UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE BARRAS DE ARENA EN DESEMBOCADURAS RIO MAIPO Y LAGUNA CÁHUIL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES

Memoria de Título presentada por

Agustín Eduardo Medina Vergara

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Raúl Pedro Flores Audibert

Octubre de 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis morfológico de barras de arena en desembocaduras rio Maipo y laguna Cáhuil mediante imágenes satelitales

Nombre del candidato(a): Agustín Eduardo Medina Vergara

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Casa Central **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Pedro Flores Audibert, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

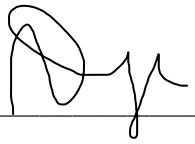
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 03/11/2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 03/11/2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA MEMORIA:

ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE BARRAS DE ARENA EN DESEMBOCADURAS RIO MAIPO Y LAGUNA CÁHUIL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES

AUTOR:

AGUSTÍN EDUARDO MEDINA VERGARA

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	Nombre	Firma
Prof. Guía	.....	.....
Miembro 1 Comisión	.....	.....
Miembro 2 Comisión	.....	.....

Valparaíso, Chile, octubre de 2026

ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE BARRAS DE ARENA EN DESEMBOCADURAS RIO MAIPO Y LAGUNA CÁHUIL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES

Agustín Medina[1], Raúl Flores[1]

[1] Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Las desembocaduras estuarinas son reconocidas como sistemas de gran productividad biológica y valor socioeconómico en donde las barras de arena presentan un rol importante en la regulación del sistema. Por ello, resulta fundamental comprender su interacción con los procesos fluviales y marinos, especialmente en sistemas altamente dinámicos como la desembocadura del río Maipo y el estuario Cáhuil, en la zona central de Chile. La presente investigación tuvo como objetivo caracterizar la evolución temporal de la barra de arena mediante técnicas de teledetección y analizar su relación con distintos forzantes hidrológicos. Para ello, se utilizaron imágenes satelitales de la misión Sentinel-2 procesadas con el índice NDWI, lo que permitió identificar y caracterizar geométricamente la barra de arena a través de parámetros como área, perímetro, largo y ancho discretizado. Posteriormente, las métricas obtenidas fueron comparadas con registros de oleaje y caudal mediante análisis temporales y correlacionales. Los resultados evidencian una alta variabilidad morfológica de la barra, observándose tendencias de acreción durante verano y erosión en invierno. Además, se identificó que caudales medios diarios que rondan los 300 m^3/s favorecen procesos de ruptura desde el interior del sistema. Las mejores correlaciones se obtuvieron al considerar la interacción conjunta entre ambos forzantes, evidenciando una relación no lineal y compleja del sistema. En conclusión, esta investigación aporta antecedentes relevantes para la comprensión y gestión de desembocaduras en la zona central de Chile, además de proponer una metodología reproducible basada en teledetección para el monitoreo de sistemas estuarinos similares.

Palabras claves: teledetección, barra de arena, morfología, estuario.

1 Contextualización

Los estuarios constituyen un entorno de intercambio entre agua dulce y agua salada, caracterizados por dinámicas hidrológicas y sedimentarias (Elliott & Whitfield, 2011). En estos sistemas interactúan el caudal de descarga, mareas, oleaje y transporte litoral de sedimentos, dando lugar a patrones espaciales y temporales variados que influyen sobre procesos ecológicos y servicios ecosistémicos (Day et al., 2012), como su función de protección ante eventos extremos. Dada su ubicación intermedia entre tierra y mar, los estuarios son particularmente sensibles a perturbaciones tanto naturales como humanas, tales como variaciones climáticas, cambios en el nivel del mar, procesos de urbanización y regulación de caudal destacan su capacidad para modificar este entorno. En este contexto, comprender su morfodinámica resulta esencial para una gestión adecuada, especialmente bajo el escenario actual de cambio climático acelerado, donde los fenómenos hidrometeorológicos adquieren mayor frecuencia e intensidad (Temmerman et al., 2013).

Dentro de la dinámica de un estuario, las barras de arena que se forman en su desembocadura desempeñan un papel central en la conectividad y en la respuesta hidrodinámica del sistema. La presencia y morfología de una barra regula la interacción entre cuerpos de agua y, por ende, impacta directamente la ecología y el uso humano del estuario. Cambios en la morfología como altura, ancho/largo, forma y eventos de cierre/apertura de la barra, pueden transformarse en alteraciones sobre la calidad del agua, hábitats de humedales y la seguridad de estructura costera (Ranasinghe & Pattiaratchi, 2003; Blott et al., 2006). En consecuencia, estudios como Tong et al. (2020) han desarrollado métodos basados en teledetección para identificar y cuantificar estas dinámicas, subrayando su relevancia para el seguimiento y gestión costera.

En el contexto chileno, los estuarios del Río Maipo y la Laguna de Cáhuil son ejemplos representativos de estuarios “bar-built” y estacional, respectivamente, donde el cuerpo de arena condiciona el estado hidrodinámico y ecológico. El estuario del Maipo, ubicado entre comunas Santo Domingo y San Antonio, incluye un humedal que ha cobrado relevancia debido a su valor para aves migratorias y su función como amortiguador frente a eventos costeros (Humedal Río Maipo, s. f.). En los últimos años se han documentado episodios de bajo caudal que han favorecido el embancamiento y la desconexión parcial del río con el mar. Estas condiciones alteradas aumentan la susceptibilidad del sistema a intrusión salina y a la pérdida de conectividad fluvio-marina (COPSA, 2023).

La Laguna de Cáhuil, en la Región de O’Higgins, es un caso de estuario cerrado estacionalmente por una barra que se forma en períodos de bajo caudal y transporte litoral fuerte, que se abre en períodos de lluvias y mayor descarga. En la última década se han detectado cambios en la dinámica y frecuencia de estos eventos, generando preocupación en la comunidad por la prolongación de episodios de estancamiento y sedimentos acumulados. Estas transformaciones repercuten en la funcionalidad del humedal y en el riesgo para usos productivos y turísticos locales (Proyecto GEF Humedales Costeros, 2021).

Para monitorizar la morfodinámica costera y estuarina, las herramientas de observación satelital y técnicas de teledetección han adquirido un rol fundamental. Estas permiten analizar la evolución de las barras y de la línea de costa con una cobertura espacial amplia, dando posibilidad a identificación de tendencias de acreción y erosión, desplazamientos longitudinales o transversales de la barra, y variaciones en la extensión de los cuerpos de agua. El acceso a plataformas como Landsat, Sentinel-2 y PlanetScope, junto con métodos de procesamiento digital de imágenes (índices espectrales, clasificación supervisada, segmentación morfológica y análisis multitemporal), presenta ventajas como rápido acceso con información de objetos multi-espacial, multi-temporal, multi-espectral y sin costo (Tong et al., 2020), lo que favorece el seguimiento de la dinámica costera, incluso en zonas donde la observación directa o mediciones in situ resultan limitadas o costosas.

En suma, estudiar la variación morfológica de las zonas de estudio mencionadas no solo aporta conocimiento sobre procesos costeros y estuarinos, sino también, información relevante para gestión y adaptación frente a cambios climáticos e hidrológico. Un análisis correlacional permitirá identificar patrones críticos, abordando una necesidad de alto valor para comunidades y ecosistemas de la zona central.

2 Marco teórico

2.1 Estuarios

Los estuarios son sistemas de transición entre ambientes fluviales y marinos, donde confluyen dinámicas hidrológicas, sedimentarias y ecológicas de gran complejidad. En estos espacios, el agua dulce proveniente de ríos interactúa con el agua salada del mar, generando un gradiente de salinidad y condiciones ambientales únicas (Dyer, 1997). Debido a esta interacción, los estuarios son reconocidos como ecosistemas de alta productividad biológica y gran valor socioeconómico, ya que actúan como áreas de crianza de numerosas especies marinas, zonas de amortiguamiento frente a eventos extremos, y espacios que ofrecen recursos pesqueros, recreativos y turísticos (Elliott & Whitfield, 2011).

Un estuario puede definirse como un cuerpo de agua costero parcialmente confinado, con libre conexión al mar abierto, dentro del cual el agua marina se diluye con agua dulce proveniente de la cuenca de drenaje (Pritchard, 1967). En ellos actúan múltiples procesos físicos:

- Hidrodinámicos, relacionados con caudales fluviales, mareas y oleaje.
- Sedimentarios, vinculados al desplazamiento de sedimentos desde ríos hacia el mar.
- Ecológicos, que determinan la distribución de comunidades biológicas.

El equilibrio entre estos procesos determina la morfodinámica estuarina, es decir, la manera en que la forma física del estuario cambia en el tiempo (Cooper, 2001).

En un contexto de cambio climático y creciente presión antrópica, los estuarios se han convertido en sistemas altamente vulnerables. El aumento del nivel del mar, la alteración del régimen de precipitaciones y la construcción de infraestructura costera han modificado de manera significativa la dinámica de muchos sistemas en el mundo (Robins et al., 2015). Estos cambios inciden directamente en la morfodinámica estuarina, la conectividad río–mar y la calidad de humedales asociados, afectando sobre el hábitat natural, la intrusión salina y calidad del agua debido a tiempos de residencia (Kennish, 2002). Un aspecto clave que se relaciona directamente con esta dinámica del sistema corresponde a la formación de barras de arena en la desembocadura del cuerpo de agua.

2.2 Barras de arena en estuarios

Las barras arenosas son acumulaciones de sedimentos que se forman en la boca de estuarios producto de la interacción entre el aporte fluvial y los procesos marinos. Dependiendo de las condiciones hidrodinámicas y sedimentarias, las barras pueden presentar diferentes morfologías y comportamientos. Suelen originarse cuando el caudal fluvial es insuficiente para mantener la boca abierta frente al transporte litoral de arena inducido por las olas y corrientes costeras. En estas condiciones, la arena transportada lateralmente se deposita en la desembocadura, generando un cordón que puede cerrar parcial o totalmente la conexión con el mar (Fitzgerald et al., 2001).

En general, su dinámica está controlada por:

- Caudal fluvial: en períodos de altas lluvias, los ríos ejercen suficiente energía para erosionar y abrir la barra.
- Oleaje y mareas: favorecen la acumulación de sedimentos y el cierre progresivo.
- Eventos extremos: tormentas y crecidas pueden modificar de manera súbita la morfología de la barra.

La presencia y variación morfológica de las barras condiciona diferentes aspectos; por un lado, la entrada de agua salada, afectando la salinidad y estratificación interna. También los tiempos de residencia del agua, que determinan procesos de calidad hídrica. Por otro lado, la conectividad ecológica, importante para especies que dependen del intercambio con el mar. Y en algunos casos riesgo para comunidades aledañas al cuerpo de agua, ya que un cierre prolongado puede incrementar la posibilidad de inundaciones aguas arriba (Ranasinghe & Pattiaratchi, 2003). Por lo tanto, el estudio de las barras de arena resulta fundamental para comprender estuarios y gestionar una adecuada adaptación.

2.3 Estudios relacionados

A nivel global, numerosos estudios han abordado la dinámica de barras de arena en estuarios. En Corea, por ejemplo, se ha analizado la evolución morfológica de la barra del estuario Han, cuya dinámica depende principalmente de la interacción entre marea y precipitaciones (Yang & Ouchi, 2012). En Estados Unidos, Orescanin et al. (2021) y Behrens et al. (2013) demostraron que la migración de la boca de descarga y los episodios de cierre responden a la combinación de descargas fluviales y condiciones de oleaje en múltiples escalas de tiempo. Otros trabajos en Australia y Sudáfrica han profundizado en la dinámica de los estuarios bar-built, señalando que su estabilidad depende de balances energéticos entre los aportes continentales y marinos (Hume et al., 2007; Cooper, 2001).

A partir de las investigaciones, se ha evidenciado el uso de distintas metodologías para caracterizar este entorno, entre los que se encuentran: monitoreos de campo mediante levantamientos topográficos, batimetrías o uso de drones (Orescanin et al., 2021; Ferrentino et al., 2023; Young et al., 2021). Modelación numérica para simular procesos morfodinámicos (Behrens et al., 2013; Fagherazzi et al., 2015; Slinger, 2016; Xie et al., 2021). Y Teledetección satelital para el seguimiento de línea de costa, barras u otros cuerpos (Yang & Ouchi, 2012; Oyedotun & Nedd, 2023; Tanaka et al., 2016; Ferrentino et al., 2023; Deroin et al., 2012).

2.4 Contexto nacional

En Chile central, los estuarios presentan dinámicas similares a los descritos en otros países, destacando la importancia de barras de arena en la regulación de ecosistemas locales y en la vida de comunidades que dependen de ellos. Algunas zonas que son de interés para este estudio son:

- Estuario del Río Maipo: localizado en la Región de Valparaíso, constituye un sistema altamente influenciado por la variabilidad del caudal fluvial. Estudios señalan que la sequía prolongada de la última década ha favorecido la intrusión salina y ha aumentado el tiempo de residencia del agua, afectando la calidad ecológica del estuario (Soto-Rivas et al., 2024). La barra de arena en la desembocadura juega un papel determinante en estos procesos. La forma general de este elemento se puede notar en la Figura 1.



Figura 1. Barra de arena en estuario Maipo. Fuente: Fundación Terram (09/09/2015).

- Estuario Cáhuil: situado en la Región de O'Higgins, corresponde a un estuario que se cierra durante el verano debido al bajo caudal y a la acción del transporte litoral, y que se abre en invierno con las lluvias. Estas variaciones estacionales modifican drásticamente la salinidad, la estratificación y los hábitats del sistema (Andrade & Grau, 2005). La Figura 2 muestra la barra de arena en este sector, siendo la principal causante de estas variaciones del estuario.



Figura 2. Barra de arena en estuario Cáhuil. Fuente: GEF Humedales (Ministerio del Medio Ambiente, 2023).

2.5 Teledetección satelital

El avance de la teledetección ha permitido un seguimiento más preciso de la morfodinámica costera y estuarina. El uso de imágenes satelitales (Landsat, Sentinel, PlanetScope) ha demostrado ser una herramienta eficiente para observar diversos procesos como erosión, acreción y migración de barras con amplia cobertura espacial y temporal.

A través de índices espectrales como NDWI (Normal Difference Water Index) y MNDWI (Modified NDWI) es posible identificar y diferenciar superficies de agua, arena y vegetación, facilitando la delimitación del cuerpo a estudiar (Xu, 2006). Asimismo, algoritmos de segmentación morfológica y clasificación supervisada permiten extraer métricas geométricas que describen su evolución (Luijendijk et al., 2018; Qi et al., 2021).

En comparación con otras metodologías mencionadas, la teledetección ofrece ventajas considerables:

- Cobertura espacial amplia y continua
- Cobertura temporal amplia, posibilitando análisis históricos mediante series de tiempo
- Disponibilidad pública y bajo costo

Sin embargo, también presenta limitaciones relacionadas con la resolución espacial y la interferencia atmosférica.

2.6 Enfoque del estudio

La literatura internacional y nacional coincide en que las barras de arena tienen gran influencia sobre la dinámica estuarina, determinando la conectividad y la respuesta ecológica de los sistemas. No obstante, persisten vacíos relevantes. Por el lado nacional, los estudios sobre estuarios como el Maipo y Cáhuil se

han centrado en aspectos hidrológicos o ecológicos, pero la cuantificación de la variación morfológica de las barras es escasa. Por otro lado, el uso de imágenes satelitales se ha orientado a líneas de costa y dinámica litoral, pero la aplicación sobre barras de arena se queda atrás.

En este contexto, el problema de investigación viene asociado a la barra de arena que, a pesar de resultar importante para la dinámica de estuarios, para los casos del rio Maipo y laguna de Cáhuil no se cuenta con estudios basados en información satelital, dejando un vacío en análisis de las variaciones morfológicas recientes. Esto limita la capacidad de gestión costera en un contexto de cambios acelerados en los procesos hidrodinámicos que se involucran.

Para abordar este problema, se propone analizar la variación morfológica de las barras de arena en los estuarios Maipo y Cáhuil, mediante imágenes satelitales de alta resolución como Sentinel-2, aplicando técnicas de índices espectrales para la delimitación de superficies de agua y arena. Los resultados se integrarán con información hidrológica para interpretar los patrones de cambio y su relación con los factores.

3 Objetivos

3.1 General

Analizar la variación morfológica de barras de arena en los estuarios Maipo y Cáhuil a partir de información satelital desde 2016 hasta 2025, viendo su relación con los factores hidrológicos para identificar patrones en su dinámica.

3.2 Específicos

- Identificar los principales factores que influyen en la dinámica morfológica de barras de arena, a partir de literatura especializada y datos hidrológicos disponibles.
- Desarrollar una metodología semiautomatizada de procesamiento de imágenes satelitales para delimitar las barras de arena y obtener métricas asociadas a su morfología.
- Caracterizar las variaciones espacio-temporales de las barras de arena, buscando correlación con los forzantes hidrológicos y establecer valores umbral que determinen el comportamiento.

4 Datos utilizados

- Imágenes satelitales

Para analizar la evolución morfológica de los sitios de interés se utilizan imágenes provenientes de la misión Sentinel-2, obtenidas a partir de la plataforma Copernicus. Se selecciona la totalidad de imágenes comprendidas entre los años 2016 y 2025, con resolución espacial de 10 metros y frecuencia temporal de máximo cada 5 días. Además, estas contemplan formato tipo ráster flotante, con índice espectral NDWI aplicado. Para la zona del estuario en Cáhuil se consideran archivos desde 2020 hasta 2025.

- Caudal

Los caudales de rio son obtenidos de la base de datos de la Dirección General de Aguas (DGA), utilizando registros de las estaciones "Río Maipo en Cabimbao" y "Estero Nilahue en Santa Teresa". Empleando datos de caudal medio diario para el mismo periodo entre 2016 y 2025.

Por otro lado, el estuario Maipo también cuenta con un registrador de datos HOBO ubicado en el muelle cerca de su desembocadura, en donde se puede adquirir datos como conductividad. Se tiene registros desde agosto de 2024 hasta marzo de 2026, con mediciones cada 10 minutos.

- Oleaje

Los datos de oleaje son obtenidos del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), utilizando los datos de "Boya San Antonio", la cual posee registro para los años 2024 y 2025. Luego, para completar el periodo restante se obtienen datos del reanálisis ERA5, procurando que las coordenadas del registro coincidan con la ubicación de la boya. Se obtienen variables de altura significativa y período del oleaje con frecuencia horaria. Para el análisis estos datos se llevan a escala diaria considerando promedio, máximos o mínimos, con tal de hacerlo comparable con las demás variables.

5 Metodología

A modo general, la investigación propone el estudio de los cambios en barras de arena basado en el uso de teledetección satelital, en complemento con las mediciones de diversos factores hidrológicos disponibles. Para buscar correlacionar una barra, resulta esencial cuantificar sus características mediante diversas métricas. A continuación, se detallan las partes más relevantes del proceso.

1. Procesamiento imágenes satelitales

El procesamiento de las imágenes se basa en el cálculo del índice NDWI, correspondiente a una combinación de bandas de reflectancia, permitiendo resaltar cuerpos de agua y diferenciarlos de vegetación/tierra. Se utiliza un umbral de 0.6 para la clasificación agua-tierra, determinado empíricamente a partir de la inspección de todos los casos. Luego, gracias a herramientas en Python se generan máscaras binarias para la distinción de cuerpos. Posteriormente con operaciones de morfología matemática, como apertura y cierre, se elimina ruido y discontinuidades existentes. Además, se establece un umbral de área mínima de 3000 [m²] para descartar máscaras pequeñas y asegurar las estructuras relevantes.

2. Extracción de barra y cálculo de parámetros

Ya con los polígonos generados dentro de una imagen, se selecciona aquel que interseca una línea definida como el origen de la barra, esto debido a una inspección previa de las imágenes en donde se determina una zona constante en el tiempo.

Una vez determinada la barra, se calculan los principales parámetros geométricos:

- Área: calculada directamente a partir de la superficie del polígono.
- Perímetro: longitud del contorno del polígono.
- Largo: determinado como el eje mayor del rectángulo que contiene la barra.
- Ancho: estimado mediante secciones perpendiculares al eje mayor. Estas secciones se generan a intervalos regulares 20 metros a lo largo de la barra, calculando la longitud que existe al intersecar los bordes del polígono. Esto permite capturar la variabilidad espacial.

Finalmente, se generan figuras que permiten visualizar los parámetros asociados a la barra detectada, además de compilar la información de cada fecha en un archivo.

3. Análisis temporal

Se realiza una clasificación de la información obtenida, corrigiendo en casos que sea aplicable, o bien, descartando aquellas en donde no se detecta de manera adecuada la barra debido a problemas por nubosidad o mucho sedimento en suspensión del agua. Con la totalidad de datos filtrados, se obtienen series de tiempo que permiten analizar la evolución temporal de cada métrica. Luego, es posible trabajar con valores agrupados mensual o estacionalmente, obteniendo promedios y medidas de dispersión con tal de identificar patrones.

4. Relación con forzantes

Debido a que los datos de oleaje por parte del SHOA están incompletos para el período de estudio, se utilizan datos del reanálisis ERA5, los cuales son validados mediante ajustes de regresión lineal con los datos observados disponibles, evaluando la calidad del ajuste mediante el coeficiente de determinación (R^2). Finalmente, para evaluar la influencia de las condiciones externas, se analiza la relación entre los parámetros morfológicos y las variables hidrodinámicas mediante análisis de correlación y diagramas de dispersión, considerando tanto respuestas inmediatas como acumuladas, lo que permite concluir sobre el comportamiento del sistema.

Para el cumplimiento del proceso se propone el diagrama de flujo de la Figura 3, en donde se presenta la relación entre las principales actividades, asociadas a cada objetivo específico.

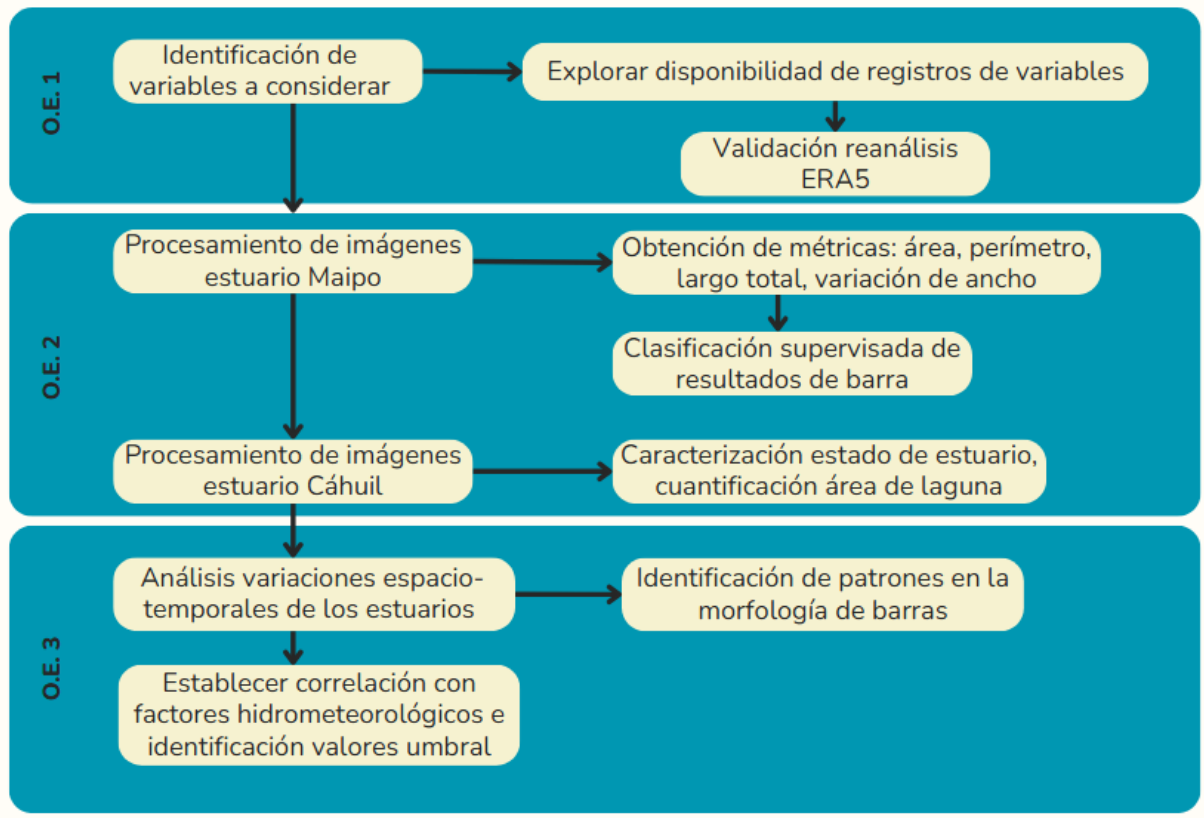


Figura 3. Diagrama de flujo de actividades.

6 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis morfológico de las barras de arena en los estuarios del río Maipo y de la laguna de Cáhuil. El trabajo se estructura en tres segmentos principales:

- La delimitación geométrica y obtención de métricas de la barra ubicada en desembocadura del Maipo a partir de imágenes satelitales.
- La identificación del estado estuarino y su evolución temporal en el sector de Cáhuil, incluyendo algunas métricas a partir de imágenes satelitales.
- La caracterización de las condiciones hidrometeorológicas que podrían influir en la dinámica morfológica observada.

Los análisis se basaron en los resultados de algoritmos en Python desarrollado específicamente para la delimitación semiautomática de barras, medición de variables geométricas y determinación del estado de apertura o cierre del estuario. Complementando con datos de caudal de la Dirección General de Aguas (DGA), sumado al registrador HOBO y datos de oleaje del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), o en su defecto, del reanálisis ERA5.

6.1 Resultados geomorfológicos del estuario del rio Maipo

En primer lugar, es necesario trabajar la serie de imágenes satelitales disponibles desde el año 2016 hasta 2025 y lograr una adecuada delimitación de la barra de arena. En la Figura 4 se presenta un ejemplo de la delimitación generada obtenida a partir del algoritmo Python realizado, en donde es posible observar una buena correspondencia entre el contorno detectado y la forma real de la barra.

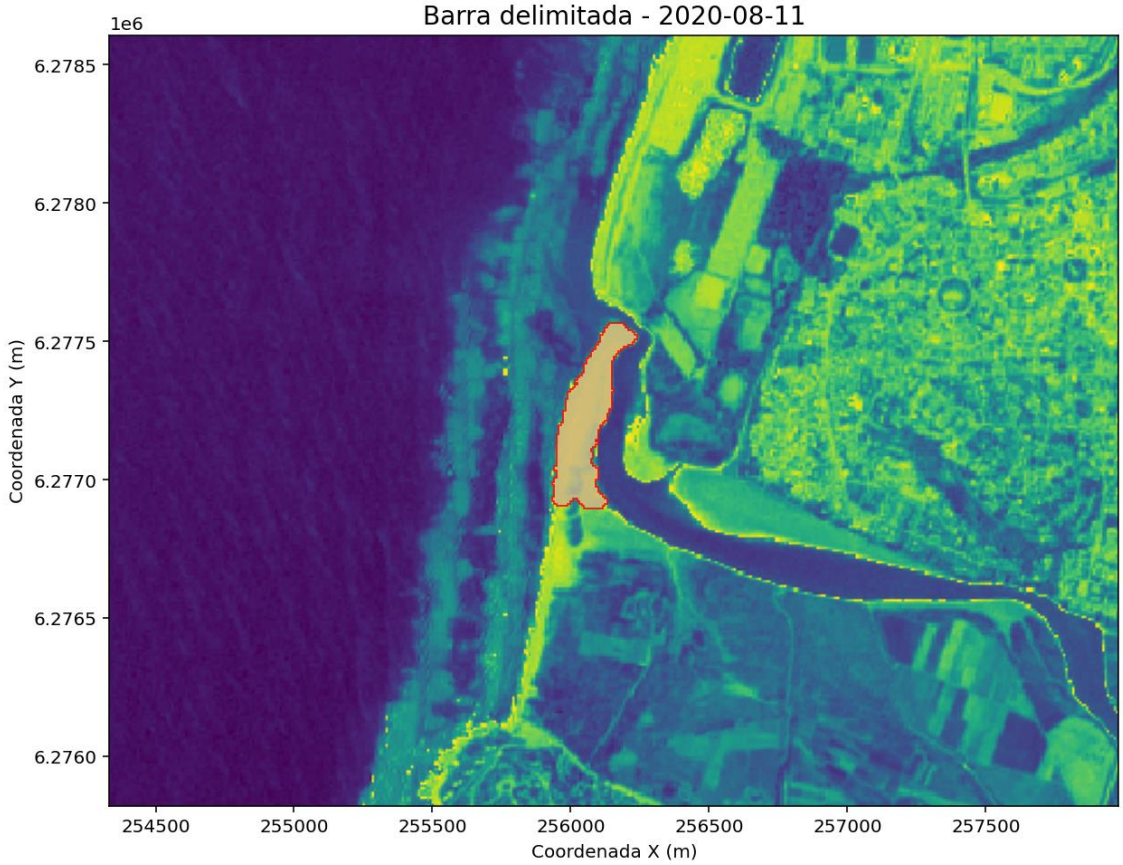


Figura 4. Delimitación barra de arena en desembocadura rio Maipo, elaborado a partir de imagen de Sentinel-2.

Gracias a que las imágenes son georreferenciadas, esta característica permite calcular diversas métricas geométricas como área, perímetro y largo de la barra para cada fecha disponible. De esta manera, en la Figura 5 se resume la evolución temporal de estas variables.

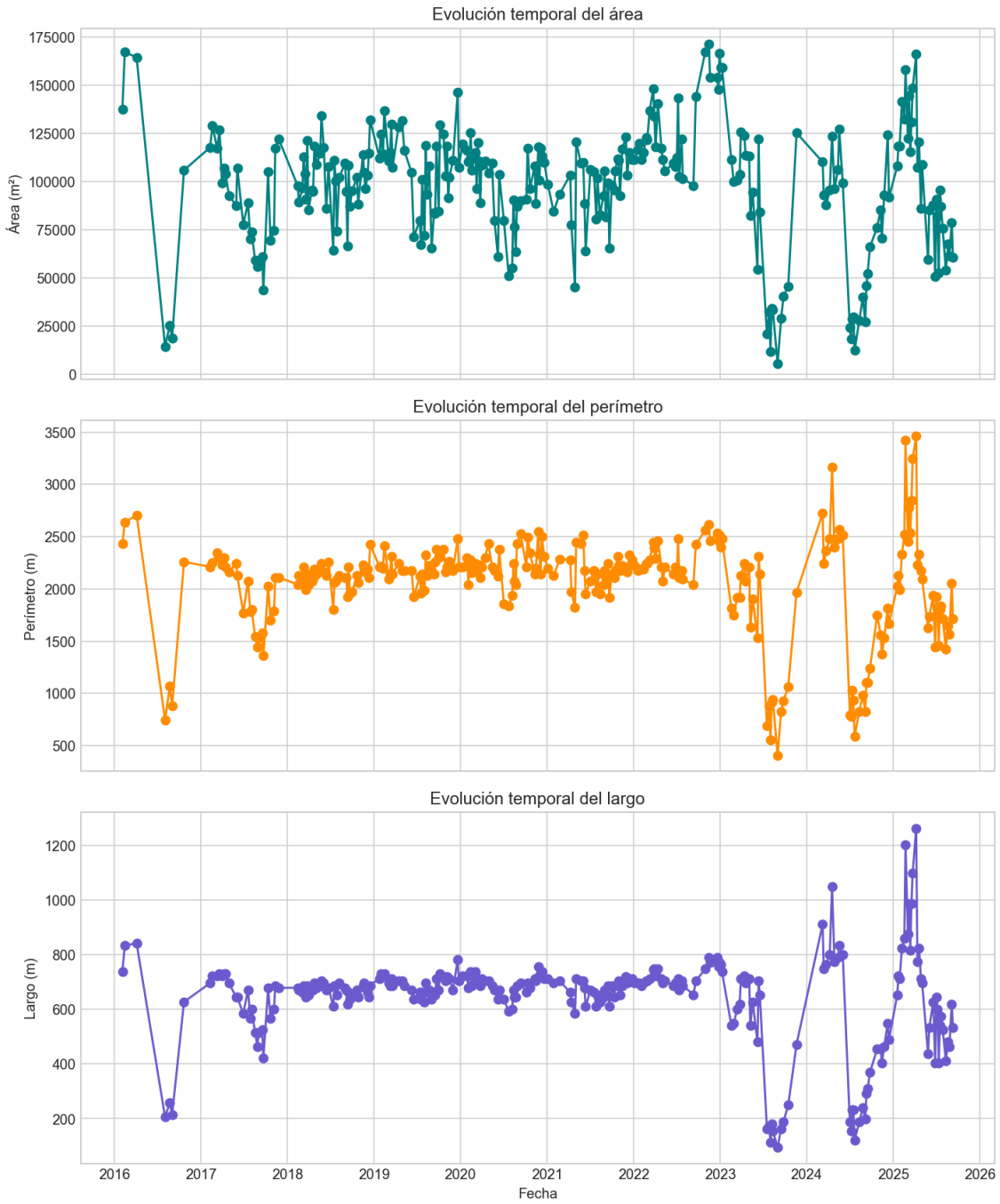


Figura 5. Evolución temporal de métricas de barra de arena en desembocadura rio Maipo.

En términos generales, el área de la barra muestra variaciones estacionales, con incrementos en verano y reducciones en invierno (mitad del año), más aún a mediados de 2016, 2023 y 2024, donde se evidencian los valores mínimos de estas métricas en toda la serie temporal, lo cual puede estar relacionado a eventos extremos. Asimismo, el perímetro y largo siguen las mismas fluctuaciones de incremento/reducción, indicando la directa relación entre estas métricas.

Por otro lado, dada la variedad de tamaños y formas que presenta la barra en el periodo considerado, resulta de interés evidenciar la dispersión del ancho en secciones discretizadas a lo largo del eje principal del elemento. A modo de ilustrar esto, se presenta la Figura 6, en donde se puede notar el eje principal, a partir del cual trazan rectas perpendiculares cada 20 metros, en donde se obtiene el valor particular del ancho dentro de la superficie delimitada.

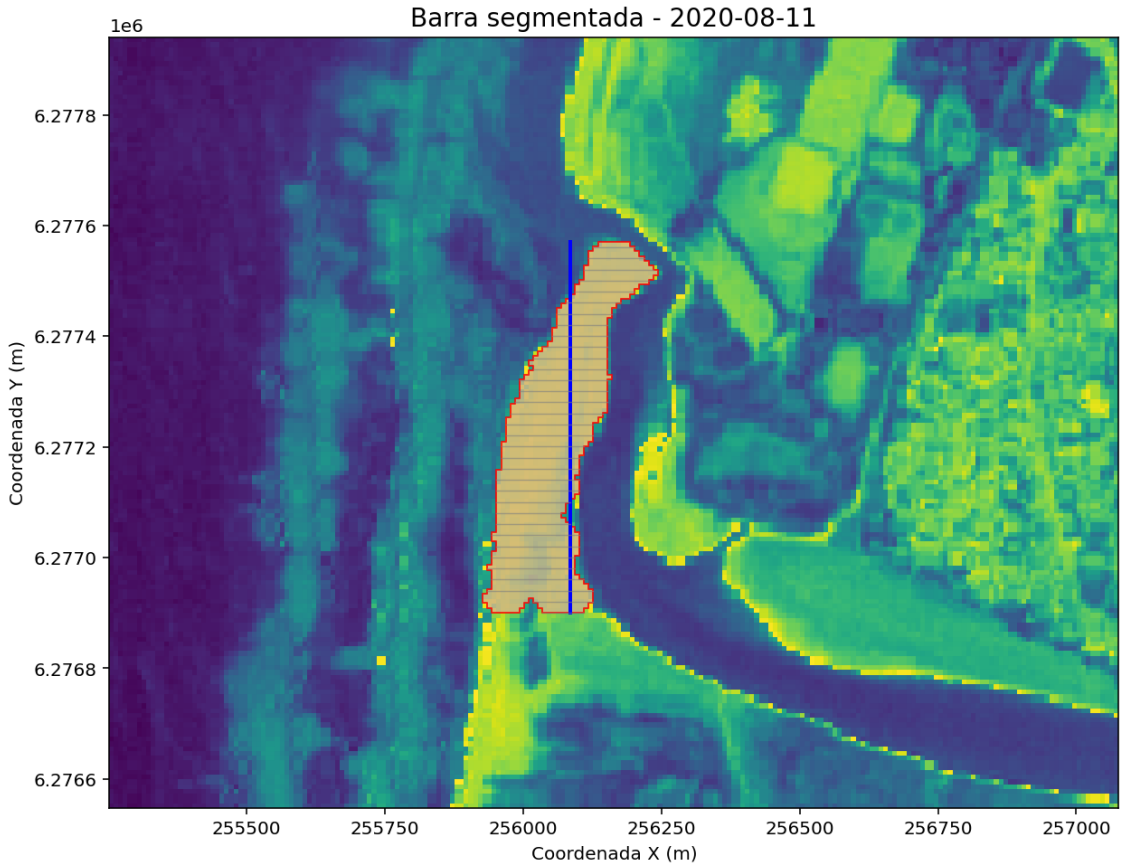


Figura 6. Segmentación barra y eje principal en desembocadura rio Maipo, elaborado a partir de imagen de Sentinel-2.

Gracias a esta segmentación, considerando como punto de partida el borde inferior de la barra y extrayendo valores del ancho discretizado para todas las imágenes satelitales, es posible cuantificar la variación de cada uno de estos segmentos a lo largo de la barra. Luego, visualizar con valores estadísticos como la media y desviación estándar resulta ser una alternativa eficaz para caracterizar la forma de la barra, tal como se muestra en la Figura 7, en donde presenta la dispersión del ancho para datos obtenidos entre los meses junio, julio y agosto a modo de agruparlos por estación, además de incluir con líneas sombreadas los casos particulares que se contemplan.

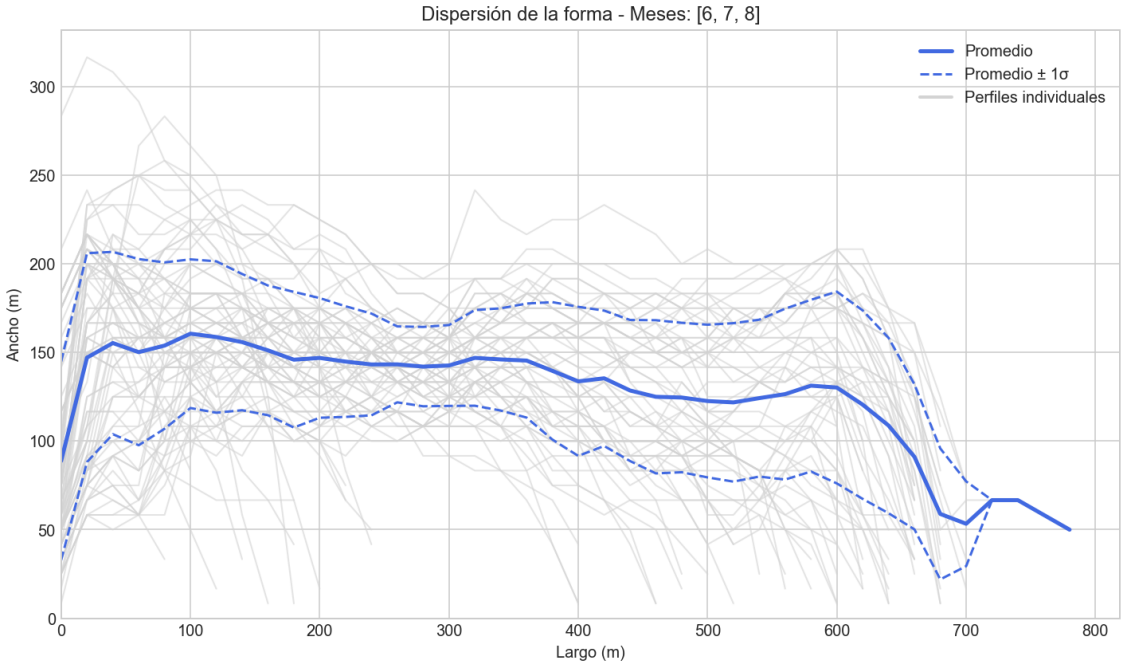


Figura 7. Ancho medio y dispersión a lo largo de la barra en meses de junio, julio y agosto.

A partir de la Figura 7 se puede notar que la tendencia de la barra es irse angostando a medida que se avanza en ella, es decir, desde el punto de partida considerado se tienen los valores más grandes de ancho en promedio, para luego disminuir hacia el extremo. Eso sí, importante hay que mencionar que la mayor dispersión se da al inicio y al extremo final de la barra, lo cual se relaciona a la variación de la "cresta" formada antes de la boca de descarga, tal como se aprecia en la barra delimitada de la Figura 6. Además, se puede notar que durante este periodo de invierno la barra presenta un ancho medio de 150 metros más o menos constante en su primera mitad, y el largo máximo obtenido para este periodo invernal no supera los 800 metros.

Replicando esta idea para las demás estaciones se presentan la Figura 8, Figura 9 y Figura 10, que caracterizan la forma de la barra en primavera, verano y otoño, respectivamente. A partir de los gráficos se puede extraer que la barra presenta un comportamiento general, demostrando gran dispersión en los metros iniciales desde la referencia de partida, y también alrededor de los 600 metros de largo para luego angostarse rápidamente. Esto último puede deberse al entorno físico del lugar que condiciona el curso de la descarga y, por ende, zonas más susceptibles a la acreción. Por otro lado, tanto en invierno como en primavera la barra alcanza largos entre 700 y 800 metros, en cambio verano y otoño presentan casos en que superan estos valores y llegan incluso hasta 1200 metros de largo. Se conoce que durante estos periodos se suele tener condiciones de caudal constante y de menor magnitud para el año hidrológico, lo cual puede ser un factor relevante, pero también viene siendo importante el clima de oleaje que permite que la barra migre y pueda sortear el entorno físico que se tiene en superficie para llegar a tales longitudes.

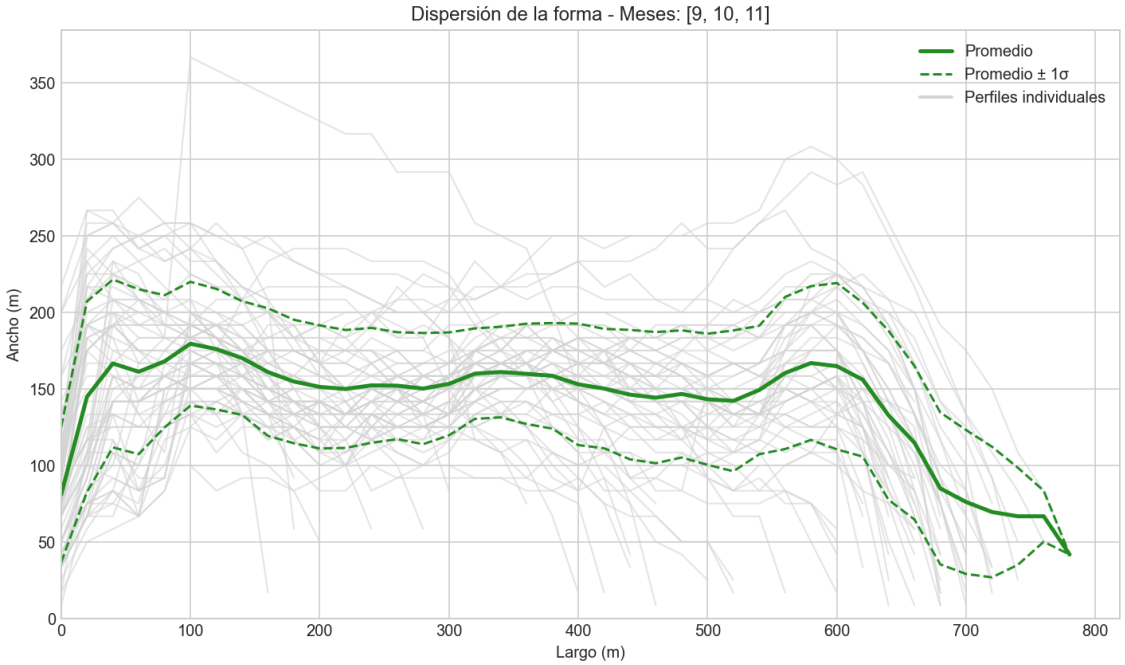


Figura 8. Ancho medio y dispersión a lo largo de la barra en meses de septiembre, octubre y noviembre.

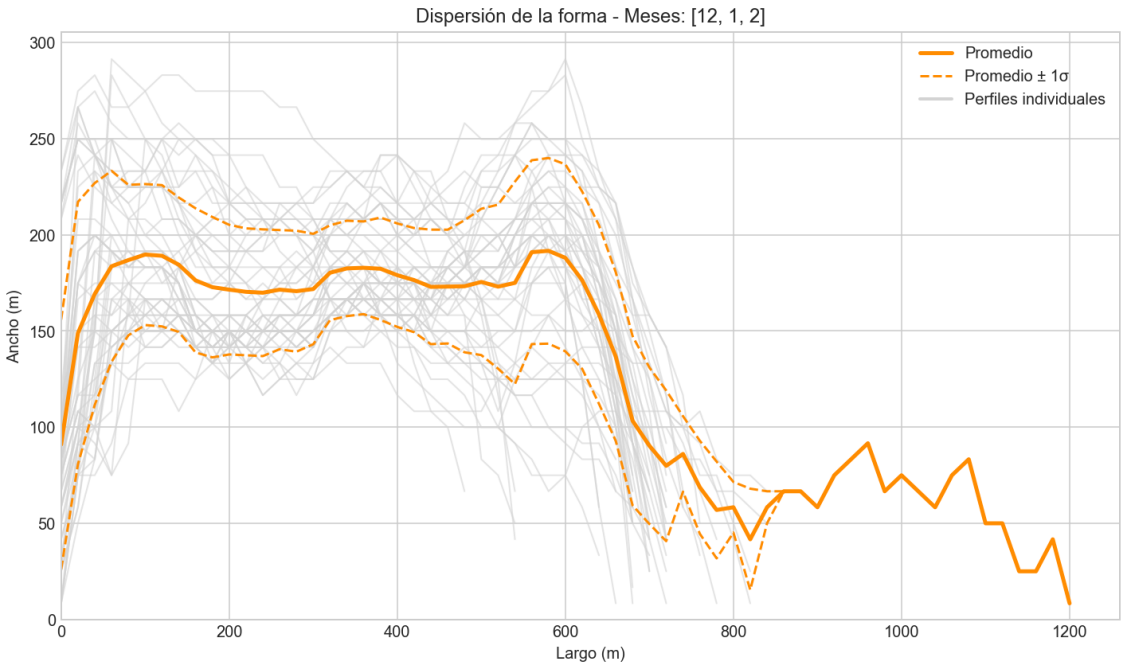


Figura 9. Ancho medio y dispersión a lo largo de la barra en meses de diciembre, enero y febrero.

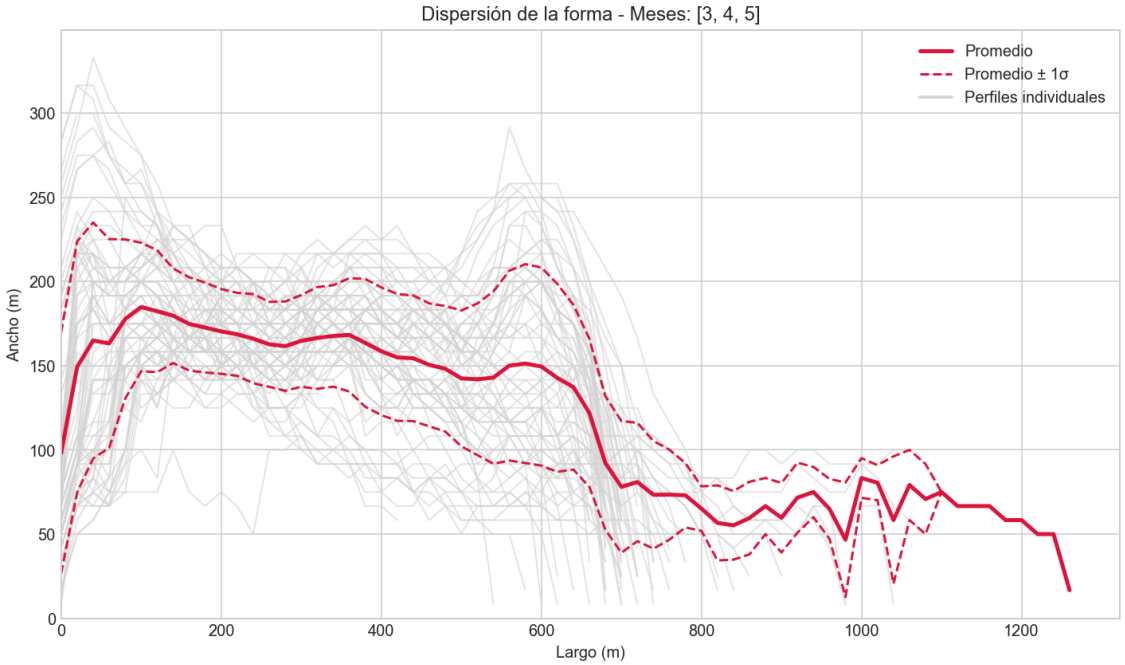


Figura 10. Ancho medio y dispersión a lo largo de la barra en meses de marzo, abril y mayo.

Por último, la Figura 11 presenta una comparativa de la morfología media de la barra en los distintos periodos del año. A partir de esta se puede extraer que el periodo invernal ser caracteriza por tener la menor magnitud del ancho en general, lo que puede relacionarse a procesos de erosión debido a caudales mayores. Por otro lado, durante verano la barra crece en magnitud de ancho, demostrando ser más o menos constante los primeros 600 metros. Mientras que en otoño se encuentran las formas más lineales de la barra, demostrado en su angostamiento paulatino.

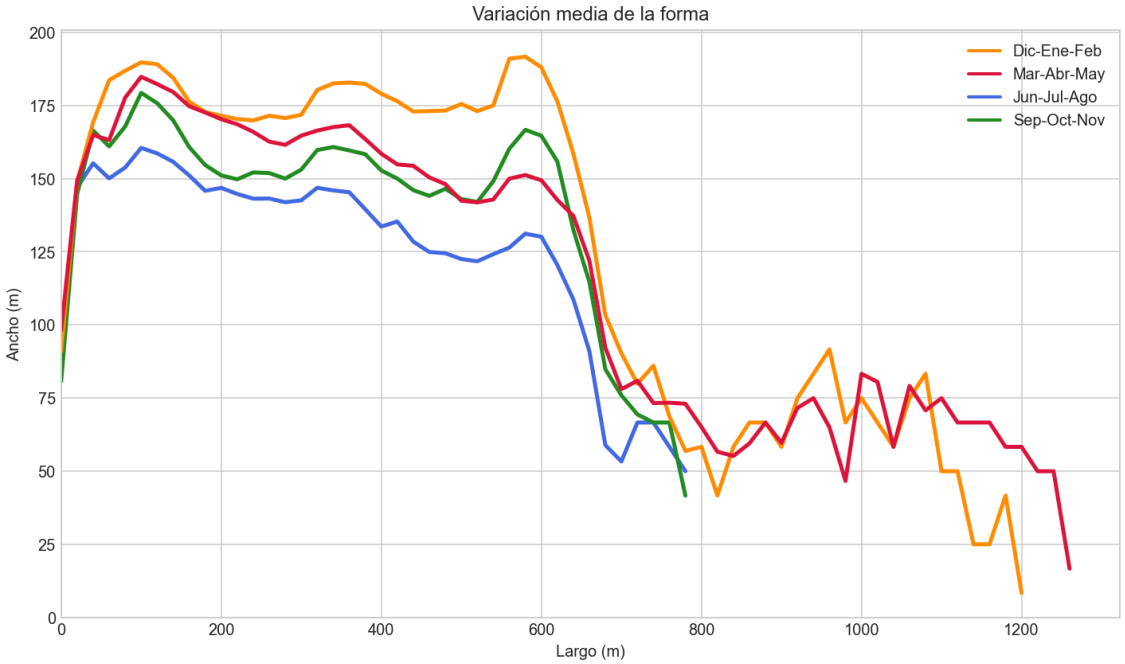


Figura 11. Variación media de la forma de la barra según estación.

6.2 Resultados geomorfológicos del estuario de Cáhuil

Dado que el estuario de Cáhuil se caracteriza por ser un estuario estacional, en primera instancia el análisis va dirigido a determinar el estado del sistema (abierto o cerrado), esto a partir de la detección de continuidad entre la laguna y el mar. Además, en caso de estar cerrado, calcular la distancia horizontal que existe entre los cuerpos de agua. La Figura 12 representa el último caso mencionado, en donde se diferencia parte de los cuerpos de agua detectados, y se traza una línea desde el punto más cercano de la laguna.

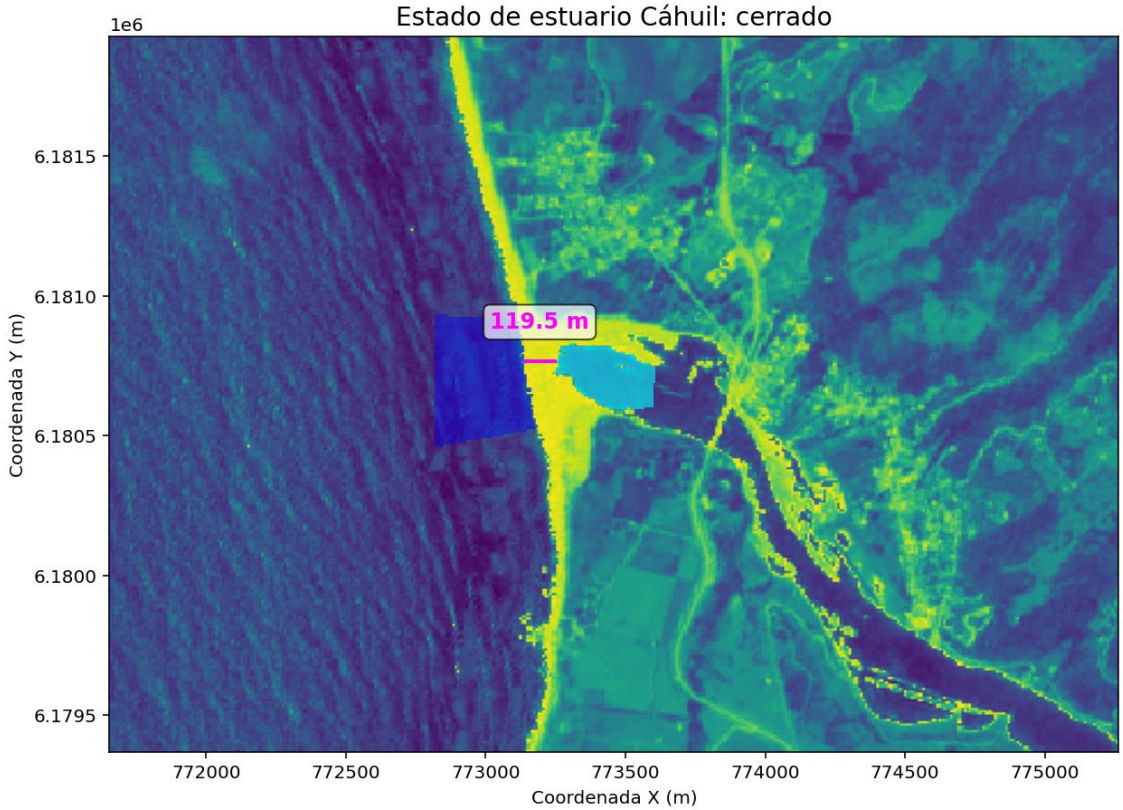


Figura 12. Ejemplo de estado de apertura en estuario Cáhuil, elaborado a partir de imagen de Sentinel-2.

Luego de llevar este proceso a la totalidad de imágenes disponibles, se puede construir una serie temporal indicando la variación de esta distancia, en donde el valor 0 implica que el estuario se encuentra en estado abierto. Para ello se elabora la Figura 13 a partir de la cual se puede notar que, en la segunda mitad de los años 2020, 2023 y 2024, existe una condición estable del estuario descargando agua hacia el mar. Además, cuando se registran distancias máximas de alrededor de 200 metros, los próximos días/semanas procede una abrupta reducción de esta distancia, llegando incluso a pasar a un estado abierto.

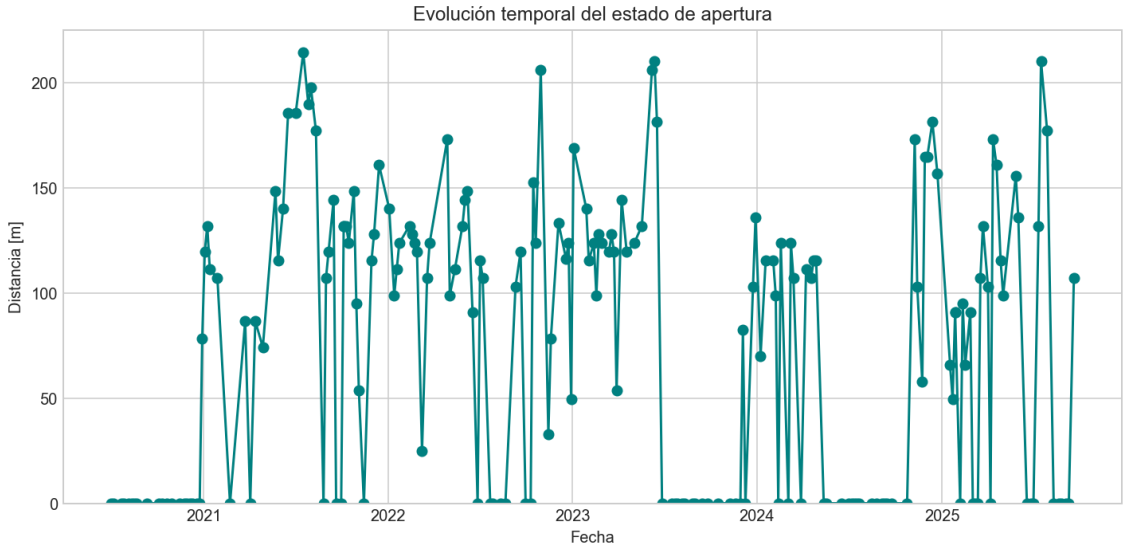


Figura 13. Evolución temporal del estado de apertura en estuario Cáhuil.

Otro análisis relevante para este estuario es el espejo de agua de la laguna, es decir, la magnitud de área de agua tomando como puntos de referencia el puente Cáhuil y la línea de costa. De esta manera se obtiene un parámetro que, sumado al estado de apertura del estuario como una variable binaria, se puede correlacionar a las mediciones hidrológicas para definir el comportamiento de este entorno. La Figura 14 presenta un ejemplo de la determinación del espejo de agua, sombreando en azul la superficie calculada aguas abajo del puente.

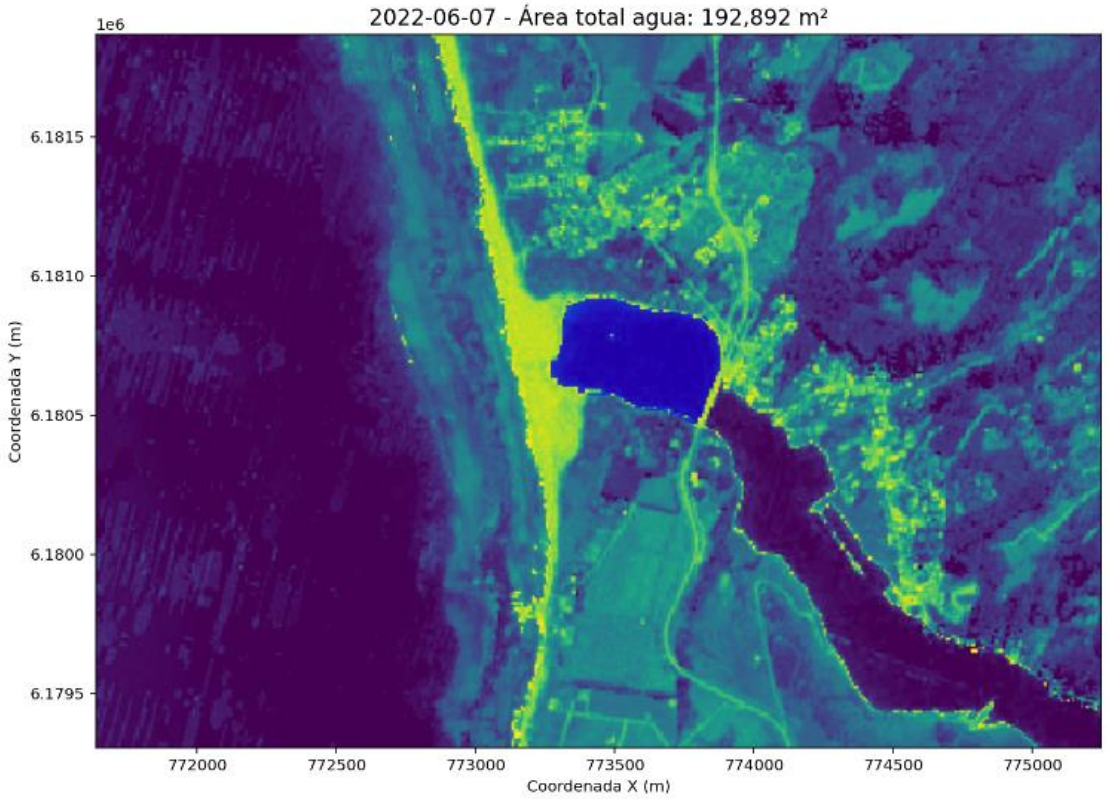


Figura 14. Ejemplo de cálculo de superficie de agua en estuario Cáhuil, elaborado a partir de imagen de Sentinel-2.

Por consiguiente, la Figura 15 muestra la serie temporal del parámetro de espejo de agua, obtenido a partir del cálculo para la totalidad de imágenes disponibles. Según este gráfico se puede notar que la tendencia ha sido el aumento de la magnitud del espejo de agua, en donde los últimos años se ha mantenido por sobre los 150.000 [m²] en la mayoría de los casos, considerando que previamente se alcanzan valores incluso por debajo de 100.000 [m²].

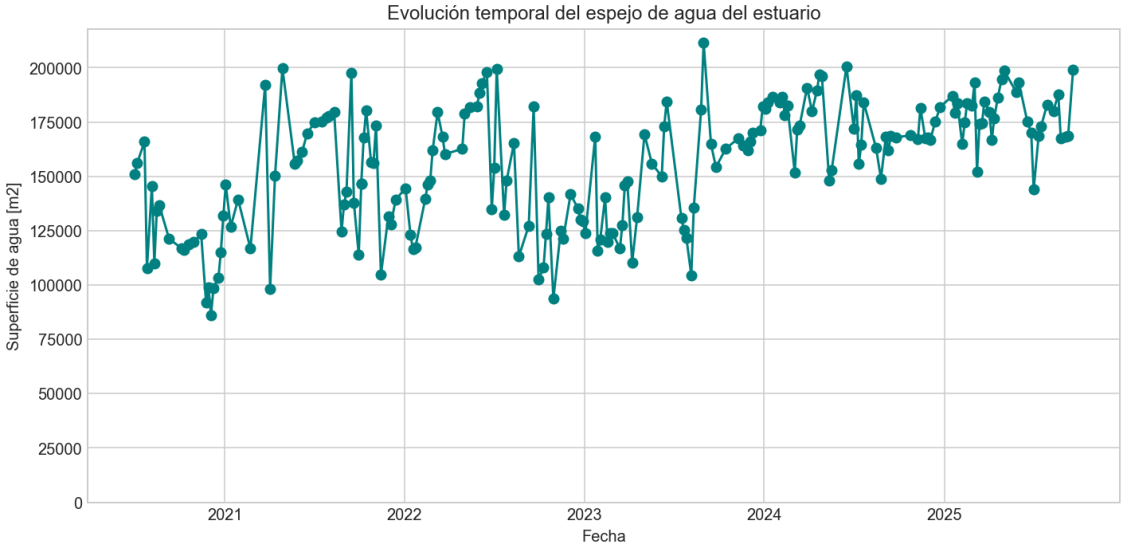


Figura 15. Evolución temporal del espejo de agua en estuario Cáhuil.

6.3 Condiciones hidrometeorológicas

La Dirección General de Aguas (DGA) tiene como una de sus funciones investigar y medir el recurso hídrico, por lo que cuenta con diversas estaciones de medición a lo largo del país, a partir de las cuales se puede obtener variables como el caudal medio diario, alturas y caudal instantáneo. La Figura 16 y Figura 17 muestran la serie temporal del caudal medio diario de las estaciones más cercanas a la desembocadura del rio Maipo y el estuario Cáhuil, respectivamente. Se consideran los datos registrados a partir de 2016 hasta mediados de 2025, en donde se puede notar mejor consistencia de datos en la estación del Maipo respecto la de Cáhuil.

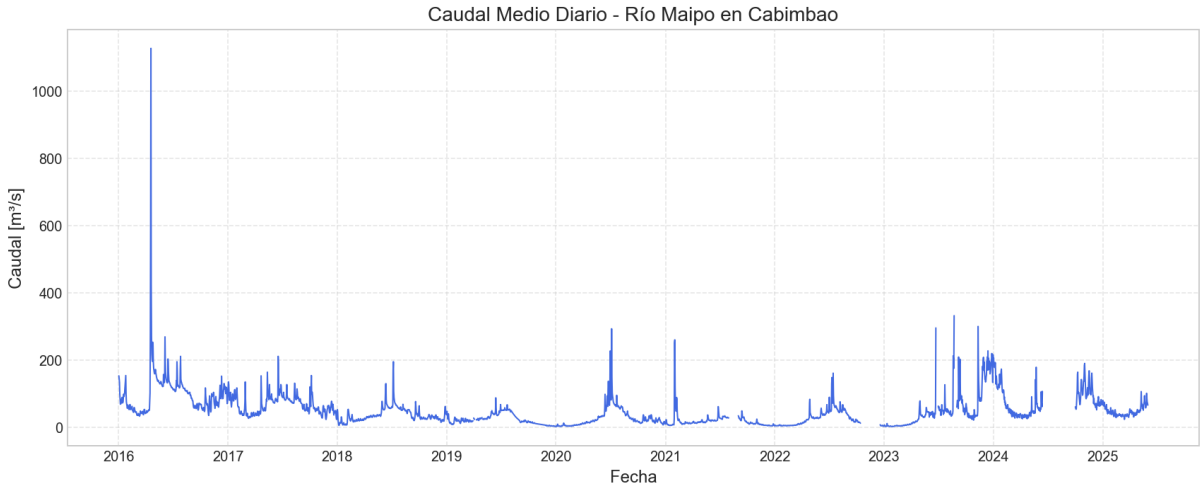


Figura 16. Serie temporal caudal medio diario según registro de estación Río Maipo en Cabimbao.

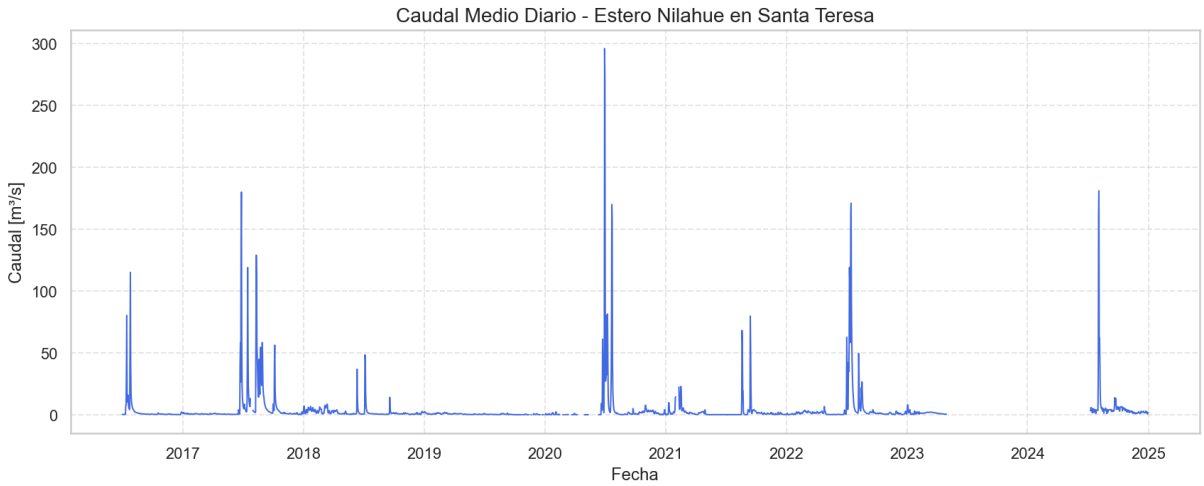


Figura 17. Serie temporal caudal medio diario según registro de estación Estero Nilahue en Santa Teresa.

El caudal registrado para el Río Maipo indica importantes crecidas en el año 2016 y 2023, lo cual es consistente con las métricas observadas para la barra en la Figura 5, lo cual debió ser similar para mediados de 2024, pero no se tiene registro. Mientras, el caudal registrado para el sector de Cáhuil a mediados de 2020 indica crecidas que permiten que el estuario se mantenga abierto.

Además, se tiene la serie temporal de conductividad registrada en el muelle del estuario Maipo, que en el caso de la Figura 18 se presentan los máximos diarios, tanto de profundidad como de superficie.

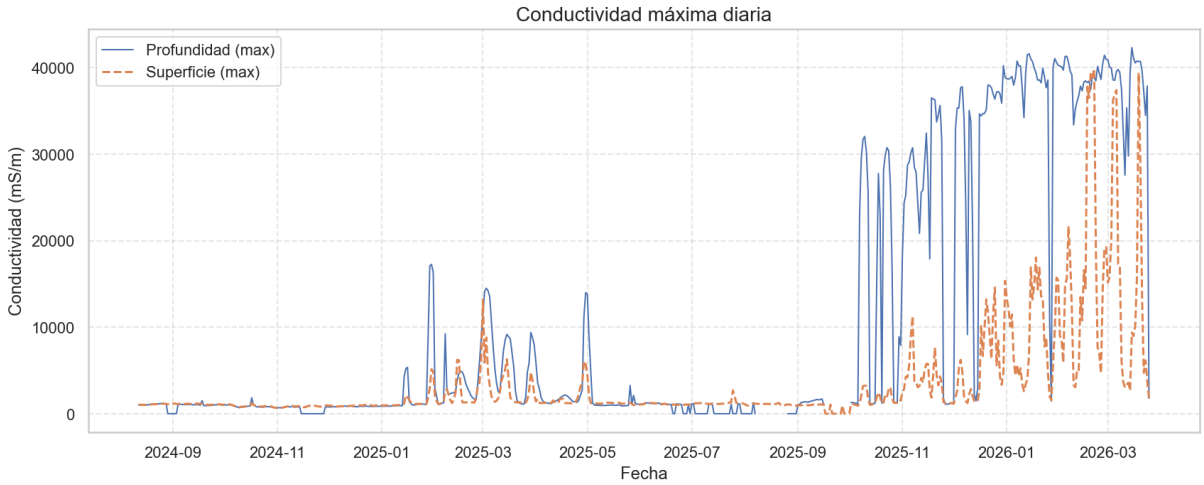


Figura 18. Serie temporal de conductividad máxima diaria según datos de HOBO en muelle Maipo.

En cuanto al clima de oleaje, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) presenta diversas variables como temperatura, altura máxima, altura significativa, dirección media, periodo significativo, entre otras, registradas cada una hora en las boyas presentes a lo largo del país. Para la desembocadura del Río Maipo se recurre a la “boya San Antonio”, la cual posee registros a partir de octubre de 2023, tal como se visualiza en la Figura 19.

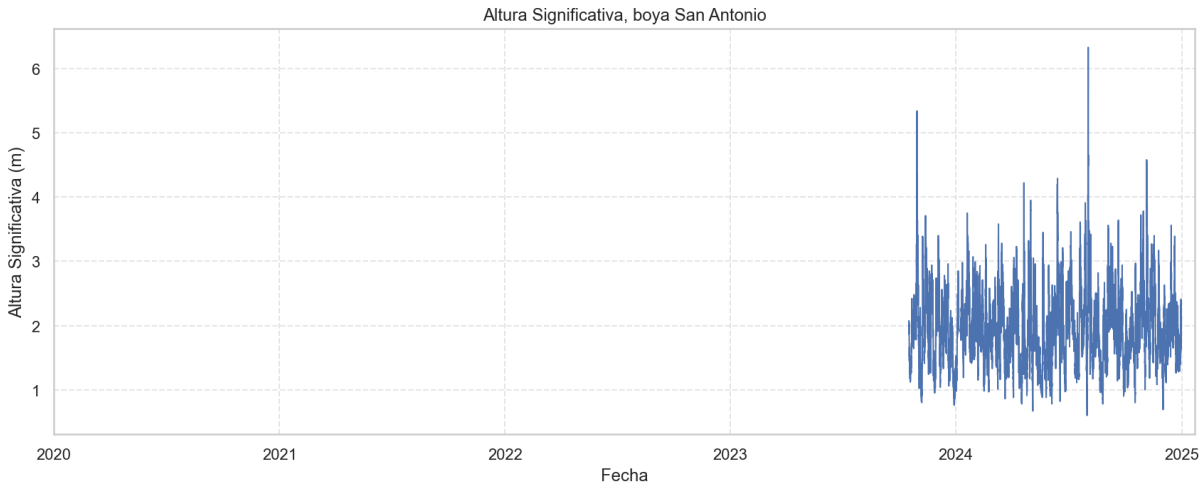


Figura 19. Serie temporal de altura significativa registrada en boya San Antonio.

Debido al importante vacío de datos para el periodo de estudio, se recurre al reanálisis ERA5 que permite complementar los datos de oleaje. Para ello, se validan los datos del reanálisis estableciendo una regresión lineal para las variables de interés de la boya, obteniendo el coeficiente de determinación respectivo. Considerando alrededor de 10.500 datos aproximadamente, desde 16/10/2023 hasta 30/12/2024, se tienen los siguientes gráficos:

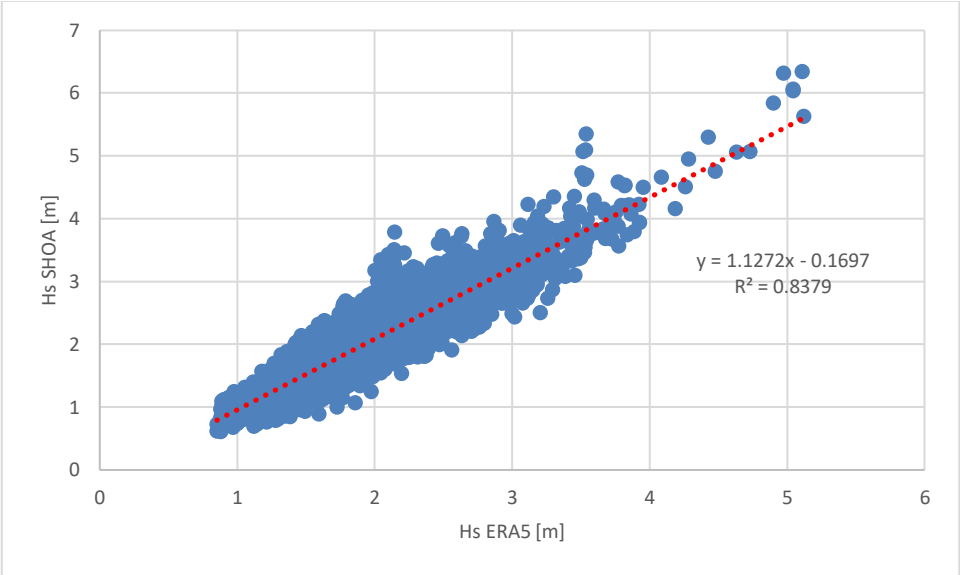


Figura 20. Regresión lineal para datos de altura significativa.

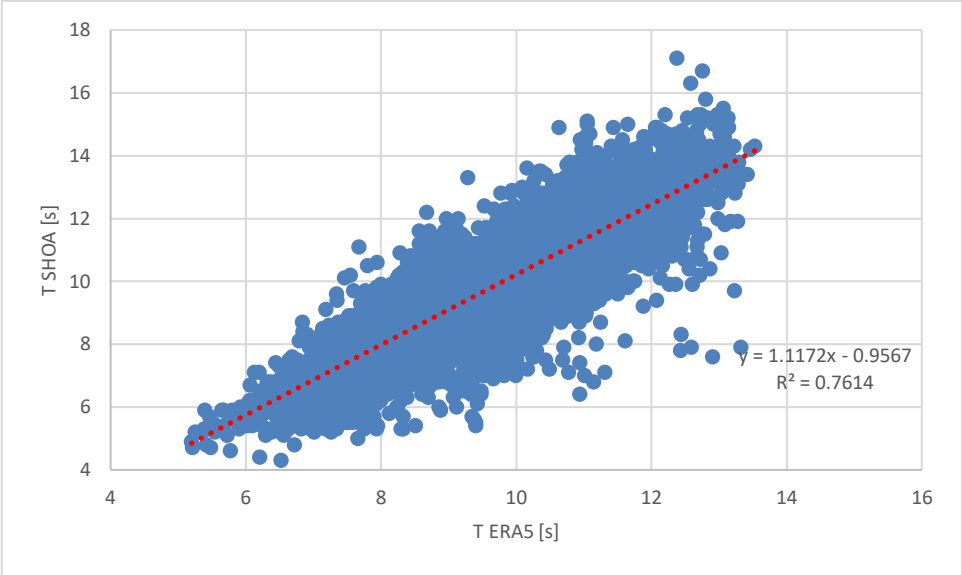


Figura 21. Regresión lineal para datos de período significativo.

Dado que se tiene un valor alto de R^2, los valores calculados se ajustan bien a los datos observados, por lo que resulta en un complemento adecuado para tener un registro completo de las variables de interés. A continuación, se presentan las series temporales del oleaje representativo de la boya de San Antonio según el registro de ERA5 para el período de 2016 a 2025.

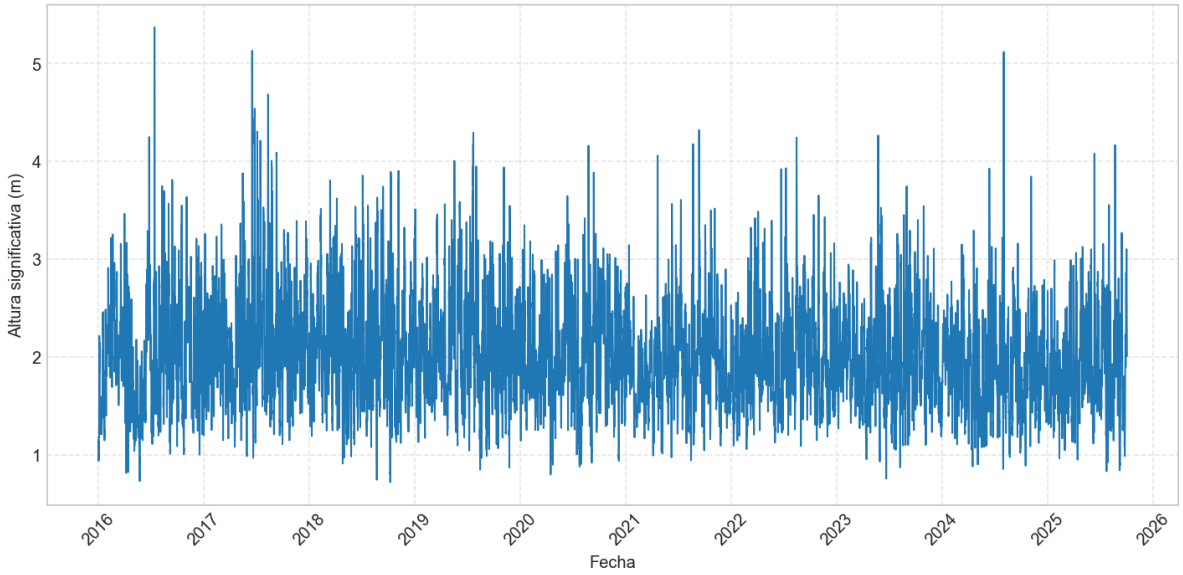


Figura 22. Serie temporal de altura significativa en San Antonio según datos de ERA5.

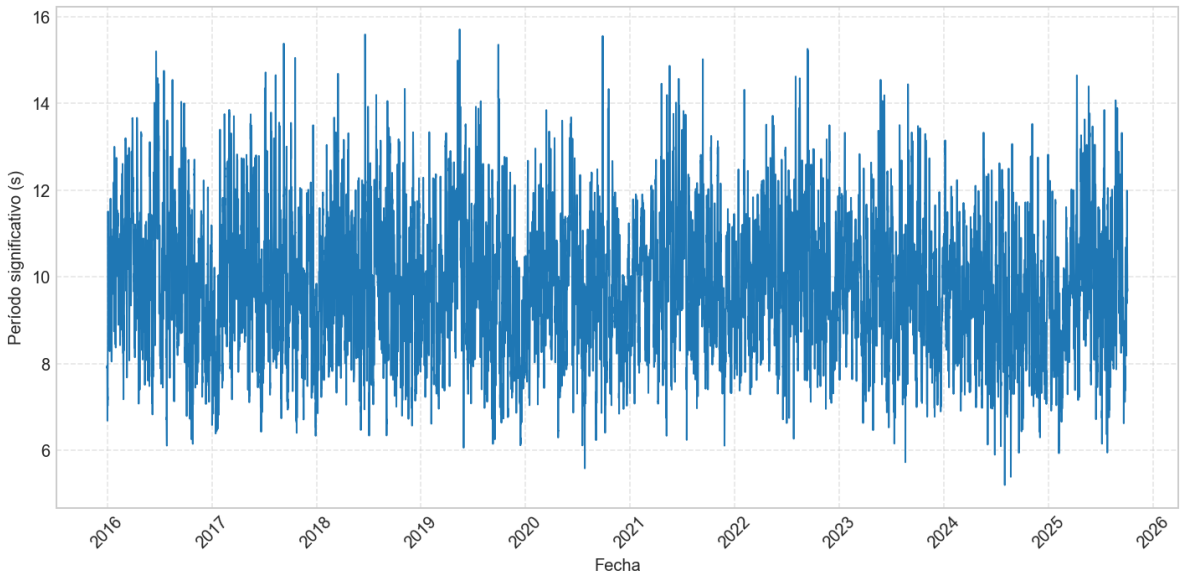


Figura 23. Serie temporal de período significativo en San Antonio según datos de ERA5.

En general, tanto la altura significativa como el periodo muestran valores más altos durante el invierno, lo que se traduce en olas grandes recurrentes y con gran energía. Por otro lado, al inicio de cada año en pleno verano se nota un oleaje con menor magnitud de altura y periodo más bajo, ocurriendo lo contrario del invierno, lo que otorga otras condiciones para el comportamiento de la barra.

7 Discusión

Los resultados obtenidos evidencian una alta variabilidad en las métricas morfológicas de la barra de arena del estuario Maipo, observándose fluctuaciones significativas de los parámetros a lo largo del periodo de estudio. De manera similar ocurre con las estimaciones realizadas para la laguna de Cáhuil. Asimismo, las condiciones de oleaje y caudal demuestran diferencias estacionales marcadas, sugiriendo una fuerte influencia de estos forzantes sobre los entornos de estudio. A continuación, se explican los detalles y se establecen correlaciones de las diversas variables.

Por un lado, el comportamiento de la barra de arena en el Maipo destaca un periodo con un largo más o menos constante, oscilando en el rango de 600 a 800 metros entre 2018 y 2022, considerando que la dirección de crecimiento usual presenta limitantes por el entorno físico a 800 metros aproximadamente. Luego, a inicios de los años 2016, 2024 y 2025 la barra supera este largo limitante, gracias a que se dan las condiciones para que pueda sortear el obstáculo y redireccionar su crecimiento, logrando en múltiples ocasiones más de 1000 metros de largo. Mientras, a mediados de 2016, 2023 y 2024 se tiene barra casi inexistente, con largos alrededor de 100 metros y superficie mínima. En suma, la variación observada sobre la barra de arena sugiere un comportamiento altamente dinámico, en donde periodos de crecimiento se alternan con periodo de gran erosión. Es por esto que se elabora la Figura 24, derivada a partir de la Figura 5, con tal de visualizar el comportamiento alternado.

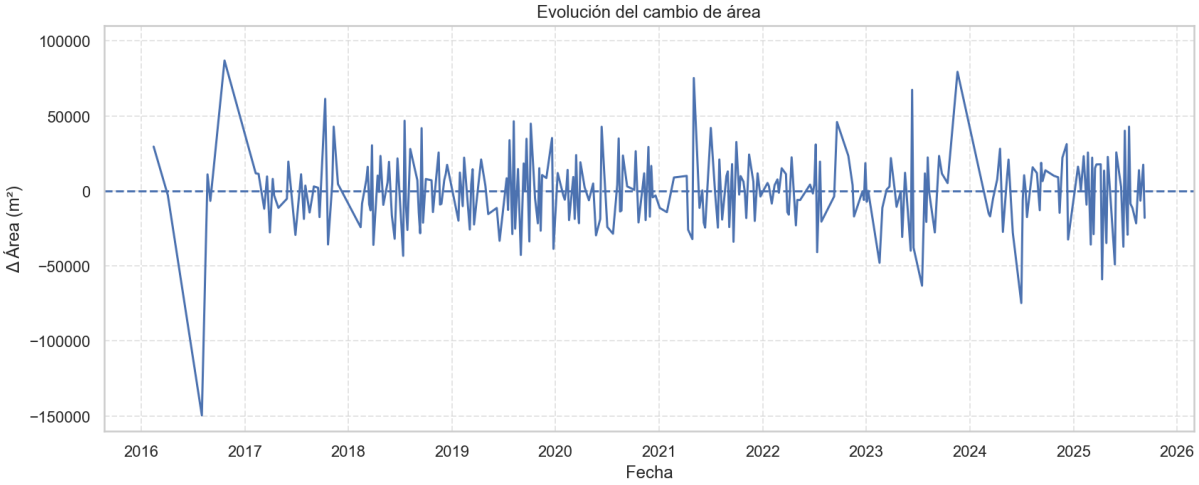


Figura 24. Evolución temporal del cambio de área en barra de arena Maipo.

En cuanto a la variación del ancho que presenta la barra del Maipo, según la comparación estacional observada en la Figura 11, permite demostrar que durante verano y otoño predomina el proceso de acreción y se dan las condiciones para que la barra migre. Durante invierno predomina la erosión y existen las condiciones para eventos extremos que provocan el arrastre total de la barra. Mientras que primavera se puede caracterizar como un periodo de reestructuración y estabilización.

Ahora bien, todos los casos comparten una alta variabilidad de ancho a inicios y a 600 metros de largo de la barra. La dispersión de anchos al comienzo del cuerpo puede explicarse por el caudal de rio, dado que este "choca" para girar su trayectoria y conectar hacia el mar, por lo que cuando viene cargado de sedimento en suspensión se puede depositar en esta zona, casos contrario cuando no trae sedimento y produce el arrastre del lugar. Mientras, la variabilidad del último tercio puede explicarse con el entorno físico que impone condiciones para que el rio modifique el cauce, entonces en muchos casos esta pérdida de fuerza favorece la acreción de esta zona.

Por otro lado, la conductividad registrada en el estuario Maipo sumado a la distancia de apertura de la descarga permite relacionar la influencia de la barra sobre la intrusión salina del sistema. Por esto se presenta la Figura 25, en donde se determina un ajuste potencial entre las variables mencionadas, demostrando que a medida que la apertura es menor existe mayor probabilidad que la conductividad sea alta, al menos en profundidad, indicando que las masas de agua salada pueden permanecer en el estuario,

más aun considerando que la conductividad se registra a 900 metros aguas arriba de la conexión con el mar.

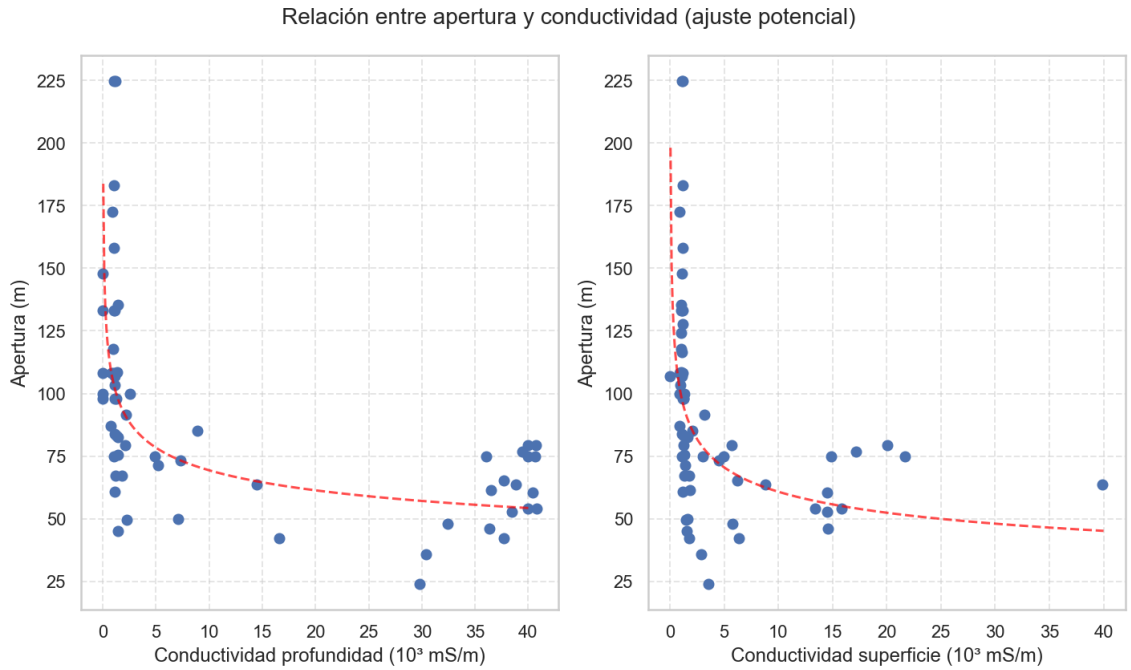


Figura 25. Relación entre la apertura y conductividad hidráulica en superficie y profundidad con ajuste potencial.

Por último, mencionar un evento que no es capturado en el proceso de estimación de parámetros, y es el cierre del estuario Maipo en enero/febrero de 2023. Para más detalle de este periodo según la información satelital adquirida, el 13 de enero se presenta una barra de gran ancho y casi conectando el borde de tierra. Luego, el 23 de enero se tiene completamente cerrada con aumento considerable del nivel aguas arriba. Para el 28 de enero se presenta una ligera abertura que permite disminuir la superficie de agua, pero rápidamente el 02 de febrero se presenta nuevamente cerrada. Por consiguiente, el registro del 12 de febrero se tiene un aumento excesivo del nivel de agua, saliendo del cauce normal del rio. Finalmente, para el 17 de febrero existe una abertura capaz de permanecer los siguientes registros.

El oleaje y su influencia sobre la costa, en este caso sobre barras de arena, puede ser variado. Durante marejadas en donde se pueden encontrar oleaje de altura significativa mayor y gran energía, como ocurre en invierno de la zona de estudio, favorece el arrastre de sedimentos provocando pérdidas de área sobre la barra y dejando la costa expuesta. Mientras que un oleaje de menor altura y energía característico de verano tiene un efecto contrario, es decir, deposita arena a lo largo de la costa reconstruyendo la barra. La Figura 26 muestra la correlación entre el cambio de superficie de la barra y el periodo medio diario del oleaje. En general, se identifican casos con periodos altos (mayor energía) que implican arrastre de arena y por ende perdida de área, mientras que crecimientos de área mayores a 50000 [m²] han ocurrido cuando se registran periodos alrededor de 10 [s] o menos. De todas maneras, al no tener buen ajuste no se puede asegurar el comportamiento de la barra solo con esta variable.

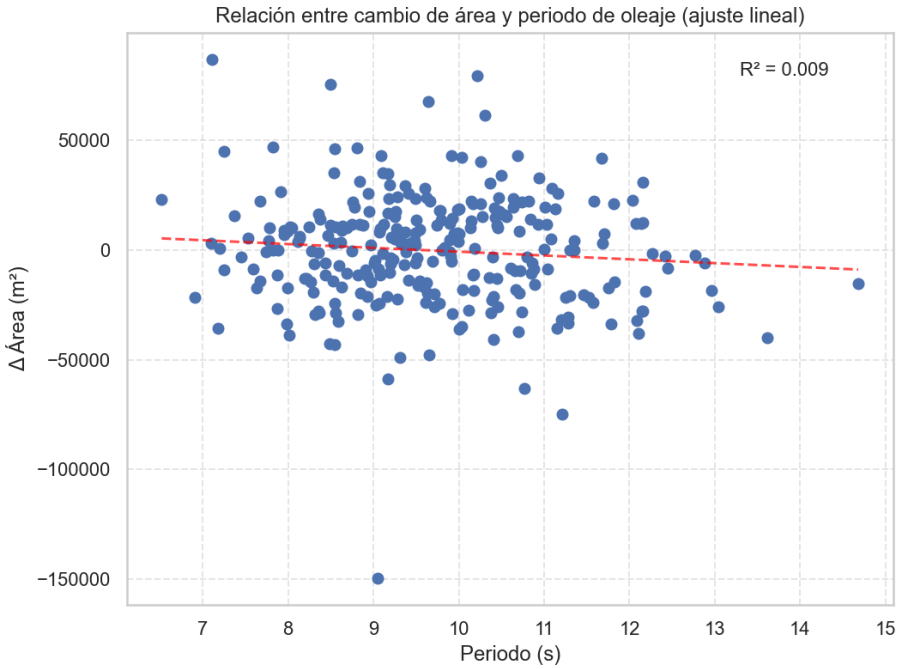


Figura 26. Relación entre el cambio de área de barra de arena y periodo de oleaje con ajuste lineal.

Luego, la Figura 27 muestra la correlación entre el área de la barra y la condición de oleaje, es decir, altura significativa y periodo, esta vez considerando un acumulado de 5 días hasta la fecha correspondiente para cada variable. Se identifican casos en que bajos valores de las variables acumuladas se asocian a gran superficie de barra y viceversa, pero son aislados, por lo que nuevamente no se logra una tendencia clara con las características de oleaje para explicar la morfología de la barra.

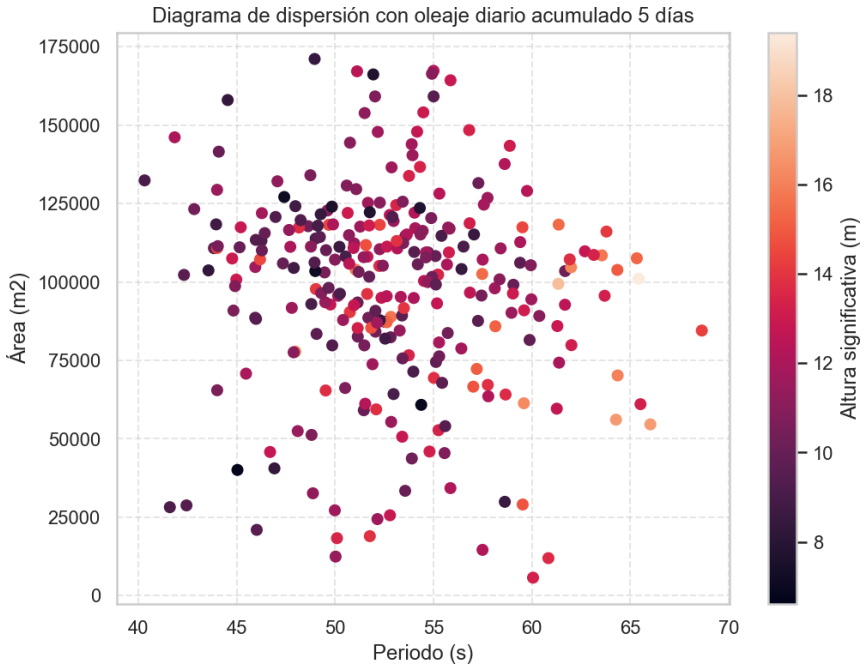


Figura 27. Relación entre área de barra de arena con altura significativa y periodo de oleaje acumulado 5 días.

El caudal de rio se presenta como otra variable relevante para el comportamiento de la barra de arena, puesto que favorece la erosión en eventos de crecidas donde la fuerza del rio puede arrastrar los sedimentos de la desembocadura, o bien, en condiciones normales deposita los sedimentos provenientes de la cuenca fluvial. La Figura 28 evidencia este tipo de comportamiento general, donde aumentos sostenidos de caudal están asociados a reducciones del área de la barra, es decir, la erosión desde el interior del sistema. Destacar que esto resulta evidente al considerar caudales acumulados, buscando reflejar que la respuesta morfológica no es inmediata.

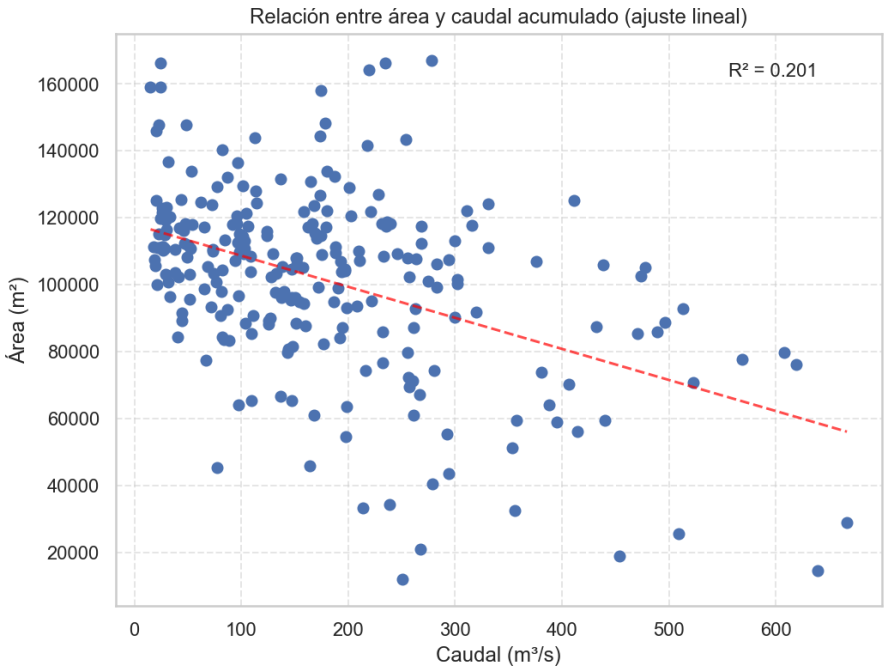


Figura 28. Relación entre área de barra de arena y caudal acumulado 5 días con ajuste lineal.

Ahora bien, la dinámica de la barra no responde a un forzante aislado, sino a la interacción entre ellos. En este sentido, el comportamiento de la barra se explica mejor con la ocurrencia simultánea de oleaje y caudal a partir de diversos casos, por ejemplo, que condiciones de oleaje energético y alto caudal que generen un umbral crítico para la ruptura de la barra. La Figura 29 muestra la dispersión del perímetro de la barra en función del caudal acumulado en conjunto con la altura significativa. A partir de esta figura se puede decir que la barra tiende a un rango limitado cuando las condiciones de caudal y oleaje son moderadas, salvo casos en que días continuos de olas pequeñas permiten que la forma se extienda y alcance perímetro mayor a 3000 metros. Luego, a medida que crece el caudal el contorno de la barra decrece.

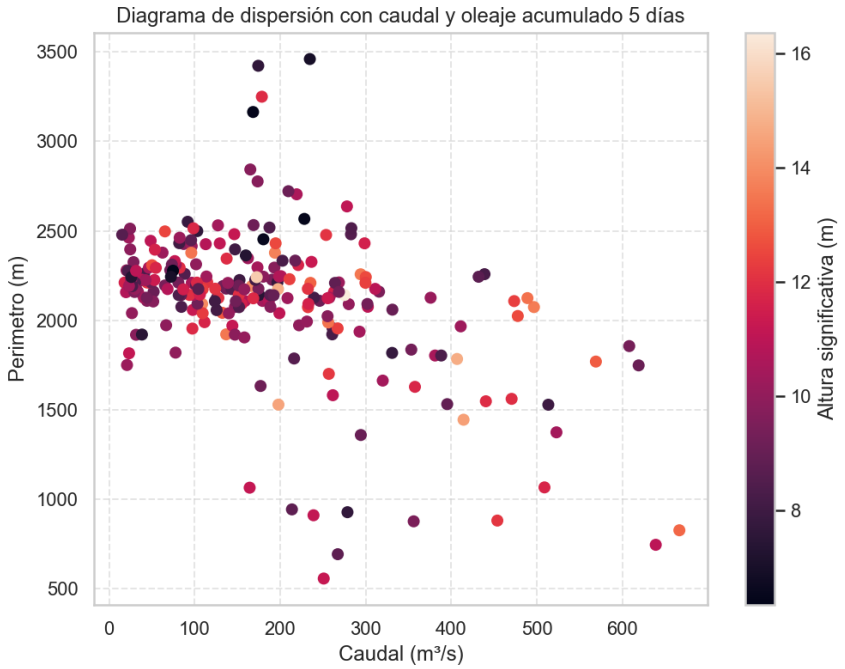


Figura 29. Relación entre perímetro de barra de arena con caudal y altura significativa acumulado 5 días.

Por consiguiente, la Figura 30 muestra el desempeño del modelo Random Forest en la predicción del área de la barra a partir del caudal y altura significativa acumulada por 5 días. Este modelo básicamente promedia las predicciones de área de muchos "árboles de decisión", los cuales trabajan los datos en rangos, logrando capturar relaciones no lineales y combinaciones complejas. Considerando que se obtiene un R^2 alto, el modelo logra explicar gran parte de la variabilidad del sistema, pero se aprecia mayor dispersión en los valores extremos, indicando que estos casos no son bien representados y posiblemente requieran otras variables a considerar. Además, se entrega un coeficiente de importancia de 0.648 y 0.352 para caudal y altura significativa, respectivamente. En resumen, lo importante es que la superficie de la barra presenta dependencia de los forzantes hidrodinámicos con una relación no lineal, en donde el caudal tiene una influencia relativa mayor.

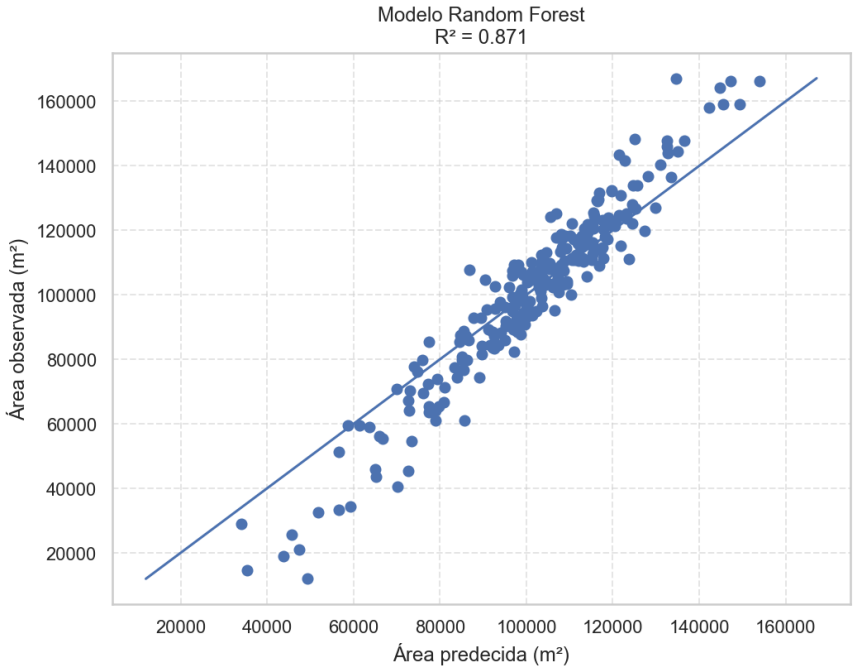


Figura 30. Predicción de área de barra mediante Random Forest usando caudal y oleaje.

Luego, para analizar con mayor detalle los eventos extremos de la barra, es decir, cuando tiene una largo cercano a 200 metros y cuando supera los 800 metros, se elabora la Tabla 1 en donde se muestran las características más relevantes según fecha. Aclarar que el registro previo corresponde a la cantidad de días que pasaron respecto a la captura satelital anterior y las variables hidrodinámicas se obtienen dentro de esos días, de ser posible fuera de los primeros 5 días que consideran los acumulados.

A partir de esta tabla, los casos en que la barra supera la 800 metros coinciden que el caudal acumulado los 5 días previos ronda 200 [m³/s], además el caudal medio máximo registrado previamente alcanza solo 60 [m³/s], salvo el caso de 08/03/2024 pero con el máximo registrado hace 90 días, lo que es tiempo razonable para que la barra se reconstruya y alcance los 910 [m] hasta esa fecha. Continuando con el oleaje de estos casos, se evidencia una altura significativa acumulada de hasta 8 [m] permite el desarrollo de la barra por sobre los 1000 [m]. Mientras, cuando el sistema se encontró cerrado el caudal registrado fue considerablemente menor tanto el acumulado como el máximo, destacando la importancia de la gestión aguas arriba y su impacto sobre el estuario. Por otro lado, casos en que la barra no supera los 200 metros se caracterizan por presentar un caudal máximo previo alto, lo que explica la importante erosión. Luego, el oleaje no presenta datos relevantes ante estas magnitudes de caudal.

Tabla 1. Resumen de variables hidráulicas y geométricas para casos particulares de barra.

Fecha	Registro previo [días]	Largo [m]	Q acumulado 5d [m³/s]	Q máximo [m³/s]	Hs acumulado 5d [m]	Hs máximo [m]
04/04/2016	50	842	219	62	12.9	3.5
02/08/2016	120	206	639	1127	12.1	5.3
17/07/2023	30	163	267	295	9.4	2.7
31/08/2023	20	94	-	332	13.2	3.7
08/03/2024	110	910	210	227	9.9	3.1
17/04/2024	10	1048	168	39	7.5	2.3
01/07/2024	30	189	-	107	11.3	3.9
21/02/2025	5	1203	174	38	8.2	1.9
07/04/2025	14	1263	234	55	7.7	2.9
23/01/2023	15	Cerrado	16	11.1	10.7	2.7

En cuanto al estuario Cáhuil, con la información recopilada se elabora la Figura 31, en donde se muestra la dispersión del área del espejo de agua en función del caudal acumulado 5 días, sumado al estado de apertura. El diagrama no permite demostrar una tendencia clara en la zona intermedia de superficie de agua, dado que para bajos caudales se tienen múltiples casos de estado abierto y cerrado. No obstante, al visualizar los extremos del rango de área, se puede notar casos en que la abertura drena rápidamente el agua del estuario dejando expuesta la superficie de sedimentos, explicando estos bajos espejos de agua. Luego, en estado cerrado el agua se acumula, aumentando el nivel y la superficie del espejo, aun cuando se registran caudales entre 100 y 200 [m³/s]. De esta manera, se evidencia que acumulados sobre 200 [m³/s] mantienen el estuario abierto y por tanto con superficie de agua limitadas.

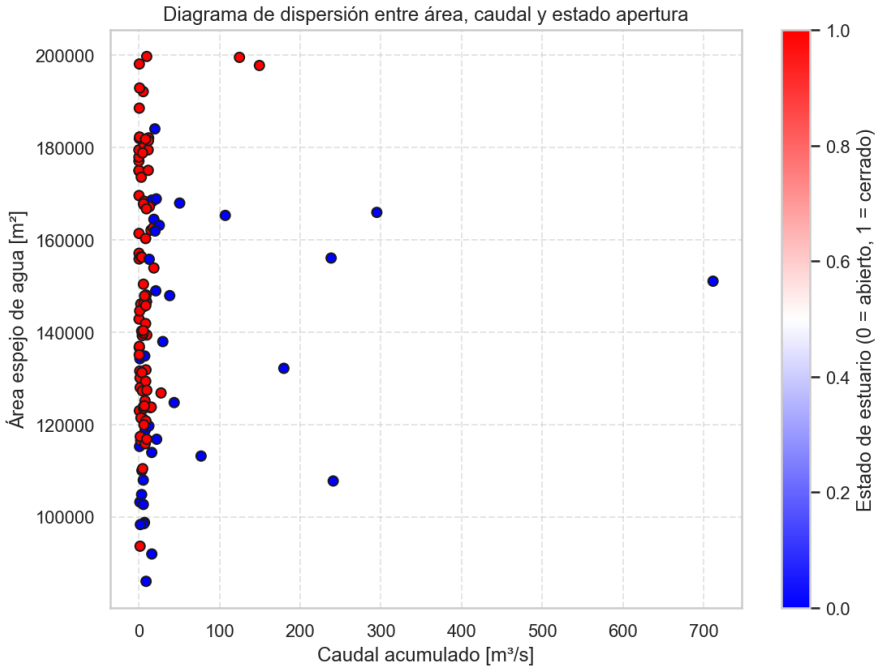


Figura 31. Relación entre espejo de agua del estuario Cáhuil con caudal acumulado y estado de apertura.

En general, a partir de los resultados obtenidos se ha observado que la morfodinámica de las barras está controlada por el balance entre forzantes marinos y fluviales. En particular, el comportamiento observado del estuario Maipo se caracteriza por aperturas importantes debido a eventos extremos de caudal, y crecimientos de barra asociados a bajo oleaje y caudal, llegando incluso a la posibilidad de cerrar el estuario. Por su parte, el estuario Cáhuil caracterizado por su intermitente conexión al mar, en donde un sostenido caudal elevado permite la apertura del sistema, mientras que bajos caudales implican la acumulación del agua que inunda zonas cada vez mayores.

Finalmente, es importante considerar ciertas limitaciones de este estudio. En primer lugar, la frecuencia ideal de información satelital es cada 5 días, no obstante, en pocas ocasiones se cumple con esa frecuencia debido a la nubosidad o el agua turbia que no permiten extraer los parámetros, descartando muchos casos que pueden corroborar los resultados vistos. Además, se desconoce el horario que está capturando la imagen satelital, lo cual sería relevante para conocer el nivel de la marea y obtener mejores relaciones que incluyan el área de la barra. Por otro lado, la disponibilidad limitada de algunos datos cómo vacíos en las series de caudal provocan la pérdida de información relevante cuando se tienen parámetros efectivos de la barra. O bien, la necesidad de utilizar datos de un reanálisis puede conllevar errores en las correlaciones dadas las discrepancias con las condiciones reales de oleaje.

8 Conclusiones

Esta investigación permitió analizar y caracterizar la evolución morfológica de la barra de arena en el estuario del río Maipo y el entorno del estuario Cáhuil mediante el uso de imágenes satelitales y datos hidrológicos. Los resultados evidencian que la barra presenta un comportamiento dinámico, con variaciones significativas en su geometría a lo largo del tiempo, lo que refleja una compleja interacción con los forzantes considerados. De manera similar, en el estuario Cáhuil se identificó una estrecha relación entre el estado de apertura y el caudal existente.

En relación con la metodología empleada para el procesamiento de imágenes satelitales, el uso del indicie NDWI demostró ser una herramienta eficaz para la detección y caracterización de barras de arena y cuerpos de agua, permitiendo obtener de manera sistemática parámetros geométricos como área, perímetro, largo y ancho discretizado. Asimismo, permitió la caracterización del espejo de agua en laguna Cáhuil. No obstante, la precisión de los resultados depende directamente de la correcta selección del umbral de clasificación agua-tierra y de la calidad de las imágenes utilizadas.

La morfología de la barra de arena presenta una alta variabilidad temporal, observándose una tendencia predominante a la acreción durante el periodo estival y procesos erosivos durante invierno. A partir del análisis de ancho mediante secciones transversales, se identificó que la variabilidad espacial de la barra no es uniforme, sino que presenta gran dispersión en los primeros metros de desarrollo y aproximadamente a los 600 metros de extensión longitudinal. Además, se determinó que la morfología de la barra influye en el nivel de intercambio entre el océano y el estuario, donde barras más extensas longitudinalmente tienden a reducir la apertura, dificultando la descarga y renovación de masas de agua salada.

Respecto a los forzantes hidrodinámicos, se identificó que la relación entre los parámetros geométricos de la barra y las variables consideradas de forma independiente no es completamente directa. Sin embargo, el oleaje presenta una tendencia predominante erosiva, observando que condiciones de alta energía y altura se asocian a reducciones de área. Del misma modo, caudales elevados favorecen procesos erosivos desde el interior del elemento, pudiendo incluso estar asociado con posibles eventos de ruptura de la barra.

Debido a que la dinámica de la barra de arena no puede ser explicada por un único forzante, se determinó que las mejores correlaciones se obtienen cuando se considera la interacción entre oleaje y caudal. En particular, se identificaron condiciones en las cuales la combinación de ambos factores genera respuestas más evidentes en la morfología de la barra. Bajo condiciones típicas del régimen hidrológico anual de la zona, los bajos caudales y oleaje moderado constante durante verano explican la tendencia a acreción, mientras que el aumento de caudal y oleaje caótico de invierno se asocian a reducciones en las métricas geométricas.

Asimismo, se identificó que casos de crecimiento pronunciado de la barra se la relacionan con alturas significativas inferiores a 10 [m] y caudales acumulados de hasta 250 [m^3/s], considerando ventanas temporales de 5 días con la media diaria. Por el contrario, casos de barra casi inexistente se asocian a caudales diarios que rondan los 300 [m^3/s]. Finalmente, el cierre total de la desembocadura ocurre bajo condiciones de oleaje moderado, con alturas acumuladas del orden de 10 metros en 5 días, pero con caudales acumulados inferiores a 20 [m^3/s].

Esta investigación aporta esencialmente la caracterización sobre la dinámica de la barra en la desembocadura del rio Maipo, contribuyendo a la comprensión de este importante sistema en la zona central de Chile. Además, aporta una metodología reproducible basada en técnicas de teledetección para el análisis morfológico de barras de arena. De esta manera, otros sistemas de características similares pueden ser analizados de esta forma para ampliar el conocimiento y realizar comparaciones entre sí.

Finalmente, los resultados obtenidos constituyen una base para el monitoreo continuo de la desembocadura, para el desarrollo futuro de herramientas que permitan la predicción del comportamiento certero de la barra de arena, asi como de eventos de cierre o apertura. Esto resulta especialmente importante para la gestión de riesgos asociados a inundaciones, la planificación de intervenciones en zonas costeras y la preservación de ecosistemas.

9 Referencias

Andrade, B., & Grau, S. (2005). *La laguna de Cahuil, un ejemplo de estuario estacional en Chile central.* Revista de Geografía Norte Grande, (33), 59-72. Recuperado a partir de https://ojs.uc.cl/index.php/RGNG/article/view/43671

Behrens, D. K., Bombardelli, F. A., Largier, J. L., & Twohy, E. (2013). *Episodic closure of the tidal inlet at the mouth of the Russian River — A small bar-built estuary in California.* Geomorphology, 189, 66-80. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.01.017

Blott, S. J., Pye, K., van der Wal, D., & Neal, A. (2006). *Long-term morphological change and its causes in the Mersey Estuary, NW England*. Geomorphology, 81(1–2), 185–206. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.008

COPSA. (2023, 27 de julio). *Estudios revelan dramática disminución del caudal del río Maipo y Aconcagua*. Recuperado el 06 de 08 de 2025, de https://copsa.cl/2023/07/27/estudios-revelan-dramatica-disminucion-del-caudal-del-rio-maipo-y-aconcagua/

Cooper, J. A. G. (2001). *Geomorphological variability among microtidal estuaries from the wave-dominated South African coast*. Geomorphology, 40(1-2), 99–122. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X01000393

Day, J. W., Jr., Yáñez-Arancibia, A., Kemp, W. M., & Crump, B. C. (2012). *Introduction to estuarine ecology*. In J. W. Day, Jr., B. C. Crump, W. M. Kemp, & A. Yáñez-Arancibia (Eds.), Estuarine ecology (2nd ed., pp. 1–18). Wiley-Blackwell. https://doi.org/10.1002/9781118412787.ch1

Deroin, J.-P., Wade, S., & Dia, A. (2012). *Impacts of breaching on a bar-built estuary, example of the Senegal River new mouth monitored with satellite imagery from 2003 to 2010*. Zeitschrift für Geomorphologie, 56(3), 351-370. https://doi.org/10.1127/0372-8854/2012/0072

Dyer, K. R. (1997). *Estuaries: A physical introduction (2nd ed.)*. John Wiley & Sons.

Elliott, M., & Whitfield, A. K. (2011). *Challenging paradigms in estuarine ecology and management*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 94(4), 306–314. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.06.016

Fagherazzi, S., Edmonds, D. A., Nardin, W., Leonardi, N., Canestrelli, A., Falcini, F., Jerolmack, D. J., Mariotti, G., Rowland, J. C., & Slingerland, R. L. (2015). *Dynamics of river mouth deposits*. Reviews of Geophysics, 53(3), 642-672. https://doi.org/10.1002/2014RG000451

Ferrentino, E., Famiglietti, N. A., Nunziata, F., Inserra, G., Buono, A., Moschillo, R., Memmolo, A., Colangelo, G., Vicari, A., & Migliaccio, M. (2023). *The Use of Satellite Synthetic Aperture Radar Imagery to Assist in the Monitoring of the Time Evolution of Challenging Coastal Environments: A Case Study of the Basilicata Coast*. Environments, 10(12), 212. https://doi.org/10.3390/environments10120212

Fitzgerald, D. M., Buynevich, I. V., & Hein, C. J. (2001). *Morphodynamics and facies architecture of tidal inlets and ebb deltas*. In C. E. Hanson (Ed.), *Coastal sedimentary environments: Processes, facies, and stratigraphy* (pp. 301–333). Springer.

Fundación Terram. (2015). *Humedal y desembocadura del río Maipo: Nuevo sitio de importancia internacional*. https://www.terram.cl/humedal-y-desembocadura-del-rio-maipo-nuevo-sitio-de-importancia-internacional/

Hume, T., Gerbeaux, P., Hart, D. E., Kettles, H., & Neale, D. (2016). *A classification of New Zealand's coastal hydrosystems* (CR 254). Ministry for the Environment, Wellington.

Humedal Río Maipo. (s. f.). *Humedal: descripción y características*. Recuperado el 06 de 08 de 2025, de https://humedalriomaipo.cl/humedal/

Kennish, M. J. (2002). *Environmental threats and environmental future of estuaries*. Environmental Conservation, 29(1), 78–107. https://doi.org/10.1017/S0376892902000061

Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). *The State of the World's Beaches*. Scientific Reports, 8(1), 6641. https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6

Ministerio del Medio Ambiente. (2023). *Restauración en Laguna Cahuil: Manejo de la barra de arena y reforestación de especies nativas*. GEF Humedales. https://gefhumedales.mma.gob.cl/restauracion-en-laguna-cahuil-manejo-de-la-barra-de-arena-y-reforestacion-de-especies-nativas/

Orescanin, M. M., Coughlin, J., & Young, W. R. (2021). *Morphological response of variable river discharge and wave forcing at a bar-built estuary.* Estuarine, Coastal and Shelf Science, 258, 107438. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107438

Oyedotun, T. D. T., & Nedd, G. A. (2023). *River mouth morphodynamics and deflection over the short term: Effects on spit growth and mangrove dynamics*. Frontiers in Environmental Science, 11, Art. 1181627. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1181627

Pritchard, R.W., (1967). *What is an estuary? Physical viewpoint*. In G. H. Lauff (Ed.), Estuaries (pp. 3–5). American Association for the Advancement of Science.

Proyecto GEF Humedales Costeros. (2021). *Propuesta integral de protocolo de apertura mecanizada de la barra terminal para el humedal de Cáhuil* [Informe técnico]. Ministerio del Medio Ambiente de Chile. https://gefhumedales.mma.gob.cl/propuesta-integral-de-protocolo-de-apertura-mecanizada-de-la-barra-terminal-para-el-humedal-de-cahuil/

Qi, Y., Qian, Y., Gao, S., Li, Z., Fang, X., & Guo, Y. (2021). *Morphological evolution of river mouth spits: Wave effects and self-organization patterns.* Estuarine, Coastal and Shelf Science, 262, 107567. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107567

Ranasinghe, R., & Pattiaratchi, C. (2003). *The seasonal closure of tidal inlets: Causes and effects*. Coastal Engineering Journal, 45(4), 601–627. https://doi.org/10.1142/S057856340300087

Robins, P. E., Skov, M. W., Lewis, M. J., Gimenez, L., Davies, A. G., Malham, S. K., Neill, S. P., McDonald, J. E., Whitton, T. A., Jackson, S. E., & Jago, C. F. (2015). *Impact of climate change on UK estuaries: A review of past trends and potential projections.* Estuarine, Coastal and Shelf Science, 169, 119-135. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.016

Slinger, J. H. (2016). Hydro-morphological modelling of small, wave-dominated estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 198(B)*, 583-596. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.10.038

Soto-Rivas, K., Flores, R. P., Williams, M., & Escauriaza, C. (2024). *Understanding Salinity Intrusion and Residence Times in a Small-Scale Bar-Built Estuary under Drought Scenarios: The Maipo River Estuary, Central Chile*. Journal of Marine Science and Engineering, 12(7), 1162. https://doi.org/10.3390/jmse12071162

Tanaka, H., Hoang, V. C., & Nguyen, T. V. (2016). *Investigation of morphological change at the Cua Dai river mouth through satellite image analysis*. En P. Lynett (Ed.), Proceedings of the 35th International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2016), Antalya, Turkey (Vol. 35). American Society of Civil Engineers.

Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T. J., Herman, P. M. J., Ysebaert, T., & De Vriend, H. J. (2013). *Ecosystem-based coastal defence in the face of global change*. Nature, 504(7478), 79–83. https://doi.org/10.1038/nature12859

Tong, S. S., Deroin, J. P., & Pham, T. L. (2020). *An optimal waterline approach for studying tidal flat morphological changes using remote sensing data: A case of the northern coast of Vietnam.* Estuarine, Coastal and Shelf Science, 236, 106613. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106613

Xie, D., Wang, Z. B., van der Wegen, M., & Huang, J. (2021). *Morphodynamic modeling the impact of large-scale embankment on the large bar in a convergent estuary*. Marine Geology, 442, 106638. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106638

Xu, H. (2006). *Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery.* International Journal of Remote Sensing*, 27*(14), 3025-3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179

Yang, C.-S., & Ouchi, K. (2012). *Analysis of bar morphology using multi-temporal and multi-sensor satellite images: Example from the Han Estuary, Korea.* Marine Geology, 311, 17-31. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.04.004