

Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico

Análisis morfodinámico de una alternativa de encauzamiento para la desembocadura del estero Llico, VII Región del Maule

KATHERINE ELIZABETH RODRÍGUEZ TAPIA

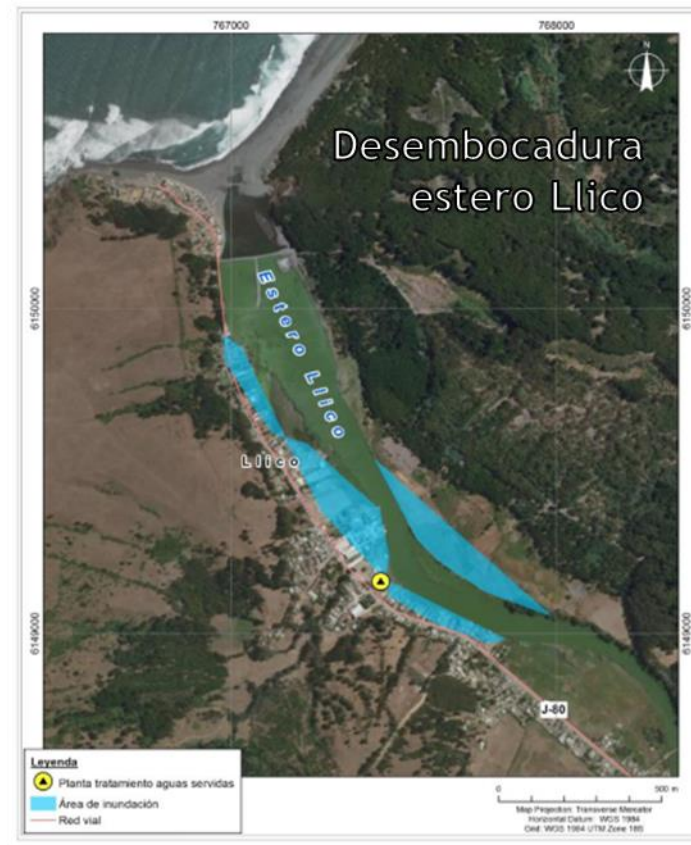
PROFESOR GUÍA: CLAUDIO HERNÁNDEZ

Contenido

- ▶ Introducción
- ▶ Formulación del problema
- ▶ Objetivos y alcances
- ▶ Marco teórico
- ▶ Recopilación de antecedentes y condiciones naturales
- ▶ Análisis de solución propuesta (metodología a implementar)
- ▶ Resultados
- ▶ Conclusiones

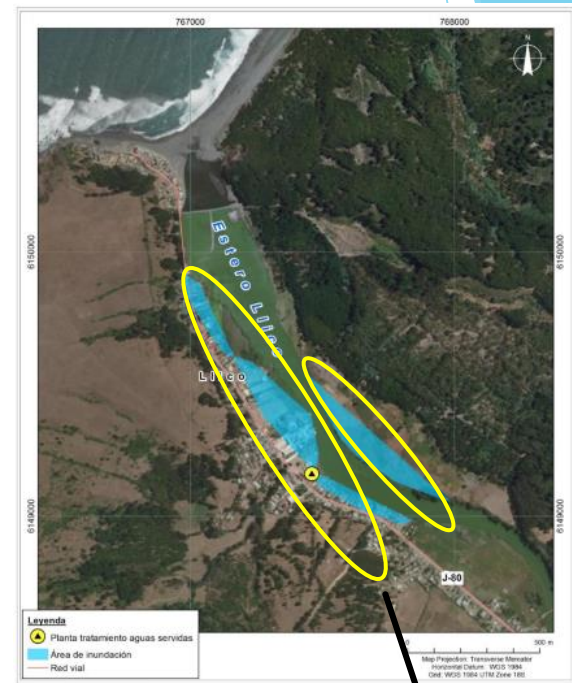
Introducción

- ▶ El presente trabajo corresponde a un análisis morfodinámico de la desembocadura del estero Llico.
- ▶ La mayor parte de los antecedentes del presente proyecto fueron proporcionados gentilmente por la empresa GHD.
- ▶ Sector de estudio corresponde a desembocadura del estero Llico, ubicada a 112 kms al Oeste de la ciudad de Curicó.



Formulación del problema

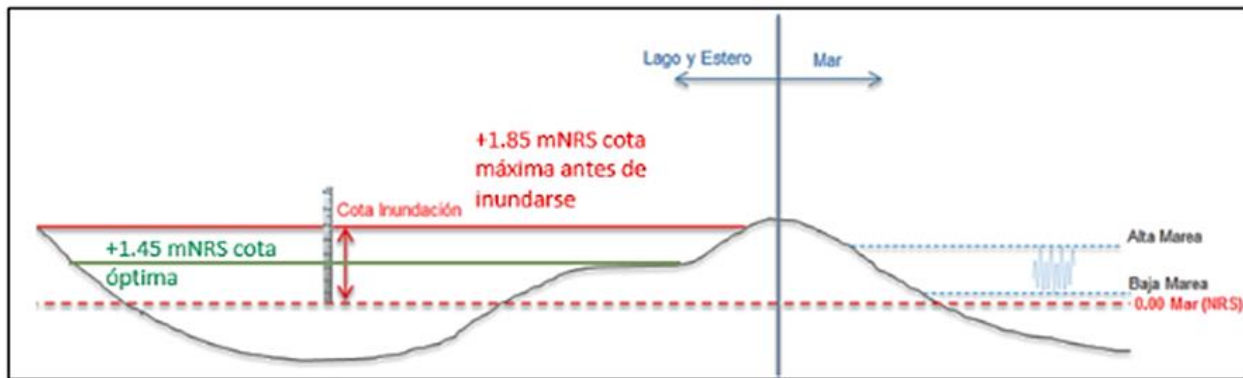
- ▶ Problemática principal: Estero Llico
 1. Inundaciones riberas Llico
 2. Condiciones de insalubridad y malos olores
- ▶ En épocas de invierno, una vez que comienzan las precipitaciones intensas, los niveles de lago y estero comienzan a aumentar, y antes que esto pase los pobladores del sector, municipalidad y junta de vecinos se organizaron para abrir la barra de arena mediante retroexcavadoras.
- ▶ Los mismos vecinos tienen “marcas” para saber en qué momento abrir la barra.
- ▶ Posteriormente cuando disminuyen los niveles, se cierra la barra para evitar que ingrese agua salada al lago.



Zona de inundaciones

Formulación del problema

- ▶ Esquema cotas estero - Lago:



Formulación del problema

- ▶ Problemática secundaria: Lago Vichuquén
 1. Contaminación del lago
 2. Niveles del lago
- ▶ De acuerdo a antecedentes recopilados, el lago Vichuquén se encuentra actualmente contaminado.
- ▶ Lago Vichuquén se encuentra en proceso de “eutrofización” acelerada (proliferación rápida de algas que impiden el paso de luz y se forma “fango”).

Formulación del problema

- ▶ CABE PREGUNTARSE....¿QUÉ PASARÍA SI CONSIDERAMOS LA APERTURA PERMANENTE DE LA BARRA?

Formulación del problema

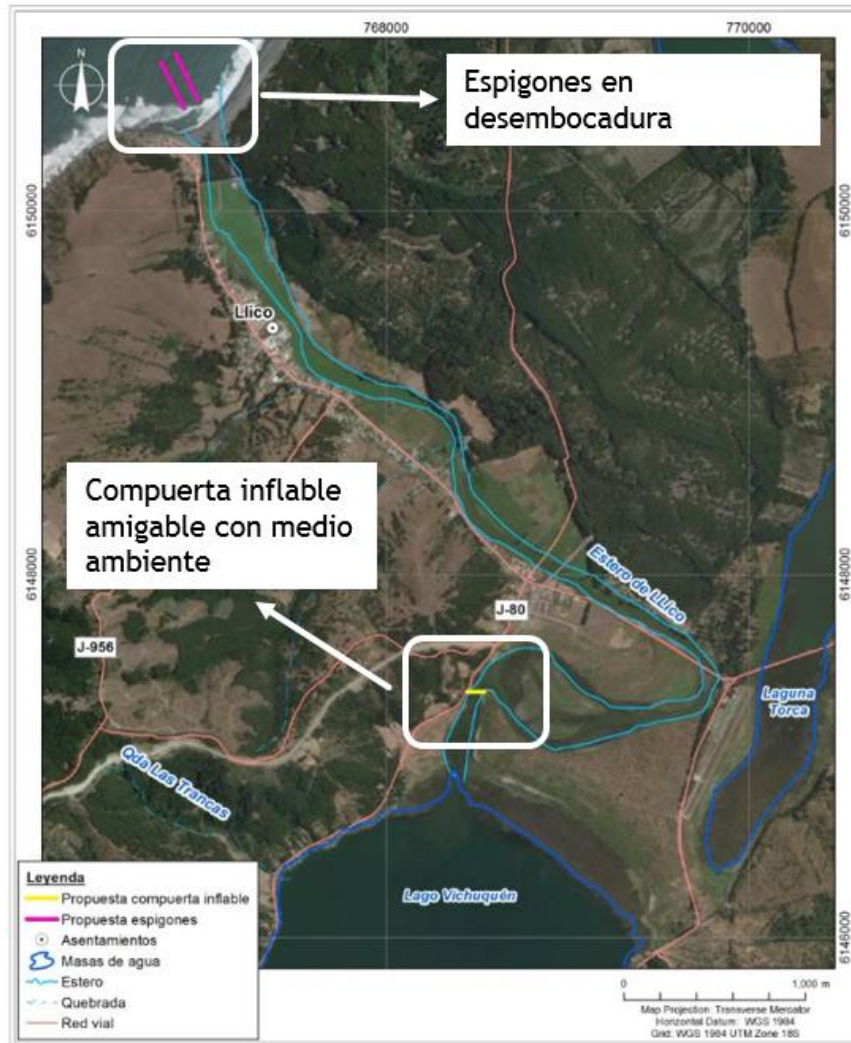
- ▶ Problema general a abordar:
- ▶ Apertura permanente de la barra que se forma en desembocadura del estero Llico, para mitigar las inundaciones que se dan lugar cuando esta barra se encuentra cerrada y comienzan las precipitaciones en época de invierno.



Solución a estudiar

- ▶ En base a lo anterior, en el presente trabajo se propone la implementación de dos espigones que encausen el flujo de la desembocadura y mantengan la conexión permanente entre estero y mar.
- ▶ Esta propuesta de solución debe ir acompañada de un control de aguas arriba en el lago Vichuquén para evitar que este se “desagüe” en marea baja e ingrese agua salada al lago Vichuquén en marea alta.

Solución a estudiar



Objetivo y Alcances

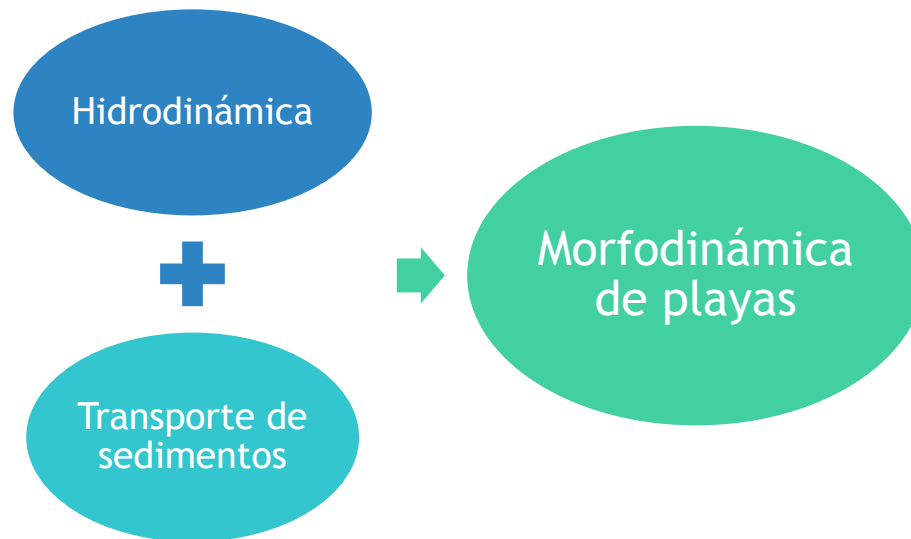
▶ Objetivo General

- Realizar un análisis morfodinámico para conocer el comportamiento del patrón de corrientes y transporte de sedimentos litorales en casos operacionales y un caso extremo, respecto de la implementación de dos espigones en la desembocadura del estero Llico, como solución a la problemática de inundaciones y estancamiento de aguas.

▶ Alcances

- Las simulaciones numéricas se ejecutaron considerando como forzante el oleaje y un nivel constante de la marea.
- No se considera el análisis de calidad de aguas del estero Llico y lago Vichuquén.
- El análisis corresponde solamente a la costa de Llico.

Marco teórico



- ▶ Para caracterización de morfodinámica se utilizarán los siguientes módulos de MIKE 21:
 - ❖ MIKE 21 SW - Módulo de oleaje espectral
 - ❖ MIKE 21 HD - Módulo hidrodinámico de corrientes
 - ❖ MIKE 21 ST - Módulo de transporte de arenas

Marco teórico

MIKE 21 SW - Módulo de oleaje espectral

- ▶ Modelo espectral de oleaje basado en la ecuación de balance de acción del oleaje (EBAO) (Komet et al. 1994 and Young 1999).
- ▶ El modelo resuelve la EBAO en el dominio espacial y espectral por medio del método de elementos finitos centrados en la celda sobre mallas flexibles no estructuradas.
- ▶ Simula el crecimiento, interacciones no lineales, propagación y disipación del oleaje tanto en aguas profundas como de forma local.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla(\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad \text{Ecuación de balance de densidad espectral}$$

- ▶ Donde:
 - ❖ N : Densidad de acción espectral
 - ❖ ∇ : Diferencial cuatri-dimensional en el espacio
 - ❖ \vec{v} : Velocidad de propagación del grupo de ondas en el espacio
 - ❖ S/σ : Términos fuente

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

Marco teórico

MIKE 21 HD - Módulo hidrodinámico

- Modelo que simula la hidrodinámica de flujos promediados en la vertical (2D), utilizando el método de volúmenes finitos tridimensionales. Basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS).

Variación local de la masa

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS$$

Variación convectiva de la masa

Términos fuente

Ecuación de conservación de la masa

Momentum en X

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} + hu_s S$$

Momentum en y

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} + hv_s S$$

Aceleración local

Términos convectivos

Superficie libre

Diferencias de P°

Tensión superf. Y de fondo

Tensores de radiación

Términos difusivos

Términos fuente

Ecuaciones de Reynolds (RANS)

Marco teórico

MIKE 21 ST - Módulo de transporte de arenas

- ▶ Modelo que estima la carga sólida para un flujo de corrientes + olas, aplicando las velocidades integradas en la vertical.
- ▶ Cálculo del sedimento se realiza mediante estimación de carga por fondo y carga en suspensión.

$$\phi_b = 5p(\sqrt{\theta' - 0.7\theta_c})$$

Transporte de fondo



$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D (uc) dz dt$$

Transporte por suspensión

Ecuación de transporte de sedimentos total

$$q_t = \phi_b + q_s$$

▶ Donde:

- ❖ p : porosidad sedimentos
- ❖ ϕ_b : Transporte por fondo
- ❖ θ_c : Valor crítico del parámetro de Shields
- ❖ q_s : Transporte por suspensión

Marco teórico

MIKE 21 ST - Módulo de transporte de arenas

- ▶ El módulo ST realiza la parametrización de las dimensiones del sedimento utilizando el parámetro de desviación geométrica de la curva granulométrica.
- ▶ En las simulaciones del presente trabajo, no se consideraron fuentes externas de aporte de sedimentos ni sumideros.

$$\sigma_g = \left(\frac{d_{84}}{d_{16}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

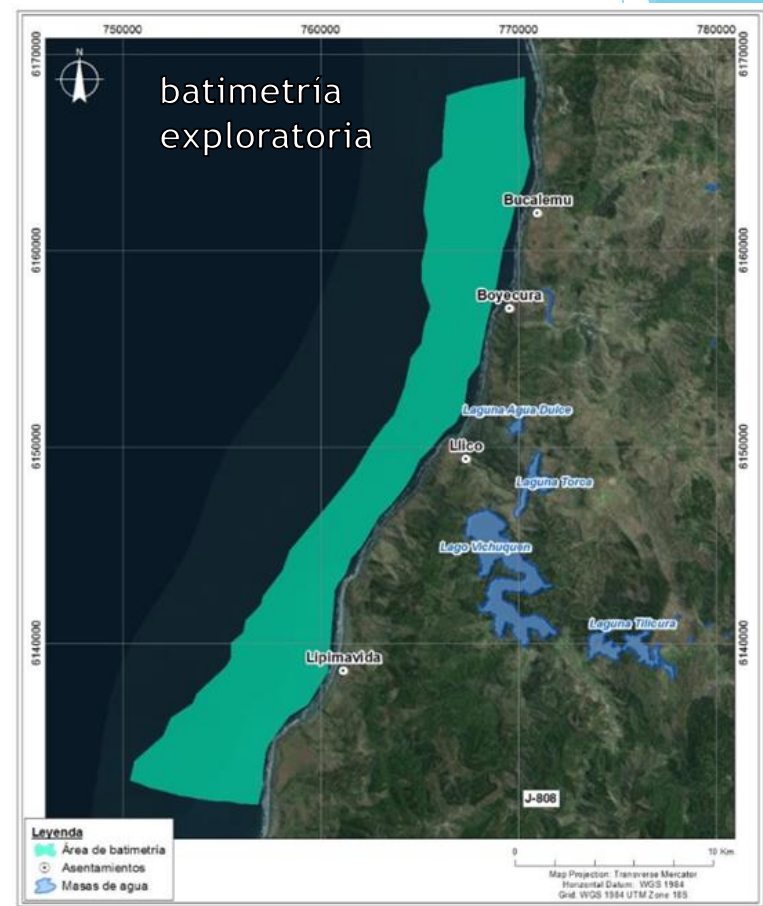
Parámetro de desviación geométrica

- ▶ Donde:
 - ❖ d_{84} : Diámetro donde pasa el 84% del sedimento en peso.
 - ❖ d_{16} : Diámetro donde pasa el 16% del sedimento en peso.
 - ❖ σ_g : Desviación geométrica

Condiciones naturales

Recopilación de antecedentes

- ▶ Levantamientos batimétricos y cartas náuticas
- ▶ Oleaje en aguas profundas y someras
- ▶ Registro de mareas en lago, estero y mar simultáneo.
- ▶ Niveles de lago Vichuquén y estero Llico.
- ▶ Hidrología.
- ▶ Granulometría.
- ▶ Calidad de aguas.
- ▶ Sistema sedimentario.

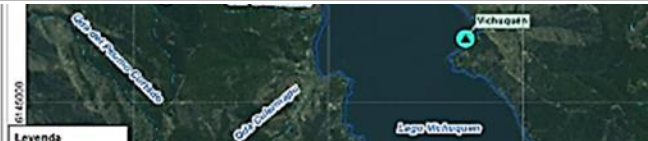
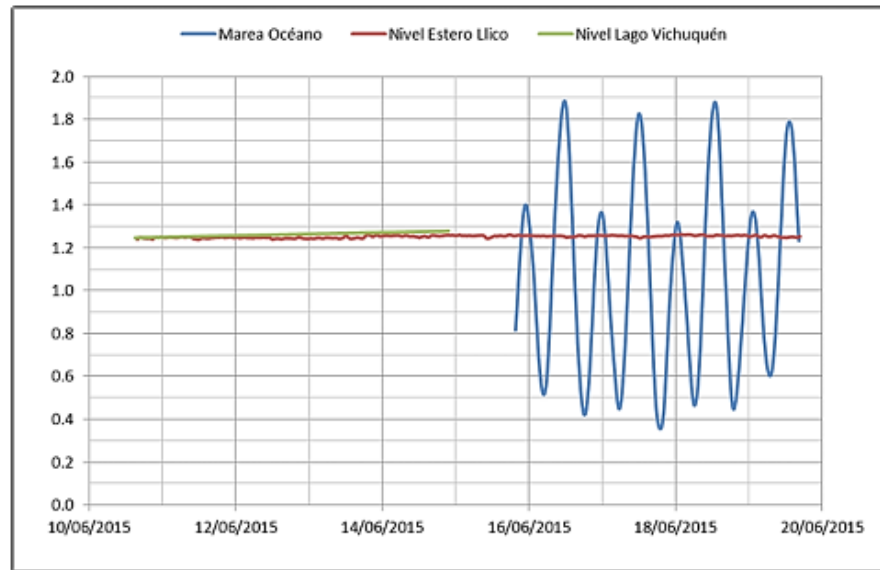


Condiciones naturales

Recopilación de antecedentes

- ▶ Mediciones se ejecutaron con barra cerrada.
- ▶ Pescadores y pobladores del sector indicaron que la marea ingresa hasta lago y estero en alta marea.
- ▶ A raíz de lo anterior se considera de mayor importancia el complemento de los espigones con el control aguas arriba (compuerta inflable).

Medición de mareas



| Sector | Fecha inicio | Fecha término |
|------------------------------|--------------|---------------|
| Costa de Llico | 15/06/2015 | 19/06/2015 |
| Estero Llico (barra cerrada) | 10/06/2015 | 19/06/2015 |
| Lago Vichuquén | 10/06/2015 | 14/06/2015 |

Condiciones naturales

Recopilación de antecedentes

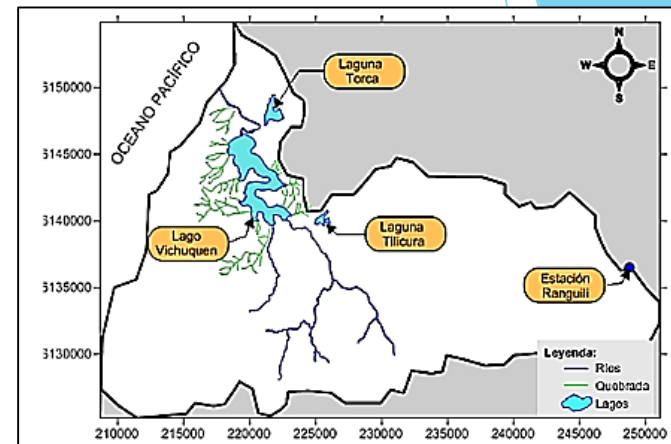
▶ Hidrología

- ▶ Se analizaron todas las fuentes aportantes al sistema del lago Vichuquén.
- ▶ A partir de lo anterior, obtuvieron los caudales de descarga del estero Llico.

▶ Calidad de Aguas

- ▶ En el año 2015 se realizó una campaña de medición de calidad de agua en 10 estaciones de muestreo (5 en lago y 5 en estero).
- ▶ Lago Vichuquén: presenta características eutróficas.
- ▶ Estero Llico: Alta concentración de coliforme fecal.

Hidrología

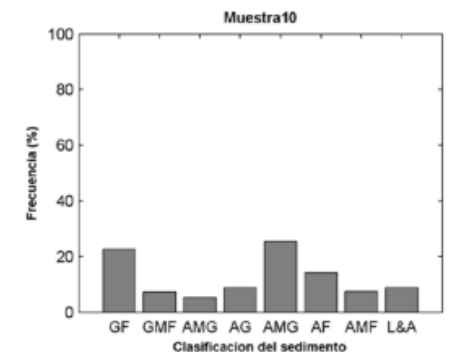
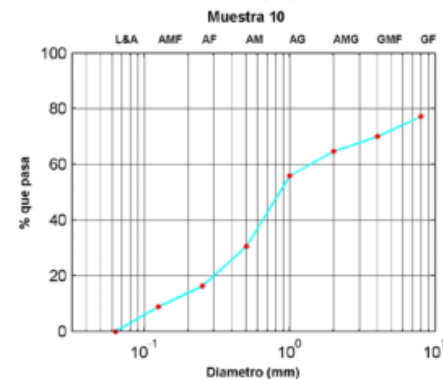
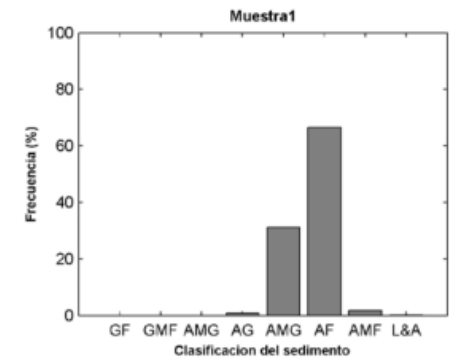
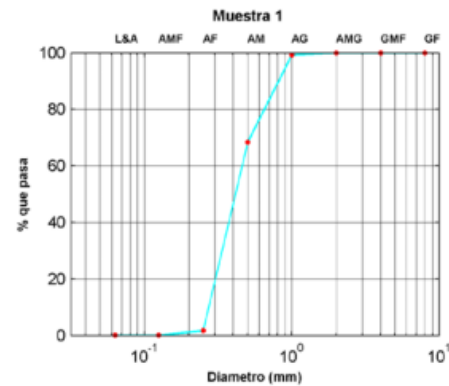


Calidad de aguas

Condiciones naturales

Recopilación de antecedentes

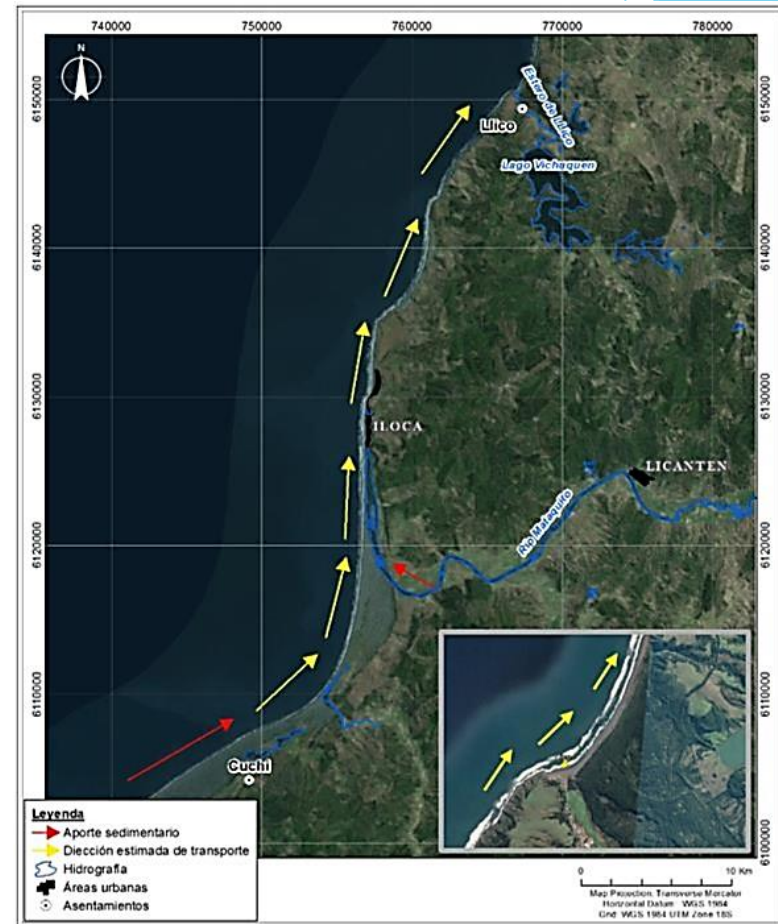
- ▶ Se extrajeron 10 muestras de sedimentos en estero Llico y playa.
- ▶ A partir de los resultados obtenidos, se determinó lo siguiente:
- ▶ Diámetro medio sedimento playa de Llico $d_{50}=0.28$ mm.
- ▶ Sedimento de estero y playa no son los mismos.
- ▶ Estero no alimenta a playa.
- ▶ Se infiere que carga sólida de estero a playa es muy reducida.



Condiciones naturales

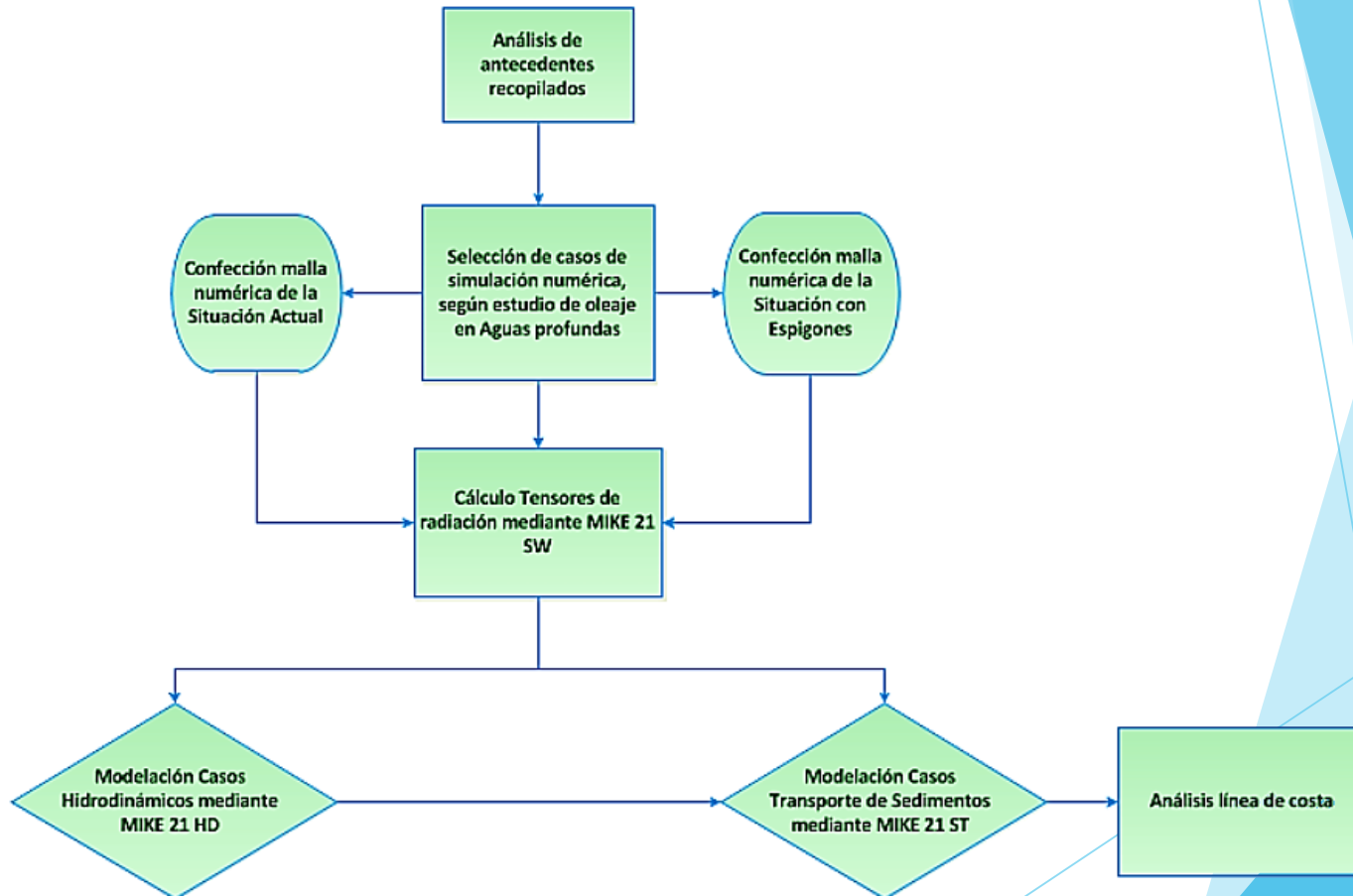
Sistema sedimentario

- Playa de Llico corresponde a una playa abierta sin protección al oleaje incidente desde el SW, W y NW.
- Fuentes de sedimentos cercanas:
- Estero Llico, Dunas de Cuchi, Río Mataquito, playas DUAO-ILOCA, dirección estimada de transporte; de sur a norte.
- Se descarta Estero Llico como fuente sedimentaria (de acuerdo a estudio granulométrico).



Análisis de solución

Metodología de modelación



Análisis de solución

Escenarios de simulación

- ▶ Escenarios de modelación:
 - Escenario situación actual
Desembocadura cerrada.
 - Escenario situación con espigones
Apertura permanente de desembocadura mediante dos espigones.
- ▶ Se estudió la influencia del oleaje, y caudales del estero Llico de acuerdo a los siguientes casos



Análisis de solución

Escenarios de simulación

- ▶ Influencia del oleaje, de acuerdo a estudio de oleaje en aguas profundas).
- ▶ Se estudió caso extremo con periodo de retorno $Tr=40$ años (proveniente del análisis extremo de los datos en aguas profundas).
- ▶ Influencia de los caudales del estero Llico, de acuerdo a promedio de caudales medios diario, mensual y $Tr=10$ años.

Análisis de solución

Escenarios de simulación

Creación batimetría

- Se utilizaron levantamientos año 2015.
- Cartas náuticas disponibles.

Configuración Parámetros para modelos

- Modelo MIKE 21 SW - Obtención tensores de radiación - Casos estacionarios.
- Modelo MIKE 21 HD - Obtención campos de Corrientes costeras - 5 días de simulación.
- Modelo MIKE 21 ST - Cuantificación transporte de sedimentos - 5 días de simulación.

Análisis de malla numérica

- Se realiza un análisis de la malla batimétrica a utilizar para verificar su adecuado funcionamiento.

Análisis de Resultados

- Tensores de radiación - campo completo de tensores.
- Corrientes hidrodinámicas - campo y salida en dos puntos del dominio.
- Transporte de sedimentos - campo de transporte y cambios del fondo.

Análisis de solución

Resumen casos a modelar

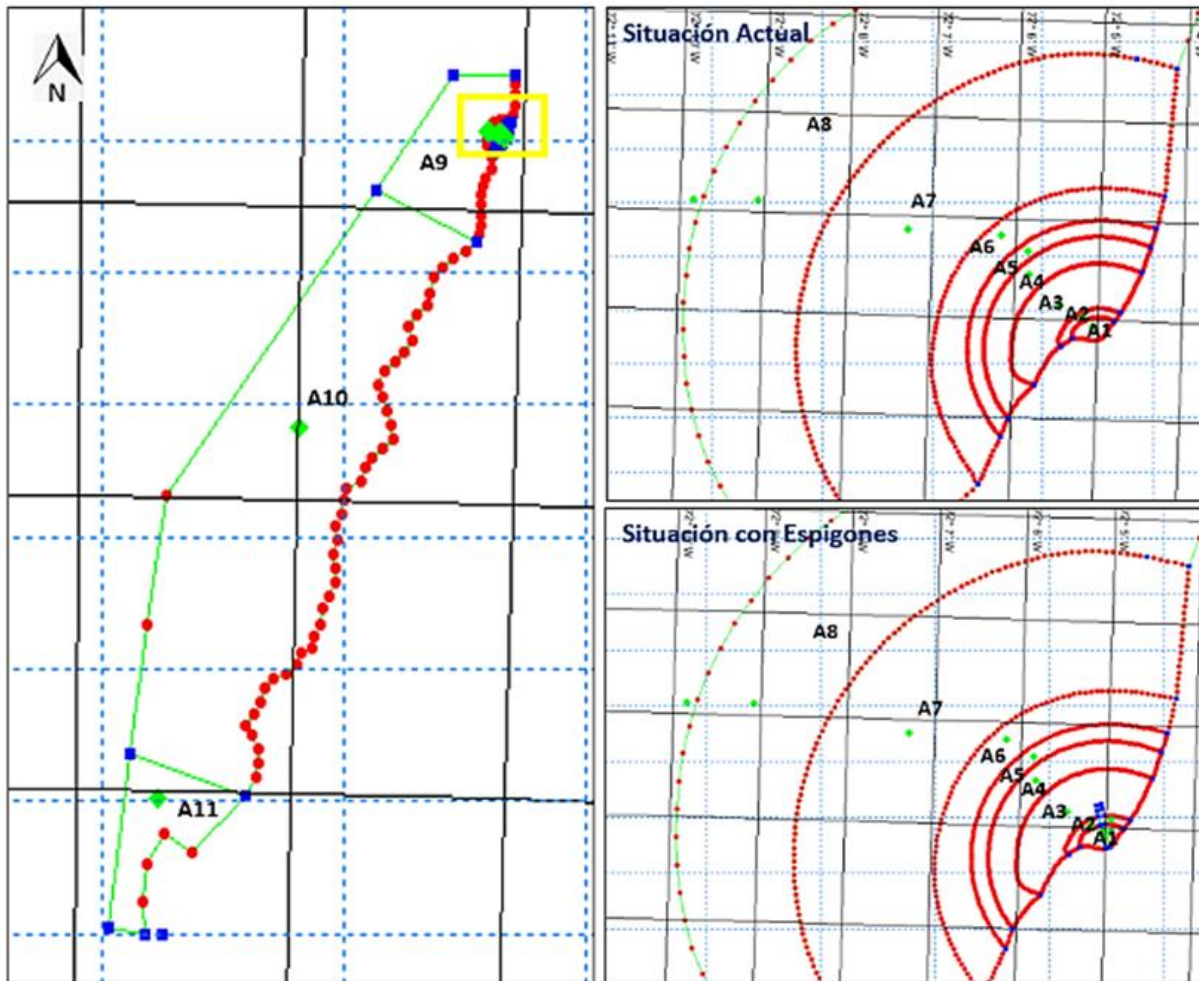
- ▶ Se simularon los tensores de radiación, corrientes litorales y transporte de sedimentos para cada uno de los casos presentados en las siguientes tablas, generando un total de 44 modelos.

| Situación actual | | | |
|------------------|------------|-------------|---------------|
| Caso N° | Altura (m) | Periodo (s) | Dirección (°) |
| 1 | 2.25 | 11 | 225 |
| 2 | 2.25 | 11 | 202.2 |
| 3 | 2.75 | 11 | 225 |
| 4 | 2.75 | 11 | 202.5 |
| 5 | 2.75 | 13 | 225 |
| 5B | 2.75 | 13 | 225 |
| 5C | 2.75 | 13 | 225 |
| 6 | 2.75 | 13 | 202.5 |
| 7 | 3.25 | 13 | 225 |
| 8 | 3.25 | 13 | 202.5 |
| 9 | 3.75 | 13 | 225 |
| 10 | 3.75 | 13 | 202.5 |
| 11 (*) | 8.39 | 13 | 225 |

| Situación con espigones | | | | |
|-------------------------|------------|-------------|---------------|--------------------------------------|
| Caso N° | Altura (m) | Periodo (s) | Dirección (°) | Caudal de salida estero Llico (m3/s) |
| 1 | 2.25 | 11 | 225 | 4.78 |
| 2 | 2.25 | 11 | 202.2 | 4.78 |
| 3 | 2.75 | 11 | 225 | 4.78 |
| 4 | 2.75 | 11 | 202.5 | 4.78 |
| 5 | 2.75 | 13 | 225 | 4.78 |
| 5B | 2.75 | 13 | 225 | 78 |
| 5C | 2.75 | 13 | 225 | 168 |
| 6 | 2.75 | 13 | 202.5 | 4.78 |
| 7 | 3.25 | 13 | 225 | 4.78 |
| 8 | 3.25 | 13 | 202.5 | 4.78 |
| 9 | 3.75 | 13 | 225 | 4.78 |
| 10 | 3.75 | 13 | 202.5 | 4.78 |
| 11 (*) | 8.39 | 13 | 225 | 168 |

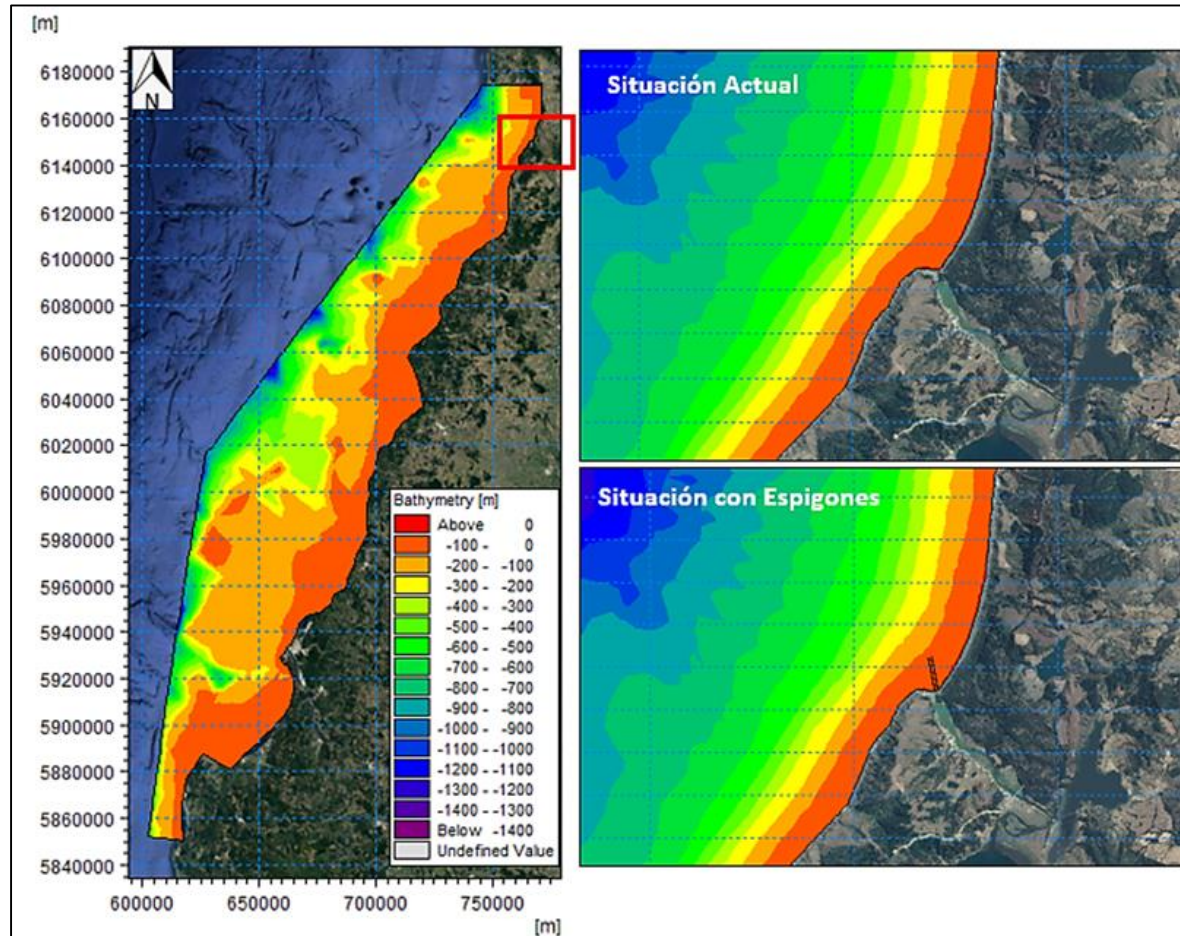
Análisis de solución

Batimetría para MIKE 21 SW



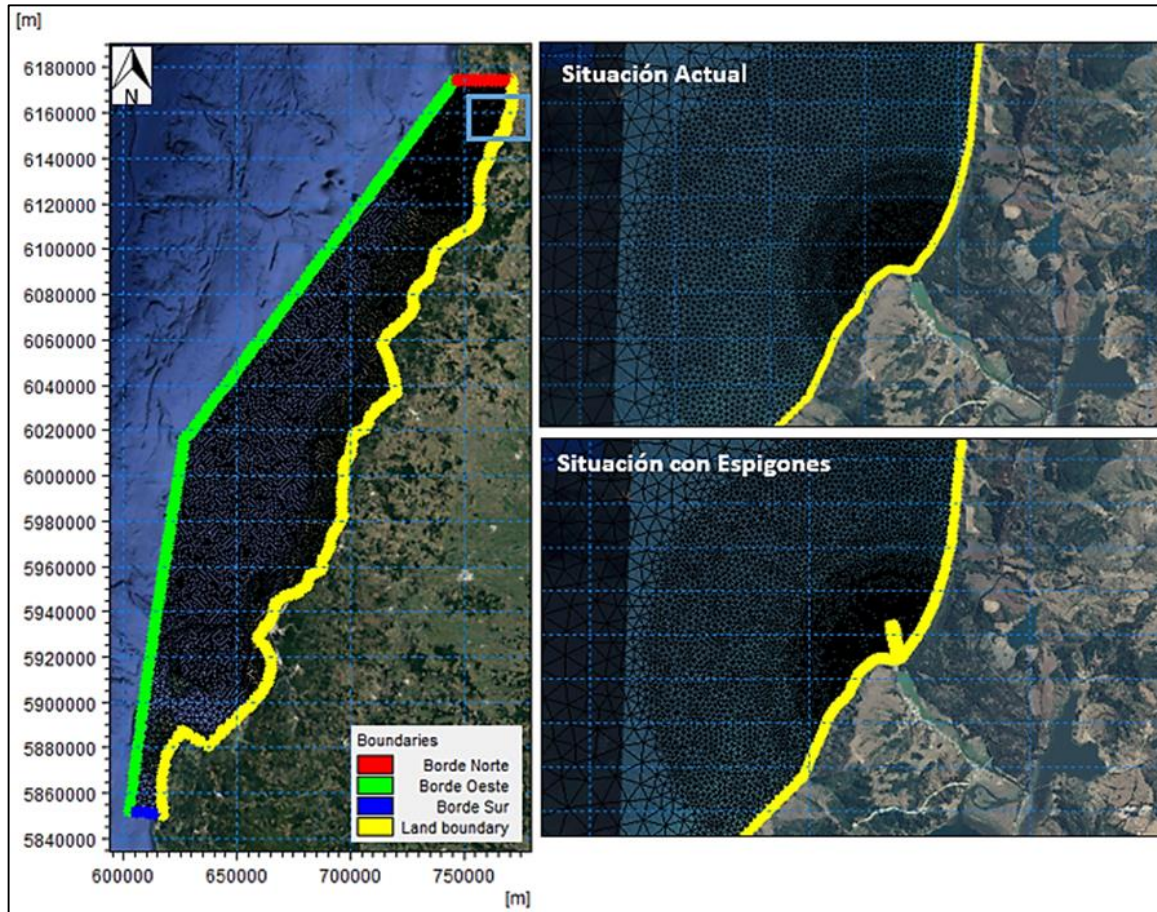
Análisis de solución

Batimetría para MIKE 21 SW



Análisis de solución

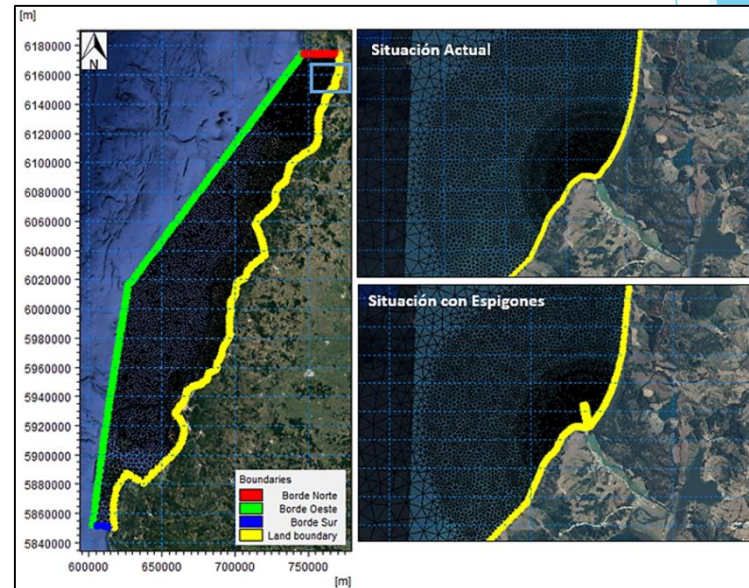
Batimetría para MIKE 21 SW



Análisis de solución

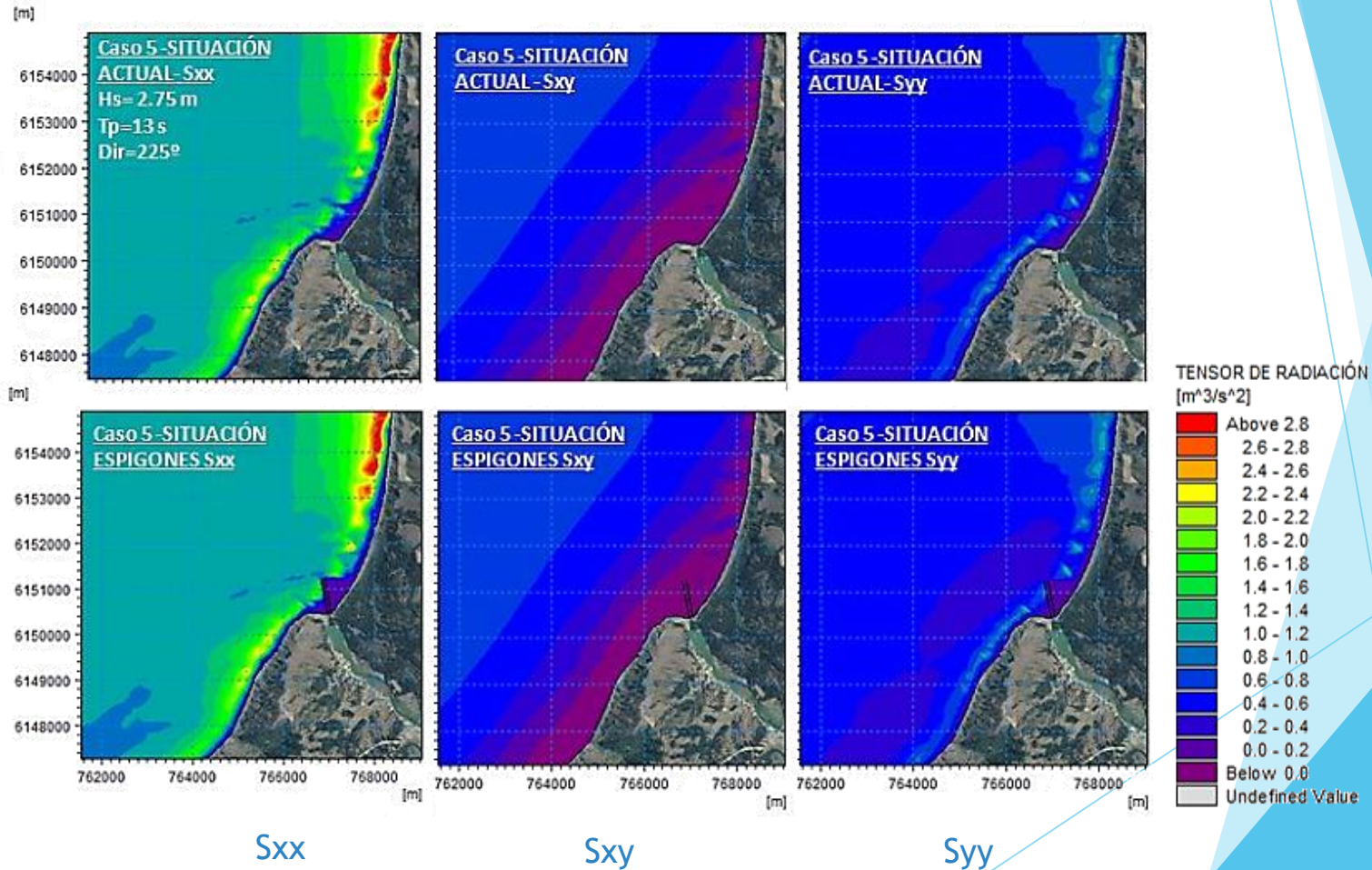
Batimetría para MIKE 21 SW

| Borde | Significado |
|--------------|--|
| Verde y Azul | Ingreso de condiciones de oleaje |
| Rojo | Condición lateral para disipar la energía proveniente de aguas profundas |
| Amarillo | Línea de costa |



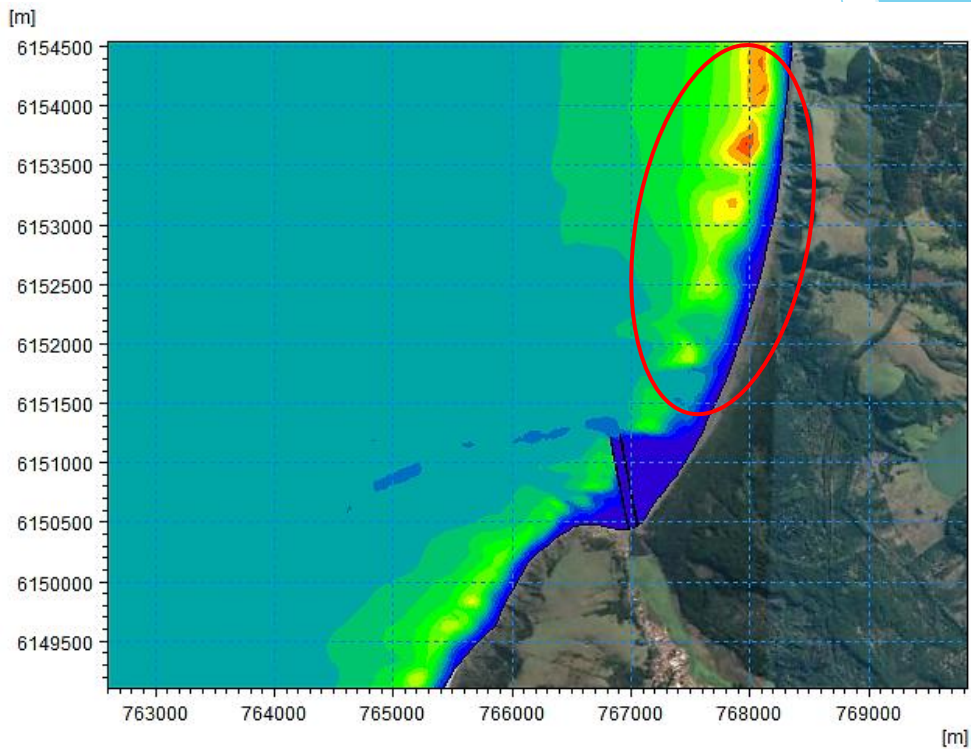
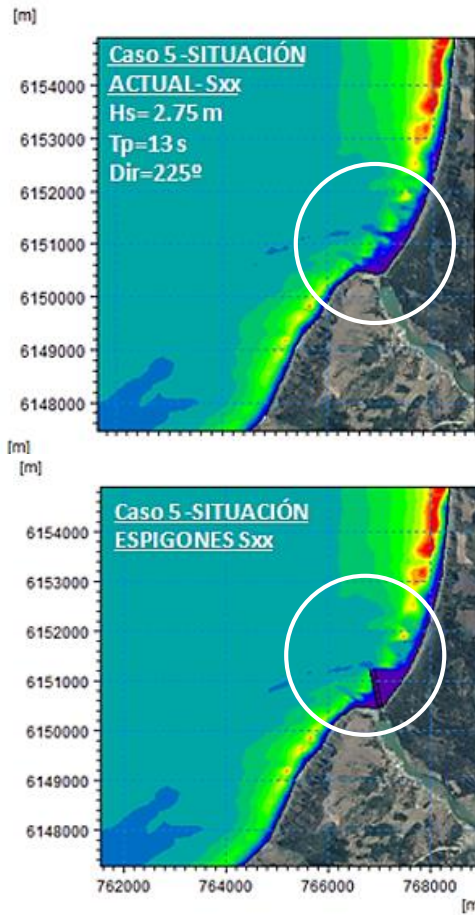
Análisis de solución

Resultados tensores de radiación MIKE 21 SW- caso 5



Análisis de solución

Resultados tensores de radiación MIKE 21 SW- caso 5



Análisis de solución

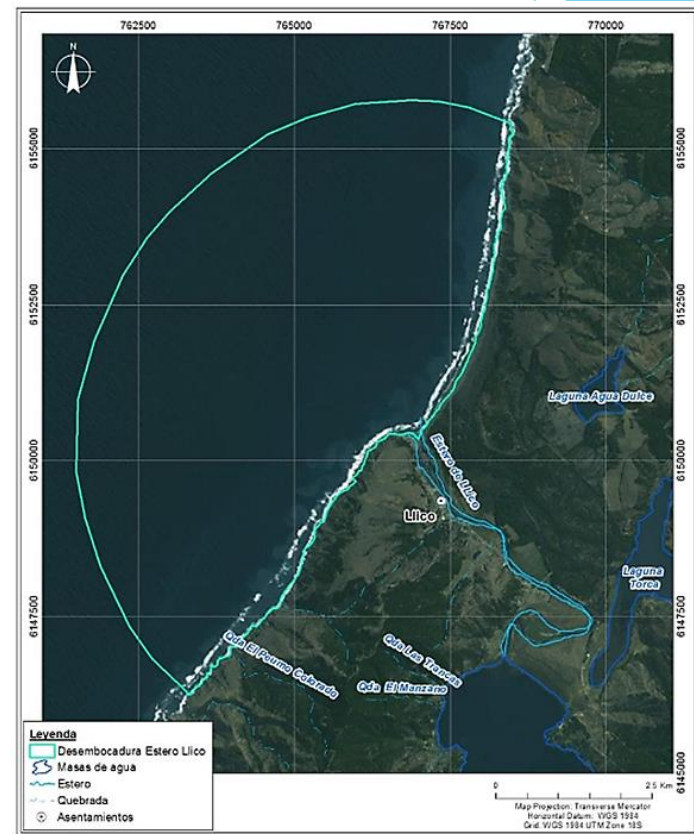
Batimetría para MIKE 21 HD

- ▶ Para obtener estabilidad numérica, se optó por disminuir las dimensiones de la malla batimétrica.
- ▶ Se ejecutó un análisis de la malla para asegurar la correcta representación del fenómeno a estudiar.
- ▶ Se disminuyeron dimensiones del dominio, se utilizó nro de Courant para asegurar estabilidad numérica:

$$CFL_{HD} = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y}$$

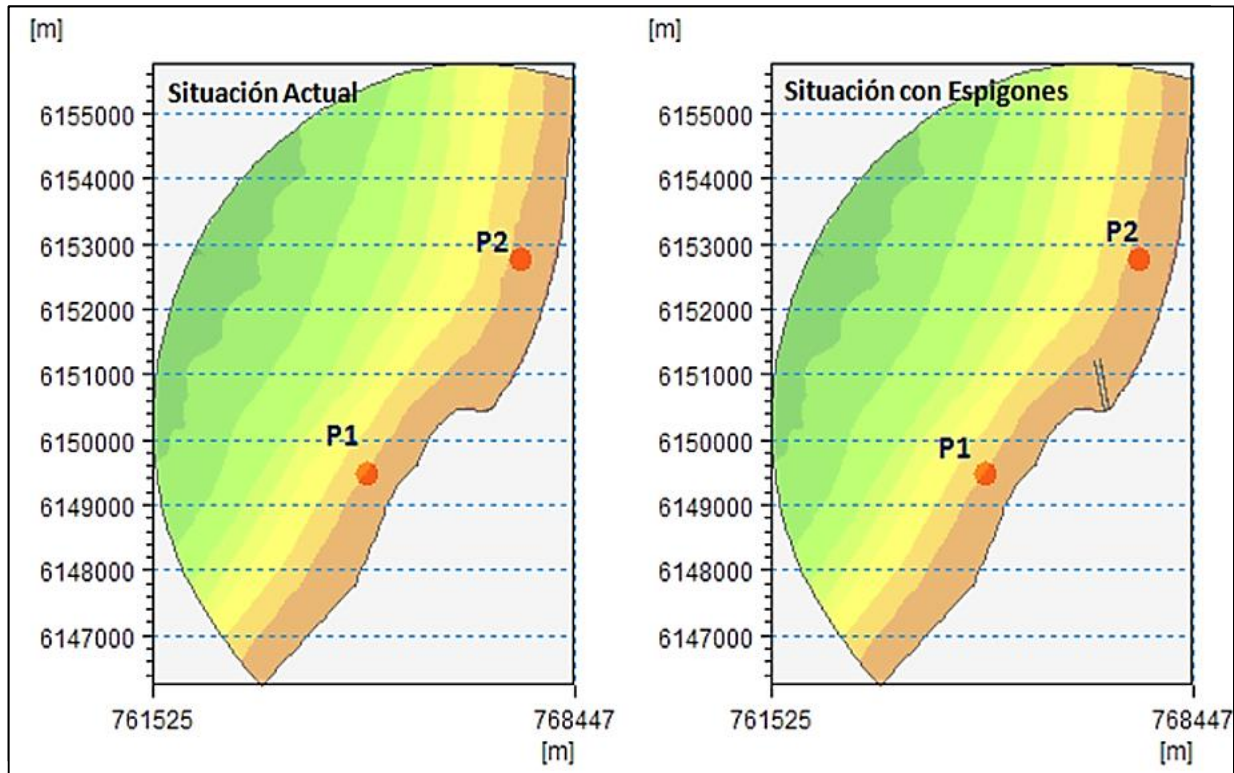
Donde:

- h: profundidad total del agua
- u y v: componentes de la velocidad en x e y
- g: Aceleración de gravedad
- Δx y Δy : Resolución del espacio y tiempo en la malla en los ejes x e y.



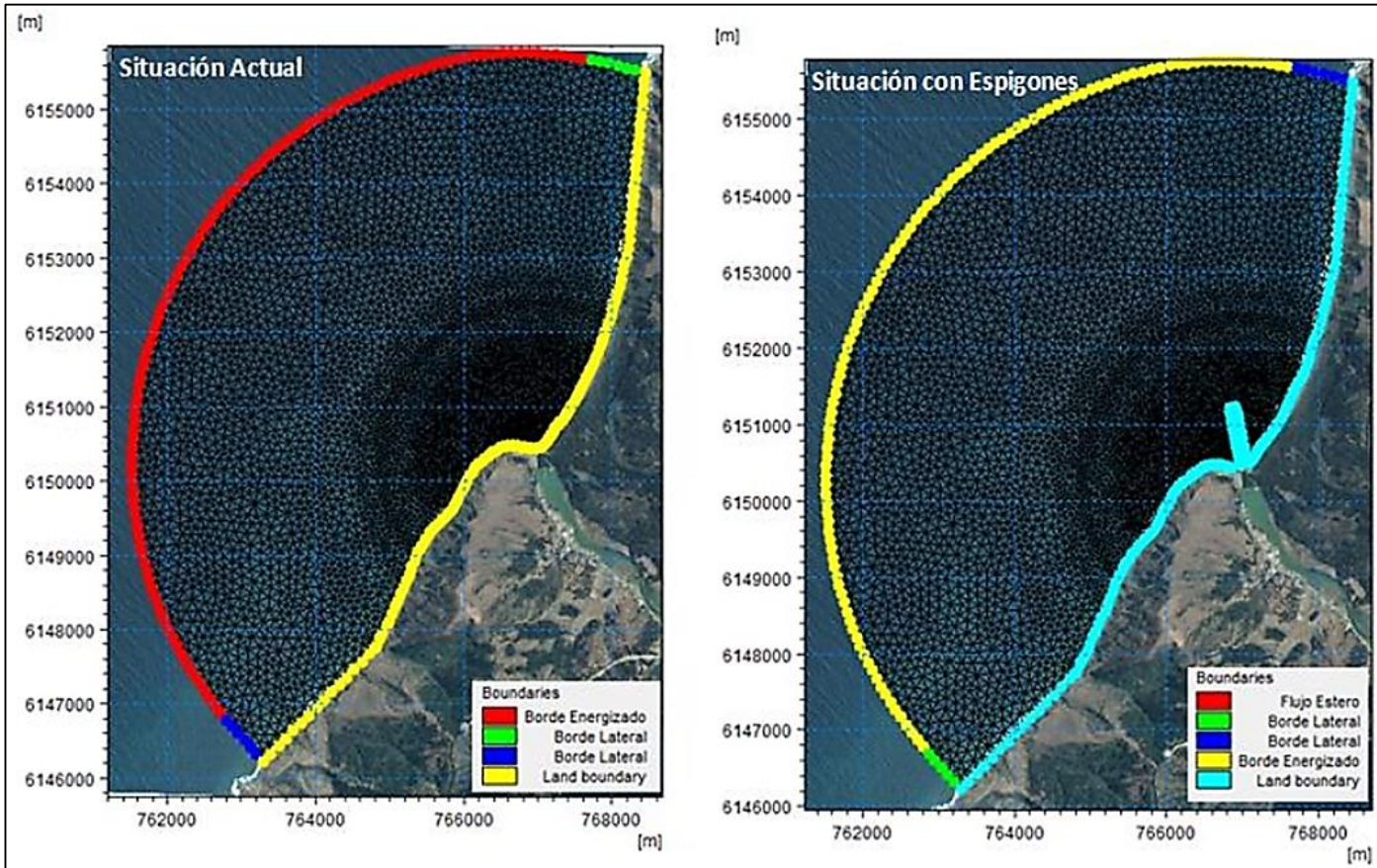
Análisis de solución

Batimetría para MIKE 21 HD



Análisis de solución

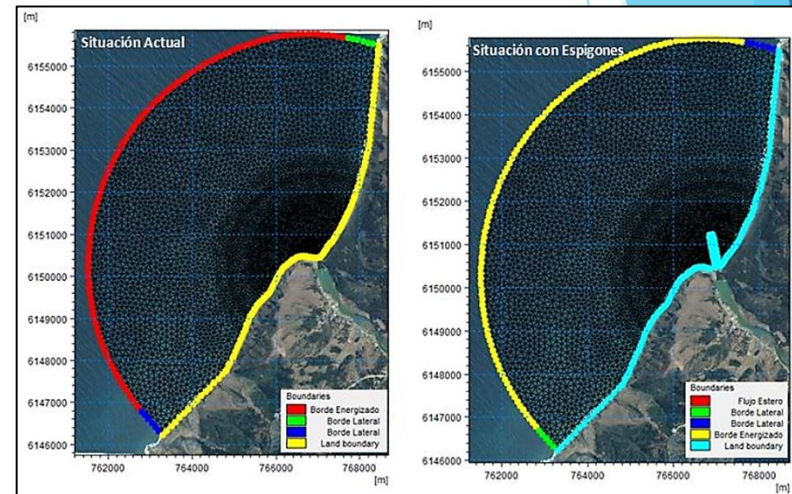
Batimetría para MIKE 21 HD



Análisis de solución

Batimetría para MIKE 21 HD

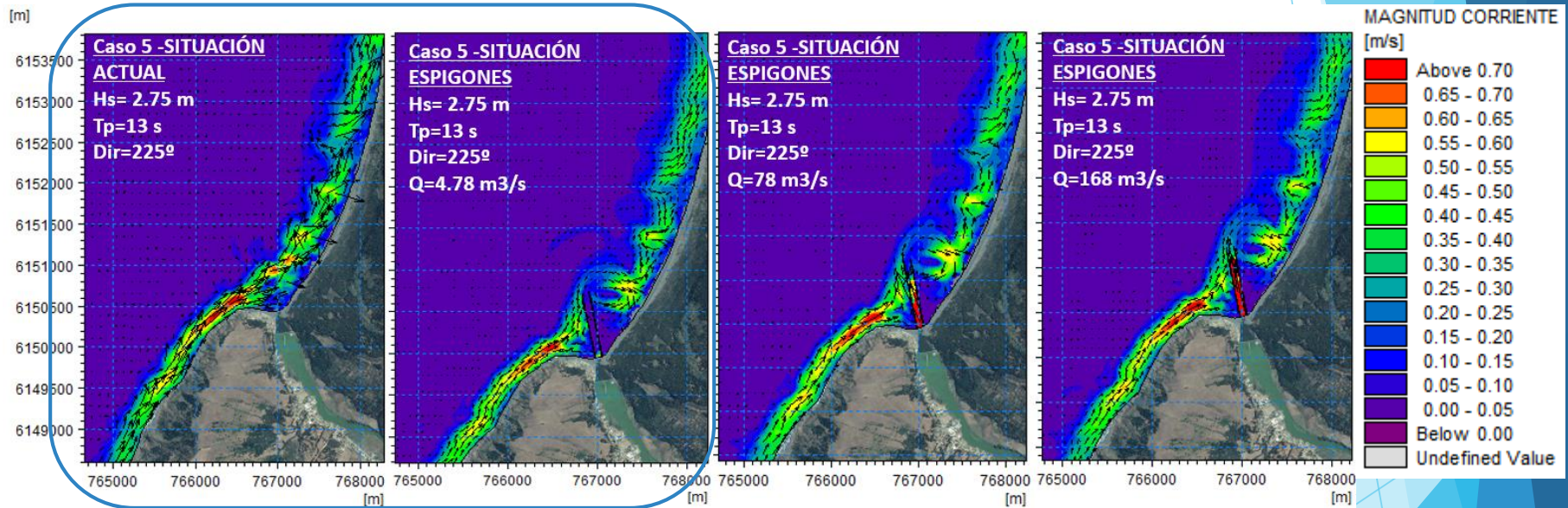
| Borde | Significado |
|----------------------------------|--|
| Rojo (malla situación actual) | Ingreso de tensores de radiación |
| Azul y verde | Condición lateral “Flather Condictions*” Límite abierto, para garantizar estabilidad de modelo en los bordes. |
| Amarillo | Línea de costa |
| Rojo (malla situación Espigones) | Ingreso de caudal de salida del estero Llico |



- ▶ * Flather Conditions: Condición lateral que asegura la continuidad del flujo en esa parte del dominio.

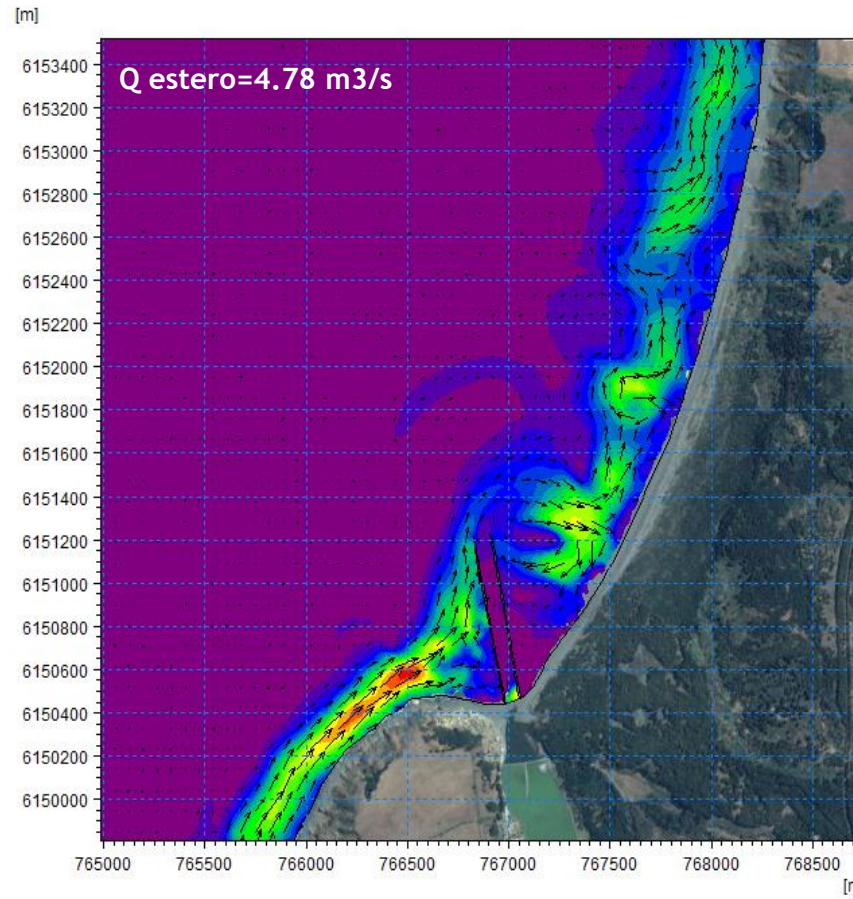
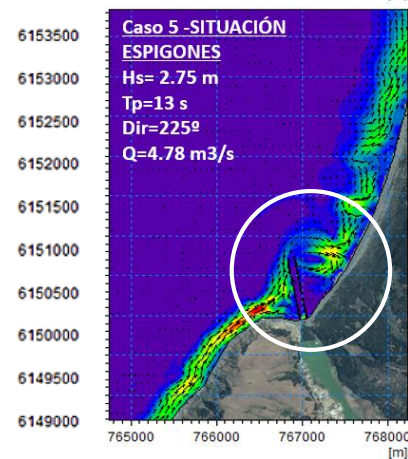
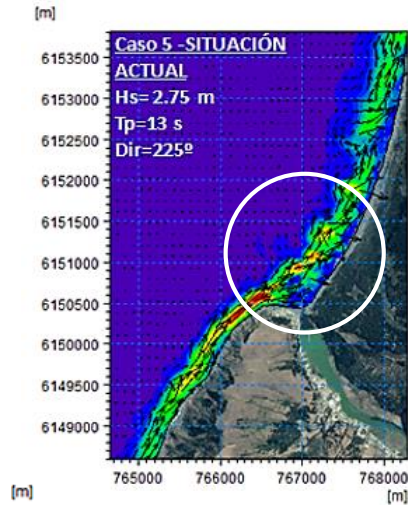
Análisis de solución

Resultados corrientes litorales MIKE 21 HD



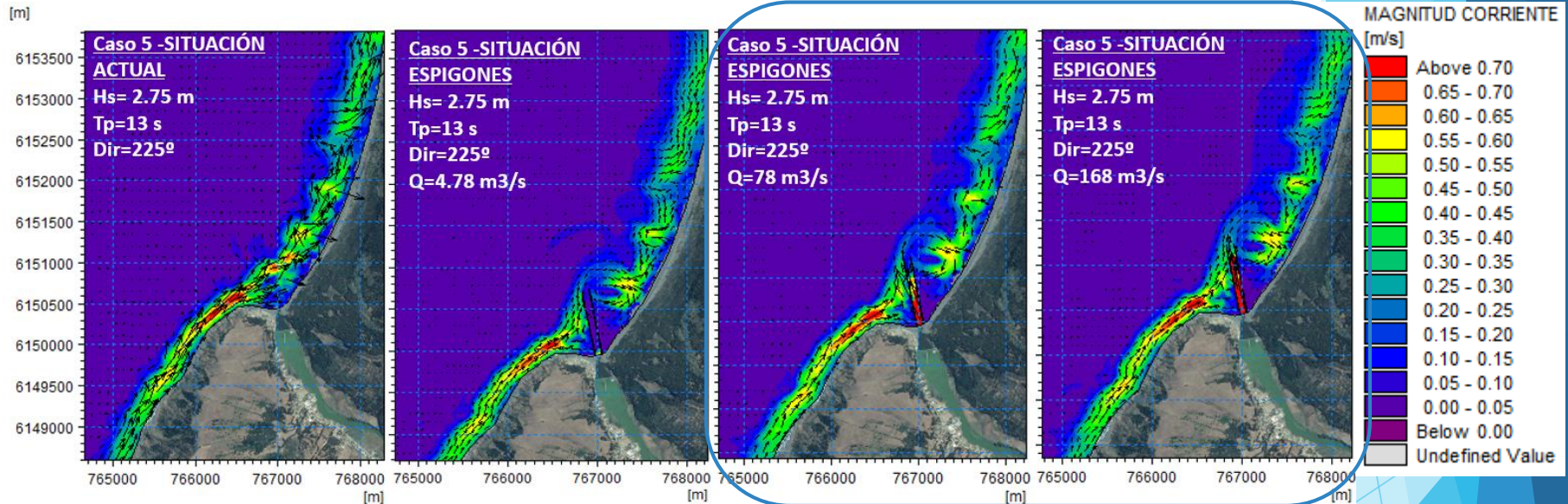
Análisis de solución

Resultados corrientes litorales MIKE 21 HD



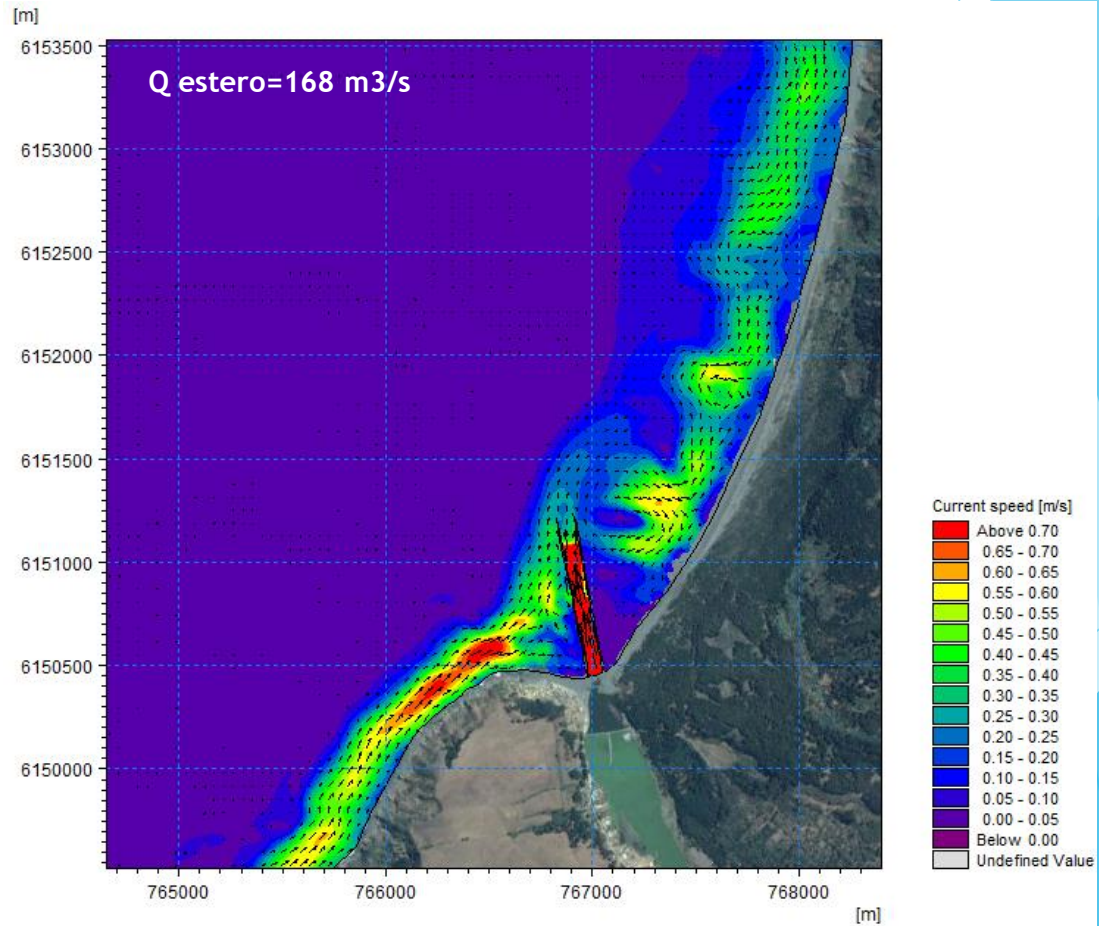
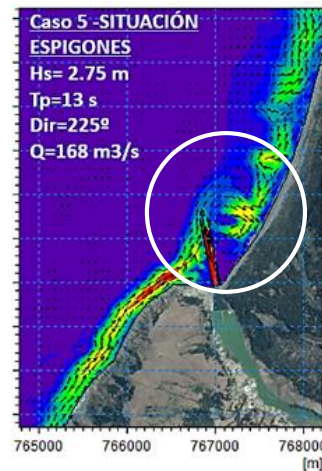
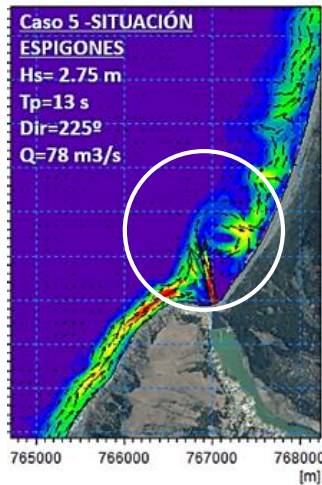
Análisis de solución

Resultados corrientes litorales MIKE 21 HD



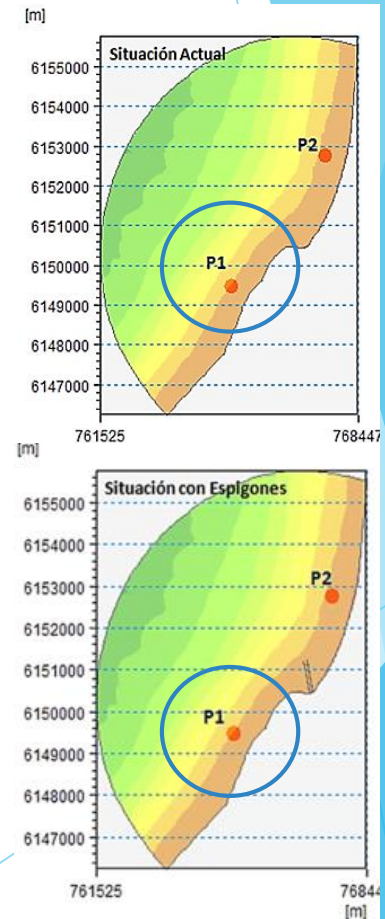
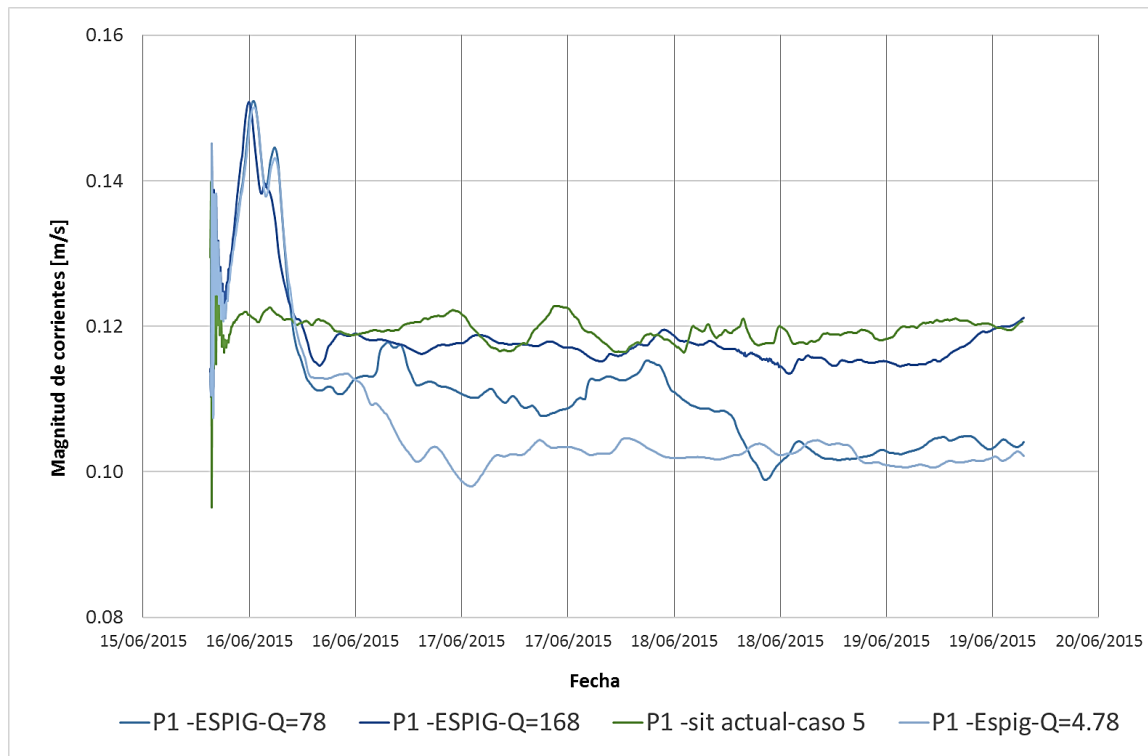
Análisis de solución

Resultados corrientes litorales MIKE 21 HD



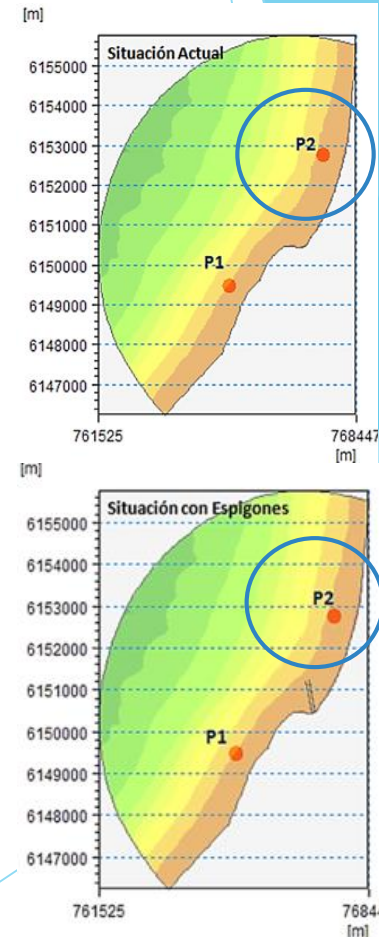
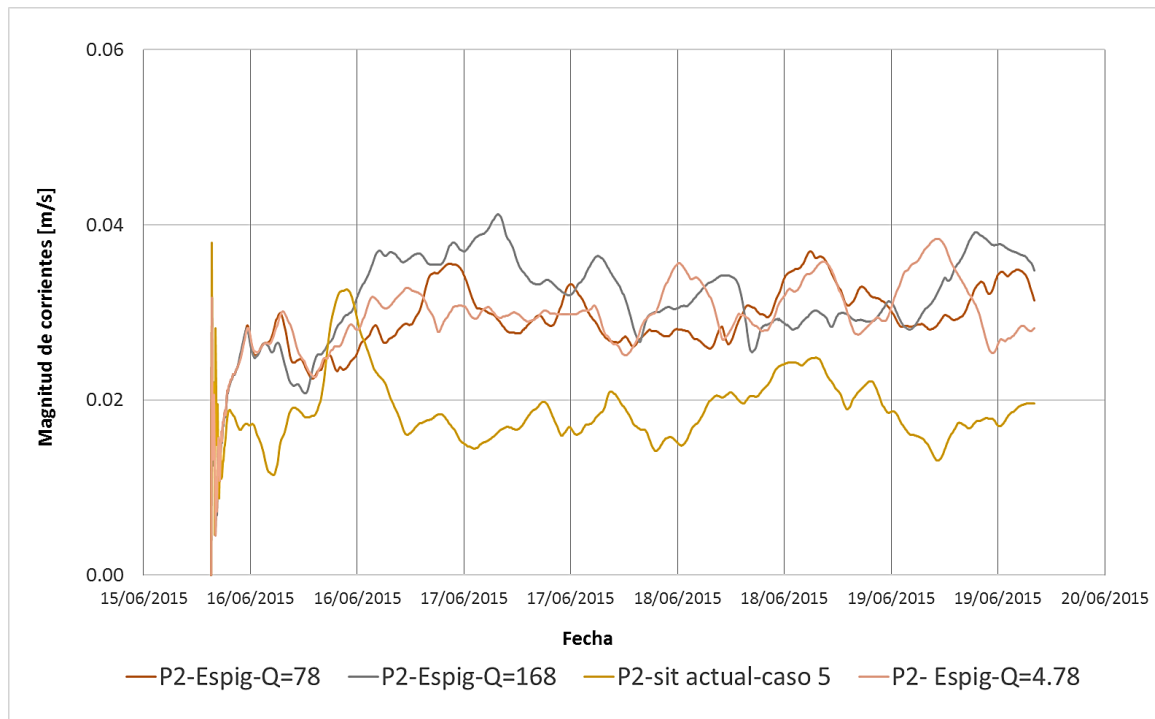
Análisis de solución

Resultados corrientes litorales MIKE 21 HD



Análisis de solución

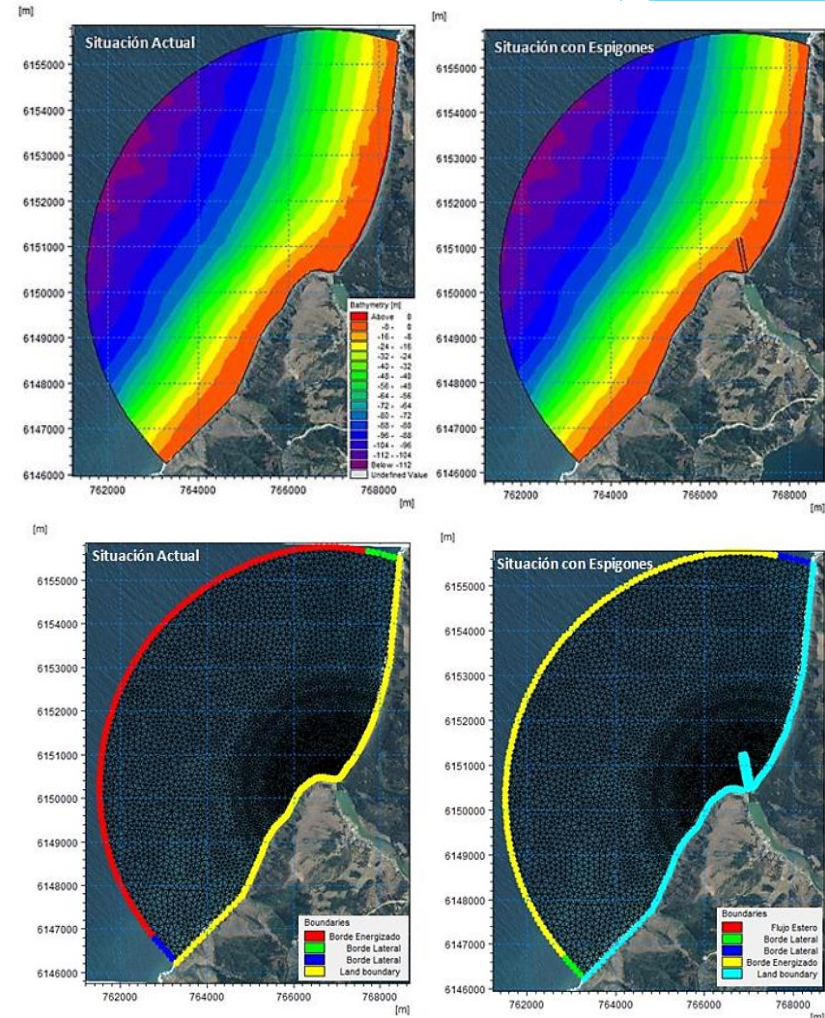
Resultados corrientes litorales MIKE 21 HD



Análisis de solución

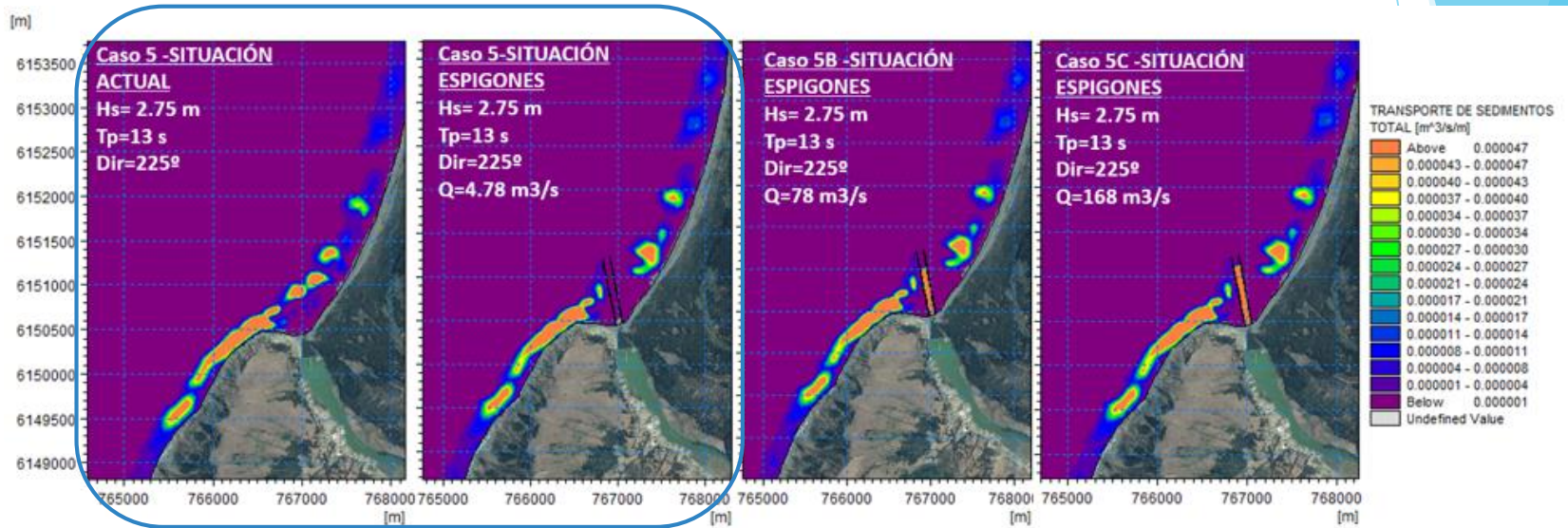
Batimetría MIKE 21 ST

- ▶ Se simulan los mismos casos de estudio en aguas profundas; $\text{Dir}=202.5^\circ$ y 225° .
- ▶ Se utilizó un diámetro medio del sedimento de $D50=0.28$ mm.
- ▶ Desviación geométrica 1.3; Porosidad 40%.
- ▶ Se utiliza misma malla batimétrica que para MIKE 21 HD.
- ▶ La condición de borde impuesta corresponde a una condición de equilibrio de transporte de sedimentos.
- ▶ Se optó por utilizar la formulación de Engelund y Hansen (DHI, 2016).
- ▶ Para estimar el transporte total, se aplican factores e calibración K_b y K_s (carga por fondo y suspendida).



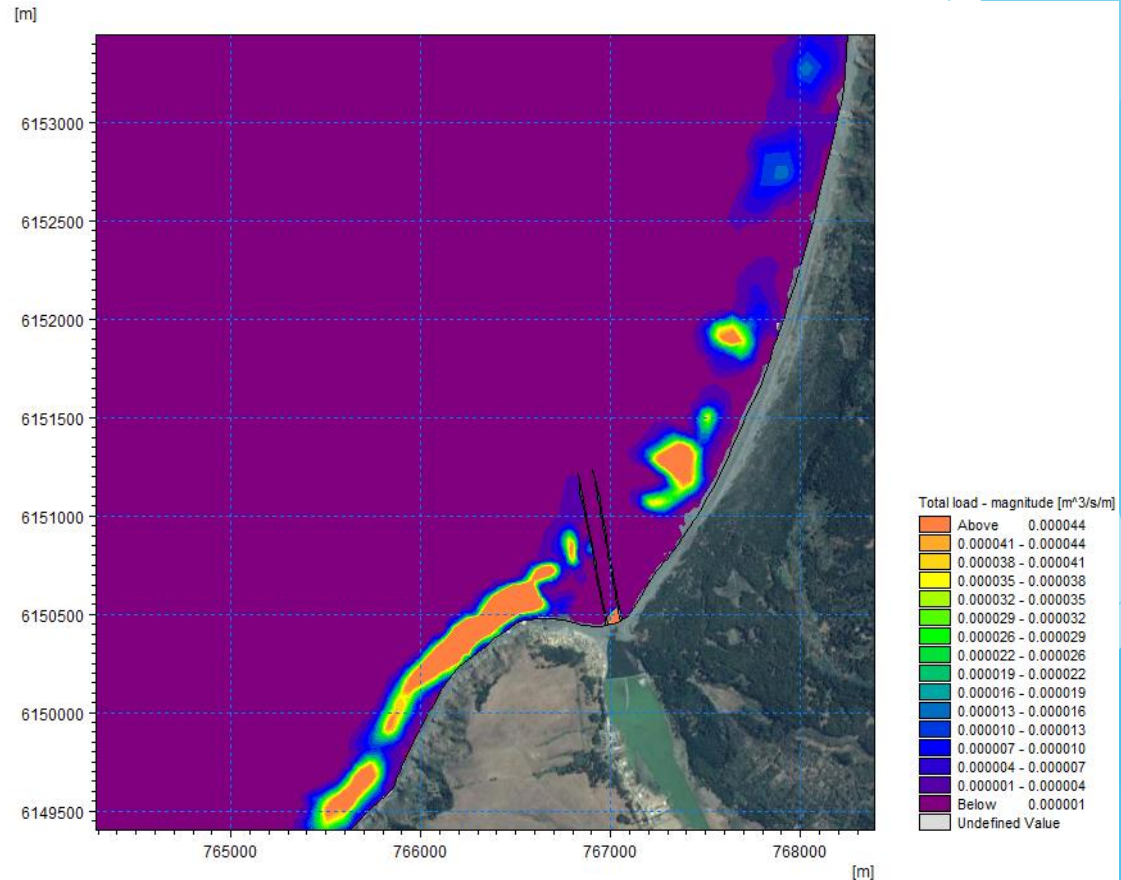
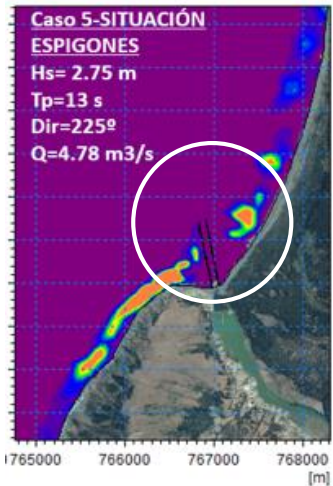
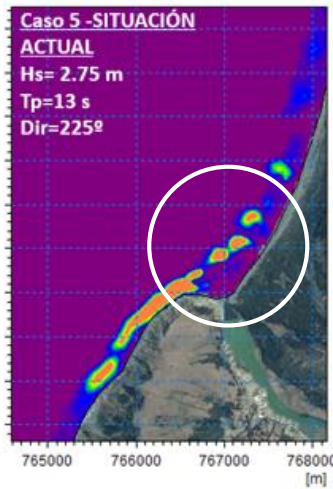
Análisis de solución

Resultados Transporte de sedimentos MIKE 21 ST



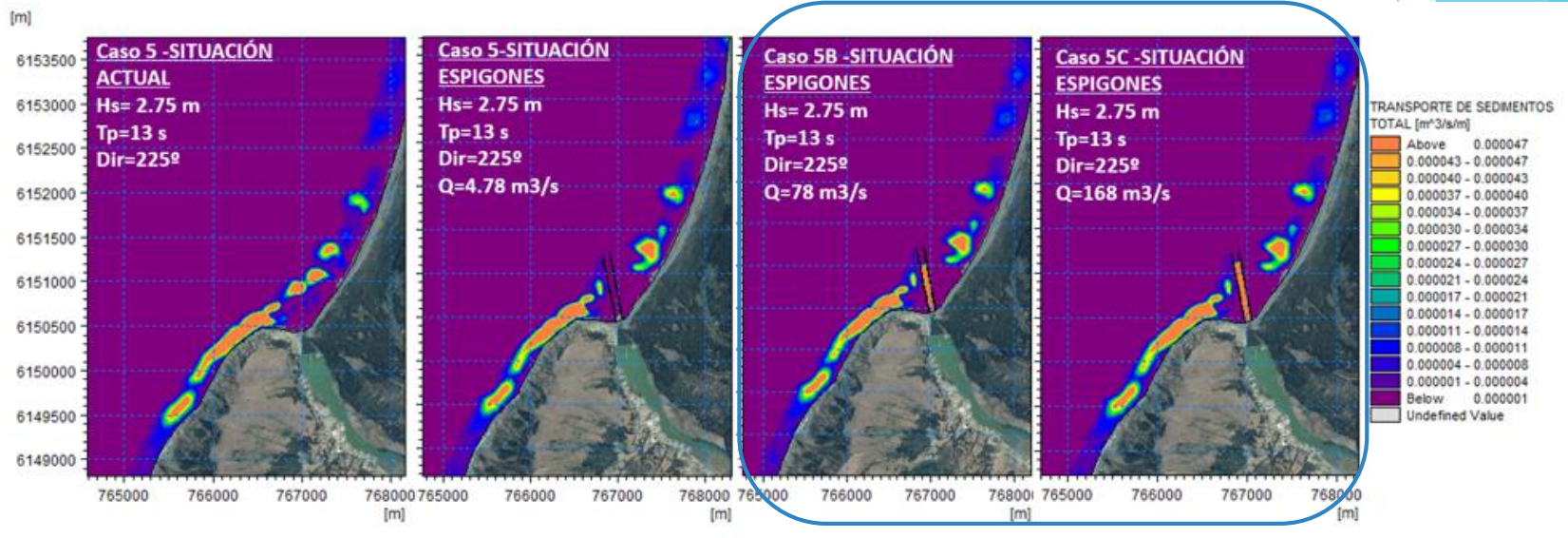
Análisis de solución

Resultados Transporte de sedimentos MIKE 21 ST



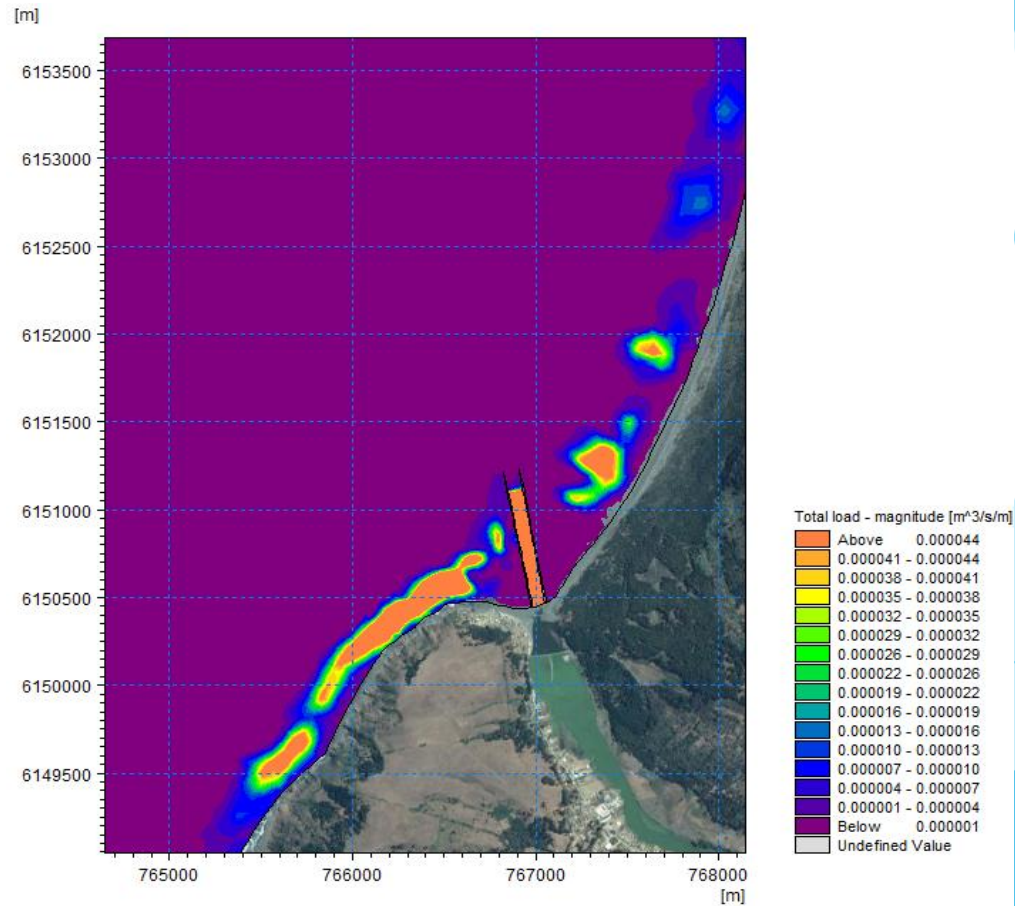
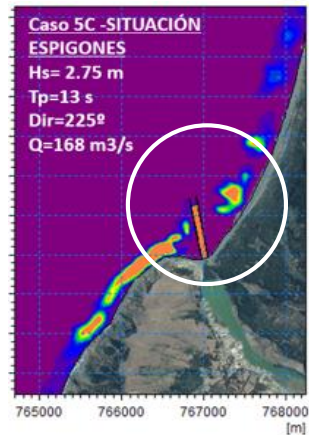
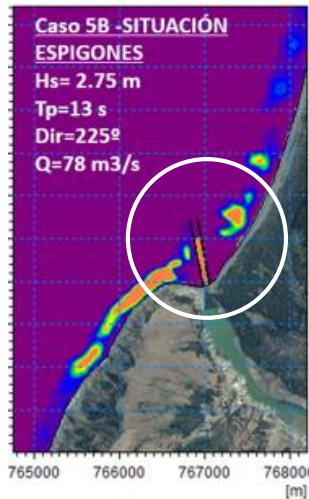
Análisis de solución

Resultados Transporte de sedimentos MIKE 21 ST



Análisis de solución

Resultados Transporte de sedimentos MIKE 21 ST



Análisis de solución

Resultados Caso Extremo MIKE 21 SW

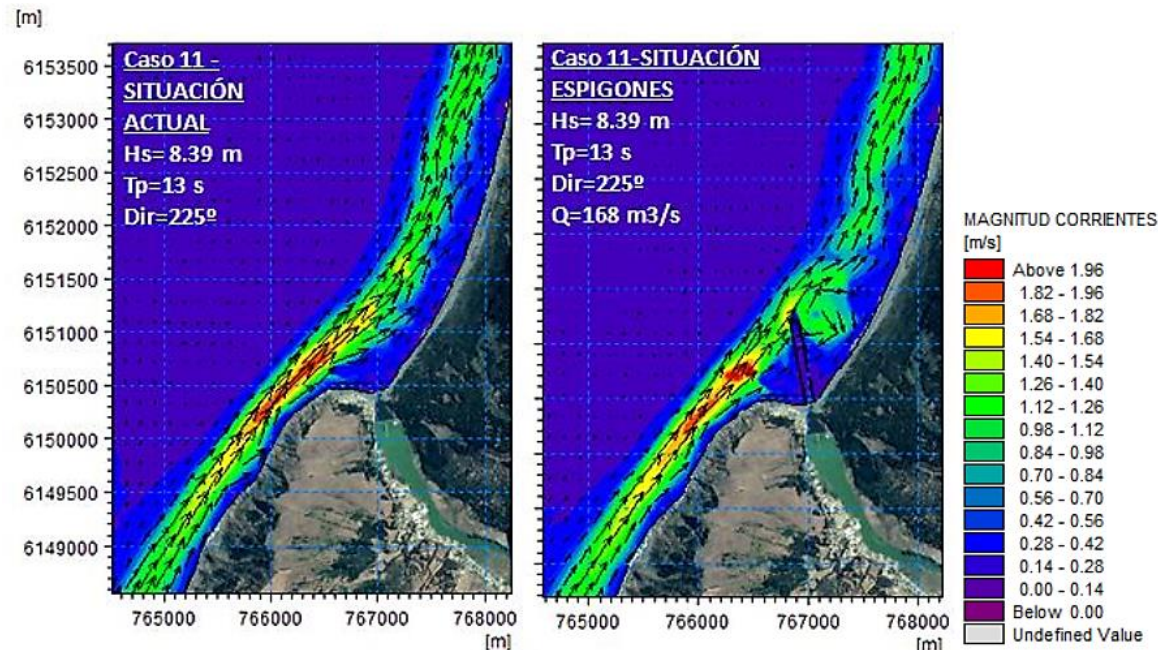
- ▶ Se optó por realizar el estudio de un caso extremo de oleaje asociado a un $Tr=40$ años (vida útil espigones).
- ▶ $H_s=8.39$ [m]
- ▶ $T=13$ [seg]
- ▶ $Dir=225^\circ$
- ▶ Q estero= 168 [m³/s]; $Tr= 10$ años.

- ▶ A continuación se presentan los resultados de corrientes y transporte de sedimentos.

Análisis de solución

Resultados Caso Extremo MIKE 21 HD

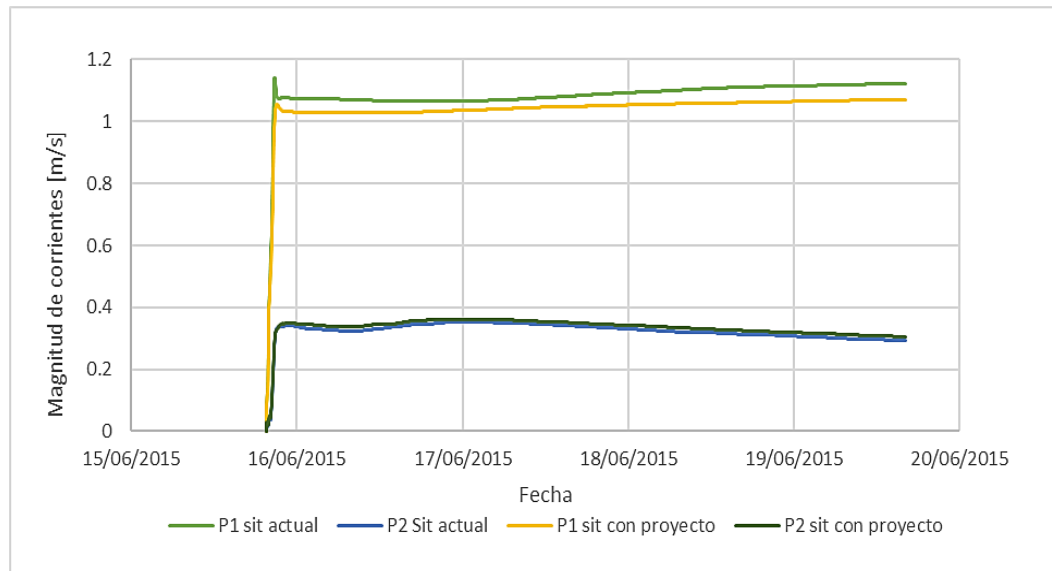
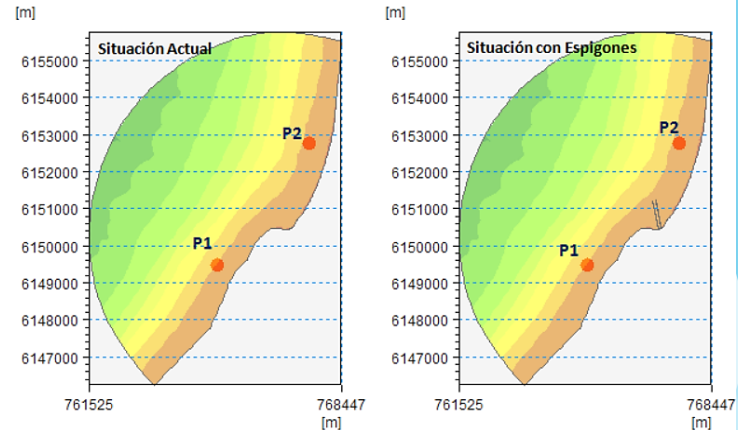
- ▶ En el sector sur de los espigones, las corrientes costeras presentan magnitudes de 1.6 a 1.9 [m/s] en la situación actual. En el sector norte no se superan los 1.6 [m/s].
- ▶ En el caso de la situación con espigones, las corrientes costeras disminuyen levemente su magnitud hacia el norte de las estructuras. 1.4 [m/s].
- ▶ Presencia de turbulencias.
- ▶ Desplazamiento de la profundidad activa y de cierre.



Análisis de solución

Resultados Caso Extremo MIKE 21 HD

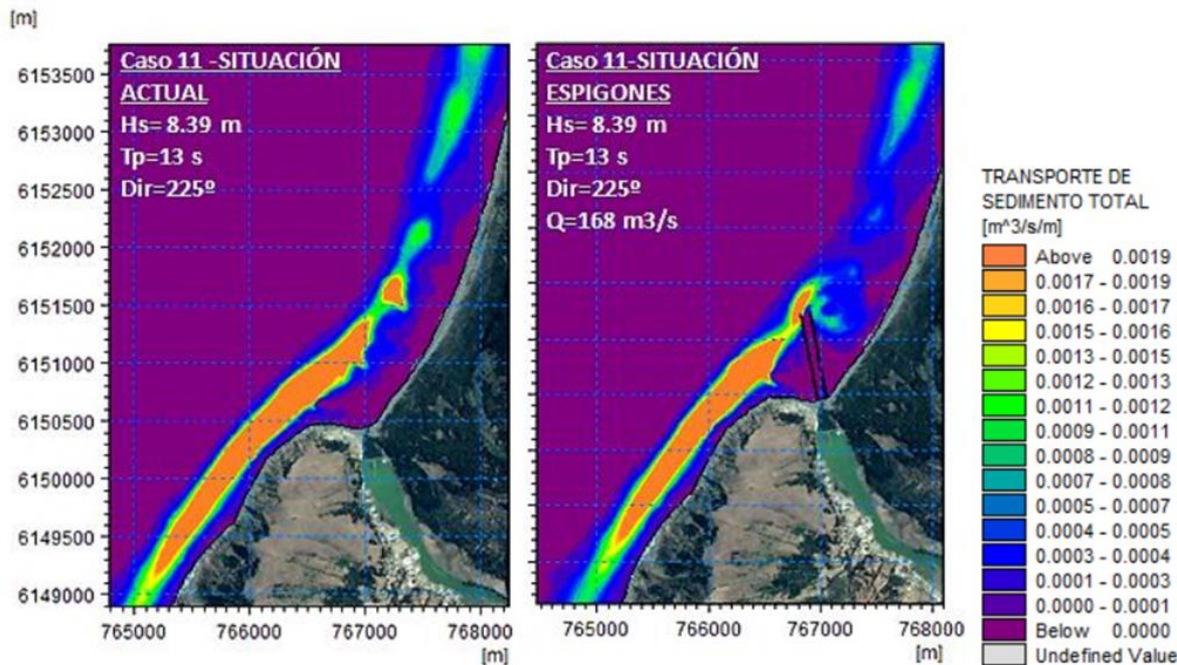
- ▶ Se evidencia una leve variación de magnitud de corrientes en el tiempo de la situación con espigones, respecto a la situación actual.
- ▶ La variación en magnitud es del orden de los 0.05 m/s.



Análisis de solución

Resultados Caso Extremo MIKE 21 ST

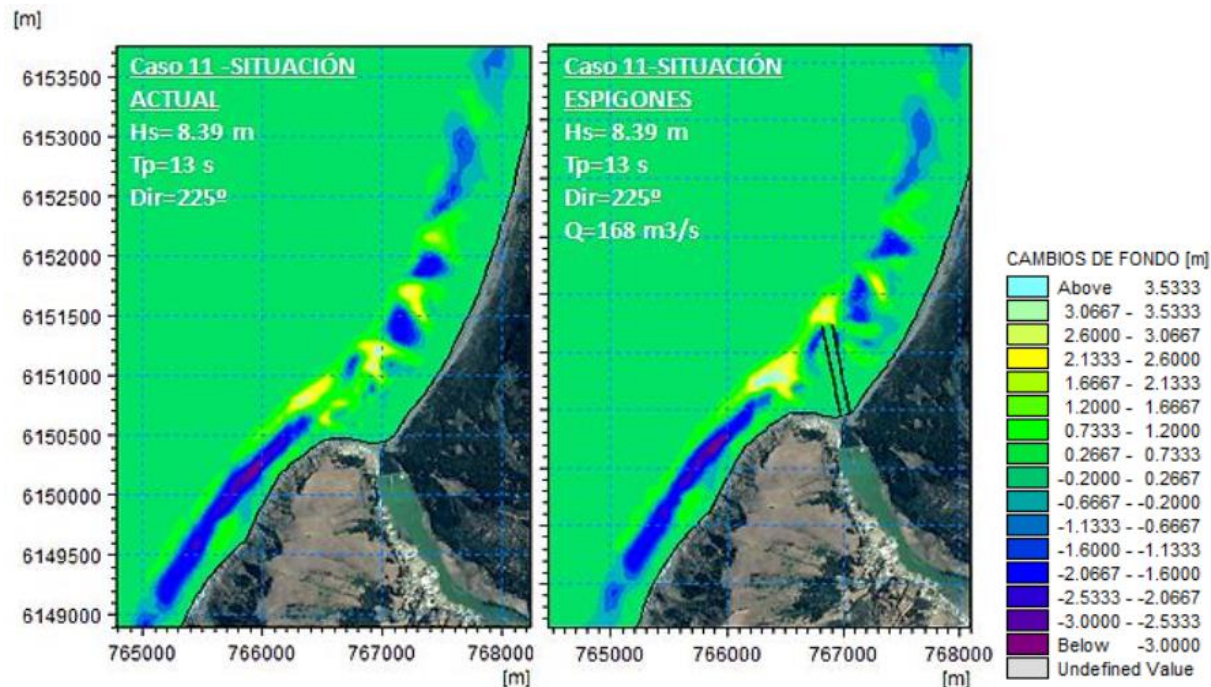
- ▶ Se observa una mayor cantidad de transporte de sedimentos, respecto a los casos operacionales.
- ▶ Se evidencia un claro “bloqueo” de la trayectoria de los sedimentos debido a la presencia de los espigones.
- ▶ Erosión de playa, acumulación de sedimentos en el sector sur de los espigones.
- ▶ Posible embancamiento de los espigones al inicio del canal



Análisis de solución

Resultados Caso Extremo MIKE 21 ST

- ▶ Zonas de acreción o acumulación: colores claros (verde agua y amarillos).
- ▶ Zonas de erosión: colores azules.
- ▶ Se evidencia acumulación de sedimentos en situación con espigones.
- ▶ Erosión de playa Llico.
- ▶ Cambios en la línea de costa.



Análisis de solución

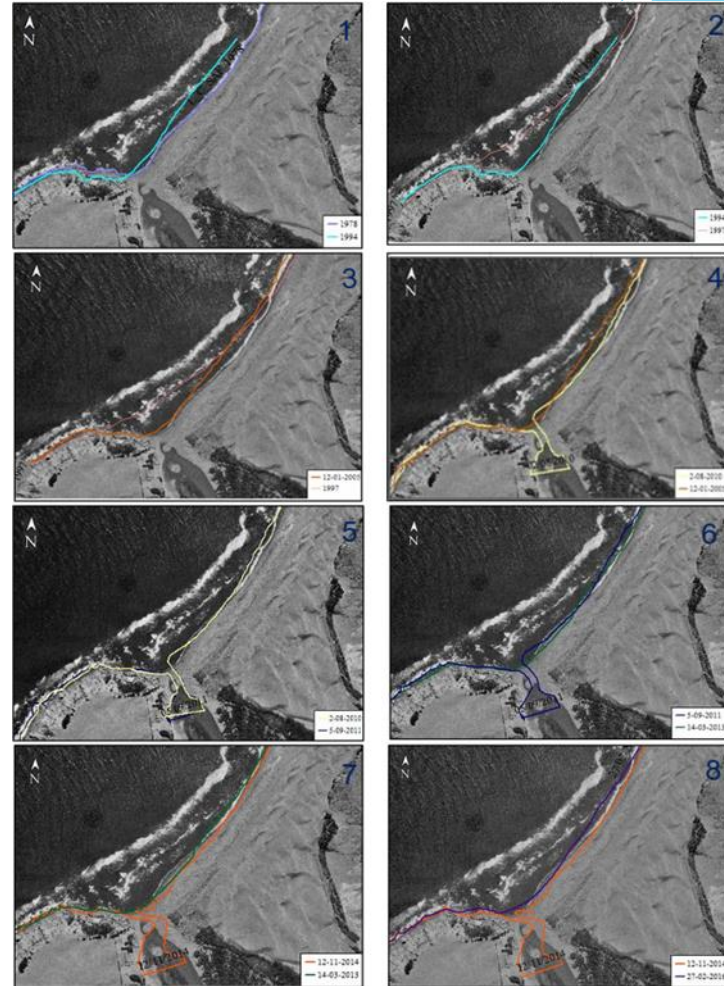
Análisis temporal de la línea de costa

- ▶ Mediante la recopilación de una serie de imágenes históricas se ejecutó un análisis temporal de la línea de costa del sector de estudio.
- ▶ Se representaron 38 años.
- ▶ Fotos SAF - Años 1978-1994-1997.
- ▶ Fotos satelitales Google Earth - Años 2005 - 2010 - 2011 - 2013 - 2014 - 2016.
- ▶ El objetivo es detectar zonas de erosión y/o acreción.

Análisis de solución

Análisis temporal de la línea de costa

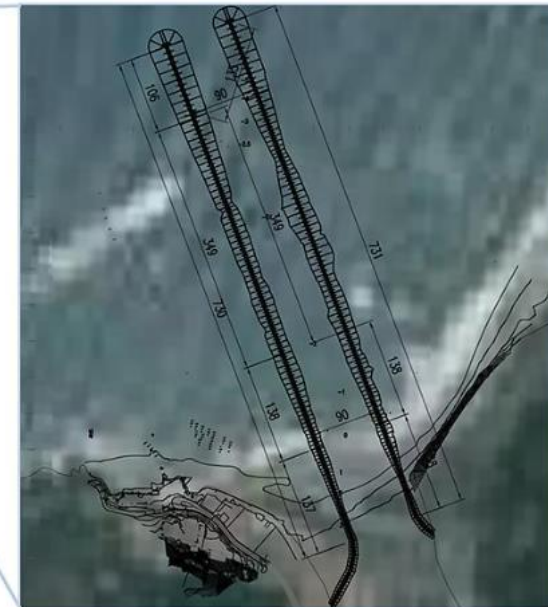
- ▶ RESULTADOS:
- ▶ Costa de Llico ha experimentado grandes variaciones a lo largo del tiempo debidas a eventos importantes:
- ▶ Temporales 1997 (DGAC, 1997) - gran avance de la línea de costa.
- ▶ Terremoto 27 Febrero 2010 - terreno bajó 50 cms. (Farías, Vargas, Tassara, etc al, 2010).



Diseño obras de encauzamiento

Bases de diseño

| Criterio | Valor adoptado |
|-----------|----------------|
| Vida útil | 25 años |
| Riesgo | 50% |
| Tr | 40 años |

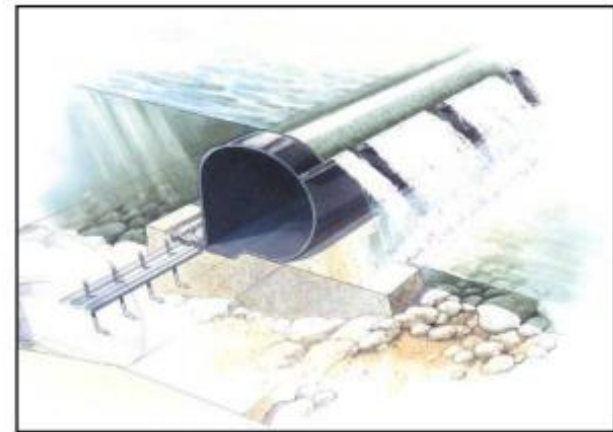


| Punto de propagación | Profundidad al pie (m NRS) | Hs al pie (m) |
|----------------------|----------------------------|---------------|
| Cabezo | -4.0 | 4.77 |
| Tronco | -2.0 | 3.98 |
| | -2.0 | 3.3 |
| Arranque | 0.0 | 2.5 |

| Sección | Elemento | W50 (Ton) |
|----------|----------|-----------|
| Cabezo | Dolosse | 2.0 - 4.0 |
| Tronco | Roca | 7.0 - 10 |
| | Roca | 3.0 - 5.0 |
| Arranque | Roca | 2.0 - 3.0 |

Plan complementario a solución propuesta

- ▶ Se propone de manera conceptual la implementación de una compuerta tipo “*Rubber Dam*”
- ▶ La compuerta se mantendrá siempre inflada.
- ▶ Esto evitará que el lago se “desagüe” en marea baja y se llene de agua de mar en marea alta.



Costos solución propuesta

| ÍTEM | DESIGNACION | | CANTIDAD | UNIDAD | PRECIO UNITARIO | TOTAL |
|----------|---|----------------|----------|--------|--------------------|--------------------------|
| | NOMBRE ÍTEM | NOMBRE PARTIDA | | | | |
| | NOMBRE SUB-ÍTEM | | | | | |
| 1 | ACTIVIDADES GENERALES | | | | | 374,616,849 |
| 1.1 | INSTALACIÓN DE FAENAS (3.5%) | | 1 | GL | 374,616,849 | 374,616,849 |
| 2 | ESPIGONES | | | | | 6,281,686,528 |
| 2.1 | SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE DOLOSSES DE 2 A 4 TON | | 608 | UN | 899,000 | 546,592,000 |
| 2.2 | SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE NUCLEO DESMONTE DE CANTERA | | 32,743 | M3 | 21,131 | 691,892,333 |
| 2.3 | SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE GEOTEXTIL DE PROTECCIÓN | | 42,224 | M2 | 3,548 | 149,810,752 |
| 2.4 | SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE ROCA FILTRO 700 A 1000 KG | | 7,663 | M3 | 23,142 | 177,337,146 |
| 2.5 | SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CORAZA FILTRO 7 A 10 TON | | 8,822 | M3 | 49,900 | 440,217,800 |
| 2.6 | SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE ROCA FILTRO 300 A 500 KG | | 15,515 | M3 | 21,131 | 327,847,465 |
| 2.7 | SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CORAZA FILTRO 3 A 5 TON | | 62,941 | M3 | 41,400 | 2,605,757,400 |
| 2.8 | SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE ROCA FILTRO 200 A 300 KG | | 3,500 | M3 | 23,142 | 80,997,000 |
| 2.9 | SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CORAZA FILTRO 2 A 3 TON | | 14,040 | M3 | 37,027 | 519,859,080 |
| 3.0 | DRAGADO | | 34,496 | M3 | 14,544 | 501,709,824 |
| 3.1 | EXCAVACIONES | | 46,528 | M3 | 5,151 | 239,665,728 |
| 3 | SISTEMA DE COMPUERTAS (Tipo RUBBER DAM) | | | | | 1,210,650,444 |
| 3.1 | ENROCADO PROTECCIÓN COMPUERTA (ROCA 50 A 100 KG) | | 1,024 | M3 | 21,131 | 21,638,144 |
| 3.2 | MURO DE BARRERA FIJA | | 210 | M3 | 416,810 | 87,530,100 |
| 3.3 | MURO DE CONTENCIÓN | | 15 | M3 | 416,810 | 6,252,150 |
| 3.4 | COMPUERTA INFLABLE | | 1 | UN | 1,094,972,500 | 1,094,972,500 |
| 3.5 | EXCAVACIONES | | 50 | M3 | 5,151 | 257,550 |
| | | | | | SUBTOTAL | \$ 7,866,953,821 |
| | | | | | I.V.A. 19% | \$ 1,494,721,226 |
| | | | | | EVENTUALIDADES 30% | \$ 2,808,502,514 |
| | | | | | TOTAL | \$ 12,170,177,561 |

Conclusiones

Hidrodinámica

- ▶ **Influencia principal:** Oleaje proveniente desde el SW y SSW para ambas situaciones.
- ▶ **Resultados situación actual:** Corrientes son mayores en zona de rompientes.
 - Magnitudes principales varían entre los 0.5 m/s (norte desembocadura) y 0.7 m/s (sector sur desembocadura).
- ▶ **Resultados situación con espigones:** Modificación en patrón de corrientes.
 - Las magnitudes varían entre los 0.4 y 0.8 m/s.
 - Espigones actúan como obstáculos.
 - En ciertas condiciones, las corrientes ingresarían al canal formado por espigones.
 - Se forman turbulencias y remolinos en sector norte.
 - Disminución en magnitud de corrientes hacia el sector norte.
- ▶ **Resultados Caso Extremo:** Se esperarían corrientes máximas de 2 m/s en sur desembocadura.

Conclusiones

Transporte de sedimentos

- ▶ **Influencia principal:** Corrientes litorales de Sur a Norte.
- ▶ **Resultados situación actual:** Transporte de sedimentos mantiene trayectoria y magnitud de aprox. $0.000047 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.
- ▶ **Resultados situación con espigones:** Alta probabilidad de embancamiento en sector sur de espigones.
 - En condiciones de salida de caudal mínima de estero Llico, se determinó que podría ingresar sedimento al canal, produciendo embancamiento.
 - Necesidad de dragados.
 - Disminución de capacidad de transporte de arenas en sector norte.
 - Erosión de playa de Llico (sector norte espigones).
- ▶ **Resultados Caso Extremo:** Desplazamiento de profundidad de cierre y activa.
 - Alta erosión en playa de Llico, acumulación en sector sur.
 - Cambios en la línea de costa.

Conclusiones

Análisis histórico Línea de Costa

- ▶ Observación general:
- ▶ Indicios de equilibrio de la costa, a partir del año 2010 (post terremoto), con tendencia leve a erosión.
- ▶ Balance neutro de sedimentos en la zona de estudio.
- ▶ Costa en equilibrio.

Recomendaciones

- ▶ Se recomienda la ejecución de campañas oceanográficas de mediciones de: oleaje, corrientes, vientos y mareas (invierno - verano). Mediciones topobatimétricas en invierno y verano.
- ▶ Respecto a los modelos matemáticos, se recomienda Calibrar y validar modelaciones con mediciones in situ.
- ▶ Se recomienda implementación de modelo de cambios de línea de costa.
- ▶ En estudios futuros se recomienda mejorar técnicas de precisión para análisis de línea de costa histórica (minimizar error usuario).

Comentarios Finales

- ¿Qué pasa entonces si mantenemos la barra de la desembocadura abierta de forma permanente? Respuesta: se infiere que problema de calidad de aguas se resuelva, sin embargo se recomienda realizar estudio de calidad de aguas para comprobar.
- ¿Qué pasa finalmente con las inundaciones en Llico ? Respuesta: Se mantienen controladas, siempre y cuando se considere compuerta aguas arriba, que mantenga al lago y estero con niveles óptimos en marea alta y baja.
- ¿Con la presencia de los espigones, qué ocurriría con la playa de Llico? Respuesta: Se infiere erosión de playa a largo plazo. Generación de zonas de acumulación en sector sur.

Comentarios Finales

- ▶ No se recomienda la implementación de dos estructuras en desembocadura.
- ▶ Alto impacto en medio ambiente.
- ▶ Posible pérdida de playa.
- ▶ Posible embacamiento en sector sur.
- ▶ Posible embancamiento en canal.
- ▶ Altas probabilidades de necesidad de dragado en canal.
- ▶ Alto costo de construcción y posibles mantenciones del canal (dragados).



GRACIAS POR SU ATENCIÓN





ANEXOS



6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Niño, Y. (2013). *Arrastre incipiente de sedimentos no cohesivos* Transporte hidráulico de sólidos.

Bagnold, R.A. (1956). *The flow of cohesionless grain fluids*. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser A249, 235-297.

Battjes, J. (1974). *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves*.

Bodemar. (2015). *Estudio Topobatimétrico*.

Bordemar. (2015). *Estudio Sediementológico*.

Cocepción, C. I. (2014). *Iccullera*. Recuperado el 26 de 08 de 2017, de <http://www.iccullera.com/niveles/e-primaria/2o-primaria/visitaalportial%E2%80%99escolleradecullera>

Córdova, R. T. (2009). *Método para la estimación del transporte longitudinal de sedimentos en playas de arena*.

Daniela Moreno, e. a. (2010). *Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia*.

David Mateos, A. C. (2013). *Atmosferis*. Recuperado el 26 de 08 de 2017, de <http://www.atmosferis.com/olas-oceanicas-calculo-de-su-energia/>

DGA. (2014). *Evaluación de la condición trófica de la red de control de lagos*.

DGAC. (1997). *Anuario Climático*. Santiago.

DHI. (2016). *MIKE 21 Flow Model FM Sand Transport Module Step-by-Step training guide: Coastal application*.

DHI. (2016). *MIKE 21 Flow Model Hydrodynamic Module*. Scientific Documentation.

DHI. (2016). *MIKE 21 Flow Model Hydrodynamic Module*. User Guide.

DHI. (2016). *MIKE 21 Flow Model Hydrodynamic Module*. User Guide.

DHI. (2016). *MIKE 21 Flow Model Sand Transport Module*. User guide.

DHI. (2016). *MIKE 21 Flow Model Sand Transport*. Scientific Documentation.

DHI. (2016). *MIKE 21 Spectral Waves Module*. Scientific Documentation.

DHI. (2016). *MIKE 21 Spectral Waves Module*. User Guide.

DHI. (2016). *MIKE ZERO Creating 2D Bathymetries*. Batymetry Editor y Mesh Generator. Scientific Documentation.

EULA, C. d. (2008). *Evaluación Limnológica General del Lago Vichuquén*.

Fariás, Vargas, Tassara, et al. (2010). *Land-Level changes during the Mw 8.8 2010 Chilean Earthquake*

G.I.O.C. (2000). *Regeneración de Playas*. En U. d. Cantabria, *Documento temático*.

GHD (2015) *Estudio de Niveles*.

GHD. (2015). *Estudio de Oleaje*.

GHD. (2015). *Estudio Hidrológico*.

GHD. (2015). *Instalación de Reglas Llico - Vichuquén, Procedimiento Apertura y Cierre de la barra mediante maquinaria pesada*.

GIOC. (2002). *Documentos de referencia, Mecánica de ondas Volumen I*.

GIOC. (2000). *Procesos Litorales*, Volumen 2. En *Documento de Referencia*.

Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*.

Goda, Y. (2000). *Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan*.

Hellemeier, R. (1978). *Uses for a calculated limit depth to beach erosion*.

Hermann M. Fritz, C. M. (2011). *Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami*.

Lamazares, L. C. (mayo-agosto de 2012). *Biblioteca digital Scielo*. Obtenido de Scielo: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382012000200005

Lira, C. (29 de septiembre de 2014). *Jornada*. Recuperado el 26 de 08 de 2017, de <http://www.jornada.unam.mx/2014/09/29/eco-c.html>

Losada, I. J., Medina, R., Losada, M. A., & Vidal, C. (1995). *Modelos Hidrodinámicos y de Transporte de Sedimentos*. Cantabria: Grupo de ingeniería oceanográfica y de costas, Universidad de Cantabria.

Martínez C. et al. (2009). *Aplicaciones de modelos de ajuste para el análisis de los cambios históricos de la línea litoral en grandes ensenadas. Ejemplos en Chile.*

Massel. (1996). *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction.*

Menéndez, N. B. (2016). *Evaluación de metodologías para la modelación Reynolds - Averaged Navier Stokes (RANS) de la capa límite en conductos circulares.*

Miguélez, I. (2016). *Sailandtrip*. Recuperado el 26 de 08 de 2017, de <http://sailandtrip.com/la-marea/>

Moreno, D. (2010). *Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia.*

N.W.Hudson1997*Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura*

Nieto, J. R. (1889). *Estudios relativos al establecimiento de un puerto militar comercial en el lago Vichuquén.*

Niño, Y. (2013). *Mecánica del Transporte de Sedimentos.*

Ojeda, J. (2001). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. En J. Ojeda.

Oliva Martínez, A. R. (Agosto de 2008). *SciELO*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972008000400004#.WUrm80nm3E8.google

Ordóñez, J. (2005). Régimen de los ríos aluviales y sus implicancias sobre la socavación general.

R. Medina, C. V. (2001). Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de Equilibrio. En G. d. Costas.

Rodríguez, M. &. (2008). *Aplicación del modelo bidimensional GUAD-2D para la determinación de zonas inundables en el T.M de Fraga.*

ROM. (1990). *ROM 02-90 Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias.*

Rubiera, J. (2004). *Oncuba*. Recuperado el 26 de 08 de 2017, de <http://oncubamagazine.com/ciencia/corrientes-asesinas/>

Sánchez - Arcilla, J. A. (1994). Ingeniería de playas (I): Conceptos de morfología costera. *Laboratorio de ingeniería marítima E.T.S Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona*.

Sánchez - Arcilla, J. A. (1994). Ingeniería de playas (I): Conceptos de morfología costera. *Laboratorio de ingeniería marítima E.T.S Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona*.

Sánchez, C. (15 de abril de 2015). *www.capital.cl*. Obtenido de Revista Capital: <http://www.capital.cl/negocios/2015/04/30/106840/la-marea-verde>

Sierra, J. P. (1998). *comparativo de criterios de rotura del oleaje regular. Ingeniería del agua*, 5(1).

Sorensen, D. -N. (1970). *Some sand transport phenomena on coasts with bars. In Coastal Engineering*.

Spare. (2011). *Introducción a las compuertas neumáticas.*

SPM, U. A. (1984). *Shore Protection Manual.*

UNICAN. (2000). *Procesos Litorales, Universidad de Cantabria*

USACE. (2008). *Coastal Engineering Manual, Parte II, Capítulo 4, Surf Zone Hydrodynamics.* U.S Army Corps of Engineers.

Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas.* The Netherlands: Aqua Publications.

Varela, V. N. (2002). *Diseño de diques rompeolas.*

Vichuquén, M. d. (2013). *Solicitud declaración como monumento histórico para el muelle de Llico.*