

## IX SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

### MODELADO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO HIDRO-MORFODINÁMICO DEL HUMEDAL COSTERO DEL RÍO ELQUI

**ROBERTO AGREDANO MARTÍN<sup>1</sup>**  
**ALFREDO NAVARRO ARAVENA<sup>2</sup>**  
**MANUEL CONTRERAS LÓPEZ<sup>3</sup>**  
**PATRICIO WINCKLER GREZ<sup>4,5,6</sup>**  
**FRANCISCO CABRERA CONA<sup>7</sup>**  
**CARLOS ZULETA RAMOS<sup>8</sup>**  
**CHRISTIAN JOFRÉ-PÉREZ<sup>9</sup>**

#### 1. RESUMEN

Los humedales costeros son sistemas que ofrecen funciones de protección y mitigación frente a eventos extremos, como pueden ser las marejadas o tsunamis, y actúan como reservorios o sumideros de carbono entre otras funciones. Dada además la fuerte antropización de las zonas cercanas a estos sistemas, en muchas ocasiones los humedales quedan cercados por la actividad antrópica, reduciendo su capacidad de adaptación natural y requiriendo entonces de planes de manejo para conseguir el equilibrio entre la actividad humana y la conservación ecológica del humedal. Este trabajo muestra la simulación hidro-morfodinámica del comportamiento de la desembocadura Humedal del río Elqui (La Serena), focalizado en la dinámica de la barra de arena que lo separa del océano, para años caracterizados como normales y lluviosos en cuanto al caudal que el humedal recibe desde el río Equi.

<sup>1</sup>DINÁMICA COSTERA E.I.R.L, email: robertoagredanomartin@gmail.com

<sup>2</sup>DINÁMICA COSTERA E.I.R.L, email: alfredo.navarro@alu.ucm.cl

<sup>3</sup>Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso - email: manuel.contreras.lopez@gmail.com

<sup>4</sup>Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso - email: patricio.winckler@uv.cl

<sup>5</sup>Centro de Observación Marino para Estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR)

<sup>6</sup>Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN)

<sup>7</sup>DINÁMICA COSTERA E.I.R.L, email: fjcabreracona@gmail.com

<sup>8</sup>Departamento de Biología, Universidad de la Serena, email: czuleta@userena.cl

<sup>9</sup>Centro de Estudios Avanzados (CEA) y Departamento de Ciencias Básicas e Informática (Campus San Felipe), Universidad de Playa Ancha, email: christian.jofre@gmail.com

## 2. INTRODUCCIÓN

El humedal de Desembocadura del Río Elqui (29,9°S) es un humedal costero urbano que se ubica aproximadamente a 3 km al noroeste del casco fundacional de La Serena, en el centro de la Bahía de Coquimbo, Comuna de La Serena. El humedal abarca una superficie de 568,1 hectáreas (Figuroa et al. 2021), de las cuales 26,2 hectáreas corresponden a la desembocadura propiamente tal (Figura 1). El área de la cuenca de captación es de 9.302 km<sup>2</sup> y la longitud del cauce principal del estuario Elqui es de 8,81 km (Zuleta-Ramos et al. 2020). El origen del agua de la laguna proviene principalmente del Río Elqui, con aportes de escurrimiento pluvial, agua subterránea y agua marina en pleamar (DGA 2004, Figuroa et al. 2021). El estudio que delimita al sistema de la desembocadura del Río Elqui con una superficie de 568,1 ha (Figuroa et al. 2021), incorpora áreas de inundación temporal, con alrededor de 300 hectáreas y el humedal permanente con 140 hectáreas. Finalmente, el 27% de la superficie restante se encuentra distribuida en 6,7 hectáreas para la laguna costera, playas y dunas con 30 hectáreas, mientras que 111,6 hectáreas son áreas de vegetación ripariana (Figuroa et al. 2021). La laguna de su desembocadura se encuentra delimitada en su ribera norte por campos agrícolas que están siendo alcanzados por la trama urbana, de la cual recibe diferentes tipos de presiones que amenazan su funcionalidad, entre las que destacan: la fragmentación y pérdida de hábitats, la contaminación de sus aguas y el cambio del uso del suelo (Zuleta-Ramos et al. 2020). Entre las presiones naturales que afectan al estuario del Río Elqui destaca el tsunami de septiembre de 2015, que inundó el humedal con sobrepasos de más de 300 metros y un runup de 2 m (Contreras-López et al. 2016). Por otra parte, entre 1986 y 2017, este humedal ha perdido casi un 11% de su espejo de agua (Winckler et al. 2019) debido a los períodos de sequía, la sobreexplotación del recurso hídrico, la intervención del caudal y el cambio climático.

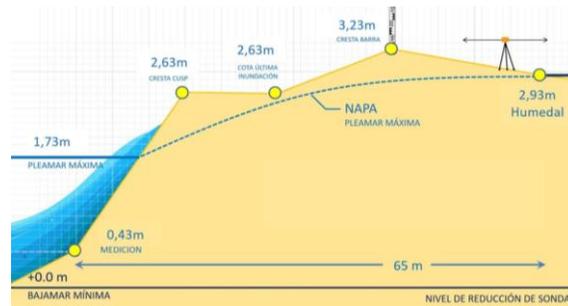
**Figura 1: Vista de la desembocadura del río Elqui realizada desde dron. Las flechas amarillas indican la posición de la barra de arena que la separa del océano y las flechas azules apuntan a zonas cubiertas por vegetación de pajonal.**



El humedal está separado del océano por una barra de arena cuya cota máxima está 0.3 m por encima del nivel del agua en el humedal (2.93 m) y 1.5 m por encima de la pleamar máxima (Figura 2); obtenida por medición directa el día 4 de septiembre de 2021). Esta barra se abre de forma natural frente a eventos de caudal desde el río Elqui, aperturas que han ido disminuyendo

en número en los últimos años. Por otro lado, han aumentado las aperturas antrópicas no reguladas donde las razones de estas no son claras por no haber información de estas<sup>1</sup>.

**Figura 2: Topografía de la barra de arena de la desembocadura del río Elqui, referida al Nivel de Reducción de Sonda del Puerto de Coquimbo.**



El objetivo de este trabajo es el de caracterizar el comportamiento hidro-morfodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena a través de la implementación un modelo numérico, considerando las condiciones tipo para año normal y año húmedo respecto de los caudales y concentraciones de sedimentos aportantes desde río Elqui al humedal. Los resultados nos muestran, para las condiciones de las simulaciones, los patrones de variaciones de niveles, velocidades y erosión/sedimentación de todo el sistema, y en particular de la barra terminal de arena.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Descripción general del modelo. Delft3D

Delft3D (Deltares, 1999) es un sistema de modelado integrado de flujo y transporte, orientado al medioambiente acuático. En el módulo de flujo, Delft3D-FLOW, se resuelven las ecuaciones no lineales 2D (promediadas en profundidad) y 3D para aguas someras (shallow water equations) que derivan de las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes para flujo incompresible de superficie libre. Este módulo es importante ya que proporciona las bases hidrodinámicas para otros módulos como los de oleaje y morfología. El software Delft3D es un modelo morfodinámico que incorpora tanto hidrodinámica como transporte de sedimentos y retroalimentación en los cambios morfológicos. Las forzantes incluidas para simular fenómenos de transporte son la marea y los forzamientos atmosféricos, siendo posible además incluir los efectos de la diferencia de densidades debidas a distribuciones de temperatura y salinidad. Además, permite simular problemas de transporte donde el campo de flujo horizontal muestra variación significativa en la dirección vertical.

Las ecuaciones que gobiernan el flujo corresponden a la ecuación de conservación de la masa:

<sup>1</sup> "Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo". Proceso de Selección Coquimbo N° 01/2021 GEFSEC ID: 9766

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

y las ecuaciones de conservación de momentum:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{C_b h} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_H \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_H \frac{\partial U}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + g \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{C_b h} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_H \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_H \frac{\partial V}{\partial y} \right), \quad (3)$$

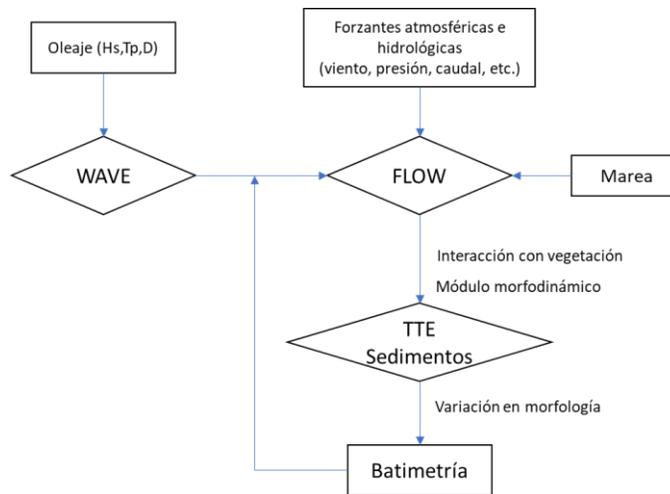
Donde  $\eta$  es la elevación de la superficie libre sobre el plano de referencia (en  $z = 0$ ),  $x$ ,  $y$  y  $z$  son las coordenadas longitudinal, transversal y vertical, respectivamente,  $t$  el tiempo,  $U$  y  $V$  las componentes horizontales de la velocidad promediadas en la profundidad,  $g$  la gravedad,  $C_b$  el coeficiente de fricción de fondo,  $h$  la profundidad y  $v_H$  la viscosidad turbulenta. Por otra parte, la ecuación tridimensional de advección-difusión para sedimento en suspensión es:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + - \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

donde  $u$ ,  $v$  y  $w$  son las componentes de la velocidad de flujo en tres dimensiones, en m/s,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  y  $\varepsilon_z$  las difusividades de Eddy de la fracción de sedimentos, en  $m^2/s$ ,  $c$  la concentración de masa de la fracción de sedimentos, en  $kg/m^3$  y  $w_s$  la velocidad de sedimentación de la fracción de sedimento, en m/s.

Delft 3D se aplicará también con su módulo Delft3D-WAVE, basado en el software SWAN (Booij et al., 1999), para modelar el oleaje que se aproxima a la costa frente al humedal. La conjunción de los módulos FLOW y WAVE permite obtener en la costa los niveles totales debidos tanto a la marea como al oleaje y la sobreelevación de este por rotura o setup. Por otro lado, dentro del humedal sólo se aplica el módulo FLOW, activando la componente morfológica que permite simular la erosión, el transporte y la sedimentación de sedimentos, e incluyendo las características de la vegetación presente (pajonal y vegetación baja) que condiciona la hidro-morfodinámica donde esté presente. La Figura 3 muestra el esquema de simulación aplicado.

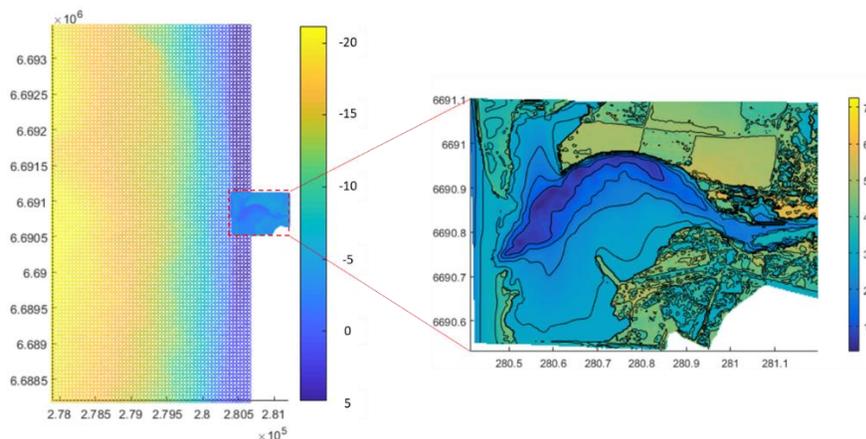
**Figura 3: Esquema teórico de procedimiento para simulación hidro-morfodinámica en los casos con interacción entre el humedal y el océano (barra abierta) con el software Delft3D. Fuente: elaboración propia.**



### 3.1.1. Generación de mallas

La malla de simulación para el humedal se generó mediante la herramienta Delft3D-RFGRID como una malla estructurada ortogonal de tamaño de celda 2,5 x 2,5 m (Figura 4), capaz de captar los fenómenos de transporte de sedimento. Sobre esta malla se construyó la topobatimetría del área de estudio, donde la batimetría corresponde a datos medidos en campaña de terreno y la topografía a datos obtenidos de un modelo de elevación digital del estuario río Elqui. Para la simulación con oleaje y marea desde el océano se usó una malla estructurada ortogonal de 12,5 x 12,5 m con el fin de obtener los niveles del agua en la zona próxima a la barra de arena.

**Figura 4: A la izquierda, dominio completo de la malla del océano junto con el dominio del humedal y sus contornos compartidos. A la derecha, zoom al dominio de la malla del humedal del río Elqui en su desembocadura.**



### 3.2. Simulaciones

Se presentan en este trabajo dos casos simulados para el comportamiento hidro-morfodinámico del humedal que corresponden con las condiciones estadísticas de año normal y año húmedo (lluvioso) para la cuenca del río Elqui, la cual fue realizada en base a los datos de caudales de agua y flujos de sedimentos reportados entre el año 1970 y el año 2021 para los registros existentes en la cuenca. Para el cálculo de los caudales se hizo uso de los datos anuales registrados por la Dirección General de Aguas (DGA) para la estación de “Río Elqui en la Serena”<sup>2</sup> (la más cercana al humedal), y para los flujos de sedimento se tomaron los reportados en INH (2020a).

Las simulaciones se realizan para los datos de contorno de la Tabla 1 como si fueran eventos independientes representativos de cada una de las condiciones. El tiempo de simulación se establece como un evento de duración máxima de 3 días (duración de la tormenta promedio para la zona de estudio obtenido de INH (2020b)). Además, cada uno de los casos se duplicó considerando dos situaciones de la barra de arena del humedal, barra cerrada correspondiente con la situación habitual sin que haya evento extremo de caudal desde el río Elqui, y barra abierta correspondiente con la situación de apertura manual de un canal rectilíneo con el objetivo de bajar los niveles de agua del humedal en previsión del pronóstico de un evento de caudal extremos desde el río Elqui.

**Tabla 1: Casos a simular respecto de los caudales representativos de año normal y año húmedo, y de la situación de la barra de arena.**

	Caudal líquido (QL) m <sup>3</sup> /s	Concentración de sedimentos (QS) kg/m <sup>3</sup>	Barra de arena
Año Normal	7.4	1323	Cerrada
			Abierta
Año húmedo	32	1400	Cerrada
			Abierta

Para la configuración de las simulaciones, la Tabla 2 presenta las características principales de las simulaciones y los parámetros relevantes de las mismas, y la Tabla 3 muestra las condiciones de contorno tanto para el océano como para el río Elqui. En el caso del contorno del océano, el oleaje simulado corresponde con un evento extremo de periodo de retorno de 100 años (obtenido en INH (2020b) por la técnica de Peak Over Threshold, POT, para un rango de datos entre 1980 y 2016), el cual es muy similar al registro durante las marejadas de agosto de 2015 en la misma zona.

**Tabla 2: Características de las simulaciones.**

Paso de tiempo (min)	0.01	
Condiciones iniciales	Salinidad océano (ppt)	31
	Salinidad Humedal (ppt)	3
	Concentración de sedimento (kg/m <sup>3</sup> )	0

<sup>2</sup> <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>

Parámetros físicos	Rugosidad de Manning		U: 0.02 V: 0.02
	Viscosidad horizontal (m <sup>2</sup> /s)		0.02
	Sedimentos	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2650
		D50 (μm)	80
	Viento	Velocidad (m/s)	2.6
		Dirección (°)	280

**Tabla 3: Condiciones de contorno de la malla**

Contornos		
Océano	Forzamiento astronómico	Mareógrafo (marea astronómica)
	Oleaje	H <sub>s</sub> =6 m / T <sub>p</sub> =14 s / D=269°
	Salinidad (ppt)	31
	Concentración de sedimentos (kg/m <sup>3</sup> )	0
Río Elqui	Salinidad (ppt)	0
	Concentración de sedimentos (kg/m <sup>3</sup> )	Año normal: 1323 Año húmedo: 1400

### 3.3. Cálculo de sobrepasos del oleaje

Delft3D sólo es capaz de calcular el sobrepaso si este se produce por niveles desde el océano en combinación con la sobre elevación por rotura del oleaje (setup). Para el humedal con barra de arena, estos niveles no alcanzan la cota máxima de coronación de la barra, pero el sobrepaso es previsiblemente alcanzado en eventos de oleaje extremos.

Para poder calcular el volumen de sobrepaso del agua de mar hacia el interior del estuario se utilizó una formulación empírica. Primero se calcula el run-up, R<sub>u2%</sub> (Stockdon et al. 2006), o elevación máxima del oleaje sobre el perfil de playa respecto del nivel medio. Si este valor supera la cota máxima de coronación de la barra terminal de arena entonces habrá sobrepaso.

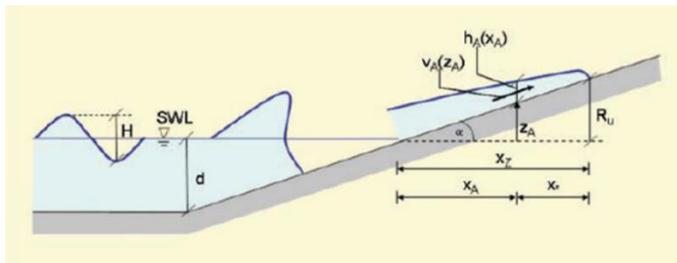
$$R_{u2\%} = 1.1 \left( 0.35 \beta_f (H_0 L_0)^{1/2} + \frac{[H_0 L_0 (0.563 \beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right) \quad (5)$$

Donde B<sub>f</sub> es la pendiente del frente de playa (barra de arena), H<sub>0</sub> es la altura de ola en aguas profundas y L<sub>0</sub> es la longitud de onda en aguas profundas (datos de H<sub>0</sub> y T coincidentes con los datos de oleaje de las simulaciones hidrodinámicas; Tabla 3). Posteriormente se estima el área de sobrepaso con apoyo de la topo-batimetría, considerando un área igual a la longitud de la barra por la diferencia de alturas entre la cota de coronación de la barra de arena y el run-up. Por

Último, se estima la velocidad del sobrepaso ( $v_A$ ) mediante la formulación de Pullen et al. (2007) (Figura 5).

Con estos datos se construye una simulación de entrada de agua salada por sobrepaso desde el contorno oceánico al humedal para estudiar el comportamiento de la mezcla dentro del humedal durante un evento extremo. Esta simulación se realiza de forma independiente, sólo el sobrepaso sin entrada de caudal desde el río al humedal.

**Figura 5: Esquema y formulación para el cálculo de la velocidad de sobrepaso del agua del océano sobre estructuras. En este caso aplicada al sobrepaso sobre la barra de arena. Fuente: Pullen et al. (2007).**



$$\frac{v_A}{\sqrt{gH_S}} = a_0^* \sqrt{\frac{(R_{u2\%} - z_A)}{H_S}}$$

(6)

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados para los cinco casos indicados anteriormente, (1) año normal y barra cerrada, (2) año húmedo y barra cerrada, (3) año normal y barra abierta, (4) año húmedo y barra abierta y (5) sobrepaso por evento extremo de oleaje.

Para los casos de barra cerrada se presentan resultados para 3 días de simulación, para los casos de barra abierta para un día y 9 horas, y para el último caso de sobrepaso de un día. Estos tiempos dependen de cuándo se alcanzan situaciones estables en los resultados.

Dada la diferencia de niveles mostradas en la Figura 2 y los rangos de marea de la zona, no se producirán sobrepasos del océano sobre la barra de arena. Por este motivo, en las simulaciones con barra cerrada se presentan sólo niveles dentro del humedal, mientras que en las simulaciones de barra abierta se muestran además niveles en la costa. En la realidad sí es posible que se produzcan sobrepasos, pero estos están asociados a la cota de run-up por efecto del ascenso del agua en la rotura del oleaje (Delft 3D no es capaz de entregar estos resultados), los cuales se calculan y simulan de forma independiente (Sección 3.3).

### 4.1 Año normal y Barra cerrada

Para el evento simulado en un año normal el nivel del humedal sobrepasa la cota de la barra a las 6 horas y se mantiene por aproximadamente un día, socavando el canal en la barra de arena, para luego sufrir una bajada brusca hasta el nivel inicial en la hora 18 del segundo día (Figura 6). Desde ahí en adelante el nivel disminuye más lento y gradualmente hasta el final de la simulación, después de 3 días. El sentido de la corriente es desde la entrada del río Elqui hacia la barra de arena. Las velocidades máximas son de 1,8 m/s, coincidentes con la descarga brusca de agua

desde el humedal al océano producto de la erosión de la barra, que genera un canal de desagüe. La hidrodinámica provoca erosión de sedimentos en las proximidades de la entrada del flujo desde el río Elqui al humedal y en el canal de salida hacia el océano. Las magnitudes los 2 m de erosión en el canal de salida. Después de 3 días el nivel del humedal no llega a cotas de la máxima marea, por lo que no se evidencia influencia de la marea en la descarga del humedal al océano.

#### 4.2 Año húmedo y Barra cerrada

Para un año húmedo el comportamiento es similar al caso anterior, con la diferencia que el mayor caudal es capaz de sobrepasar el nivel máximo de la barra de arena y socavarla con más rapidez. El nivel máximo se consigue a las 6 horas de iniciado el evento y comienza a disminuir instantáneamente (Figura 7). Se alcanzan velocidades máximas de 2,5 m/s. El canal formado por erosión coincide con el formado en el caso anterior, pero adicionalmente se genera un canal secundario más al norte. Los cambios del lecho son evidentemente mayores y abarcarían la totalidad de la zona del cuerpo de agua principal y desembocadura, con magnitudes de sedimentación de hasta 2 m y erosión de hasta 2,5 m. Al igual que en caso anterior, después de 3 días el nivel del humedal no llega a cotas de la máxima marea.

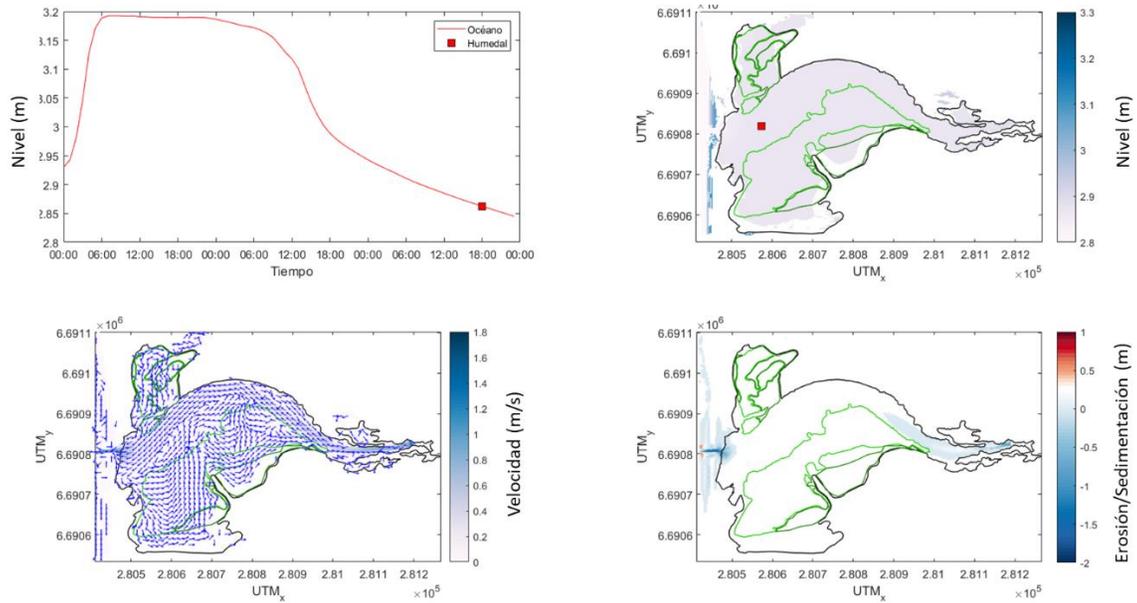
#### 4.3 Año normal y Barra abierta

En esta simulación de año normal se usó el canal de apertura artificial de la barra. Si bien se ve una disminución inicial del nivel del humedal, este alcanza un máximo que se mantiene por alrededor de 15 horas (Figura 8). Una vez pasado este tiempo se produce el desagüe brusco hasta niveles similares con la marea, modulándose con ella en adelante. Si bien los niveles del humedal y marea son similares, no se interrumpe la salida de agua del humedal hacia el océano por el canal, la cual impide que la marea entre al humedal. Durante el ascenso de la marea, esta ralentiza la salida de agua desde el humedal al océano provocándose una acumulación del agua que entra al humedal desde el río Elqui. Durante la simulación, las velocidades alcanzan 4,5 m/s en la apertura, lo cual provoca una socavación del canal de hasta ~3 m. De nuevo, la acumulación de sedimentos es generalizada, con magnitudes de hasta 1 m en el cuerpo de agua principal y en toda la parte del océano incluida en el dominio.

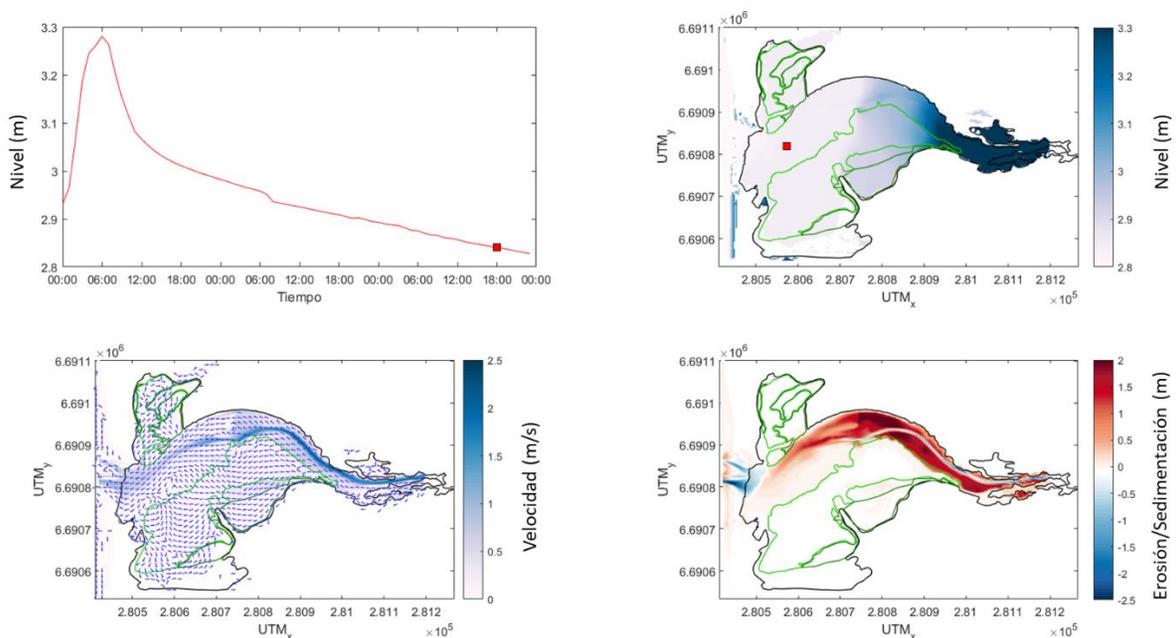
#### 4.4 Año húmedo y Barra abierta

En esta simulación se describe un comportamiento similar al caso Año húmedo y Barra cerrada, con la particularidad que el mayor caudal del río Elqui provoca una erosión más temprana del canal de apertura, provocando un desagüe y consiguiente modulación con la marea en menos tiempo. Dados los altos caudales desde el río, la modulación tiene una diferencia instantánea de alrededor de 20 cm entre los niveles de marea y del humedal. Las velocidades máximas rondan los 5 m/s en la barra, provocando una erosión de hasta 3 m de profundidad. Las sedimentaciones en el cuerpo de agua principal son generalizadas, observándose canales de escurrimiento con cierto grado de erosión (Figura 9).

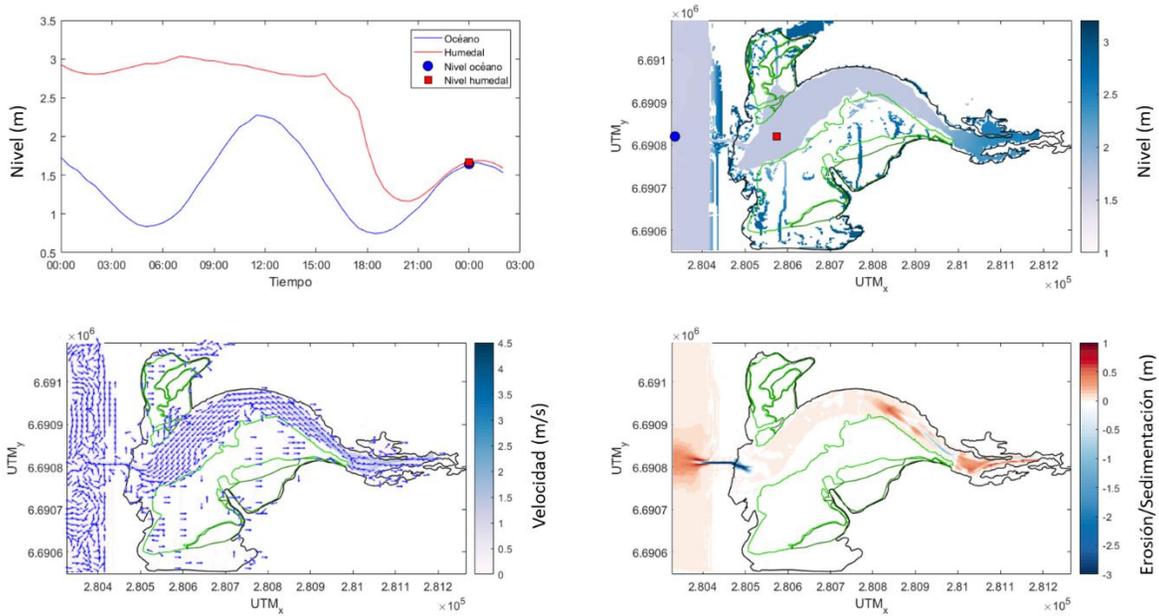
**Figura 6: Instante para la simulación de año normal y barra cerrada. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha).**



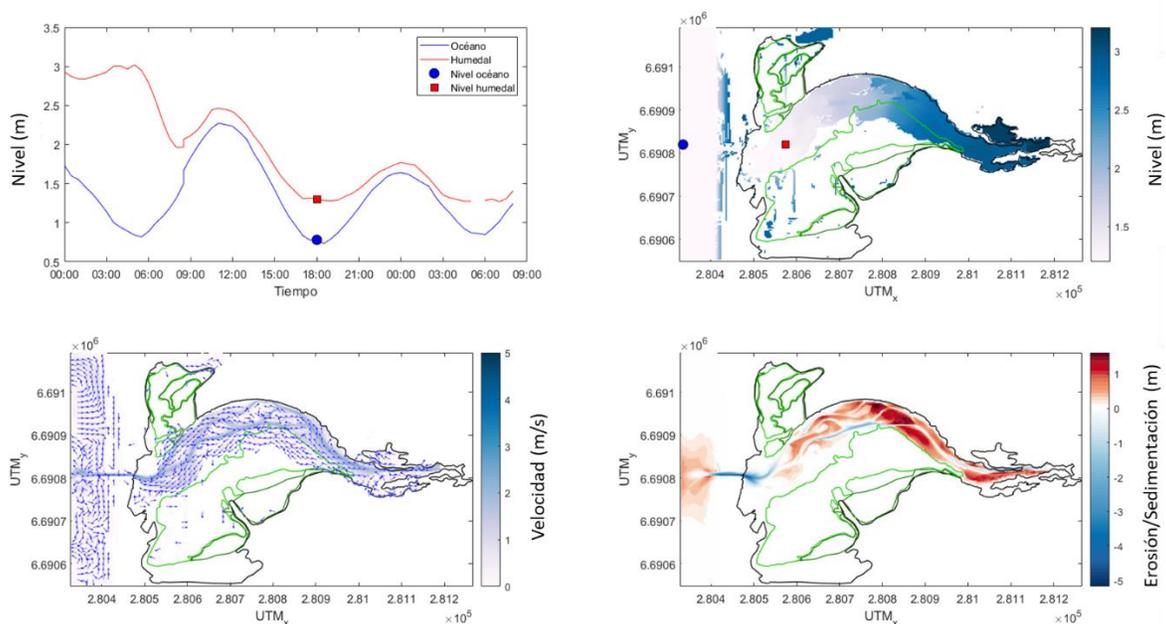
**Figura 7: Instante para la simulación de año húmedo y barra cerrada. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha).**



**Figura 8: Instante para la simulación de año normal y barra abierta. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha).**



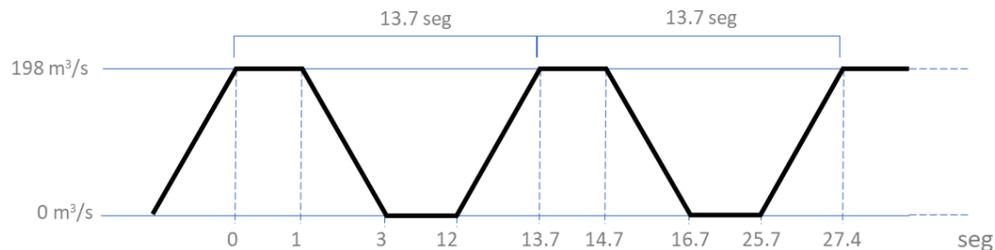
**Figura 9: Instante para la simulación de año húmedo y barra abierta. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha).**



#### 4.5. Caso con sobrepaso del oleaje

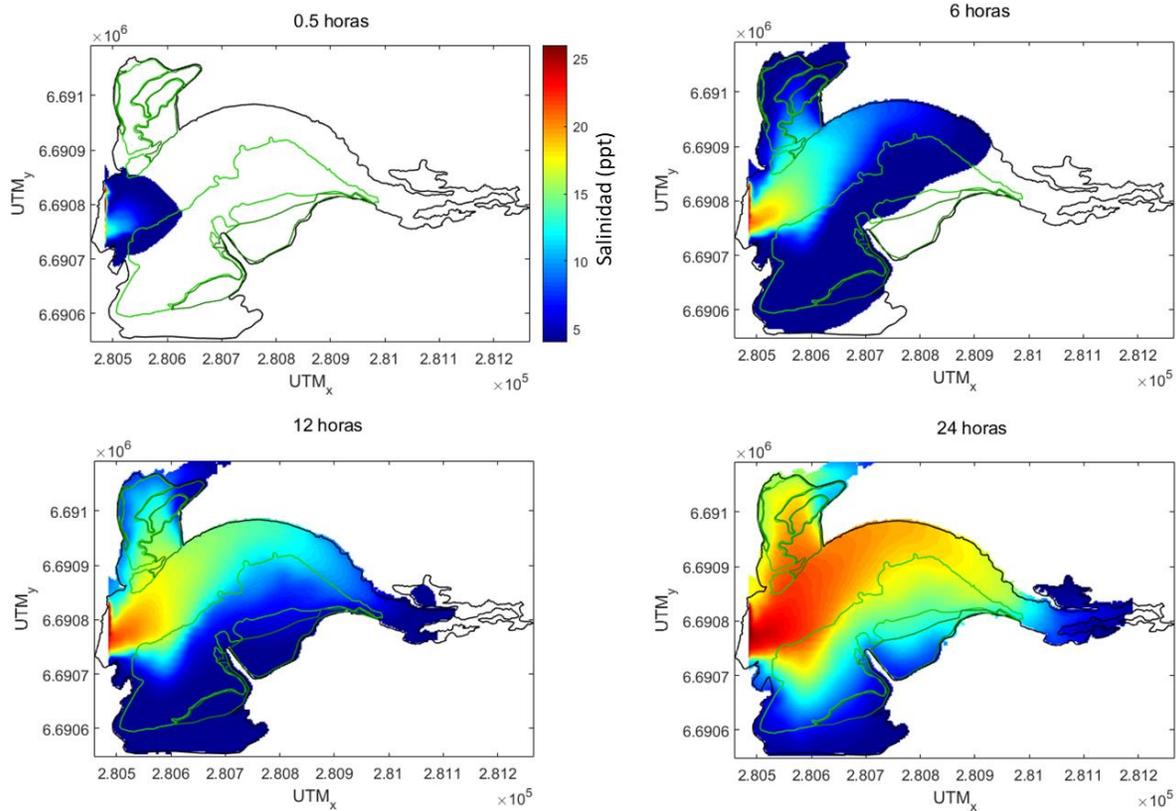
Se presentan los resultados de la simulación del sobrepaso del oleaje sobre la barra de arena y descargando agua salada en el interior del humedal, sin considerar entradas de caudal desde el río Elqui. El run-up,  $Ru_{2\%}$  (Ecuación 5), fue de 3,25 m sobre el nivel medio del mar. Dado que la cota máxima de la barra en la zona de sobrepaso fue en promedio de 3,1 m, se obtuvo una profundidad del sobrepaso de 0,15 m. El sobrepaso cubrió 44 celdas de 2,5 m cada una, totalizando una sección de 110 m. Con esto se obtuvo una sección del sobrepaso de  $0,15 \text{ m} \times 110 \text{ m} = 16,5 \text{ m}^2$ . Adicionalmente, la velocidad de sobrepaso (Ecuación 6) fue de 12 m/s para un porcentaje de excedencia del 50%, lo que resultó en una descarga de  $12 \text{ m/s} \times 16,5 \text{ m}^2 = 198 \text{ m}^3/\text{s}$  por cada ola de sobrepaso. Según los datos del oleaje, el período de este es de 13,7 s, por lo tanto, la secuencia de descarga se realizó también en períodos coincidentes como muestra la Figura 10.

**Figura 10: Secuencia de descarga del oleaje al humedal por efecto del run-up para un evento de oleaje extremo. Fuente: Elaboración propia.**



Con estos datos se realizó una simulación durante 24 horas con sobrepaso de una ola cada 13,7s. En la Figura 11 se observa que, en zonas con presencia de vegetación, la salinidad avanza más lentamente por el humedal, quedando más concentrada en el cuerpo de agua principal cercano a la descarga.

**Figura 11:** Evolución de la salinidad por sobrepasado de olas individuales durante un evento de oleaje extremo para un período de 24 horas.



## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta dos casos de simulación del humedal de la desembocadura del río Elqui frente a eventos de entrada de caudal desde el río en condiciones de año normal y año húmedo, así como un caso de sobrepaso desde el océano al humedal para un oleaje extremo en situación de barra terminal de arena cerrada. Para las dos primeras situaciones se simuló la condición de barra de arena cerrada, que separa el humedal del océano, y la condición de barra abierta previa al evento con el fin de establecer la relevancia de contar con una medida de evacuación del agua.

En el desarrollo del trabajo se evidenció la importancia de integrar en las simulaciones la presencia y características de la vegetación, la cual influye en el patrón de velocidades y condiciones de mezcla en el sistema.

Las principales conclusiones respecto del comportamiento del sistema en los eventos simulados son las siguientes:

- La barra, tanto si está cerrada como si tiene un canal de apertura previo, se ve erosionada fuertemente en los eventos simulados generando un canal de desagüe del humedal que varía en sus dimensiones con la magnitud del evento.
- La sedimentación de material se produce casi exclusivamente en el cuerpo de agua principal, debido a que el flujo se ralentiza al entrar en una zona de mayor sección y a la presencia de la vegetación que actúa de barrera.
- Las erosiones son principalmente en la zona de la barra de arena. En los casos de barra cerrada, ésta se erosiona hasta formar un canal de desagüe bien definido mientras que, en los casos con canal de desagüe previo, éste se erosiona fuertemente aumentando su capacidad.
- Una vez que se produce rotura de la barra y desagüe del humedal este pierde agua hasta encontrarse con los niveles de la marea, momento en el cual los niveles dentro del humedal se modulan con la marea. En estas situaciones, sin cesar el flujo de entrada desde el río Elqui, el humedal se llena o vacía al ritmo de subida o bajada de la marea. La marea no entra en el humedal, sino que favorece, ralentiza o impide la salida del agua desde el humedal al mar.
- Las cotas de la barra de arena impiden la entrada del océano al humedal por diferencia de niveles, lo cual no implica que no se pueda producir sobrepaso en eventos extremos de marejada por efecto del run-up.
- Para el evento de sobrepaso simulado con oleaje extremo (marejada), dentro del humedal se produce un gradiente horizontal de salinidad, que alcanza la zona más cercana al contorno de entrada desde el río en 24 horas de evento continuo de marejada.

## **6. AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo se enmarca en el proyecto GEFSEC ID: 9766 "Promoviendo la conservación y el manejo sostenible de los humedales costeros y sus cuencas aportante, a través de la mejora en la gestión y planificación de los ecosistemas de borde costero de la zona centro sur de Chile, hotspot de biodiversidad", a través del "Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo. También se agradece al programa de Vinculación de la Investigación de la Facultad de Ciencias de la Universidad de La Serena y al proyecto Sistema Articulado de Investigación en Cambio Climático y Sustentabilidad en Zonas Costeras de Chile (PFUE-RED 21992) del Ministerio de Educación.

## REFERENCIAS

Booij, N., Ris, C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third generation wave model for coastal regions: model description and validation. *JGR Oceans* 104 C4, 7649–7666.

Contreras-López M, Winckler P, Sepúlveda I, Andaur-Álvarez A, Cortés-Molina F, Guerrero CJ, Mizobe CE, Iguait F, Breuer W, Beyá JF, Vergara H & Figueroa-Sterquel R (2016) Field Survey of the 2015 Chile Tsunami with emphasis on Coastal Wetland and Conservation Areas. *Pure and Applied Geophysics*, 173(2): 349-367.

Deltares, 1999. Delft3D-FLOW. User Manual. Tech. rep., Deltares, the Netherlands.

DGA (2004) Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca del Río Elqui. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.

Figueroa A, Lictevout E, Rojas C, Tapia D, Daroch S, Cáceres R (2021) Delimitación y caracterización de usos del Humedal Desembocadura del Río Elqui y sus Subcuencas Aportantes, Región de Coquimbo. Informe Final. Ministerio del Medio Ambiente, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

INH (2020a). Diagnóstico mejoramiento playa La Serena, comuna La Serena, Región de Coquimbo. Estudio de hidrología.

INH (2020b). Diagnóstico mejoramiento playa La Serena, comuna La Serena, Región de Coquimbo. Estudio de oleaje.

Pullen, T., Allsop, N. W. H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H., & Van der Meer, J. W. (2007). *Eurotop wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual*.

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger Jr, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, 53(7), 573-588.

SUBDERE (2019) Líneas Interiores de la División Política Administrativa. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo.

Winckler P, Contreras-López M, Vicuña S, Larraguibel C, Mora J, Esparza C, Salcedo J, Gelcich S, Fariña JM, Martínez C, Agredano R, Melo O, Bambach N, Morales D, Marinkovic C & Pica A (2019) Volumen 6: Vulnerabilidad y riesgo en humedales costeros, en "Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile". Informe final Preparado para el Ministerio del Medio Ambiente.

Zuleta-Ramos C & Bravo-Naranjo V (eds) (2020) Atlas Humedales Costeros de Coquimbo: Biodiversidad & Territorio. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.