Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ciencias Físicas
Unidad de Posgrado

Hidrodinámica y descarga del emisario Taboada en la bahía del Callao

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Física con mención en Geofísica

AUTOR

Marco Antonio MERMA JARA

ASESOR

Mg. Jorge Martín QUISPE SÁNCHEZ

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Merma, M. (2023). *Hidrodinámica y descarga del emisario Taboada en la bahía del Callao*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Marco Antonio Merma Jara
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	22754672
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9805-1935
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jorge Martín Quispe Sánchez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	25548660
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9488-8615
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	David Pareja Quispe
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	41273620
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Octavio Fashé Raymundo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10351868
Miembro del jurado 2	

Nombres y apellidos	Carmela Cristhy Ramos Orlandino
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10647523
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.4.2. Oceanografía Física y Física de la Atmósfera
Grupo de investigación	Ciencias de la Tierra Clima y Medio Ambiente – CTCLIMA
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Latitud: -12.05819215 Longitud: -77.0189181894387
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2020 - 2022
URL de disciplinas OCDE	Oceanografía, Hidrología, Recursos hídricos http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
UNIDAD DE POSGRADO

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD PRESENCIAL PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN FÍSICA CON MENCIÓN EN GEOFÍSICA

Siendo las 6:00 pm del 2 de octubre de 2023, en el salón 304 de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, se reunieron los siguientes miembros del Jurado Examinador:

Dr. David Pareja Quispe	(Presidente)
Mg. Octavio Fashé Raymundo	(Miembro)
Mg. Carmela Cristhy Ramos Orlandino	(Miembro externo)
Mg. Jorge Martín Quispe Sánchez	(Asesor)

Para la sustentación oral y pública de la tesis para optar el Grado Académico de Magíster en Física con mención en Geofísica, del Bach. Marco Antonio Merma Jara, con código de matrícula N° 10137004.

Después de darse lectura al expediente de Grado, en el que consta haberse cumplido con todas las disposiciones reglamentarias, los señores miembros del Jurado Examinador, atendieron a la exposición de la tesis titulada:

"Hidrodinámica y descarga del emisario Taboada en la bahía del Callao"

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado Examinador, los asistentes y el tesista se retiraron del salón 304, para que el presidente y los miembros del Jurado Examinador puedan deliberar y calificar.

Al término de la deliberación, el Dr. David Pareja Quispe invitó al tesista y a los asistentes a pasar al salón 304 para dar lectura a la evaluación de la sustentación. Obteniendo como resultado la calificación de:

15	Quince	Bueno
(NÚMERO)	(LETRAS)	(ESCALA)

A continuación, el presidente del Jurado Examinador entrega el Acta de Sustentación de Tesis a la Unidad de Posgrado, para continuar el trámite correspondiente para obtener el Grado Académico de Magister Física con mención en Geofísica, del Bach. Marco Antonio Merma Jara.

Siendo las 8 : 10 pm, se levantó la sesión.

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
UNIDAD DE POSGRADO

Los miembros del Jurado Examinador suscriben el Acta de sustentación de tesis en la Ciudad de Lima, a los 2 días del mes de octubre de 2023.

Acta de Sustentación de Tesis del Bach. Marco Antonio Merma Jara.

Dr. David Pareja Quispe Presidente

Mg. Octavio Fashé Raymundo
Miembro

Mg. Carmela Cristhy Ramos Orlandino
Miembro externo

Mg. Jorge Martín Quispe Sánchez
Asesor

CALIFICACIÓN OBTENIDA: Quince (15) Bueno

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

UNIDAD DE POSGRADO

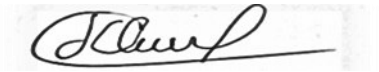
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **JORGE MARTIN QUISPE SANCHEZ** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N° 000022-2023-UPG-VDIP-FCF/UNMSM (21 de marzo del 2023) de la tesis de investigación, cuyo título es "**Hidrodinámica y descarga del emisario Taboada en la bahía del Callao**", presentado por el bachiller MARCO ANTONIO MERMA JARA para optar el grado de **Maestría en Física con mención en Geofísica.**

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de **5%** de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado correspondiente.

Lima, 23 de octubre de 2023.



Firma del asesor
D.N.I. Nº: 25548660
JORGE MARTIN QUISPE SANCHEZ

Dedicatoria

A mi madre:

Hilaria Jara LL.

A la memoria de mi padre:

Luis Merma A.

A mis hermanos:

Yoni A.,

Margot M.,

Julio C.,

Yonel Ch.

Agradecimientos

A Jorge Quispe asesor de la investigación, por presentarme el reto, por toda la orientación y capacitaciones para el logro de los objetivos.

A César Aguirre por todo el aporte de su experiencia con el modelo ELCOM, por todas las horas de discusión sobre los enfoques, análisis, críticas, sugerencias.

A César Jiménez por el aporte por su grande ayuda sobre procesamiento de datos.

A Gerardo Ramírez, por todo el apoyo a través de sus grandes conocimientos de lenguaje de programación que fueron utilizados en el desarrollo de la investigación, así como las sugerencias para la simulación.

A la Facultad de Ciencias Físicas por todos los conocimientos brindados a través de la formación como físico.

A los autores del modelo ELCOM, Center for Water Research de la Universidad de Australia.

Gracias por Todo.

Índice general

Pág.

1. Introducción **12**

1.1. Situación problemática 12

1.2. Objetivos 14

1.3. Justificación 15

1.4. Área de estudio 16

1.5. Limitaciones 18

2. Marco teórico **19**

2.1. Antecedentes 20

2.2. Hidrodinámica 22

2.3. Agua, marea y viento 23

2.4. Modelos oceánicos de simulación 25

2.5. Procesos dinámicos en la circulación del océano 26

2.6. Temperatura y salinidad 31

2.7. Métodos para la solución numérica de las ecuaciones de movimiento . 33

2.7.1. Métodos de diferencias finitas 33

2.8. Procesos de mezcla hidrodinámica 35

2.9. Emisor submarino 35

2.10. El modelo ELCOM 37

3. Metodología de la Investigación **41**

3.1. Preparación de datos de entrada para el modelo de simulación 41

3.1.1. Datos de batimetría 42

3.1.2. Datos meteorológicos y nivel del mar 43

3.1.3. Tiempo Juliano 47

3.1.4. Rosa de viento 49

3.2. Malla de simulación 50

3.2.1. Capas verticales 51

3.2.2. Variables de salida 52

3.3. Configuración ejecución de la simulación 52

3.3.1. Tiempo de simulación y número de iteraciones 52

3.3.2. Salidas del modelo y pos procesamiento 54

3.4. Monitoreo en la bahía del Callao 54

3.5. Herramientas estadísticas 60

4. Resultados y discusión **62**

4.1. Estabilidad de la simulación 62

4.2. Magnitudes de la velocidad del viento en la bahía del Callao 63

4.3. Evolución de salinidad, temperatura y velocidad 64

4.3.1. Salinidad 65

4.3.2. Temperatura 65

4.3.3. Velocidades 66

4.4. Sección vertical para el emisario submarino 67

4.4.1. Salinidad 67

4.4.2. Temperatura 69

4.4.3. Velocidades 70

4.5. Distribuciones espaciales 72

4.5.1. Distribución espacial de salinidad 72

4.5.2. Distribución espacial de temperatura 73
4.5.3. Distribución espacial de velocidades 74
4.6. Validación de magnitudes medidas y simuladas 76
4.6.1. Validación de Salinidad 77
4.6.2. Validación de Temperatura 78
4.6.3. Validación de Velocidades 79
4.7. Conclusiones 81

Referencias **83**

Apéndices **85**

A. Ecuaciones hidrodinámicas de ELCOM **87**

B. Capas verticales **92**

C. Esquema de discretización en ELCOM **93**

D. Viscosidad turbulenta **97**

Índice de figuras

1.1. Área de estudio, costa del Callao (Realizado con GMT: General Mapping Tools) 17

2.1. (a) Fuerzas debido a la aceleración, (b) Fuerzas de advección. Fuente: Talley (2011) 28
2.2. Fuerzas debido a la fricción. Fuente: Talley (2011) 28
2.3. (a) Fuerzas gradiente de presión, (b) fuerza de gravedad. Fuente: Talley (2011) 30
2.4. Sistema de coordenadas para la batimetría. Fuente: Hodges y Dallimore (2007) 39

3.1. Representación de la batimetría para la región de interés en el modelo ELCOM, en términos de filas (horizontal) y columnas (vertical) en la malla de simulación, las profundidades tiene unidades de metro, desde 0 m hasta 90 m. 43
3.2. Comportamiento de la magnitud de la velocidad del viento, mayo de 2016. Datos MERRA-2 44
3.3. Cambios en la dirección del viento, mayo de 2016. Datos MERRA-2 . 45
3.4. Variación de la temperatura del aire, mayo de 2016. Datos MERRA-2 45
3.5. Comportamiento de la humedad relativa, durante mayo de 2016. Datos MERRA-2 46
3.6. Varciación de la presión atmosférica, durante mayo de 2016. Datos MERRA-2 46
3.7. Datos de marea mayo de 2016. Fuente: Sealevel Station Catalog (SSC) 47
3.8. Rosa de viento de 16 puntas. (Fuente: Elaboración propia) 49

3.9. Malla de la simulación numérica 50
3.10. Tamaño de malla considerado en la simulación numérica. (Fuente: Elaboración propia.) 51
3.11. Diagrama de flujo para preprocesamiento. Fuente: Elaboración propia 54
3.12. Posiciones de las estaciones de registro de datos, en la bahía del Callao. Generado con Ocean Data View ODV. 55
3.13. Temperaturas superficiales medidas en las posiciones de las estaciones de registro de datos, bahía del Callao. Curvas interpoladas por el software Ocean Data View (ODV) 56
3.14. Salinidad superficial en las posiciones de las estaciones de registro de datos, bahía del Callao. La distribución de curvas interpoladas a través del software Ocean Data View (ODV) 57
3.15. Velocidades superficiales en las posiciones de las estaciones de registro de datos, bahía del Callao. Curvas interpoladas por el software Ocean Data View (ODV) 58
3.16. Regiones para el análisis de datos entre las estaciones de las fronteras. 59

4.1. Evolución de la condición CFL. Para CFL_x, CFL_y, CFL_z. Gnerado con GNU Octave 62
4.2. Magnitud de velocidades para el viento, para el mes de mayo de 2016, datos obtenidos desde MERRA-2 63
4.3. Rosa de vientos, para el mes de mayo de 2016, datos obtenidos desde MERRA-2 64
4.4. Evolución de la salinidad simulada en las estaciones E17, E18, E19, E20, mayo de 2016. 65
4.5. Evolución de la temperatura simulada en las estaciones E17, E18, E19, E20, mayo de 2016. 65
4.6. Evolución de la velocidad simulada en las estaciones E17, E18, E19, E20, mayo de 2016. 66
4.7. Promedio de salinidad, temperatura, velocidad en cada estación E17, E18, E19, E20 en toda la simulación. 66

4.8. Salinidad simulada en el corte Este-Oeste, 16 de mayo de 2016, en la barra de colores la salinidad se mide en unidades psu. 68
4.9. Cambio de salinidad simulada con la profundidad en el emisor submarino, 16 de mayo de 2016. 69
4.10. Temperatura simulada en el corte Este-Oeste, 16 mayo de 2016. . . . 69
4.11. Cambio de temperatura simulada con la profundidad en el emisor submarino, 16 de mayo de 2016. 70
4.12. Velocidades simuladas en el corte Este-Oeste, 16 de mayo de 2016. Las magnitudes de velocidad están expresadas en cm/s. 71
4.13. Cambio de velocidad simulada con la profundidad en el emisor submarino, mayo de 2016. 71
4.14. Distribución de salinidad para el 16 de mayo de 2016, simulado con el modelo ELCOM. 73
4.15. Distribución de temperaturas para el 16 de mayo de 2016, simulado con el modelo ELCOM. 74
4.16. Distribución de velocidades para el 16 de mayo de 2016, simulado con el modelo ELCOM. 75
4.17. Distribución del campo de velocidades en la bahía del Callao, 16 de mayo de 2016, simulados por el modelo ELCOM. 76
4.18. Comparación de las salinidades superficiales medidas y simuladas en las estaciones E11 hasta E20. 78
4.19. Comparación de las temperaturas medidas y simuladas en las estaciones E11 hasta E20. 79
4.20. Comparación de las velocidades superficiales medidas y simuladas en las estaciones E11 hasta E20. 80

B.1. Capas verticales en el área de estudio en total 31 capas que suman 100 m, de profundidad. Fuente: Elaboración propia. 92

C.1. Esquema de la malla computacional. Fuente: Cassulli y Cheng (1992) 95
C.2. Velocidades en la malla computacional, en los centros de las celdas. Fuente: Cassulli y Cheng (1992) 96

Índice de tablas

3.1. Estadísticas de los datos meteorológicos, mayo de 2016. Datos obtenidos desde MERRA-2 44
3.2. Número de días por cada mes transcurrido, según tiempo Juliano. . . 48
3.3. Símbolos en la representación de fecha y hora 48
3.4. Direcciones según rosa de vientos, para los datos MERRA-2. 50
3.5. Distribución de capas verticales en el dominio de simulación, en total suma 100 m de profundidad. 51
3.6. Tiempo de simulación, número de iteraciones y paso de simulación . 53
3.7. Estaciones de registro en la bahía del Callao en mayo de 2016 55
3.8. Valores de temperaturas registradas en la bahía del Callao. 56
3.9. Valores de salinidad, registradas en la bahía del Callao. 57
3.10. Velocidades de las corrientes marinas registradas en la bahía del Callao 58
3.11. Valores de temperatura, salinidad, velocidad en la superficie y fondo. 59
3.12. Diferencias de temperatura, salinidad y velocidades en la frontera región 1 y región 2, en la superficie. 60
3.13. Diferencias de temperatura, salinidad y velocidades en la frontera de la región 2 y región 3, en la superficie. 60

4.1. Comparación entre valores medidos y simulados para la salinidad. . . 77
4.2. Comparación entre valores medidos y simulados para la temperatura. 78
4.3. Comparación entre valores medidos y simulados para la velocidad . . 79

Resumen

En esta investigación el objetivo fue analizar las variables de salinidad, temperatura superficial del mar y la velocidad, obtenidas a partir de la simulación numérica realizada con el modelo ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) sobre la bahía del Callao.

Para analizar el desempeño de la simulación se utilizó datos recolectados por el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) para el mes de mayo de 2016 sobre la bahía del Callao.

Para el correcto funcionamiento del modelo se han utilizado datos de batimetría, de estaciones meteorológicas y de marea. Además, se consideró la presencia del emisario submarino Taboada. Los resultados de la simulación fueron comparados con datos de 10 estaciones de registro, estas estaciones se encuentran identificadas con los rótulos E11 hasta E20. Para el caso de la salinidad los resultados muestran un error mínimo de 0.11 % y máximo de 1.47 %, para la temperatura el error mínimo es de 0.59 % y máximo de 7.98 %, así mismo para las magnitudes de las velocidades el error mínimo de 1.39 % y máximo 42.15 %.

Finalmente, la simulación realizada con el modelo ELCOM pueden ser utilizadas para analizar el comportamiento del océano en la bahía del Callao.

Palabras clave: Bahía del Callao, simulación, salinidad, temperatura, corrientes marinas.

Abstract

In this research, the objective was to analyze the variables of salinity, sea surface temperature, and velocity, obtained from numerical simulation conducted using the ELCOM model (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) over the Callao Bay.

To assess the performance of the simulation, data collected by the Instituto del Mar del Perú (IMARPE) for the month of May 2016 over Callao Bay were utilized.

For the proper functioning of the model, bathymetry data, meteorological station data, and tidal data were employed. Additionally, the presence of the Taboada submarine outfall was considered. The simulation results were compared with data from 10 recording stations labeled from E11 to E20. In the case of salinity, the results indicate a minimum error of 0.11 % and a maximum of 1.47 %. For temperature, the minimum error is 0.59 %, with a maximum of 7.98 %. Similarly, for velocity magnitudes, the minimum error is 1.39 %, and the maximum is 42.15 %.

Ultimately, the simulation carried out with the ELCOM model can be used to analyze the ocean's behavior in Callao Bay.

Keywords: Callao Bay, simulation, salinity, temperature, marine currents.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Situación problemática

El océano es una inmensa fuente de recursos naturales, la mayor parte del planeta Tierra está cubierta por agua, cubre más de las dos terceras partes de la superficie de la tierra además permite que la vida sea posible, produce la mitad del oxígeno que respiramos, ayuda a regular el clima y proporciona el hábitat más grande para la vida en la tierra. El agua de mar se compone de agua y sales, de las cuales el 96.5 % es agua y el 3.5 % restante sales disueltas, siendo el cloruro de sodio (NaCl) la sal más abundante.

El explorador español Vasco-Núñez de Balboa impresionado por la plácida superficie del amplio océano, que avistó por primera vez desde un pico en Panamá en 1513 D.C., le dio el nombre de "Pacífico", al océano más grande del mundo que ocupa alrededor de un tercio de la superficie del globo terrestre, es el más grande de todos los océanos. Su superficie, excluidos los mares marginales, es de unos 166 000 000 km^2. Tiene doble área del océano Atlántico, el siguiente más grande entre los océanos (Reddy, 2001).

El movimiento en el océano está generado por una compleja combinación de factores como las mareas y los vientos, en el caso de las mareas son originadas por

la atracción gravitacional del sol y la luna. Por su parte el viento impulsa la parte superficial, principalmente y como consecuencia se forman las olas y las diferencias de densidades de sus aguas. Cuando el viento sopla sobre la superficie del océano, puede causar una mezcla vertical de las capas de agua. Esto se debe a que el viento ejerce una fuerza sobre la superficie del agua, moviendo el agua en la dirección del viento y creando corrientes superficiales. Como resultado, las aguas superficiales se mezclan con las aguas más profundas.

El movimiento de agua en el océano es impulsado por la interacción entre el sol y la luna así como por procesos tectónicos. La energía del sol es transferida hacia el océano a través de flujos de calor, agua y a través de los vientos. Las mareas crean ondas internas que se rompen, creando turbulencias y mezcla (Talley, 2011).

En las campañas de monitoreo del océano en regiones de interés se utilizan instrumentos de medición especializados para registrar en la superficie del mar, temperatura, salinidad, corrientes marinas. Para el caso de corrientes marinas a nivel de la superficie y subsuperficie se utilizan los correntómetros, entre los que podemos mencionar el ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) que registra la velocidad y dirección de las corrientes marinas.

Desde que se han accedido al uso de las computadoras han sido posible la implementación de modelos numéricos para la descripción de los fenómenos en el océano a partir de las soluciones de ecuaciones hidrodinámicas por métodos numéricos, a través de los cuales se han construido modelos numéricos orientados a la investigación del océano, zonas costeras, lagos y atmósfera.

Los modelos numéricos permiten obtener también valores para la temperatura, salinidad, corrientes marinas dentro de sus alcances y limitaciones con las que fueron creados y constituye una herramienta muy utilizada para explorar los fenómenos oceánicos relacionados con los cambios de temperatura, salinidad y corrientes marinas.

Existen estudios realizados sobre la hidrodinámica en ecosistemas costeros, entre los cuales, para la bahía del Callao se realizó un estudio mediante simulación de las

distribuciones de las corrientes con influencia de las descargas de los ríos Rímac y Chillón, en la que se ha utilizado el modelo numérico ROMS (Regional Ocean Medel System) con el objetivo de estudiar la circulación marina y descargas hipotéticas en la bahía del Callao, teniendo en cuenta las variaciones estacionales climatológicas y fue considerado la dirección e intensidad del viento como forzante (Correa et al, 2008).

Así mismo, para la bahía del Callao y Miraflores utilizando el modelo numérico POM (Princeton Ocean Model) se estudió la circulación marina a nivel superficial con la finalidad de caracterizar el patrón de dicha circulación considerando el viento y la marea como forzantes (Centeno et al, 2010).

También desde el interés de la contaminación del ecosistema marino, se han registrado datos de temperatura que están relacionados con la hidrodinámica del agua de la bahía, en este caso para investigar sobre la demanda de oxígeno, así como el impacto de la contaminación en el ecosistema de la bahía (Orozco et al, 1999).

Debido a que los datos de temperatura, salinidad y velocidad de corrientes se obtienen por mediciones directas, en campañas en el océano, a partir de estas y utilizando modelos numéricos es posible analizar la hidrodinámica en la bahía del Callao considerando la descarga del emisario submarino Taboada.

En el presente trabajo se analizó las variaciones de la distribución espacial de la temperatura, salinidad y velocidad de las corrientes marinas, simuladas con el modelo numérico ELCOM, para conocer mejor el comportamiento de sus propiedades físicas y los diversos procesos que ocurren en la bahía del Callao.

1.2. Objetivos

Objetivo general

- Analizar la distribución espacial de la temperatura, salinidad y velocidad de las

corrientes marinas sobre la bahía del Callao, realizadas mediante simulación numérica.

Objetivos específicos

- Analizar la temperatura del mar en la bahía del Callao, usando datos de mediciones y de simulación numérica.
- Analizar la salinidad del mar en la bahía del Callao, usando datos de mediciones y de simulación numérica.
- Analizar las velocidades en la bahía del Callao, usando datos de mediciones y de simulación numérica.

1.3. Justificación

Debido a la importancia de los ecosistemas costeros que son vulnerables a los cambios en las condiciones ambientales, tienen un comportamiento por las mañanas y otro por las tardes, algunos son influenciados por las descargas de ríos y emisarios submarinos, esto hace que cambien las condiciones del ecosistema costero.

Los estudios por conocer la variabilidad de estos ecosistemas se hacen relevantes para mejorar la gestión ambiental y mitigar el impacto, esto implica conocer a cerca del control, de calidad de agua, del monitoreo ambiental, previsión del clima, gestión de recursos naturales y por la investigación científica.

Respecto del control de calidad del agua: La medición de la salinidad y temperatura del agua de mar en una bahía es importante para determinar la calidad del agua. La salinidad y temperatura pueden influir en la vida marina y la presencia de contaminantes.

Respecto del monitoreo ambiental: El monitoreo de la velocidad, salinidad y temperatura del agua de mar en una bahía puede ser utilizado para detectar cambios

en el ambiente marino. Esto puede ayudar a identificar patrones de comportamiento de las especies marinas y prevenir la alteración del ecosistema.

Respecto de la previsión del clima: Las mediciones de velocidad, salinidad y temperatura del agua de mar en una bahía pueden ser utilizadas para predecir el clima local y regional. Esto es especialmente importante para la navegación y la industria pesquera.

Respecto de la gestión de recursos naturales: La medición de la velocidad, salinidad y temperatura del agua de mar en una bahía puede ayudar en la gestión de los recursos naturales, como la pesca y la acuicultura. Esto puede permitir la identificación de áreas propicias para la cría de ciertas especies y evitar la sobrepesca.

Respecto de la investigación científica: Las mediciones de velocidad, salinidad y temperatura del agua de mar en una bahía pueden ser utilizadas para realizar investigaciones científicas en temas como la dinámica oceánica, la biología marina, la geología y la meteorología.

1.4. Área de estudio

La región Callao está situada al centro-oeste del territorio peruano, donde se localiza el puerto del mismo nombre y el más importante del Perú. Sus coordenadas geográficas se encuentran entre $11^o50'$ latitud Sur y entre $77^o06'$ y $77^o22'$ longitud Oeste.

La provincia se divide en siete distritos de los cuales cuatro se encuentran en la zona costera (límite terrestre del área de estudio): Callao, la Punta y la Perla, al sur y Ventanilla al norte donde desembocan los ríos Chillón y Rímac. La zona sur de la costa está semi-protegida por el islote Redondo y por diversas islas como el Frontón, Cavinzas, principalmente, por la isla San Lorenzo.

La zona costera se encuentra ubicada sobre un abanico aluvial del río Rímac, con presencia de acantilados con un rango de 25 a 70 metros, a una distancia promedio

de 100 metros de la zona de playa en la que se presenta gran cantidad de sedimento rocoso redondeado por el trabajo relacionado a la alta energía del oleaje en el lugar, siendo los meses de junio a agosto los de mayor intensidad.

En la Figura 1.1, se muestra la región de estudio, ha sido obtenido a partir GMT (Generic Mapping Tools), este es un software gratuito que permite la visualización, y creación de mapas (Wessel y cols., 2019).

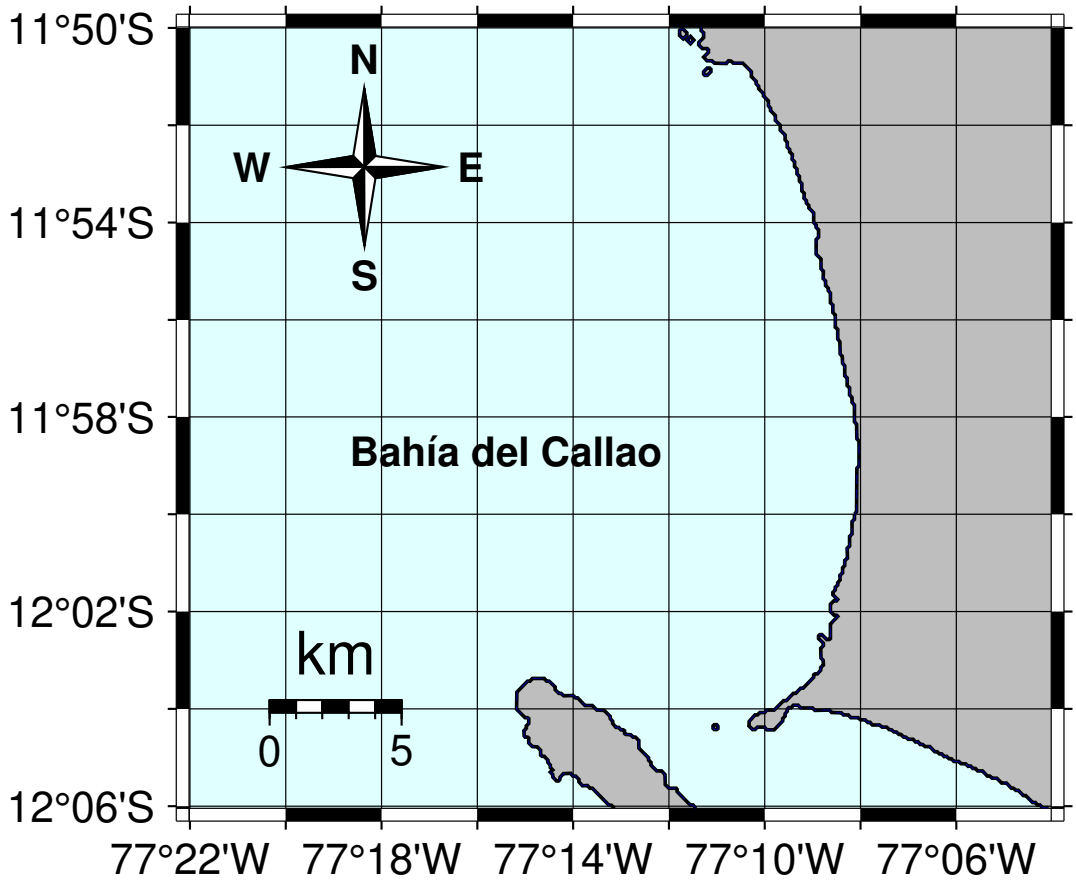


Figura 1.1: Área de estudio, costa del Callao (Realizado con GMT: General Mapping Tools)

La contribución científica del trabajo de investigación a desarrollar se enmarca en el contexto de la utilidad del modelo numérico como herramienta y que puede ser de utilizado en otros trabajos de investigación.

1.5. Limitaciones

Este estudio se basa en datos recopilados mediante mediciones directas de salinidad, temperatura y velocidad de corrientes en estaciones específicas en la bahía del Callao. Estos datos corresponden a momentos específicos del día.

La investigación se centra en el análisis de variables específicas, como la salinidad, temperatura y velocidad en la bahía del Callao, con un énfasis particular en el emisario submarino Taboada.

No se ha considerado la influencia de otros factores o contribuciones en la investigación debido a la necesidad de mantener un enfoque específico y controlado en las variables y factores que son objeto de estudio. La inclusión de estos elementos podría introducir una complejidad adicional y requerir un enfoque distinto en términos de modelado y recopilación de datos.

Los datos recopilados para la validación del modelo se limitan a los valores de las variables medidas en la superficie de la bahía del Callao.

Se ha considerado el caudal de agua que ingresa a la bahía a través del emisario submarino Taboada, sin considerar explícitamente otras contribuciones.

La simulación se llevó a cabo para el mes de mayo de 2016, ya que se disponía de datos recopilados directamente en la bahía del Callao los días 16, 17 y 18 de ese mes, lo que permitió una validación más precisa.

Es importante destacar que esta investigación se centró en un período específico y en las condiciones presentes en ese momento. Futuros estudios podrían abordar la inclusión de otras fuentes de agua en la bahía y considerar datos más recientes para evaluar la evolución de la situación en años posteriores.

Capítulo 2

Marco teórico

Para la investigación acerca de la hidrodinámica en la bahía del Callao, es necesario considerar la bahía, desde el enfoque de la física, como una entidad dinámica, compleja que está en constante interacción con su entorno a través de cambios ocasionados por factores naturales, así como de la actividad humana. Para entender los fenómenos se puede enfocar desde el punto de vista reduccionista, atendiendo a ciertas variables de interés, sin embargo, debido a la complejidad del sistema también es necesario un estudio como un todo.

Además la bahía es un recurso natural y un espacio público que debe ser gestionada de manera adecuada para su sostenibilidad y preservación a largo plazo, debido a que están relacionadas con la comunidad que tiene conexión directa y que tienen significado cultural y simbólico, es parte de su identidad y de la relación con el entorno natural.

Con la finalidad de obtener información sobre los fenómenos relacionados con los cuerpos de agua como son las bahías es necesario prestar atención a los antecedentes relacionados como paso fundamental, así como los conocimientos sintetizadas en teorías y leyes.

2.1. Antecedentes

En Canadá, para el lago Ontario, utilizando forzantes meteorológicos para la temporada del verano de 2006, así como datos de campo de cadenas de termistores (un tipo de sensor de temperatura), ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) y datos históricos del nivel del agua, se realizaron simulaciones numéricas. Los resultados de la simulación fueron comparados con perfiles de temperatura encontrándose que los perfiles simulados fueron un poco más fríos que los registrados directamente (Hall, 2008).

La modelación numérica es aplicada actualmente para resolver diversos problemas de calidad del agua e hidrodinámica como fue el caso de Shen et al (2002) que desarrollaron un modelo hidrodinámico de simulación tridimensional para estudiar el transporte de contaminantes en el sistema, el modelo resolvió la variación en los parámetros relevantes para el control de la contaminación y predijo las fluctuaciones del contenido del oxígeno a diferentes profundidades, a través de los años, mediante la calibración de datos históricos de la bahía de Hakata en Japón

Lonin y Vásquez (2005) utilizaron un modelo numérico denominado ECOM-SED (Estuarine, Coastal Ocean Model with Sediment Transport), para estudiar la dinámica de los coliformes en el Golfo de Urabá en Colombia. Con la aplicación de dicho modelo se buscó determinar la extensión de las zonas de contaminación provenientes de fuentes puntuales como ríos y zonas urbanas. Como resultado de la investigación mencionan la identificación del alcance de la contaminación así como de los patrones bajo condiciones climáticas cambiantes.

Montoya y Toro (2006) utilizaron el modelo numérico ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model), para explicar los principales factores que afectan la dinámica oceanográfica del golfo de Urabá en Colombia. La metodología utilizada fue realizar varios experimentos numéricos con la finalidad de analizar la sensibilidad del modelo frente a parámetros numéricos así como a forzantes físicos, con las cuales pudo analizar los patrones de circulación en el golfo de Urabá, utilizó datos de una campaña de mediciones que indicaban estratificación en las aguas del golfo de Urabá,

y le atribuye como causa a las descargas del río Atrato. También analizó la pluma turbia del río Atrato, además encontró que la dirección del viento es fundamental en la explicación de la dinámica de la pluma del río, adicionalmente en la investigación ha considerado la influencia de factores sobre la circulación, como: las mareas y rotación de la tierra.

Por otro lado Corral et al (2011), realizaron simulaciones numéricas para la bahía Nueva, en la ciudad de Puerto Madryn en la región noreste de la Provincia del Chubut, en Argentina, utilizando el modelo COHERENS (A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas) con la finalidad de obtener información para la construcción de un emisario submarino.

También, para el lago Titicaca en la región Puno Aguirre (2009) realizó una simulación numérica donde consideró cambios en la temperatura. Para este propósito utilizó el modelo ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model).

Así mismo Yzocupe (2005) para la bahía de Paracas en Pisco (Perú) investigó sobre dispersión de contaminantes, para lo cual presentó un modelo de dispersión de contaminantes bidimensional donde utilizó una aproximación numérica de ecuaciones bidimensionales que rigen la dinámica de aguas rasas y dispersión de sustancias.

Desde el enfoque de la descripción del movimiento de las aguas en el el océano, en la costa peruana, en la bahía de Paracas, al sur de Perú, fue realizado un estudio mediante simulación numérica atendiendo a los forzantes como el viento, usando datos de campañas de mediciones oceanográficas y los datos entregados por la simulación numérica, para este último fueron validadas principalmente la temperatura y las corrientes marinas (Quispe, 2007).

Como parte del monitoreo ambiental acuático en el área costera del Callao en 1999 se han registrado las magnitudes de las corrientes marinas de velocidad mínima de 1.0 cm/s, máxima de 22.0 cm/s, un promedio 10 cm/s. Además,se observaron convergencia de flujos costeros proveniente del Nor-Oeste y Sur-Oeste originando un remolino frente a las playas de Márquez en el Callao (Cabello et al, 1999).

Continuando con el monitoreo de la calidad acuática en la bahía del Callao, en

2000 se realizaron nuevamente muestreos para las corrientes marinas y se reportaron que las magnitudes de velocidades de corrientes variaron de 5.5 hasta 32.9 cm/s en la superficie, en tanto que en el fondo fue 1.0 cm/s hasta 22.0 cm/s (Guzman et al, 2000).

En marzo del 2002 como parte de la evaluación ambiental en las zonas costeras del Perú, se han registrado datos para las velocidades de las corrientes en la bahía del Callao, en la cual reportaron valores en la superficie mínimo de 7 cm/s, máximo de 15 cm/s y en promedio 11 cm/s (Sánchez, 2008).

En diciembre 2011, en primavera, se realizó registros de las magnitudes de velocidades como parte de un estudio del denominado "línea base de la bahía del Callao", se efectuó en el área delimitada por las islas San Lorenzo, El Frontón y la Península de La Punta, del 21 al 30 de noviembre, con la finalidad de caracterizar aspectos biológicos y oceanográficos, así mismo, para obtener bases técnicas para el ordenamiento pesquero y acuícola (Arguelles et al, 2011).

2.2. Hidrodinámica

La hidrodinámica es el estudio de la dinámica de los fluidos en movimiento. Involucra a las corrientes marinas y a la influencia de factores como la marea, la temperatura y la salinidad en el movimiento del agua.

Las corrientes marinas del agua en el océano está relacionado con el movimiento del agua, estas son causadas por factores como el viento, la rotación de la tierra, la temperatura, la salinidad y la topografía del fondo marino, las corrientes marinas superficiales son causadas, principalmente, por el viento, mientras que las corrientes marinas profundas son causadas por la diferencia de densidades.

Las corrientes marinas pueden ser superficiales o profundas, y pueden variar en velocidad, anchura y profundidad. Algunas corrientes pueden ser permanentes, mientras que otras son temporales y cambian con las estaciones. Estas tienen una gran variedad de efectos en el medio ambiente marino, incluyendo la distribución

de nutrientes y el transporte de sedimentos y organismos marinos. También pueden afectar la navegación, la pesca y la industria marina.

Las corrientes marinas se pueden clasificar en varios tipos, como las corrientes de borde occidental, las corrientes de borde oriental, las corrientes ecuatoriales y las corrientes de rotación. Cada tipo tiene características y patrones de circulación únicos. Estas también pueden tener un impacto significativo en el clima global. Por ejemplo, la Corriente del Golfo transporta agua caliente hacia el norte del Atlántico, lo que contribuye al clima cálido de Europa occidental.

2.3. Agua, marea y viento

El agua posee varias propiedades que lo convierten en un elemento importante para la vida en los océanos y su función en diversos fenómenos físicos asociados, entre las propiedades importantes según Periañez (2010).

Viscosidad: Se presenta debido a la fuerza de rozamiento interno de los fluidos, gracias a esta el fluido puede desplazarse, el fluido se modela por capas una sobre otra, como consecuencia del esfuerzo tangencial aplicado sobre las capas de fluidos.

Tensión superficial: Es una fuerza por unidad de longitud que atrae a las moléculas de la superficie del líquido hacia el interior, hace que los líquidos adopten formas en la que la superficie exterior sea mínima. La tensión superficial es la responsable de la existencia de ondas capilares en el océano, la tensión superficial es la fuerza restauradora.

Salinidad: Es una propiedad fundamental del agua marina, se define como la fracción de masa de todos los iones presentes en una muestra de agua respecto de la masa total, un valor típico para la salinidad en el mar abierto es 35 gramos de sal por cada kilo de agua, esto se expresa usualmente en partes a por mil (ppm) o unidas practica de salinidad (psu).

Densidad: Es un parámetro que gobierna muchos procesos que tienen lugar en el océano, se defina como la razón de la masa por unidad de volumen, en el sistema internacional de unidades se expresa en kg/m^3, la densidad tiene dependencia de la salinidad, temperatura y presión a la que el agua esté sometida. La densidad del agua oceánica aumenta si aumenta la salinidad y disminuye conforme aumenta la temperatura.

Mareas: Son ondas de mayor longitud que se observan en el océano, el origen está en las variaciones de la fuerza de gravedad en la superficie del océano debido al movimiento relativo de la Tierra, el Sol y la Luna. Las mareas producen corrientes intensas en muchos lugares del mundo, lo que implica una dificultad en la navegación, las corrientes inducidas por mareas resuspenden sedimentos del fondo afectando la morfología de la costa.

Viento: El viento es el movimiento del aire en la atmósfera terrestre, generado principalmente por diferencias en la presión atmosférica. El aire siempre fluye desde áreas de alta presión hacia áreas de baja presión, y el movimiento resultante se percibe como viento.

El viento también puede ser causado por otros factores, como la rotación de la Tierra (efecto Coriolis), la topografía del terreno, la temperatura y la humedad del aire. La dirección y la velocidad del viento pueden variar significativamente en diferentes lugares y momentos, y son influenciadas por factores climáticos y geográficos, es un factor importante en muchos procesos naturales, como la circulación atmosférica, la formación de nubes y la dispersión de contaminantes en el aire.

Datos meteorológicos: Los datos meteorológicos son información cuantitativa y cualitativa que se recopila sobre las condiciones atmosféricas en un lugar y momento determinados. Estos datos pueden incluir información sobre la temperatura, la humedad, la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, la precipitación y la radiación solar, entre otros parámetros.

Los datos meteorológicos se recopilan a través de una variedad de instrumentos y métodos, incluyendo estaciones meteorológicas terrestres, satélites, boyas en el océano, aviones y globos meteorológicos. Estos datos se utilizan para predecir el tiempo y el clima, estudiar los patrones climáticos a largo plazo, y ayudar a tomar decisiones en áreas como la agricultura, la aviación, la gestión de recursos hídricos y la planificación urbana.

2.4. Modelos oceánicos de simulación

Los modelos oceánicos de simulación son herramientas computacionales que utilizan ecuaciones matemáticas complejas para simular el comportamiento del océano. Estos modelos utilizan datos de entrada de la temperatura, la salinidad, la velocidad de las corrientes y otros factores para crear una representación tridimensional del océano y su dinámica.

Los modelos oceánicos de simulación se utilizan para estudiar el clima y la circulación oceánica, así como para predecir el impacto del cambio climático en el océano y los ecosistemas marinos. También se utilizan para simular eventos como tsunamis y huracanes, y para estudiar la dispersión de contaminantes en el agua.

Estos modelos se ejecutan en computadoras y utilizan datos, tanto observados como de modelización, para producir resultados precisos. Debido a su complejidad, la creación y validación de estos modelos requiere la colaboración de expertos en diversas áreas, incluyendo la física de fluidos, la meteorología, la oceanografía y la informática.

Históricamente los inicios de la aplicación de modelos numéricos, como necesidad para describir la circulación costera comenzaron en los años setenta (1970) y que en los noventas (1990) se logra un salto importante, donde se logra el desarrollo del método de diferencias finitas, específicamente el desarrollo de esquemas denominados semi-implícitos (Páez, 2012).

Uno de los trabajos científicos más importantes en la historia de la modeliza-

ción atmosférica, fue publicado por la revista científica “Journal of the Atmospheric Sciences” en 1966. En este se presentó un nuevo enfoque para la modelización de la atmósfera terrestre, que se basaba en la discretización de las ecuaciones de movimiento de la atmósfera utilizando métodos numéricos específicos. El enfoque propuesto es conocido como la ”malla Arakawa”(Arakawa grid), fue una de las primeras soluciones exitosas para el problema de la advección de la energía en modelos numéricos de la atmósfera. Este enfoque, junto con otros métodos numéricos propuestos, se convirtió en la base de muchos modelos numéricos utilizados en la actualidad para la predicción del clima y la investigación climática (Mesinger y Arakawa, 1982).

2.5. Procesos dinámicos en la circulación del océano

En el movimiento de los cuerpos de agua están involucrados muchos fenómenos relacionados con el viento, fuerzas de atracción de la luna y el sol, cantidad de movimiento, etc.

Circulación oceánica

Según Pickard y Emery (1982), la circulación oceánica se puede dividir en dos partes, la termohalina y las componentes impulsados por el viento. Otra forma de describirlos es que la circulación oceánica se debe en parte a cambios en la densidad causados por el clima o cambios climáticos y en parte debido al estrés del viento. Así mismo el término de circulación termohalina se utiliza para referirse al movimiento del agua que tiene lugar cuando su densidad cambia por una variación de temperatura o de salinidad en una parte adecuada de su volumen.

Procesos dinámicos

Según Talley (2011), en la circulación del océano se presentan diversos mecanismos, estos impulsados por la luna, el sol, así como eventos tectónicos. Estos procesos

tienen que ver con el balance del momentum (cantidad de movimiento). El flujo de fluido en tres dimensiones está gobernado por ecuaciones que expresan el cambio de la velocidad o momentum. En cada una de las dimensiones se incluye el término aceleración la cual indica como cambia la velocidad en el transcurso del tiempo, además están presentes los términos que corresponden a la advección y a los forzantes, las ecuaciones en cada dimensión corresponden al norte, este y la vertical (arriba).

Balance de la cantidad de movimiento

El movimiento de los fluidos en tres dimensiones es gobernado por ecuaciones que expresan cambios en la velocidad (o cantidad de movimiento), uno por cada una de las tres dimensiones físicas, cada una de las tres ecuaciones incluye un término de aceleración, uno de advección y términos de forzamientos.

$$\text{(Densidad)} \times \text{(Aceleración + Advección)} = \text{Fuerzas por unidad de volumen} \quad (2.1)$$

Esta ecuación es válida para cualquier tipo de fluido, ya sea compresible o incompresible. Sin embargo, la forma específica en que se aplica y resuelve la ecuación puede variar según el tipo de fluido y las condiciones de un problema específico.

A su vez las fuerzas sobre la masa distribuida (densidad de masa) se expresa por la ecuación que incluye efectos de la presión, de la fuerza gravitatoria y de los efectos de fricción.

$$\text{Fuerza por unidad de volumen} = \text{Fuerza gradiente de presión} + \text{gravedad} + \text{fricción} \quad (2.2)$$

Estas ecuaciones para cada una de las direcciones este, norte, y la vertical (arriba).

La fricción a la que se hace referencia es la "fricción viscosa.º "fricción fluida". Esta fricción se debe a la viscosidad del fluido y se describe en términos de la viscosidad del fluido y las derivadas de la velocidad del fluido con respecto a la

posición en el espacio.

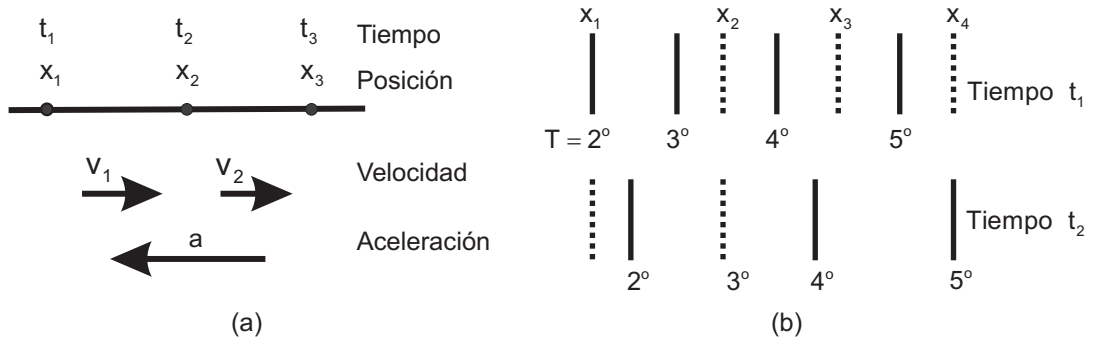


Figura 2.1: (a) Fuerzas debido a la aceleración, (b) Fuerzas de advección. Fuente: Talley (2011)

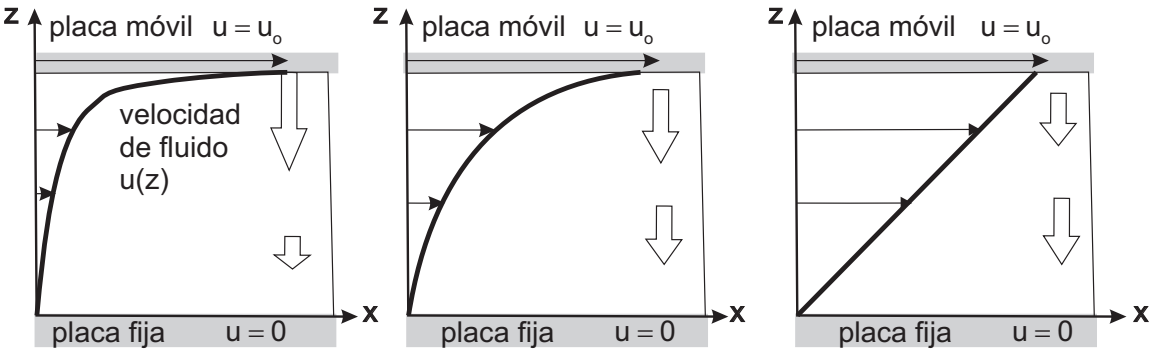


Figura 2.2: Fuerzas debido a la fricción. Fuente: Talley (2011)

Aceleración y advección

La aceleración como cambio de la velocidad en el tiempo, expresada en coordenadas cartesianas como $\mathbf{u} = (u, v, w)$, donde u, v, w son las velocidades en las direcciones positivas hacia el este (dirección x), hacia el norte (dirección y) y hacia arriba (dirección z) respectivamente. Entonces las velocidades son

$$u = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \tag{2.3}$$

$$v = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \tag{2.4}$$

$$w = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \tag{2.5}$$

Siendo la velocidad zonal (u), meridional (v) y vertical (w) respectivamente.

La advección, indica como el flujo cambia a las propiedades tales como temperatura, salinidad y los vectores velocidad. La advección puede cambiar la propiedad de flujo si hay un gradiente en la propiedad a través del cual el fluido se mueve. En la ecuación del momento en la dirección x, el término de advección es

$$advec_x = u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial w} \tag{2.6}$$

La derivada es la suma de los términos de aceleración y advección, es decir

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} \tag{2.7}$$

Fuerzas gradiente de presión y fuerza gravitacional

El flujo del fluido debido a la variación espacial en presión es también descrito matemáticamente como el gradiente de presión

$$\mathbf{grad\ p_x} = -\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}}$$

La fuerza gravitacional entre la tierra y el objeto o paquete de fluido se dirige hacia el centro de masa de la tierra, esto es

$$fuerza\ gravitacional\ por\ unidad\ de\ volumen = -\rho g$$

Fuerza centrífuga y de Coriolis

La fuerza centrífuga es una fuerza aparente hacia afuera sobre una masa en rotación, como la tierra gira alrededor de un eje fijo (su propio eje), la dirección de la fuerza centrífuga está hacia afuera alejándose del eje fijo opuesta a la gravedad en

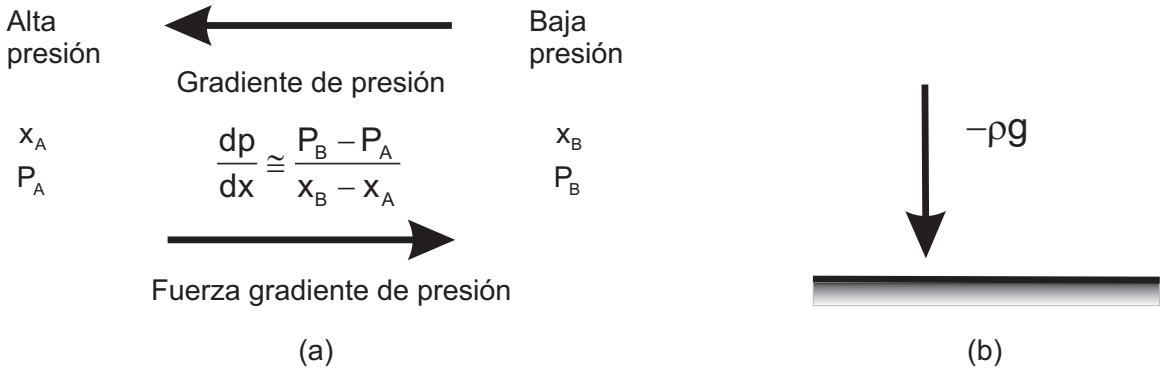


Figura 2.3: (a) Fuerzas gradiente de presión, (b) fuerza de gravedad. Fuente: Talley (2011)

el ecuador, en los polos esta fuerza es nula. La fuerza centrípeta es la fuerza interna necesaria para mantener una masa en movimiento en línea recta hacia el eje fijo de la tierra, su magnitud es igual a la magnitud de la fuerza centrífuga. La fuerza centrípeta es real en tanto que la fuerza centrífuga es solo aparente. La expresión matemática para la aceleración centrífuga está dada por la razón entre la fuerza y la densidad

$$a_c = \Omega^2 r \tag{2.8}$$

Donde Ω es la tasa de rotación de la tierra expresado por la razón $2\pi/T$, siendo T la duración de un día, y r es el radio de la tierra, aproximadamente 6400 km.

La fuerza de Coriolis no es cero solamente si el cuerpo está en movimiento, y es importante si el cuerpo viaja a través de un periodo de tiempo significativo.

$$momento_x : -2\Omega \, sen\psi \, v = -fv \tag{2.9}$$

$$momento_y : 2\Omega \, sen\psi \, u = fu \tag{2.10}$$

$$parametro\, de\, Coriolis : f = 2\Omega \, sen\psi \tag{2.11}$$

Fuerza viscosa o disipación. Los fluidos tienen procesos moleculares viscosos que suaviza las variaciones de velocidad y reduce la velocidad del flujo en general. Estos procesos moleculares son muy débiles, por lo que los fluidos a menudo pueden ser tratado, teóricamente, como no viscoso en lugar de viscoso. Sin embargo, se

observa que fluidos turbulentos como en el océano y la atmósfera en realidad actúan como si la viscosidad efectiva fuera mucho mayor que la viscosidad molecular.

2.6. Temperatura y salinidad

Las ecuaciones de evolución para la temperatura, la salinidad y la ecuación de estado que relaciona la densidad, salinidad, temperatura y presión, por consiguiente, una evolución para la densidad lo describe el flujo de fluido para el océano.

El siguiente conjunto completo de ecuaciones describe el estado físico del océano.

$$\begin{aligned}\frac{Du}{Dt} - fv = \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} - fv \\ = -(\frac{1}{\rho})(\frac{\partial p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x}(A_H\frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_H\frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_v\frac{\partial u}{\partial z})\end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}\frac{Dv}{Dt} + fu = \frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} + fu \\ = -(\frac{1}{\rho})(\frac{\partial p}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x}(A_H\frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_H\frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_v\frac{\partial v}{\partial z})\end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned}\frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} \\ = -(\frac{1}{\rho})(\frac{\partial p}{\partial z}) - g + \frac{\partial}{\partial x}(A_H\frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_H\frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_v\frac{\partial w}{\partial z})\end{aligned} \quad (2.14)$$

A_H y A_v son coeficientes de difusión de momentum horizontal y vertical, respectivamente, se utilizan para modelar la difusión de la cantidad de movimiento en el fluido en las direcciones horizontal y vertical. Sus valores característicos dependen de las propiedades del fluido y las condiciones específicas del flujo en el que se aplique.

Cuando los valores de A_H y A_v son pequeños en comparación con las escalas de longitud y tiempo del flujo, el flujo se considera predominantemente laminar, caso contrario se considera el flujo turbulento.

La ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \tag{2.15}$$

Donde ρ es la densidad del agua, u, v, w son las velocidades en las direcciones x, y, z respectivamente

Ecuación de temperatura La temperatura se cambia calentando, enfriando, y difusión. La salinidad se cambia por adición o remoción de agua dulce, que altera la dilución de las sales. Luego se calcula la densidad a partir de la temperatura y la salinidad utilizando la ecuación del estado del agua de mar.

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_H}{\rho c_p} + \frac{\partial}{\partial x}(k_H \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_H \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_H \frac{\partial T}{\partial z}) \tag{2.16}$$

El parámetro κ_H es el coeficiente de difusividad térmica horizontal en la dirección x. Indica cuán efectiva es la difusión horizontal de temperatura en el fluido.

la ecuación de salinidad

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + u\frac{\partial S}{\partial x} + v\frac{\partial S}{\partial y} + w\frac{\partial S}{\partial z} = Q_S + \frac{\partial}{\partial x}(\kappa_S \frac{\partial S}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\kappa_S \frac{\partial S}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\kappa_S \frac{\partial S}{\partial z}) \tag{2.17}$$

Donde Q_S es la fuente o sumidero de salinidad por unidad de masa, κ_s es el coeficiente de difusividad salina. Este coeficiente es una medida de cuán eficaz es el proceso de difusión de salinidad en el fluido. Cuanto mayor sea el valor de κ_S, más rápida será la difusión de la salinidad en el fluido.

2.7. Métodos para la solución numérica de las ecuaciones de movimiento

La solución de ecuaciones de movimiento, se realizan en la mayoría de los casos usando el método de punto de cuadrícula (grid point method) en este método una serie de puntos es introducida en una región de interés y las variables dependientes son inicialmente definidas y después calculado en dichos puntos. Los puntos introducidos se denominan cuadrícula (grid) aunque también se utilizan con frecuencia los términos malla (mesh), enrejado (lattice). Es necesario tener los puntos de la cuadrícula en una ubicación fija en la horizontal, esto significa que según el sistema Euleriano de ecuaciones. Las coordenadas de espacio y tiempo se eligen como variables independientes.

Con este método, la forma más común de resolver las ecuaciones que gobiernan es encontrar aproximadamente expresiones para las derivadas que aparecen en las ecuaciones. Estas expresiones aproximadas son definidas usando los valores de las variables dependientes en los puntos de la cuadrícula y en intervalos de tiempo discretos por lo tanto, se forman usando diferencias de variables dependientes en intervalos de tiempo y espacio finitos, por esa razón este enfoque se llama método de diferencias finitas (Mesinger y Arakawa, 1982).

2.7.1. Métodos de diferencias finitas

Para la descripción de la dinámica del océano es necesario expresarlas a través de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, estas permiten describir la evolución temporal de las propiedades del agua como la temperatura, salinidad densidad. Es necesario transformar las ecuaciones diferenciales, para ser utilizadas por una computadora en forma discreta, entonces así se transforman en ecuaciones algebraicas a partir de las cuales se pone énfasis despejando la magnitud de interés. Un método para conseguir ello son las diferencias finitas. También está el método de elementos finitos y el método espectral.

Consideremos una función diferenciable $f(x)$, para el cual se puede desarrollar la serie de Taylor.

$$f(x+h) = f(x) + hf' + \frac{h^2}{2}f'' + O(h^3) \tag{2.18}$$

$$f(x-h) = f(x) - hf' + \frac{h^2}{2}f'' + O(h^3) \tag{2.19}$$

Donde h es una pequeña cantidad, f',f'' son la primera y segunda derivada de la función f, $O(h^3)$ es la aproximación de orden tres, se desprecian los términos de orden superior.

Diferencia hacia adelante y hacia atrás: De las ecuaciones 2.18 y 2.19, se obtiene, la siguiente ecuación denominada diferencia hacia adelante la cual tiene una aproximación de orden uno.

$$f' = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} + O(h) \tag{2.20}$$

De la misma forma la ecuación denominada diferencia hacia atras

$$f' = \frac{f(x) - f(x-h)}{h} + O(h) \tag{2.21}$$

De las ecuaciones 2.20 y 2.21 restando se obtiene una nueva ecuación, ahora pasa a tener una aproximación de orden dos.

$$f' = \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} + O(h^2) \tag{2.22}$$

De las ecuaciones 2.20 y 2.21 sumando se obtienen también una nueva ecuación, la cual ahora pasa a tener una aproximación de orden dos.

$$f'' = \frac{f(x+h) + f(x-h) - 2f(x)}{h^2} + O(h^2) \tag{2.23}$$

2.8. Procesos de mezcla hidrodinámica

En el comportamiento de mezcla de cualquier descarga de aguas residuales, se rige por la interacción de las condiciones ambientales.

Las condiciones ambientales en el cuerpo de agua receptora como lagos, ríos, embalses, estuarios y aguas costeras, son descritas por la geometría de los cuerpos de agua y las características dinámicas.

Las características dinámicas vienen dadas por la velocidad y distribución de densidades en el cuerpo de agua, sobre todo en la vecindad de la descarga. En muchos casos, estas condiciones pueden tomarse como estado estacionario con poca variación, porque la escala de tiempo para los procesos de mezcla es usualmente del orden de minutos, hasta posiblemente una hora. En algunos casos los flujos son influenciado por las mareas. La dilución efectiva de la pluma de descarga puede reducirse cuando las condiciones son tipo estacionario.

Las condiciones de descarga se relacionan con las características geométricas y el flujo del emisario sumergido. Las características de flujo vienen dadas por el caudal de descarga. También se presenta el flujo de flotabilidad que representa el efecto de la diferencia de densidad relativa entre la descarga de efluentes y el ambiente.

La hidrodinámica de descarga continua de un efluente (fluido que emana de una fuente) en un cuerpo de agua receptor se puede conceptualizar como un proceso de mezcla (Jirka et al, 2002).

2.9. Emisor submarino

Un emisor submarino es una tubería que conduce las aguas residuales desde la tierra hacia el mar y que cuenta con uno o varios puntos de descarga que aseguren la dispersión del agua en el entorno marino de tal forma que no represente un riesgo para el medio ni para la salud humana. Por otro lado, la ubicación de los emisores submarinos es un problema, para ser colocados requieren áreas con una circulación

apreciable, pues si se colocan en ubicaciones donde se registran poca circulación de agua como las bahías y estuarios, existe el riesgo que los contaminantes se concentren en los alrededores. Los efectos de las descargas de aguas residuales se presentan para la salud humana, en la parte estética, así como sobre la ecología marina (Bravo, 2002).

Los emisarios o emisores submarinos se utilizan para descargar el líquido que ha pasado por un proceso de tratamiento de residuos. No todos los contaminantes en los desechos líquidos pueden eliminarse mediante tratamiento, el emisario diluye eficazmente los residuos vertidos que luego reduce sustancialmente la concentración de contaminantes en las aguas residuales, en consecuencia esto reduce el riesgo para la flora y la fauna y los usuarios humanos del medio marino.

Emisor submarino Taboada:

El Estado peruano, a través de Sedapal (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima), ha desarrollado diversos proyectos y obras de gran envergadura a fin de eliminar la descarga de desagües crudos al medio ambiente. El proyecto más importante es la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Taboada, cuya entrada en funcionamiento permite solucionar el problema sanitario originado por el vertido de aguas residuales sin tratamiento alguno al mar y al río Rímac y representa el inicio de la descontaminación del mar peruano. Previamente a su entrada en servicio sólo se trataba el 16 % de las aguas residuales generadas en la capital, con algunas plantas convencionales y lagunas de oxidación (Tedagua, 2014).

Características:

Con un caudal medio de 14 m^3/s y máximo de 20 m^3/s, se ha convertido en la mayor planta depuradora construida hasta la fecha en Sudamérica. Da servicio a una población de más de 4, 1 millones de habitantes equivalentes, que representa el 56 % de la población de Lima y Callao y el 72 % de las aguas residuales de ambas ciudades. La planta consta inicialmente de bombeo de agua bruta, pre tratamiento con rejas de gruesos, tamizado de 6 mm, desengrasado-desarenado y tamizado fino de 1 mm, está contemplada la futura ampliación hasta incluir el tratamiento terciario

del efluente. Una vez tratada, el agua es enviada mediante un emisario submarino de tubos de polietileno de alta densidad de 3 m de diámetro a casi 4 km de la costa (www.grupocobra.com/proyecto).

El emisario tiene 3 910 m de longitud, 402 m terrestres y 3 508 m submarinos. Se realizó con tubería de polietileno de alta densidad de 3 m de diámetro, para un caudal máximo de 20 m^3/s.

Según Pita, Sánchez, y Sierra (2011), el tramo difusor tiene una longitud de 1000 m, con un diámetro interior que se va reduciendo. Es por ello que los primeros 340 m tienen un diámetro interior de 3 m, los siguientes 330 m tienen un diámetro de 2.4 m y los 330 m de 1.8 m. Con 250 difusores localizados cada 4 m.

2.10. El modelo ELCOM

ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) es un modelo hidrodinámico tridimensional para lagos y embalses, y se utiliza para predecir la variación de la temperatura y la salinidad del agua en el espacio y el tiempo (Hodges y Dallimore, 2014).

ELCOM es una herramienta para modelamiento numérico que permite simular la hidrodinámica y termodinámica de cuerpos de agua con estratificación temporal, con forzantes medioambientales. El modelo de simulación hidrodinámica resuelve la inestabilidad para flujos incompresibles usa las ecuaciones de Navier-Stokes asumiendo presión hidrostática. El modelo incluye respuestas baroclínicas y barotrópicas, efectos de rotación, forzamiento de mareas, estrés debido al viento (la suma de señales periódicas que afectan un dominio costero), forzamiento térmico superficial, entradas y salidas de flujo, transportes de sales, calor y escalares pasivos (Hodges y Dallimore, 2007).

Consideraciones hidrodinámicas

El modelo tiene en su estructura implementaciones de las ecuaciones que son utili-

zadas para el transporte tridimensional y la temperatura superficial, así como para el transporte de cantidad de movimiento, continuidad, condiciones de borde en la superficie libre como en el fondo y los lados, transporte de escalares, condiciones de frontera para escalares, evolución de la superficie libre, cizalladura del viento en la superficie libre y cantidad de movimiento debido a la acción del viento.

Limitaciones en el paso de tiempo

El modelo es incondicionalmente estable para flujos puramente barotrópicos; es decir, van a producir resultados numéricos estables para cualquier tamaño de intervalo de tiempo. Sin embargo, para los flujos estratificados, utiliza explícitamente discretización de los términos baroclínicos en la ecuación de momento que conduce a una restricción de paso de tiempo basada en la condición de onda interna Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), por lo que es necesario que se cumpla la condición de estabilidad:

$$(g')^{1/2}\frac{\Delta t}{\Delta x} = \sqrt{2} \tag{2.24}$$

El término de la izquierda se define como el número CFL baroclínico (CFL_b), donde g es la gravedad reducida debido a la estratificación, D es la profundidad efectiva y $\sqrt{g'D}$ es la aproximación de la velocidad de una onda interna, Δt es el paso de tiempo. La estabilidad baroclínica es la condición más restrictiva en la densidad del flujo estratificado. El intervalo de tiempo máximo permitido es

$$\Delta t < \frac{CFL\Delta x}{U} \tag{2.25}$$

Donde U se toma como la velocidad horizontal del agua (Hodges y Dallimore, 2014).

Sistema de coordenadas espaciales en el modelo

La batimetría generalmente es presentada como la distancia vertical desde una línea base horizontal, usualmente es la altura media del agua y puede ser positiva hacia arriba o positiva hacia abajo, en la Figura 2.4 la dirección vertical positiva. El modelo ELCOM utiliza la convención (x, y, z) que sigue la regla de la mano derecha y z en la dirección vertical positiva hacia arriba.

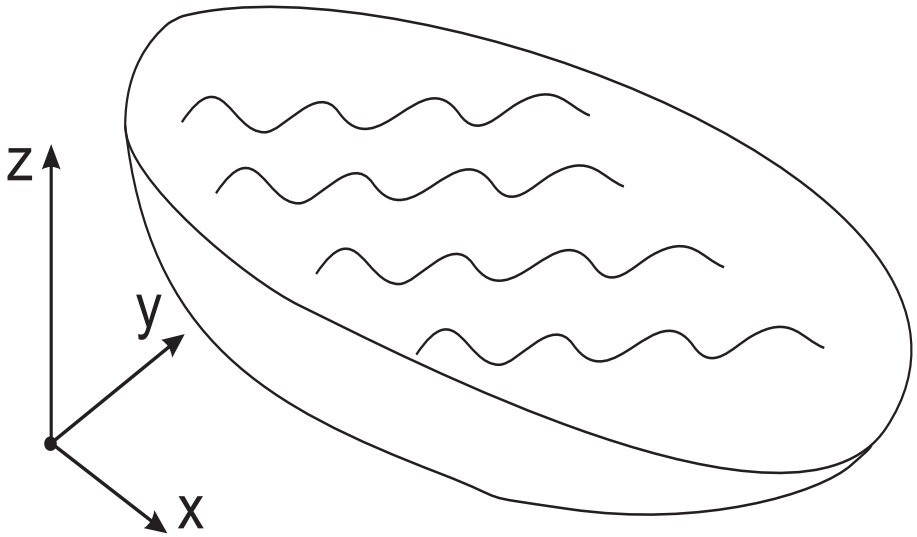


Figura 2.4: Sistema de coordenadas para la batimetría. Fuente: Hodges y Dallimore (2007)

Posición geográfica

Para la simulación se utilizan la posición geográfica como latitud, longitud y altitud. La longitud y la altitud no tienen efecto sobre la simulación, pero la longitud es utilizada para geo-referenciar la salida de datos. La latitud es utilizada para proveer apropiadamente los forzantes Coriolis. Las latitudes norte son todas positivas en tanto que las latitudes sur son negativas.

Formato de almacenamiento para resultados de una simulación

La simulación genera una gran cantidad de información numérica, los cuales deben ser almacenados en Network Common Data Form (NetCDF), el cual es un conjunto de bibliotecas de software y formatos de datos autodescriptivos e independientes de la máquina que admiten la creación, el acceso y el intercambio de datos científicos orientados a matrices. NetCDF fue desarrollado y se mantiene en Unidata, que es una comunidad diversa de instituciones educativas y de investigación con el objetivo común de compartir datos geo científicos y las herramientas para acceder y visualizar esos datos (https://www.unidata.ucar.edu). Unidata proporciona datos y herramientas de software para su uso en la educación e investigación en geociencias.

Capítulo 3

Metodología de la Investigación

La investigación utiliza un modelo de simulación computacional oceánica, específicamente, ELCOM, que permite la configuración de parámetros para regiones de interés, y da como resultados valores numéricos que corresponden a variables de la hidrodinámica.

La investigación es aplicada ya que permite conocer la funcionalidad del modelo utilizado en la región de interés sobre el comportamiento hidrodinámico de la región de estudio.

La región de estudio corresponde a la bahía del Callao con la presencia del emisor submarino Taboada.

3.1. Preparación de datos de entrada para el modelo de simulación

Se establecen una secuencia de actividades que comienzan con los datos de batimetría de la región de estudio, tratamiento de estos datos para que sea la información de entrada para el modelo, luego configurar las condiciones de contorno, realizar el preprocesamiento para finalmente ejecutar la simulación.

3.1.1. Datos de batimetría

Los datos de batimetría corresponden a la costa del Callao, estos datos originalmente en la estructura longitud, latitud y profundidad (x, y, z) son preparados para ingresar al modelo ELCOM, ello requiere la conversión a una representación bidimensional, a partir del cual se representa la región de interés para la simulación. Los datos de batimetría fueron obtenidos desde ETOPO (Elevation and Topography) de NOAA National Centers for Environmental Information (2022), luego mediante interpolación fue adecuada para la región de estudio.

En la Figura 3.1, se muestra la representación bidimensional, luego de ser procesada y quedar listo como dato de entrada para el modelo ELCOM.

Un metro es la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre, entonces como el meridiano terrestre mide 40 000 000 metros o 40 000 km, el meridiano terrestre es 360° (un círculo), por lo que un grado de latitud = Longitud meridiano [km]/360°

$$1 \text{ grado latitud} = \frac{40\,000 \text{ km}}{360^o} = 111.1 \text{ km}$$

La batimetría para su ingreso al modelo lo hace en forma de matriz de profundidades organizadas en filas y columnas. Las celdas que corresponden a tierra firme se designan con un código numérico 999, las fronteras abiertas con 888.

El conjunto de celdas para aplicar límites designa el agrupamiento lógico de las celdas de la cuadrícula sobre las cuales las condiciones de contorno se asignan en ELCOM. Un conjunto de puntos puede tener un flujo de entrada por ejemplo un río, otro conjunto puede tener una toma de presa, otro conjunto puede representar flujos de agua subterránea.

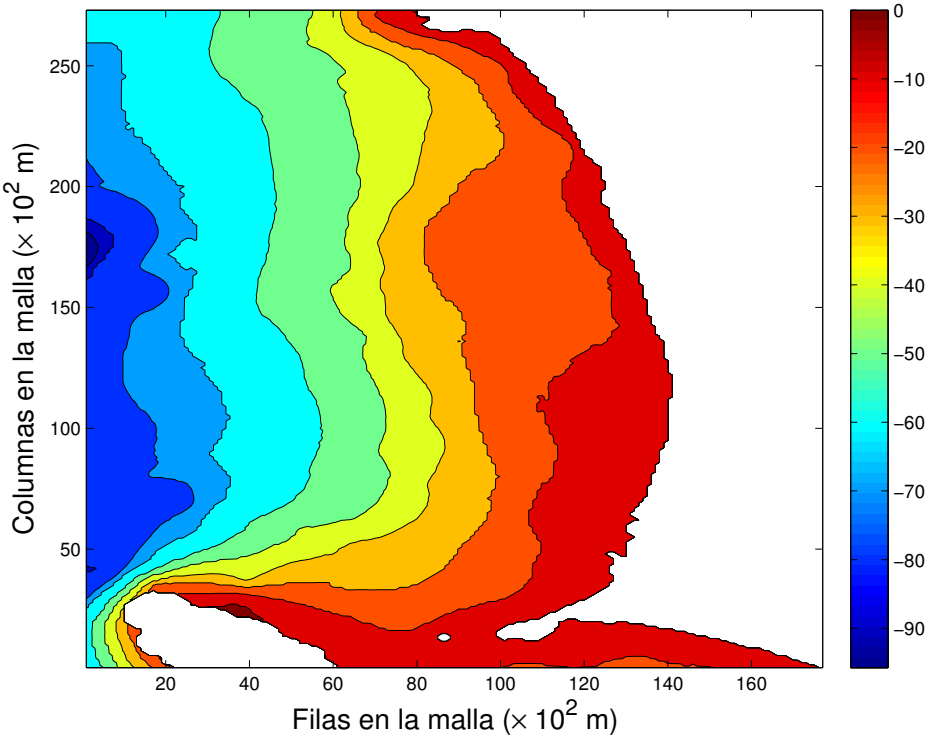


Figura 3.1: Representación de la batimetría para la región de interés en el modelo ELCOM, en términos de filas (horizontal) y columnas (vertical) en la malla de simulación, las profundidades tiene unidades de metro, desde 0 m hasta 90 m.

3.1.2. Datos meteorológicos y nivel del mar

Los datos meteorológicos necesarios son el tiempo, velocidad de viento, dirección de viento, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica y precipitación. Para la investigación los correspondientes a radiación solar y precipitación de acuedo a los datos obtenidos tienen valor cero.

Los datos meteorológicos fueron obtenidos desde el servicio web Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Versión 2 (MERRA-2), que ofrece series temporales de temperatura, humedad relativa, presión a 2 m de altura sobre el nivel del suelo, velocidad y dirección del viento a 10 m, (accedido a través del sitio web https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/)

La información estadística sobre velocidad de viento, dirección de viento, temperatura del aire, humedad relativa se muestran en la Tabla 3.1.

Para el viento la magnitud mínima fue de 0.65 m/s y una magnitud máxima de

Variable	Min.	Máx.	Media	Mediana
Velocidad de viento (m/s)	0.65	6.69	3.69	3.70
Dirección del viento (^{o})	121.82	235.52	183.13	182.72
Temperatura del aire (^{o} C)	16.19	22.97	19.44	18.94
Humedad relativa (%)	0.59	0.91	0.76	0.79
Presión atmosférica (Pa)	94436.00	94999.00	94697.97	94700.00

Tabla 3.1: Estadísticas de los datos meteorológicos, mayo de 2016. Datos obtenidos desde MERRA-2

6.69 m/s, la magnitud de la velocidad media fue de 3.69 m/s. En la Figura 3.2 se muestra la evolución de la magnitud de la velocidad para el mes de mayo de 2016.

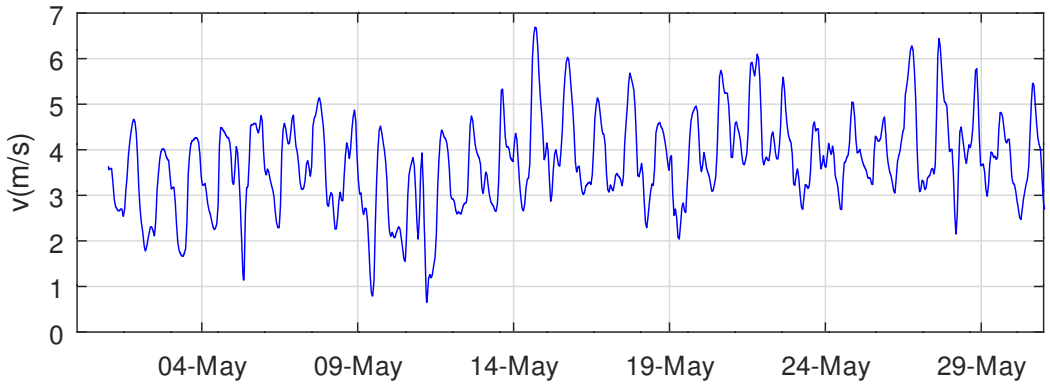


Figura 3.2: Comportamiento de la magnitud de la velocidad del viento, mayo de 2016. Datos MERRA-2

La dirección del viento tiene valor mínimo 121.82^o y máximo de 235.2^o y una media de 183.13^o. En la Figura 3.3 se muestran como estas direcciones cambian durante el mes de mayo de 2016.

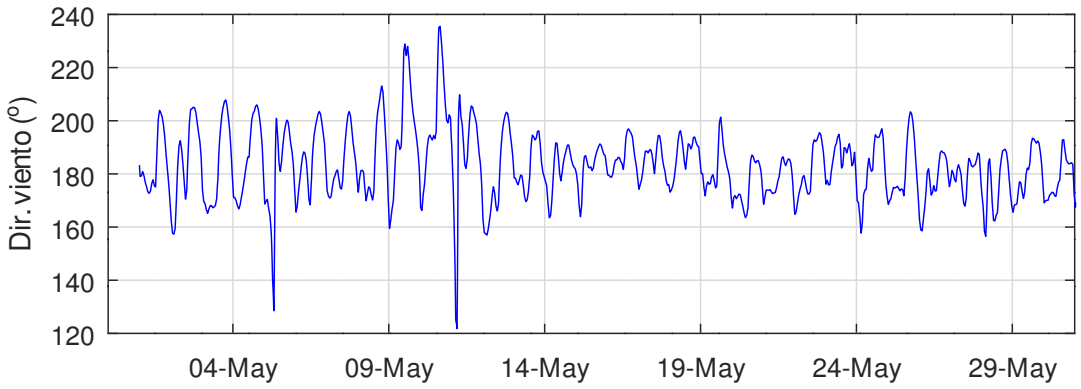


Figura 3.3: Cambios en la dirección del viento, mayo de 2016. Datos MERRA-2

La temperatura mínima del aire fue de 16.90^oC y la máxima de 22.97^oC y una media de 19.44^oC,. En la Figura 3.4 se muestra la variación durante el mes de mayo de 2016.

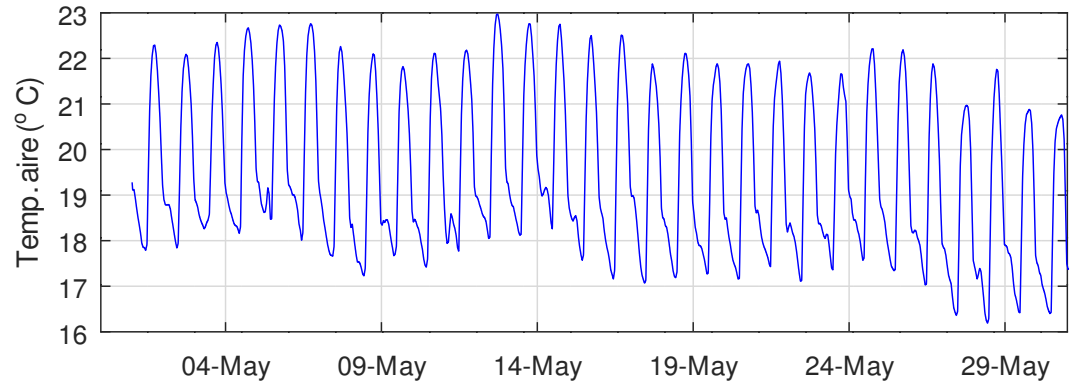


Figura 3.4: Variación de la temperatura del aire, mayo de 2016. Datos MERRA-2

La humedad relativa mínima es 0.59, y la máxima es 0.91 y la media 0.76. En la Figura 3.5 se muestran los cambios de esta magnitud durante el mes de mayo de 2016.

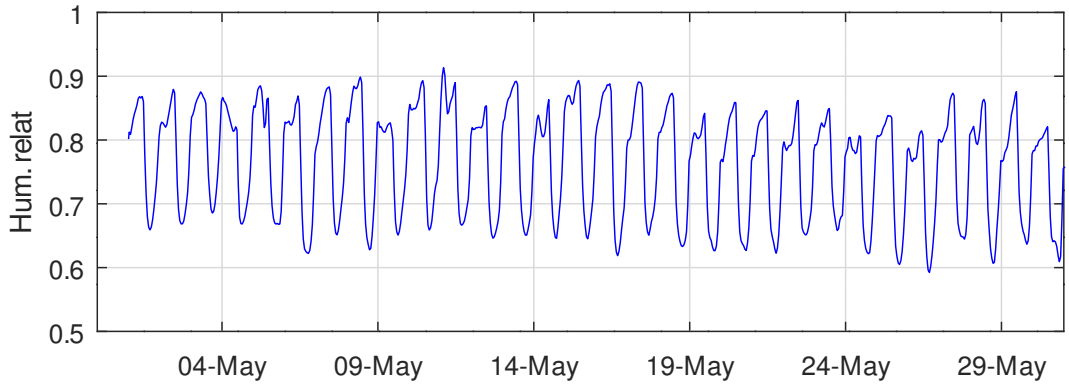


Figura 3.5: Comportamiento de la humedad relativa, durante mayo de 2016. Datos MERRA-2

Para la presión atmosférica su valor mínimo es 94436.00 Pa, y el valor máximo es 94999.00 Pa y la media 94697.97 Pa. En la Figura 3.6 se muestran los cambios de esta magnitud durante el mes de mayo de 2016.

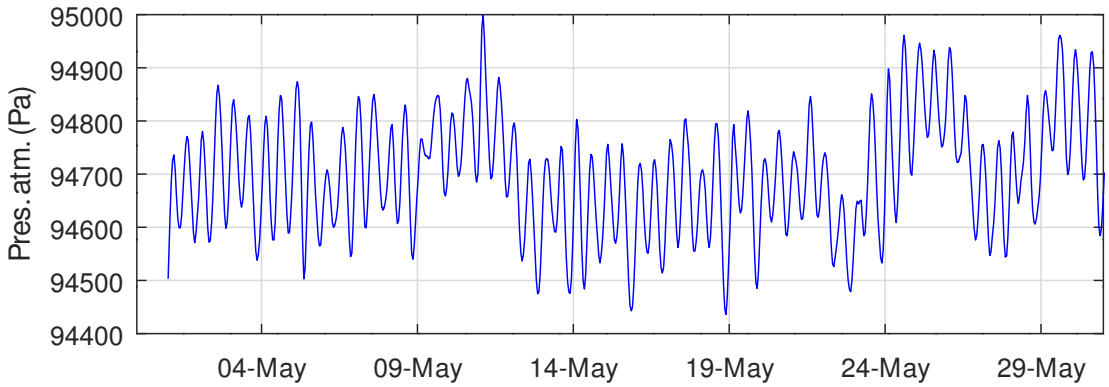


Figura 3.6: Varciación de la presión atmosférica, durante mayo de 2016. Datos MERRA-2

Los datos de marea para la investigación corresponde al mes de mayo de 2016. Los datos fueron obtenidos de Sealevel Station Calatog (SSC), para la costa del Callao, con frecuencia de registro de una hora. En la Figura 3.7 se muestra la serie de tiempo para la marea.

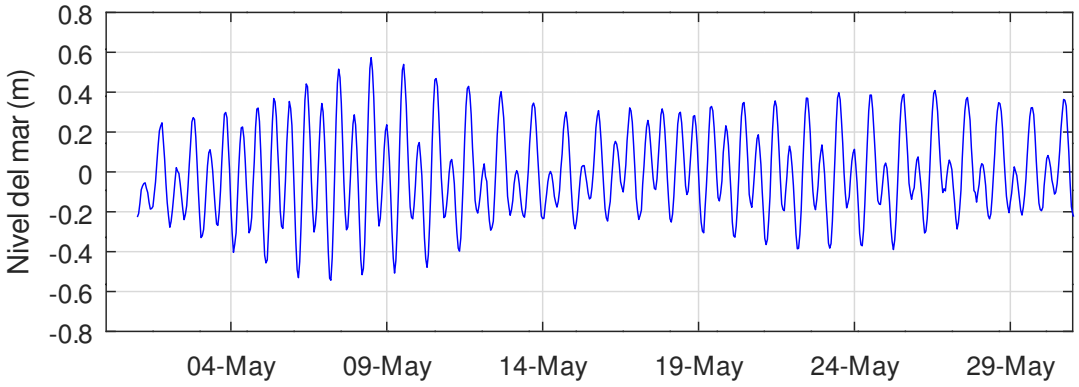


Figura 3.7: Datos de marea mayo de 2016. Fuente: Sealevel Station Catalog (SSC)

3.1.3. Tiempo Juliano

Los datos meteorológicos provenientes de las estaciones, usualmente reportan el tiempo en el formato dd-mm-yy (día,mes,año) ó mm-dd-yy (mes, día, año) y las horas en el formato HH:MM:SS (horas, minutos segundo). El modelo de simulación utiliza el formato de tiempo Juliano.

Estructura del tiempo Juliano: Los datos de tiempo para el modelo de simulación, requiere el formato de tiempo Juliano, el cual está expresado indicando el año seguido de las fracciones de días transcurridos desde el primer día del primer mes del año.

Por ejemplo el primero de enero del 2013, a las cero horas con cero minutos (01-Ene-2013 00:00)

$$\text{01-Ene-2013 00:00} = 2013001.000$$

La medida del tiempo usual convertido al formato Juliano para el modelo, posee al inicio cuatro dígitos que indican el año (2013), los siguientes tres dígitos indican el número de días transcurridos dese el 1 de enero, $001, 002, \ldots, 365$, y los dígitos después del separador decimal, indican las fracciones de día.

Conversión a tiempo Juliano: Si tenemos las fecha en el formato dd-mm-yyyy (dia, mes, año) y las horas es el formato $HH : MM : SS$ (Hora, minuto, segundo)

La cantidad de días acumulados desde el 1 de enero de cada año se muestra en la Tabla 3.2, finalizado enero se tienen 31 días acumulados, finalizado febrero se tienen 59 días acumulados, etc. En caso de año bisiesto se adiciona el día correspondiente al mes de febrero.

Mes	Ene.	Feb.	Mar	Abr.	May.	Jun.	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
mm.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ndd.	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Acum.	31	59	90	120	151	181	212	243	273	304	334	365

Tabla 3.2: Número de días por cada mes transcurrido, según tiempo Juliano.

$$\text{DJ} = \text{yyyy*1000+[(mm-1)+1]+(dd-1)} + \frac{\text{HH}}{24} + \frac{\text{MM}}{24 * 60} + \frac{\text{SS}}{24 * 3600}$$

Símbolo	Descripción
yyyy	Número que representa el año.
mm	Número de mes contado respecto de enero.
dd	Número de día respecto del mes
HH	Número de horas respecto del día
MM	Número de minutos respecto del día
SS	Número de segundos respecto del día

Tabla 3.3: Símbolos en la representación de fecha y hora

En la fórmula para el día juliano DJ, el caso $(mm - 1)$ puede tomar los valores entre 1 y 12, dependiendo del valor asumido se reemplaza por el número de días acumulados según la Tabla 3.2.

En la ecuación para DJ, el término [(mm-1)+1]. Si el mes abril mm=4, entonces mm-1=3, de la Tabla 3.2, le corresponde el número de días acumulados 90 y sumando +1, finalmente le corresponde 91 días.

3.1.4. Rosa de viento

Una rosa de los vientos indica los rumbos en que se divide la circunferencia del horizonte y estos son: este (E), oeste (W), norte (N) y sur (S).

La rosa de vientos indica rumbos, que son direcciones dados por los puntos cardinales, cada uno de los cuales corresponde a un valor numérico o ángulo expresado en grados sexagesimales. Se divide la circunferencia en cuatro cuadrantes, cada uno de 90°, el valor 0° ó 360° coincide con la dirección norte (N). Los ángulos se incrementan en el sentido horario. En la Figura 3.8, se muestran cuatro direcciones en cada cuadrante, los datos utilizados contienen alguna de las dieciséis direcciones. En la Tabla 3.4 se muestran los ángulos correspondientes a cada dirección según el sentido convencional. La rosa de vientos se utiliza para marcar el rumbo del viento, el número de puntas puede variar entre 4 y 32, cada punta corresponde a los rumbos, esta última indica la cantidad de direcciones de viento, así para 16 puntas se conoce como medios vientos. Una estación meteorológica reporta usualmente medios vientos.

Cada punta de la rosa de vientos indica por donde ingresa el viento, así si la dirección es 180° indica que el viento entra desde el sur.

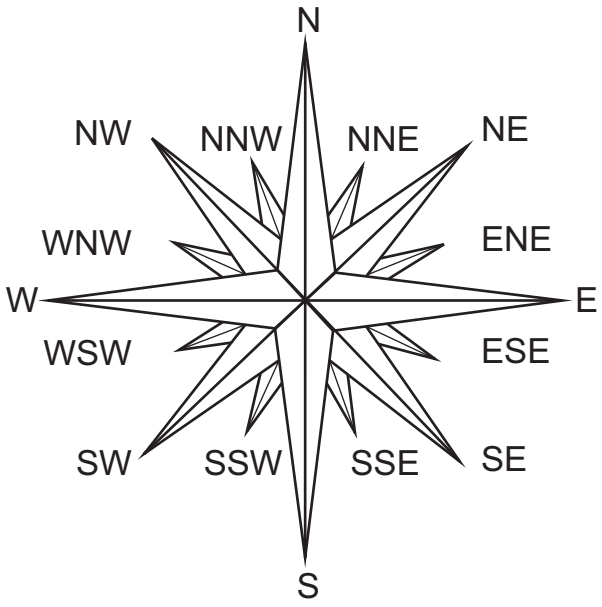


Figura 3.8: Rosa de viento de 16 puntas. (Fuente: Elaboración propia)

Código	Dirección (^{o})	Código	Dirección (^{o})
N	0.0	S	180.0
NNE	22.5	SSW	202.5
NE	45.0	SW	225.0
ENE	67.5	WSW	247.5
E	90.0	W	270.0
ESE	112.5	WNW	292.5
SE	135.0	NW	315.0
SSE	157.5	NNW	337.5

Tabla 3.4: Direcciones según rosa de vientos, para los datos MERRA-2.

3.2. Malla de simulación

La malla de simulación es mostrada en la Figura 3.9, en la cual se muestra una disposición tridimensional de celdas.

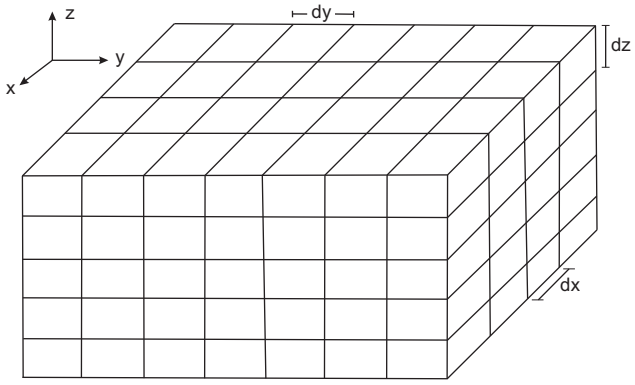


Figura 3.9: Malla de la simulación numérica

Distancia entre nodos de malla: La malla tiene celdas rectangulares, dx en el horizonte, dy en la vertical, para este caso se ha considerado $dx = dy = 100$ m. Donde x es el número de filas, y el número de columnas, z el número de capas, se ha establecido $x = 197$ filas, $y = 275$ columnas, $z = 31$ capas verticales.

En la separación de malla se ha considerado regiones de tamaño homogéneo, es decir cuadrículas de 100 m de lado. a lo largo de las filas $xgridsize = 100$ y a lo largo de las columnas $ygridsize = 100$ m

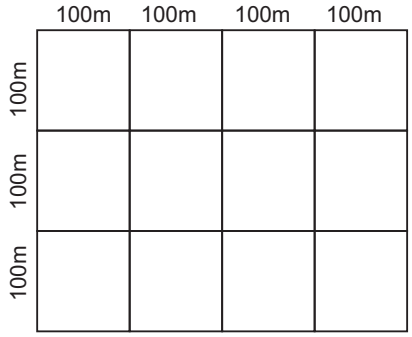


Figura 3.10: Tamaño de malla considerado en la simulación numérica. (Fuente: Elaboración propia.)

3.2.1. Capas verticales

Para obtener un corte en la localización del emisor submarino, fue importante considerar en la entrada de batimetría que el número de capas verticales seleccionada sea 31, esto considerando que el emisor submarino en su parte inicial tiene una profundidad de alrededor de 9.22 m y en la parte final alrededor de 13.72 m.

El número capas se distribuyó de la siguiente forma, 20 capas de 1 m, 5 capas de 2 m, 2 capas de 5 m, 2 capas de 10 m y 2 capas de 20 m, sumando en total 100 m en la profundidad, esto cumple el requisito para entrada en el modelo ya que la mayor profundad de la malla tridimensional de simulación es de 90 m. La suma de las longitudes de las capas verticales debe superar a la profundidad mayor de la malla de simulación para que sea posible la ejecución, caso contrario el modelo no ejecuta. En Apéndice B se muestra el detalle de las capas verticales.

Nro capas	Paso espacial dz (m)	Total z(m)
20	1	20
5	2	10
2	5	10
2	10	20
2	20	40

Tabla 3.5: Distribución de capas verticales en el dominio de simulación, en total suma 100 m de profundidad.

Condiciones de frontera: En las fronteras abiertas (lados) así como en la superficie y el fondo, las velocidades iniciales son cero de acuerdo a la solución utilizada por el modelo: $U_i = 0$. En el Apéndice A, se muestran las ecuaciones hidrodinámicas del modelo ELCOM. El caudal utilizado para el flujo del emisario fue de $14\, m^3/s$.

Caudal del emisario: Como el caudal medio del emisario es uniforme de $14\ m^3/s$, es el valor considerado en el modelo, sin considerar las características bioquímicas del agua.

3.2.2. Variables de salida

El modelo requiere de la activación explícita de las variables que deben ser entregadas por la simulación, esto se consigue configurando un archivo cuyo nombre es *datablock.dat*

Se ha indicado explícitamente que las variables de salida requeridas sean: salinidad, temperatura, velocidad longitudinal, velocidad latitudinal, cortes este-oeste.

3.3. Configuración ejecución de la simulación

3.3.1. Tiempo de simulación y número de iteraciones

El número de iteraciones está determinado por el tiempo y el paso de simulación, según la siguiente fórmula

$$\text{Iteraciones} = (\frac{\text{Dias}}{\text{paso}}) \times (24) \times (3600)$$

Donde Dias es el número de días, paso es el número de segundos. En la Tabla 3.6 se muestran el número días de simulación por cada cinco días, con pasos de 30 s, 60 s y 120 s, indicando sus respectivas iteraciones máximas correspondientes. Una consideración para el número de iteraciones es que esta debe estar en concordancia

Dias	Paso(s)	Iteraciones	Paso(s)	Iteraciones	Paso(s)	Iteraciones
5	30	14400	60	7200	120	3600
10	30	28800	60	14400	120	7200
15	30	43200	60	21600	120	10800
20	30	57600	60	28800	120	14400
25	30	72000	60	36000	120	18000
30	30	86400	60	43200	120	21600

Tabla 3.6: Tiempo de simulación, número de iteraciones y paso de simulación

con los datos meteorológicos, así como de marea, es decir el número de iteraciones no puede exceder a los datos de los forzantes meteorológicos.

Preprocesamiento: En esta etapa, el modelo debe verificar que los datos ingresados corresponden y sean adecuados para la simulación. El preprocesamiento es utilizado para convertir los datos tridimensionales de la batimetría, límites de forzamiento, y estructura de la malla en vectores unidimensionales utilizados por el modelo. La salida del preprocesamiento consiste en archivos de datos binarios, estos contienen toda la información necesaria para que se realice la simulación. Si todo está correctamente configurado se confirma caso contrario, corregir los errores y nuevamente se realiza el preprocesamiento hasta que sea verificado la correcta ejecución del modelo.

El modelo emite mensajes de error y no permite continuar hasta que los errores sean corregidos. En la Figura 3.11 se muestra el diagrama de flujo de la verificación pre procesamiento.

En esta etapa las fallas que se presentan tienen que ver con los datos de entrada, como los forzantes meteorológicos, la verificación de las condiciones de frontera y perfiles iniciales de temperatura.

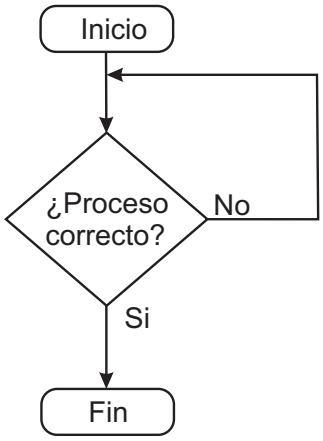


Figura 3.11: Diagrama de flujo para preprocesamiento. Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Salidas del modelo y pos procesamiento

Los resultados de la simulación se guardan en un formato propio del modelo ELCOM. Estos archivos tienen una extensión **.unf**, los cuales contienen toda la información que se ha procesado así como los calculados durante la simulación.

Pos procesamiento: Como la información se encuentra en archivos de almacenamiento en formato NetCDF (Network Common Data Form), para su procesamiento, es necesario extraerlos mediante el uso de algún lenguaje de programación que posea las cualidades para ello. En este documento se ha utilizado GNU Octave (Eaton y Bateman, 2020), así como el software Ocean Data View ODV (Schiltzer, 2022).

3.4. Monitoreo en la bahía del Callao

En 2016, los días 16, 17 y 18 de mayo, el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) registró datos de las magnitudes de velocidades de las corrientes marinas, de la salinidad, temperatura y velocidad de corriente. En la Tabla 3.7 se muestran las coordenadas geográficas de las estaciones donde se han registrado los datos. En la Figura 3.12 se muestran las localizaciones de las estaciones en la bahía del Callao,

Estaciones	Longitud	Latitud	Estaciones	Longitud	Latitud
10	-77.1983	-12.0672	21	-77.1383	-11.9670
11	-77.1802	-12.0549	22	-77.1637	-11.9623
12	-77.1623	-12.0597	23	-77.2025	-11.9673
13	-77.1579	-12.0343	24	-77.2350	-11.9659
14	-77.1806	-12.0335	25	-77.2329	-11.9336
15	-77.2035	-12.0322	26	-77.2006	-11.9361
16	-77.2178	-12.0336	27	-77.1708	-11.9336
17	-77.2317	-12.0022	28	-77.1454	-11.9392
18	-77.2016	-12.0007	29	-77.1998	-11.9212
19	-77.1703	-12.0009	30	-77.1723	-11.9212
20	-77.1431	-12.0011	**	****	****

Tabla 3.7: Estaciones de registro en la bahía del Callao en mayo de 2016

en mayo de 2016, las identificaciones de las estaciones están asociado a los números, desde 10 hasta 30.

La numeración de las estaciones empieza en 10 debido a que las estaciones enumeradas antes del 10, se encuentran fuera de la región de interés de la investigación.

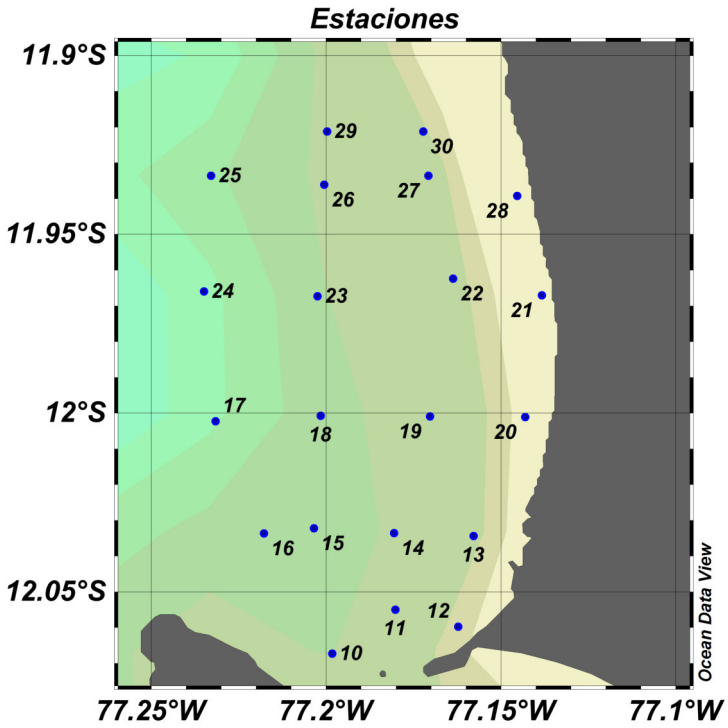


Figura 3.12: Posiciones de las estaciones de registro de datos, en la bahía del Callao. Generado con Ocean Data View ODV.

También se han registrado datos para la temperatura en las mismas posiciones de las estaciones. En la Tabla 3.8 se muestran los valores de temperatura registrados. En la Figura 3.13, se muestran los valores de temperaturas registradas.

Estación	Temperatura(°C)	Estación	Temperatura(°C)
10	18.20	21	18.80
11	17.90	22	18.20
12	18.20	23	18.00
13	19.10	24	18.30
14	18.50	25	18.50
15	18.20	26	18.80
16	18.50	27	19.60
17	18.40	28	19.20
18	18.90	29	18.60
19	18.70	30	16.40
20	18.90	***	***

Tabla 3.8: Valores de temperaturas registradas en la bahía del Callao.

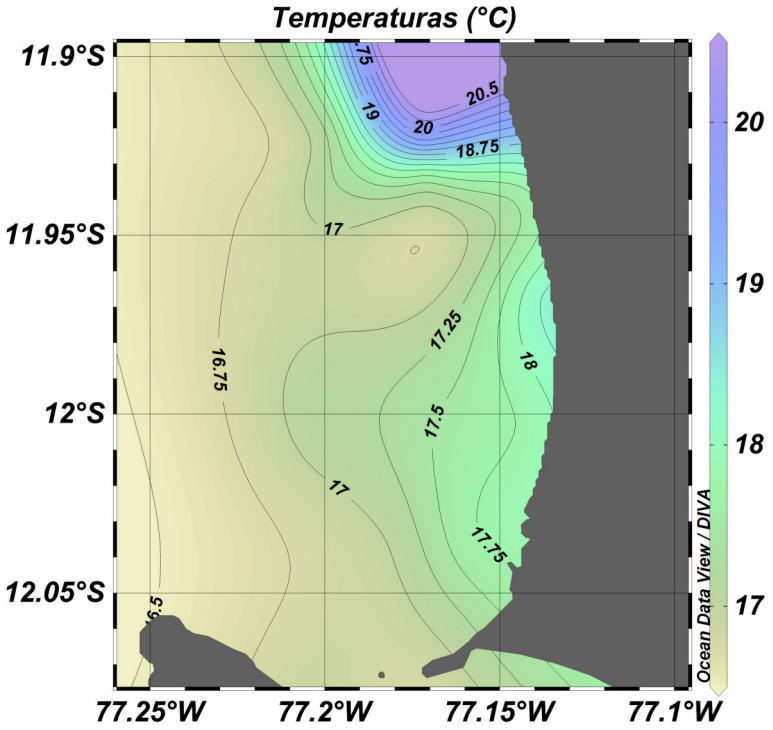


Figura 3.13: Temperaturas superficiales medidas en las posiciones de las estaciones de registro de datos, bahía del Callao. Curvas interpoladas por el software Ocean Data View (ODV)

También se han registrado datos para la salinidad para las mismas posiciones de las estaciones. En la Figura 3.14 se muestra las posiciones de las estaciones.

Estación	Salinidad(psu)	Estación	Salinidad(psu)
10	35.1	21	35.1
11	34.9	22	35.1
12	34.9	23	35.0
13	35.0	24	35.2
14	35.1	25	35.1
15	35.1	26	35.2
16	35.2	27	35.2
17	35.3	28	35.1
18	34.9	29	35.2
19	34.7	30	35.2
20	35.0	***	***

Tabla 3.9: Valores de salinidad, registradas en la bahía del Callao.

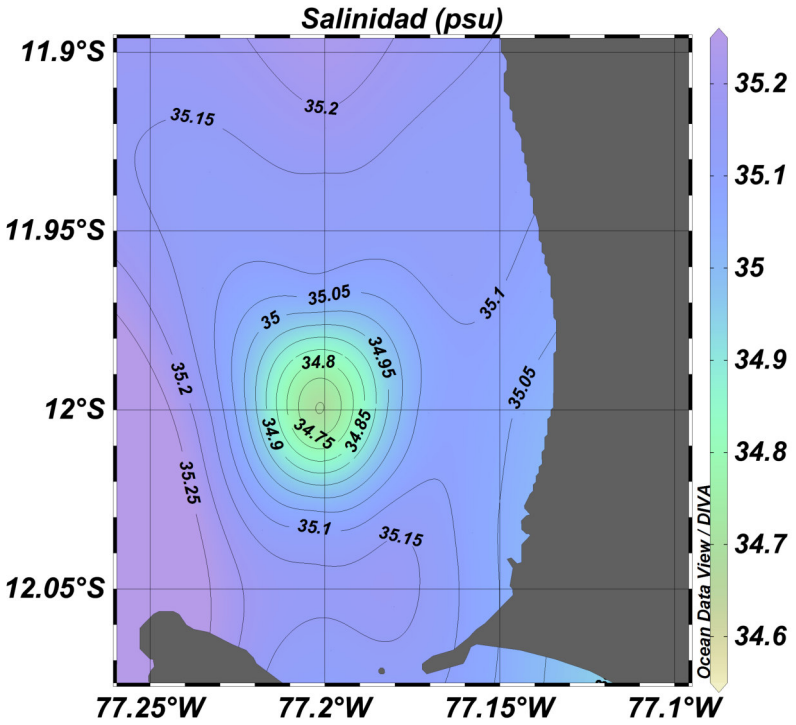


Figura 3.14: Salinidad superficial en las posiciones de las estaciones de registro de datos, bahía del Callao. La distribución de curvas interpoladas a través del software Ocean Data View (ODV)

En la tabla 3.10 se muestran los valores de las velocidades registradas en la bahía

del Callao, por medición directa. En la Figura 3.15 se muestran las velocidades en

Estación	v(cm/s)	Dir (°)	Estación	v(cm/s)	Dir(°)
10	7.92	225	21	5.25	288
11	12.58	96	22	1.76	215
12	6.37	252	23	13.99	204
13	8.77	173	24	7.43	312
14	3.65	209	25	5.32	234
15	5.13	159	26	6.45	260
16	9.79	232	27	4.19	232
17	18.33	159	28	5.46	121
18	9.13	179	29	8.74	268
19	7.79	258	30	8.01	200
20	8.83	248	***	***	***

Tabla 3.10: Velocidades de las corrientes marinas registradas en la bahía del Callao

la bahía del Callao, para los datos medidos directamente. La representación de las curvas se obtuvo a través del software Ocean Data View.

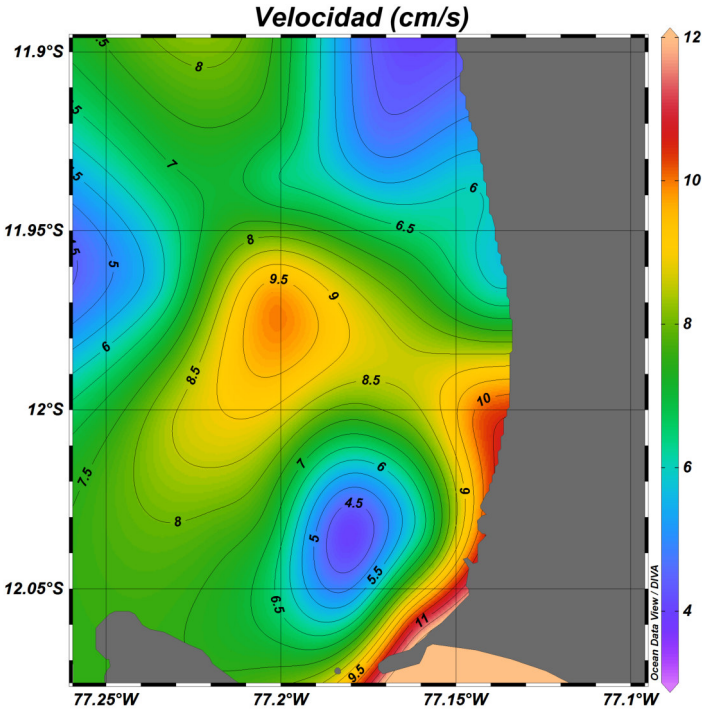


Figura 3.15: Velocidades superficiales en las posiciones de las estaciones de registro de datos, bahía del Callao. Curvas interpoladas por el software Ocean Data View (ODV)

En la Tabla 3.11 se muestran los valores máximos, mínimo y promedio para la temperatura, salinidad y magnitud de velocidad de corrientes para la superficie y para el fondo. Los datos registrados corresponden a la medición directa.

En la superficie el promedio de las magnitudes de la temperatura es 18.57 ^oC, en tanto que los valores máximo y mínimo respectivamente son 19.60 ^oC y 16.40 ^oC.

	Superficie			Fondo		
	Tem (^oC)	Sal. (psu)	Vel. (cm/s)	Tem. (^oC)	Sal. (psu)	Vel. (cm/s)
Máximo	19.60	35.29	18.33	20.40	35.21	11.48
Mínimo	16.40	34.68	1.76	16.70	34.78	3.23
Promedio	18.47	35.08	7.85	17.30	35.11	7.15

Tabla 3.11: Valores de temperatura, salinidad, velocidad en la superficie y fondo.

En la Figura 3.16 se muestra el esquema de la separación de tres regiones para análisis de los cambios de temperatura, salinidad, velocidad en la superficie. La región 2 es donde se encuentra el emisario submarino, a partir de esta configuración se analizan los cambios en las estaciones E16-E17, E15-E18, E14-E19, E13-E20 entre la región 1 y región 2, de la misma forma las estaciones E17-E24, E18-E23, E19-E22 y E20-E21, entre la región 2 y la región 3.

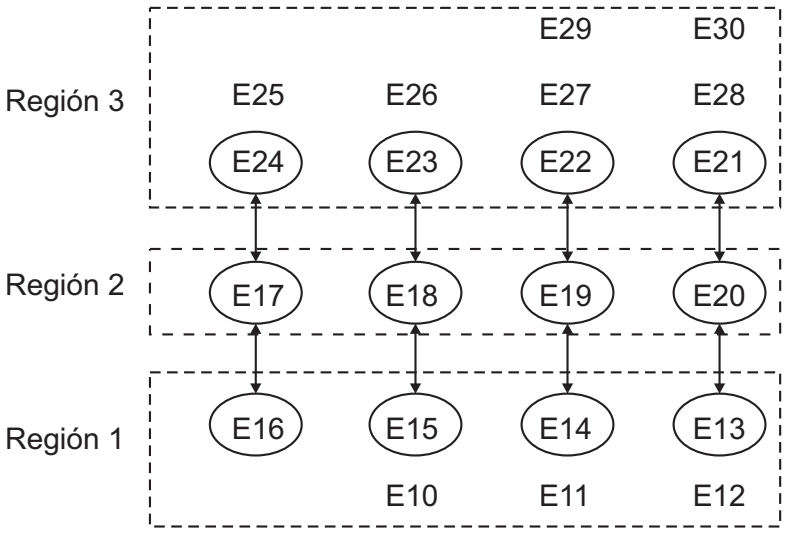


Figura 3.16: Regiones para el análisis de datos entre las estaciones de las fronteras.

En la Tabla 3.12 se muestra la diferencia de temperatura, salinidad, magnitud

de la velocidad de corrientes en la frontera de la región 1 y región 2.

Superficie	Estaciones			
Región 1 y 2	E16–E17	E15–E18	E14–E19	E13–E20
ΔTemp. (^oC)	-0.10	0.70	0.20	-0.20
ΔSal. (psu)	0.12	-0.23	-0.38	0.06
ΔVel (cm/s).	8.54	4.00	4.14	0.06

Tabla 3.12: Diferencias de temperatura, salinidad y velocidades en la frontera región 1 y región 2, en la superficie.

En la Tabla 3.13 se muestra la diferencia entre la región 2 y región 3

Superficie	Estaciones			
Región 1 y 2	E17–E24	E18–E23	E19–E22	E20–E21
ΔTemp. (^oC))	-0.10	-0.90	-0.50	-0.10
ΔSal. (psu)	-0.12	0.12	0.43	-0.01
ΔVel. (cm/s)	-10.90	4.86	-6.03	-3.58

Tabla 3.13: Diferencias de temperatura, salinidad y velocidades en la frontera de la región 2 y región 3, en la superficie.

3.5. Herramientas estadísticas

Las herramientas estadísticas que fueron aplicadas en el análisis de los resultados son la media móvil, el error porcentual, el error cuadrático medio. El error porcentual $E_{\%}$ esta dado por:

$$E_{\%} = \frac{|x_m - x_s|}{x_m} \times 100\,\% \tag{3.1}$$

Donde, x_m son los valores registrados en las mediciones directas, en tanto que x_s son los valores obtenidos a través de la simulación numérica.

El error cuadrático medio (RMSE, Root Mean Square Error) está dado por la expresión:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)^2} \tag{3.2}$$

Donde N es el número de observaciones, y_i son las mediciones realizadas, x_i son los valores obtenidos por el modelo a través de la simulación numérica.

Para comparar los resultados medidos y simulados en los puntos identificados como las estaciones de registro de datos, para eliminar las altas fluctuaciones de los datos simulados se utiliza la media móvil con un periodo determinado, para elegir el periodo más adecuado, se toma como referencia el valor del error cuadrático medio (RMSE), considerando aquel que da el menor valor. Luego el error porcentual nos indica el nivel de aproximación entre los valores registrados y simulados.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Estabilidad de la simulación

En la Figura 4.1 se muestra la evolución de la condición CFL para la coordenada x e y que tienen el mismo comportamiento ya que el paso espacial fue de 100 m para ambos. Al inicio el valor de CFL aumenta rápidamente desde cero hasta encontrarse entre 0.4 y 0.45, luego del cual se estabiliza alrededor de 0.5, en tanto que, para las capas verticales, al inicio aumenta desde cero hasta 0.35 luego se va estabilizando alrededor de 0.4, aproximadamente.

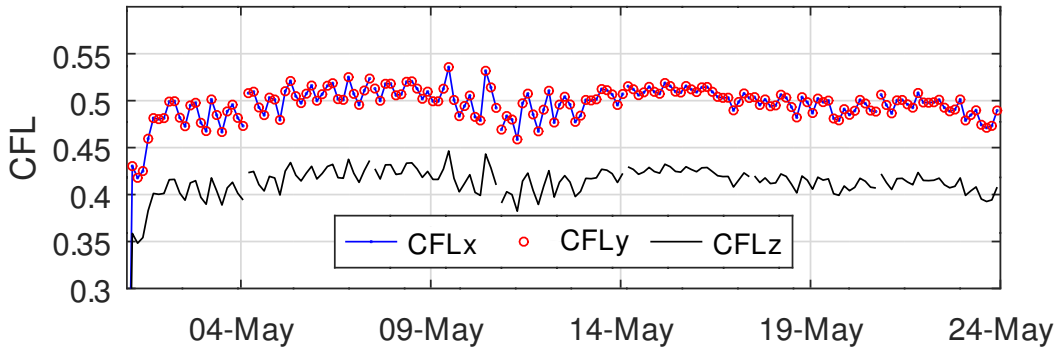


Figura 4.1: Evolución de la condición CFL. Para CFL_x, CFL_y, CFL_z. Gnerado con GNU Octave

La condición CFL nos indica la coherencia entre la dimensión espacial y temporal

durante el proceso de simulación.

4.2. Magnitudes de la velocidad del viento en la bahía del Callao

En la Figura 4.2, se observa la distribución de velocidades del viento para el mes de mayo de 2016. Se observa que las velocidades tienen magnitudes mayores que cero pero menores que ocho, en unidades m/s, siendo entre 0-1 m/s un 0.5 %, entre 1-2 m/s que alcanzan el 4.0 %, luego entre 2-3 m/s que representan el 18.3 %, entre 3-4 m/s con una contribución del 40.1 %, entre 4-5 m/s un 27.7 % y mayores que 5 m/s tienen una representación del 7.8 % y entre 6-7 m/s alcanzan apenas 1.7 %.

Los datos meteorológicos corresponden a un punto específico dado por latitud 12,048S y longitud 77,162W, para el mes de mayo de 2016.

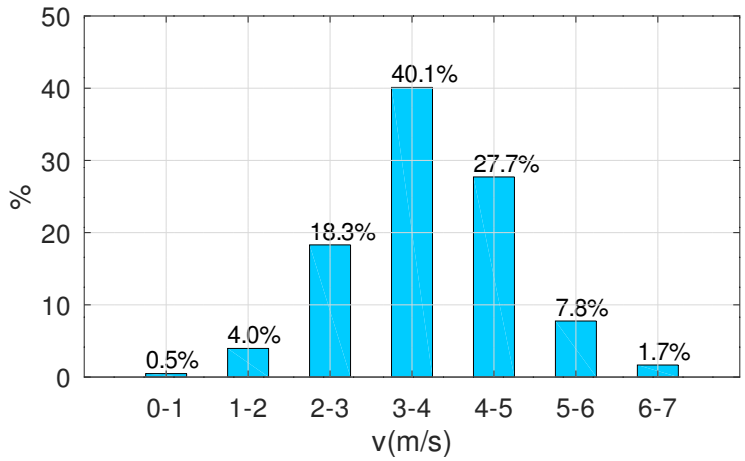


Figura 4.2: Magnitud de velocidades para el viento, para el mes de mayo de 2016, datos obtenidos desde MERRA-2

En la Figura 4.3 se muestran la rosa de vientos para el mes de mayo de 2016, en ella se observan las magnitudes de las velocidades y sus direcciones, En ella se observa que el viento proviene en su mayoría entre sur y suroeste con magnitudes entre 3-4 m/s variando entre 35 % y 40 %, vientos con magnitudes entre 4-5 m/s

entre 5 % y 35 % y una menor contribución de magnitudes entre 5-6 m/s con una variación menor del 10 %.

Estos datos de viento corresponden a los obtenidos desde MERRA-2, para el mes de mayo de 2016, para el punto específico dado por latitud 12.048 S y longitud 77.162 W, en la región de estudio.

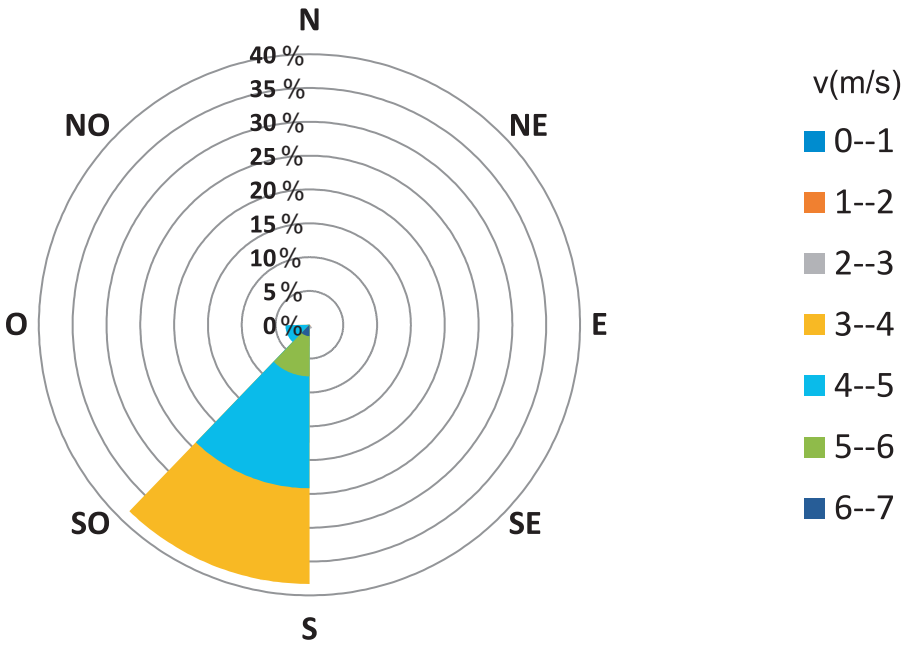


Figura 4.3: Rosa de vientos, para el mes de mayo de 2016, datos obtenidos desde MERRA-2

4.3. Evolución de salinidad, temperatura y velocidad

Para las estaciones identificadas con E17, E18, E19 y E20 se presenta la evolución de salinidad, temperatura y velocidad, estas se encuentran sobre y alrededor de la posición del emisario submarino.

4.3.1. Salinidad

Estaciones E17, E18, E19, E20: En la Figura 4.4 se muestran la evolución de la salinidad para todo el tiempo de simulación, y los valores promedio para la salinidad en las estaciones, respectivamente, son 34,795 psu, 34.845 psu, 34.674 psu y 34.687 psu.

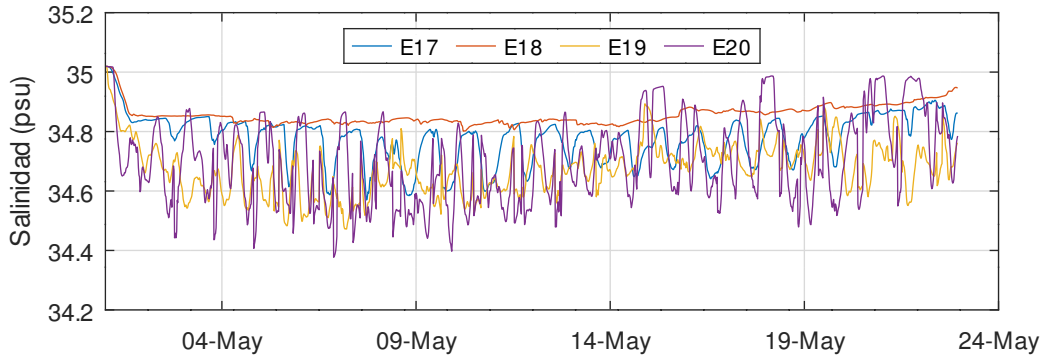


Figura 4.4: Evolución de la salinidad simulada en las estaciones E17, E18, E19, E20, mayo de 2016.

4.3.2. Temperatura

Estaciones E17, E18, E19, E20: En la Figura 4.5 se muestra la evolución de la temperatura en las estaciones durante el tiempo de simulación, los valores promedios para cada estación, respectivamente son, 17.758 ^oC, 17.618 ^oC, 17.655 ^oC y 17.611 ^oC.

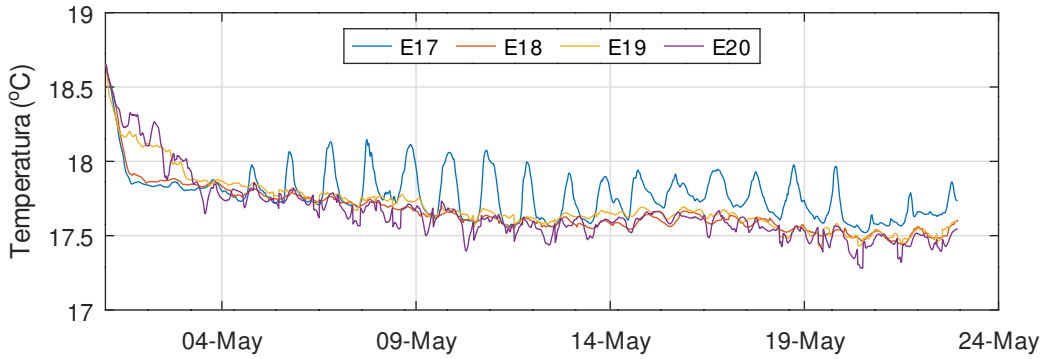


Figura 4.5: Evolución de la temperatura simulada en las estaciones E17, E18, E19, E20, mayo de 2016.

4.3.3. Velocidades

Estaciones E17, E18, E19, E20: En la Figura 4.6 se muestra la evolución de la velocidad en las estaciones durante el tiempo de simulación, el valor promedio de las magnitudes de velocidades respectivamente es 18.572 cm/s, 11.224 cm/s, 11.635 cm/s, 13.675 cm/s.

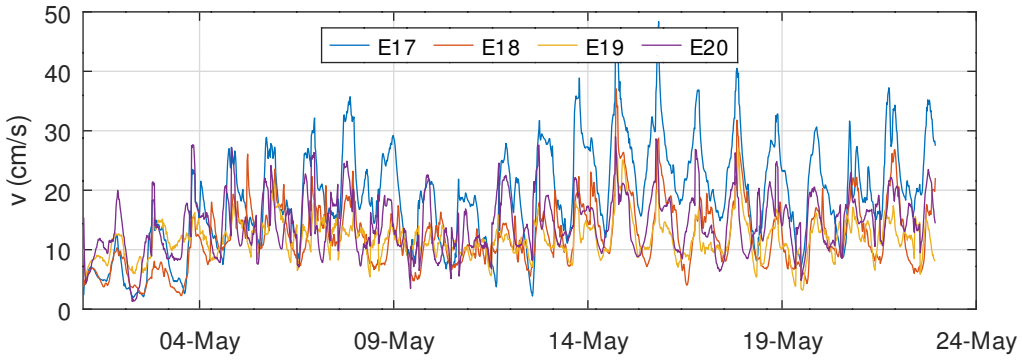


Figura 4.6: Evolución de la velocidad simulada en las estaciones E17, E18, E19, E20, mayo de 2016.

En la Figura 4.7, para las estaciones E17, E18, E19 y E20 se presentan los valores promedio para todo el tiempo de simulación, para la salinidad, temperatura y magnitud de velocidad en las estaciones.

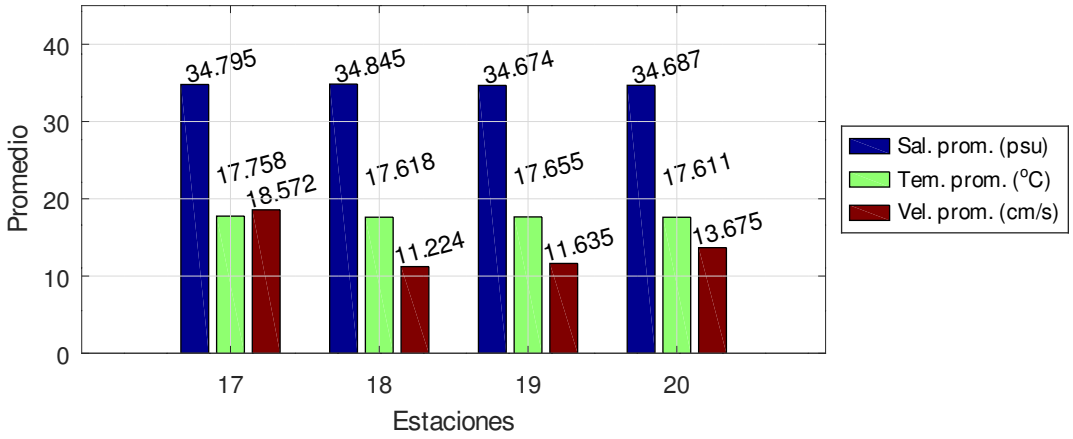


Figura 4.7: Promedio de salinidad, temperatura, velocidad en cada estación E17, E18, E19, E20 en toda la simulación.

De la Figura 4.7 se observa que la salinidad en las estaciones E17, E18, E19 y

E20 el menor valor promedio es 34.674 psu, el mayor valor promedio es 34.845 psu. Respecto de la temperatura promedio el menor valor es 17.611 ^oC y el mayor valor es 17.758 ^oC, la diferencia entre los valores extremos es de 0.147 ^oC. Mientras tanto, para los valores para la velocidad se tienen que la menor magnitud promedio es 11.224 cm/s y la mayor magnitud promedio es 18.572 cm/s.

4.4. Sección vertical para el emisario submarino

En esta sección se muestran los resultados de la simulación para el corte transversal este-oeste, para las variables salinidad, temperatura y magnitud de la velocidad, a lo largo del emisario submarino Taboada. El emisario tiene 3 910 m de longitud (402 m terrestres y 3 508 m submarinos). Los emisores están distribuidos a lo largo de un kilómetro.

4.4.1. Salinidad

En la Figura 4.8 se muestra la distribución de salinidad para el emisario submarino, donde se aprecia que debido a la emisión de fluido a lo largo del emisario modifica los valores de la salinidad, desde la superficie entre 0 m y 15 m de profundidad.

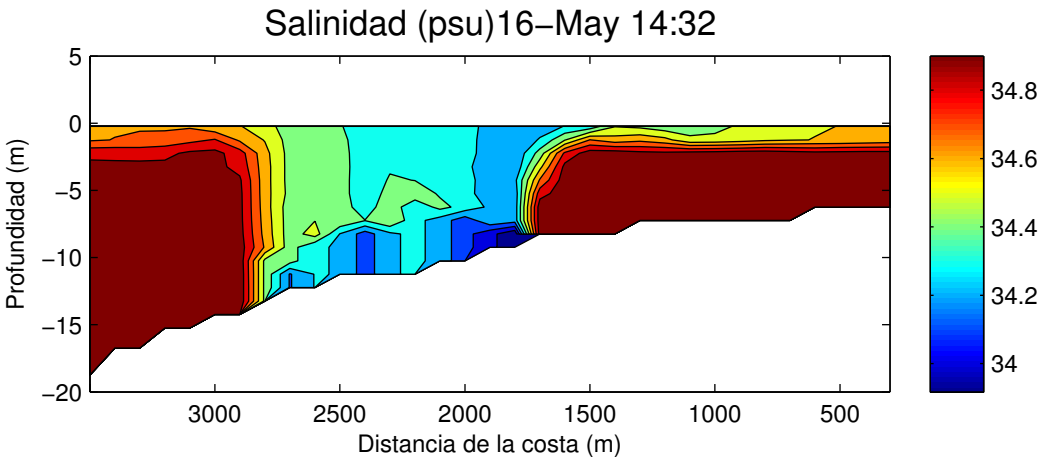


Figura 4.8: Salinidad simulada en el corte Este-Oeste, 16 de mayo de 2016, en la barra de colores la salinidad se mide en unidades psu.

Los valores de la salinidad en el fondo en la parte inicial del emisario respecto de la costa tienen valores distribuidos localizados alrededor de 34.00 psu y la final del emisario respecto de la costa tiene valores entre 34.2 psu y 34.4 psu. Al ascender los valores van cambiando y al llegar a la superficie se propaga hacia la costa y alejándose de esta.

Perfiles de Salinidad En la Figura 4.9 se muestra el cambio de la salinidad con la profundad en la localización del emisario submarino, el punto P1 localizado desde la costa es el inicio del emisario submarino, P2 un punto intermedio y P3 el punto final del emisario. En estos puntos se observa un ligero aumento de la salinidad cuando la profundidad está entre 5 m y 10 m.

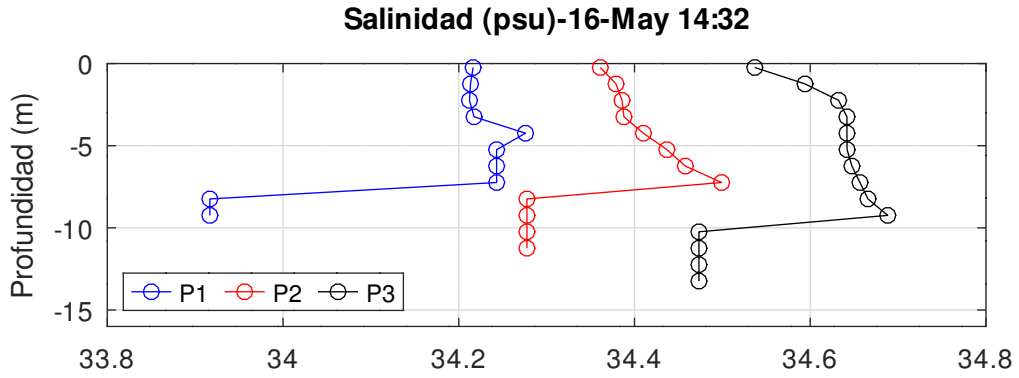


Figura 4.9: Cambio de salinidad simulada con la profundidad en el emisor submarino, 16 de mayo de 2016.

De la Figura 4.9 se puede apreciar que la salinidad disminuye entre los 5 m y 10 m de profundidad, en el emisario submarino se encuentran las aguas provenientes de la planta de tratamiento y del mar en la localización del emisario.

4.4.2. Temperatura

En la figura 4.10 se muestra la distribución de temperaturas en el corte transversal Este-Oeste para el emisario submarino, se observa que en la mayor parte del emisario la temperatura esta entre 17.65 ^oC y 17.75 ^oC. Además, se observa que el flujo se propaga saliente hacia los extremos en el corte transversal.

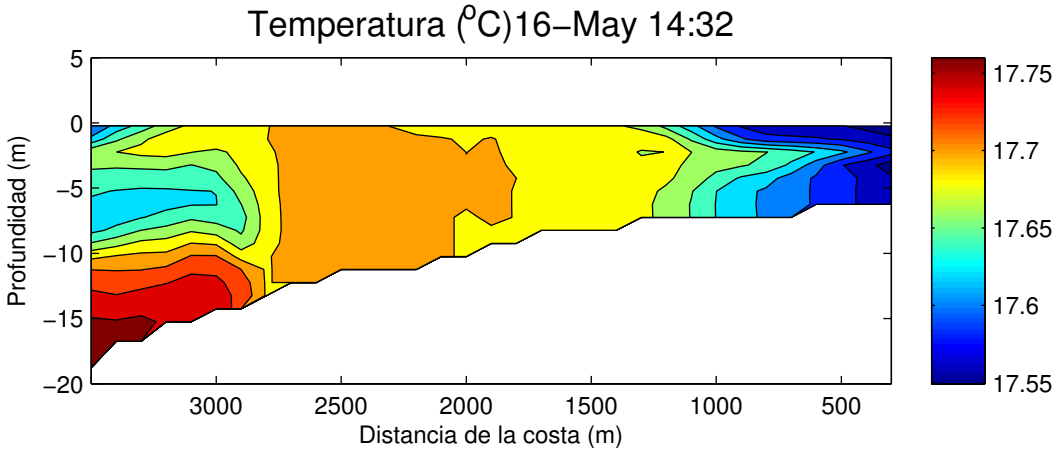


Figura 4.10: Temperatura simulada en el corte Este-Oeste, 16 mayo de 2016.

Perfiles de Temperatura En la Figura 4.11 se muestra el cambio de la temperatura con la profundad en el emisor submarino. En el punto P1 se incrementa acercándose a 17.7 ^oC cuando la profundidad está alrededor de 5 metros medido desde la superficie del mar, cerca de los 10 m de profundidad. En el punto P2 la temperatura entre 5 y 10 metros de profundidad alcanza valor un tanto mayor que 17.705 ^oC y menor que 17.71 ^oC. En tanto que en el punto P3 la temperatura disminuye hasta llegar entre 17.68 ^oC y 17.69 ^oC y finalmente aumenta hasta llegar entre 17.69 ^oC y 17.7 ^oC.

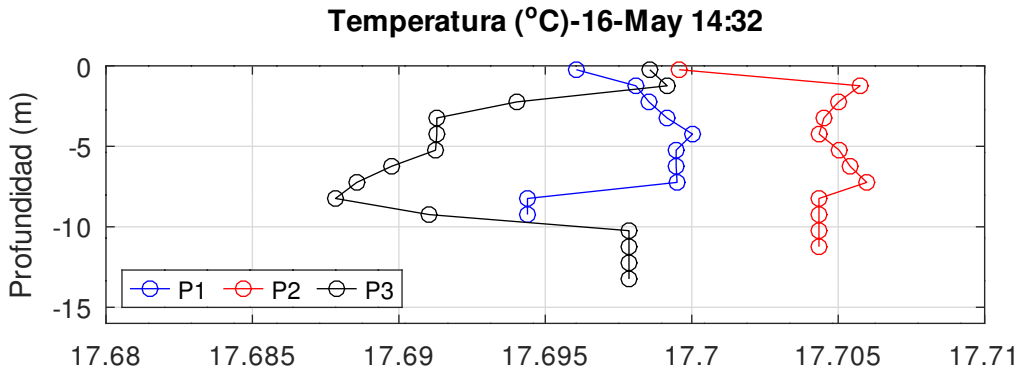


Figura 4.11: Cambio de temperatura simulada con la profundidad en el emisor submarino, 16 de mayo de 2016.

De la Figura 4.11 se aprecia que, al inicio del emisario, respecto de la costa, la temperatura aumenta con la profundidad para luego disminuir cuando esta por los 10 m de profundidad, el cambio mayor se da en el punto final y esta disminuye con la profundidad, para luego aumentar cuando se acerca los 15 m de profundidad.

4.4.3. Velocidades

En la figura 4.12 se muestra la distribución de velocidades en el corte transversal Este-Oeste para el emisario submarino, las magnitudes de las velocidades son mayores que 0 cm/s pero menores que 20 cm/s.

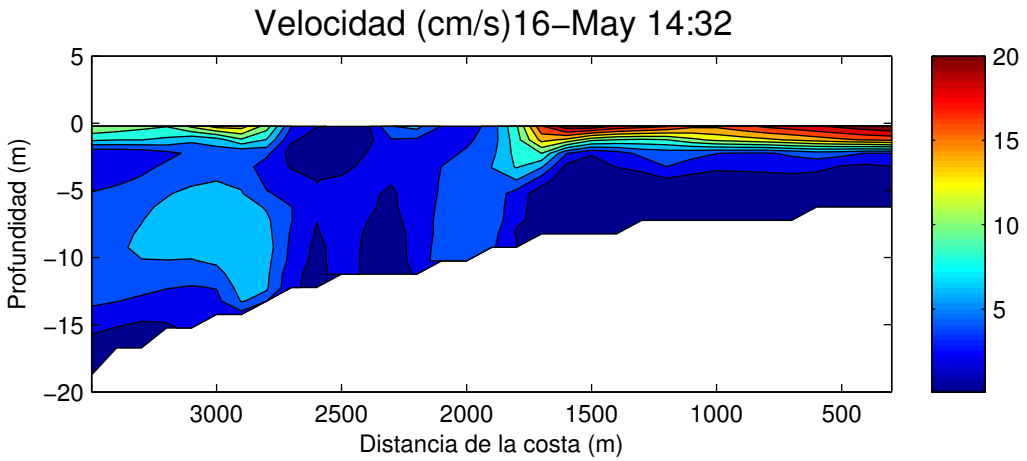


Figura 4.12: Velocidades simuladas en el corte Este-Oeste, 16 de mayo de 2016. Las magnitudes de velocidad están expresadas en cm/s.

Perfiles de Velocidad: En la Figura 4.13 se muestra el cambio de la velocidad con la profundad en el emisor submarino, desde el punto inicial de la costa. La magnitud de la velocidad disminuye con la profundidad desde valores menores que 10 cm/s hasta cerca de 2 cm/s, en tanto que en en punto intermedio disminuye desde 6 cm/s hasta llegar entre 0 cm/s y 2 cm/s, de la misma forma en el punto final del emisario empieza entre 10 cm/s y 12 cm/s, disminuyendo hasta llegar entre 4 cm/s y 6 cm/s, todos conforme aumenta la profundidad entre 0 m y 15 m.

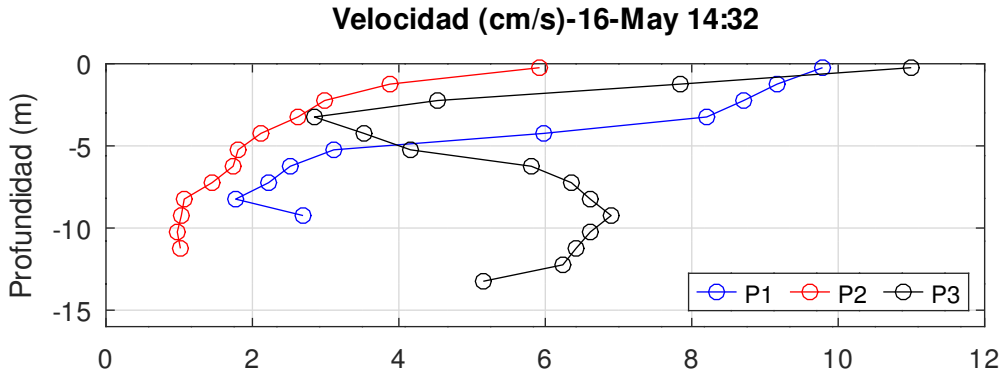


Figura 4.13: Cambio de velocidad simulada con la profundidad en el emisor submarino, mayo de 2016.

4.5. Distribuciones espaciales

En la región de estudio el movimiento de aguas, así como los cambios en la salinidad, temperatura, se presentan en distribuciones espaciales. Estas distribuciones son con respecto al promedio entre la superficie y el fondo, de acuerdo al modelo utilizado.

Se muestran las distribuciones para el día 16 de mayo de 2016, considerando la fecha en que fueron realizadas por mediciones directas vía monitoreo, para la salinidad, temperatura y velocidad.

4.5.1. Distribución espacial de salinidad

En la Figura 4.14, para el 16 de mayo de 2016, la mayor concentración se encuentra entre 34.8 psu y la región donde aún hay presencia de salinidad entre 34.3 psu y 34.5 psu es alrededor de la localización del emisario submarino.

Desde el inicio de la simulación hasta el 16 de mayo de 2016 hay cambios sobre todo en las aguas que se encuentran cerca de la costa, sobre todo apareciendo una región con concentración de 34.9 psu.

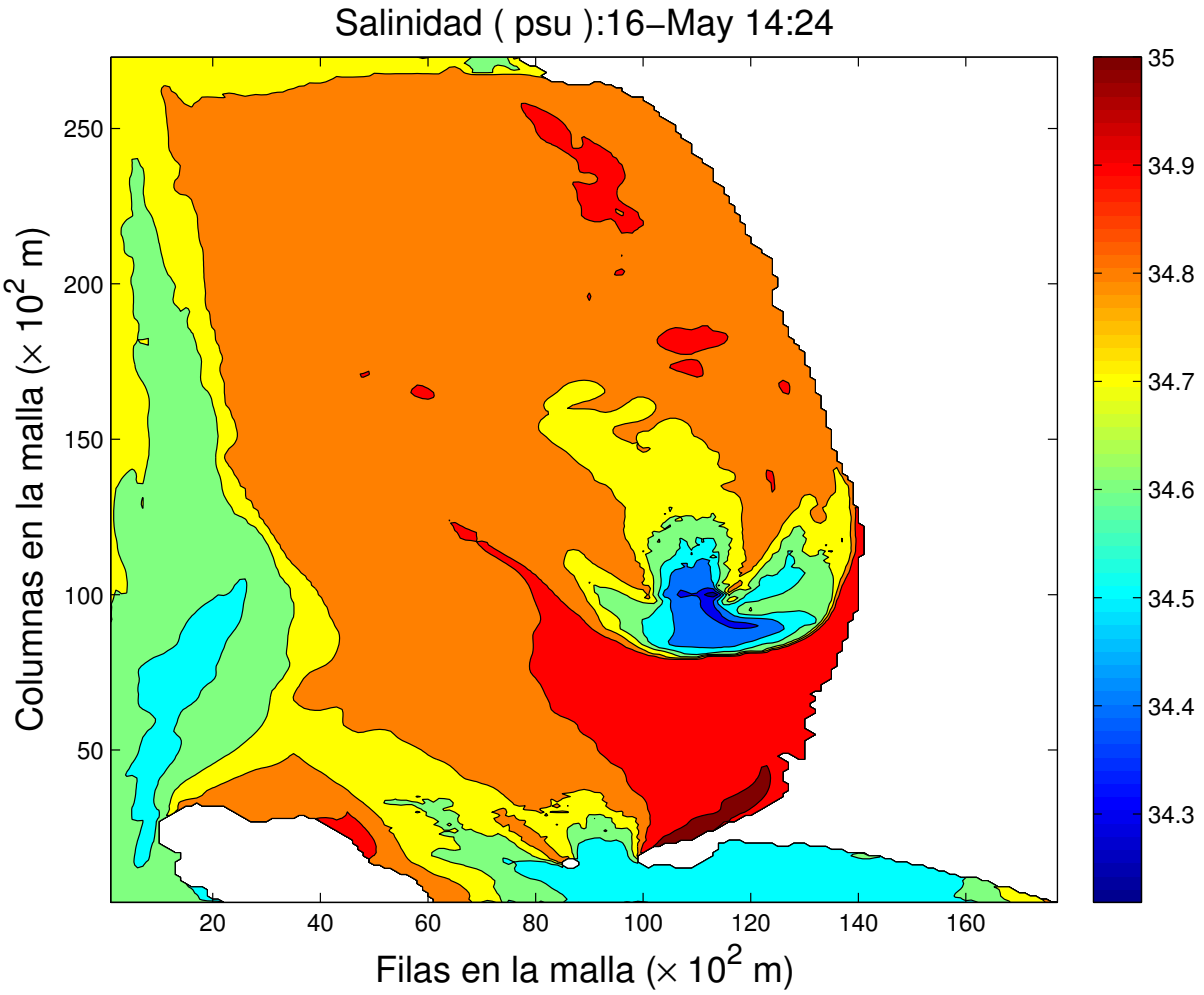


Figura 4.14: Distribución de salinidad para el 16 de mayo de 2016, simulado con el modelo ELCOM.

4.5.2. Distribución espacial de temperatura

En la Figura 4.15 para el 16 de mayo de 2016 la distribución de temperaturas cerca de la costa se encuentra entre 17.4 ^oC y 17.6 ^oC, además, se observa que el cambio en promedio presenta una distribución uniforme de temperatura en la parte central y norte de la bahía del Callao.

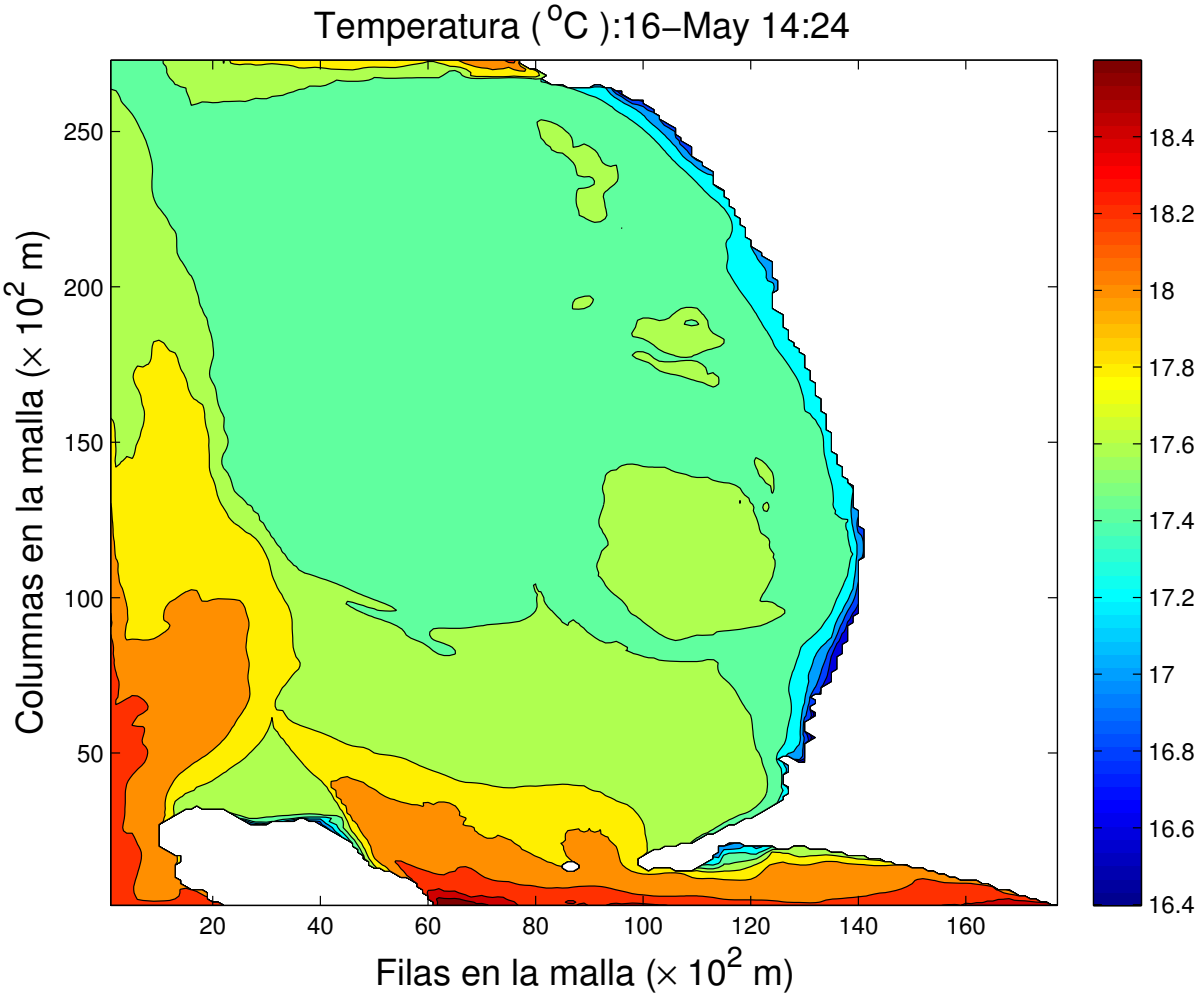


Figura 4.15: Distribución de temperaturas para el 16 de mayo de 2016, simulado con el modelo ELCOM.

4.5.3. Distribución espacial de velocidades

En la Figura 4.16 para el 16 de mayo de 2016, cerca de la costa, la distribución de velocidades se encuentra entre 5 cm/s y 15 cm/s al rededor del emisario submarino. También se observan muy cerca de la costa distribuciones de 20 cm/s y alejándose de la costa hacia el oeste también aparecen distribuciones alrededor de 25 cm/s.

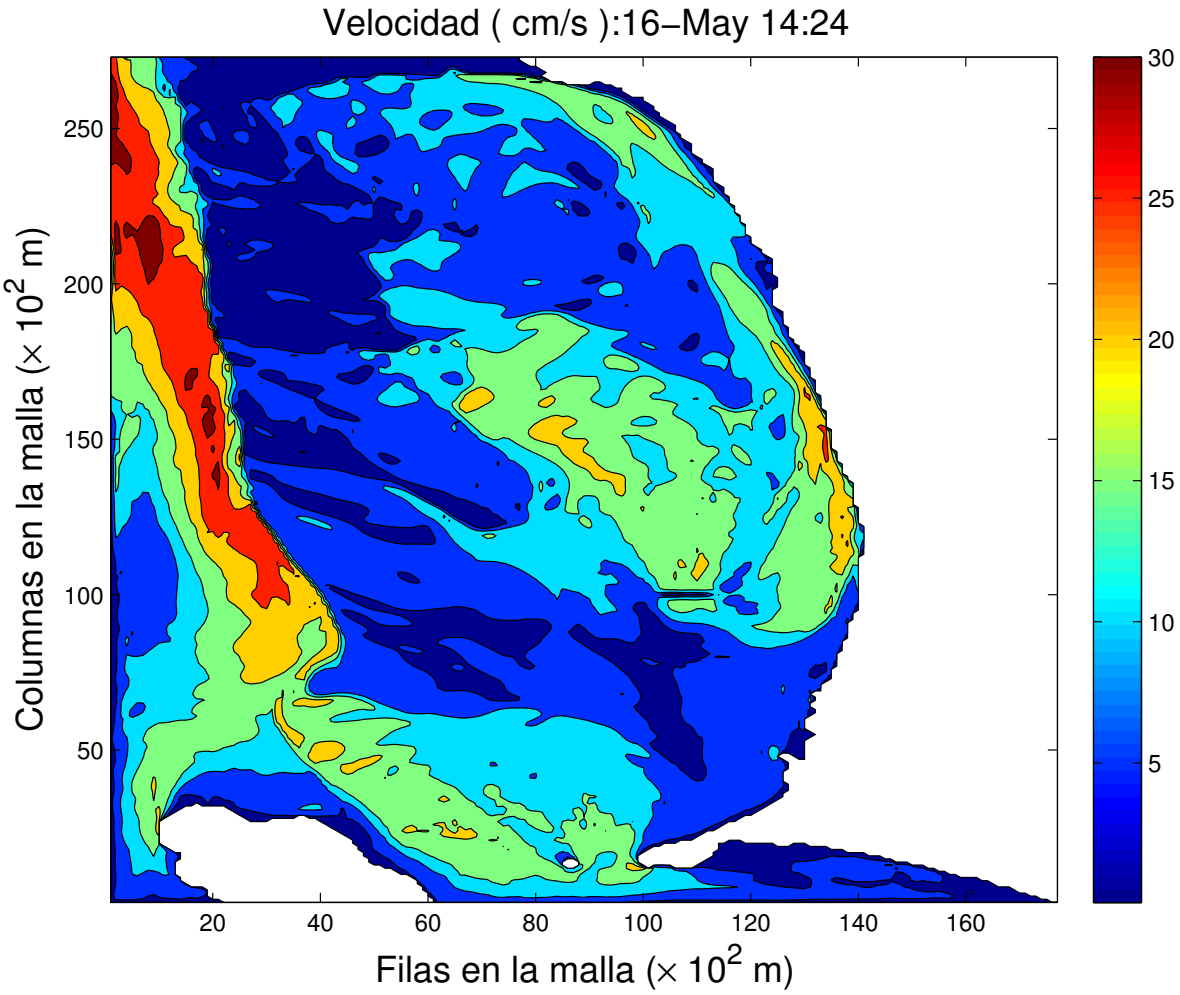


Figura 4.16: Distribución de velocidades para el 16 de mayo de 2016, simulado con el modelo ELCOM.

Campo de velocidades

En la Figura 4.17 se muestra la evolución de las direcciones de las corrientes en la bahía del Callao, para el 16 de mayo de 2016, se observa que las velocidades en la parte central se dirigen hacia el este, acercándose a la costa, con magnitudes entre 10 cm/s y 15 cm/s. Desde el oeste ingresan velocidades con mayor magnitud entre 15 cm/s y 25 cm/s.

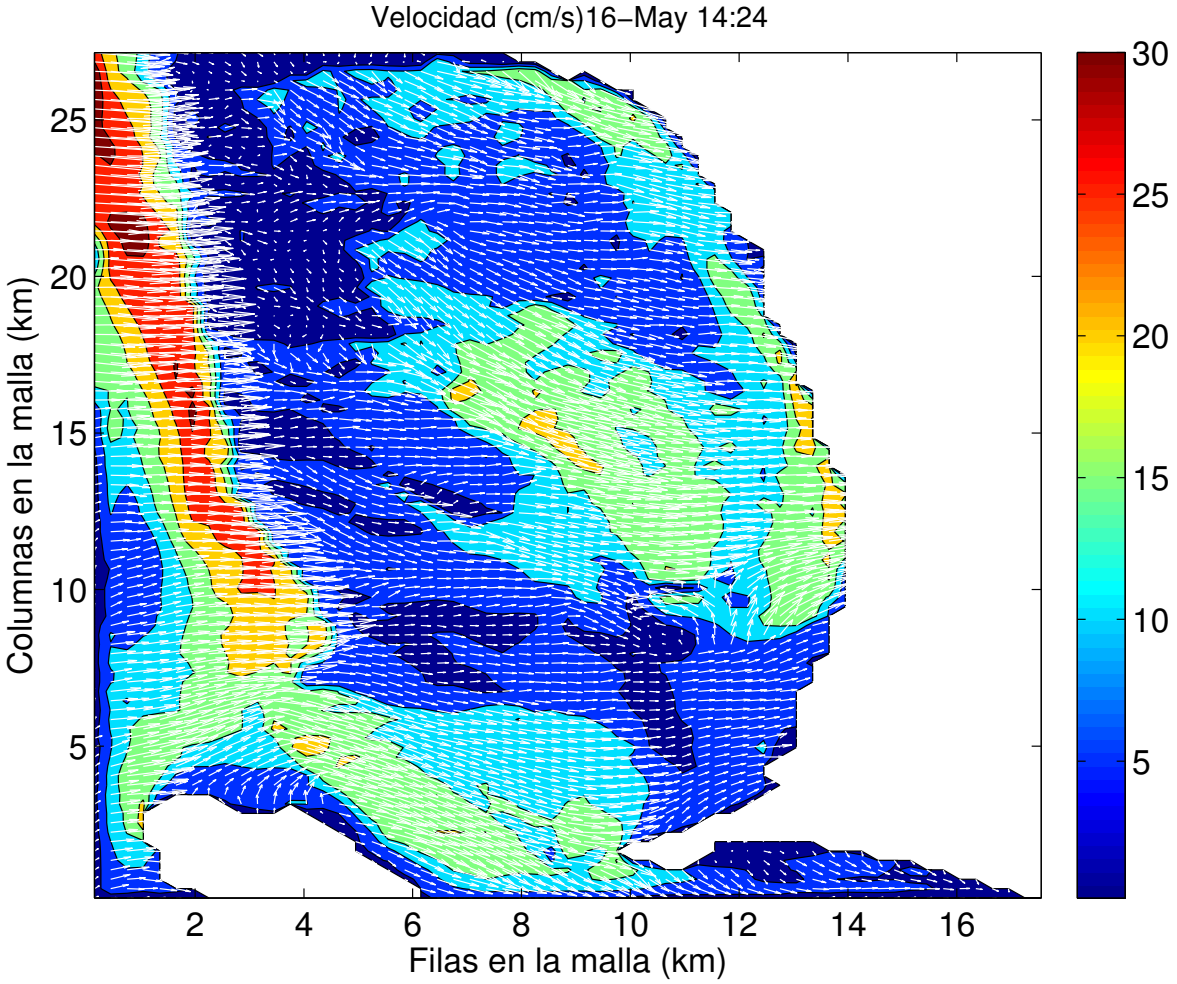


Figura 4.17: Distribución del campo de velocidades en la bahía del Callao, 16 de mayo de 2016, simulados por el modelo ELCOM.

4.6. Validación de magnitudes medidas y simuladas

Para el monitoreo realizado en la bahía de Callao, se registraron datos de velocidad, temperatura y salinidad, los valores registrados fueron comparados con los obtenidos por la simulación numérica.

La región de interés está sobre la localización del emisario submarino, por esto

se toma como referencia las estaciones E11, E12, E13, E14, E15, E16, E17, E18, E19 y E20, el emisario submarino está entre las estaciones E17, E18, E19, E20.

Para las altas fluctuaciones de los valores de la velocidad en cada una de las estaciones, se ha realizado un filtro a través de la medía móvil, de todos filtros realizados se ha elegido aquel que da el menor valor para el error medio cuadrático RMSE, el cual nos indica el nivel de correlación entre los valores registrados en el campo con los valores simulados por el modelo. Finalmente, para indicar la diferencia se utilizó el error porcentual.

Las estaciones E10, E11, E12 se validaron para el día 16 de mayo de 2016, y para las estaciones E13, E14, E15, E16, E17, E18, E19, E20 se validaron para el día 18 de mayo de 2016. De acuerdo a la fecha en que fueron registrados los datos en el monitoreo para la bahía del Callao.

4.6.1. Validación de Salinidad

En la Tabla 4.1 se muestran las estaciones con los respectivos valores de la salinidad medidos, simulados y su respectivo error.

El mayor error se presenta en la estación 17 con 1.47 %, y el menor error se presenta en la estación 18 con 0.11 %. Se observa que el error en una sola estación supera el uno por ciento, lo que nos indica que la simulación representa con buena precisión los valores para la salinidad.

Estación	Sal_{med}(psu)	Sal_{sim}(psu)	$E(\%)$
11	34.91	34.84	0.21
12	34.91	34.96	0.14
13	35.02	34.94	0.23
14	35.06	34.89	0.48
15	35.14	34.84	0.85
16	35.16	34.85	0.88
17	35.29	34.77	1.47
18	34.91	34.87	0.11
19	34.68	34.75	0.20
20	35.08	34.78	0.86

Tabla 4.1: Comparación entre valores medidos y simulados para la salinidad.

En la Figura 4.18 se muestra la correlación entre los valores medidos y simulados para la salinidad.

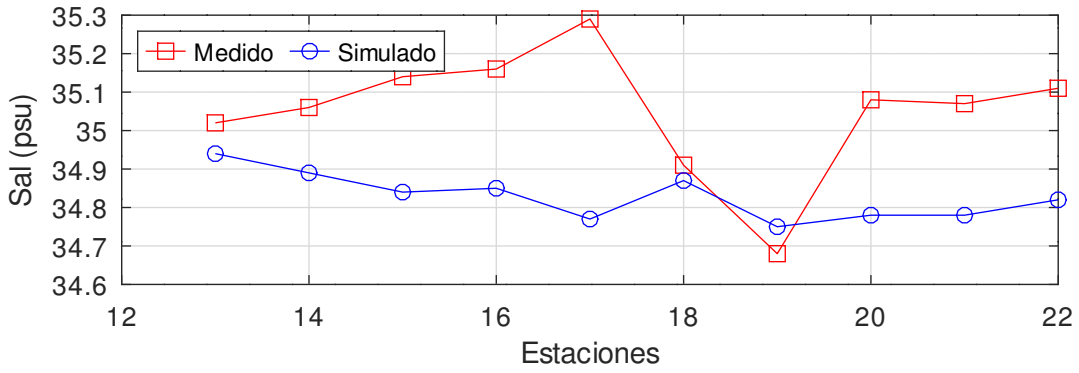


Figura 4.18: Comparación de las salinidades superficiales medidas y simuladas en las estaciones E11 hasta E20.

4.6.2. Validación de Temperatura

En la Tabla 4.2 se muestran los valores medidos para la temperatura, así como los valores simulados con su respectivo error porcentual.

El mayor error corresponde a la estación E13 con 7.98 % y el menor error corresponde a la estación E11 con 0.59 %.

Estación	T_{med} (^oC)	T_{sim} (^oC)	$E(\%)$
11	17.9	17.79	0.59
12	18.2	17.73	2.60
13	19.1	17.58	7.98
14	18.5	17.64	4.67
15	18.2	17.64	3.05
16	18.5	17.65	4.58
17	18.4	17.68	3.94
18	18.9	17.53	7.26
19	18.7	17.49	6.47
20	18.9	17.48	7.53

Tabla 4.2: Comparación entre valores medidos y simulados para la temperatura.

En la Figura 4.19 se muestra la correlación entre los valores medidos y simulados para la temperatura.

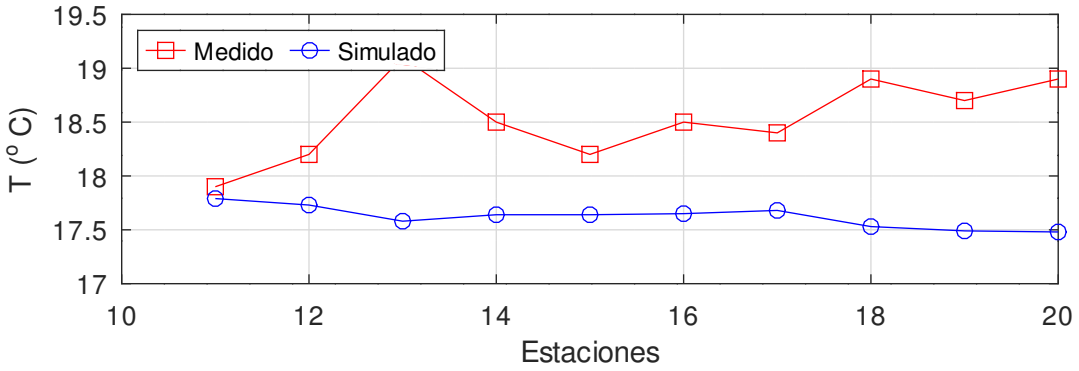


Figura 4.19: Comparación de las temperaturas medidas y simuladas en las estaciones E11 hasta E20.

4.6.3. Validación de Velocidades

En la Tabla 4.3 se muestran las estaciones, los valores medidos v_{med} en campo, los valores simulados v_{sim} y el error porcentual ($E_{\%}$).

Estación	v_{med}(cm/s)	v_{sim}(cm/s)	$E(\%)$
11	12.58	11.36	9.74
12	6.37	9.06	42.25
13	8.77	5.29	39.68
14	3.65	4.72	29.30
15	5.13	7.15	39.41
16	9.79	9.15	6.50
17	18.33	16.15	11.89
18	9.13	7.17	21.49
19	7.79	7.68	1.39
20	8.83	11.29	27.91

Tabla 4.3: Comparación entre valores medidos y simulados para la velocidad

La estación E19 presenta el menor error porcentual con un valor de 1.39 %, en tanto que la estación E12 presenta el mayor error porcentual con un valor de 42.15 %.

En al Figura 4.20 se muestran la correlación de los valores medidos y los valores simulados para la velocidad en las estaciones identificadas desde E11 hasta E20, se aprecia una correlación, en general, buena.

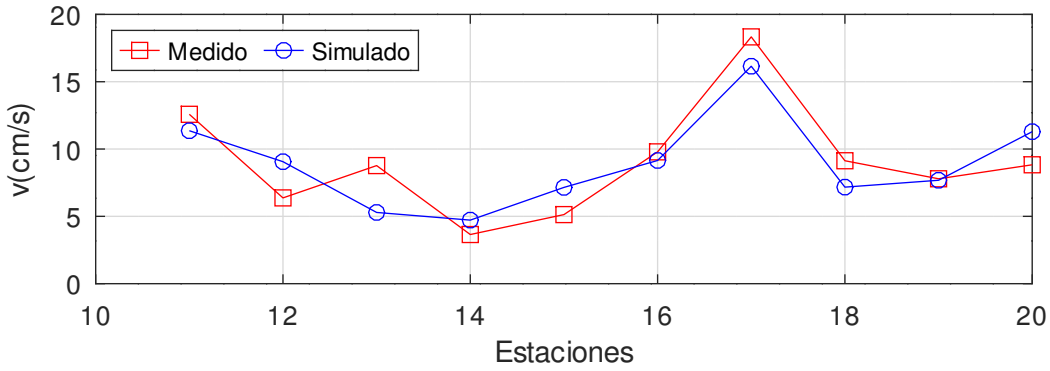


Figura 4.20: Comparación de las velocidades superficiales medidas y simuladas en las estaciones E11 hasta E20.

Estudios similares

En la bahía del Callao, se han realizado mediciones de las variable velocidad por otras investigaciones así tenemos el monitoreo realizado por Cabello et al (1999) que reportaron magnitudes entre 1 cm/s hasta 22 cm/s y en promedio 10 cm/s. Asimismo el monitoreo realizado por Guzman et al (2000) reportaron magnitudes entre 5.5 cm/s y 32.9 cm/s en la superficie. De la misma forma Sánchez (2008) reporta para la superficie velocidades entre 7 cm/s y 15 cm/s. Además Arguelles et al (2011) reportaron mediciones de velocidades entre 5 cm/s y 25 cm/s. Por otro lado, mediante simulación numérica Centeno et al (2010), reportaron magnitudes para la velocidad de corrientes entre 18 cm/s y 22 cm/s.

De los estudios mencionados para las velocidades de corrientes en la bahía del Callao y los obtenidos en la simulación, de la Figura 4.17, velocidades entre 5 cm/s y 25 cm/s, indican que el modelo ELCOM proporciona resultados similares.

Los estudios previos han demostrado una variabilidad significativa en las velocidades de las corrientes en la bahía del Callao

Dado que el modelo ELCOM fue utilizado en la investigación para simular las corrientes en la bahía, es esencial comparar los resultados del modelo con las mediciones reales reportadas en estudios anteriores, como los mencionados. Esta validación

puede proporcionar una base sólida para la confiabilidad del modelo en la predicción de las corrientes en la bahía.

4.7. Conclusiones

Durante la ejecución de la simulación numérica, se obtuvieron valores de salinidad, temperatura y velocidad en las posiciones de las estaciones donde se realizaron mediciones directas. Al contrastar estos valores simulados con los valores medidos, se encontró una buena correlación. Por lo tanto, podemos destacar la utilidad del modelo ELCOM para la simulación numérica en la bahía del Callao por haber representado adecuadamente las diversas variables analizadas.

Se establece que la precisión de la simulación numérica depende de la calidad de los datos requeridos, tales como la batimetría, datos meteorológicos y datos de marea. Además, la estabilidad del modelo durante la ejecución es crucial, y esto depende de la elección adecuada del tamaño de paso temporal y espacial.

La simulación presenta estabilidad en todo el tiempo considerado, para las coordenadas x e y como se muestra en la Figura 4.1, por tanto, los resultados obtenidos a partir del modelo tienen coherencia con las dimensiones espaciales y temporales, de la misma en las capas verticales.

En la bahía del Callao, se registraron directamente los datos de velocidad, temperatura y salinidad los días 16, 17 y 18 de mayo de 2016. Al comparar las magnitudes de velocidad en cada punto identificado por las estaciones, se puede establecer que el modelo simula con buena aproximación las magnitudes medidas, como se puede apreciar en la Tabla 4.1, Tabla 4.2 y Tabla 4.3

Los resultados obtenidos de la simulación numérica pueden ser útiles tanto para la gestión y conservación de recursos marinos como para otras aplicaciones relacionadas con el monitoreo y la predicción de las condiciones oceanográficas en la bahía del Callao, ya que la salinidad, temperatura y velocidades están sujetas a constantes cambios.

Como trabajos futuros, es necesario continuar con el análisis de datos recopilados a través de modelos numéricos de simulación para contribuir a mejorar la comprensión de los diversos procesos oceánicos en el área de estudio.

Referencias

Aguirre, C. (2009). *Simulación numérica de la hidrodinámica del lago Titicaca frente a las costas de la ciudad de Puno en el Perú.* UNMSM, Lima, Perú.

Arguelles et al. (2011). Estudio línea base ELBA Callao primavera 2011. *IMARPE, Lima, Perú.*

Bravo, L. (2002). Toma y conservación de muestras de agua residual en emisores submarinos. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).*

Cabello et al. (1999). Evaluación de la calidad acuática en el área costera del Callao, agosto 1999.

Casulli, V., y Cheng, R. T. (1992). Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *International Journal for numerical methods in fluids*, *15*(6), 629–648.

Centeno et al. (2010). Modelación numérica de la circulación marina en las bahías Callao y Miraflores. *Revista del Encuentro Científico Internacional*, *7*(1), 59–66.

Corral et al. (2011). Modelación numérica para la definición de escenarios hidrodinámicos críticos del futuro emisario submarino de puerto Madryn. *Mecánica Computacional*, *30*(45), 3515–3528.

Correa et al. (2008). Modelado de la circulación marina y descargas hipotéticas en la bahía del Callao, Perú. *Instituto del Mar del Perú*, *35*(3).

Eaton y Bateman. (2020). Octave version 6.3.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations. *https://www.gnu.org/software/octave/doc/v6.3.0/*.

Guzman et al. (2000). Evaluación de la calidad acuática en el área costera del

Callao, 2000. *IMARPE, Lima, Perú.*

Hall, E. (2008). *Hydrodynamic modelling of lake Ontario.* Queen's University.

Hodges y Dallimore. (2007). *Estuary, lake and coastal ocean model ELCOM, v2.2 user manual.* Water Research, University of Western Australia.

Hodges y Dallimore. (2014). *Estuary, lake and coastal ocean model ELCOM, v2.2 science manual.* Water Research, University of Western Australia.

Jirka et al. (2002). *User's manual for CORMIX: a hidrodynamic mixing zone model and decision support system for polutant dischargues into surface water.* Office of Science and technology, U. S. Enviromental Protection Agency, Washington, DC 20460.

Lonin, S. A., y Vásquez, J. G. (2005). Hidrodinámica y distribución de coniformes en el golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*.

Mesinger y Arakawa. (1982). Numerical methods used in atmosferic models. *Global Atmosferic Reseach Programme (GARP) publications series No 17*.

Montoya y Toro. (2006). Calibración de un modelos hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el golfo de Urabá, Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*(13).

NOAA National Centers for Environmental Information. (2022). *Etopo 2022 15 arc-second global relief model.* NOAA National Centers for Environmental Information. Descargado de https://doi.org/10.25921/fd45-gt74 (Accessed enero de 2022)

Orozco et al. (1999). Contaminación sobre el ecosistema marino del Callao en abril y setiembre de 1997. *IMARPE*.

Periañez. (2010). *Fundamentos de oceanografía dinámica.* Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla.

Pickard, G. L., y Emery, W. (1982). *Descriptive physical oceanography: an introduction.* Pergamon Press.

Pita, E., Sánchez, M., y Sierra, I. (2011). *El emisario de la Taboada (Lima-Perú): un nuevo récord.* XI Jornadas Españolas de Costas y Puertos. Descargado de https://costasypuertos.com/sites/default/files/2011_LasPalmas_Libro%20Costas%20y%20PuertosDEF.pdf

Páez, E. (2012). *Modelación numérica y de calidad de agua en el estero de Urías, Sinaloa, México*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C.

Quispe, J. M. (2007). *Simulación de la hidrodinámica en la bahía de Paracas, Pisco-Perú; utilizando forzantes físicos*. UNMSM, Lima, Perú.

Reddy. (2001). *Descriptive physical oceanography*. A. A. Balkema Publishers, India.

Schiltzer, R. (2022). Ocean data view. *https://odv.awi.de*.

Shen et al. (2002). A three-dimensional numerical model of hydrodynamics and water quality in Hakata bay. *Ocean Engineering*, *29*(4), 461–473.

Sánchez, G. (2008). Bahía del Callao, Perú, evaluación ambiental en marzo 2002. *IMARPE*, *35*(1).

Talley, L. D. (2011). *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Academic Press.

Tedagua, S. I. (2014). PTAR,Taboada (Lima,Perú) la mayor planta de tratamiento de aguas residuales de sudamérica, artículo técnico. *FuturEnviro*, 81–87.

Wessel, P., Luis, J., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H., y Tian, D. (2019). The generic mapping tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *20*(11), 5556–5564.

Yzocupe, V. A. (2005). Modelo de dispersión de contaminantes en aguas rasas. *Revista de Investigación de Física*, *8*(01), 46–53.

Apéndices

Apéndice A

Ecuaciones hidrodinámicas de ELCOM

Transporte de momentum

$$\frac{\partial dU_\alpha}{\partial t} + \partial U_j \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_j} = -g\{\frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} + \frac{1}{\rho_o}\frac{\partial}{\partial x_j}\int_{z'}^{\eta} \rho' dz\}$$
$$+\frac{\partial}{\partial x_1}\{\nu_1 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_1}\} + \frac{\partial}{\partial x_2}\{\nu_2 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_2}\} + \frac{\partial}{\partial x_3}\{\nu_3 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_3}\} - \epsilon_{\alpha\beta} f U_\beta \tag{A.1}$$

$\frac{\partial dU_\alpha}{\partial t}$: Representa la tasa de cambio de la velocidad U_α (componente de la velocidad en la dirección α, donde α puede ser 1, 2 o 3) con respecto al tiempo. Es la aceleración del fluido en esa dirección en función del tiempo.

$\partial U_j \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_j}$: Es el término convectivo que describe cómo las componentes de velocidad U_j en la dirección j contribuyen al cambio de U_α en la dirección α.

$-g\{\frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} + \frac{1}{\rho_o}\frac{\partial}{\partial x_j}\int_{z'}^{\eta} \rho' dz\}$: Representa la aceleración debida a la gravedad (g) y al cambio de elevación del nivel del mar (η) en la dirección α. La integral en el término refleja la variación de la cantidad (ρ') con respecto a la profundidad z desde la superficie libre hasta la profundidad η.

$\frac{\partial}{\partial x_1}\{\nu_1 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_1}\}$: Representa la difusión de momentum debido a la viscosidad en la dirección x_1 con coeficiente de viscosidad ν_1.

$\frac{\partial}{\partial x_2}\{\nu_2 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_2}\}$: Representa la difusión de momentum debido a la viscosidad en la dirección x_2 con coeficiente de viscosidad ν_2.

$\frac{\partial}{\partial x_3}\{\nu_3 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_3}\}$: Representa la difusión de momentum debido a la viscosidad en la dirección x_3 con coeficiente de viscosidad ν_3.

$-\epsilon_{\alpha\beta} f U_\beta$: Representa el efecto de la fuerza de Coriolis (f) en el flujo, que actúa perpendicularmente a la velocidad U_β en la dirección β, $\varepsilon_{\alpha\beta}$ es el tensor de Levi-Civita, que toma valores dependiendo de las direcciones α y β.

Continuidad

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \tag{A.2}$$

Esta es una representación de la masa en un flujo de fluido. Describe que la tasa de cambio de la velocidad en todas las direcciones espaciales x_j sumadas es igual a cero.

Condiciones de frontera para el momentum

Superficie libre

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial x_3} = 0 \tag{A.3}$$

Indica que la tasa de cambio de la componente de velocidad U_α con respecto a la dirección espacial x_3 es igual a cero. La velocidad U_α no varía a lo largo de la dirección x_3

Fondo y lados

$$U_i = 0 \tag{A.4}$$

Indica que la velocidad U_i en la dirección i es igual a cero. Esto implica que no hay flujo de velocidad en la dirección i. Esta ecuación representa un flujo estacionario en una dirección específica, lo que significa que no hay movimiento de fluido en esa dirección.

Transporte de escalares

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(CU_j) = \frac{\partial}{\partial x_1}\{\kappa_1 \frac{\partial C}{\partial x_1}\} + \frac{\partial}{\partial x_2}\{\kappa_2 \frac{\partial C}{\partial x_2}\} = \frac{\partial}{\partial x_3}\{\kappa_3 \frac{\partial C}{\partial x_3}\} + S \qquad \text{(A.5)}$$

$\frac{\partial C}{\partial t}$: Representa la tasa de cambio de la propiedad C con respecto al tiempo.

$\frac{\partial}{\partial x_j}(CU_j)$: Describe como la propiedad C se transporta debido al flujo de velocidad U_j, representa el transporte convectivo de C en las direcciones x_j.

$\frac{\partial}{\partial x_1}\{\kappa_1 \frac{\partial C}{\partial x_1}\} + \frac{\partial}{\partial x_2}\{\kappa_2 \frac{\partial C}{\partial x_2}\} = \frac{\partial}{\partial x_3}\{\kappa_3 \frac{\partial C}{\partial x_3}\}$: Representan la difusión de la propiedad C en las direcciones x_1, x_2, x_3 respectivamente. Los coeficientes de difusión $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ indican la capacidad de C para propagarse en esas direcciones.

S: Este término representa cualquier fuente o sumidero de la propiedad C en el fluido. Puede incluir fuentes externas o reacciones químicas que generen o consuman C en el sistema.

Condiciones de frontera sobre los escalares

$$\frac{\partial C}{\partial x_j} = 0 \qquad \text{(A.6)}$$

Esta ecuación implica que la propiedad C no varía con respecto a las coordenadas x_j. En términos de transporte, implica que no hay gradientes espaciales en la dirección x_j para la propiedad C

Evolución de la superficie libre

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_0^\eta U_\alpha dz \qquad \text{(A.7)}$$

Esta ecuación describe la evolución del nivel libre del océano

$\frac{\partial \eta}{\partial t}$: Representa la tasa de cambio del nivel libre del océano con respecto al tiempo. Indica cómo la superficie del agua cambia con el tiempo.

$-\frac{\partial}{\partial x_\alpha}\int_0^\eta U_\alpha dz$: Representa la contribución de la advección vertical de la corriente U_α a la variación del nivel del mar. El signo negativo indica que un aumento en la elevación del nivel del mar η resulta en una disminución del flujo vertical de agua (U_α) y viceversa.

Cizalladura del viento en superficie libre

$$(U_*)_\alpha^2 = C_{10}\frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}}(W_\beta W_\beta)^{\frac{1}{2}}W_\alpha \tag{A.8}$$

Describe la magnitud cuadrada del flujo turbulento vertical en un fluido.

$(U_*)_\alpha^2$: Representa la magnitud cuadrada del flujo turbulento vertical en la dirección α en el fluido.

C_{10}: Es un coeficiente que se utiliza en modelos de turbulencia para representar la intensidad de la turbulencia, su valor depende del contexto y del tipo de flujo que se está modelando.

ρ_{aire}: Es la densidad del aire, ρ_{agua} es la densidad del agua, W_β es la componente de la velocidad en la dirección β y W_α es la componente de la velocidad en la dirección α.

Entrada de impulso por el viento

$$\frac{dU_\alpha}{dt} = \frac{(U_*)_\alpha^2}{h} \tag{A.9}$$

Esta ecuación describe la tasa de cambio de la velocidad U_α en función de tiempo en un flujo océanico o fluvial.

$\frac{dU_\alpha}{dt}$: Representa la tasa de cambio de la velocidad en la dirección α con respecto al tiempo. Indica cómo la velocidad cambia con el tiempo.

$\frac{(U_*)_\alpha^2}{h}$: Es el cuadrado de la velocidad U_* en la dirección α. El valor de U_* depende de las características del flujo y suele relacionarse con la velocidad de fricción de la

capa límite.

h: Representa la altura característica del flujo. Esta altura es importante en el contexto del flujo, ya que afecta la velocidad y las fuerzas de fricción.

Nomenclatura en las ecuaciones hidrodinámicas

- i, j, k, m: Tres componentes espaciales (ejemplo i=1,2,3)
- α, β: Dos componentes espaciales horizontales (ejemplo α=1,2)
- U: Velocidad media de Reynolds
- η: Altura de superficie libre promedio de Reynolds
- ρ_o: Densidad referencial
- ρ': Densidad anómala (es decir la diferencia entre la densidad en el lugar y la densidad de referencia)
- g: gravedad
- f: Constante de Coriolis
- h: Altura de la capa de mezcla de viento

Apéndice B

Capas verticales

Para la simulación se han configurado 31 capas verticales para cubrir los 90 m de profundidad en el área de estudio. El modelo ELCOM requiere que la suma de todas las capas exceda la máxima profundidad. Se tiene entonces 20 capas de 1 m, 5 capas de 2 m, 2 capas de 5 m, 2 capas de 10 m y 2 capas de 20 m, que en total suman 100 m, que es mayor que la máxima profundidad de 90 m en al área de estudio.

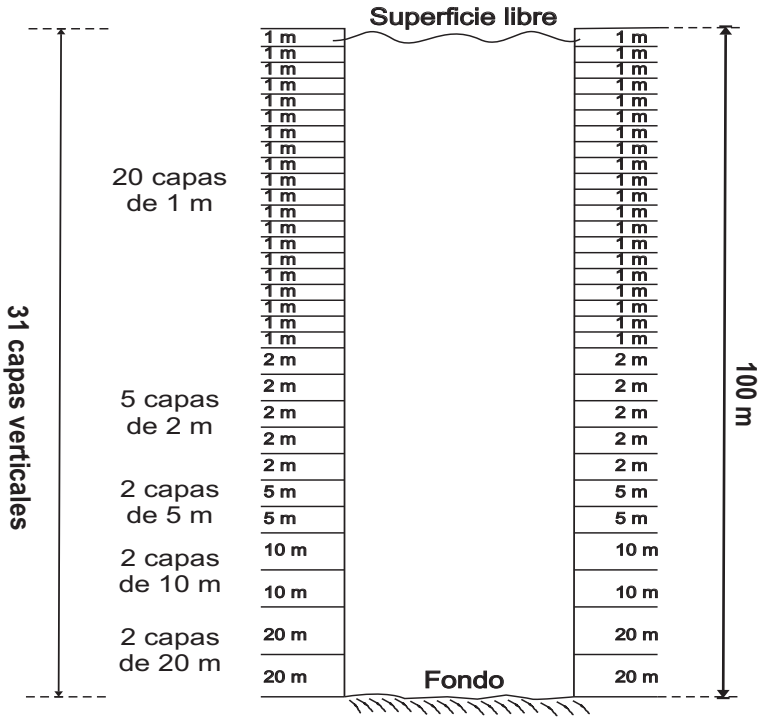


Figura B.1: Capas verticales en el área de estudio en total 31 capas que suman 100 m, de profundidad. Fuente: Elaboración propia.

Apéndice C

Esquema de discretización en ELCOM

El modelo ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) es un modelo de simulación numérica utilizado para simular la circulación en cuerpos de agua costeros como estuarios, lagos y océanos costeros. En el contexto de la resolución de ecuaciones hidrodinámicas, ELCOM utiliza un esquema de discretización basado en coordenadas rectangulares, que es un enfoque común en modelos numéricos para cuerpos de agua costeros. En particular, ELCOM utiliza un esquema de diferencias finitas para discretizar las ecuaciones hidrodinámicas.

Las ecuaciones gobernantes se discretizan en una malla de solución cartesiana en una formulación escalonada, donde las componentes individuales de velocidad se definen en cada cara y las variables escalares se definen en los centros de las celdas. En las ecuaciones discretas, las caras de las celdas se representan mediante subíndices como $i + 1/2$, mientras que los centros se representan con valores enteros (i, j, k).

Según Casulli y Cheng (1992) para la forma discreta de las ecuaciones, se utilizan subíndices para representar la posición en el espacio discreto (i, j, k).

Las ecuaciones gobernantes se refiere a las ecuaciones fundamentales que descri-

ben la dinámica de los flujos en el modelo ELCOM.

Discretizadas significa que estas ecuaciones continuas se han dividido en pasos finitos para ser resueltas numéricamente en una malla.

En una malla de solución cartesiana significa que se utiliza una malla cuadriculada con coordenadas cartesianas para representar el dominio espacial del modelo.

En una formulación escalonada significa que las variables se almacenan en diferentes ubicaciones de la malla, como caras de celdas y centros de celdas.

Subíndices como $i + 1/2$ se refiere a la forma en que se etiquetan las caras de las celdas en la malla. En una malla cartesiana, las caras se etiquetan con coordenadas como i, j y k, donde $i + 1/2$ representa la cara en la dirección i.

Valores enteros (i, j, k) se utilizan para representar las ubicaciones en el centro de las celdas. Esta es la forma como se discretizan y almacenan las variables en el modelo ELCOM, utilizando una malla cartesiana y notación específica para etiquetar las ubicaciones en la malla.

Diagrama esquemático de la malla computacional

Según Casulli y Cheng (1992), el diagrama esquemático de la malla de simulación es la que se muestra en la Figura C.1

$\eta_{i,j}$ es la elevación libre de la superficie del agua en ese punto en un momento específico. Esta elevación puede deberse a factores temporales como las olas o las mareas y refleja las fluctuaciones de la superficie del agua en relación con la profundidad media.

h representa la profundidad estática o la profundidad media del agua en ese punto. Es la profundidad promedio del agua sin considerar las variaciones debidas a las olas, mareas u otros factores temporales.

La profundidad total en un punto es $H = h + \eta$.

Así mismo u representa la componente de velocidad horizontal en la dirección del eje x (horizontal), que generalmente se asocia con la corriente en la dirección este-oeste.

v representa la componente de velocidad horizontal en la dirección del eje y (horizontal), que generalmente se asocia con la corriente en la dirección norte-sur

w representa la componente de velocidad vertical en la dirección del eje z (vertical). La velocidad vertical puede indicar el movimiento hacia arriba o hacia abajo en el agua, lo que es fundamental para comprender la estratificación vertical y la circulación vertical en un cuerpo de agua.

Δx: Representa el espaciado horizontal entre los puntos de la malla en la dirección x (horizontal), Δz: Representa el espaciado vertical entre los puntos de la malla en la dirección z (vertical).

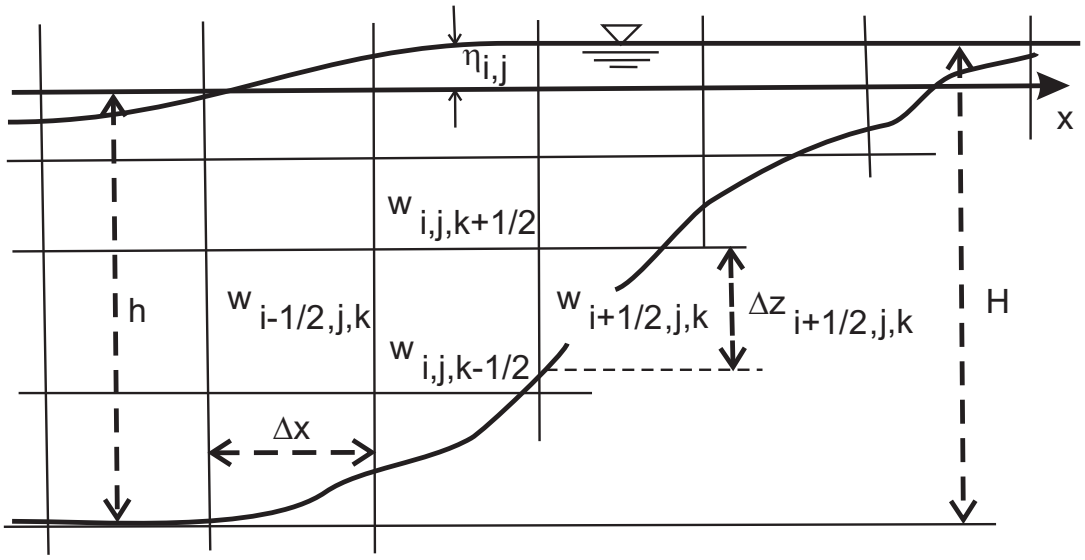


Figura C.1: Esquema de la malla computacional. Fuente: Cassulli y Cheng (1992)

Las velocidades en los Centros de las Celdas: Las velocidades horizontales promedio (u y v) se calculan generalmente en los centros de las celdas de la malla, es decir, en el punto medio de cada celda como se muestra en la Figura C.2. Esto se conoce como un enfoque centrado en la celda. Las velocidades verticales (w) también se calculan en los centros de las celdas en la dirección vertical.

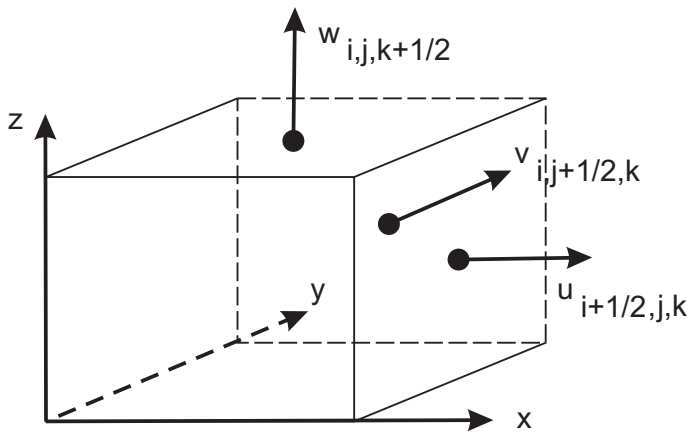


Figura C.2: Velocidades en la malla computacional, en los centros de las celdas. Fuente: Cassulli y Cheng (1992)

Apéndice D

Viscosidad turbulenta

La viscosidad eddy, también conocida como viscosidad turbulenta, es un término que se utiliza en la dinámica de fluidos para describir la transferencia de cantidad de movimiento (momentum) entre diferentes escalas de turbulencia en un flujo. En términos simples, se refiere a la resistencia que los movimientos turbulentos de un fluido ofrecen al flujo de otros movimientos turbulentos de diferentes tamaños.

Según Hodges y Dallimore (2014) La entrada de momentum del viento generalmente se modela utilizando una condición de contorno de esfuerzo en la superficie libre, la viscosidad eddy ν y el strees del viento u_*^2 requieren de la solución vertical de la ecuación

$$\frac{\partial}{\partial x}(\nu\frac{\partial U_\alpha}{\partial x_3})\ ;\ \frac{\partial}{\partial x}(\kappa\frac{\partial C}{\partial x_3}) \tag{D.1}$$

En lugar de los términos de esfuerzo de Reynolds (se refiere a la contribución del flujo turbulento al esfuerzo o fuerza en un fluido) en las ecuaciones de transporte de momentum y escalar, se utilizan términos que son modelados en ELCOM mediante el modelo de capa mixta tridimensional

$\frac{\partial}{\partial x}(\nu\frac{\partial U_\alpha}{\partial x_3})$: Aquí, ν representa la viscosidad cinemática del fluido. La viscosidad cinemática es una medida de la resistencia del fluido al movimiento. En el contexto de la ecuación, esta parte describe la difusión de momentum en la dirección x_3 debido a la viscosidad del fluido. Esta expresión es comúnmente utilizada para modelar la

transferencia de momentum en la dirección vertical en la dinámica de fluidos.

$\frac{\partial}{\partial x}(\kappa \frac{\partial C}{\partial x_3})$: En esta parte de la ecuación, κ se refiere a la difusividad turbulenta. La difusividad turbulenta es un parámetro que representa la tasa de mezcla turbulenta en el fluido. En este contexto, esta expresión describe la difusión de una propiedad escalar C en la dirección x_3 debido a la turbulencia en el fluido. Puede representar, por ejemplo, la dispersión de una sustancia química o la transferencia de calor causada por la turbulencia en el fluido.

Aquí, U_α se refiere a una componente de velocidad en la dirección α y C es una propiedad escalar que describe alguna característica física del fluido, como la concentración de una sustancia química o la temperatura. Ambos términos son importantes en la ecuación de transporte para describir la transferencia de momentum y la difusión de propiedades escalares en un flujo turbulento.