

# ESTUDIO HIDRODINÁMICO PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA BAHÍA DE PUERTO VARAS

Propuesta preparada para Universidad San Sebastián



UNIVERSIDAD  
SAN SEBASTIAN

Informe MP 392 – 2022

Agosto de 2022

Las Condes  
Cruz del Sur 251  
Tel. (562) 2495 8672

Puerto Varas  
Tel. (569) 9410 2085

[www.mejores-practicas.com](http://www.mejores-practicas.com)

MEDIO AMBIENTE – ENERGÍA – AGUA  
CAMBIO CLIMÁTICO – COMUNIDADES

## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas

Preparado para  
**Universidad San Sebastián**  
 Puerto Montt

Preparado por  
**MEJORES PRÁCTICAS**  
 Cruz del Sur 251, Las Condes, Santiago

Versión	Rev. A.	
Fecha	19 de agosto de 2022	
Estado	Entrega a cliente	
Revisado por	Juan Carlos Dominguez jcdominguez@mejores-practicas.com	
Preparado por	Juan Carlos Dominguez, jcdominguez@mejores-practicas.com Ignacio Beyá, ignacio@ihbeya.com Teresita Scheuch, tscheuch@mejores-practicas.com	

Este informe fue elaborado por Mejores Prácticas Asociados SpA., persona jurídica a la que pertenece su propiedad intelectual de acuerdo con la normativa nacional e internacional vigente. El informe fue preparado para el cliente identificado arriba, para los fines que éste estime convenientes, en base al conocimiento e información disponibles a la fecha de su entrega. Cualquier otro uso, decisión adoptada, resultado o conclusión arribada por terceros en base a la información contenida en este informe, será de su entera responsabilidad. Mejores Prácticas Asociados SpA. no se hace responsable de cualquier daño o perjuicio causado, directa o indirectamente, como resultado de ello.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>ESTUDIO DE CONDICIONES NATURALES</b>	<b>5</b>
3.1	VIENTO	5
3.2	OLEAJE	9
<b>4</b>	<b>MODELACIÓN HIDRODINÁMICA</b>	<b>11</b>
4.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	11
4.2	CONFIGURACIÓN DEL MODELO	12
4.2.1	<i>Batimetría</i>	13
4.2.2	<i>Dominio, malla y modelo de elevación digital</i>	13
4.2.3	<i>Parámetros de configuración</i>	16
4.3	ESCENARIOS A MODELAR	17
4.4	RESULTADOS	18
4.4.1	<i>Altura de ola</i>	18
4.4.2	<i>Corrientes</i>	21
4.5	DISCUSIÓN	24
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>27</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

La Universidad San Sebastián (USS) requiere estudiar la hidrodinámica del Lago Llanquihue al interior de la bahía de Puerto Varas con el fin de entender cómo podrían circular los contaminantes al interior de la bahía. Dentro de las fuentes de contaminación se encuentra la pluma proveniente del aliviadero de tormenta de la planta elevadora de aguas servidas (PEAS) de la ciudad (Figura 1), y una descarga de aguas lluvias en el sector de Puerto Chico que pudo haber sido afectada por posible contacto con aguas servidas.

En este contexto, la USS solicitó a Mejores Prácticas, consultora especialista en temas hidráulicos y socioambientales, realizar un estudio hidrodinámico basado en modelación numérica que ayude a caracterizar la hidrodinámica de la bahía y el comportamiento de los contaminantes al interior de esta. El presente documento especifica la metodología y resultados de dicho estudio.



**Figura 1: Aliviadero de tormenta operando en la ciudad de Puerto Varas.**

*Fuente: Portal soychile.cl*

## 2 OBJETIVOS

El objetivo general del estudio es caracterizar la hidrodinámica del lago Llanquihue en la bahía de Puerto Varas para estimar de manera general la forma en que podrían circular los contaminantes dentro de ella.

Los objetivos específicos se detallan a continuación:

- ✓ Recopilar antecedentes del lago Llanquihue y sus forzantes meteorológicas (e.g. estudios anteriores, estadística del viento, batimetría, ubicación y características de los emisarios).
- ✓ Realizar un estudio de condiciones naturales para determinar las principales forzantes de la corriente y los casos representativos para la modelación.
- ✓ Modelar la bahía de Puerto Varas para distintas condiciones de viento y oleaje a partir de un modelo hidrodinámico que permita conocer los patrones de corriente y estimar la circulación de contaminantes en la bahía.

Queda fuera de los alcances del presente trabajo la modelación de la dispersión de contaminantes por falta de información respecto a las fuentes, el tipo de contaminante a modelar y sus características físicas y químicas, pudiendo quedar dicho trabajo para una etapa posterior.

### 3 ESTUDIO DE CONDICIONES NATURALES

Las principales forzantes hidrodinámicas identificadas como relevantes para estimar la circulación en la bahía de Puerto Varas son el **viento** y las corrientes inducidas por el **oleaje**. Otros efectos como las ondas de Kelvin y las ondas Poincaré actúan en una escala espacial y temporal mayor y su efecto no es tan relevante al interior de la bahía (Abarca, 2018).

De acuerdo con Winckler (2021), para el modelado de plumas de contaminantes se debieran considerar condiciones medias e intensas de las forzantes, pero no extremas, como se hace en el caso del diseño de obras. Esto, pues *“la ocurrencia de eventos extremos está asociada a períodos de retorno altos de muy corta duración durante los cuales los procesos de mezcla son muy eficientes debido a la turbulencia ambiente, y, por ende, se asume que no generan impactos relevantes en el medio biótico”*.

Las condiciones **medias** se pueden definir como aquellas en que la magnitud de la variable tiene una **probabilidad de excedencia de 50%**, o mediana. Esta condición se asocia la operación normal de la descarga. Las condiciones **intensas** corresponden a aquellas en que la magnitud tiene una **probabilidad de excedencia de 1%**. Esta condición se asocia a baja concentración cerca de la descarga, pero alta extensión espacial de la misma.

A continuación, se presenta un análisis estadístico de las principales forzantes para considerar aquellas condiciones medias e intensas.

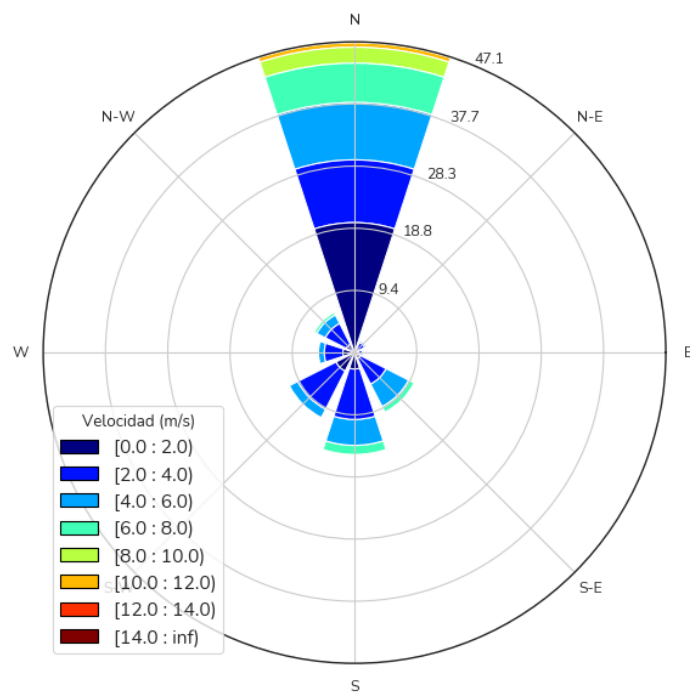
#### 3.1 Viento

Debido a que no existen mediciones directas de viento en el lago, se decidió utilizar la base de datos de viento histórico de la estación El Tepual, ubicada a 16 km de la Bahía de Puerto Varas, y de la cual se cuenta con un registro horario de 10 años de extensión entre los años 2006 y 2016. De acuerdo a la Pub. SHOA 3201, esta metodología es aceptada ya que la estación está relativamente cercana al sitio de interés (menos de 50 km) y no existen obstáculos importantes entre la estación y el sitio de estudio.

La Figura 2 y Figura 3 resumen la estadística horaria de la estación El Tepual entre los años 2006 y 2016 y muestran la distribución de velocidades y direcciones. Esta información se presenta además en la Tabla 1. La dirección predominante del viento es la **N**, con un **47%** de los casos, seguida de la dirección **S (16%)**, **SO (11%)** y **SE (10%)**. Las mayores intensidades provienen de la dirección **N**.

Debido a que los climas de viento N y S pueden generar condiciones de oleaje y patrones de corrientes muy distintos en la bahía de Puerto Varas, se decidió separar la estadística por dirección y modelar ambas condiciones. La Tabla 2 muestra la velocidad máxima y promedio para cada dirección, además de los percentiles 50 y 99, correspondientes a las condiciones medias e intensas respectivamente.

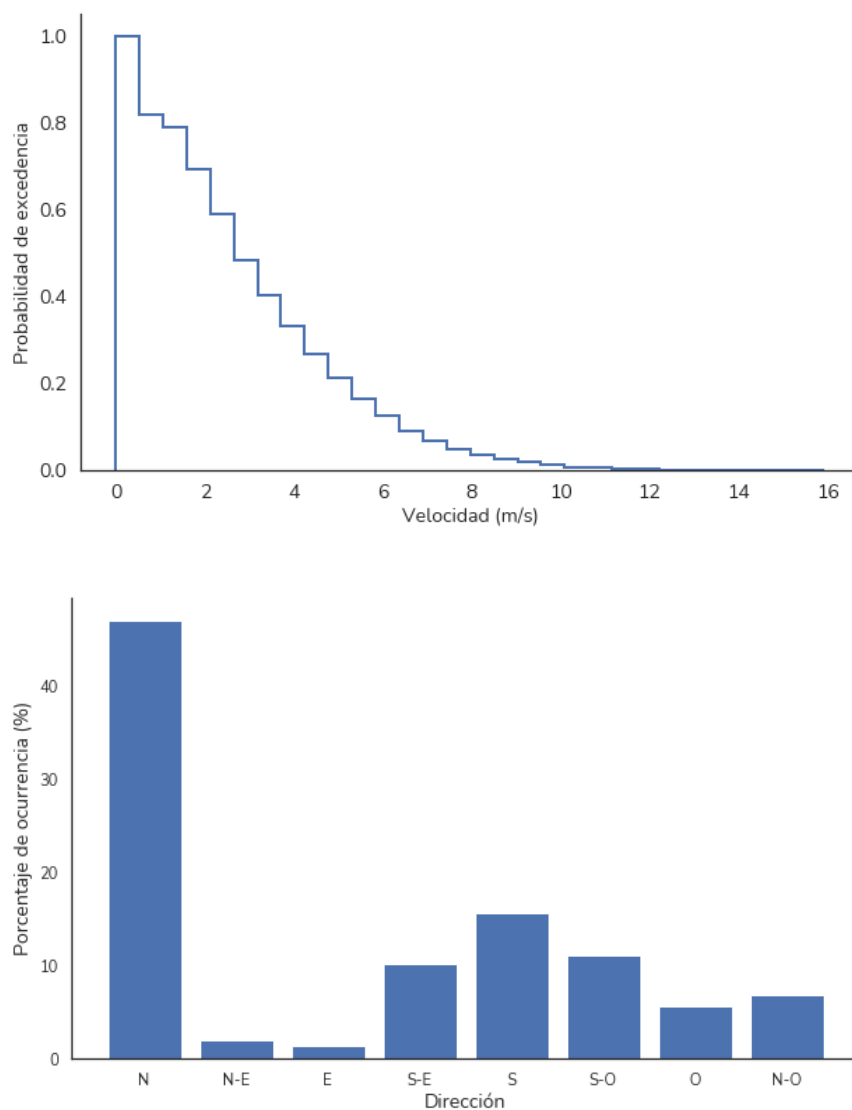
## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas



**Figura 2: Rosa de vientos a partir de los datos horarios de la estación El Tepual entre los años 2006 – 2016.**

*Fuente: Elaboración propia.*

## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas



**Figura 3: Distribución del viento horario en la estación El Tepual para los años 2006 – 2016. Arriba: Probabilidad de excedencia empírica de la velocidad del viento para todas las direcciones. Abajo: Histograma de la dirección del viento.**

*Fuente: Elaboración propia.*



## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas

**Tabla 1: Incidencia de velocidad y dirección del viento a partir de los datos horarios de la estación El Tepual entre los años 2006 – 2016.**

Velocidad (m/s)			Dirección (°)								Total (%)
			N	N-E	E	S-E	S	S-O	O	N-O	
0	-	2	19.7	0.6	0.6	1.0	2.5	3.1	1.7	1.4	30.6
2	-	4	9.5	1.1	0.6	4.4	7.7	6.5	2.8	3.6	36.1
4	-	6	8.7	0.3	0.2	3.8	3.9	1.4	0.9	1.4	20.7
6	-	8	6.0	0.1	0.0	1.0	1.4	0.1	0.1	0.4	9.1
8	-	10	2.4	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	2.7
10	-	12	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
12	-	14	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
14	<		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total (%)			47.1	2.1	1.4	10.2	15.6	11.2	5.6	6.9	100.0

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2: Estadística de viento separada por dirección. El Percentil 50 y 99 corresponden respectivamente a las condiciones media e intensa. Se destacan 4 casos a modelar.**

Velocidad (m/s)	Dirección (°)							
	N	N-E	E	S-E	S	S-O	O	N-O
Promedio	3.0	2.7	2.4	3.8	3.4	2.5	2.7	3.2
Máximo	15.9	12.3	8.2	9.8	11.3	9.3	10.3	12.9
P 50	2.6	2.6	2.1	3.6	3.1	2.1	2.6	2.6
P 99	10.8	8.2	6.2	7.7	7.7	6.2	6.7	8.2

Fuente: Elaboración propia

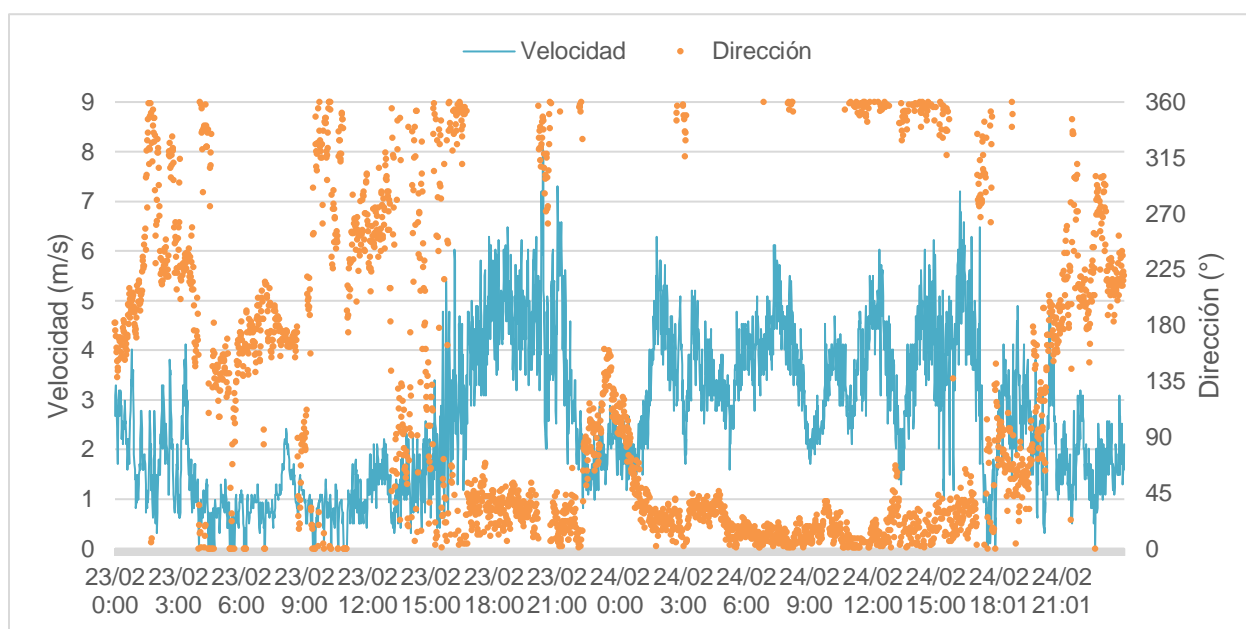
Adicionalmente se decidió modelar un quinto caso, correspondiente a un caso real de estudio, basado en un evento de descarga ocurrido entre los días 23 y 24 de febrero de 2022 en el sector de Puerto Chico, cuyos efectos se pueden ver en la Figura 4. Para ello, se extrajo una serie de tiempo de viento con resolución de un minuto de la estación automática “Estación El Tepual Puerto Montt Ap. (410005)” de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC)<sup>1</sup>. El registro con la intensidad del viento y dirección se muestra en la Figura 5. Se puede apreciar cómo las mayores intensidades (sobre los 4 m/s) se asocian a vientos provenientes del N y NE.

<sup>1</sup> <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/diario/datosDiariosEstacionAutomatica/410005/2022/02/24>

## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas



**Figura 4: Efectos de descarga ocurrida entre los días 23 y 24 de febrero de 2022 en el sector de Puerto Chico.**  
Fuente: Proporcionada por el mandante.



**Figura 5: Registro de intensidad del viento y dirección en la estación El Tepual de la DMC para los días 23 y 24 de febrero de 2022.**

Fuente: Elaboración propia con datos de la DMC.

### 3.2 Oleaje

En el caso del oleaje, debido a que no se cuenta con mediciones directas de altura de ola, periodo y dirección

## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas

en el Lago Llanquihue, estos parámetros deben ser estimados utilizando un modelo de generación de oleaje a partir de las condiciones de viento definidas previamente. Detalles de dicho modelo se muestran en la siguiente sección.

## 4 MODELACIÓN HIDRODINÁMICA

Para estimar el patrón de corrientes en el lago Llanquihue, y en particular, en la bahía de Puerto Varas, se utilizó como herramienta la modelación numérica. En específico, se utilizó el software Telemac-Mascaret para estimar las corrientes generadas por viento y oleaje, con sus módulos TELEMAC2D para el estudio de la hidrodinámica y TOMAWAC para estimar las condiciones de oleaje.

### 4.1 Descripción del modelo

**Telemac-Mascaret** es un software de modelación que agrupa distintos módulos de cálculo que pueden acoplarse para estudiar el efecto agregado de diferentes fenómenos (ej. oleaje, corrientes, transporte de sedimentos y cambio morfológico).

**Telemac 2D** es el módulo hidrodinámico capaz de calcular las características del flujo: alturas de escurrimiento y velocidades del flujo (entre otras variables hidráulicas). Este módulo resuelve las ecuaciones que gobiernan el flujo de superficie libre promediando las velocidades en la columna de agua, conocidas como ecuaciones de aguas poco profundas, y derivadas por primera vez por Barré de Saint-Venant en 1871:

$$\begin{aligned}
 \frac{\delta h}{\delta t} + \vec{U} \cdot \nabla h + h \cdot \nabla \vec{U} &= S_h & (\text{continuidad}) & \quad \text{i} \\
 \frac{\delta u}{\delta t} + \vec{U} \cdot \nabla u &= -g \frac{\delta \eta}{\delta x} + S_x + \frac{1}{h} \nabla(h \cdot \mu_t \nabla u) & (\text{momentum en eje x}) & \quad \text{ii} \\
 \frac{\delta v}{\delta t} + \vec{U} \cdot \nabla v &= -g \frac{\delta \eta}{\delta y} + S_y + \frac{1}{h} \nabla(h \cdot \mu_t \nabla v) & (\text{momentum en eje y}) & \quad \text{iii} \\
 \frac{\delta T}{\delta t} + \vec{U} \cdot \nabla T &= S_T + \frac{1}{h} \nabla(h \cdot \mu_T \nabla T) & (\text{trazadores}) & \quad \text{iv}
 \end{aligned}$$

La principal aplicación de este módulo es en hidráulica marítima, fluvial y lacustre, donde la influencia de los siguientes fenómenos o características de modelación pueden ser relevantes:

- Propagación de ondas largas, incluidos los efectos no lineales.
- Fricción de fondo.
- Efecto de la fuerza de Coriolis.
- Efectos de los fenómenos meteorológicos como la presión atmosférica, lluvia, evaporación y viento.
- Turbulencia.
- Flujos supercríticos y subcríticos.
- Influencia de los gradientes horizontales de temperatura y salinidad sobre la densidad del agua.
- Coordenadas cartesianas o esféricas para grandes dominios.
- Áreas secas y mojadas en el dominio computacional: planicies de marea e inundación.
- Arrastre y difusión de trazadores por corrientes. Incluye términos de creación y decaimiento.
- Seguimiento de partículas y cálculo de derivadores lagrangianos.

## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas

- Tratamiento de singularidades: presas, diques, alcantarillas, etc.
- Rompimiento de diques.
- Fuerzas de arrastre creadas por estructuras verticales.
- Porosidad.
- Corrientes inducidas por el oleaje (Se debe acoplar al módulo ARTEMIS o TOMAWAC).
- Transporte de sedimentos (Se debe acoplar al módulo SISYPHE).
- Calidad del agua (se debe acoplar al módulo WAQ).

**TOMAWAC** es el módulo para modelar la propagación del oleaje en áreas costeras. Es un modelo espectral de 3ra generación, el cual incorpora los siguientes fenómenos físicos:

- Olas generadas por el viento
- Refracción por fondo
- Refracción por corrientes
- Disipación por rompimiento de ola por fondo
- Disipación por rotura de olas a contracorriente

En cada punto de la malla computacional, TOMAWAC calcula la siguiente información:

- Altura de ola significativa
- Frecuencia media de la ola
- Dirección media de la ola
- Frecuencia de ola peak
- Corrientes inducidas por olas
- Estrés por radiación

Telemac-Mascaret fue desarrollado inicialmente por el Laboratorio Nacional de Hidráulica y Medio Ambiente (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement - LNHE) y la Dirección de Desarrollo de la Junta de Electricidad de Francia (EDF-R&D), y ahora es administrado por un consorcio de las siguientes organizaciones : Artelia (anteriormente Sogreah, Francia), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Alemania), Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA, Francia), Daresbury Laboratory (Estados Unidos Unido), Electricité de France R&D (EDF, Francia) y HR Wallingford (Reino Unido).

## 4.2 Configuración del modelo

A continuación, se presentan las características más importantes del modelo hidrodinámico, y del modelo de generación y propagación de oleaje.

## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas

### 4.2.1 Batimetría

La información topo-batimétrica del lago Llanquihue se obtuvo de la carta náutica digitalizada del Lago Llanquihue elaborada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) (Figura 6). Esta se complementó con información de detalle de la costa de la Bahía de Puerto Varas proporcionada por la Dirección de Obras Portuarias (DOP) del MOP (Figura 7).

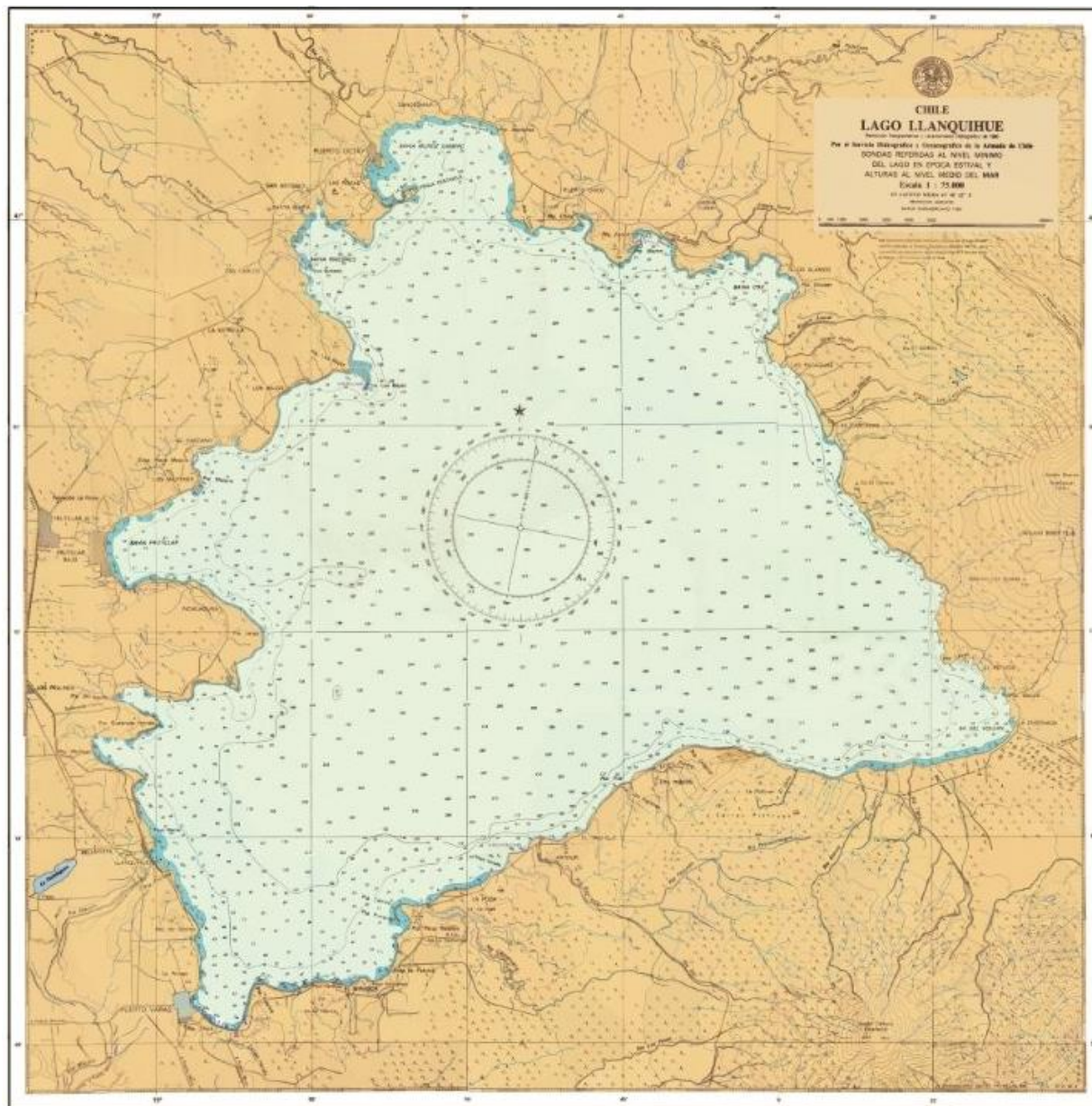
### 4.2.2 Dominio, malla y modelo de elevación digital

Utilizando la información topo-batimétrica recopilada, se definió el dominio y malla de simulación, los cuales corresponden al lago Llanquihue completo discretizado en elementos y nodos espaciados con una resolución máxima de 10 m en el área de interés y en profundidades bajas (donde se esperan velocidades promedio en la columna de agua máximas); y una resolución mínima de 600 m en las zonas de máxima profundidad (donde se esperan velocidades promedio en la columna de agua pequeñas). Luego, se asignó cotas de la forma del fondo lacustre a los nodos de la malla utilizando el método de interpolación *inverse distance weighting*, creando así el modelo de elevación digital (DEM) utilizado en las simulaciones.

El dominio, malla y DEM de modelación desarrollados para este estudio y utilizados por ambos módulos del software Telemac-Mascaret (Telemac 2D y Tomawac) se presentan en la Figura 8.



## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas



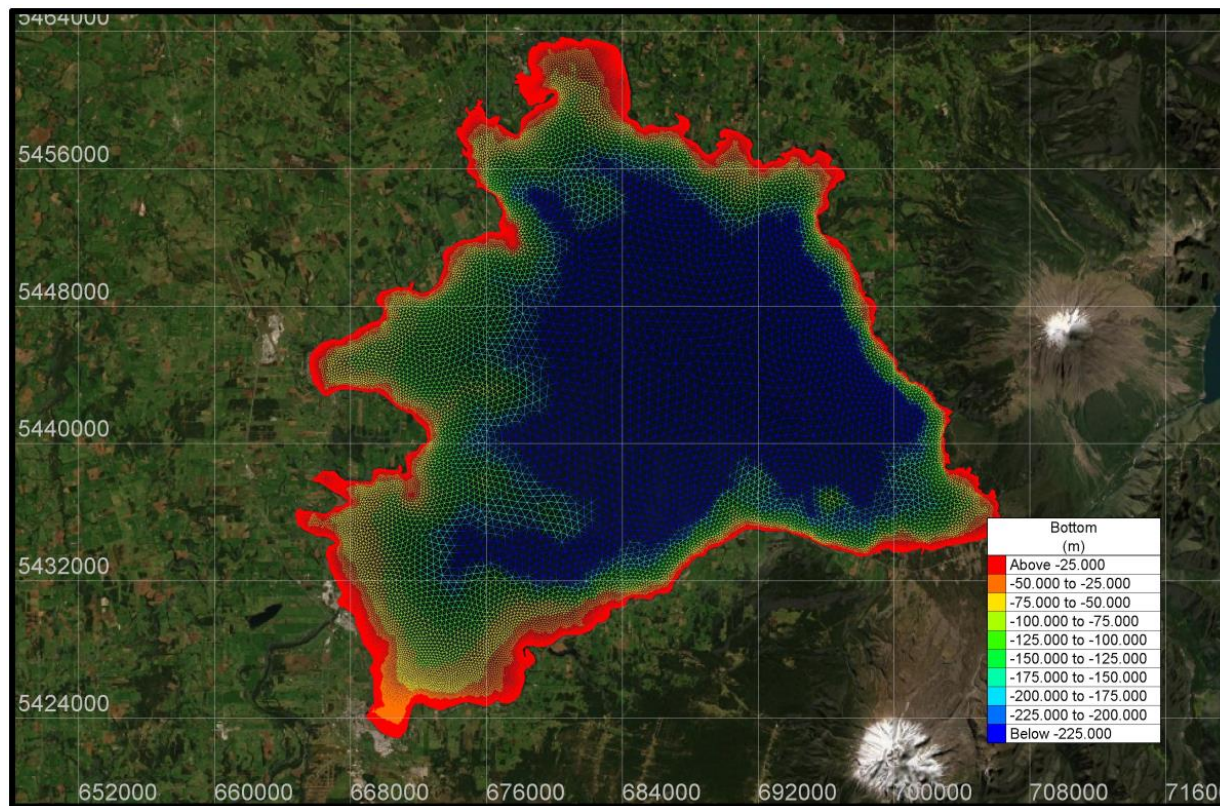
**Figura 6: Carta náutica del Lago Llanquihue**

*Fuente: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA)*





## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas



**Figura 8: Dominio, malla y DEM de modelación.**

Fuente: *Elaboración propia*

### 4.2.3 Parámetros de configuración

La Tabla 3 presenta los principales parámetros de configuración de los módulos Telemac y TOMAWAC. El detalle de cada parámetro está disponible en los manuales de Telemac-Mascaret.

## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas

**Tabla 3: Parámetros de configuración de los módulos del modelo hidrodinámico y propagación de oleaje.**

Parámetro de configuración	Modulo	
	TELEMAC 2D	TOMAWAC
Discretización temporal	5 segundos	60 segundos
Acoplamiento	TOMAWAC - 60 segundos	-
Fricción de fondo	Según Strickler / coeficiente = 40	Según Hasselmann / Coeficiente por defecto
Condición inicial	Sin corrientes	Sin oleaje
Resultados	Superficie libre y velocidad de corrientes cada 10 minutos (1 minuto para escenario TS).	Altura significativa, dirección media, periodo medio, periodo peak cada 1 hora.
		Frecuencia mínima = 0.1
Otros	Considera efecto de Coriolis	Número de frecuencias = 28
	Modelo de turbulencia según Spalart-Allamaras	Frecuencia máxima = 4.35
		Numero de direcciones = 36

Fuente: *Elaboración propia*

### 4.3 Escenarios a modelar

En el Capítulo 4 se identificaron 5 escenarios relevantes para la modelación. Los escenarios corresponden a condiciones medias (percentil 50) e intensas (percentil 99) provenientes de las direcciones Norte y Sur, además de una serie de tiempo de un caso real de descarga al lago ocurrido en febrero de 2022. Un resumen de estos escenarios se presenta en la Tabla 2-1.

**Tabla 4: Escenarios de viento para simulación**

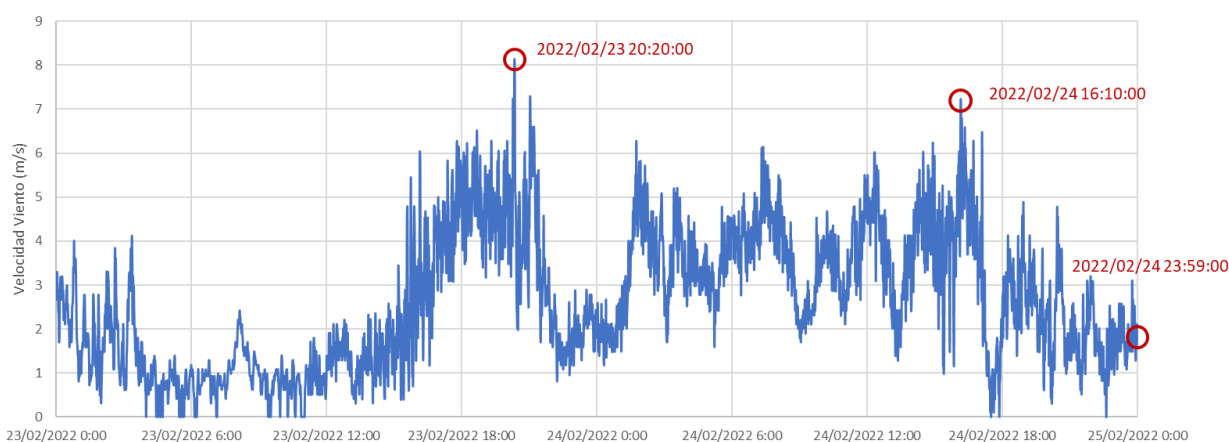
Viento			
Nombre Escenario	Dirección (°)	Intensidad (m/s)	Observación
N1	Norte	2,57	Constante hasta alcanzar estado estacionario
N2	Norte	10,79	Constante hasta alcanzar estado estacionario
S1	Sur	3,08	Constante hasta alcanzar estado estacionario
S2	Sur	7,71	Constante hasta alcanzar estado estacionario
TS	Según serie de tiempo	Dos días de simulación: 23/02/2022 00:00 al 25/02/2022 00:00	

Fuente: *Elaboración propia*

## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas

### 4.4 Resultados

A continuación se describen los principales resultados de las modelaciones. En el Anexo 1 se adjunta la cartografía en PDF para cada escenario. Para los escenarios N1, N2, S1 y S2 los resultados presentados se obtuvieron del ultimo registro del modelo, al cuarto día de simulación, para representar un estado estacionario. Para verificar el estado estacionario, se comparó dicho resultado con el promedio de los últimos 10 registros del modelo. Para el escenario TS (serie de tiempo) se presentan 3 instantes: (1) 2022/02/23 20:20; (2) 2022/02/24 16:10; y (3) 2022/02/24 23:59, los que corresponden respectivamente a 2 peaks de intensidad del viento y al último instante de simulación, tal como muestra la Figura 9.



**Figura 9: Serie de tiempo de la velocidad del viento usada como forzante de simulación en el escenario TS e instantes para presentación de resultados.**

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.4.1 Altura de ola

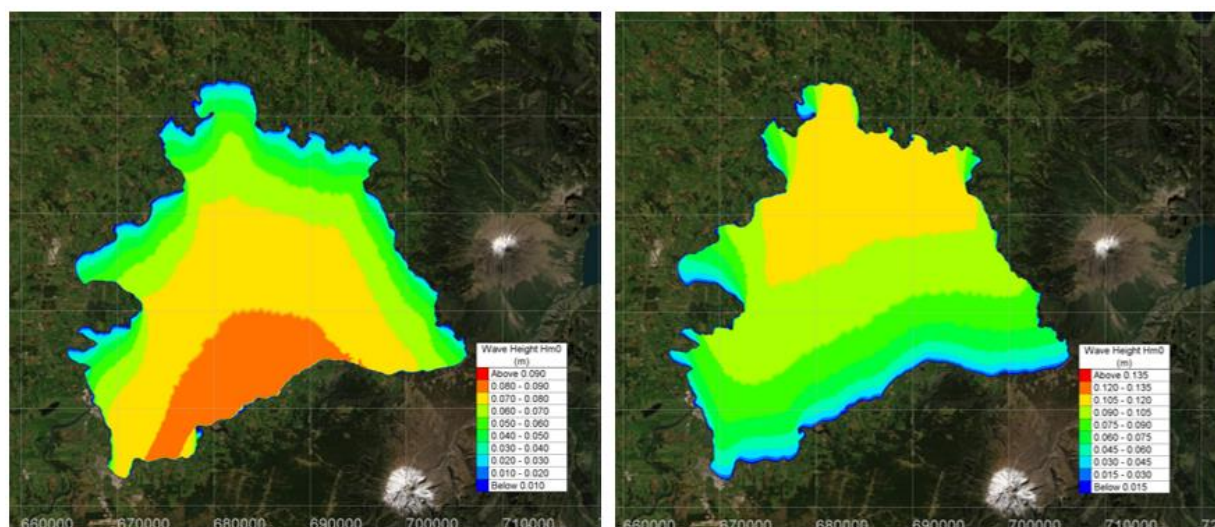
La Bahía de Puerto Varas está expuesta al norte, con un Fetch (distancia sobre la cual sopla el viento para generar oleaje) de aproximadamente 40 km, por lo cual los eventos de viento norte son capaces de generar un oleaje mayor en la bahía que el viento sur. La Figura 10 y Figura 11 muestran la altura de ola resultante en el lago para las intensidades medias e intensas de viento en ambas direcciones. La Tabla 5 muestra la altura de ola significativa en un nodo al interior de la bahía para las distintas condiciones.

En el caso del viento norte, la altura de ola significativa (correspondiente al promedio del tercio superior de las olas) es superior a 1 m para el caso de viento intenso, pero la distribución de alturas al interior de la bahía muestra que hay sectores más expuestos, como el caso de Puerto Chico, y sectores más abrigados, como el sector sur poniente, cercano al aliviadero de tormenta de la PEAS de Essal (Figura 12). Para el caso del viento sur se observa cómo la altura de ola aumenta hacia afuera de la bahía (Figura 13).



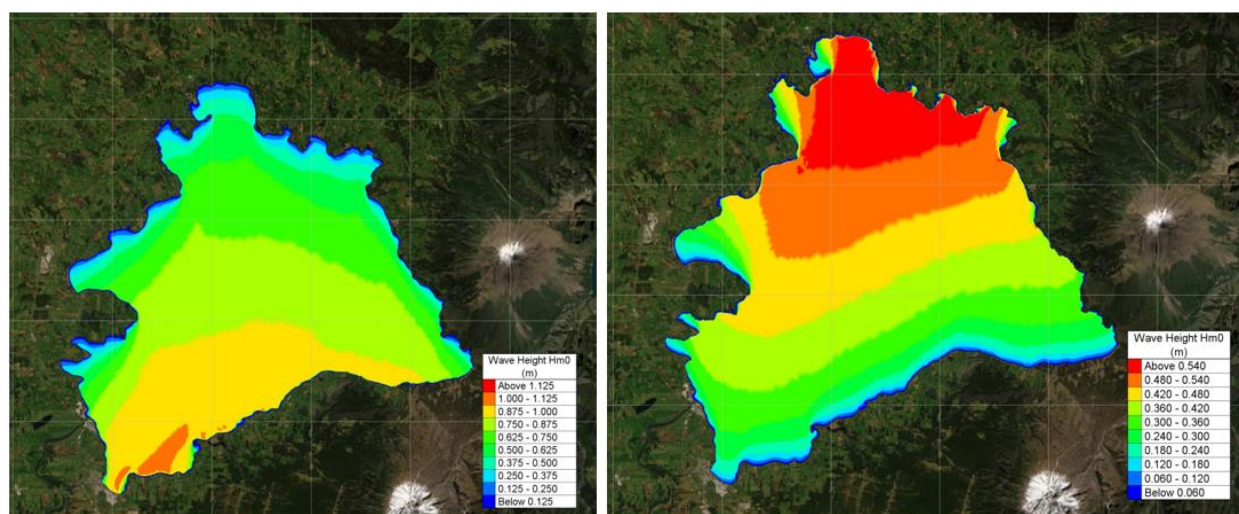
## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas

El resultado de la modelación de la serie de tiempo para el evento de febrero de 2022 (Caso TS) muestra oleaje casi nulo, menor a los 3 cm, lo que se condice con lo observado en la Figura 4. Dicho resultado se muestra en el Anexo.



**Figura 10:** Altura de ola resultante para los casos de viento medio: N1 (panel izquierdo) y S1 (panel derecho). Notar que la escala de color es distinta para cada figura.

Fuente: *Elaboración propia*



**Figura 11:** Altura de ola resultante para los casos de viento intenso: N2 (panel izquierdo) y S2 (panel derecho). Notar que la escala de color es distinta para cada figura.

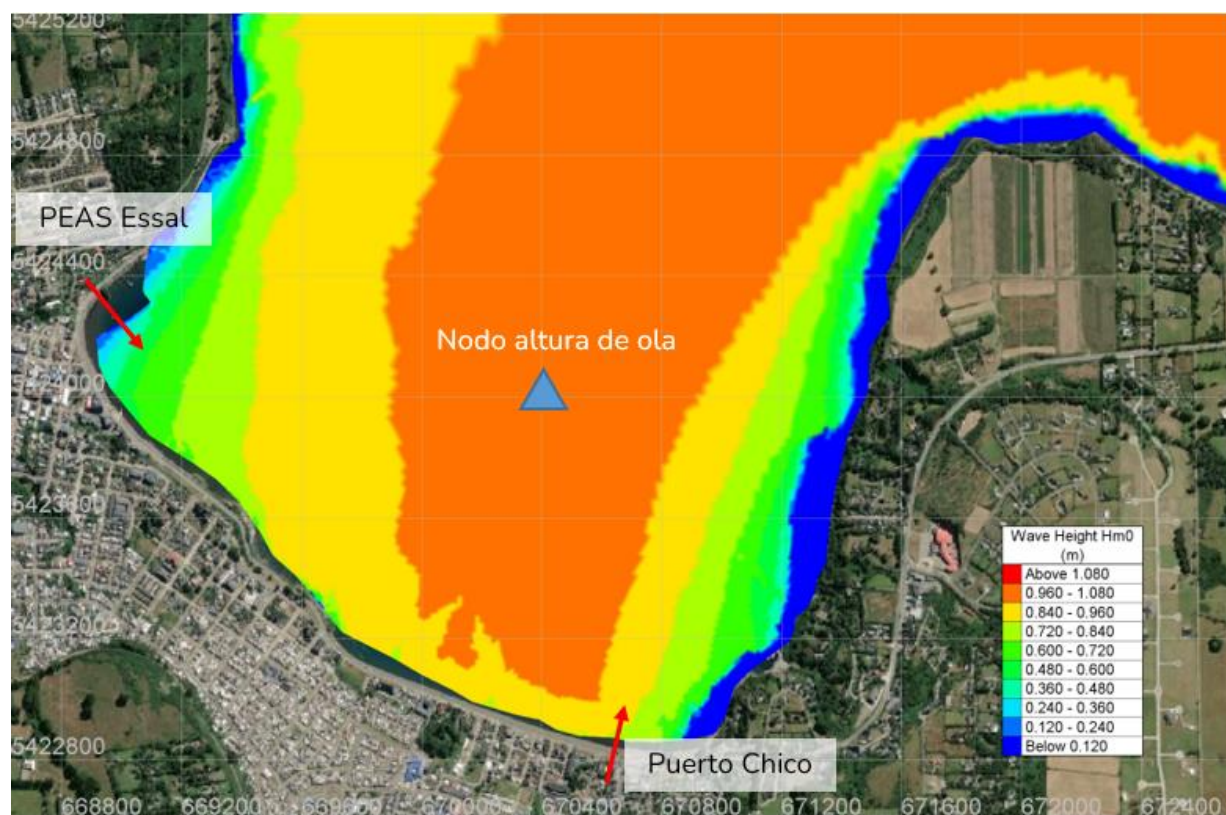
Fuente: *Elaboración propia*

## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas

**Tabla 5: Altura de oleaje en un punto ubicado al interior de la Bahía de Puerto Varas (5.424.000 N; 670.400 E; UTM 18S WGS-84) para los distintos escenarios.**

Nombre Escenario	Viento			Altura de ola significativa (m)
	Dirección (°)	Intensidad (m/s)		
N1	Norte	2,57		0,07 – 0,08
N2	Norte	10,79		0,96 – 1,08
S1	Sur	3,08		0,04 – 0,05
S2	Sur	7,71		0,18 – 0,20

Fuente: Elaboración propia

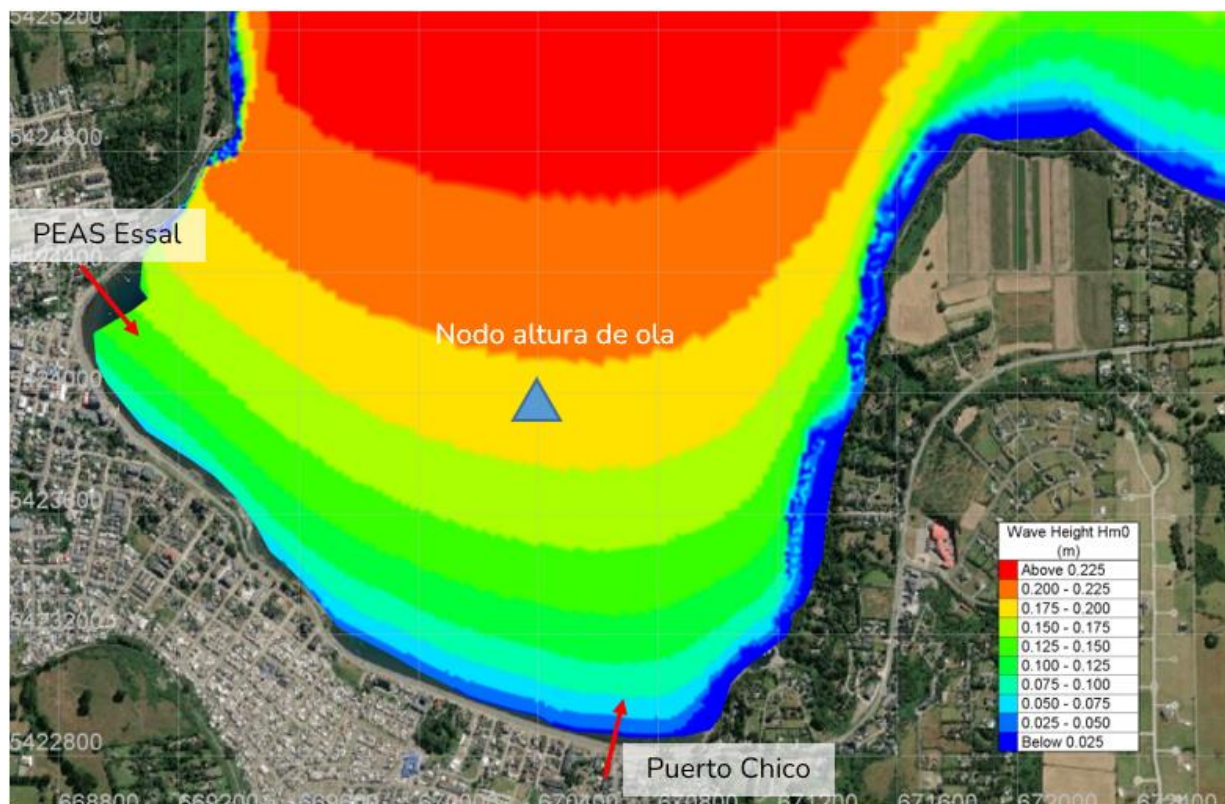


**Figura 12: Altura de ola resultante al interior de la Bahía de Puerto Varas para la condición de viento norte intenso (Caso N2). Las flechas muestran dos zonas de descarga hacia el lago.**

Fuente: Elaboración propia



## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas



**Figura 13:** Altura de ola resultante al interior de la Bahía de Puerto Varas para la condición de viento sur intenso (Caso S2). Las flechas muestran dos zonas de descarga hacia el lago.

Fuente: Elaboración propia

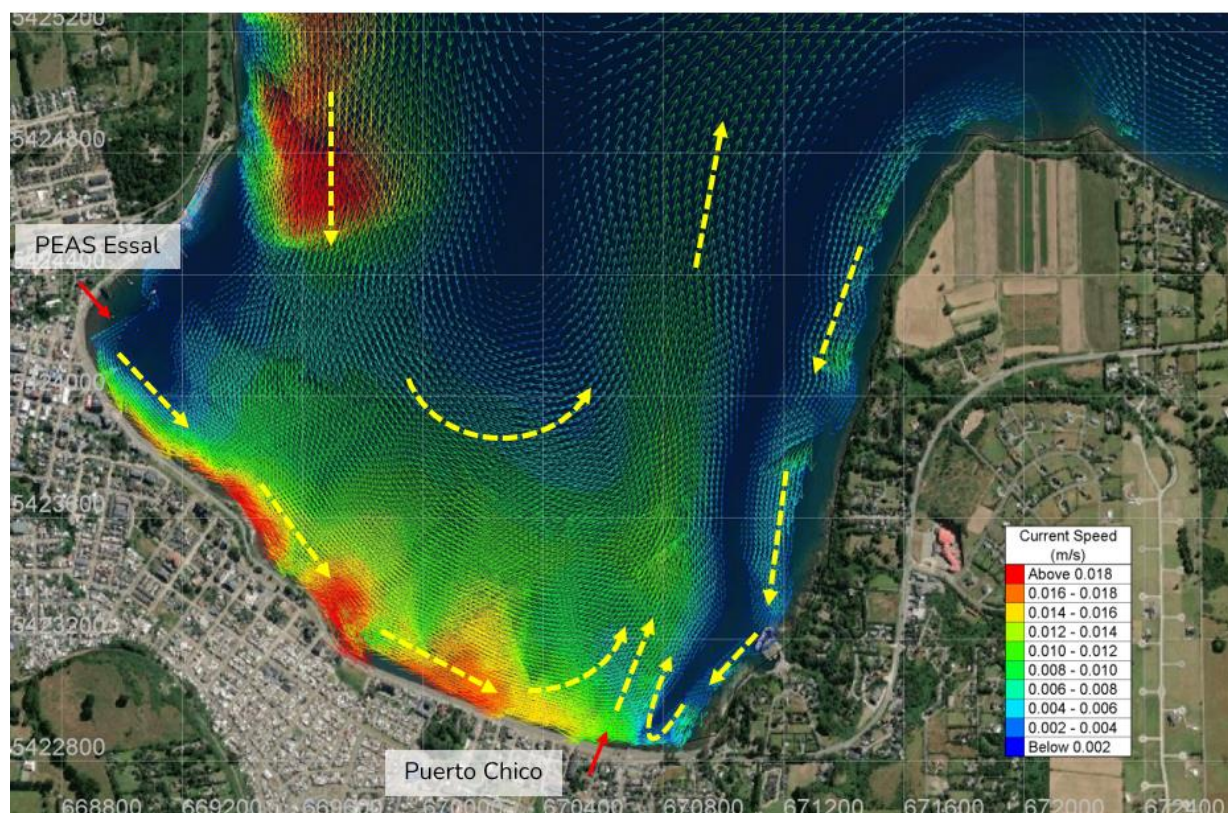
### 4.4.2 Corrientes

Las corrientes en la Bahía de Puerto Varas presentan dos patrones distintos según la dirección de viento modelada (norte o sur). La dirección de estas corrientes no cambia significativamente entre el escenario de velocidad media y el escenario de velocidad intensa para una misma dirección del viento, pero sí cambia la velocidad. Debido a esto, a continuación se comentan los resultados para las condiciones medias, enfocándose en el patrón de corrientes más que en la intensidad. Los resultados completos se presentan en los Anexos.

En el caso del viento norte, condición que está presente el 47% del tiempo (Tabla 1), el patrón de corrientes corresponde al mostrado en la Figura 14. Como se puede apreciar, la bahía presenta un patrón de circulación general con corrientes que entran por los bordes de la bahía y retornan por el centro. Se produce una corriente longitudinal de poniente a oriente en casi todo el borde costero de Puerto Varas, que comienza cerca de la PEAS de Essal y termina a la altura de Puerto Chico. En Puerto Chico se juntan dos corrientes litorales que salen luego con dirección al norte hacia afuera de la bahía. Las mayores velocidades se producen cerca de la costa, producto de los tensores de radiación producidos por la rotura del oleaje en el

## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas

modelo. El sector de la PEAS de Essal, debido a su condición abrigada, presenta velocidades cercanas a cero. Este mismo patrón pero con mayores velocidades se observa para el Caso N2, el cual se muestra en el Anexo.



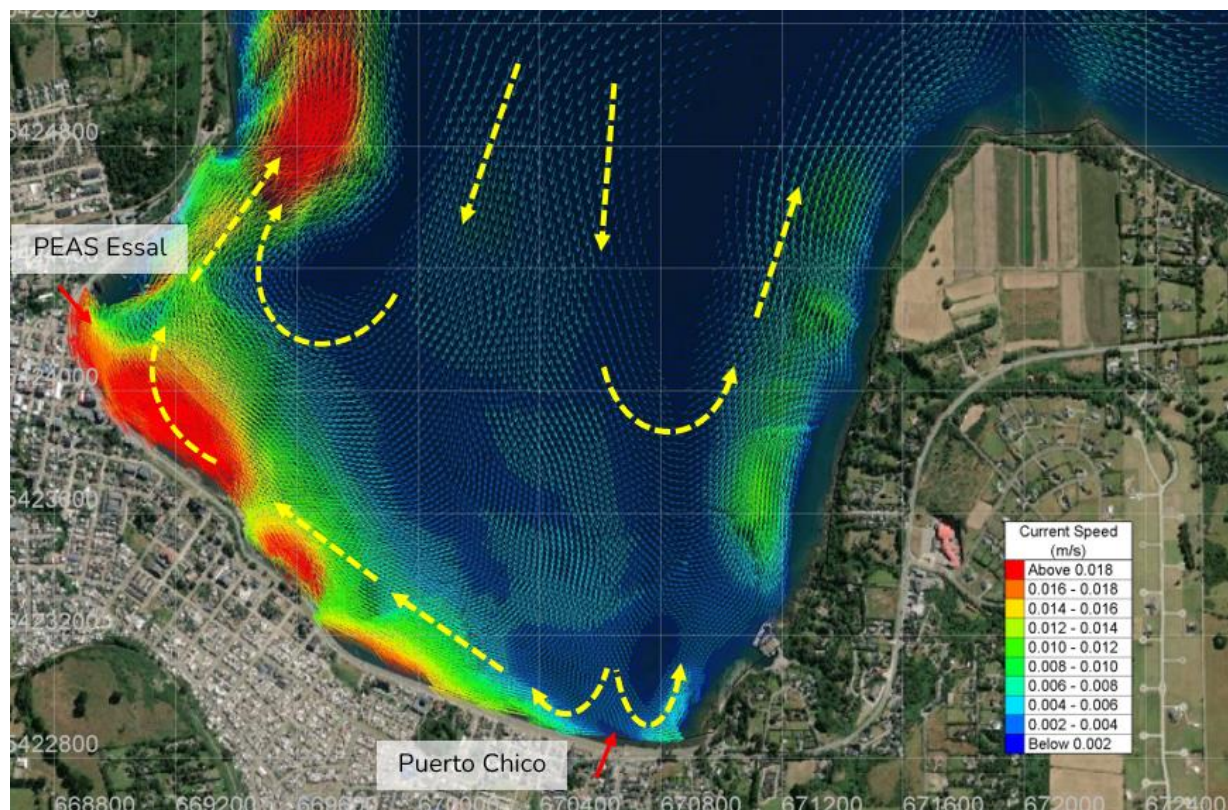
**Figura 14: Patrón de corrientes al interior de la Bahía de Puerto Varas para la condición de viento norte media (Caso N1). Las flechas rojas muestran dos zonas de descarga hacia el lago. Las flechas amarillas muestran de modo grueso la dirección de las corrientes.**

*Fuente: Elaboración propia*

El patrón de corrientes para la condición media de viento sur (Caso S1) presenta direcciones casi opuestas al caso de viento norte. En este caso, el patrón general muestra corrientes que ingresan por el centro de la bahía y retornan por los bordes hacia afuera. La corriente en el sector de Puerto Chico es más baja que en el caso norte, y se divide en una corriente litoral hacia el poniente, que atraviesa todo el borde costero de Puerto Varas, y otra corriente litoral con dirección hacia el norte. En este caso la corriente en el sector de la PEAS de Essal es mayor que en el caso norte, y toma una dirección hacia el nororiente. Al igual que en el caso del viento norte, las mayores corrientes se producen en la costa producto de la rotura del oleaje. El Caso S2 es similar, pero con mayores velocidades (ver Anexo).



## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas



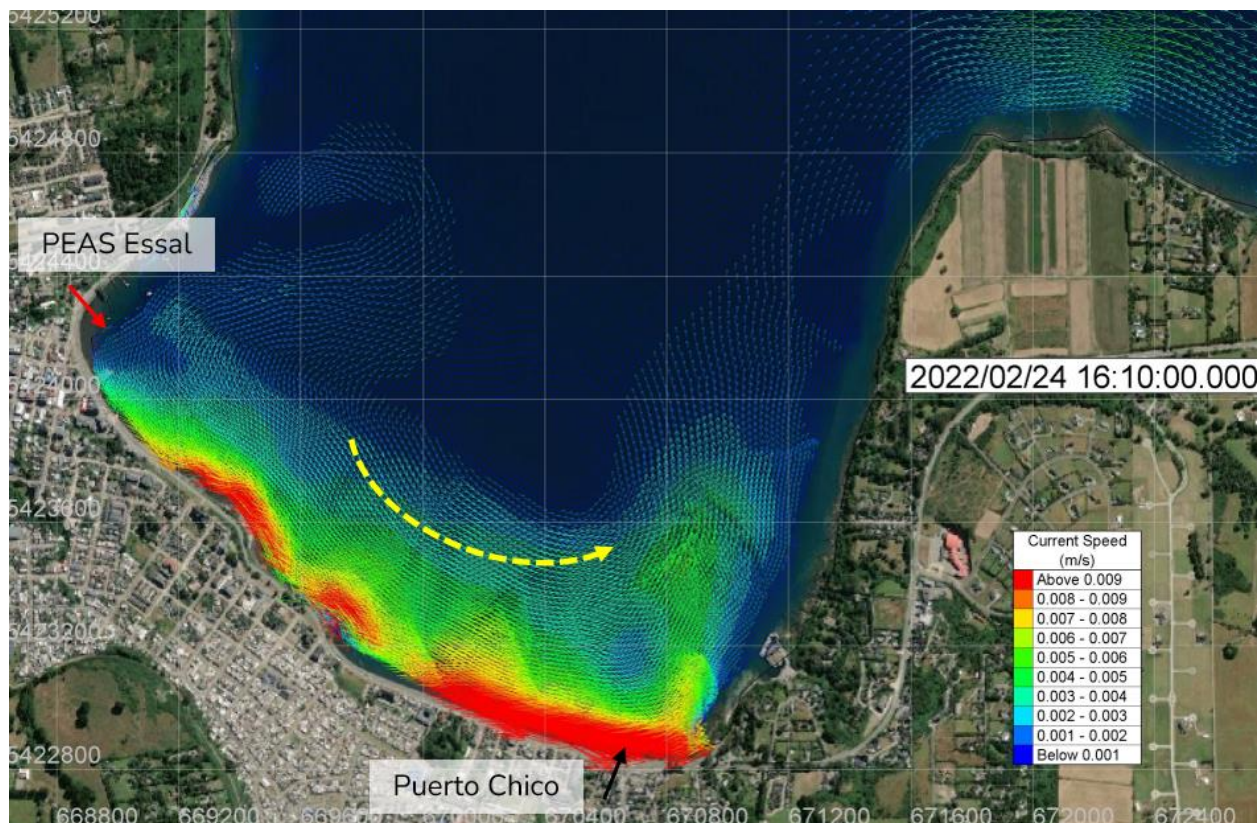
**Figura 15: Patrón de corrientes al interior de la Bahía de Puerto Varas para la condición de viento sur media (Caso S1). Las flechas rojas muestran dos zonas de descarga hacia el lago. Las flechas amarillas muestran de modo grueso la dirección de las corrientes.**

*Fuente: Elaboración propia*

Para la serie de tiempo del evento de febrero de 2022 (Caso TS) las corrientes exhiben un patrón similar en casi todo el tiempo de simulación producto de la predominancia del viento NE. La circulación en este caso es en sentido antihorario, con una corriente litoral que va de poniente a oriente desde la PEAS de Essal y luego hacia el norte desde Puerto Chico (Figura 16). Las intensidades de la corriente son menores a 1 cm/s, con su máximo en el borde costero producto de la rotura del oleaje.



## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas



**Figura 16:** Patrón de corrientes al interior de la Bahía de Puerto Varas en un instante de viento NE de la serie de tiempo entre los días 23 y 24 de febrero de 2022 (Caso TS). La flecha amarilla muestra de modo grueso la dirección de las corrientes.

Fuente: *Elaboración propia*

### 4.5 Discusión

A pesar de que no se modeló directamente la dispersión de contaminantes, los resultados dan una buena idea de la dirección que tomarían las descargas de contaminantes en el borde costero. Esto puede ayudar a definir, por ejemplo, la mejor ubicación para un aliviadero de tormenta, a rastrear posibles fuentes de contaminación al interior de la bahía o a predecir los efectos de una descarga de contaminantes.

Los eventos de descarga de aguas servidas al lago producto de la activación del aliviadero de tormenta de la PEAS debieran ocurrir en teoría durante episodios de tormenta, cuando las aguas lluvia ingresan al sistema de aguas servidas y colapsan la capacidad de la planta elevadora. Dichos episodios de tormenta están por lo general asociados a condiciones de viento norte. Por otra parte, la dirección de viento predominante en la zona es el viento norte, con un 47% de los casos (Tabla 1), lo cual aumenta a un 56% si se suman los casos del NE y NO. Dado que casi la mitad del tiempo la dirección predominante del viento es del norte, y que en la mayoría de las tormentas con riesgo a tener que utilizar el aliviadero de la PEAS

## Estudio hidrodinámico para la calidad del agua en la Bahía Puerto Varas

la dirección norte es la que predomina, es importante evaluar si la ubicación actual del aliviadero es la adecuada desde el punto de vista hidrodinámico para esta condición de viento.

Como se puede apreciar en los resultados, la PEAS y el aliviadero de tormenta están ubicados en una zona abrigada del oleaje norte, con poca turbulencia y en teoría poca dispersión y mezcla de contaminantes. Adicionalmente, la dirección de la corriente litoral para los eventos de viento norte va desde la PEAS hacia el suroriente, llevando los posibles contaminantes directamente hacia la playa contigua o incluso más allá, dependiendo de los efectos de dispersión y sedimentación no modelados en el presente estudio.

En el caso de eventos de viento sur, por lo general asociados a buen tiempo en la zona, el sector de la PEAS y el aliviadero de tormenta tiene mayor circulación de corriente y el movimiento de los contaminantes es hacia el norte, alejándolos del sector de playa. Esto podría ser favorable, considerando que la playa contigua ubicada al suroriente es utilizada para el baño en condiciones de buen tiempo, donde predomina el viento sur, pero a su vez afecta a quienes practican deportes de vela justamente al norte de la descarga con condiciones de viento sur. A pesar de esto, los eventos de descarga con condiciones de viento sur debieran ser escasos, ya que rara vez vienen acompañados de precipitación.

## 5 CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como objetivo estudiar los patrones de circulación de corrientes al interior de la Bahía de Puerto Varas con el fin de estimar de manera indirecta la propagación de posibles contaminantes al interior de la bahía. A continuación se resumen los principales resultados:

- Las principales forzantes hidrodinámicas dentro de la Bahía de Puerto Varas son el viento y el oleaje.
- La estadística de vientos, calculada a partir de una base de datos histórica de la estación El Tepual, muestra que la dirección predominante del viento es la norte (47% de los casos), seguido de la sur (16% de los casos).
- Para la modelación hidrodinámica se consideraron ambas direcciones (norte y sur) e intensidades de viento media (percentil 50) e intensas (percentil 99) para cada una. Adicionalmente, se modeló una serie de tiempo basada en un caso de descarga ocurrida en febrero de 2022.
- El modelo utilizado fue el Telemac – Mascaret, con sus módulos TELEMAC2D para el estudio de la hidrodinámica y TOMAWAC para estimar las condiciones de oleaje a partir del viento.
- La Bahía de Puerto Varas muestra dos patrones de circulación distintos para las condiciones de viento norte y sur. La intensidad del viento solo cambia la velocidad de las corrientes, pero se mantienen los patrones más o menos parecidos.
- A pesar de que no se modeló directamente la dispersión de contaminantes, los resultados dan una buena idea de la dirección que tomarían las descargas de contaminantes en el borde costero. Esto puede ayudar a definir, por ejemplo, la mejor ubicación para un aliviadero de tormenta, a rastrear posibles fuentes de contaminación al interior de la bahía o a predecir los efectos de una descarga de contaminantes.
- El patrón de circulación para la condición de viento norte debiera ser el más relevante para definir la mejor ubicación de un aliviadero de tormenta, pues es esta condición la que más predomina y en la que usualmente ocurren las precipitaciones capaces de colapsar el sistema de aguas servidas.

## 6 REFERENCIAS

Abarca, Javiera (2018). “Modelación hidrodinámica del Lago Llanquihue”. *Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente hídrico*. Universidad de Chile.

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada [SHOA] (2019). Pub. 3201: Instrucciones oceanográficas N°1. 4ª Edición.

Winckler, Patricio (2021). “Guía para el modelado de la hidrodinámica y del proceso de mezcla de descargas salinas y térmicas asociadas a proyectos de plantas termoeléctricas y desalinizadoras” Universidad de Valparaíso.