



“Energía Mareomotriz”
Convenio de Colaboración y Transferencia de Recursos entre la
Subsecretaría de Energía y la Universidad de Chile.

Para
Ministerio de Energía
Gobierno de Chile

Por
Departamento de Geofísica
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile

5 de Mayo del 2014

Tabla de contenidos

1. Introducción.....	2
2. Modelo oceánico regional ROMS.....	3
3. Implementación del modelo en la costa de Chile.....	4
3.1. Implementación del modelo en el Estrecho de Magallanes.....	6
4. Análisis armónico.....	7
5. Validación.....	8
5.1. Descripción de la información utilizada.....	8
5.2. Validación del nivel del mar.....	10
5.3. Validación de las corrientes de marea.....	11
6. Sitios de interés.....	13
6.1. Isla de Chiloé.....	13
6.2. Estrecho de Magallanes.....	15
7. Conclusiones.....	16
8. Desafíos futuros.....	17
9. Referencias.....	18

1. Introducción

Chile enfrenta actualmente el importante desafío de aumentar y diversificar su matriz energética. Por esta razón, ha aumentado el interés por cuantificar el potencial de las energías renovables no convencionales (ERNC). El Departamento de Geofísica (DGF) de la Universidad de Chile tiene una larga experiencia llevando a cabo iniciativas destinadas a la prospección de distintos tipos de ERNC. Ejemplo de ello son los Exploradores de Energía Eólica y Solar¹, los cuales han sido desarrollados gracias a una estrecha y prolongada colaboración con el Ministerio de Energía.

Dado que nuestro país cuenta con una costa de más de 4000 km de extensión, es posible suponer que existe un potencial de energías marinas significativo frente a nuestro litoral. Por esta razón, resulta oportuno realizar una caracterización detallada del potencial de las energías marinas, dentro de las cuales se encuentran la energía asociada al oleaje, a las mareas y las corrientes. En este contexto nace la idea de desarrollar el Explorador Marino¹, el cual tiene como principal objetivo ampliar el conocimiento del recurso energético oceánico renovable, a través de simulaciones numéricas destinadas a describir la variabilidad espacial y temporal de dicho recurso frente a las costas de Chile. Este proyecto se ejecutó bajo el Convenio de Prestación de Servicios y Transferencia de Recursos entre el Ministerio de Energía y la Universidad de Chile según Decreto Exento N°550 del 28 de diciembre de 2011, participando como contraparte el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y la Dirección de Investigación, Programas y Desarrollo de la Armada (DIPRIDA).

En particular, el presente documento muestra información sobre el recurso mareomotriz disponible en la costa de Chile. Se entrega una breve descripción del modelo hidrodinámico utilizado para simular las corrientes y se presenta la metodología que fue adoptada para la ejecución de las simulaciones numéricas, indicando las configuraciones de los dominios y las bases de datos seleccionadas para utilizar como condiciones iniciales y de borde. Además, se evalúa el desempeño de las simulaciones a través de una validación realizada mediante comparaciones con observaciones *in-situ* proporcionadas por el SHOA. Se exhiben los resultados de las corrientes de marea en dos zonas atractivas por su potencial energético, como son los alrededores de la Isla de Chiloé y el Estrecho de Magallanes. Finalmente se entregan algunas conclusiones del trabajo realizado y los desafíos futuros para mejorar la calidad de la información disponible en la actualidad.

Es importante recalcar que debido a que se presenta información sobre el recurso mareomotriz basado en simulaciones numéricas, los resultados obtenidos no deben ser considerados absolutamente confiables sin ser corroborados previamente con mediciones de campo.

¹ Los Exploradores de Energía Eólica, Solar y Marina son herramientas en línea destinada al análisis de los recursos energéticos, los cuales son de acceso libre y gratuito para todo tipo de público. Ver en www.minenergia.cl o en: <http://ercn.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/> <http://ercn.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/> <http://ercn.dgf.uchile.cl/Explorador/Marino/> (actualmente solo energía undimotriz)

2. Modelo oceánico regional ROMS

Para llevar a cabo las simulaciones que permiten obtener una prospección preliminar de la energía mareomotriz, el sistema de modelación implementado es el modelo oceánico regional ROMS (Regional Ocean Modeling System). Este modelo fue desarrollado inicialmente por la Universidad de Rutgers (Shchepetkin & McWilliams, 2005), agregándose luego otras instituciones con el fin de mejorar el código, en cuanto a estabilidad y eficiencia, como también para hacerlo más fácil de aplicar para distintos tipos de usuarios. En particular, en este proyecto se ha utilizado el modelo ROMS AGRIF desarrollado por el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD, Francia), debido principalmente a su habilidad para ejecutar configuraciones de dominios anidados.

El modelo oceánico regional ROMS resuelve las ecuaciones primitivas de un fluido geofísico hidrostático e incompresible, con una superficie libre, coordenadas horizontales curvilíneas y coordenadas verticales siguiendo la topografía (coordenadas- σ). Dentro de las variables de pronóstico del modelo están la elevación de la superficie libre (nivel del mar), las componentes horizontales de la velocidad barotrópica y baroclínica, y propiedades materiales como la temperatura y la salinidad.

La parametrización de la mezcla vertical en ROMS corresponde a un sub modelo de cierre de la turbulencia. La mezcla vertical tanto en el interior del océano como en las capas límites de superficie y de fondo es calculada con el esquema de parametrización KPP (K-Profile Parameterization; Large *et al.*, 1994). Este esquema ha mostrado ser adecuado tanto en comparaciones con mediciones como en modelaciones de gran dominio (Li *et al.*, 2001). Por otra parte, la mezcla horizontal es parametrizada usando coeficientes de mezcla proporcionales al espaciamiento de la grilla local y gradientes de velocidad. Varios operadores de mezcla horizontal en coordenadas curvilíneas están implementados en ROMS, incluyendo formas armónicas para la viscosidad y la difusión. Los coeficientes de mezcla asociados para el momentum y los trazadores pueden ser constantes, dependientes del tamaño de grilla, o variar con el tiempo (proporcionales al campo de flujo).

Como condiciones de borde superficiales ROMS requiere de especificaciones de flujos de momentum (esfuerzo del viento), flujos de calor (radiación, calor sensible y calor latente) y flujos de agua dulce (precipitación y evaporación). Como condición de borde en el fondo, ROMS usa una formulación cuadrática de arrastre para el momentum, mientras que los flujos normales de calor y agua dulce son típicamente cero. En los bordes laterales cerrados, los flujos normales de calor y de agua dulce también son cero, excepto para entradas continentales de agua dulce, y una condición de no deslizamiento es aplicada al flujo tangencial. Las condiciones en los bordes abiertos son una combinación de radiación hacia fuera del dominio y un flujo adaptativo hacia las condiciones externas prescritas (Marchesiello *et al.*, 2001).

3. Implementación del modelo en la costa de Chile

Para llevar a cabo las simulaciones que permiten obtener una prospección preliminar de la energía mareomotriz presente en las costas de Chile, la estrategia fue dividir la región en sub-dominios, los cuales a su vez se encuentran anidados sobre dominios de mayor extensión (figura 1). Los dominios de mayor extensión tienen una resolución espacial de 9 km, los cuales tienen un dominio anidado de resolución intermedia de 3 km, el cual contiene otro dominio anidado de alta resolución de 1 km en la zona costera.

Contar con una correcta representación de la profundidad del fondo marino es importante para obtener simulaciones realistas de la circulación costera. En estas simulaciones se ha utilizado la base de datos batimétrica de carácter público de mayor calidad disponible, la cual tiene una resolución nominal de 1 km y es denominada GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans)². En general, la calidad de GEBCO es adecuada para fines de modelación oceanográfica en mar abierto, pero puede presentar imprecisiones importantes en la zona de canales y estrechos del sur de Chile.

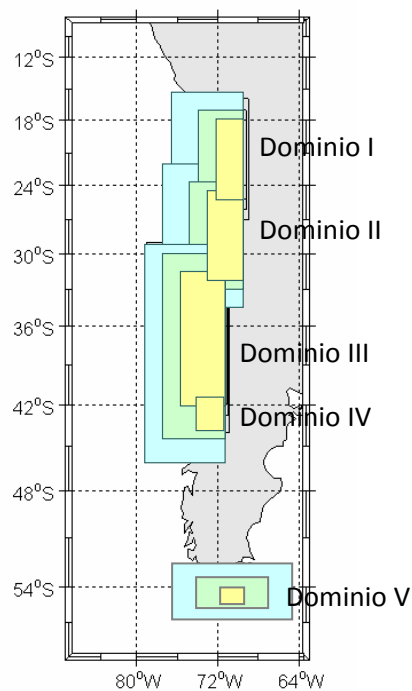


Figura 1. Configuración de las sub-regiones y dominios anidados utilizados en ROMS.

² Auspiciado por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO y la Organización Hidrográfica Internacional (OHI). www.gebco.net.

Una condición de borde superficial primordial en el modelo es el esfuerzo del viento cerca de la superficie del mar (10 m de altura). Para proveer al modelo de esta condición de borde se utilizó una base de datos satelitales denominada ASCAT (Advanced Scatterometer)³, la cual tiene una resolución espacial de 25 km y una resolución temporal diaria (figura 2). Esta base de datos es de aceptable calidad sobre el océano, pero no logra representar los gradientes fuertes del viento que ocurren cerca de la costa, los cuales podrían tener un impacto muy significativo sobre la circulación costera local.

Como condiciones de bordes abiertos de los dominios de mayor extensión y condiciones iniciales de todos los dominios se utilizó la base de datos ECCO (Estimating the Circulation & Climate of the Ocean). Estos datos son una combinación de un modelo global de circulación oceánica (GCM, General Circulation Model) con observaciones, las cuales pueden ser tanto mediciones remotas como in-situ. Esta base de datos tiene una resolución espacial de 1° y una resolución temporal de 10 días. El modelo además ha sido forzado por las mareas del modelo global TPXO7.2 de la Universidad Estatal de Oregon (Egbert & Erofeeva, 2002)⁴.

Se realizaron simulaciones para todo el año 2010, excepto en la zona del Estrecho de Magallanes, donde se cuenta con una simulación de solo un mes. Los resultados del modelo fueron almacenados con una resolución temporal de una hora. Datos de nivel del mar y corrientes generados a partir de estas simulaciones son analizados para dar una prospección preliminar del potencial de energía mareomotriz en las costas de Chile.

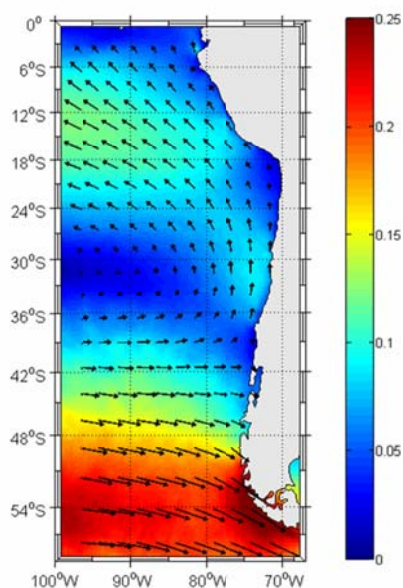


Figura 2. Promedio anual (año 2010) del esfuerzo del viento (Pa) a partir de los datos satelitales ASCAT en la región del Pacífico Sur Oriental.

³ El escaterómetro ASCAT corresponde a la última generación de medición satelital para estimar el esfuerzo del viento a través de microondas emitidas desde el espacio. Los datos pueden ser adquiridos desde <http://cersat.ifremer.fr>

⁴ Este modelo global de mareas es un ajuste de mínimos cuadrados a la ecuación de marea de Laplace y los datos de altimetría satelital de los satélites TOPEX/Poseidon y Jason. Para mayor información y descarga de los datos se recomienda visitar <http://volkov.oce.orst.edu/tides/>

3.1. Implementación del modelo en el Estrecho de Magallanes

Para realizar una simulación del Estrecho de Magallanes se utilizaron 3 dominios anidados (figura 3). El dominio de mayor extensión espacial y menor resolución horizontal (~ 4 km) simuló 9 meses, abarcando el periodo entre enero y septiembre del año 2010, con el objetivo de obtener una condición inicial y de borde adecuada para los dominios de mayor resolución horizontal. Tanto los forzantes superficiales como la batimetría fueron obtenidos a partir de bases de datos generados por National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA). Un re-análisis de la atmósfera superficial fue obtenido a partir de los datos NCEP2⁵ y la batimetría fue elaborada a partir de la base de datos batimétrica ETOPO2⁶. Las condiciones de borde fueron obtenidas a partir de los datos ECCO. Los resultados correspondientes al último mes de simulación fueron usados como condición de borde e inicial para los dominios de mayor resolución espacial. A partir de este dominio mayor fueron anidados 2 dominios de menor extensión espacial, uno de 1.2 km y otro de 400 m de resolución horizontal, los cuales realizan una simulación de sólo un mes de duración.

Es importante destacar que para realizar la simulación del dominio de resolución intermedia (1.2 km) la batimetría utilizada corresponde la base de datos GEBCO, mientras que la batimetría utilizada en el dominio de mayor resolución (400 m) corresponde a una combinación de datos batimétricos proporcionados por el SHOA y la base de datos GEBCO.

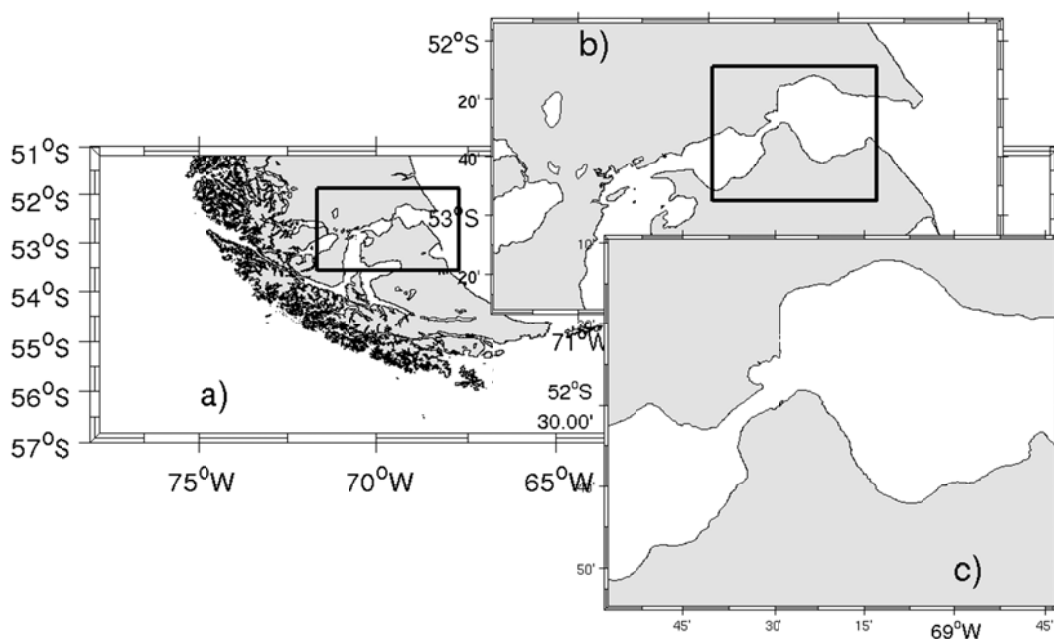


Figura 3. Área de estudio en la zona del Estrecho de Magallanes. Los dominios tienen una resolución espacial de: a) ~ 4 km, b) ~ 1.2 km y c) ~ 400 m.

⁵ NCEP2 corresponde al Reanálisis desarrollado por National Center for Environmental Prediction de la NOAA de Estados Unidos. La descarga de los datos se puede realizar en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.surface.html>

⁶ ETOPO2 es la base de datos batimétrica de National Geophysical Data Center de la NOAA de Estados Unidos. La descarga de los datos se puede realizar en <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO2/>

4. Análisis Armónico

Las corrientes de marea se pueden representar como la suma de oscilaciones armónicas con los períodos determinados por los ciclos de las fuerzas astronómicas que dan origen a las mareas. Cada oscilación se conoce como constituyente de marea, y tiene asociada una amplitud y una fase, las cuales pueden ser calculadas a partir de datos de corrientes utilizando técnicas de análisis armónico. Se pueden incluir cientos de periodos diferentes, sin embargo, con el propósito de ejemplificar el carácter mas bien determinístico de la marea, en este reporte se incluirán sólo los períodos principales, los cuales están asociados a los ciclos de la Luna y el Sol. Los constituyentes principales de la marea utilizados para la elaboración de este informe se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Constituyentes armónicos principales de la marea.

Símbolo	Componente de marea	Periodo (horas)
M ₂	Semidiurna lunar	12.42
S ₂	Semidiurna solar	12.00
N ₂	Semidiurna lunar elíptica mayor	12.65
K ₁	Diurna luna/sol	23.94
O ₁	Diurna lunar	25.83

Así las corrientes observadas y simuladas pueden ser representadas matemáticamente como la suma de M armónicos:

$$u' = u_0 + \sum_{j=1}^M A_j \cos(\omega_j t - \phi_j)$$

donde:

u' es la representación armónica de la corriente.

u₀ es el flujo medio.

M es el número total de armónicos con el cual se representará la marea.

A_j es la amplitud del j-ésimo constituyente de marea.

ω_j es la frecuencia angular del j-ésimo constituyente de la marea.

t es el tiempo.

φ_j es la fase del j-ésimo constituyente de marea.

Para obtener la amplitud y la fase de cada constituyente se realizó un ajuste de mínimos cuadrados entre los datos de corrientes y el armónico con el periodo de la constituyente de interés. En general, se puede obtener una muy buena representación de las corrientes de marea, con gran parte de la varianza (energía) de los datos explicada por el pronóstico u', incluyendo sólo los armónicos M₂, S₂, N₂, K₁ y O₁.

5. Validación

En el campo de la hidrodinámica, la modelación numérica posee una importancia considerable, puesto que puede ser utilizada como una herramienta en la toma de decisiones basándose en los resultados obtenidos. Por esta razón es necesario contar con buenas simulaciones numéricas y así obtener resultados confiables de los modelos. Para establecer cuán realista son las simulaciones realizadas, se presenta a continuación una comparación entre los datos entregados por el modelo y las observaciones de campo disponibles. En esta sección se presentan en particular las comparaciones entre los resultados del modelo de nivel del mar y corrientes.

5.1. Descripción de la información utilizada

Para llevar a cabo una comparación entre el nivel del mar simulado por ROMS y observaciones de campo se usaron datos horarios del nivel del mar registrados en mareógrafos instalados a lo largo de la costa de Chile (figura 4) por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). Se contó con datos de nivel del mar registrados durante el año 2010, por lo que el periodo de simulación y observación coinciden en este caso.

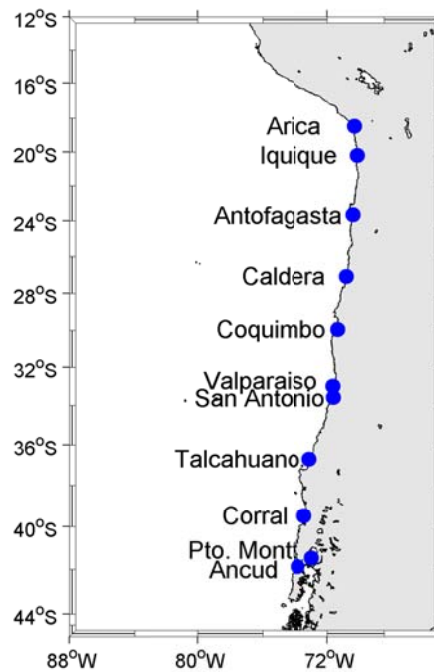


Figura 4. Mapa con las estaciones de muestreo disponibles para realizar una validación del nivel del mar simulado.

Por otra parte, para comparar las corrientes simuladas por ROMS y observaciones *in-situ*, se utilizaron mediciones de corrientes obtenidas por perfiladores doppler acústicos denominados ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) anclados en dos puntos diferentes de la zona sur de Chile (figura 5). La tabla 2 contiene información detallada de la posición geográfica y del período de medición de los instrumentos utilizados para la validación de los resultados de corrientes del modelo.

Tabla 2. Sitios de medición, posición geográfica, período de medición y configuración de los ADCPs

Sitio	Latitud	Longitud	Inicio – Final	Δt (min)	Rango de profundidades medidas (m)	Tamaño de celda (m)
Caleta Sta. Bárbara	42.86° S	72.82° W	10 Jun 2009-15 Jun 2009	10	1-35	1
Paso Inglés	53.58° S	72.32° W	31 Oct 2008-30 Nov 2008	10	1-70	2

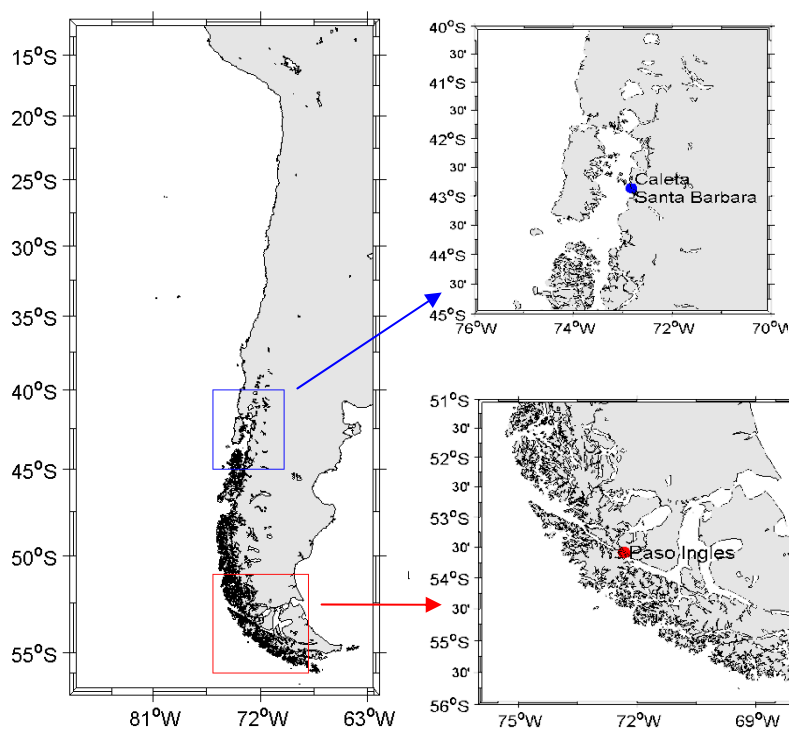


Figura 5. Mapa con las estaciones de muestreo disponibles para realizar una validación de las corrientes simuladas.

5.2. Validación del nivel del mar

Existe una alta dependencia del nivel del mar con los ciclos astronómicos que generan la marea, así la variabilidad del nivel del mar puede ser pronosticada de buena manera en cualquier época del año. Además, dado que las frecuencias que involucran la mayor variabilidad del nivel del mar son diurnas y semidiurnas, se puede pronosticar con una aceptable precisión, al utilizar observaciones que tengan aproximadamente un mes de duración. Por esta misma razón, no se esperan grandes cambios intraestacionales o anuales en la energía de alta frecuencia del nivel del mar. Esto a su vez permite que se puedan realizar buenas validaciones del nivel del mar representado por el modelo.

Las oscilaciones del nivel del mar tienen mayor rango de marea en la zona sur de Chile. En particular la estación de Puerto Montt presenta la mayor variabilidad del nivel de mar (figura 6). Este mayor potencial de marea presente en la zona sur de Chile, sumado a la complejidad de la línea de costa que forma canales y fiordos estrechos en esta región, permite suponer que las corrientes de marea pueden alcanzar valores muy superiores a los observados en otras regiones del país expuestas al océano abierto.

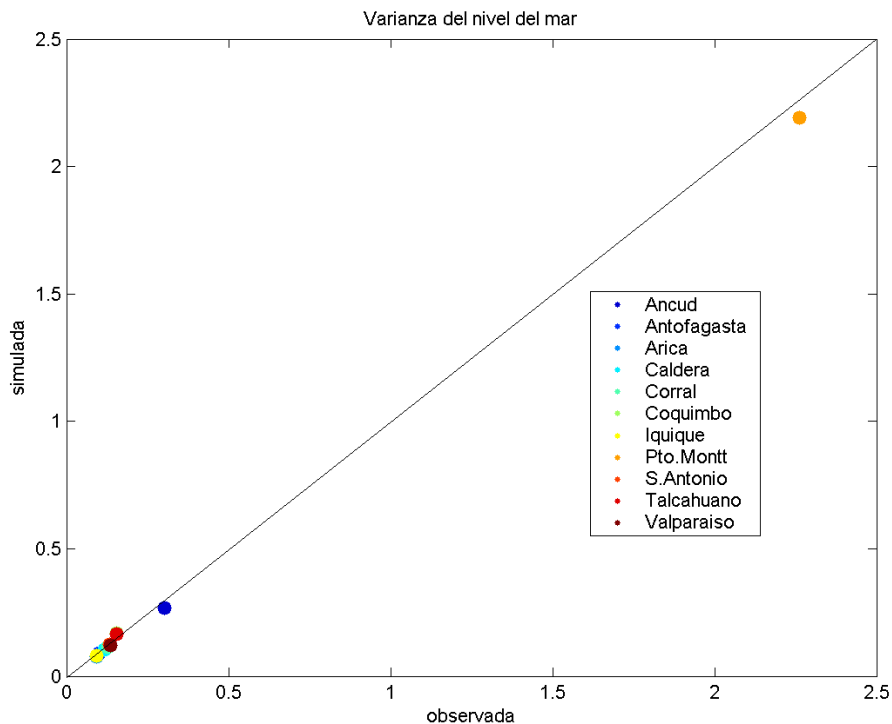


Figura 6. Diagrama de dispersión de la varianza de las series de tiempo del nivel del mar observado y simulado en diferentes lugares de la costa de Chile.

)

5.3. Validación de las corrientes de marea

En general, en las regiones costeras abiertas al océano Pacífico, los resultados del modelo no muestran un potencial importante de energía asociado a las corrientes de marea. Las corrientes rara vez superan el umbral de 1 m/s y no son controladas por las mareas, sino que responden a los gradientes de presión generados por la acción del esfuerzo del viento.

En la zona de canales y estrechos del sur de Chile el escenario es completamente distinto. Aquí las corrientes son dominadas por el fenómeno de mareas y en algunos sitios se pueden observar corrientes del orden de 3 m/s. Al comparar la corriente meridional simulada con las observaciones en Caleta Santa Bárbara, se puede observar que el modelo está reproduciendo magnitudes de corrientes realistas (figura 7). Lo mismo ocurre en el caso de Paso Inglés, donde tanto la componente meridional como zonal muestran magnitudes de la corriente consistentes con las observaciones (figura 8). Cabe recordar que las series de tiempo no son directamente comparables, ya que no coinciden los periodos de observación y simulación. Sin embargo, al contar con sólo unos pocos días de observaciones es posible realizar una aproximación razonable de la energía de las corrientes de marea utilizando el análisis armónico. De hecho, en las figuras 7 y 8 se presenta la reconstrucción de la serie de tiempo para representar el periodo en que hay observaciones utilizando la amplitud y fase de las constituyentes obtenidas al aplicar el análisis armónico a los datos de la simulación. Así, la reconstrucción de las series de tiempo de corrientes con sólo cuatro armónicos permite capturar un importante porcentaje de la varianza total (tabla 3), por lo que el análisis armónico se convierte en una herramienta importante para estimar el potencial energético en esta región.

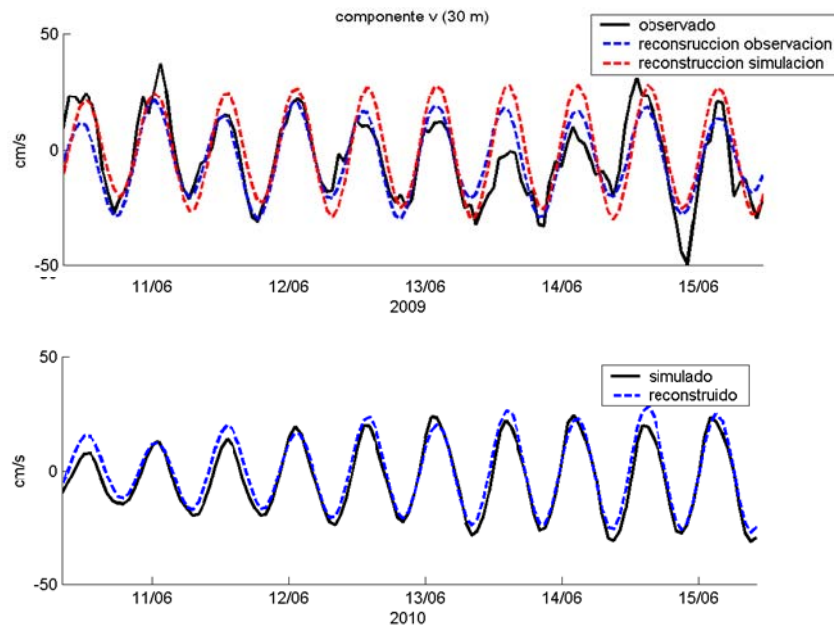


Figura 7. Datos horarios del flujo observado y simulado a 30 metros de profundidad) en Caleta Santa Bárbara (línea negra). Además se muestran las series reconstruidas (línea segmentada azul) a partir de las constituyentes de marea M_2 , S_2 , N_2 , K_1 y O_1 .

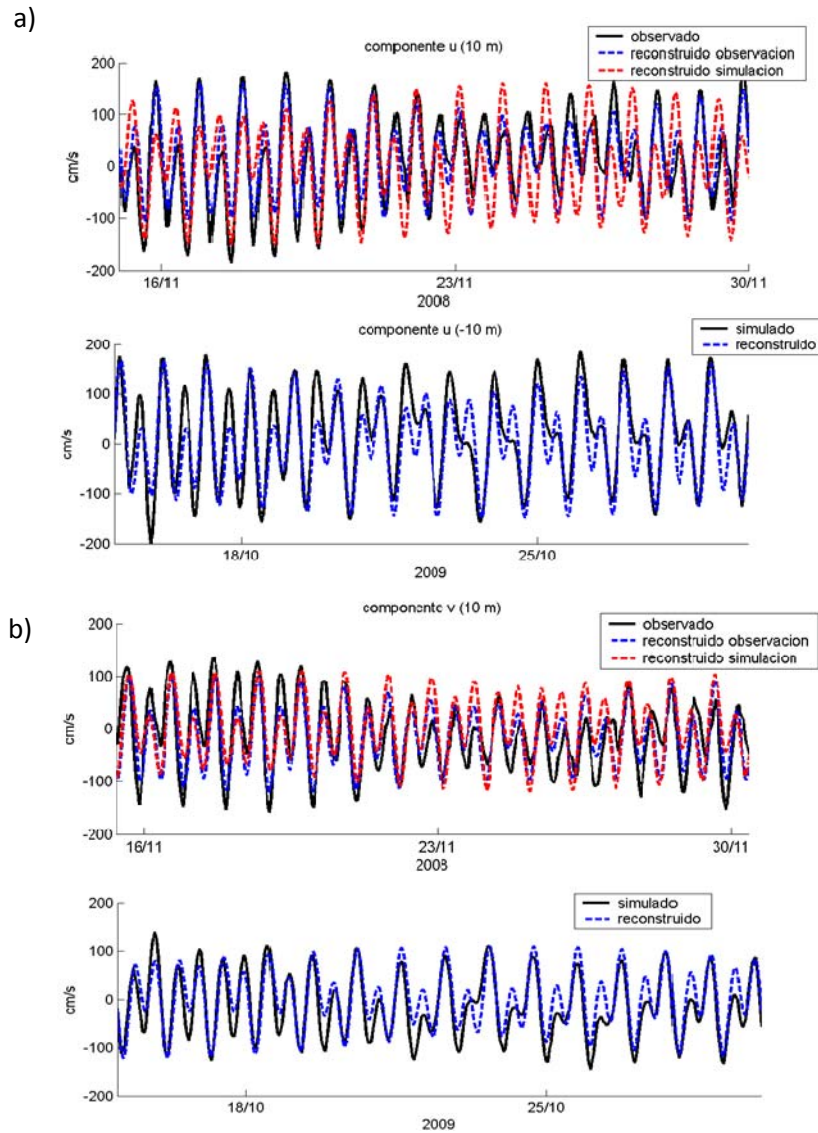


Figura 8. Datos horarios del flujo observado (figura superior) y simulado a 10 metros de profundidad (figura inferior). Además se muestran las series reconstruidas utilizando las observaciones y la simulación a partir de las constituyentes de marea M_2 , S_2 , N_2 , K_1 y O_1 . a) Componente zonal de la corriente y b) componente meridional de la corriente.

Tabla 3. Varianza explicada por las reconstrucciones de las series de tiempo de corrientes utilizando las constituyentes de marea M_2 , S_2 , N_2 , K_1 y O_1 .

Sitio	Varianza explicada observaciones		Varianza explicada simulaciones	
	Componente zonal	Componente meridional	Componente zonal	Componente meridional
Caleta Sta. Bárbara	-	87.6%	-	93.0%
Paso Inglés	78.7%	80.2%	74.4%	75.6%

6. Sitios de interés

6.1. Isla de Chiloé

El dominio utilizado para simular la zona de la Isla de Chiloé comprende entre 72°W – 75°W de longitud y 41.3°S – 43.6°S de latitud. Este dominio cuenta con una resolución de 1 km y se encuentra anidado a dos mallas de menor resolución espacial (figura 9). El dominio de mayor extensión tiene una resolución de 9 km, el dominio intermedio una resolución de 3 km. Las condiciones de borde laterales en la grilla mayor y las condiciones iniciales fueron obtenidas a partir de datos ECCO. La batimetría utilizada en todos los dominios corresponde a GEBCO. El modelo ha sido forzado por las mareas del modelo global TPXO7.2 considerando 10 constituyentes y por el viento satelital del escaterómetro ASCAT. La simulación comprende el periodo comprendido entre enero y diciembre del año 2010.

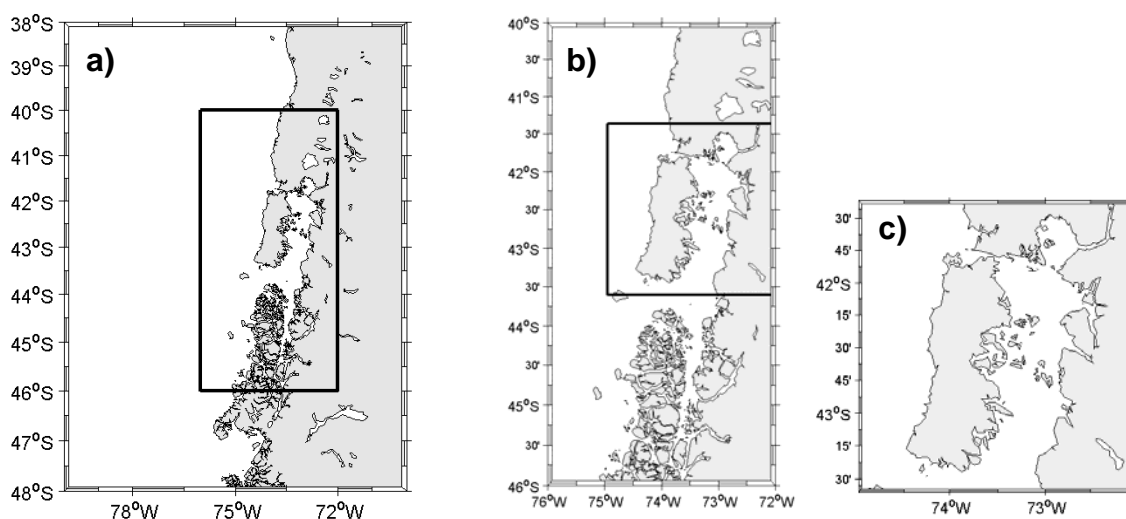


Figura 9. Área de estudio en la zona de la Isla de Chiloé. Los dominios anidados tienen una resolución espacial de: a) ~9 km, b) ~ 3 km y c) ~ 1 km

En la figura 10 se muestra la magnitud promedio de la velocidad de la corriente superficial simulada y su varianza. Como es de esperar el modelo muestra valores máximos en la zona del Canal de Chacao, el cual es actualmente objeto de estudio con la finalidad de evaluar el potencial mareomotriz y la factibilidad de extraer energía en esta zona (Proyecto Fondef D09I1052⁷). Sin embargo, también aparecen en la simulación otros puntos con máximos relativos de la velocidad de la corriente, como por ejemplo, frente a las Islas de San Pedro y Tranqui, y en la zona del Canal Desertores. Es importante notar que las mismas regiones que presentan mayores valores medios de la corriente, también presentan la mayor variabilidad debido al carácter de oscilante de las corrientes de marea.

⁷ Proyecto en desarrollo denominado "Evaluación del recurso energético asociado a corrientes mareales en el Canal de Chacao para la selección e implementación de dispositivos de recuperación de energía".

Es importante destacar que existe en esta zona una gran cantidad de canales estrechos que se presentan en la figura 10 con un bajo potencial mareomotriz. Sin embargo, debido a la resolución horizontal del modelo, estos canales pueden estar siendo mal representados o incluso no estar siendo modelados. Por esta razón es necesario analizar con mucha precaución estos resultados.

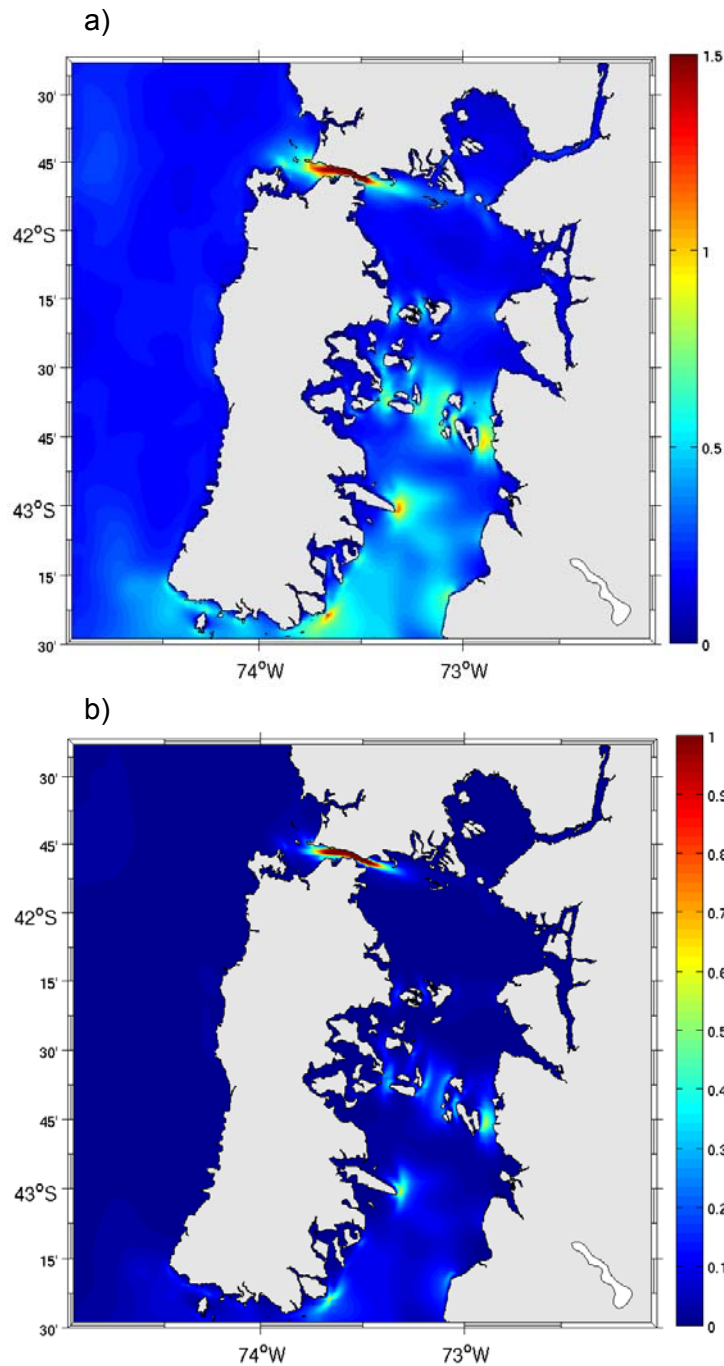


Figura 10. a) Magnitud promedio de la velocidad de la corriente superficial. b) Varianza de la magnitud de la corriente superficial.

6.2. Estrecho de Magallanes

La estrategia utilizada para realizar una simulación del Estrecho de Magallanes fue presentada en la sección 3.1. Aquí se presentan los resultados de la simulación de un mes de duración del dominio de mayor resolución horizontal (400 m).

En la figura 11 se presentan la magnitud promedio de la velocidad de la corriente superficial y su varianza. Como es de esperar los mayores registros de velocidades se encuentran en las zonas de angosturas del Estrecho de Magallanes, en especial la Primera Angostura. En esta zona las corrientes superan la velocidad de 1 m/s entre un 60% a 70% del mes simulado. En esta zona las corrientes tienen una gran variabilidad asociada a las mareas, sin embargo, el viento también puede afectar de forma significativa las corrientes, debido a su alta intensidad durante gran parte del año.

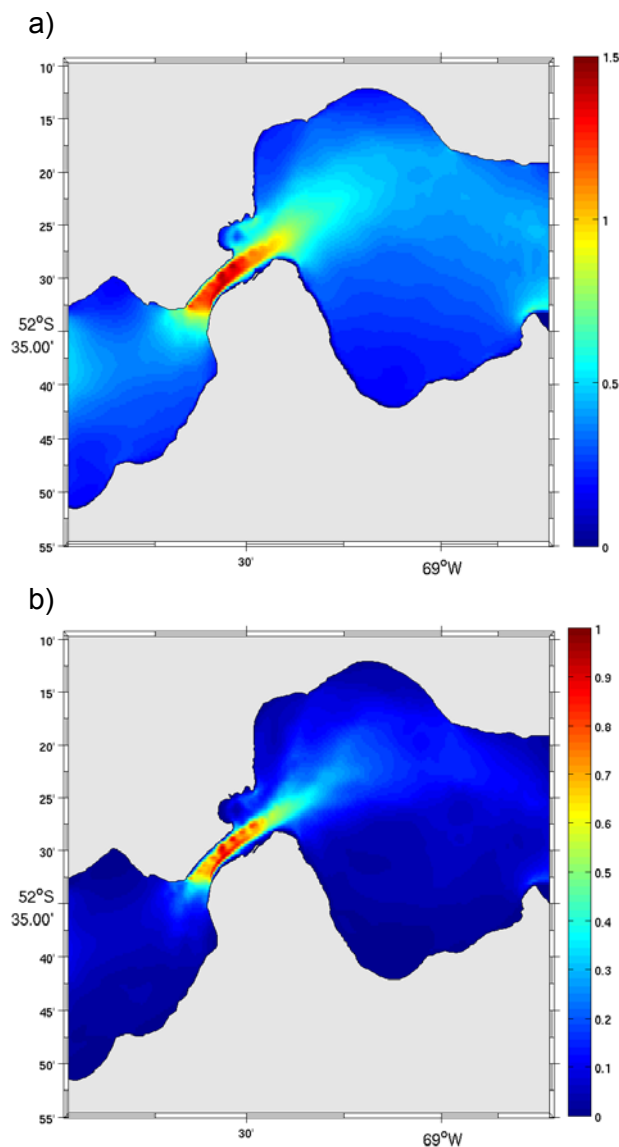


Figura 11. a) Magnitud promedio de la velocidad de la corriente superficial. b) Varianza de la magnitud de la corriente superficial.

7. Conclusiones

En este estudio se encontró que la costa de Chile presenta dos tipos de regímenes bastantes dispares en relación a la energía mareomotriz disponible. Por una parte, la costa del país que se encuentra expuesta al océano abierto, desde Arica hasta el norte de Maullín (entre 18°S y 41.5°S), no presenta un nivel de energía mareomotriz que sea aprovechable, debido a que las oscilaciones del nivel del mar por efecto de las mareas son del orden de decenas de centímetros y las corrientes rara vez superan los 0.5 m/s. Además, aunque la variabilidad de alta frecuencia del nivel del mar está controlada principalmente por las mareas, las corrientes en la zona costera se encuentran influenciadas de forma importante por el viento y la surgencia costera, principalmente desde Coquimbo (30°S) hacia el sur, donde la intensidad del viento y su variabilidad sinóptica aumentan considerablemente. Así, la utilización del modelo ROMS en esta región abierta al océano es bastante eficiente utilizando 1 km de resolución, sin embargo, la resolución del esfuerzo del viento (0.25°) es demasiado gruesa para incluir los efectos del gradiente zonal presente en la costa de Chile, lo que puede afectar significativamente la circulación costera.

Por otra parte, está la zona de canales, fiordos y estrechos del sur de Chile, desde la Isla de Chiloé hasta el Estrecho de Magallanes (entre 42° S y 55°S). Esta es una región interesante en términos de su potencial energético mareomotriz, ya que además de que el rango de marea aumenta considerablemente en esta zona, con oscilaciones del nivel del mar que pueden superar los 8 metros de altura, sus características geográficas, con constricciones importantes del flujo, permite que las corrientes de marea aumenten de forma significativa, encontrándose valores superiores a 1m/s en diversos canales. Además, dado que en esta zona las corrientes y las oscilaciones del nivel del mar de alta frecuencia están fuertemente controladas por el fenómeno de la marea, es posible obtener una muy buena aproximación de la variabilidad temporal del recurso energético. Utilizando un análisis armónico se pueden reproducir las corrientes de marea y el nivel del mar de forma bastante realista sin tener límites en el tiempo, debido al carácter determinístico del fenómeno de las mareas por ser un efecto de las fuerzas gravitacionales de los astros sobre la Tierra.

Finalmente es importante destacar que debido a la complejidad de la línea de costa en la zona de canales y estrechos del sur de Chile, y a la máxima resolución horizontal que se está utilizando para realizar las simulaciones (1 km y 400 m), existen canales que no pueden ser bien representados o incluso no están siendo representados por el modelo. Esto es importante ya que la presencia o ausencia de un canal puede alterar la dinámica de las regiones adyacentes. Sin embargo, a pesar de las limitaciones de las simulaciones en esta región, en general, se obtuvo una buena validación de los datos simulados con las observaciones disponibles.

8. Desafíos Futuros

Los resultados obtenidos en este proyecto nos han permitido concluir que, desde el punto de vista de la energía mareomotriz, la zona de interés se ubica en la región de estrechos, fiordos y canales del sur de Chile. Por esta razón, resulta necesario mejorar las simulaciones hidrodinámicas en esta zona. Para lograr esto es preciso aumentar la resolución horizontal de las simulaciones con el objetivo de representar de mejor manera los canales presentes en esta región. Esto aumenta considerablemente el tiempo de cómputo, por lo tanto, el uso de mallas regulares ya no resulta eficiente. Dada la complejidad de la línea de costa en esta región, el uso de mallas flexibles que permitan aumentar la resolución en canales estrechos y disminuirla cuando los canales aumenten su extensión es la alternativa más conveniente. Por lo tanto, se está trabajando actualmente en la implementación de un nuevo modelo hidrodinámico para llevar a cabo las simulaciones que nos permitirán obtener una mejor prospección de las energías mareomotriz en zonas de interés en el sur de Chile. El sistema de modelación escogido es el modelo hidrodinámico Delft3D-FLOW⁸, el cual permite configurar de manera sencilla mallas flexibles que siguen la línea de costa y ha sido especialmente diseñado para la simulación de la zona costera, los ríos y los estuarios.

Otro factor importante para obtener mejores simulaciones de la zona de canales y estrechos del sur de Chile, es contar con una batimetría local de mayor resolución horizontal y con mayor confiabilidad que las bases de datos globales utilizadas hasta aquí. Por esto en las nuevas simulaciones se incorporarán los datos batimétricos proporcionados por el SHOA.

⁸ Este modelo ha sido desarrollado por Deltares, <http://www.deltares.nl/>

9. Referencias

Egbert, G.D. & S.Y. Erofeeva, 2002: Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Ocean. Atmos. Tech.* 19 (2), 183–204

Large, J. C. McWilliams, & S. C. Doney, 1994: Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.*, **32**, 363–403.

Li, X., Y. Chao, J. C. McWilliams, & L.L. Fu, 2001: A comparison of two vertical mixing schemes in a Pacific Ocean General Circulation Model. *J. Climate*, **14**, 1377–1398.

Marchesiello, P., McWilliams, J. & Shchepetkin, A., 2001: Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models, *Ocean Modell.*, 3, 1-21.

Shchepetkin, A. F., & J. C. McWilliams, 2005: The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, *Ocean Modelling*, 9, 347-404.