



X SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DEL EMISARIO DE LOMA LARGA, VALPARÁISO. PARTE I: MODELACIÓN HIDRODINÁMICA PARA LOS AÑOS ENTRE EL 2017 Y 2022.

**MATÍAS QUEZADA LABRA¹ FELIPE GALAZ GALLARDO² PIA MONREAL DONOSO³ MARCELO
GAETE NÚÑEZ⁴ PABLO DIAZ PICCARDO⁵**

RESUMEN

Las condiciones hidrodinámicas entre el año 2017 y 2022 son representadas mediante simulación numérica tridimensional con el Modelo Mike 3 FM, el cual fue previamente calibrado en base a la comparación estadística con mediciones realizadas en dos puntos cercanos a la zona de estudio, los que al estar en distintas profundidades permitieron verificar si el modelo es capaz de capturar de manera adecuada la información de las corrientes.

Los resultados obtenidos de la modelación numérica permitieron visualizar que las corrientes se dirigen preferentemente hacia el Sur, con leves fluctuaciones hacia el norte, no mostrando una respuesta estrictamente mareal. Adicionalmente, un patrón estadístico fue detectado en las direcciones de corriente, que mostraron comportamientos cíclicos trianuales en lo relativo al valor medio y los percentiles 25% y 75%.

Los resultados obtenidos en el estudio mostraron la importancia de considerar ventanas de tiempo extensas en la representación de la hidrodinámica para detectar comportamientos cíclicos de las corrientes.

¹ Gerente, SGS consultoría y modelación ambiental. mquezada@ecotecnos.cl o Matias.Quezada@sgs.com.

² Jefe de proyectos, SGS consultoría y modelación ambiental. fgalaz@ecotecnos.cl o Felipe.Galaz@sgs.com.

³ Jefa de Modelación Ambiental, SGS consultoría y modelación ambiental. pmonreal@ecotecnos.cl o Pia.Monreal@sgs.com.

⁴ Subgerente de saneamiento, ESVAL. mgaete@esval.cl.

⁵ Ingeniero de tratamiento físico, ESVAL. pdiazp@esval.cl.

1 INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la modelación numérica tridimensional de procesos oceánicos, existen diversos desafíos que se deben resolver. Entre ellos, se encuentra el determinar las características hidrodinámicas del cuerpo de agua, lo cual es complejo, debido a los diversos factores forzantes que modulan los procesos de transporte y mezcla, alterando tanto la temperatura, como concentración de todos los compuestos que puedan existir en él.

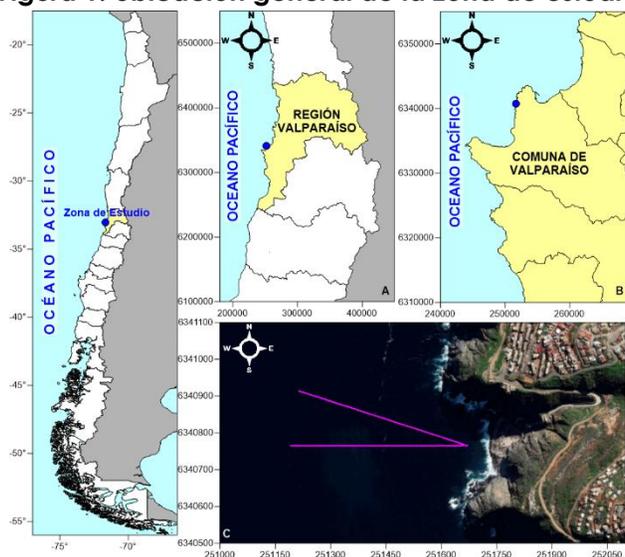
Los agentes que inducen la circulación oceánica son diversos, con mayor influencia de unos por sobre otros, dependiendo de la cercanía que exista con la costa y la profundidad de la columna de agua en que se evalúe. Algunas de las forzantes más importantes son: La marea, el viento, las diferencias de presión, características termodinámicas de la atmósfera, variaciones de densidad, entre otras.

La compleja interacción de todos estos fenómenos, generan el campo de corrientes sobre el que eventualmente se pueden descargar efluentes industriales, que luego son transportados desarrollando plumas que se desplazan hacia diferentes puntos de la costa. Por lo anterior, resulta de interés ambiental conocer su comportamiento tridimensional, es decir, cómo es la interacción de este vertimiento en la vertical y en la horizontal, en un mismo instante de tiempo tanto en escalas de mezcla turbulenta como advectiva.

Basado en lo anterior es que resulta fundamental caracterizar de manera adecuada el comportamiento hidrodinámico en el cual se puede realizar una eventual descarga de residuos líquidos, para cada determinada zona de estudio.

En este caso particular, el sector de estudio se encuentra ubicado en el sector de Loma Larga, Región de Valparaíso, de acuerdo a lo indicado en la Figura 1, lugar en el cual se encuentra operando desde 1999 el Emisario de Loma Larga de la empresa Esval, para el cual se ha desarrollado un estudio ambiental compuesto de dos partes: Estudio Hidrodinámico y Estudio de Comportamiento de la Pluma de Coliformes, siendo presentada en la presente publicación lo relativo a la primera componente.

Figura 1: Ubicación general de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 MATERIALES

Para abordar el estudio se han empleado un conjunto de datos de campo y modelos numéricos, los que son descritos de manera breve a continuación.

2.1.1 INFORMACION DE CAMPO DISPONIBLE

2.1.1.1 Campaña de campo de oceanografía física

Durante el año 2023, se desarrollaron trabajos de campo con el propósito de levantar información de diversa índole donde los siguientes parámetros que fueron empleados en la modelación numérica: Correntometría, oleaje local y batimetría exploratoria; registrados en dos puntos que se indican en rojo en la Figura 2.

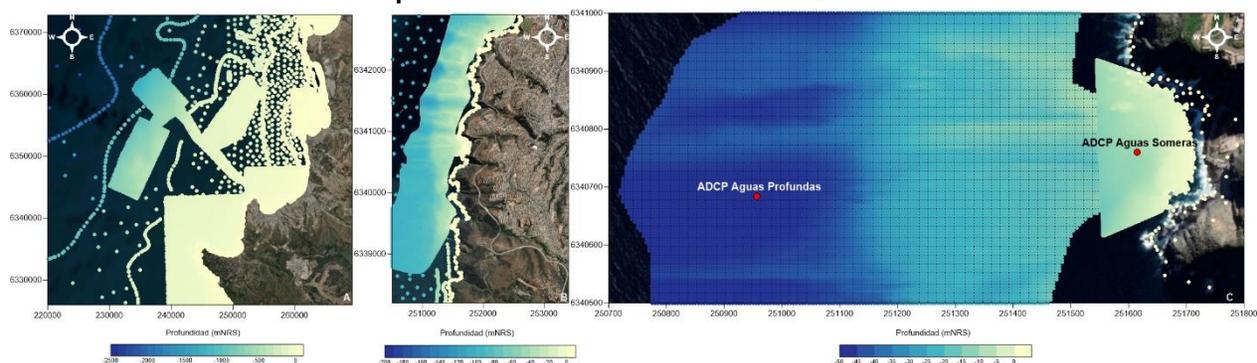
2.1.1.2 Base batimétrica empleada

Para la construcción del dominio numérico se consideró la información batimétrica del SHOA provista en las cartas, así como también de levantamientos batimétricos de detalle y exploratorios de la zona de estudio, tal como se menciona a continuación:

- SHOA N° 4000 Bahía Coquimbo a Bahía Valparaíso.
- SHOA N° 4320 Bahía Quintero a Bahía Valparaíso.
- SHOA N° 4322 Bahía Con-Con
- SHOA N° 5100 Punta Pite a Punta Topocalma y Puertos Adyacentes
- SHOA N° 5111 Bahía y Puerto Valparaíso.
- SHOA N° 5112 Punta Ángeles a Rada de Quintay.
- Batimetría exploratoria levantada por Ecotecnos.
- Batimetría de detalle levantada por Geomar y proporcionada por Esvál.

Cada una de estas bases de datos fue ensamblada para elaborar el modelo digital de terreno, conservando las sondas de las batimetrías más recientes por sobre las más antiguas (en aquellas zonas de traslape), a modo de incorporar posibles efectos de variaciones del lecho por transporte de sedimentos (sedimentación/erosión). En la Figura 2 se presentan la distribución espacial de los datos batimétricos disponibles para este estudio.

Figura 2: Datos batimétricos empleados en la construcción del modelo digital de terreno y puntos de medición mediante ADCP.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

2.1.2.1 MIKE21 SW: Módulo de Oleaje

MIKE 21 SW (Spectral Waves), incluye una nueva generación de modelos espectrales Viento-Ola basado en mallas no estructuradas. El modelo simula el crecimiento, decaimiento y transformación de las olas generadas por viento (Sea) y las de mar de fondo (Swell) fuera de la costa (offshore) y en zonas costeras. Para más información se sugiere revisar el manual del modelo⁶, el documento científico⁷ y/o su página de ayuda⁸.

2.1.2.2 MIKE3 FM: Módulo Hidrodinámico

Mike 3 Flow Model FM, es un modelo tridimensional que tiene aplicaciones en ambientes oceanográficos, costeros y con estuarios. El módulo hidrodinámico se basa en la solución numérica de las ecuaciones tridimensionales de Navier Stokes, promediada por Reynolds bajo los supuestos de Boussinesq y la presión hidrostática. Para más información sugerimos revisar el manual del modelo Mike 3 HD FM⁹ y/o la página de ayuda¹⁰.

2.1.3 BASES DE DATOS NUMÉRICAS Y MODELOS GLOBALES EMPLEADOS

2.1.3.1 HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model)

Los parámetros de salinidad y temperatura del océano empleados como forzantes del modelo numérico hidrodinámico, fueron obtenidos desde el modelo global HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) (Bleck, 2002), el que cuenta con valores diarios para estas variables a diversas profundidades ($\Delta z = 2$ m las primeras 6 capas) y en resoluciones horizontales de $1/12^\circ$. Para más información sugerimos revisar la página del modelo y su documentación asociada¹¹.

2.1.3.2 ECOWIND: Base de datos de hindcast de vientos

ECOWIND, es una herramienta in house que cuenta con las capacidades para generar forzantes atmosféricas como la velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, radiación solar y humedad relativa, entre otras variables. Para sus cálculos utiliza el modelo numérico Weather Research and Forecasting Model o WRF, que según lo descrito en Skamarock et al. (2019) es un modelo atmosférico diseñado para la investigación y la predicción numérica de la meteorología en dimensiones de meso y micro escala. La ejecución de este modelo numérico requiere la incorporación de información meteorológica proveniente de un modelo global, que para este estudio se optó por ocupar los datos del *Global Forecast System (GFS)*.

Finalmente, con las salidas del modelo WRF se generaron las forzantes atmosféricas, las que se representan de manera gráfica en la Figura 3, para un instante de tiempo cualquiera.

⁶ https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2023/Coast_and_Sea/MIKE21SW.pdf

⁷ https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2023/Coast_and_Sea/M21SW_Scientific_Doc.pdf

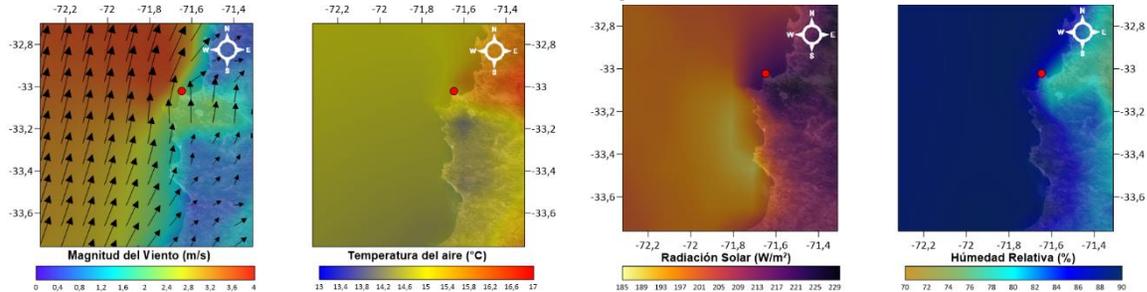
⁸ <http://doc.mikepoweredbydhi.help/webhelp/2023/FemInputEditorSW/index.htm>

⁹ https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/MIKE_FM_HD_3D.pdf

¹⁰ http://doc.mikepoweredbydhi.help/webhelp/2023/MIKE_FM_3D/index.htm

¹¹ <https://www.hycom.org/hycom/documentation>

Figura 3: Ejemplo de forzantes ECOWIND construidas para la modelación del emisario de Loma Larga.

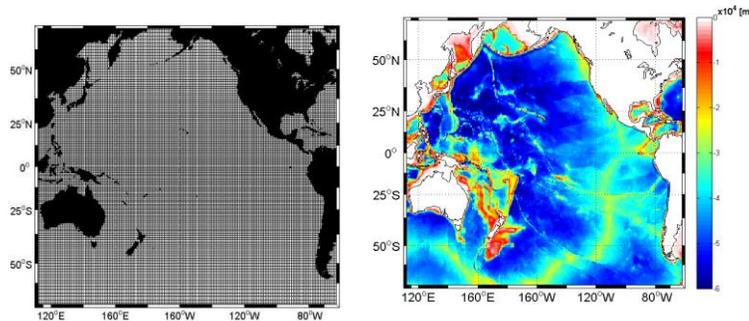


Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.1.3.3 ECOWAVES: Base de datos de hindcast de oleaje

En la actualidad Ecotecnos cuenta con una base de datos de elaboración propia de hindcast (Becerra, Quezada, & Díaz, 2022) que provee en su primera versión¹² los 40 años de estadística de oleaje en aguas profundas (1979-2019) la cual entrega espectros bidimensionales a lo largo de la costa de Chile, los que se obtuvieron a partir de modelos globales construidos sobre el dominio numérico ilustrado en la Figura 4. Para más información recomendamos revisar la publicación¹³.

Figura 4: Dominio numérico del modelo de oleaje global disponible para su uso.



Elementos rectangulares

Batimetría global

Fuente: Ecotecnos, 2022.

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 ASPECTOS GENERALES

La zona de estudio corresponde a un sector ubicado inmediatamente al sur de la bahía de Valparaíso específicamente a Loma Larga (Figura 1), la que se ubica al sur de Punta Ángeles y al norte de Laguna Verde. La estructura morfológica de Laguna Verde brinda un abrigo parcial al oleaje del tercer cuadrante, mientras que los frentes provenientes desde el cuarto cuadrante, ingresan de manera directa a la zona de estudio.

La circulación costera de un determinado sector depende principalmente de la profundidad del mar a la cual se realicen los análisis, ya que, a medida que se acerca a la zona de rompiente, la

¹² En la actualidad se encuentra actualizada hasta Junio de 2024.

¹³ <https://www.lajar.cl/index.php/rlajar/article/view/vol50-issue4-fulltext-2811/1609>

hidrodinámica comienza a depender fuertemente de las corrientes inducidas por oleaje, mientras que fuera de ella usualmente la marea, vientos y otros efectos sinópticos tienen una acción preponderante.

Del análisis preliminar y conceptual de la zona de estudio, se advierte que las forzantes que podrían adquirir un rol importante, son las siguientes:

- Mareas.
- Oleaje.
- Vientos.
- Otros efectos a escala sinóptica, por ejemplo, fortalecimiento de los campos de vientos en las zonas de generación del oleaje que llega a la costa de Chile debido a fenómenos interanuales como el ENOS (Becerra, 2017) y SAM fase positiva (Godoy, 2018). Estos efectos están contenidos en los campos globales de vientos superficiales y oleaje.

A continuación, se describe, de manera detallada, cada una de las actividades que se desarrollaron con el objeto de lograr el modelamiento propuesto.

2.2.2 MODELACION

2.2.2.1 Configuración general del modelo Numérico

El proceso de calibración del modelo Mike en su módulo hidrodinámico de Malla Flexible en 3 dimensiones (MIKE 3 FM), se realizó considerando el dominio numérico ilustrado en la Figura 5, el cual se aplicó indistintamente a cualquiera de los módulos indicados previamente.

El dominio numérico construido se compuso de 5.403 nodos y 10.214 elementos de cómputos, sobre los cuales se obtuvo la solución numérica de los diversos procesos simulados, abarcando desde los 2448 metros hasta los 0 metros de profundidad. La descripción de la vertical se realizó mediante 10 capas en coordenadas sigma, de las cuales se analizaron 3. Esto permite uniformar la profundidad sin deformar la solución del problema y describir de manera detallada en cada elemento, el comportamiento de las variables de estado en el eje z.

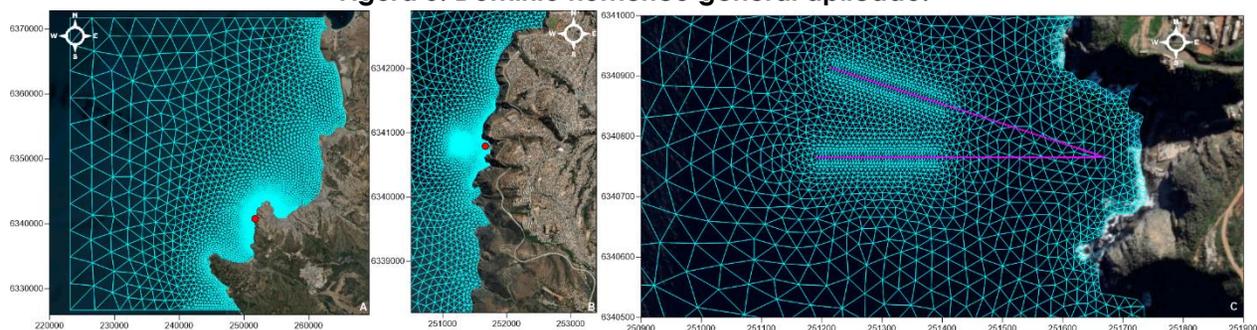
Este tipo de mallado en la vertical, permite definir oceanográficamente la capa de fondo, intermedia y superficial, las cuales numéricamente corresponden a las coordenadas sigma que describen la dinámica en el lecho (capa de fondo), a media columna de agua (capa intermedia) y en la superficie del mar (interfase entre atmósfera – océano).

Durante el proceso de calibración se empleó un paso de tiempo de $\Delta t = 600$ segundos y un número de iteraciones variable en función de una convergencia de 0,0001 metros para la determinación de la profundidad total (profundidad NRS + desnivelación). Las corridas se ejecutaron en un esquema de partida en frío (cold start), con un tiempo de estabilización de 2 días (288 time step) para forzantes de mareas y vientos, considerándose en esta publicación el caso de mayor éxito y omitiendo consecuentemente todas las iteraciones realizadas.

Conceptualmente y desde un punto de vista numérico una partida en frío significa que el dominio de modelación se encuentra sin agitación, es decir, todas las características hidrodinámicas son cero. Una vez que esta es forzada por mareas, vientos o cualquier otra variable, se necesita de un intervalo de tiempo para que el esquema numérico (modo de solución de las ecuaciones de

gobierno del fenómeno simulado) alcance un equilibrio y posteriormente comience a representar de manera adecuada las principales características de la hidrodinámica litoral.

Figura 5: Dominio numérico general aplicado.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

La calibración del modelo numérico se realizó mediante el empleo de la información proveniente de la campaña de campo ejecutada en el año 2023 y que tuvo cobertura temporal desde abril hasta mayo, centrándose la atención en esta publicación en las corrientes específicamente, comparando el comportamiento vertical y temporal de las componentes ortogonales U y V de la corriente, y estimándose la correlación y bias de los cuantiles, a modo de describir el comportamiento estadístico durante el periodo de registro, dado que el objetivo del modelo es reconstruir la historia hidrodinámica desde 2017 hasta 2022.

2.2.2.2 Explotación del modelo numérico

Una vez calibrado el modelo hidrodinámico, se simuló la circulación desde el año 2017 y hasta el 2022 bajo las consideraciones indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de las simulaciones hidrodinámicas realizadas en el estudio.

Año	Condición Oceanográfica ¹⁴	Variables incluidas	Tiempo simulado	Fuente
2017	Neutro	Oleaje, mareas, vientos, temperatura del mar, salinidad del mar, radiación solar, humedad relativa y temperatura ambiente.	Año completo cada 10 minutos	ECOWAVES SHOA ECOWIND HYCOM
2018	Neutro			
2019	Neutro			
2020	Neutro			
2021	Niña			
2022	Niña			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Con este set de casos simulados, se espera obtener características de la climatología de corrientes en la zona de estudio y no solamente determinar el probable comportamiento de un set de escenarios acotados.

¹⁴ https://psl.noaa.gov/enso/past_events.html

3 RESULTADOS

Cabe mencionar que las variables de viento, olas y desnivelación del nivel del mar, tuvieron su proceso de calibración, pero los resultados se centrarán en las corrientes, donde se presentará al caso con la mejor calibración y su posterior explotación.

3.1 CALIBRACIÓN: CORRIENTES

3.1.1 ADCP AGUAS PROFUNDAS

En la Figura 6, se muestra la comparación de las series de tiempo de perfil vertical de la componente U y V. Cada uno de estos recuadros se han construido de acuerdo a:

- **Recuadro superior:** Serie de tiempo del perfil vertical de velocidades registradas mediante el instrumento ADCP.
- **Recuadro inferior:** Serie de tiempo del perfil vertical de velocidades reproducidas por el modelo numérico en tres dimensiones.

En el caso de la componente U se logra apreciar que el modelo numérico captura de manera adecuada el comportamiento vertical y temporal, pues se puede advertir que en ambas representaciones gráficas se ilustran las intensificaciones de la velocidad, así como también las disminuciones de la magnitud de la componente analizada. Los resultados instrumentales mostraron una mayor variabilidad espacio temporal (efecto de pixelado en la imagen ilustrada), mientras que el modelo numérico se desarrolló de una manera más suave, siendo ambas situaciones esperables.

Para el caso de la componente ortogonal V, se logra apreciar un comportamiento similar entre los datos registrados y los modelados numéricamente, siendo ambos casos concordantes en las magnitudes y signos de la componente vectorial de la corriente. Las similitudes cualitativas entre ambas representaciones gráficas resultaron ser de alta y según la inspección visual, representan el mismo funcionamiento vertical y temporal de las corrientes.

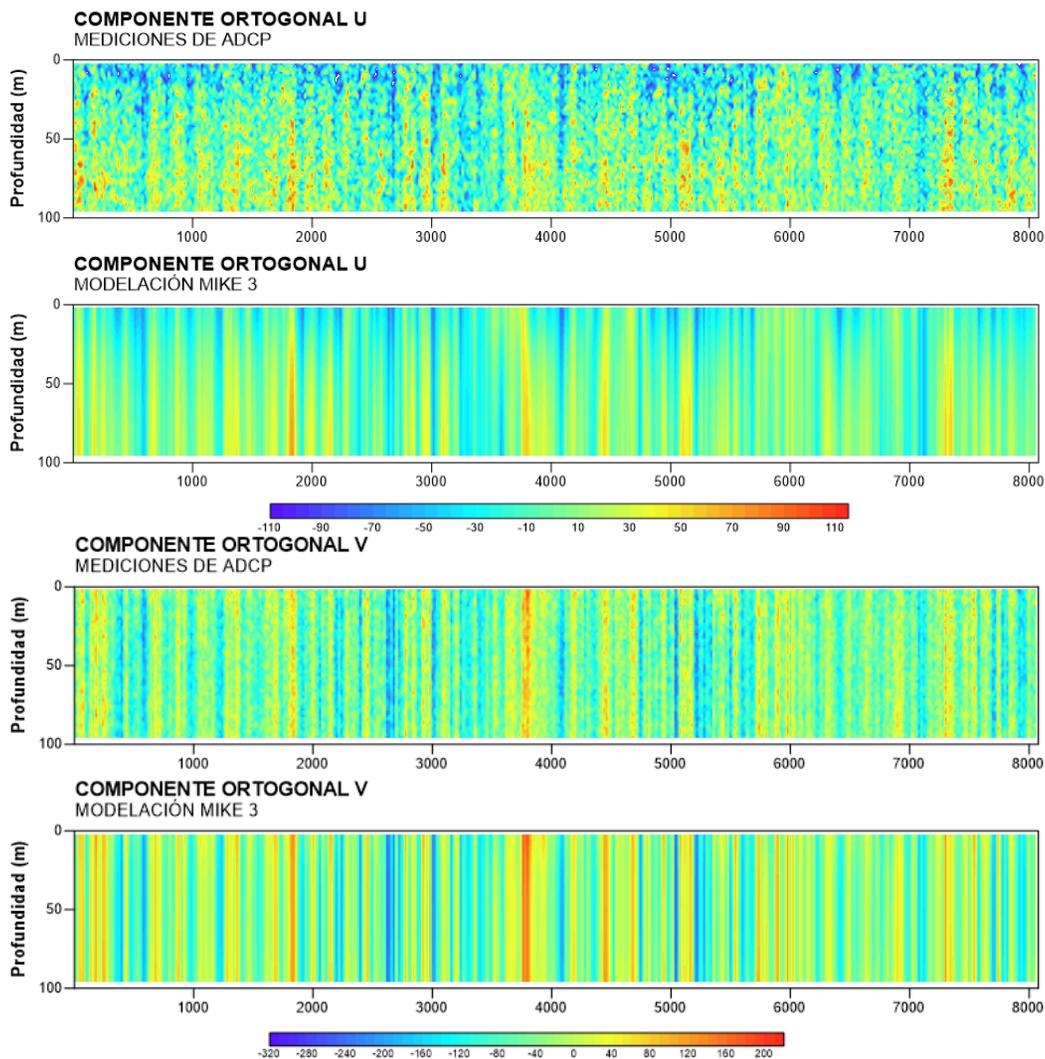
En la Tabla 2 se presenta el resumen de la comparación de cuantiles de la estadística simulada y la registrada, para el ADCP de aguas profundas.

Tabla 2: Resumen de la comparación de cuantiles para cada componente ortogonal y capa comparada para el ADCP de aguas profundas.

Capa	Estadístico	Componente U (cm/s)	Componente V (cm/s)
Superficial	R ²	0.999	1.000
	BIAS	-0.126	-0.024
Intermedia	R ²	1.000	1.000
	BIAS	-0.011	0.025
Fondo	R ²	0.999	1.000
	BIAS	0.028	0.019

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 6: Comparación de las series de tiempo de perfil vertical de corrientes, para la componente vectorial U y V de las corrientes en aguas profundas.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

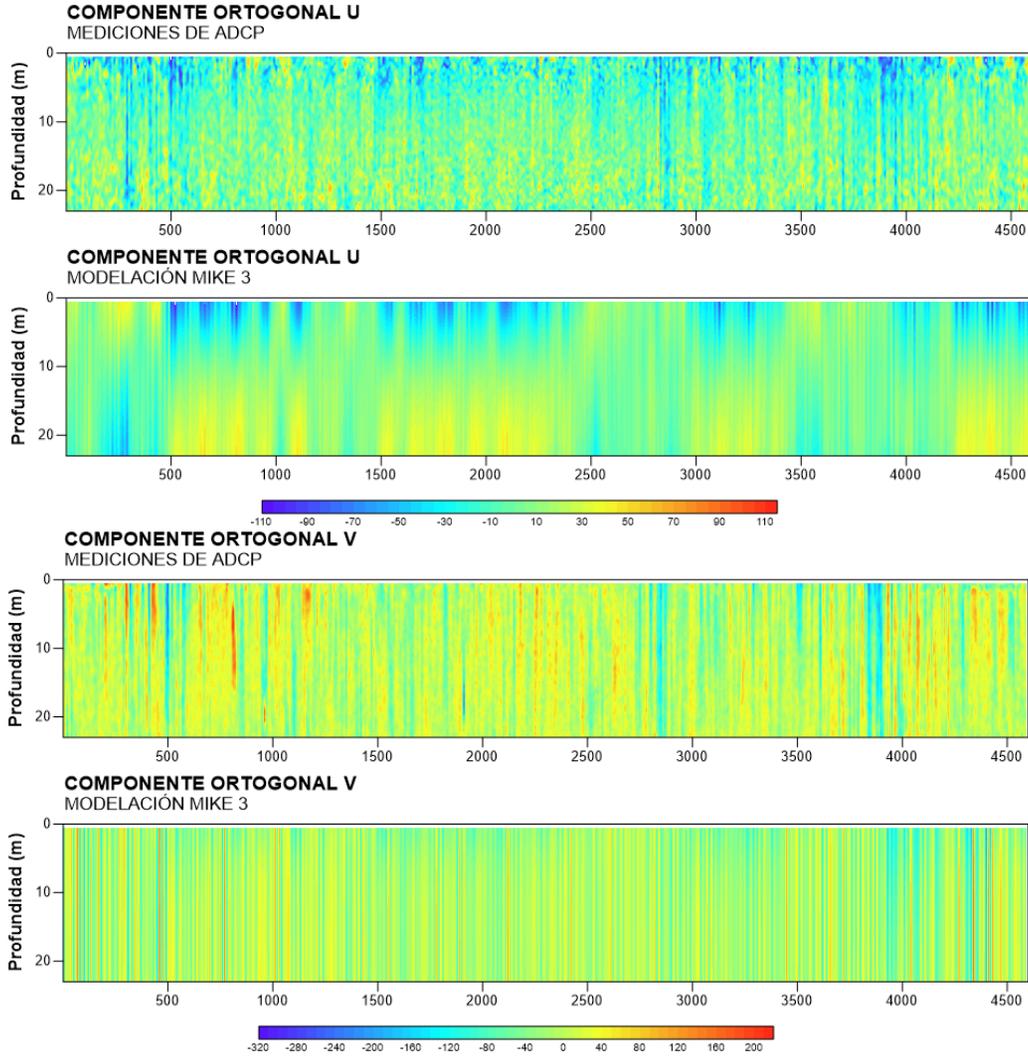
3.1.2 ADCP AGUAS SOMERAS

Al igual que para el ADCP de aguas profundas, se ha realizado el análisis del perfil vertical en el tiempo.

En la Figura 7 se muestra la comparación de las series de tiempo de perfiles verticales de velocidad para las componentes ortogonales U y V. De ella se puede advertir una concordancia cualitativa en el comportamiento de ambas señales, es decir, la señal registrada y la producida numéricamente. Tanto las intensificaciones superficiales (colores azules) como las disminuciones en el lecho (colores amarillos), se logran advertir en ambas gráficas, es decir, se presentaron tanto en el registro instrumental como la reproducción numérica del perfil vertical de velocidades.

El resumen de los estadísticos de comparación se muestran en la Tabla 3.

Figura 7: Comparación de las series de tiempo de perfil vertical de corrientes, para la componente vectorial U y V de las corrientes en aguas someras.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla 3: Resumen de la comparación de cuantiles para cada componente ortogonal y capa comparada para el ADCP de aguas someras.

Capa	Estadístico	Componente U (cm/s)	Componente V (cm/s)
Superficial	R ²	0.993	0.997
	BIAS	0.065	-0.151
Intermedia	R ²	0.997	0.992
	BIAS	-0.445	0.084
Fondo	R ²	0.985	0.991
	BIAS	-0.271	-0.153

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.2 EXPLOTACIÓN : 6 AÑOS DE HIDRODINAMICA (2017-2022)

El comportamiento hidrodinámico resumido como promedio anual (debido a la cantidad de información generada) se presenta para una profundidad de 10 metros en la Figura 8. Cada recuadro se compone de las magnitudes de velocidad (como mapa de color) y las direcciones (vectores). En términos generales se puede apreciar que todos los flujos medios anuales ilustrados se dirigen principalmente hacia el Sur, sin rotaciones importantes lo cual permite presumir técnicamente que existirá una buena capacidad de transporte de una eventual las descarga de coliformes fecales que debería derivar principalmente hacia el sur, debido a la advección.

Es importante destacar que este comportamiento medio de la hidrodinámica es concordante con lo levantado en las campañas de PVA que se han ejecutado previamente por Esval, las que indican mediante técnicas de levantamiento lagrangiano, que los derivadores en la mayoría de los casos se desplazan con orientación sur, es decir, dirigiéndose principalmente hacia Laguna Verde y no hacia el sector el Membrillo.

Especialmente el comportamiento de las corrientes en su magnitud, muestra zonas cercanas a la costa de intensificaciones alcanzado valores del orden de 0.5 m/s en el sector de Loma Larga. Adicionalmente se puede apreciar que hacia aguas más profundas (izquierda de cada uno de los recuadros) las velocidades tienen hacia promedios cercanos a 0.25 m/s.

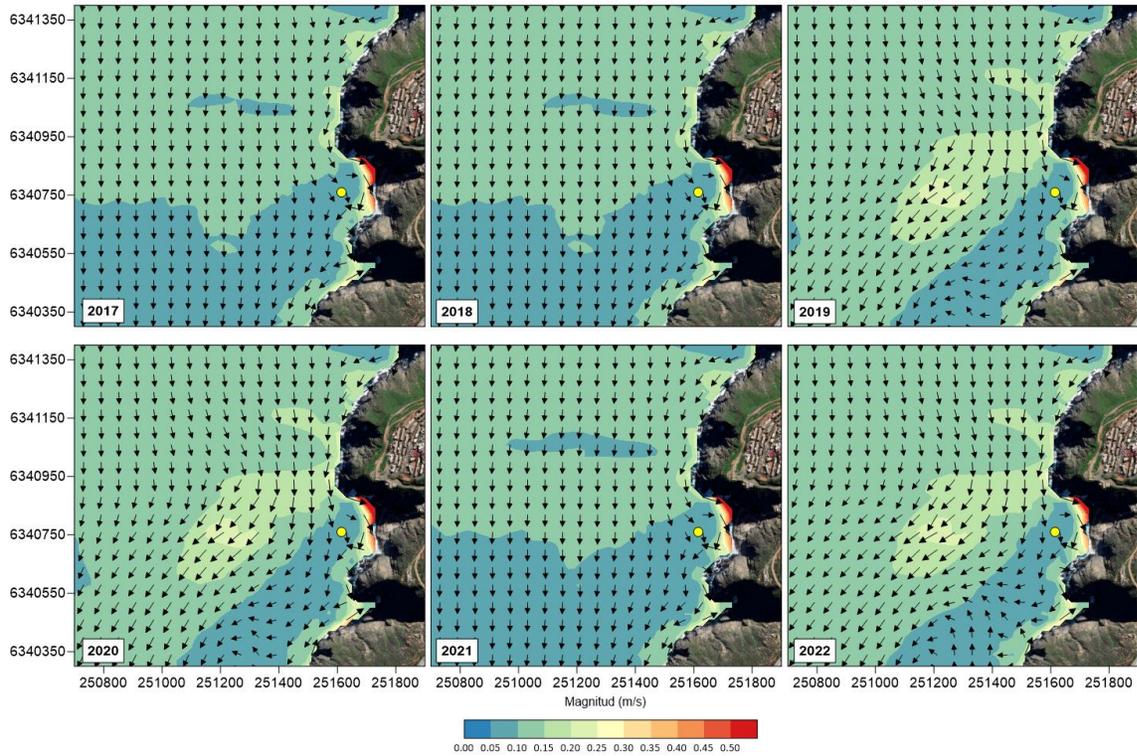
Al extraer la información de las magnitudes y direcciones de la corriente en el nodo ADCP Aguas Someras (punto amarillo de la Figura 8) y a modo de profundizar el análisis, se ha elaborado la Figura 9 la que ilustra el comportamiento resumido en un gráfico de cajas, el cual presenta las medias anuales en línea roja (centro de la caja), los percentiles 25 y 75% (borde inferior y superior de la caja) y los extremos de la desviación estándar (barbas de la caja). Lo anterior se ha realizado tanto para las magnitudes como para las direcciones.

En el caso de las magnitudes se ha obtenido que el promedio anual de las corrientes es del orden de 5 cm/s, con fluctuaciones que empujan el percentil de 75% de excedencia hasta valores cercanos a los 10 cm/s, mientras que los máximos puntos alcanzan magnitudes cercanas a los 30 cm/s.

Por su parte, las direcciones mostraron comportamientos asociados en pares de años. Por ejemplo, el comportamiento direccional del año 2017 es comparable con el del 2020, tanto en su valor medio como sus percentiles. Misma situación ocurre cuando se compara el 2018 con el 2021 y 2019 con el 2022.

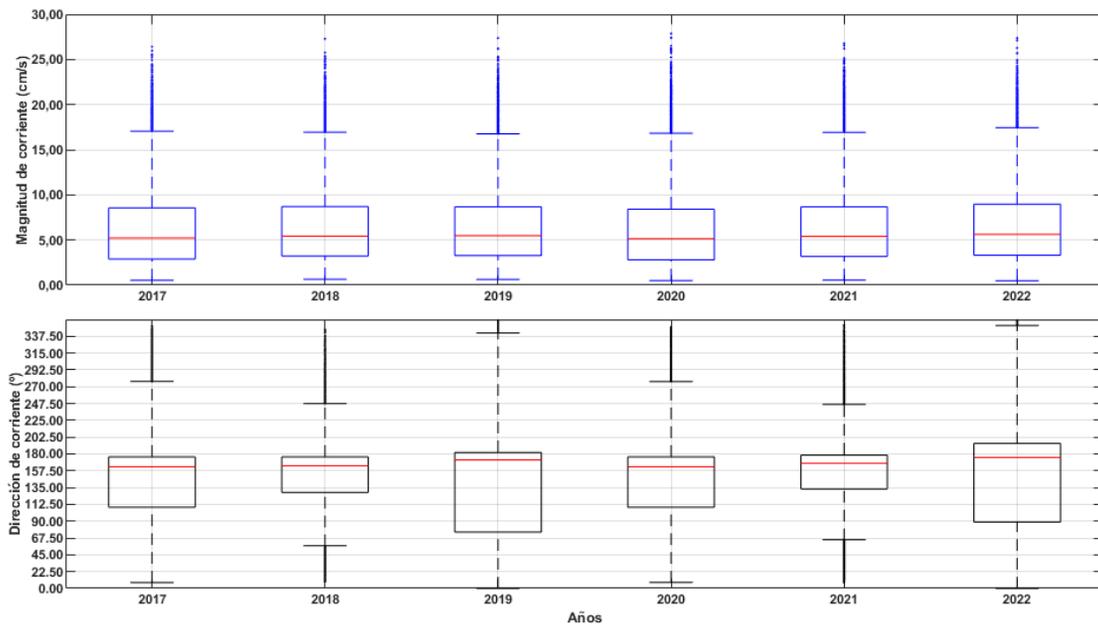
Del resultado ilustrado en la Figura 9 se puede advertir que las direcciones indican que las corrientes se dirigen como valor medio hacia el sur (segundo cuadrante de direcciones), sin embargo, hay fluctuaciones débiles hacia el primer cuadrante (norte) pero de baja incidencia estadística.

Figura 8: Campos medios anuales de circulación en el entorno de Loma Larga. Desde el 2017 hasta el 2022.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

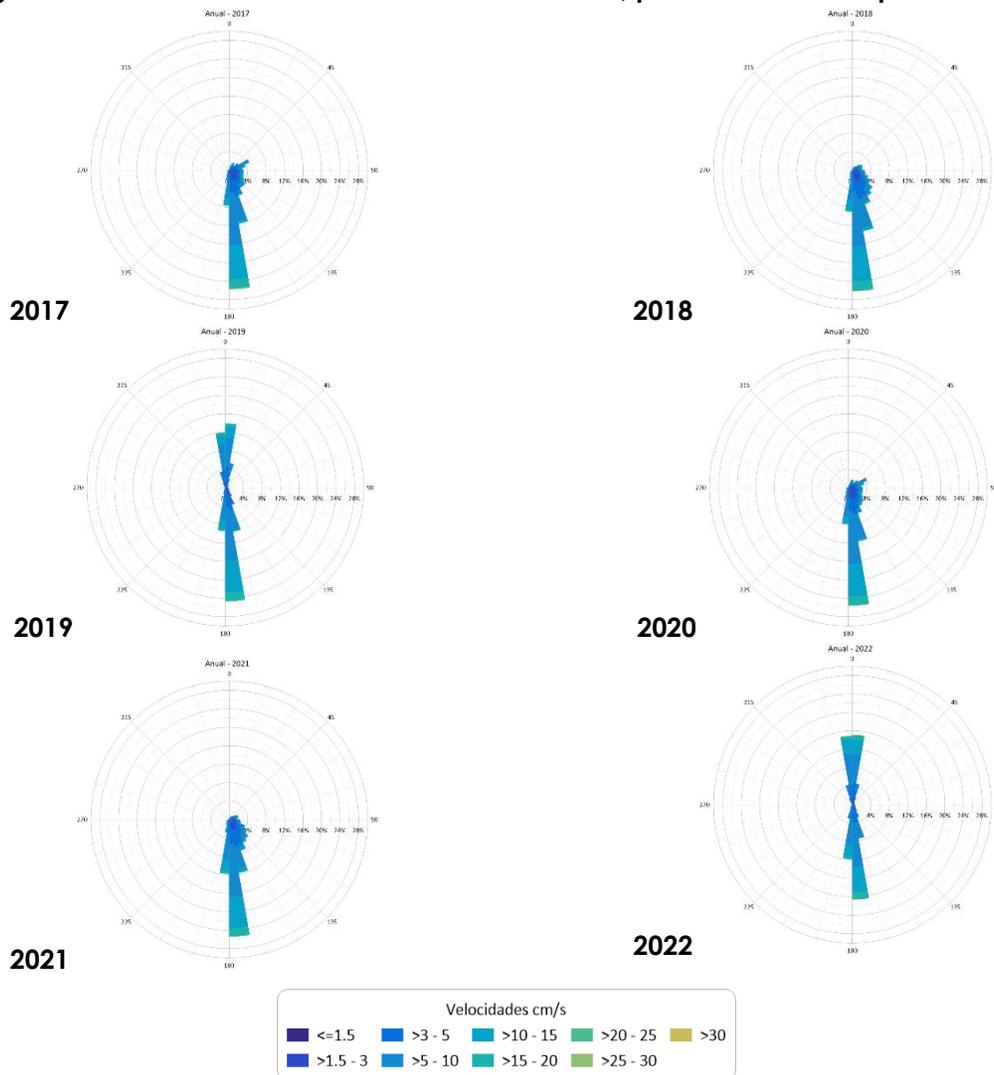
Figura 9: Resumen estadístico de las corrientes del modelo numérico a 10 metros de profundidad.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Para visualizar con mayor facilidad las direcciones de una mejor manera, se han elaborado las rosas de corrientes que se presentan en la Figura 10. Cada una de ella se ha elaborado para mostrar el comportamiento anual. En el caso del año 2017 se puede advertir como las corrientes se dirigen preferentemente hacia el sur (barra más larga que representa mayor frecuencia). Leves presencias de corrientes orientadas hacia el Norte se pueden advertir de las rosas direccionales, las que serían de baja incidencia. Similar condición se presentó para el año 2018, 2020 y 2021. Para el año 2019 se puede advertir que, si bien la componente principal del flujo orienta las masas de agua hacia el sur, una componente también se orienta hacia el norte. Similar comportamiento al del año 2019 se obtuvieron para las condiciones presentadas en el año 2022, de tal modo que se omite su descripción en mayor detalle.

Figura 10: Rosas de corrientes del año 2017 al 2022, para 10 metros de profundidad.



4 CONCLUSIONES

4.1 RESPECTO DE LA HIDRODINAMICA BASAL

La hidrodinámica basal mostró que el flujo se orienta preferentemente hacia el sur, con escasas incursiones al norte, siendo esto un indicador de la dirección principal que adoptaría el transporte de sustancias u otras incorporaciones de emisiones al medio, que tengan un comportamiento pasivo.

Este comportamiento de la hidrodinámica indica que las mareas no son el agente regulador principal de la circulación, pues no se evidenciaron significativamente flujos y reflujos. Esta situación también fue advertida por las mediciones de corrientes lagrangianas que se reportan en los PVA suministrados por ESVAL, en los cuales se puede ver advertir como las mediciones muestran que los derivadores se dirigen hacia el sur de la descarga, es decir, se orientan principalmente hacia el sector de Laguna Verde.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación interanual de la hidrodinámica, se logró detectar un patrón estadístico en las direcciones, con ciclos equivalentes entre los años 2017 y 2020, 2018 y 2021, y 2019 y 2022; donde sus valores medios y los percentiles (25% y 75%) muestran una equivalencia significativa. Esto permite establecer con claridad la importancia de representar ventanas de tiempo más extensa en las simulaciones hidrodinámica.

Con la información disponible y generada durante este estudio, se desconoce si esta ciclicidad está vinculada a fenómenos de gran escala del océano, sin embargo, resultaría interesante aumentar el tiempo de simulación con fines académicos.

5 REFERENCIAS

- Becerra, D. (2017). Caracterización de las Marejadas del verano 2015-16 y su relación con el fenómeno El Niño. Memoria para optar al grado de Ingeniero Civil Oceánico. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- Becerra, D., Quezada, M., & Díaz, H. (2022). A deep water and nearshore wave height calibration of the ECOWAVES hindcasting database. *Latin american journal of aquatic research*, 50(4), 573-595.
- Bleck, R. (2002). An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, 4, 55-88.
- Godoy Apablaza, M. A. (2018). Influencia del modo anular Austral sobre el oleaje incidente en las costas de Chile. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso.
- Horvath, K., D. Koracin, R. Vellore, J. Jiang, and R. Belu. 2012: Sub-kilometer dynamical downscaling of near-surface winds in complex terrain using WRF and MM5 mesoscale models. *J. Geophys. Res.*, 117, D11 111, doi:DOI10.1029/2012JD017432.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Huang, X.-Y. 2019. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR.