplicable en otras escalas temporales e incluso en otros fiordos patagónicos, demostrando la reproducibilidad de la metodología que contribuye a un avance en el conocimiento del transporte de plumas de río y su estudio mediante técnicas de teledetección.

## 5 AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue desarrollado con fondos del proyecto ONR-Global Grant N62909-23-1-2004 y beca ANID 2024.

## REFERENCIAS

- Bakun, A., & Nelson, C. S. (1991).** The seasonal cycle of wind-stress curl in subtropical eastern boundary current regions. *Journal of Physical Oceanography*, *21*(12), 1815–1834.
- Basdurak, N. B., Largier, J. L., & Nidzieko, N. J. (2020).** Modeling the Dynamics of Small-Scale River and Creek Plumes in Tidal Waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *125*(7), e2019JC015737. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019JC015737>
- Das, N., Bhattacharjee, R., Choubey, A., Agnihotri, A. K., Ohri, A., & Gaur, S. (2022).** Analysing the change in water quality parameters along river Ganga at Varanasi, Mirzapur and Ghazipur using Sentinel-2 and Landsat-8 satellite data during pre-lockdown, lockdown and post-lockdown associated with COVID-19. *Journal of Earth System Science*, *131*(2), 102. <https://doi.org/10.1007/s12040-022-01825-0>
- Dyba, K., Ermida, S., Ptak, M., Piekarczyk, J., & Sojka, M. (2022).** Evaluation of Methods for Estimating Lake Surface Water Temperature Using Landsat 8. *Remote Sensing*, *14*(15). <https://doi.org/10.3390/rs14153839>
- Flanders Marine Institute (VLIZ), & Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). (2021). <https://www.ioc-sealevelmonitoring.org>.
- Flores, R. P., Lara, C., Saldías, G. S., Vásquez, S. I., & Roco, A. (2022).** Spatio-temporal variability of turbid freshwater plumes in the Inner Sea of Chiloé, northern Patagonia. *Journal of Marine Systems*, *228*, 103709.
- Garg, V., Aggarwal, S. P., & Chauhan, P. (2020).** Changes in turbidity along Ganga River using Sentinel-2 satellite data during lockdown associated with COVID-19. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *11*(1), 1175–1195. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1782482>
- Kilcher, L. F., & Nash, J. D. (2010).** Structure and dynamics of the Columbia River tidal plume front. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *115*(C5). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2009JC006066>
- Lara, C., Miranda, M., Montecino, V., & Iriarte, J. L. (2010).** Chlorophyll-a MODIS mesoscale variability in the Inner Sea of Chiloé, Patagonia, Chile (41-43° S): Patches and gradients? *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, *45*(2), 217–225.
- Lihan, T., Saitoh, S.-I., Iida, T., Hirawake, T., & Iida, K. (2008).** Satellite-measured temporal and spatial variability of the Tokachi River plume. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *78*(2), 237–249.
- Ma, Y., Song, K., Wen, Z., Liu, G., Shang, Y., Lyu, L., Du, J., Yang, Q., Li, S., & Tao, H. (2021).** Remote sensing of turbidity for lakes in northeast China using Sentinel-2 images with machine learning algorithms. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *14*, 9132–9146.
- Mendes, R., Saldías, G. S., DeCastro, M., Gómez-Gesteira, M., Vaz, N., & Dias, J. M. (2017).** Seasonal and interannual variability of the Douro turbid river plume, northwestern Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, *194*, 401–411.
- Moller, G. S. F., Kampel, M., & de Moraes Novo, E. M. L. (2010).** Spectral classification of water masses under the influence of the Amazon River plume. *Acta Oceanologica Sinica*, *29*(3), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s13131-010-0031-1>
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002).** Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Computers & Geosciences*, *28*(8), 929–937.
- Piñones, A., Valle-Levinson, A., Narváez, D. A., Vargas, C. A., Navarrete, S. A., Yuras, G., & Castilla, J. C. (2005).** Wind-induced diurnal variability in river plume motion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *65*(3), 513–525.
- R Core Team. (2022).** *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. (4.2.2).
- Saldías, G. S., Hernández, W., Lara, C., Muñoz, R., Rojas, C., Vásquez, S., Pérez-Santos, I., & Soto-Mardones, L. (2021).** Seasonal variability of SST fronts in the Inner Sea of Chiloé and its adjacent coastal ocean, northern Patagonia. *Remote Sensing*, *13*(2), 181.
- Saldías, G. S., Largier, J. L., Mendes, R., Pérez-Santos, I., Vargas, C. A., & Sobarzo, M. (2016).** Satellite-measured interannual variability of turbid river plumes off central-southern Chile: Spatial patterns and the influence of climate variability. *Progress in Oceanography*, *146*, 212–222.
- Simon, R. N., Tormos, T., & Danis, P.-A. (2014).** Retrieving water surface temperature from archive LANDSAT thermal infrared data: Application of the mono-channel atmospheric correction algorithm over two freshwater reservoirs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *30*, 247–250.