

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE LA DESEMBOCADURA DE ESTUARIOS
INTERMITENTES EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE Y SU RELACIÓN CON
EL CAUDAL DE RÍO APORTANTE**

DRAZEN KUSJANOVIC¹
MEGAN WILLIAMS²
PATRICIO CATALÁN³

RESUMEN

Los estuarios representan ecosistemas de alto valor ecológico, funcional y social, ya que desempeñan un papel clave en la regulación de procesos biofísicos y la provisión de procesos ecosistémicos esenciales. Sin embargo, el creciente cambio climático y presión antrópica de la zona costera ha generado una degradación progresiva de la morfología de estos ambientes. En este estudio se analiza la evolución morfológica de la desembocadura de 12 estuarios de tipo barrera ubicados en la zona central de Chile durante el periodo de 1985-2024, con el objetivo de caracterizar sus transformaciones morfológicas y evaluar su relación con el caudal fluvial aportante. Para ello, se implementó una metodología basada en teledetección y el procesamiento automatizado de imágenes satelitales para estimar el estado de conexión estuario-océano y el ancho efectivo de desembocadura. Los resultados muestran una tendencia general al aumento en la frecuencia de cierres y al estrechamiento de las desembocaduras, asociadas a la disminución sostenida del caudal fluvial. Se observa además que, si bien la acción del oleaje actúa de forma constante en la dinámica morfológica, su capacidad en el cierre de desembocaduras a través de la deriva litoral depende críticamente de la magnitud del caudal fluvial, lo que refuerza el rol del régimen hidrológico como variable moduladora crítica de la morfología estuarina. Este trabajo aporta evidencia sobre el impacto de la crisis hídrica en la estabilidad de estuarios intermitentes y destaca el potencial de las herramientas satelitales para su monitoreo a largo plazo.

¹ Estudiante de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María - email: drazen.kusjanovic@sansano.usm.cl

² Profesora Asistente, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental & Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: megan.williams@uc.cl

³ Profesor Titular, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María - email: patricio.catalan@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas estuarinos se encuentran a lo largo de todo el mundo en una gran variedad de configuraciones geológicas y oceanográficas (McSweeney et al., 2017). Sin embargo, se ha determinado como característica prevalente que el número de estuarios que se encuentra por unidad de longitud de costa será mayor a lo largo de márgenes continentales activos (Inman y Nordstrom, 1970) y sobre plataformas continentales de un mayor ancho (Nummedal et al., 1977). Estas características hacen del territorio costero de Chile una zona geográfica ideal para la proliferación de estos sistemas, en donde es posible encontrar estuarios de diversas morfologías a lo largo de sus más de 6.400 kilómetros de longitud de costa.

En la zona central de Chile, caracterizada por un clima mediterráneo, es común la presencia de estuarios de tipo barrera (i.e. Pritchard, 1960). Estos sistemas se distinguen por la formación de bancos de arena en su desembocadura, conformando una barrera transversal la cual puede obstruir parcial o totalmente su conexión con el océano. La evolución morfológica de estas desembocaduras se encuentra gobernada por la acción combinada del movimiento de mareas, el clima de oleaje y el caudal del río aportante (Dalrymple et al., 1992), por lo que comprender el comportamiento de estas forzantes hidrodinámicas es clave para entender la dinámica de apertura y cierre de estos sistemas.

La marea y el oleaje se consideran variables relativamente estables a escalas interanuales en comparación con el caudal fluvial, el cual puede presentar cambios significativos debido a su dependencia de procesos hidrológicos naturales y de intervenciones antropogénicas en la cuenca aguas arriba de la desembocadura del río. Esta alta variabilidad convierte al caudal en un factor particularmente influyente en la dinámica de estuarios de menor escala, donde puede incluso llegar a ser más importante que el flujo mareal en la definición de la morfología de la desembocadura y de la evolución de su barrera de arena (Ranasinghe et al., 1999). El régimen fluvial cobra, además, una especial relevancia en un contexto nacional de crisis hídrica (Garreaud et al., 2019), donde se ha documentado una disminución sostenida en los aportes fluviales de numerosos ríos exorreicos a lo largo de los últimos años (Bozkurt et al., 2018).

A pesar de los avances en la comprensión de los estuarios en Chile, la evolución morfológica de estos sistemas, y en particular su relación con el caudal de río, ha sido pobremente cuantificada a nivel nacional, donde la mayoría de los estudios disponibles se concentran en eventos puntuales o en periodos de tiempo acotados, dejando una brecha importante en el entendimiento de sus transformaciones a largo plazo.

En este contexto, la teledetección se presenta como una gran alternativa para la recopilación de información de la zona costera y el estudio de fenómenos de una a mayor escala espacial y temporal, como la dinámica morfológica de sistemas estuarinos. Esto debido a su amplia cobertura espacial, al monitoreo temporal continuo que ofrece y a su rentabilidad en comparación con otros enfoques que requieren de mediciones realizadas en campañas en terreno o el uso de modelos físicos en laboratorio.

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la morfodinámica de la desembocadura de los principales sistemas estuarinos en la zona central de Chile durante los últimos 40 años. Para

ello, se emplean técnicas de teledetección y procesamiento automatizado de imágenes satelitales, lo que permite caracterizar la evolución temporal de parámetros morfológicos clave, como el estado de conexión del estuario y el ancho de su desembocadura. Este enfoque ofrece una metodología innovadora para el monitoreo sistemático de estos sistemas, permitiendo su análisis en escalas espaciales y temporales antes inabordables, y contribuyendo al desarrollo de estrategias para la gestión integrada de la zona costera.

2. ZONAS DE ESTUDIO

En la zona central de Chile, caracterizada por un macrobioclima mediterráneo (~ 23°S a 37°S) es posible identificar más de 70 sistemas con características estuarinas que incluyen las desembocaduras de los principales ríos, esteros y arroyos de la extensión especificada, además de múltiples lagunas y humedales costeros.

Para este estudio, se seleccionó un conjunto reducido de estuarios representativos (Tabla 1). La selección de estos sistemas considera la disponibilidad continua de registros satelitales, la relevancia hidrológica de las cuencas hidrográficas a las que pertenecen, una distribución geográfica representativa dentro del área de estudio, un tamaño adecuado para su procesamiento mediante teledetección y la evidencia documentada de intermitencia en la conexión del estuario con el océano.

Tabla 1: Sistemas estuarinos estudiados en este trabajo. Se indica distribución geográfica y administrativa, área de cuenca hidrográfica y caudal medio anual de río en estación fluviométrica más cercana. [1] = Inventario de Cuencas de Chile (DGA). [2] = Sistema Nacional de Información de Agua (DGA).

Sitio	Lat. (S)	Long. (O)	Región	Área Cuenca ^[1] (km ²)	Caudal Medio ^[2] (m ³ /s)
Río Elqui	29°53'	71°16'	Coquimbo	9.826	4,7
Río Limarí	30°43'	71°41'	Coquimbo	11.697	7,8
Río Choapa	31°37'	71°33'	Coquimbo	7.654	10,8
Río Petorca – La Ligua	32°24'	71°24'	Valparaíso	3.969	2,4
Río Aconcagua	32°55'	71°30'	Valparaíso	7.334	18,9
Río Maipo	33°36'	71°37'	Valparaíso	15.274	107,0
Río Rapel	33°54'	71°49'	O'Higgins	13.767	-
Esteros Nilahue	34°28'	72°01'	O'Higgins	3.397	8,7
Río Mataquito	34°58'	72°10'	Maule	6.332	109,0
Río Maule	35°19'	72°24'	Maule	21.054	457,8
Río Itata	36°23'	72°52'	Ñuble	11.327	323,3
Río Biobío	36°48'	73°09'	Biobío	24.371	913,9

3. METODOLOGÍA

3.1 TELEDETECCIÓN Y USO DE INLETTRACKER

Para determinar el estado de conexión y estimar el ancho de las desembocaduras de estuarios, se propone el uso de imágenes satelitales de mediana resolución y libre acceso, disponibles a través de programas de observación terrestre como Landsat (L5, L7 y L8) y Sentinel-2 (S2). Estos ofrecen un registro histórico continuo desde 1985 hasta la actualidad para el monitoreo

de la zona costera, con resoluciones espaciales de 10 a 30 metros por píxel y frecuencias de revisita adecuadas para el monitoreo multitemporal, permitiendo identificar patrones de variabilidad estacional e interanual en las desembocaduras estuarinas.

La identificación de la desembocadura de estuarios se basa en la detección de los cuerpos de agua que la componen. Para este estudio se utiliza el Índice Diferencial de Agua Normalizado Modificado mNDWI (Xu, 2006), el cual utiliza bandas espectrales verde e infrarroja de onda corta para resaltar el contraste entre cuerpos de agua y otros tipos de cobertura terrestre, facilitando así el análisis automatizado de las imágenes.

Para el procesamiento automatizado de las imágenes satelitales se utilizó la herramienta InletTracker (Heimhuber et al., 2021), un toolkit de código abierto implementado en Python. Esta herramienta permite el rastreo automático de la desembocadura de estuarios sobre transectos georreferenciados generados a lo largo y ancho de su barrera de arena.

InletTracker emplea las funcionalidades del paquete de herramientas de Python CoastSat (Vos et al., 2019) para el acceso a registros satelitales públicos disponibles en Google Earth Engine. Las imágenes descargadas son procesadas mediante técnicas de mejoramiento espacial (i.e. *pansharpening* y *downsampling*), para luego aplicar un algoritmo de búsqueda de rutas de menor costo. Este algoritmo recorre de forma iterativa una superficie de coste definida a partir del valor del índice espectral mNDWI de signo invertido, acumulando el coste de cada píxel a lo largo del camino trazado. Como resultado, se generan dos transectos para cada imagen analizada (Figura 1a): un transecto transversal a la barrera de arena, que conecta el océano con un punto al interior del estuario, y un transecto longitudinal, el cual conecta dos puntos de la playa ubicados en lados opuestos de la desembocadura.

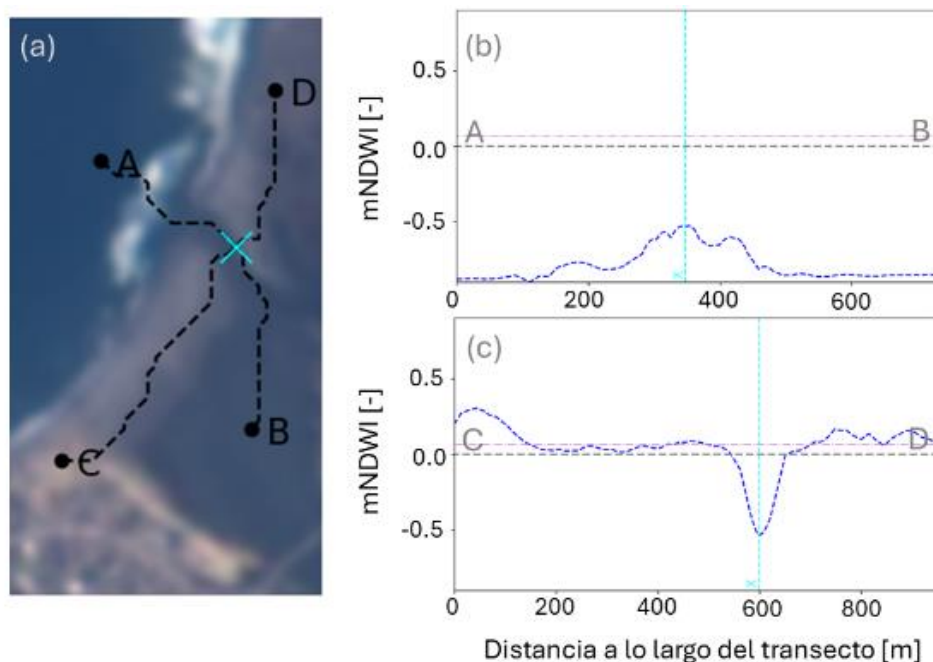


Figura 1: Generación automática de los transectos mediante InletTracker. En (a) registro satelital de la desembocadura del Río Aconcagua en estado abierto. En (b) y (c) se presentan el perfil espectral mNDWI⁽⁻¹⁾ generado a través y a lo largo de la barrera, respectivamente.

El transecto a lo largo de la barrera de arena (Figura 1c) reproduce de manera aproximada la morfología de la desembocadura para cada imagen del registro satelital y constituye la base de análisis para la determinación del ancho de su canal.

3.2 ESTADO DE CONEXIÓN

El estado de conexión de un estuario queda determinado por la presencia o ausencia de un canal de agua que atraviesa la barrera de arena y conecta el océano con el interior del estuario. Si bien este estado puede ser inferido automáticamente mediante una función incorporada en el paquete de herramientas de InletTracker, para esta investigación se opta por una inspección visual directa del registro satelital para un diagnóstico más certero. Esta tarea se lleva a cabo utilizando una interfaz gráfica de clasificación de estado de imágenes presente en InletTracker, la cual permite al usuario inspeccionar cada registro satelital en sus formatos de color verdadero, Índice Diferencial de Agua Normalizado NDWI e Índice Diferencial de Agua Normalizado Modificado mNDWI, asignando un estado de conexión a cada imagen. Este procedimiento da como resultado una serie temporal binaria que representa la evolución del estado de conexión del estuario en el tiempo.

A partir de esta serie, se calcula el parámetro *Entrance Closure Index* (ECI) (Haines, 2006), definido como la razón entre el número de observaciones en que el estuario estuvo cerrado y el total de observaciones validadas dentro de un periodo representativo, lo cual permite caracterizar la frecuencia relativa de cierre de desembocadura. Con el fin de identificar patrones estacionales, se calcula la frecuencia mensual de cada estado.

Finalmente, con el objetivo de identificar tendencias a largo plazo en la frecuencia de aperturas o cierres, se aplica un test de tendencia basado en regresión lineal sobre la proporción anual de estados abiertos. Esta prueba permite evaluar si dicha proporción ha experimentado una variación sistemática a lo largo del tiempo.

3.3 CÁLCULO DE ANCHO DE DESEMBOCADURA

Para estimar el ancho efectivo de las desembocaduras, se emplea un algoritmo de procesamiento sobre los perfiles espectrales de transectos a lo largo de la barrera de arena generados por InletTracker. Este método determina el tramo correspondiente al canal abierto en la barrera de arena mediante un umbral espectral adaptativo, definido a partir de la mediana del perfil espectral (M_{mNDWI}) (i.e. Heimhuber et al., 2021) y el valor mínimo (punto con mayor potencial de representar la parte más profunda de la desembocadura). Este umbral relativo se calcula como:

$$U = M_{mNDWI} - \frac{P}{100} \cdot \Delta \quad (1)$$

donde Δ representa la diferencia entre M_{mNDWI} y el valor mínimo del perfil espectral, y P es un porcentaje calibrado de manera iterativa para cada sitio a partir de mediciones de referencia del ancho de desembocaduras obtenidas de imágenes de alta resolución en Google Earth Pro. Luego, los puntos con valores espectrales inferiores a este umbral delimitarán el ancho efectivo del canal de la desembocadura (Figura 2a).

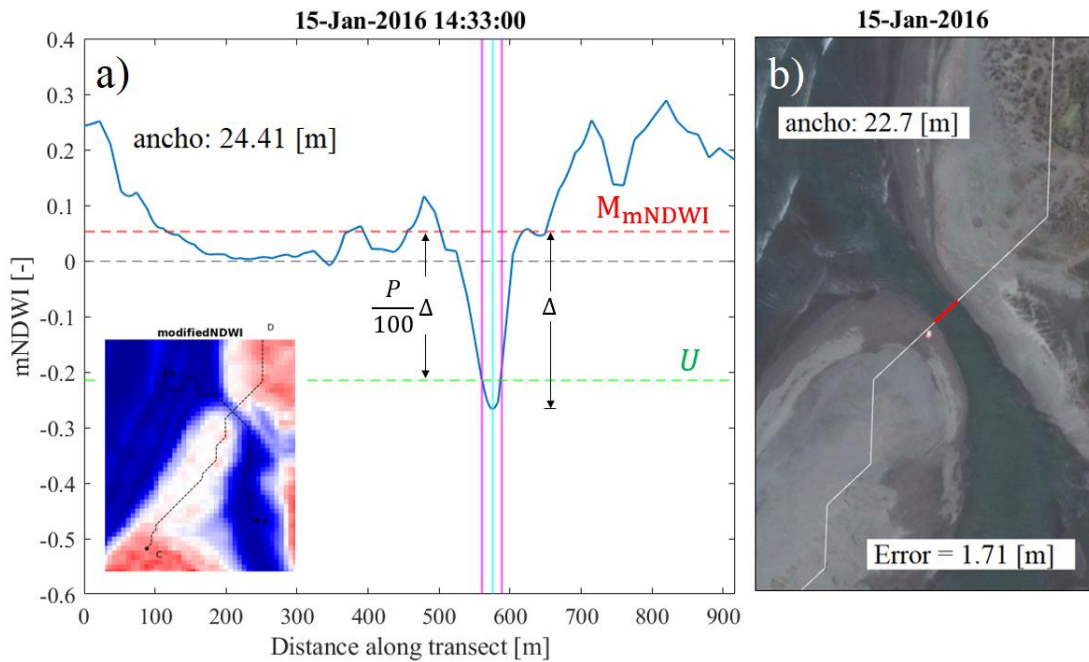


Figura 2: a) Ilustración del método de detección automática del ancho de desembocaduras. En azul se muestra el perfil de valores del índice $mNDWI^{(-)}$ a lo largo de la barrera. Se indica el cálculo del parámetro Δ como la diferencia entre la mediana y el valor mínimo del transecto. La línea punteada verde corresponde al umbral relativo U . b) Validación de resultados a partir de anchos estimados con Google Earth Pro.

Adicionalmente, con el fin de compensar algunas limitaciones asociadas a la resolución espacial de las imágenes, se introducen cuatro coeficientes numéricos correctivos. Estos coeficientes ajustan el ancho estimado mediante parámetros espectrales y geométricos correlacionados con el tamaño real de la desembocadura. Cada coeficiente se define mediante una función exponencial de un parámetro diagnóstico, como la amplitud relativa Δ o la variabilidad espectral del perfil. Para la calibración de estos coeficientes, se define una función objetivo que cuantifica el error entre los anchos corregidos obtenidos mediante el modelo y los anchos reales de referencia.

Finalmente, el método de detección automática de anchos de desembocadura es validado al comparar sus resultados con mediciones reales que no se hayan utilizado en la fase de calibración (Figura 2b). Para evaluar el desempeño del método, se adopta un criterio práctico de validación basado en el error absoluto medio (MAE), donde se establece que el método logra una buena capacidad de generalización si este error es inferior al tamaño de píxel del sensor satelital principal utilizado en el análisis ($MAE < 10$ [m]).

3.4 CORRELACIÓN CON FORZANTES HIDRODINÁMICAS

Con el objetivo de evaluar la relación entre el ancho del canal de desembocadura de los estuarios y el caudal fluvial aportado por el río, se realiza un análisis de correlación utilizando el coeficiente de Spearman, adecuado para el análisis de series temporales no lineales. Para este análisis, se utilizan caudales medios mensuales registrados en estaciones fluviométricas ubicadas aguas arriba de cada desembocadura, cuyos datos son extraídos de los reportes del

Sistema Nacional de Información de Agua de la Dirección General de Aguas (DGA: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>).

Como análisis complementario, se evalúa la relación entre los anchos y el caudal de marea Q_m en la desembocadura (Keulegan, 1967), estimado como la tasa de cambio del prisma mareal del sistema ($Q_m = dP/dt$). Asimismo, se examina la relación entre anchos y variables características del clima de oleaje (H_s, T), y expresiones aproximadas de potencia de oleaje asociadas a forzantes de cierre de desembocaduras ($E_w \sim (1/16)\rho_o g H_s^2 C_g \sin 2\theta$) (Behrens et al., 2013).

4. RESULTADOS

Con el objetivo de ilustrar paso a paso la aplicación de la metodología descrita, se expone en primer lugar el caso del estuario del Río Aconcagua, el cual sirve como referencia para la presentación de resultados de los demás sitios. En la Figura 3 se presentan los resultados correspondientes al análisis del estado de conexión.

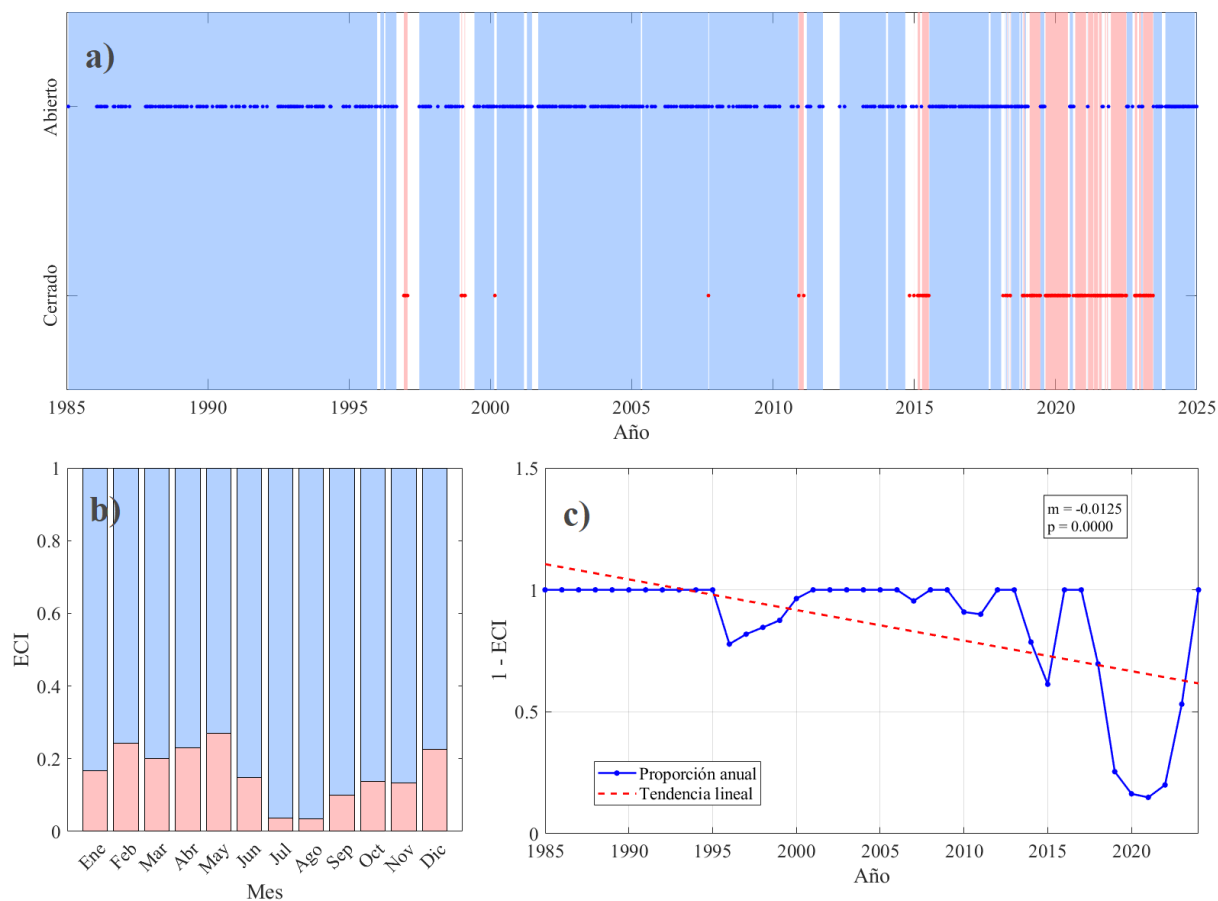


Figura 3: Resultados del análisis de estado de conexión para la desembocadura del estuario del Río Aconcagua. En a) estado de conexión histórico determinado para cada registro satelital, en color azul se indican estados de conexión abiertos y en rojo estados cerrados; en b) estacionalidad parámetro ECI indicada por la barra de color rojo; y en c) regresión lineal simple aplicada a las proporciones anuales de estados abiertos.

Siguiendo con la metodología descrita, a través del procesamiento de perfiles espectrales de transectos generados mediante el método de rutas de menor costo de InletTracker, es posible construir una serie de tiempo del ancho de la desembocadura del estuario en estudio. Esta serie, una vez calibrada, fue validada con un MAE = 4,0 [m]. En la Figura 4 se presentan los resultados correspondientes al análisis de anchos de desembocadura.

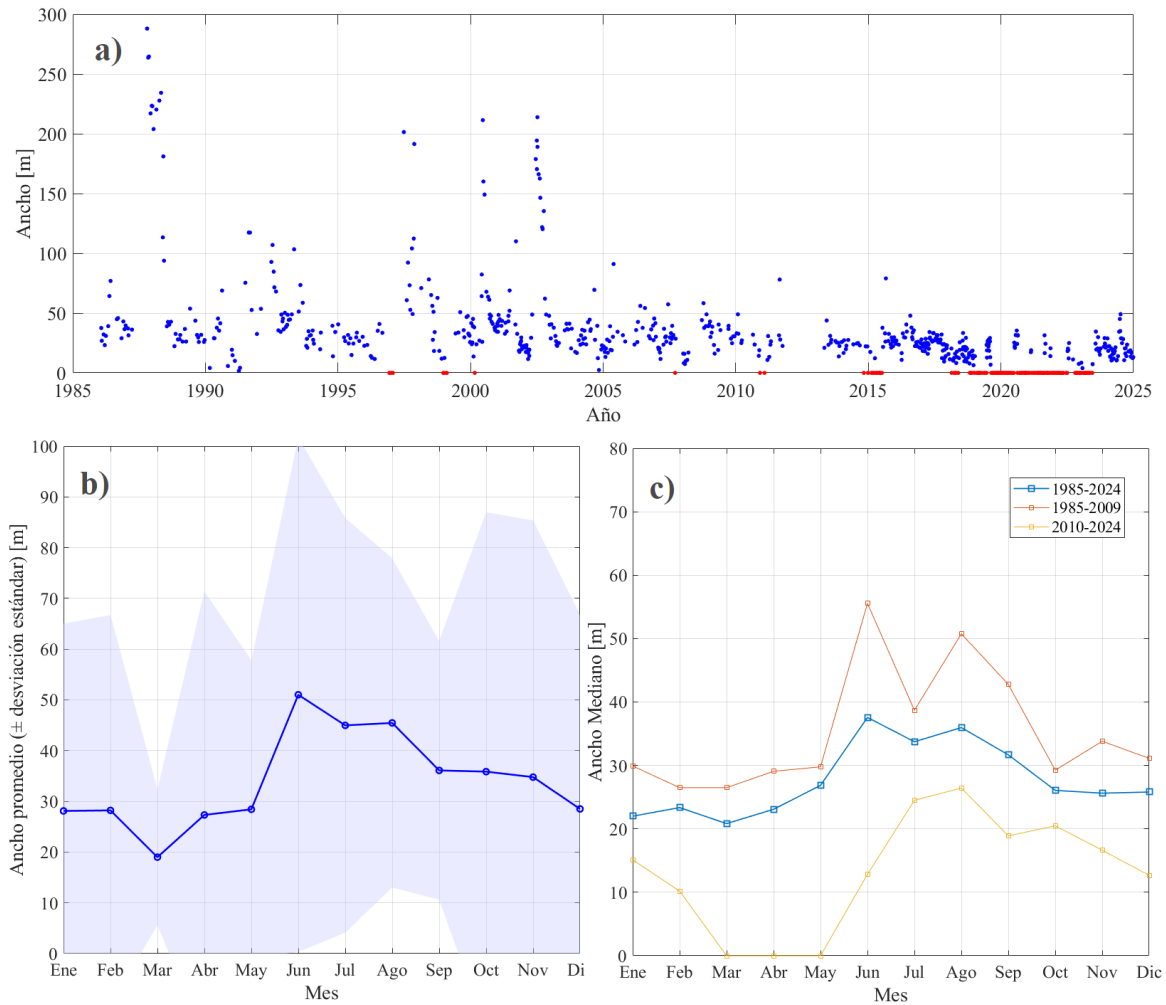


Figura 4: Resultados del análisis del ancho de desembocadura del estuario del Río Aconcagua. En a) ancho histórico determinado para cada registro satelital, en color rojo se indican los cierres; en b) promedio y desviación estándar mensual; y en c) valores medianos mensuales para los distintos periodos indicados.

De manera complementaria, se evalúa la tendencia de los valores medianos mensuales mediante la prueba de Mann-Kendall, obteniéndose un estadístico $Z = -12,65$ para la desembocadura del estuario del Río Aconcagua. Este valor negativo y estadísticamente significativo indica una tendencia decreciente sostenida en el ancho de desembocadura durante el periodo analizado.

Por otro lado, se analizaron las posibles relaciones entre el ancho de desembocadura y las forzantes hidrodinámicas. Los resultados obtenidos se detallan en la Figura 5, incluyendo el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) y su respectivo valor p.

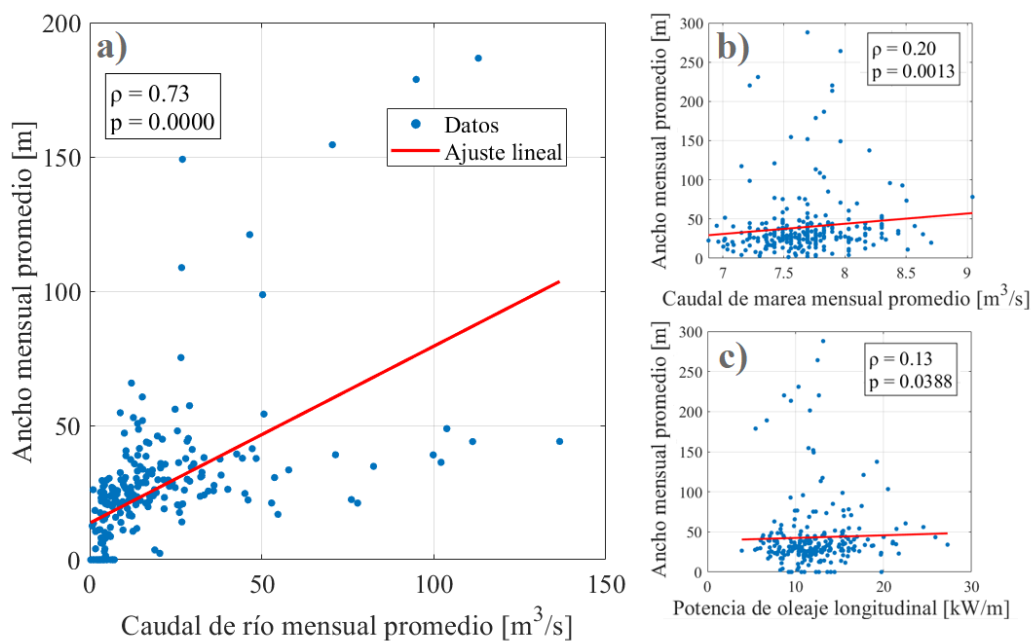


Figura 5: Ancho mensual promedio de desembocadura vs a) caudal mensual promedio del Río Aconcagua en Romeral (BNA 05423003-6); b) caudal de marea promedio y c) potencia de oleaje longitudinal.

Como es posible observar, no se identificaron correlaciones estadísticamente significativas entre el ancho de desembocaduras y las variables marítimas analizadas (Figuras 5b y 5c). Este patrón se observó de forma consistente en los demás sitios, y en consecuencia, su análisis se considera complementario dentro del enfoque principal centrado en el régimen fluvial.

Los resultados obtenidos para los distintos sitios en estudio se resumen en la Tabla 2. Por otro lado, la Figura 6 presenta la evolución histórica del estado de conexión registrado en cada estuario.

Tabla 2: Resumen resultados para los 12 sitios en estudio. Se indican valor del índice ECI y del ancho de desembocadura para los distintos periodos indicados, estadístico Z de la prueba de Mann-Kendall, y coeficiente de correlación de Spearman ρ entre caudal fluvial y ancho de desembocadura.

Sitio	ECI [-]			Ancho [m]			Z	ρ
	1985-2024	1985-2009	2010-2024	1985-2024	1985-2009	2010-2024		
Río Elqui	0,24	0,01	0,56	17,19	34,71	4,72	-12,92	0,64
Río Limarí	0	0	0	26,02	28,90	23,39	-4,78	0,40
Río Choapa	0,25	0,13	0,45	21,17	30,49	12,06	-8,45	0,71
Río Petorca	0,21	0,03	0,54	27,84	38,40	13,07	-6,85	0,65
Río Aconcagua	0,14	0,03	0,32	33,84	47,37	14,52	-12,65	0,73
Río Maipo	0,00	0,00	0,00	82,57	97,87	60,05	-9,21	0,78
Río Rapel	0	0	0	227,69	286,73	149,11	-7,78	-
Estero Nilahue	0,54	0,51	0,58	26,78	32,36	20,49	-2,09	0,74
Río Mataquito	0,00	0,00	0,01	205,78	249,71	158,62	-2,48	0,53
Río Maule	0	0	0	310,79	386,30	238,95	-6,97	0,43
Río Itata	0,01	0,01	0,01	129,30	154,69	112,61	-1,11	0,68
Río Biobío	0	0	0	446,18	345,34	507,60	4,59	0,21

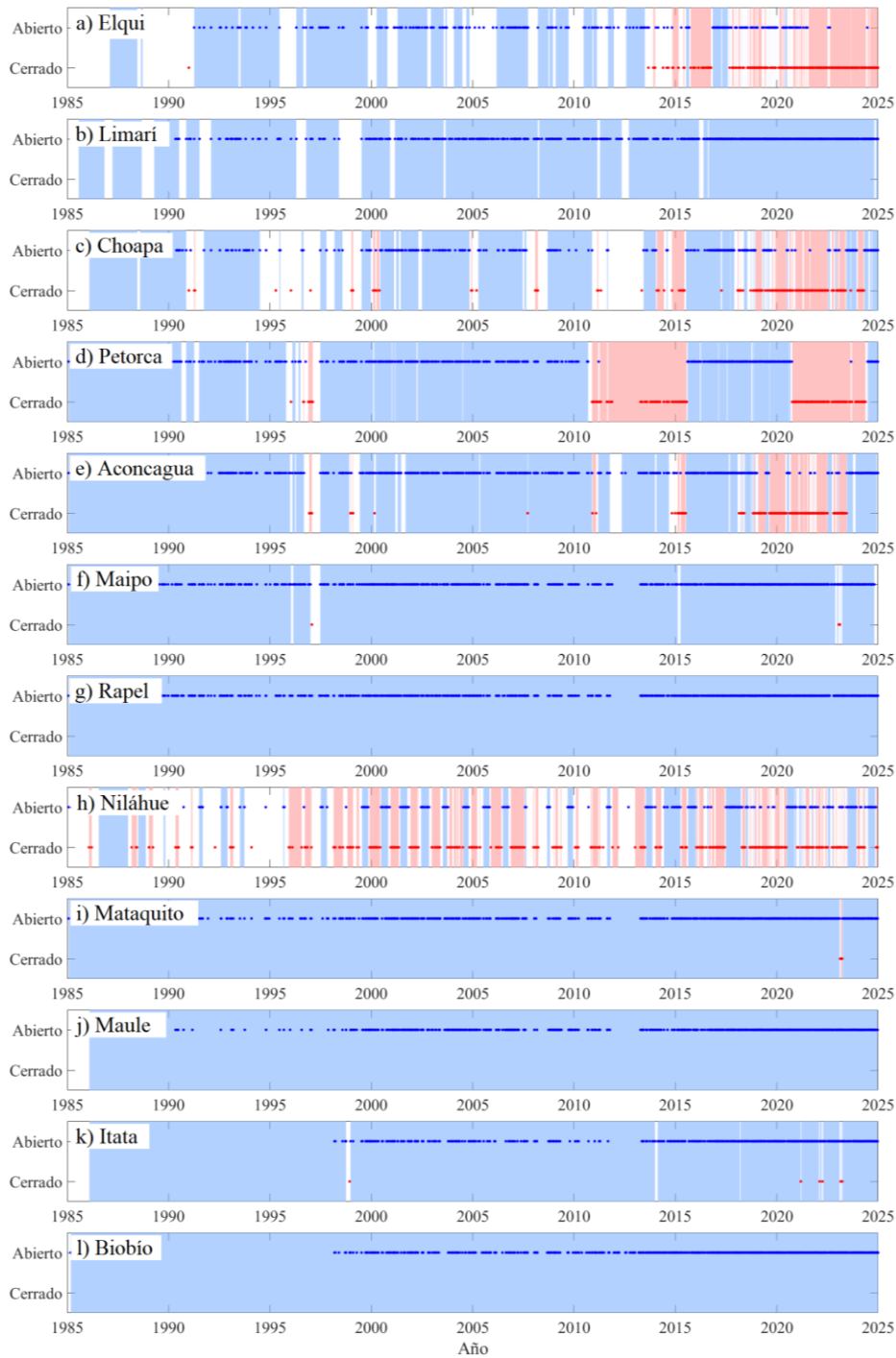


Figura 6: Estado de conexión con el océano de los últimos 40 años para los 12 sistemas estuarinos en estudio. Los puntos representan la imagen satelital individual procesada indicando su estado. En sombreado azul se indica cada vez que se registran estados de conexión abiertos consecutivos, mientras que en sombreado rojo se muestra cuando se registran estados de conexión cerrados consecutivos.

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para los distintos sistemas estuarinos analizados permiten identificar patrones comunes en la evolución morfológica de sus desembocaduras (donde se

observa que estas se mantienen abiertas en años húmedos) así como variaciones específicas asociadas a forzantes hidrológicas. El análisis comparativo entre sitios permitió identificar grupos funcionales que comparten características comunes en su evolución. En estuarios de mediana escala (ancho promedio < 50 [m]) como Elqui, Choapa, Petorca y Aconcagua, se observa un cambio notable en su dinámica de conexión a partir del año 2010 (ver Figura 6), caracterizada por un aumento sostenido del índice ECI, episodios prolongados de cierre y una reducción drástica en la duración de los periodos abiertos. Estos cambios coinciden con una disminución sostenida del ancho de desembocadura, respaldada por tendencias negativas significativas en la prueba de Mann-Kendall. Por otro lado, en sistemas de mayor escala como Maipo, Mataquito e Itata, históricamente abiertos, se registra un aumento de cierres puntuales en el último lustro, lo que podría constituir un indicador de vulnerabilidad emergente de estos estuarios. Adicionalmente, en todos los demás sitios, salvo en el estuario del Río Biobío, se presenta una disminución en el ancho de desembocadura (ver Tabla 2).

En general, se observa que los estuarios asociados a cuencas con menores caudales medios presentan una mayor frecuencia de cierre, especialmente en años recientes, lo que sugiere una relación directa entre la disminución del aporte fluvial y la obstrucción de la conexión con el océano. De forma complementaria, la tendencia decreciente en el ancho de desembocaduras sugiere un vínculo con la disminución sostenida de los caudales fluviales en el contexto de la sequía prolongada que afecta a la zona central de Chile. Esta hipótesis se ve reforzada por los resultados del análisis de correlación, donde se obtienen coeficientes de Spearman significativos ($\rho > 0,6$) en la mayoría de los sistemas estudiados. Además, los análisis estacionales muestran mayores anchos de desembocadura durante el invierno y la primavera temprana, en concordancia con los máximos hidrológicos por lluvias y deshielos, y menores valores durante el verano, cuando los caudales disminuyen. Estos resultados adquieren mayor relevancia al considerar que las forzantes marítimas, como la marea y el oleaje, no mostraron correlaciones significativas con el ancho de desembocaduras, ni evidenciaron variaciones sustantivas a escalas latitudinales ni en su temporalidad interanual. Esto sugiere que ambos factores actúan de forma persistente y estable en sus efectos erosivos y de acreción de la barrera de arena, respectivamente. Por consiguiente, se observa que el oleaje solo logra actuar efectivamente en el cierre de la desembocadura cuando los caudales fluviales disminuyen, mientras que ante caudales intensos y sostenidos no es capaz de contrarrestar su efecto erosivo. Así, si bien el oleaje constituye un agente morfodinámico activo permanente, es el caudal del río el que regula su eficacia, y por ende, determina en gran medida la apertura y cierre del sistema.

6. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que los estuarios de la zona central de Chile presentan una evolución morfológica heterogénea en cuanto a su estado de conexión con el océano, con patrones fuertemente condicionados por las características locales de cuenca y de régimen hidrológico. A partir del año 2010, se identificó un cambio significativo en varios estuarios de mediana escala, caracterizado la reducción del ancho de desembocadura y por episodios prolongados de cierre. Por otro lado, en los años recientes se ha identificado el aumento de cierres puntuales en estuarios de mayor escala, lo que puede indicar una señal temprana de vulnerabilidad. Estos cambios se encuentran fuertemente correlacionados con una disminución del caudal fluvial, lo que refuerza su rol como principal forzante en la dinámica

de apertura y cierre. En conjunto, estos resultados aportan evidencia relevante para comprender los procesos que controlan la dinámica de desembocaduras estuarinas y ofrecen herramientas prácticas para su monitoreo y gestión en el contexto de escenarios hidrológicos cambiantes.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por CIGIDEN mediante el Proyecto FONDAP 1523A0009 y al Proyecto FONDECYT 11191077.

REFERENCIAS

Behrens, D.K., Bombardelli, F.A., Largier, J. L. and Twohy, E. (2013). Episodic closure of the tidal inlet at the mouth of the Russian River — A small bar-built estuary in California. *Geomorphology*, Volume 189, 66-80.

Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J., and Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Clim Change* 150, 131-147.

Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A. and Boyd, R. (1992). Estuarine Facies Models: Conceptual Basis and Stratigraphic Implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62, 1130-1146.

Garreaud, R., JP. Boisier, R. Rondanelli, A. Montecinos, H. Sepúlveda and D. Veloso-Águila (2019). The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A Climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 1-19.

Haines, P. (2006). Physical and Chemical Behaviour and Management of Intermittently Closed and Open Lakes and Lagoons (ICOLLs) in NSW. PhD Thesis. Griffith University, Queensland, Australia.

Heimhuber, V., Vos, K., Fu, W. and Glamore, W. (2021). InletTracker: an open-source Python toolkit for historic and near real-time monitoring of coastal inlets from Landsat and Sentinel-2. *Geomorphology*, 389, p. 107830.

Inman, D. L. and Nordstrom, C. E. (1971). On the Tectonic and Morphologic Classification of Coast. *Journal of Geology*, Vol 79, 1-21.

McSweeney, S.L., Kennedy, D.M., Rutherford, I.D. and Stout J.C. (2017). Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons: Their global distribution and boundary conditions. *Geomorphology*. Vol 292, 142-152.

Nummedal, D., Oertel, F. G., Hubbard, D. K., and Hine, A. C. (1977). Tidal inlet variability – Cape Hatteras to Cape Canaveral: *Proc. Coastal Sediments '77*, ASCE, Charleston, S.C., 543-562.

Pritchard, D. W. (1960). Lectures on estuarine oceanography. B. Kinsman (Editor), J. Hopkins Univ., p. 154.

Ranasinghe, R., Symonds, G. and Holman R. A. (1999). Quantitative characterization of rip currents via video imaging, in *Coastal Sediments '99*, edited by N. C. Kraus and W. G. McDougal, 987-1002.

Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A. and Turner I. L. (2019). CoastSat: a Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environ. Model. Softw.*, 122, p. 7.

Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3025-3033.