



Output 4 | Actividad 4.1

Análisis histórico de las variables de la dinámica costera

Español

INFORME 4.1 – 21 Sep 2019 - UNIDO/CTCN Rfx 7000002437

Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua (LH-INA, Argentina) | Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental – Facultad de Ingeniería – Universidad de la República (IMFIA-UdelaR, Uruguay)

Technologies for the design of a regional strategic plan for the coastal management and adaptation to Climate Change in the Province of Buenos Aires

*Proyecto INA 376
Informe LHA 06-376-19
Ezeiza, diciembre de 2019*

Equipo de trabajo

Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua (LH-INA, Argentina)

Msc. Ing. Mariano Re | Ing. Pablo E. García | Lucas Bindelli | Ing. Martín Sabarots Gerbec | Msc. Ing. Nicolás J. Tomazin | Lic. Carlos Haspert | Arq. Leonardo S. Peralta | Lic. Federico Haspert

Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental – Facultad de

Dr. Ing. Mónica Fossati | Dr. Ing. Sebastián Solari | Dr. Ing. Pablo Santoro | Msc. Ing. Rodrigo Alonso | Ing. Michelle Jackson

Informe realizado por:

Pablo Santoro, Rodrigo Alonso, Nicolás Tomazin y Mariano Re.

Resumen

La actividad 4.1 consiste en un análisis histórico y estadístico de las principales variables de la dinámica costera de la Provincia de Buenos Aires. Las variables que se estudian son los campos de vientos costeros, niveles de marea en zonas costeras, oleaje y transporte de sedimentos (deriva litoral).

Para este análisis se implementaron una serie de modelos numéricos con el objetivo de realizar un análisis retrospectivo de cada una de las variables mencionadas. En este informe se describen las metodologías utilizadas y sus validaciones, y se presentan los principales.

La información aquí generada, además de engrosar la base de datos de la Asistencia Técnica, colabora en una mejor comprensión del comportamiento de las variables que han modelado el sector costero en estudio durante las últimas décadas.

Índice

1	Introducción	5
1.1	Problema	5
1.2	Asistencia técnica	6
1.3	Actividad 4.1.....	6
2	Validación de los datos de viento de reanálisis	8
2.1	Introducción	8
2.2	Datos de viento de reanálisis CFSR	8
2.3	Metodología de validación.....	13
2.4	Resultados de la validación	15
3	Análisis retrospectivo de niveles de marea.....	21
3.1	Introducción	21
3.2	Modelo regional de marea del Atlántico Sur (ASTide)	22
3.3	Modelo regional de marea de la Provincia de Buenos Aires	30
3.4	Base de datos generada	54
4	Análisis retrospectivo de oleaje	56
4.1	Introducción	56
4.2	Modelo de oleaje	56
4.3	Validación.....	60
4.4	Base de datos generada	66
5	Estadística de variables costeras.....	69
5.1	Introducción	69
5.2	Vientos	69
5.3	Niveles de marea.....	72
5.4	Oleaje	85
6	Transporte litoral.....	95
6.1	Introducción	95
6.2	Modelo de transporte litoral.....	95
6.3	Series	101
6.4	Resultados.....	102
7	Conclusiones.....	107
	Referencias.....	110

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problema

La costa oceánica de la Provincia de Buenos Aires presenta gran diversidad de playas a lo largo de sus 400 km, con diferentes regímenes de oleaje, mareas, y con composiciones granulométricas y morfológicas variables. Entre San Clemente, al NE, y Pehuén-Co, al SO, se concentran más de 30 localidades balnearias que pertenecen a 12 partidos de la provincia (Figura 1.1). Los municipios presentan importantes diferencias en cuanto a cantidad de población y actividades económicas. Principalmente se destacan actividades asociadas al turismo y actividades comerciales vinculadas al movimiento de los puertos.

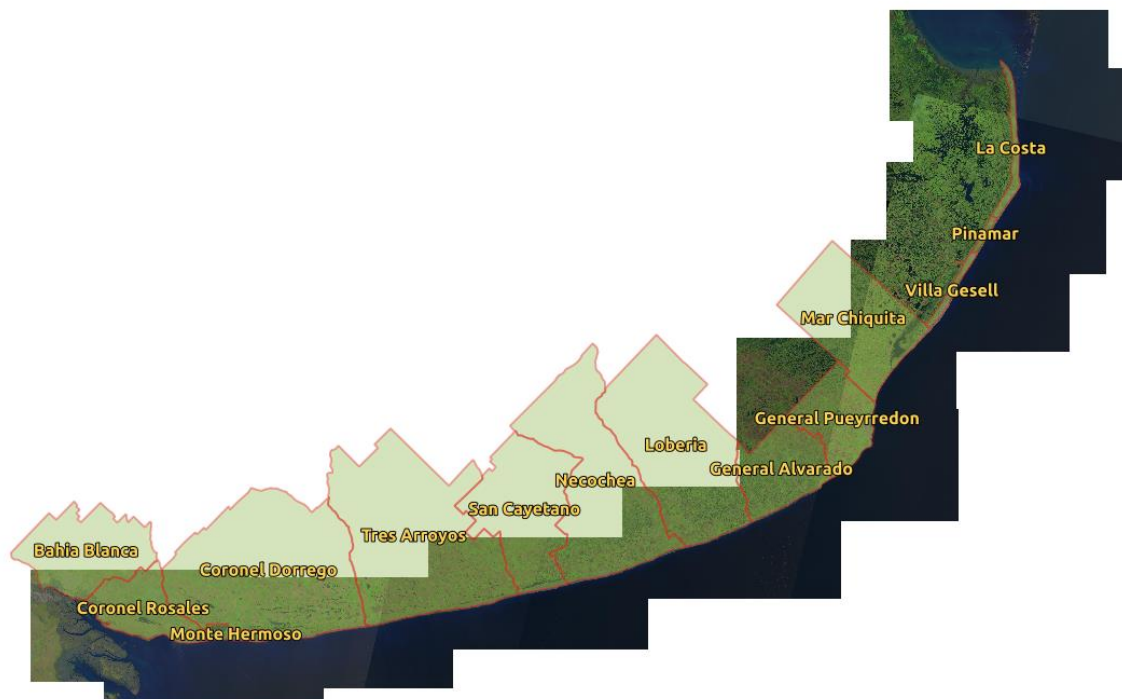


Figura 1.1. Partidos del litoral marítimo de la provincia de Buenos Aires.

Esta región litoral se ve afectada por numerosos problemas ambientales y climáticos, principalmente debidos a la erosión costera. Las actividades antrópicas como la construcción de defensas costeras, el crecimiento urbano sobre estructuras medanosas, la extracción de arena y la explotación de acuíferos sin un apropiado manejo han agravado los procesos erosivos y acrecentado la vulnerabilidad frente al Cambio Climático.

La constante acción del oleaje y el impacto de los eventos de tormenta severos (Sudestadas) son los responsables primarios de la dinámica erosiva de la costa bonaerense. Estudios referidos a obras puntuales como la instalación de rompeolas para prevenir erosión en la zona de acantilados en Mar del Plata, la ejecución de defensas costeras para protección de rutas o los planes de modificación de una de las escolleras del Puerto de Mar del Plata refuerzan la necesidad de contar con un manejo costero integral y planificado. Resulta en este contexto que se plantea la preocupación de la provincia de Buenos Aires respecto de la vulnerabilidad de la costa ante las distintas amenazas que afectarían su dinámica en el marco del Cambio Climático.

1.2 Asistencia técnica

El análisis de los procesos costeros naturales (meteorología, climatología, hidrodinámica y morfología) en relación a los cambios en las actividades humanas y del uso/cobertura del suelo, resulta un insumo necesario para el estudio del riesgo a la erosión costera de manera integral y la generación de información necesaria para la concreción de un plan integral de manejo costero bonaerense.

En este marco, el Departamento de Costa Marítima de la Provincia de Buenos Aires solicitó la Asistencia Técnica a CTCN (Climate Technology Center & Network) que plantea dos objetivos generales: i) diagnosticar el estado actual de la dinámica en la costa oceánica de la provincia, e ii) implementar un mapa de riesgo frente al Cambio Climático y delinear recomendaciones de manejo costero, para utilizar como insumo en la ejecución de un Plan de Manejo Integral Estratégico de la costa bonaerense a desarrollarse a futuro.

Entre los objetivos específicos a alcanzar por esta Asistencia Técnica se destacan: i) determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera durante las últimas décadas (nivel del mar, oleaje, viento, cambios morfológicos), ii) estimar a partir de proyecciones de Cambio Climático los posibles escenarios costeros futuros, y iii) desarrollar labores de transferencia tecnológica, capacitación y formación asociadas al proyecto. Entre los principales productos de esta asistencia se destacan la puesta en valor de las herramientas de modelación numérica del solicitante, la capacitación y entrenamiento en el manejo de las mismas y la elaboración de un manual de recomendaciones de manejo costero para la costa oceánica de Buenos Aires.

Esta Asistencia Técnica se lleva a cabo con los equipos profesionales del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA) de Argentina y el Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR) de Uruguay.

1.3 Actividad 4.1

La Actividad 4.1 de esta Asistencia Técnica se enmarca dentro del Entregable 4, y está asociada al análisis histórico y estadístico de las principales variables de la dinámica costera de la Provincia de Buenos Aires

Esta actividad colabora en la construcción de la base de datos de variables meteorológicas y oceánicas de la costa de la provincia de Buenos Aires. En este sentido se plantea la elaboración de un análisis retrospectivo de las principales variables del sistema, de alta resolución espacial y con un alcance temporal de más de 30 años. Las variables que se estudian son los campos de vientos costeros, niveles de marea en zonas costeras, oleaje y transporte de sedimentos (deriva litoral).

2 VALIDACIÓN DE LOS DATOS DE VIENTO DE REANÁLISIS

2.1 Introducción

Los forzantes principales de la dinámica del agua en la costa marítima de la Provincia de Buenos Aires son la marea astronómica y el campo de vientos que genera condiciones de marea meteorológica. Los datos de viento son observados en algunos pocos puntos costeros y no se cuenta con información directa acerca del comportamiento de esta variable mar adentro.

Debido a la necesidad de conocer los campos de vientos que actúan sobre los entornos costeros para poder modelar el comportamiento de los niveles de marea y el oleaje en estas zonas, se utilizan datos de reanálisis que consisten en un conjunto de datos globales grillados que se obtienen a partir del análisis de observaciones y resultados de modelaciones numéricas.

Las características de escala global de este tipo de información hacen que sea necesario validarla para su utilización a escala regional y/o local. En este capítulo se presenta la validación de los datos de viento de reanálisis comparándolos con distintas fuentes de información.

2.2 Datos de viento de reanálisis CFSR

2.2.1 Reanálisis de vientos

Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) es el reanálisis climático de escala global más reciente desarrollado por el Centro Nacional de Predicciones Ambientales de Estados Unidos (NCEP). Abarca el período 1979-2010 con una resolución espacial del dominio atmosférico de ~38 km y un paso temporal de 1 hora. Los detalles técnicos del reanálisis CFSR se pueden encontrar en (Saha et al., 2010). Por su parte, Climate Forecast System (CFS) refiere al modelo acoplado atmósfera-océanos-continentes-capas de hielo y al algoritmo de asimilación de datos utilizados en CFSR. Desde 2011, NCEP tiene implementado CFS de forma operativa, almacenando y poniendo a disposición sus datos en una base de datos denominada CFSv2 (Saha et al., 2014). CFSv2 puede considerarse una prolongación de CFSR que permite extender la base de datos hasta el presente.

En este trabajo se abarcó el período de 40 años comprendido entre 1979 y 2018: los datos de 1979-2010 son del reanálisis CFSR y los de 2011-2018 de CFSv2. A ambas bases de datos se accedió a través de la plataforma de archivo de datos para investigación (RDA¹) del Centro

¹ <https://rda.ucar.edu/>

Nacional para la Investigación de la Atmósfera (NCAR) y la Corporación de Universidades para la Investigación de la Atmósfera (UCAR).

Específicamente, para el funcionamiento de los modelos utilizados en esta Asistencia Técnica, se descargaron las variables viento en superficie y presión reducida al nivel medio del mar. En este capítulo se valida la intensidad y dirección del campo medio del viento a 10 metros de altura para la zona de estudio. En la Figura 2.1 se presenta la resolución espacial de estos datos en la costa marítima de la Provincia de Buenos Aires. Se aprecia que CFSv2 presenta algo más de resolución espacial ($\sim 0.2^\circ$) que CFSR ($\sim 0.3^\circ$). En lo que respecta al paso temporal, en ambas bases de datos el paso menor es de 1 hora. Al ser el viento en superficie una variable que CFS no modifica al asimilar observaciones, el paso horario corresponde a pronósticos a 1h, 2h, 3h, 4h, 5h y 6h, inicializados a las 00, 06, 12 y 18 UTC de cada día.

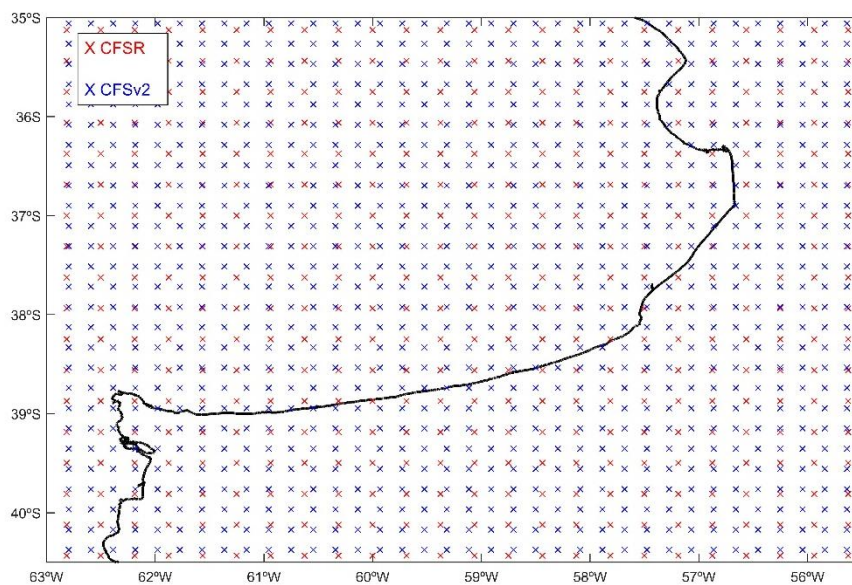


Figura 2.1. Nodos de reanálisis en la costa marítima de la Provincia de Buenos Aires: CFSR (rojo) y nodos CFSv2 (azul).

A modo de análisis exploratorio de los vientos CFSR en esta zona, en la Figura 2.2 se presenta el campo de los valores de intensidad promedio, el campo de la máxima desviación estándar calculada con paso anual, y el promedio de los máximos anuales. En estos mapas se aprecia la diferencia entre la climatología del viento sobre el mar y sobre el continente. Sobre el mar se observan valores promedios ente 7 y 7.5 m/s de intensidad de viento, valores de desviación estándar entre 3 y 3.5 m/s y máximos anuales entre 20 y 22 m/s. Sobre el continente los valores promedios se encuentran entre 4 y 5 m/s, la desviación estándar entre 2 y 2.5 m/s y los máximos anuales entre 12.5 y 15 m/s. La transición entre estas dos climatologías se da en la zona costera y su representación en la base de datos está condicionada a la resolución espacial de la misma.

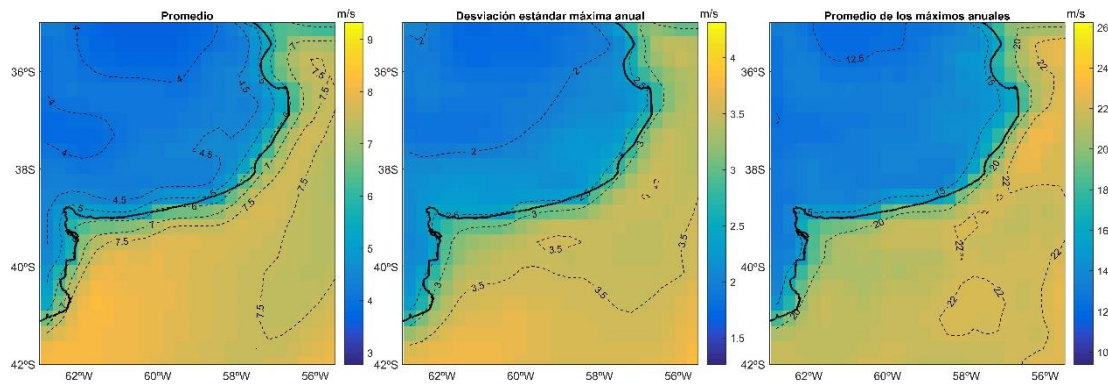


Figura 2.2. Vientos CFSR (Intensidad). Período 1979-2010. Campo promedio (izquierda), campo de la desviación estándar máxima calculada con paso anual (centro) y campo del promedio de los máximos anuales (derecha).

2.2.2 Datos altimétricos

Los radares altimétricos montados en satélites de baja altura proporcionan desde 1985 (puesta en marcha de GEOSAT) observaciones de altura significativa del oleaje (H_s) y velocidad de viento sobre el mar con cobertura global. En lo que respecta al viento, dado que CFSR no asimila este tipo de observaciones, la altimetría constituye una fuente de observaciones idónea para la validación de los vientos CFSR.

El principio de medición se basa en el análisis de la deformación del retorno de la señal emitida por el radar altimétrico montado en el satélite y que se refleja en la superficie del mar. En lo que respecta al viento sobre el mar, se identifica la deformación atribuible a la presencia de ondas capilares y se asume una vinculación directa entre estas y el viento local.

La base de datos IMOS² está conformada por datos altimétricos de H_s y velocidad de viento sobre el mar, proporcionados por distintas misiones satelitales (*i.e.* base multi-misión), los cuales son procesados con una misma metodología a los efectos de proporcionar una fuente de información con la mayor extensión temporal y cantidad de datos posible. El procesamiento incluye la calibración a partir de datos medidos en boyas oceanográficas, la comparación cruzada entre misiones y un análisis de calidad de los datos (Ribal y Young, 2019). La base de datos está disponible en el portal australiano de red de datos oceánicos (AODN³). Los datos se descargan por misión y por dominios de $1^\circ \times 1^\circ$. La base es dinámica y se actualiza semestralmente con los datos proporcionados por las misiones altimétricas vigentes. En este sentido, se reporta que la fecha de descarga de los datos utilizados en este trabajo fue el 5/2/2019, alcanzando todos los datos correspondientes al 2018.

² <http://imos.org.au/>

³ <http://thredds.aodn.org.au/thredds/catalog/IMOS/SRS/Surface-Waves/Wave-Wind-Altmetry-DM00/catalog.html>

En la Figura 2.3 se presenta la cobertura temporal de cada una de las 13 misiones recopiladas en IMOS. Se aprecia que el inicio es 1985, hay un hueco en el año 1991, y la cantidad de datos por año va aumentando con el tiempo al haber más misiones en períodos coincidentes.

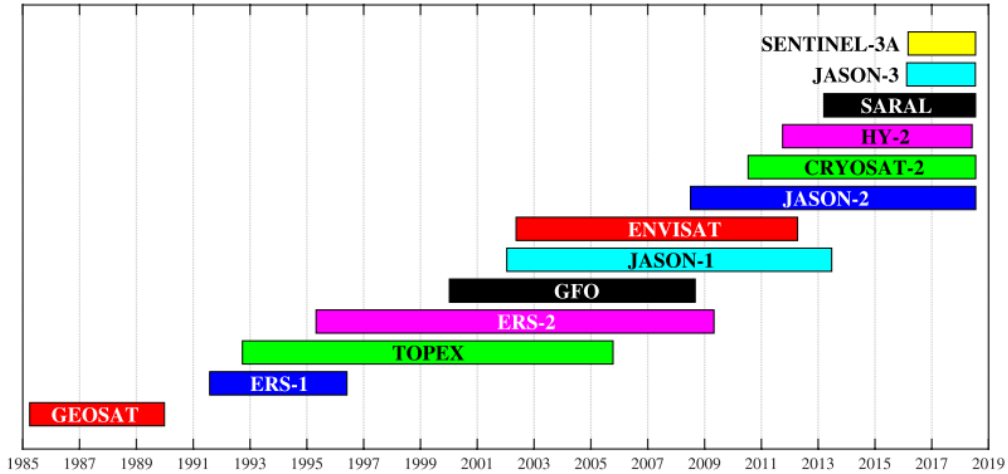


Figura 2.3. Cobertura temporal de las misiones altimétricas presentes en la base de datos IMOS. Tomada de Ribal y Young (2019).

En la Figura 2.4 se presenta la distribución espacial de la cantidad de datos IMOS disponibles en la zona de estudio y el porcentaje de los mismos que son catalogados como de buena calidad⁴. Se observa que en las regiones de 1° x 1° alejadas de la costa hay ~45000 datos de los cuales más del 90 % son de buena calidad, mientras que en el sector costero tanto la cantidad como el porcentaje de datos buenos decrecen. De todas formas, en la región en la que hay menos datos, la cantidad catalogados como de buena calidad superan los 10000. El motivo del decrecimiento en la cantidad de datos buenos en la zona costera se debe a problemas en la medición altimétrica atribuidos al cambio tierra-agua en la trayectoria del satélite.

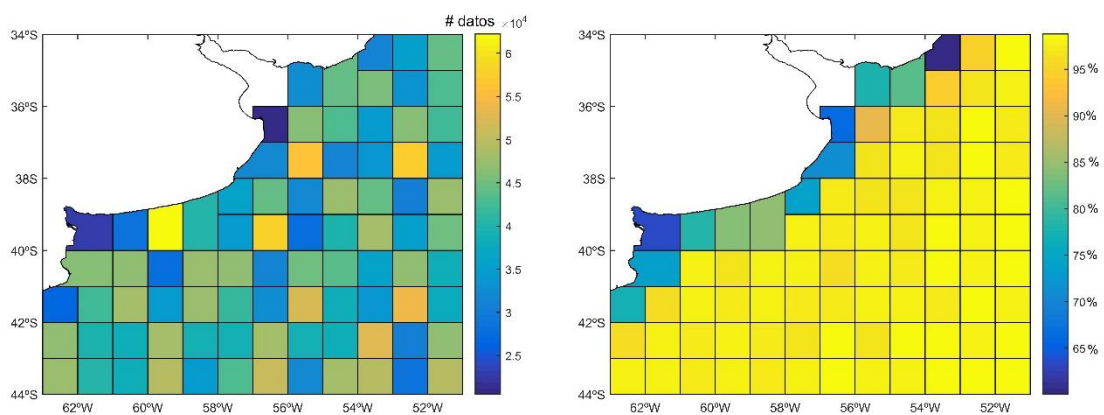


Figura 2.4. Base de datos altimétricos IMOS. Distribución espacial de la cantidad de datos (izquierda); distribución espacial del porcentaje de datos catalogados como de buena calidad (derecha).

⁴ Dato de buena calidad: aquel que la base de datos asigna como 1 a la variable *SWH_KU_quality_control*.

Se realizó un análisis exploratorio de los datos altimétricos. Hay dos variables que reportan sobre la velocidad del viento: velocidad del viento sin calibrar (*WSPD*) y velocidad del viento calibrada (*WSPD_CAL*). Para las misiones GEOSAT, ERS1, TOPEX, ERS2, GFO y ENVISAT, los valores de *WSPD_CAL*, están fuera del rango de lo esperable, tanto los que se obtienen directamente de la base de datos, como los que se generan reproduciendo la función de calibración reportada en Ribal y Young (2019). Para las misiones JASON 1, JASON 2 y JASON 3, CRYOSAT-2, HY-2, SARAL y SENTINEL-3A los valores de los datos calibrados se encuentran dentro de lo esperable. Por lo tanto, para este trabajo se optó por utilizar los datos de todas las misiones, utilizando el dato calibrado si proviene de las misiones JASON 1,2 y 3, CRYOSAT-2, HY-2, SARAL y SENTINEL-3A, y el dato sin calibrar si proviene de las misiones GEOSAT, ERS1, TOPEX, ERS2, GFO y ENVISAT.

A modo de ejemplificar qué se consideró como dentro de lo esperable y que no, en la Figura 2.5 se presenta una comparación para la región [53W 52W] x [43S 42S] de los vientos altimétricos sin calibrar, calibrados y los vientos CFSR. Estos últimos se incluyeron a modo de referencia. La misión GFO (gráfico de arriba) fue una de las que no se consideró el viento calibrado. Por el contrario, JASON-3 (gráfico de abajo) es una de las misiones en las que si se optó por el viento calibrado.

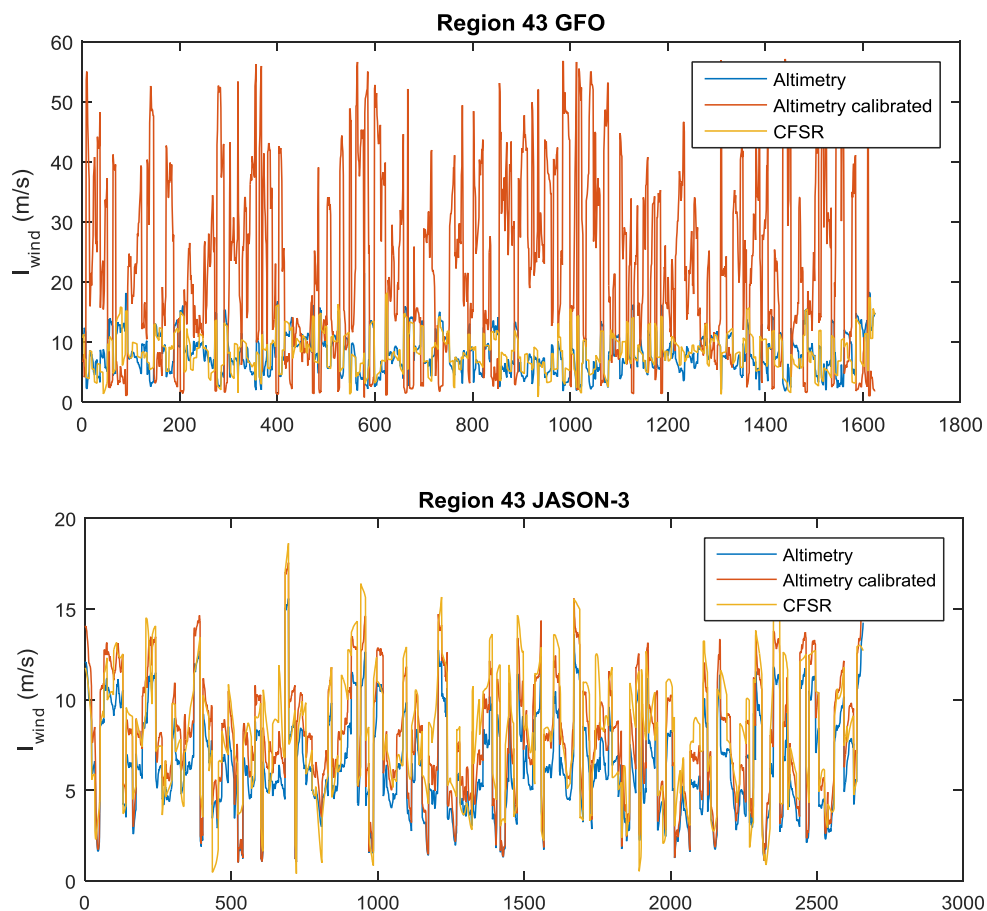


Figura 2.5. Comparación entre velocidad de viento altimétrica sin calibrar, calibrada y viento CFSR. Región [53W 52W] x [43S 42S]. Misión GFO (arriba), misión JASON-3 abajo.

2.2.3 Mediciones in-situ

Se dispuso de dos registros de mediciones in-situ de viento localizadas en el ingreso del estuario de Bahía Blanca (Torre Mareográfica Bahía Blanca) y en el Puerto Quequén. Si bien ambas están ubicadas en las proximidades de la costa, Torre Bahía Blanca está sobre el mar y Quequén está en tierra.

En lo que respecta a Torre Bahía Blanca, se utilizó una serie de datos que abarca el período 2011-2014 con datos registrados con una frecuencia que varía en el entorno de los 2 minutos. Dentro de este período, el único hueco de información se lo identificó en setiembre de 2012 donde hay 28 días sin datos. Para compatibilizar la frecuencia de 2 minutos con el paso horario de los vientos CFSR, la serie se la transformó a paso horario promediando los datos con una ventana horaria centrada en las horas en punto. Se asume que el tiempo está referido al horario local (UTC -03:00) y que el anemómetro está a 10 m de altura.

En el caso de Quequén el registro es más extenso, abarca el período 2002-2014 y la frecuencia de los datos es de 30 minutos. También se la transformó a paso horario promediando con una ventana horaria centrada en las horas en punto. Se detectaron varios datos faltantes. Para el caso de la serie ya transformada a paso horario, faltan el 48.7% de los datos. Los huecos más extensos detectados están en: junio de 2002 (31 días), mayo de 2004 (15 días), agosto de 2013 (10 días) y entre setiembre y diciembre del 2013 (120 días). También se asume que el tiempo está referido al horario local (UTC -03:00) y que el anemómetro está a 10 m de altura.

2.3 Metodología de validación

2.3.1 Datos de reanálisis vs Datos altimétricos

Los análisis que involucran el uso de datos altimétricos se realizaron agrupando la información por regiones. Para esto se recurrió a una grilla uniforme de $1^\circ \times 1^\circ$ la cual se torna irregular en la proximidad de la costa para poder adaptarse a la configuración de la misma. En la Figura 2.6 se presenta esta división, junto con los nombres utilizados para identificar a las regiones costeras de interés.

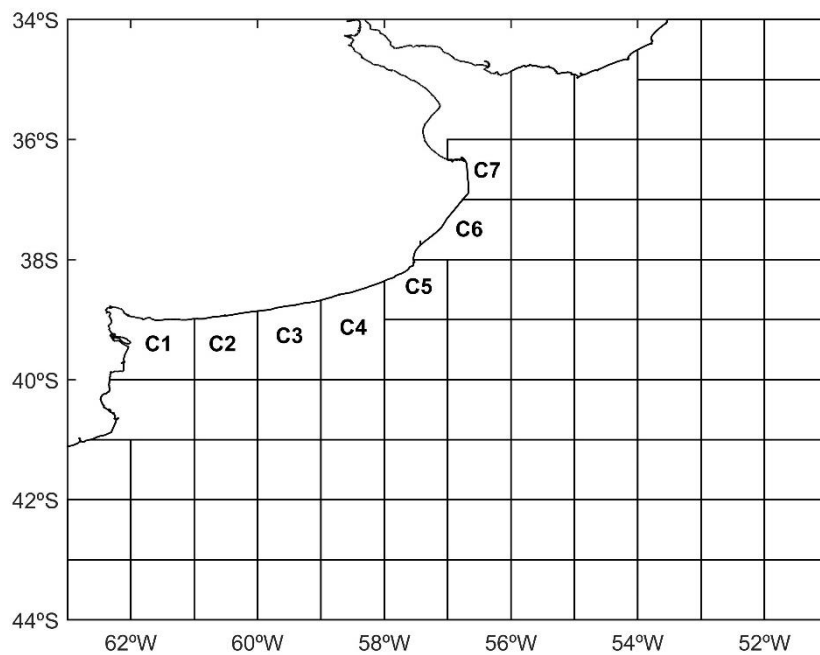


Figura 2.6. División del dominio considerada en el análisis de los datos altimétricos.

Dada una serie de datos altimétricos correspondiente a alguna de las regiones C1 a C7, se construye la serie concomitante de datos CFSR interpolando linealmente en espacio y tiempo la base de datos de vientos CFSR. De esta forma, a cada dato altimétrico se lo empareja con un dato obtenido del reanálisis CFSR. Luego ambas series se comparan recurriendo a los estadísticos *BIAS* (sesgo), *RMSE* (error cuadrático medio), *SI* (índice de dispersión) y *r* (coeficientes de correlación). Luego de calcular cada uno de los estadísticos para cada una de las regiones, se los presenta en mapas que permiten visualizar la distribución espacial de la performance de los vientos CFSR. A su vez, para las regiones costeras (C1 a C7), estos estadísticos se acompañan con los cocientes entre las medias y desviación estándar de ambas series y se presentan junto a un diagrama de dispersión superpuesto con un gráfico cuantil-cuantil (25 cuantiles equiespaciados en escala Gumbel). Finalmente se recurre a un diagrama de Taylor normalizado (Taylor, 2001) para sintetizar en un solo gráfico los resultados de las regiones costeras de interés.

2.3.2 Datos de reanálisis vs Mediciones in-situ

La comparación con las mediciones in-situ se la presenta con el mismo tipo de gráficos (i.e. diagrama de dispersión más cuantil-cuantil) con el que se presenta la comparación con los datos altimétricos de las zonas costeras.

Para la comparación se consideraron dos series de datos CFSR. Una construida a partir de interpolación lineal al punto donde se realizaron las mediciones, y otra considerando los datos en el nodo marítimo más cercano. Al nodo marítimo se lo definió como aquel nodo que está en el mar y todos sus nodos vecinos también. En la Figura 2.7 se presenta la ubicación de Torre Bahía Blanca (BB) y el puerto de Quequén (QQ) junto con los nodos CFSR y se indica con círculos azules los nodos marítimos más próximos a estos puntos de medición.

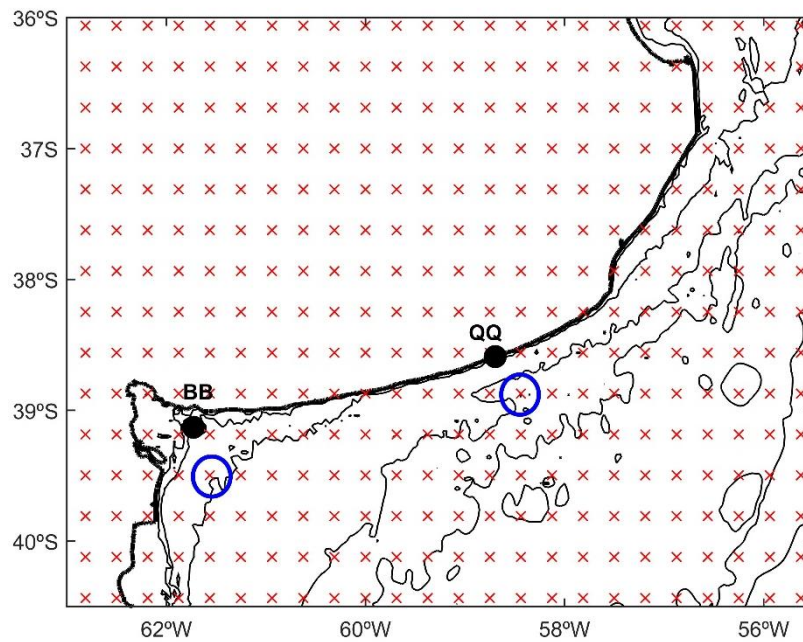


Figura 2.7. Ubicación de los puntos de medición (BB y QQ), localización de los nodos CFSR e identificación (círculo azul) del nodo marítimo más cercano a cada punto de medición.

2.4 Resultados de la validación

2.4.1 Datos de reanálisis vs Datos altimétricos

En la Figura 2.8 se muestran los mapas de los estadísticos utilizados para caracterizar la performance de los vientos CFSR tomando como referencia los datos altimétricos. Se aprecia una buena performance general, con *BIAS* en el rango de -0.5 y 1.2 m/s, *RMSE* entre 1.7 y 2.3 m/s, *r* entre 0.75 y 0.86 y *SI* entre 21 y 32. En cuanto a la distribución espacial se observa que la performance mejora hacia la esquina SE del dominio. Esto particularmente se aprecia en un aumento de la correlación ($r > 0.86$) y una menor dispersión ($SI < 21$).

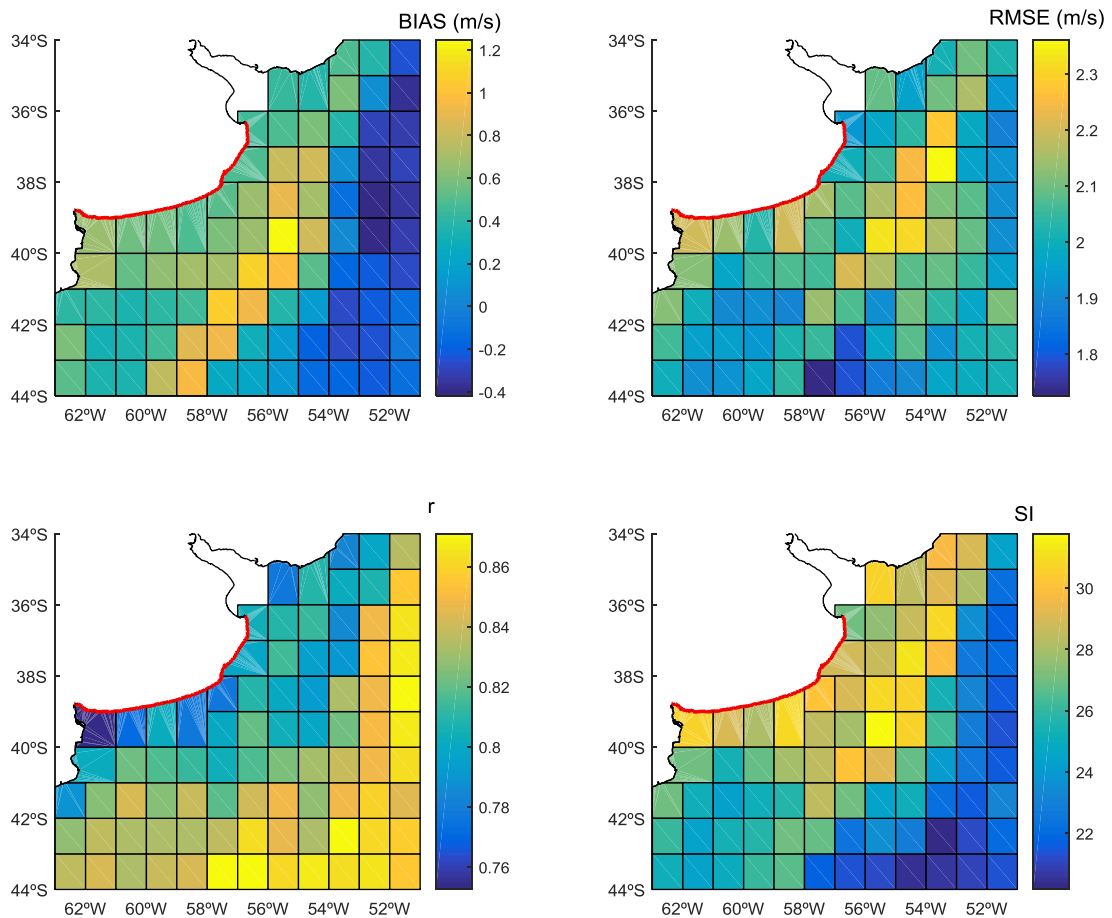
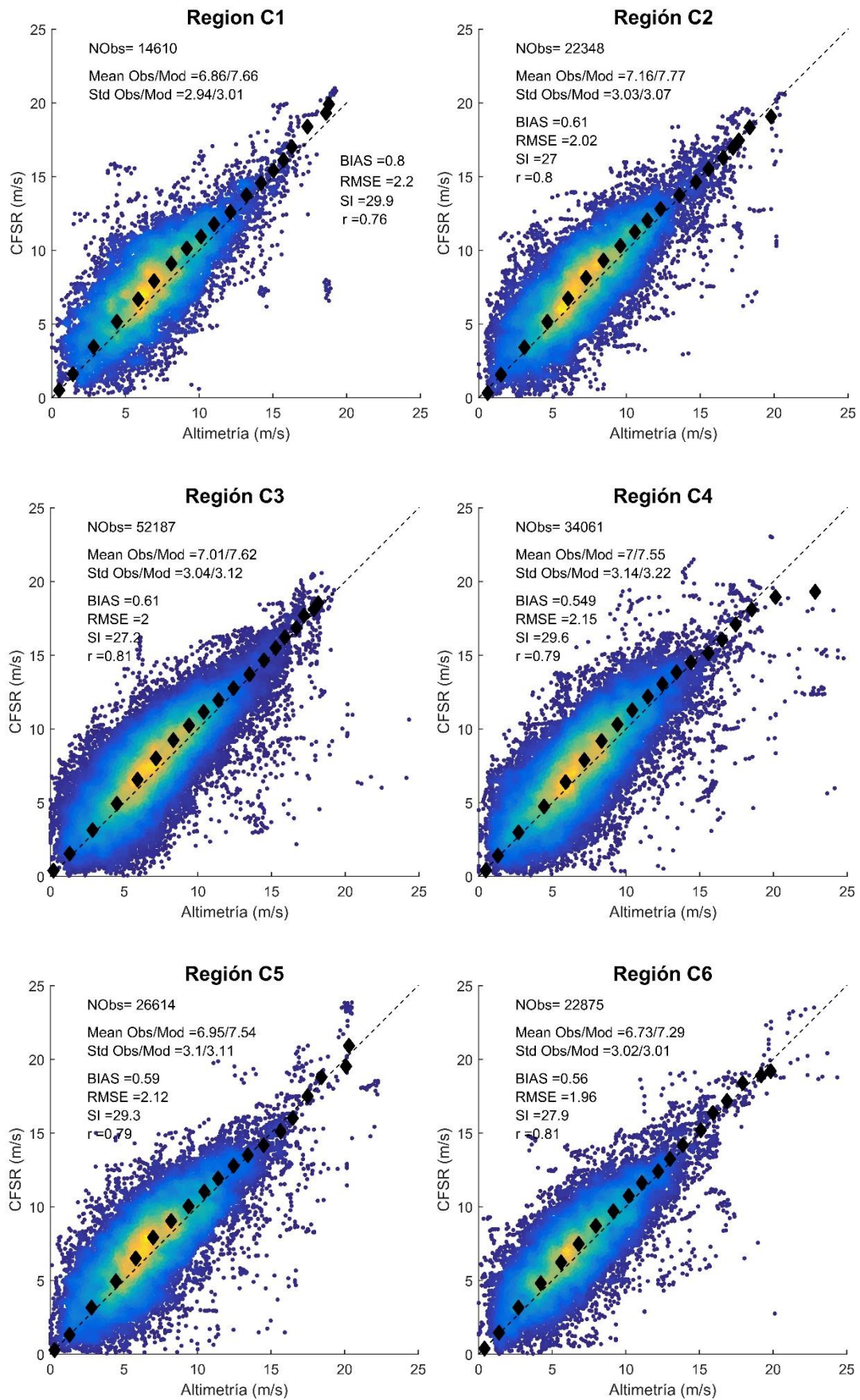


Figura 2.8. Distribución espacial de los estadísticos BIAS, RMSE, r y SI.

La Figura 2.9 presenta las comparaciones de mayor detalle realizadas para las regiones costeras C1 a C7. Se aprecia el buen nivel de acuerdo existente entre el viento CFSR y la medición altimétrica en cada una de estas regiones. Los gráficos cuantil-cuantil permiten visualizar que la buena performance alcanza también a los valores más altos de velocidad de viento. En términos cuantitativos, este buen desempeño se caracteriza en BIAS positivos que varían entre 0.5 y 0.8 m/s, errores RMSE entre 1.8 y 2.2 m/s y correlaciones entre 0.76 y 0.82.



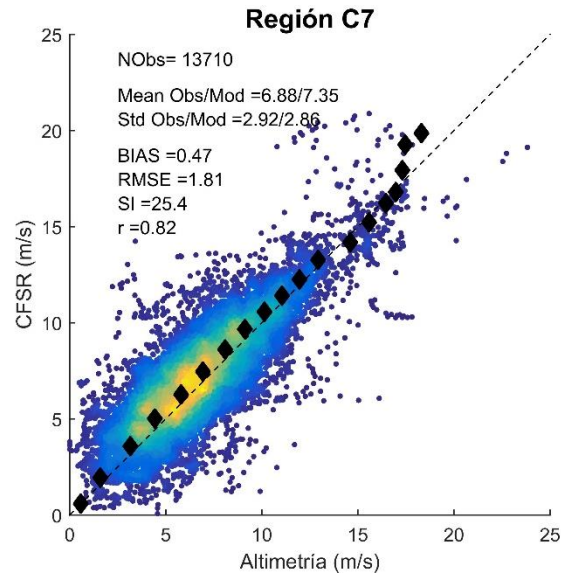


Figura 2.9. Datos de reanálisis vs Datos altimétricos. Diagrama de dispersión y gráfico cuantil-cuantil para la región C7.

Finalmente en la Figura 2.10, se presenta un diagrama de Taylor que permite comparar la performance del viento CFSR entre las distintas regiones costeras. Se aprecia que la región que presenta la peor performance es C1, mientras que C7 es la que presenta la mejor.

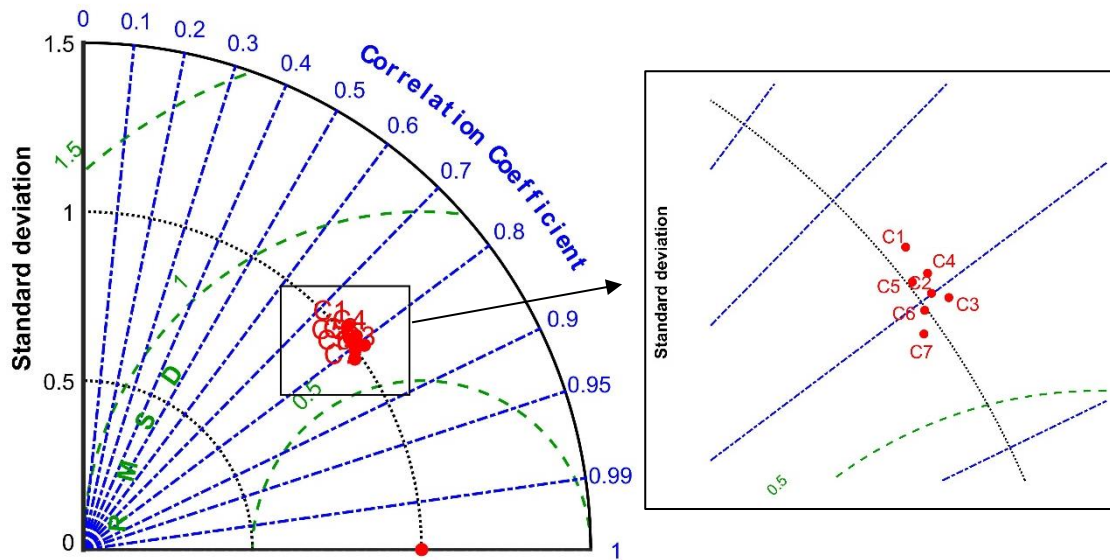


Figura 2.10. Comparación de la performance del viento de reanálisis (CFSR) para las distintas regiones costeras a partir de un diagrama de Taylor.

2.4.2 Datos de reanálisis vs Mediciones in-situ

En la Figura 14 se presentan las comparaciones con los datos en Torre Bahía Blanca, mientras que en la Figura 15 se presentan las comparaciones con los datos de Quequén.

Los datos CFSR interpolados al punto de medición en Bahía Blanca parecen estar influenciados por la climatología continental. Al ser una estación localizada en el mar, el nivel de acuerdo no fue bueno. Por el contrario, se observa un buen nivel de acuerdo con los datos CFSR del nodo marítimo más cercano. Este nivel de acuerdo es similar al obtenido con los datos altimétricos, y da la pauta de que en el punto de medición tiene un mayor peso la climatología marítima por sobre la continental.

Este resultado ratifica, con otra fuente de observaciones, la validación del viento CFSR (sobre el mar) obtenida a partir de los datos altimétricos.

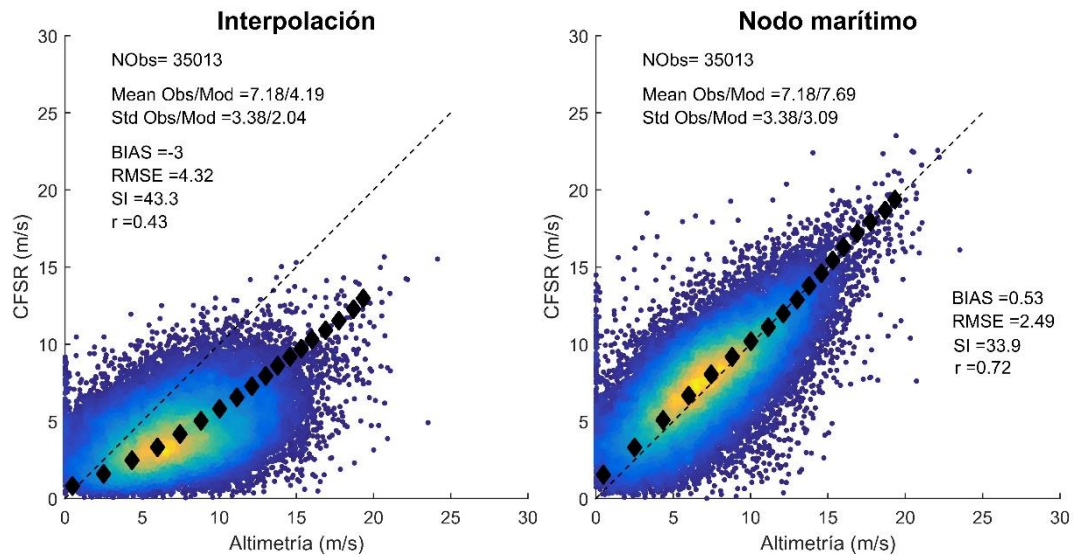


Figura 2.11. Viento CFSR vs Mediciones in-situ en Torre Bahía Blanca. Comparación con el dato CFSR interpolado (izq.) y comparación con el dato CFSR del nodo marítimo más cercano (der.).

En el caso de Quequén, se aprecia poca diferencia entre los datos CFSR interpolados y los del nodo marítimo más cercano. A su vez, al compararlos con las medidas estadísticas, se observa un nivel de acuerdo de peor calidad que para el caso de los vientos sobre el mar. Específicamente se manifiesta en una mayor dispersión y menor correlación. Al tratarse de una estación costera, da la pauta de que la resolución de CFSR puede no ser suficiente para captar con detalle la transición agua-continente en la climatología del viento. Para una mayor profundización en la búsqueda de explicaciones a las diferencias observadas, es necesario contar con más información del entorno y de cómo fueron obtenidas las medidas.

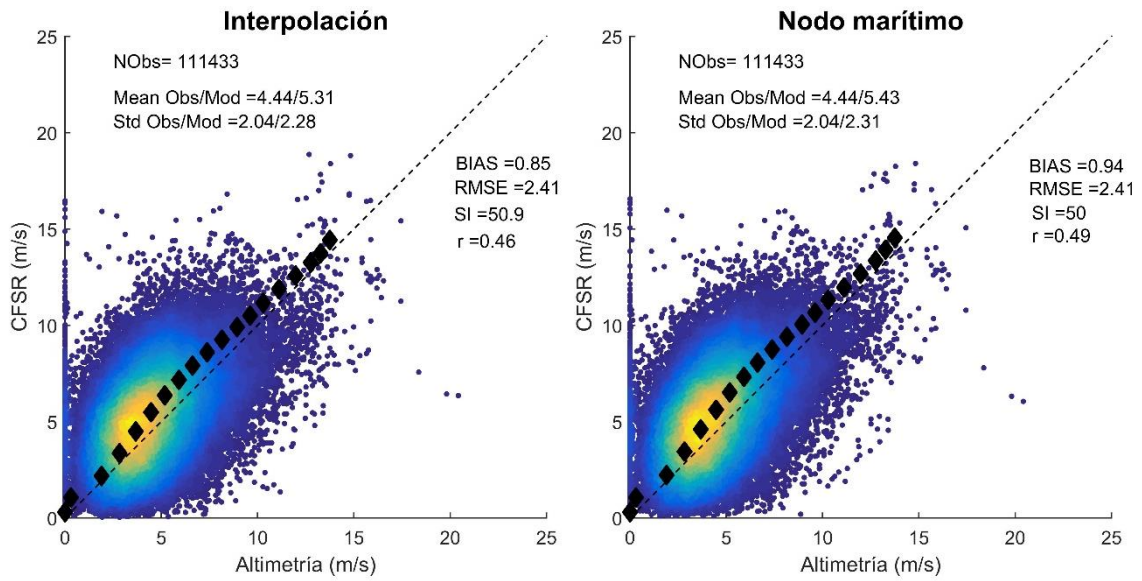


Figura 2.12. Viento CFSR vs Mediciones in-situ en Quequén. Comparación con el dato CFSR interpolado (izq.) y comparación con el dato CFSR del nodo marítimo más cercano (der.).

3 ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE NIVELES DE MAREA

3.1 Introducción

La información de niveles de marea resulta un insumo fundamental para la evaluación de los efectos del Cambio Climático sobre los riesgos de erosión e inundación en la costa de la Provincia de Buenos Aires. En los más de 400 km que constituyen este sector costero marítimo existen unas pocas estaciones de medición sistemática de niveles de marea. Entre ellos se destacan San Clemente, Mar del Plata, Puerto Quequén y Puerto Belgrano. A pesar de ello, las series observadas no representan largos períodos y contienen vacíos de información. Por este motivo, y por la necesidad de contar con series largas de datos en toda esta extensión costera se realizó un análisis retrospectivo de los niveles de marea (*hindcast*).

Este análisis retrospectivo fue realizado a partir de la implementación de modelos numéricos que fueron calibrados y validados con la información existente de niveles observados. Esta metodología facilitó la generación de una base de datos de nivel de mar homogénea que cubre toda la costa marítima bonaerense, con alta resolución temporal y espacial y de larga duración.

Para la simulación del período 1985-2016 se extrajeron series de niveles y corrientes integradas en vertical con frecuencia horaria en San Clemente, Mar del Plata, Quequén y Monte Hermoso, y además en 55 estaciones virtuales ubicadas a 13 Km de la costa equiespaciadas 10 Km y 12 estaciones virtuales ubicadas a 35 Km de la costa equiespaciadas 50 Km (Figura 3.1). Sobre estas mismas estaciones se reportan los datos de hindcast de oleaje.

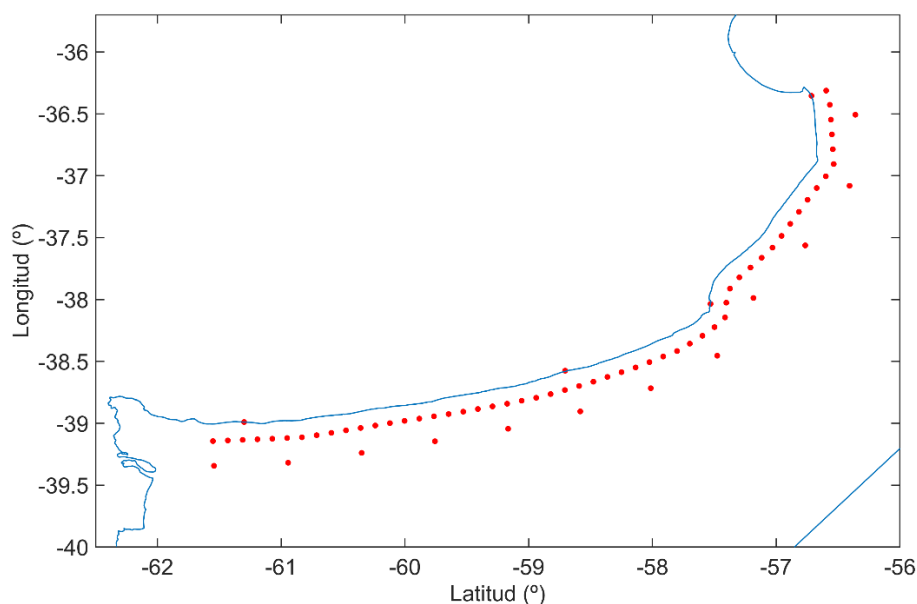


Figura 3.1. Ubicación de las estaciones donde se extrajeron las series del hindcast de niveles.

3.2 Modelo regional de marea del Atlántico Sur (*AStide*)

3.2.1 Implementación del modelo

En los últimos años se ha desarrollado en el IMFIA (UdelaR, Uruguay) un modelo de mareas para la zona del Atlántico Sur, denominado *AStide*, que se utiliza para forzar modelos locales del Río de la Plata y Frente Marítimo (Fossati et al., 2014). Este modelo representa la propagación de marea astronómica y la generación de la componente meteorológica de la marea que se propaga desde el Sur y viaja hacia el Norte por la costa argentina del Atlántico Sur (Santoro et al., 2013). El dominio de este modelo incluye la zona de interés de esta Asistencia Técnica, la costa de la Provincia de Buenos Aires, y por tanto se utiliza para forzar un modelo local de marea. En esta sección se presentan las principales características del modelo regional y la evaluación del mismo en la representación de las mareas en la plataforma Continental Argentina. A su vez, se comparan los resultados con los que presenta el modelo global de marea FES2014⁵, con el objetivo de evaluar si con el atlas global se obtienen mejores resultados que con el modelo *AStide*, en cuyo caso sería más conveniente forzar el modelo local con el atlas global.

El modelo numérico utilizado para la implementación del *AStide* es el MOHID, un código desarrollado en el Instituto Superior Técnico – MARETEC de Portugal, y que describe el flujo en diversos tipos de cuerpos de agua (Mateus y Neves, 2013). El MOHID es un modelo de flujo a superficie libre tridimensional baroclínico basado en las ecuaciones de Navier-Stokes con las aproximaciones de Boussinesq e hidrostática. La malla tridimensional está formulada con una aproximación de volúmenes finitos con la posibilidad de utilizar coordenada vertical sigma que permite una buena simulación de los efectos topográficos. En su versión actual el MOHID está subdividido en módulos, cada uno contiene determinada información e interactúa con los demás a través de flujos de información. El *AStide* utiliza la versión bidimensional del modelo MOHID.

El modelo ha sido calibrado y validado en proyectos previos (Fossati et al., 2014) para reproducir correctamente las ondas que ingresan al Río de la Plata. Para este proyecto se evalúan los resultados que se obtienen del modelo *AStide* en estaciones de marea ubicadas en el sur de Argentina, de manera de evaluar la calidad del mismo en la representación de las condiciones de marea cercanas a la zona de estudio. El dominio de cálculo y la batimetría del modelo *AStide* se presenta en la Figura 3.2. La malla tiene una estructura latitud longitud con una discretización constante de 0,1 ° en ambas. La batimetría del área de interés ha sido generada principalmente a partir de datos batimétricos digitalizados extraídos de GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Ocean*) y datos batimétricos ofrecidos por el Servicio de Hidrografía Naval de la Argentina (SHN). Se consideró 1 m de profundidad mínima. Por otro lado, para representar la línea de costa de la región de estudio se utilizaron datos extraídos del NOAA/NGDC *Marine Geology and Geophysics Division*. Tanto los datos batimétricos como la línea de costa originales fueron posteriormente procesados a través de filtros y algunas correcciones manuales.

⁵ <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2014.html>

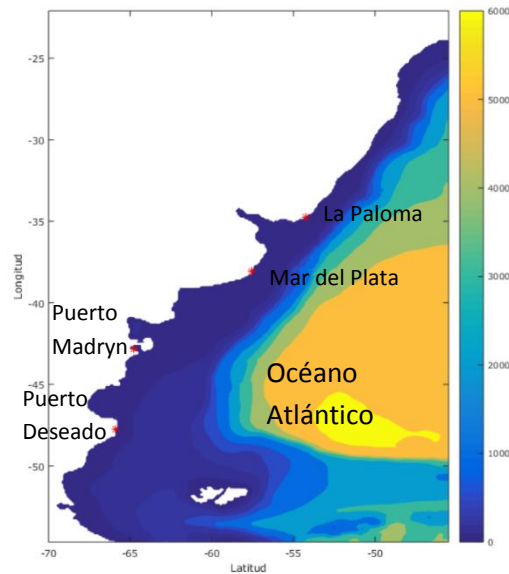


Figura 3.2. Dominio y batimetría del modelo *ASTide*.

Para obtener los efectos de la acción del viento sobre los niveles, en la superficie libre se impone una tensión de corte calculada utilizando un coeficiente de arrastre, la densidad del aire y la velocidad del viento a 10 m sobre la superficie libre. El coeficiente de arrastre puede definirse como un valor constante o ser calculado a partir de distintas formulaciones. Los datos de vientos y presiones se extrajeron de los reanálisis de NCEP-CFSR (*National Center for Environmental Prediction de Estados Unidos*) (Saha et al., 2010) que presentan 6 horas de resolución temporal y 0.5 ° de resolución espacial. Se utiliza la formulación de Large y Ponds (1981) para determinar la tensión de corte del viento.

En las celdas de fondo se impone una tensión de corte que se calcula por una ley cuadrática en función de la velocidad de la celda de fondo y el coeficiente de arrastre de fondo. Este último se calcula a partir del coeficiente de rugosidad n de Manning. Se utiliza un coeficiente de rugosidad de fondo n de Manning de 0,005.

Las fronteras laterales abiertas se introducen como forma de limitar el dominio de cálculo a la región de interés. En estos contornos se imponen valores de las variables de manera de permitir que las ondas del interior del dominio puedan propagarse y que el flujo saliente los atraviese libremente. En este modelo, se utiliza el esquema de relajación Blumberg-Kantha como condición de borde en la frontera abierta, con un tiempo de relajación de 100 s en aguas profundas, 1000 s en aguas poco profundas y transición lineal. En la condición de borde de la frontera oceánica (sur y este) se utiliza para imponer el efecto de la marea astronómica sobre el dominio de cálculo, para lo cual se calcula la elevación de la superficie libre en celda por medio de la frontera oceánica a partir de la superposición de 13 componentes armónicas de la marea: M2, N2, S2, K2, 2N2, O1, Q1, K1, P1, Mf, Mm, Mtm, MSqm. Los valores de las amplitudes y fases de estas componentes de la marea astronómica se extraen de la solución del atlas global de mareas FES2004 (Lyard et al., 2006).

En lo que refiere al paso temporal de cálculo se define $\Delta t = 180$ s. Para la parametrización de la turbulencia se utiliza la formulación de Smagorinsky con coeficiente igual a 0,1 para el cálculo de la viscosidad horizontal y una viscosidad vertical constante igual a 0,001. Además, se utiliza un filtro bi-harmónico de coeficiente $1e9$ (término adicional que se agrega en el flujo horizontal turbulento viscoso que filtra las oscilaciones de alta frecuencia en un modelo numérico de advección-difusión).

3.2.2 Validación modelo

Para evaluar la calidad del modelo *ASTide* en la representación de los niveles de marea en la plataforma sur argentina se utilizan los datos disponibles de series de niveles medidos en las estaciones mareográficas de Puerto Deseado, Puerto Madryn y Mar del Plata (Figura 3.2). Estos datos fueron descargados del sitio del Sea Level Center de la Universidad de Hawaii⁶. Los datos medidos en cada estación se utilizan por un lado para determinar las componentes armónicas de marea y por otro para evaluar la componente total de marea (componente astronómica y componente meteorológica). Se cuenta con datos medidos entre marzo 2010 y agosto 2018, aunque la serie en cada estación presenta algunos agujeros, lo que limita el período de tiempo que se utilizó para la determinación de las componentes armónicas de marea. Para la marea astronómica se cuenta también con información del atlas global de mareas FES2014 (Lyard et al., 2016). En la evaluación del modelo *ASTide* se compara también los resultados con los obtenidos con el atlas global en los puntos de control. El modelo global FES2014⁷ es un modelo oceánico global de cálculo de marea astronómica elaborado por LEGOS, Noveltis, CNES, CLS, Francia, cuya descripción se encuentra en.

Se evalúa la calidad del modelo *ASTide* en la representación de la marea astronómica en la plataforma sur argentina y en la costa de la provincia de Buenos Aires. Para esto, se comparan los resultados del modelo forzado solamente con las componentes de marea astronómica por la frontera oceánica. Se utiliza un periodo de tiempo de un año para el cual se obtienen los 60 armónicos principales de marea. Para tener en cuenta la influencia del forzante viento en la representación de la marea astronómica, también se comparan los resultados con el modelo con todos los forzantes.

Los resultados obtenidos para las estaciones analizadas Puerto Deseado, Puerto Madryn y Mar del Plata se presentan en las Figura 3.3 a Figura 3.8. Para cada estación se presenta por un lado la comparación de las amplitudes y fases de los principales armónicos y por otro la comparación de la superposición de la marea astronómica generada por las 60 componentes de los distintos modelos (modelo *ASTide* completo, modelo *ASTide* astronómico y atlas global de marea astronómica FES2014).

En Puerto Deseado y en Puerto Madryn la componente astronómica de marea muestra variaciones de nivel de más de 5 m, mientras que en Mar del Plata apenas alcanzan los 2m. En Puerto Deseado se observa que el modelo *ASTide* representa bien las regulaciones de marea

⁶ <http://uhslc.soest.hawaii.edu>

⁷ <https://datastore.cls.fr/catalogues/fes2014-tidemodel/>

dadas por la combinación de componentes diurnas y semidiurnas. El error relativo del modelo *AS tide* es de 8% mientras que del global FES2014 es 3,6%. El cálculo de un error medio normalizado (error relativo) surge de la gran variabilidad de la amplitud de la marea a lo largo del dominio, y se normaliza respecto a cuatro veces la desviación estándar de la serie observada (valor que en una distribución normal abarca aproximadamente el 95% de los datos entorno a la media). La comparación de armónicos muestra una buena representación de ambos modelos tanto en fase como en amplitud.

En Puerto Madryn se observa una marea astronómica con variaciones de nivel de más de 5 m. Las variaciones quincenales de la envolvente se observan tanto en los datos como en los modelos. Se observa que el modelo *AS tide* sobredimensiona los niveles astronómicos con un error del 12% mientras que el modelo global FES2014 los subestima con un error relativo del 35%. Esta relación 10 de los modelos con los datos astronómicos también se observa para las principales componentes de marea M2 y S2.

En la estación de Mar del Plata se observa que en general el modelo *AS tide* sigue las variaciones temporales que muestra la marea astronómica obtenida a partir de las mediciones, subestimando un poco las amplitudes con un error relativo del 10%. Se observa que el modelo global FES2014 representa mejor las fases, siendo el error relativo en este caso menor igual a un 5,5%. En la comparación por componentes se observa que el modelo *AS tide* representa correctamente los principales armónicos, la M2 y la O1.

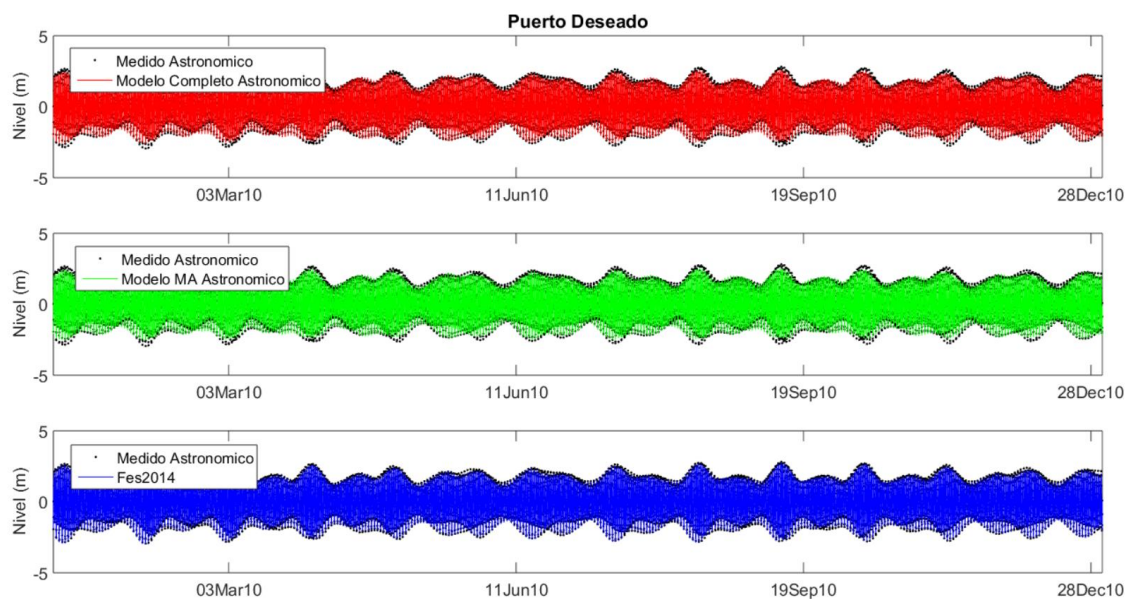


Figura 3.3. Componente astronómica de marea en Puerto Deseado obtenida a partir de los datos (superposición de las 60 componentes principales) y su comparación con la componente astronómica obtenida con el modelo *AS tide* con todos los forzantes (panel superior), con el modelo *AS tide* con forzante astronómico (panel intermedio) y con el modelo global de marea astronómica FES2014 (panel inferior).

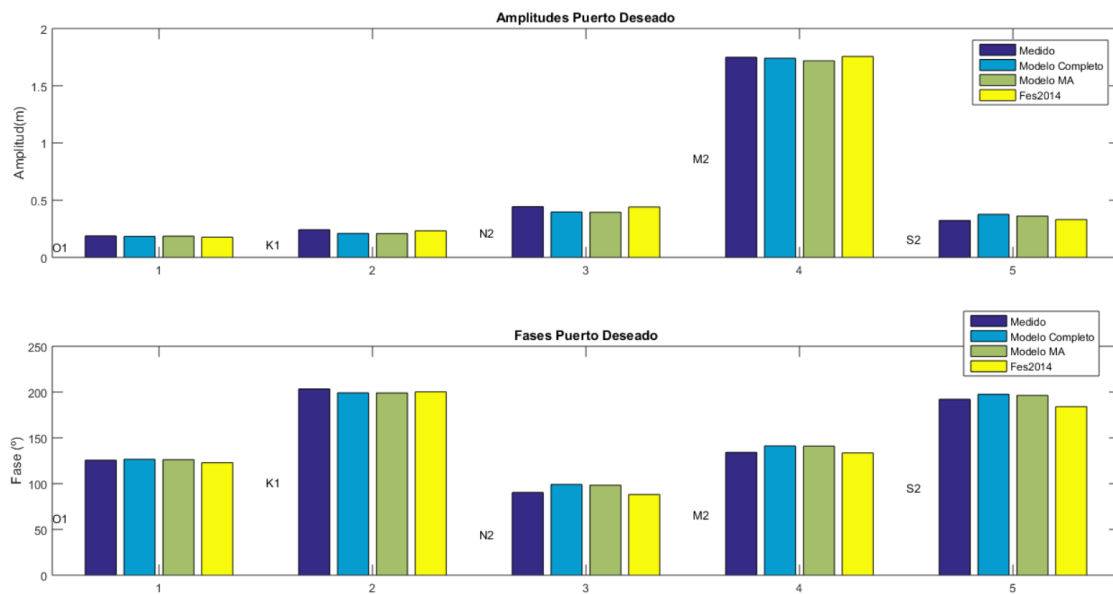


Figura 3.4. Comparación de las amplitudes y fases de los 5 armónicos principales obtenidos en Puerto Deseado a partir de las mediciones, del modelo completo, del modelo forzado solo con marea astronómica y del modelo global de marea astronómica FES2014.

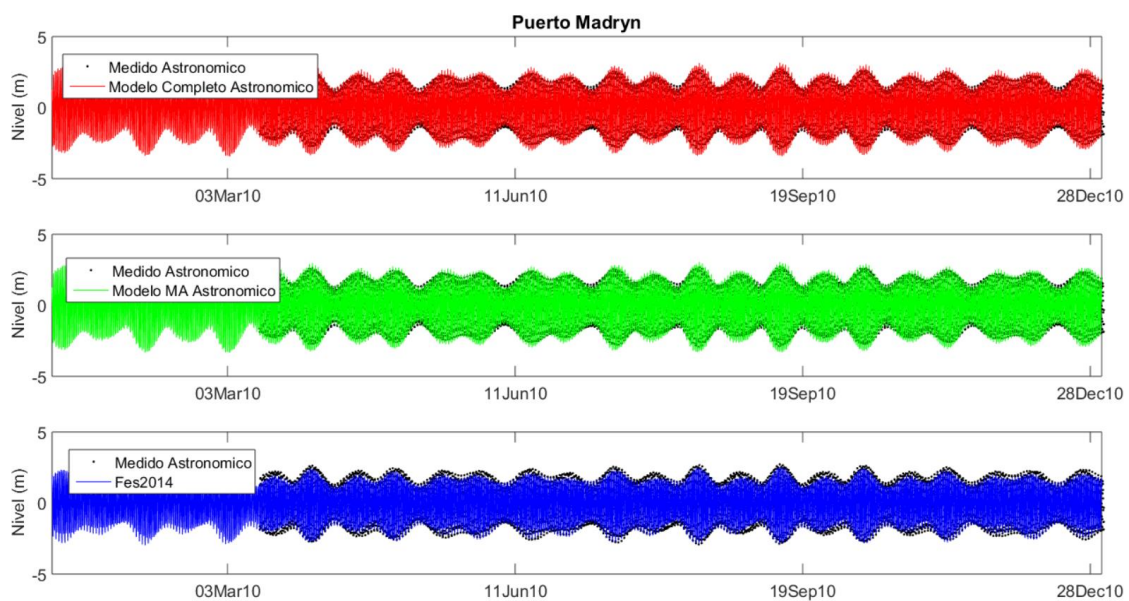


Figura 3.5. Componente astronómica de marea en Puerto Madryn obtenida a partir de los datos (superposición de las 60 componentes principales) y su comparación con la componente astronómica obtenida con el modelo *AStide* con todos los forzantes (panel superior), con el modelo *AStide* con forzante astronómico (panel intermedio) y con el modelo global de marea astronómica FES2014 (panel inferior).

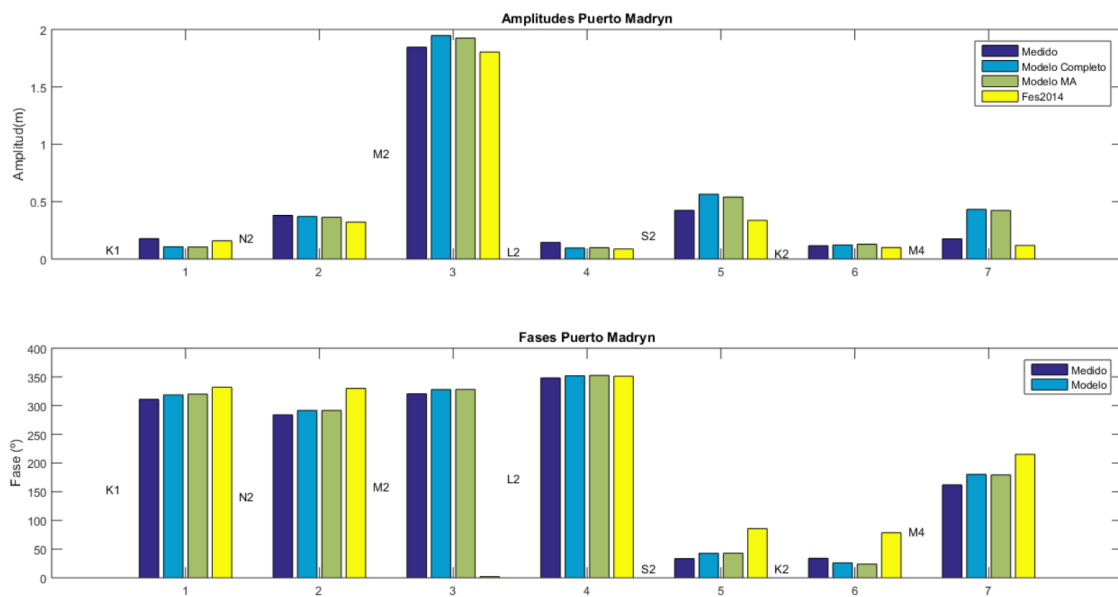


Figura 3.6. Comparación de las amplitudes y fases de los 7 armónicos principales obtenidos en Puerto Madryn a partir de las mediciones, del modelo completo, del modelo forzado solo con marea astronómica y del modelo global de marea astronómica FES2014.

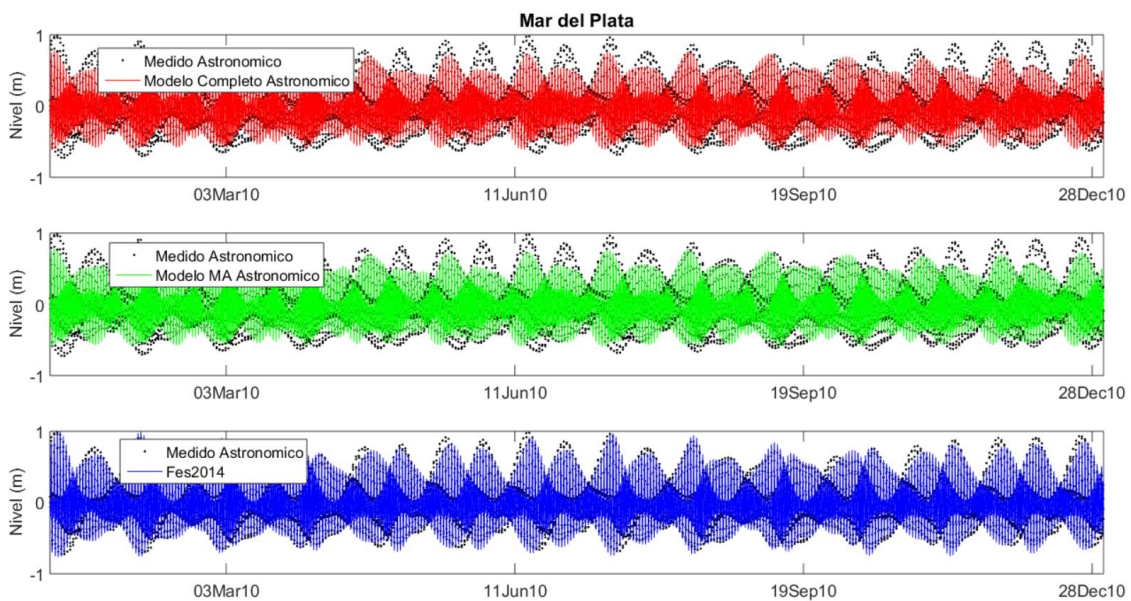


Figura 3.7. Componente astronómica de marea en Mar del Plata obtenida a partir de los datos (superposición de las 60 componentes principales) y su comparación con la componente astronómica obtenida con el modelo *AS tide* con todos los forzantes (panel superior), con el modelo *AS tide* con forzante astronómico (panel intermedio) y con el modelo global de marea astronómica FES2014 (panel inferior).

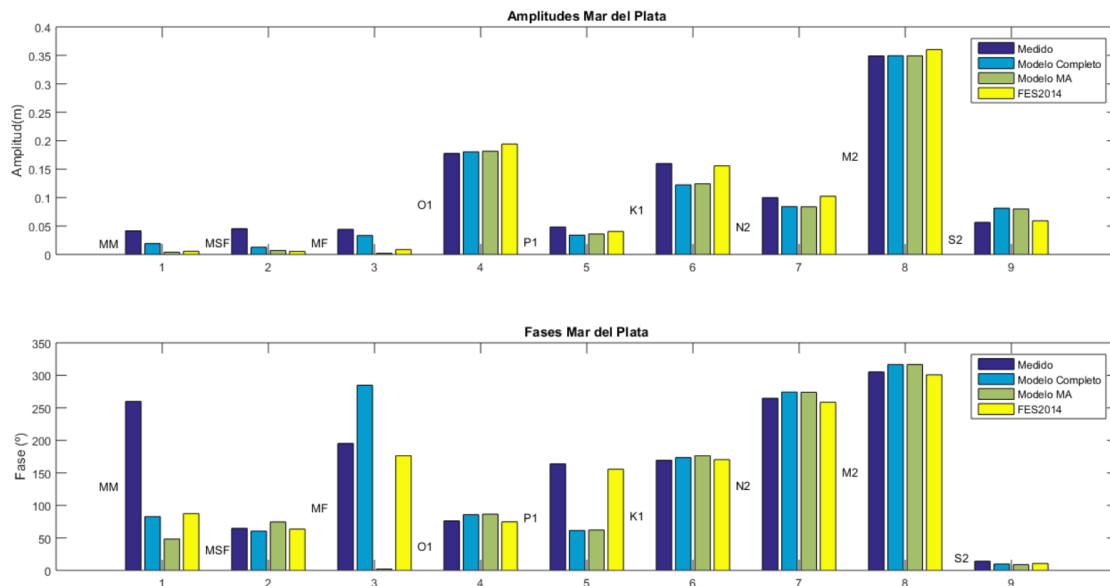


Figura 3.8. Comparación de las amplitudes y fases de los 9 armónicos principales obtenidos en Mar del Plata a partir de las mediciones, del modelo completo, del modelo forzado solo con marea astronómica y del modelo global de marea astronómica FES2014.

Se presenta en esta sección los resultados obtenidos de la evaluación del modelo *ASTide* en la representación de la marea total (marea astronómica y marea meteorológica) en las estaciones de Puerto Deseado (Figura 3.9), Puerto Madryn (Figura 3.10) y Mar del Plata (Figura 3.11). La comparación de los resultados del modelo con los datos medidos muestra que el modelo reproduce las principales variaciones de la marea total en las tres ubicaciones. Por otra parte, es importante mencionar que en Puerto Deseado y Puerto Madryn la componente astronómica de la marea domina sobre la componente meteorológica, siendo esta última prácticamente despreciable. En Mar del Plata la componente astronómica continúa siendo dominante pero los eventos de marea meteorológica son frecuentes y no son despreciables. Tomando la relación entre la varianza de la marea meteorológica sobre la varianza de la marea total (en porcentaje) de los datos medidos, como un indicador de la importancia relativa de la marea meteorológica en la serie total, se obtiene un valor de 1% en Puerto Deseado, 2% en Puerto Madryn y 35% en Mar del Plata.

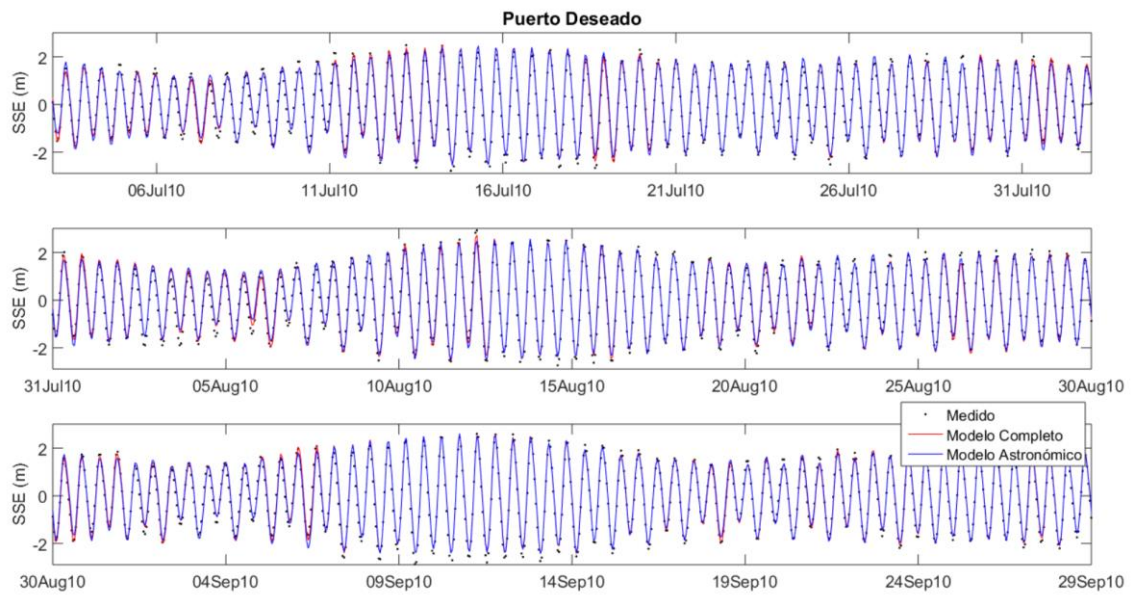


Figura 3.9. Comparación de la serie medida y obtenida con el modelo en Puerto Deseado para un período de tres meses; se incluye el resultado del modelo astronómico.

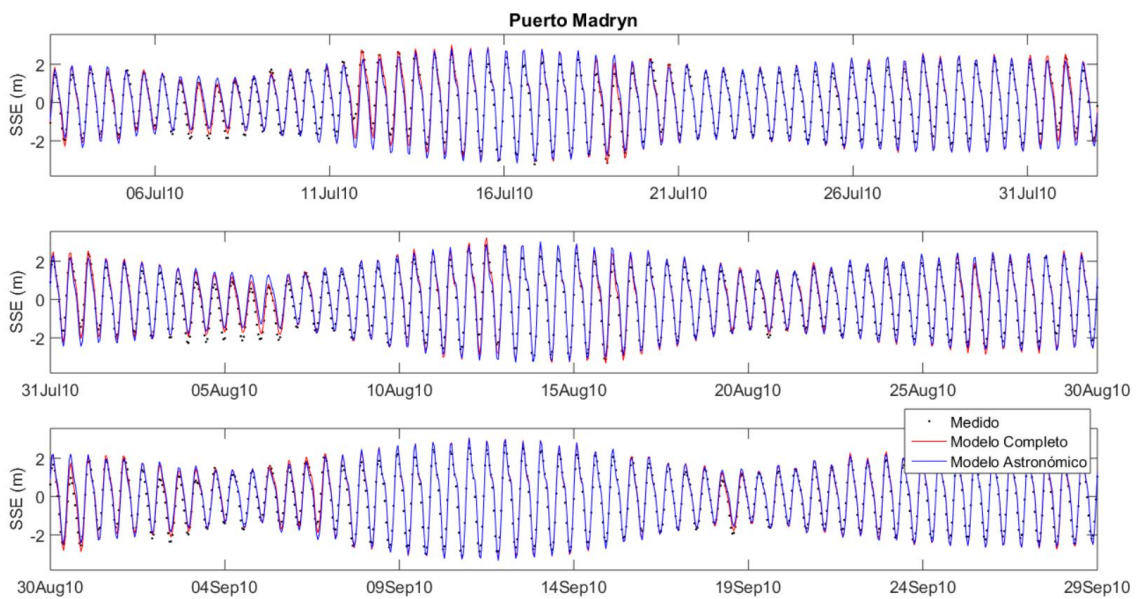


Figura 3.10. Comparación de la serie medida y obtenida con el modelo en Puerto Madryn para un período de tres meses; se incluye el resultado del modelo astronómico.

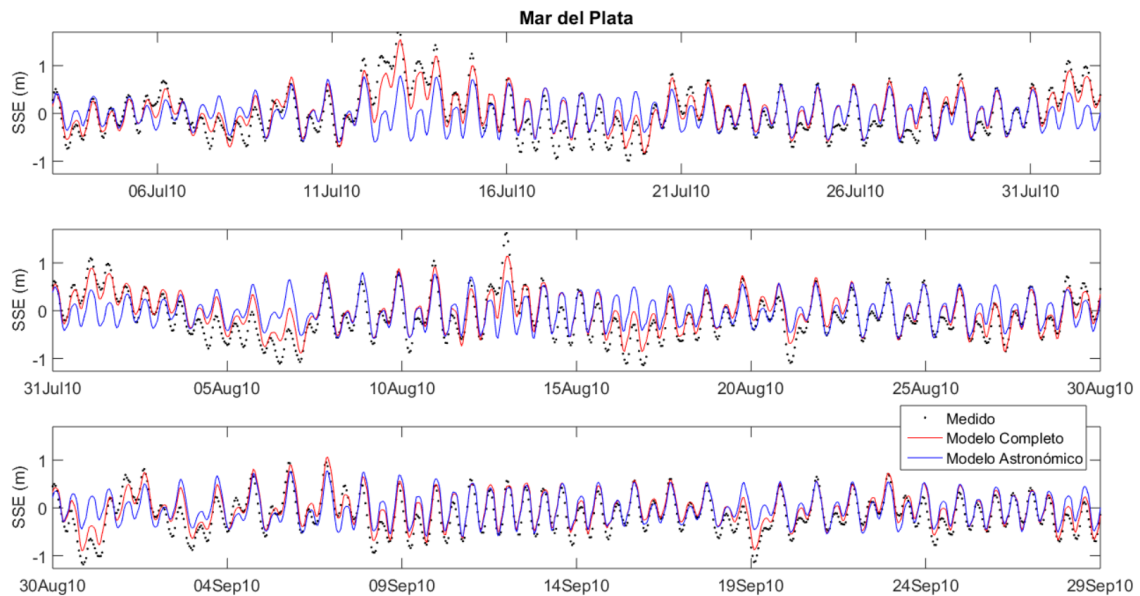


Figura 3.11. Comparación de la serie medida y obtenida con el modelo en Mar del Plata para un período de tres meses; se incluye el resultado del modelo astronómico.

De manera de cuantificar la calidad del modelo en la representación de los niveles medidos se calcula el error medio cuadrático RMSE y el error relativo calculado como el RMSE sobre el doble de la desviación estándar de la marea medida. En Puerto Deseado el error del modelo es 0,25m (5%), en Puerto Madryn 0,4m (7%) y en Mar del Plata 0,18 m (10,5%).

3.3 Modelo regional de marea de la Provincia de Buenos Aires

3.3.1 Estrategia de modelación

Se implementó un modelo hidrodinámico para la costa oceánica de la provincia Buenos Aires, el cual fue calibrado y validado en base a información de niveles medidos en estaciones mareográficas de la costa de la provincia de Buenos Aires e información de altimetría satelital.

Una vez calibrado el modelo se realizaron simulaciones retrospectivas (*hindcast*) cubriendo el período 1985-2016 (31 años). Se escogió como herramienta numérica el modelo TELEMAC/MASCARET (Hervouet, 2007), en particular su módulo hidrodinámico bidimensional TELEMAC2D.

Se decidió emplear este modelo por tratarse de herramientas de código abierto, eficiente computacionalmente, en continuo desarrollo por grupos de reconocido prestigio internacional, y con una comunidad de usuarios extendida (www.opentelemac.org). El modelo TELEMAC ha sido aplicado exitosamente en numerosos estudios de dinámica costera (Briere et al., 2007; Jones et al., 2008; Guillou y Chapalain, 2012; Huybrechts et al., 2012; Huybrechts y Villaret, 2013; Luo et al., 2013; Jia et al., 2015; Sathish Kumar y Balaji, 2015).

La implementación del modelo considera las principales características de la dinámica de la zona costera de la Provincia de Buenos Aires. La hidrodinámica en dicha zona muestra una variabilidad influenciada claramente por dos procesos que tienen origen y escalas temporales distintas, la marea astronómica y los eventos de marea meteorológica u ondas de tormenta (Santoro et al., 2013; Etala, 2009). Las primeras responden a un forzante astronómico y su régimen varía a lo largo de la costa de la provincia de Buenos Aires mostrando amplitudes significativamente mayores hacia el sur. Las segundas responden al forzante meteorológico (viento y presión en superficie) su duración es de varios días y se trata de eventos que ocurren con una frecuencia aproximadamente semanal.

El modelo se calibró con datos medidos en diferentes puntos de la costa atlántica considerando los procesos de marea antes mencionados. Se seleccionó el año 2010 para la calibración del modelo, comparando predicciones de marea astronómica en las estaciones de Mar del Plata, Monte Hermoso, Quequén y San Blas; y marea real en la estación de Mar del Plata. Para la validación se utilizaron otros años con datos disponibles de marea real en Mar del Plata, y además se utilizaron datos de niveles obtenidos a partir de altimetría satelital en todo el dominio de simulación y con énfasis en la zona costera de la Provincia de Buenos Aires.

La calibración del modelo se realizó en función de dos parámetros: el coeficiente de fricción de fondo (en este caso el número n de Manning) y el coeficiente de arrastre del viento (CD).

La tensión en superficie ejercida por la acción del viento se representa con una formulación de arrastre del tipo en función de un coeficiente de arrastre, la densidad del aire y la velocidad del viento en 10 m. Se evaluaron las alternativas de utilizar un coeficiente de arrastre constante y uno variable (en función de la velocidad de viento, obtenido a partir de la formulación de Flather, 1976).

Se evalúa la calidad de los resultados obtenidos en lo que refiere a series temporales en las estaciones costeras antes mencionadas calculando el CRMSE (Centered Root Mean Square-Error), el sesgo (BIAS), Correlación de Pearson (r), gráficos de dispersión y cuantil-cuantil de todos los datos. En lo que refiere a la comparación con datos de altimetría satelital se interpolaron los resultados del modelo, tanto en el espacio y el tiempo, a las correspondientes ubicaciones e instantes de cada medida satelital. Luego se discretizó el dominio de cálculo en zonas y se calcularon para cada una de ellas el sesgo (BIAS), error medio cuadrático (RMSE), Correlación de Pearson (r) y un error medio cuadrático normalizado (NRMSE), gráficos de dispersión y cuantil-cuantil de todos los datos. El cálculo de un error medio normalizado surge de la gran variabilidad de la amplitud de la marea astronómica a lo largo del dominio, se normalizó respecto a cuatro veces la desviación estándar de la serie observada (valor que en una distribución normal abarca aproximadamente el 95% de los datos entorno a la media). A continuación, se detalla la formulación para el cálculo de cada estadístico, en donde el subíndice m y o hacen referencia a modelo y a observación.

3.3.2 Información utilizada

Para caracterizar la batimetría, se utilizó información cartográfica correspondiente a las cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval de la Armada Argentina (SHN), en particular las cartas: H1, H2, H101, H113, H114, H115, H210, H211, H211A. En la zona norte del dominio de cálculo se utilizó información cartográfica correspondiente a las cartas náuticas del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) ROU01, e información batimétrica extraídos del GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Ocean*).

Luego, se utilizaron los datos de viento en 10 m y presión a nivel del mar de reanálisis de NCEP, CFSR para el período 1985-2010 y CFSRv2 para el período 2010-2016. Se trabajó con series horarias la cuales están compuestas por datos cada 6 horas y datos de pronósticos entre cada uno de ellos. Los datos de viento se descargaron con una resolución espacial de 0.205° x 0.204°, mientras que los de presión tienen una resolución de 0.312° x 0.312°.

Se utilizaron series de caudales diarios de los ríos Paraná (Guazú y Las Palmas) y Uruguay para el período 1985 – 2016. Las mismas fueron elaboradas a partir de información recopilada por el Instituto Nacional de Agua Argentino (INA), la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM) y la Administración de Usinas Térmicas del Estado (UTE).

Se utilizaron dos tipos de datos de niveles para la calibración y validación del modelo, predicciones puramente astronómicas de niveles en las estaciones Mar del Plata, Quequén, Monte Hermoso y San Blas; y por otro lado niveles reales medidos en la estación de Mar del Plata. Las predicciones de marea astronómica fueron provistas por el INA y surgen de una reconstrucción propia a partir de Componentes provistas por el Servicio de Hidrografía Naval.

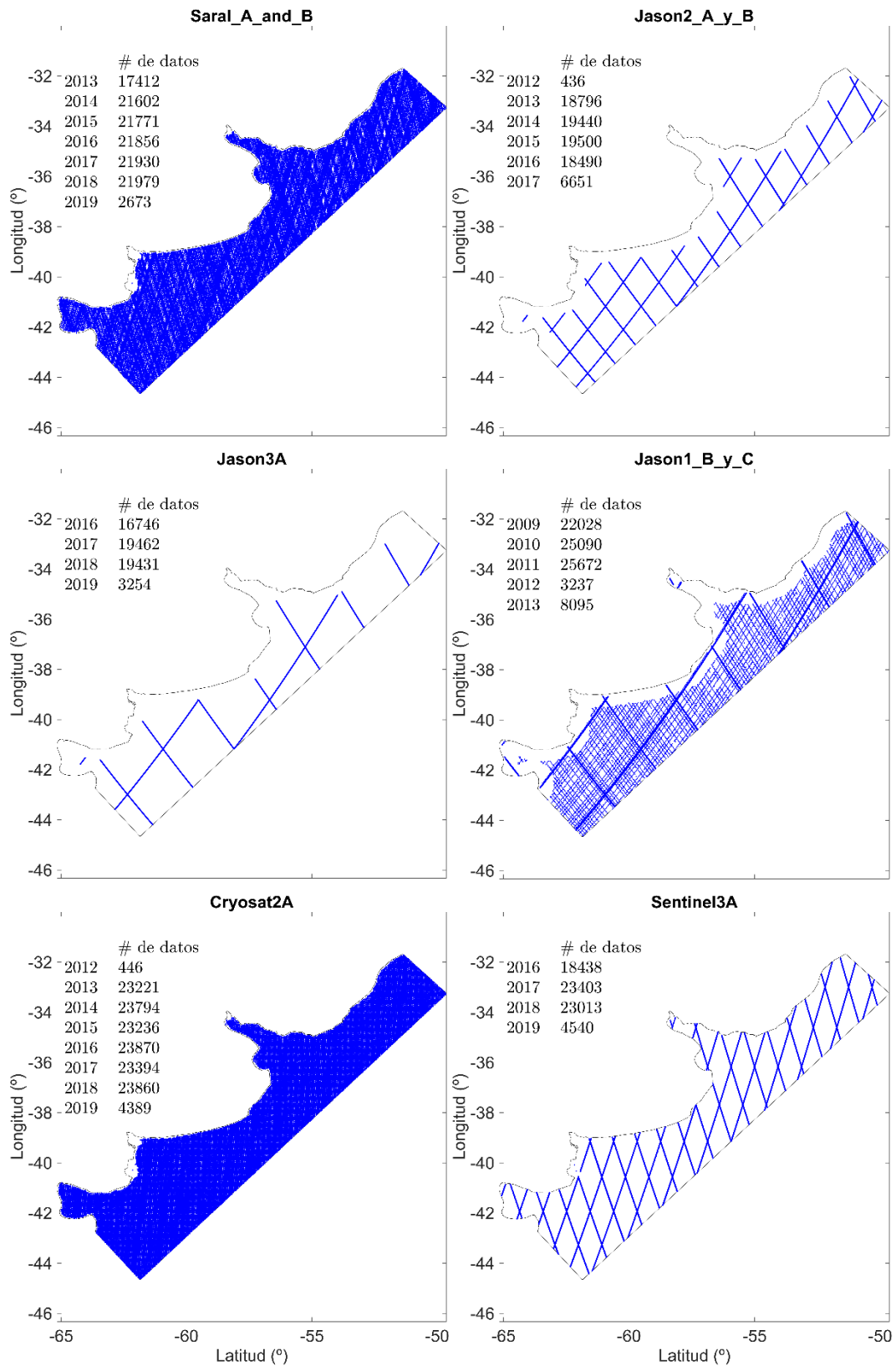
Los datos de niveles medidos en la estación mareográfica de Mar del Plata fueron descargados del sitio del Sea Level Center de la Universidad de Hawaii (<http://uhslc.soest.hawaii.edu>). La Tabla 3.1 muestra la disponibilidad de datos con frecuencia horaria en la estación Mar del Plata. La base de datos reconoce ciertas dudas respecto al nivel de referencia de los datos, por lo que se ajustó su nivel medio para que fuera 0,91 m, valor presentado por el SHN referido al plano de reducción utilizado para construir la batimetría del modelo.

Tabla 3.1. Información disponible en la estación Mar del Plata en la base de datos del Sea Level Center de la Universidad de Hawaii. Porcentaje de datos disponibles con frecuencia horaria.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53	100
2005	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	81
2006	84	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2007	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2008	100	100	100	100	100	100	100	77	42	100	100	92
2009	97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2010	0	0	26	100	100	100	100	100	100	100	100	96
2011	100	95	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2012	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2013	100	100	100	100	100	100	100	100	91	100	90	91
2014	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2015	100	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016	100	100	94	87	87	91	100	100	82	61	100	100

Los datos de estimación de la elevación de superficie libre mediante altimetría satelital se obtuvieron a través del sitio Radar Altimeter Database System (RADS)⁸. Se trata de una base de datos homogeneizada, validada y con validación cruzada de datos de elevación de superficie libre a partir de altimetría satelital (Scharroo et *al.*, 2013). Se descargaron los datos correspondientes a los siguientes satélites y misiones: Sara A y B, Jason 1 B y C, Jason 2 A y B, Cryosat 2 A, Jason 3, y Sentinel 3 A. En la Figura 3.12 se muestra como gráfico de puntos la ubicación de los datos disponibles notándose la diferencia entre las trayectorias de los distintos satélites y un resumen de la cantidad de datos disponible por año. Los datos se encuentran referidos al nivel medio DTU15 (Andersen et *al.*, 2017).

⁸ <http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml>



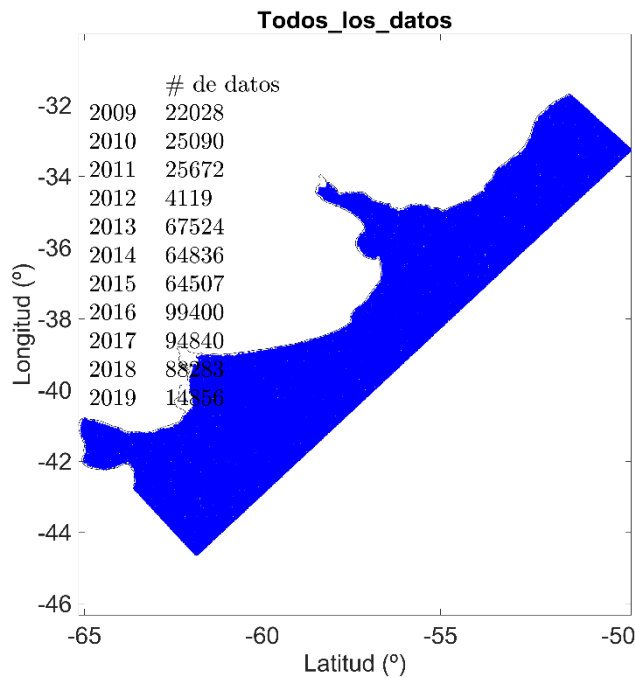


Figura 3.12. Gráfico de puntos con la ubicación de cada medición altimétrica para las misiones Sara A y B, Jason 1 B y C, Jason 2 A y B, Cryosat 2 A, Jason 3, y Sentinel 3 A. Se muestra además la cantidad de datos disponibles por año.

3.3.3 Detalles del modelo hidrodinámico

Se trabajó con el sistema TELEMAC-MASCARET (Hervouet, 2007), se trata de un sistema de código abierto, y es desarrollado por el consorcio Open TELEMAC-MASCARET⁹. El sistema ofrece diversos modelos numéricos que permiten el estudio de la hidrodinámica, transporte de sustancias y sedimentos. En particular en este trabajo se utilizó su módulo hidrodinámico bidimensional integrado en vertical TELEMAC-2D.

El dominio cubre la costa de la provincia de Buenos Aires, incluyendo además el golfo de San Matías y la zona de Bahía Blanca al sur y se extiende hasta Río Grande al norte (Figura 3.13). Se incluye la desembocadura de los principales afluentes, los ríos Paraná y Uruguay en su borde Oeste, la zona costera de la Provincia de Buenos Aires en su totalidad y la plataforma continental hasta los 2300 m de profundidad aproximadamente. Los límites del dominio de cálculo en la frontera oceánica se ubicaron normales a la costa. De esta forma la frontera abierta se sitúa aproximadamente en forma paralela a la plataforma continental y las fronteras sur y norte normales a la costa

Como ya fue mencionado el sistema de modelos TELEMAC-MASCARET trabaja en base a mallas de elementos/volúmenes finitos de tipo triangular. La malla fue generada utilizando el software libre *BlueKenueTM* y cuenta con 48.056 nodos y 94.033 elementos. En la Figura 3.13 se presenta

⁹ www.opentelemac.org

la configuración horizontal de la malla en elementos finitos utilizada en este trabajo, la cual se estructuró sobre la base de un sistema coordinado Este-Oeste y Norte-Sur a partir de los contornos y de los datos batimétricos digitalizados. Se observa que la malla está formada por elementos triangulares de tamaño variable según la precisión en el cálculo requerida para las diferentes zonas del dominio. Los elementos de mayor tamaño (aproximadamente 7 Km de lado) se encuentran en la zona del borde oceánico. La densidad de la malla crece hacia la zona de interés, provincia de Buenos Aires, alcanzado sobre la costa una resolución de 1 Km.

La batimetría del dominio de cálculo se confeccionó a partir de la información cartográfica antes mencionada. En la Figura 3.13 se presenta la batimetría del área modelada ingresada al modelo en todo el dominio de cálculo. Se observa en la misma la gran variación de la profundidad en el dominio de estudio

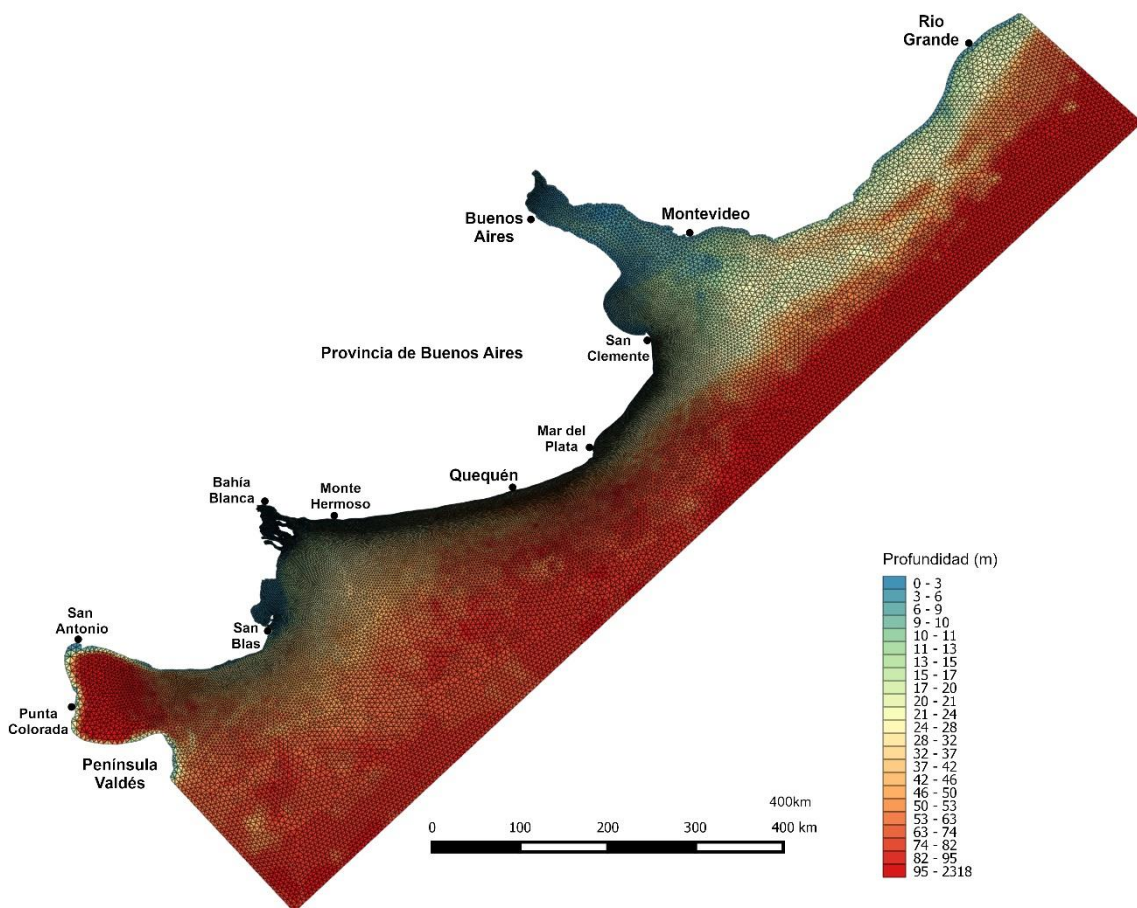


Figura 3.13. Malla de cálculo y batimetría.

El paso de discretización temporal elegido es de 60 segundos, el cual muestra ser adecuado para la malla que se está utilizando presentando excelentes tiempos de ejecución y habiendo mostrado no influir en los resultados obtenidos. En lo que respecta a la ley de fricción de fondo, por tratarse de un modelo bidimensional en el cual las velocidades se promedian en la vertical, se considera que la formulación de Manning es conceptualmente acertada. En lo que respecta al coeficiente de Coriolis, su efecto no es despreciable dada las escalas espaciales del dominio

considerado, se optó por trabajar en coordenadas esféricas con lo cual modelo calcula para cada nodo el valor del coeficiente de Coriolis de acuerdo a su latitud. Como ya fue mencionado se incluye el efecto del viento mediante una formulación del tipo de arrastre. Se tiene en cuenta el efecto de la presión atmosférica en la superficie. En esta implementación bidimensional se tiene en cuenta el efecto de la salinidad a través de los gradientes horizontales de densidad. Se empleó la opción que considera la presencia de planicies de inundación en el dominio, de esta forma se tiene un tratamiento especial de las zonas someras que puedan quedar sin agua durante la evolución de la simulación. En lo que respecta a las opciones de advección se utiliza el método N para las componentes de la velocidad y para la elevación de la superficie libre el método PSI distribuido.

El modelo de turbulencia utilizado es del Smagorinski. El solver utilizado corresponde al método del gradiente conjugado.

Las ondas de marea relevantes para la hidrodinámica en la zona de estudio son impuestas en los nodos correspondientes a la frontera oceánica del modelo y los valores impuestos provienen del modelo ASTide. Se impusieron tanto la elevación de la superficie libre como las corrientes integradas en la vertical.

La condición de borde impuesta en cada nodo de la frontera oceánica es de tipo Dirichlet, esto es, se impone el valor de la variable en cuestión. La condición de borde en la superficie libre es la que permite tener en cuenta el efecto de los forzantes atmosféricos. Por un lado la componente normal de la tensión en la superficie libre se impone como la presión atmosférica a nivel del mar, y por otro lado se impone la componente tangencial o rasante de la tensión en base a una formulación de tipo de arrastre que tiene en cuenta la velocidad del viento.

En lo que refiere a la condición de borde en fondo, se utilizó la formulación de Manning-Strickler en función del coeficiente de rugosidad n de Manning. Tal como se mencionó en la metodología el mismo fue un parámetro de calibración, evaluándose varias alternativas que incluyen distintos valores del coeficiente de fricción, así como configuraciones con un valor uniforme para todo el dominio y otras con una distribución por zonas.

El modelo requiere la especificación de una condición inicial para las variables del sistema, es decir, para la elevación de la superficie libre y para la velocidad. La condición inicial para la elevación de la superficie es un valor uniforme en todo el dominio de cálculo, igual a 0,91 m. Dicho valor corresponde al nivel medio en varias estaciones (como Mar del Plata y San Clemente) referido al plano de reducción de las cartas batimétricas empleadas para confeccionar la malla del modelo. En los que respecta al campo de velocidades la condición inicial es el reposo.

3.3.4 Calibración y validación del modelo hidrodinámico

Calibración

La Tabla 3.2 presenta el conjunto de simulaciones realizadas durante el proceso de calibración del modelo. Los parámetros de calibración del modelo son el coeficiente de rugosidad de fondo n de Manning y el coeficiente de arrastre del viento CD . Se realizaron simulaciones con el coeficiente de arrastre del viento variando entre 1×10^{-6} y 3×10^{-6} y la formulación variable con la velocidad del viento según Flather, simulaciones $CD1$ a $CD5$. Por otra parte, se realizaron simulaciones con el coeficiente de fricción de fondo variando entre 0,01 y 0,03, simulaciones $n1$ a $n3$. Finalmente, a la luz de estos resultados se escogió una configuración final con coeficiente de arrastre de viento $CD=3 \times 10^{-6}$ y de fricción de fondo $n=0,025$.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos comparando primero la componente astronómica de las series de niveles en las estaciones de Mar del Plata, Quequén, Monte Hermoso y San Blas; y luego los resultados de comparación de la marea real en la estación de Mar del Plata.

Tabla 3.2. Simulaciones realizadas

Simulación	C_D	n
<i>CD1</i>	1,00E-06	0,02
<i>CD2</i>	2,00E-06	0,02
<i>CD3</i>	2,50E-06	0,02
<i>CD4</i>	3,00E-06	0,02
<i>CD5</i>	Variable	0,02
<i>n1</i>	2,50E-06	0,01
<i>n2</i>	2,50E-06	0,02
<i>n3</i>	2,50E-06	0,03
<i>Final</i>	3,00E-06	0,025

Para evaluar la calidad del modelo en la representación de la marea astronómica en la costa de la provincia de Buenos Aires se comparan las series de niveles puramente astronómicas predichas por el INA a partir de componentes provistas por el SHN en la estación de Mar del Plata, Quequén, Monte Hermoso y San Blas; con las series puramente astronómicas obtenidas a partir de los resultados del modelo. Estas últimas se obtuvieron a partir de un análisis de armónicos utilizando la herramienta UTide (Codiga, 2011) sobre las series simuladas, y luego reconstruyendo la serie temporal para el año de interés. Recordar que las simulaciones realizadas tienen en cuenta todos los forzantes, tanto astronómicos como meteorológicos. Los resultados se presentan comparando series temporales, gráficas de barras comparando amplitudes y fases de las componentes astronómicas principales en cada estación y finalmente se cuantifica la calidad de los resultados mediante los estadísticos antes presentados.

La Figura 3.14 muestra la comparación de las series temporales para las simulaciones CD1 a CD5 para todo el año 2010, mientras que en la Figura 3.15 se muestra una ventana de 15 días. En la Figura 3.16 se comparan las amplitudes y fases de las principales componentes.

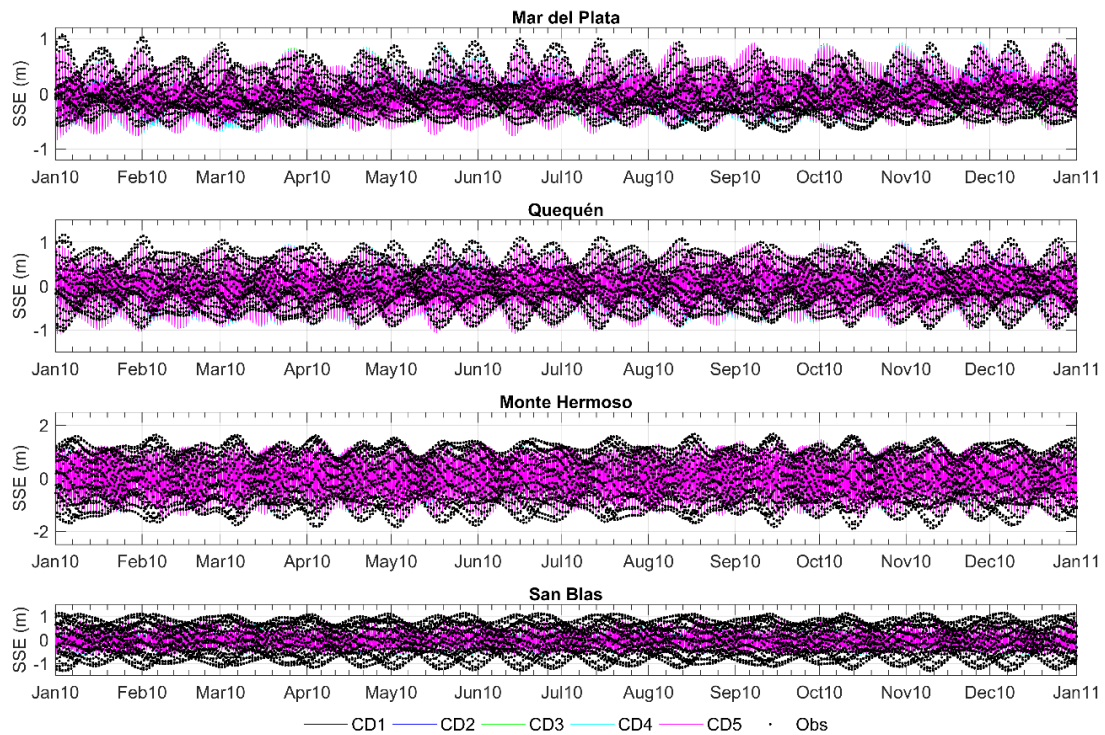


Figura 3.14. Componente astronómica de marea en las estaciones de Mar del Plata, Quequén, Monte Hermoso y San Blas durante el año 2010. Simulaciones con distintos coeficiente de arrastre de viento (Tabla 3.2).

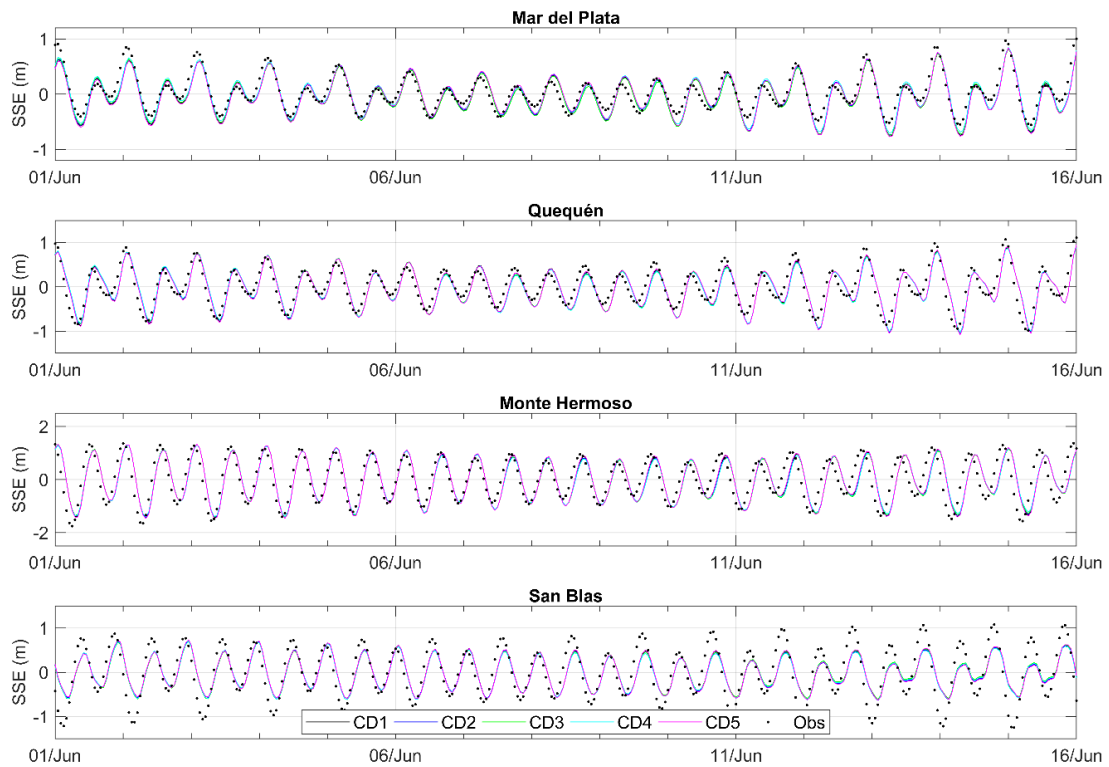
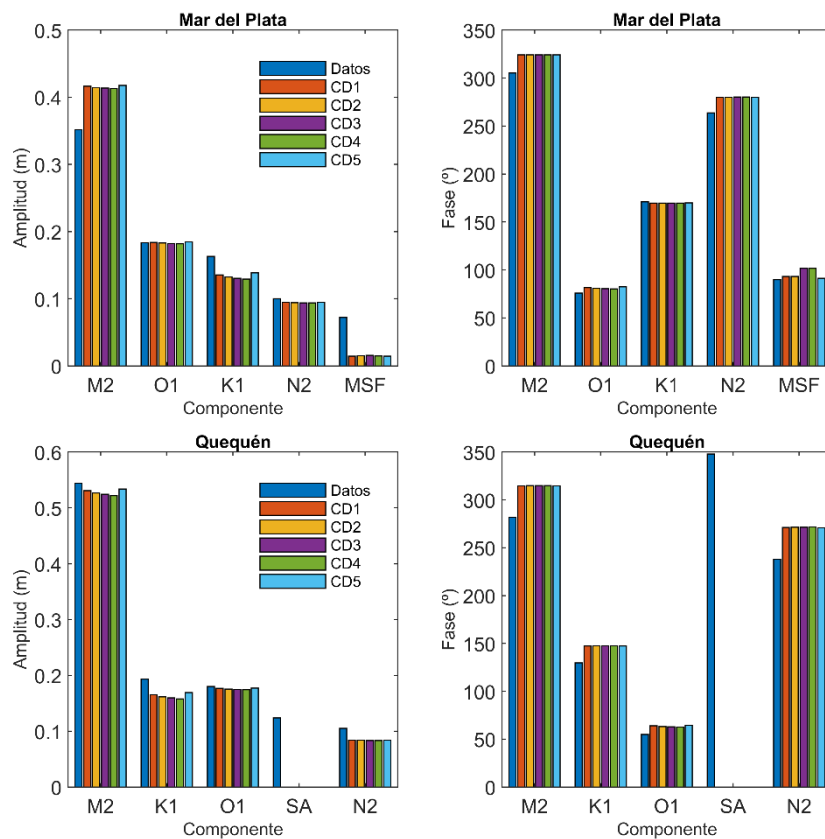


Figura 3.15. Componente astronómica de marea en las estaciones de Mar del Plata, Quequén, Monte Hermoso y San Blas durante la primera quincena de junio de 2010. Simulaciones con distintos coeficiente de arrastre de viento (Tabla 3.2).



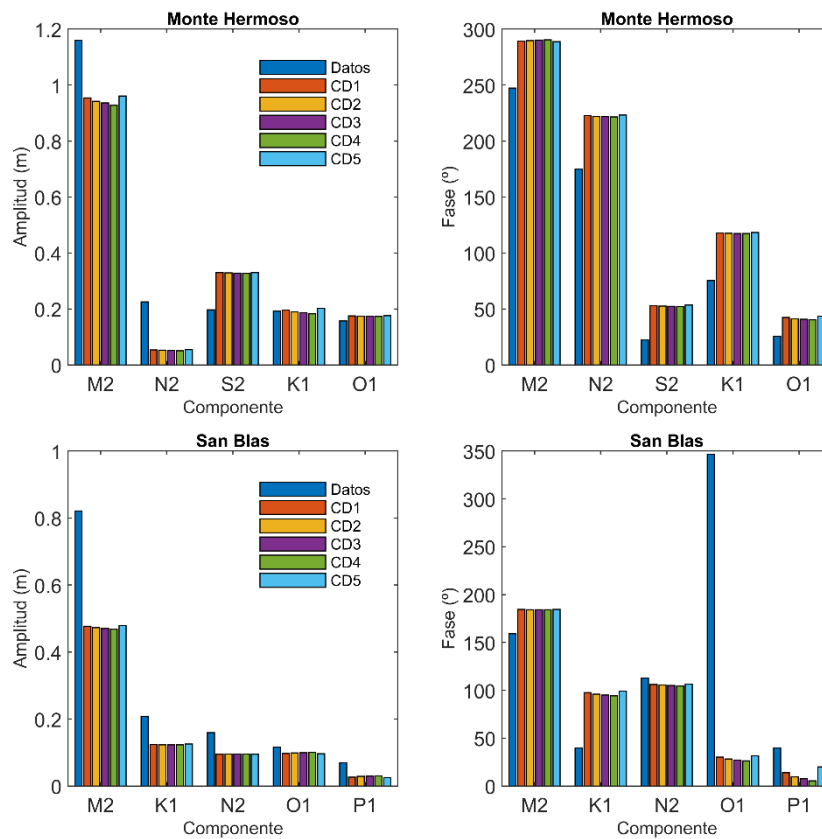


Figura 3.16. Comparación de las amplitudes (izq.) y fases (der.) esperadas y simuladas para las principales componentes de la marea astronómica en las estaciones de Mar del Plata, Quequén, Monte Hermoso y San Blas. Simulaciones con distintos coeficiente de arrastre de viento (Tabla 3.2).

En la Figura 3.17 y la Figura 3.18 se comparan las series temporales de marea astronómica obtenidas para las simulaciones con distintos coeficientes de rugosidad de fondo, mientras que en la Figura 3.19 se muestra la comparación de las amplitudes y fases de las principales componentes. Se observa que la marea astronómica es sensible al coeficiente de fricción de fondo, mostrando una clara atenuación de su amplitud a mayores valores de fricción de fondo acompañada a su vez de cambios en la fase. En Mar del Plata la simulación con menor coeficiente de fricción claramente sobrestima la amplitud de la marea astronómica, las simulaciones con mayor coeficiente de fricción muestran una buena representación tanto de las amplitudes como de las fases de las principales componentes. En la estación de Quequén la componente principal (M_2) es la que muestra mayor sensibilidad especialmente en términos de amplitud, siendo un valor intermedio de fricción el que arroja mejores resultados. En la estación Monte Hermoso se observa un comportamiento similar, siendo la amplitud de la componente principal sobreestimada para el menor valor de fricción y subestimada para los mayores. En la estación San Blas todas las simulaciones subestiman la amplitud de la marea astronómica.

Al comparar el comportamiento en las cuatro estaciones consideradas se observa que el modelo reproduce satisfactoriamente las fases en términos generales en todas las estaciones, las amplitudes muestran que los valores de fricción más altos son los que mejor representan las amplitudes en la zona norte de la costa (Mar del Plata, Quequén) y en la medida que nos desplazamos al sur los valores más bajos de fricción de fondo son los que se mejor se aproximan.

Esto último podría sugerir que una configuración de fricción de fondo variable en el espacio con coeficiente de fricción disminuyendo de norte a sur podría arrojar mejores resultados; sin embargo, no habiendo una justificación física de peso para justificar dicha zonificación se optó por escoger un valor de compromiso uniforme en el dominio.

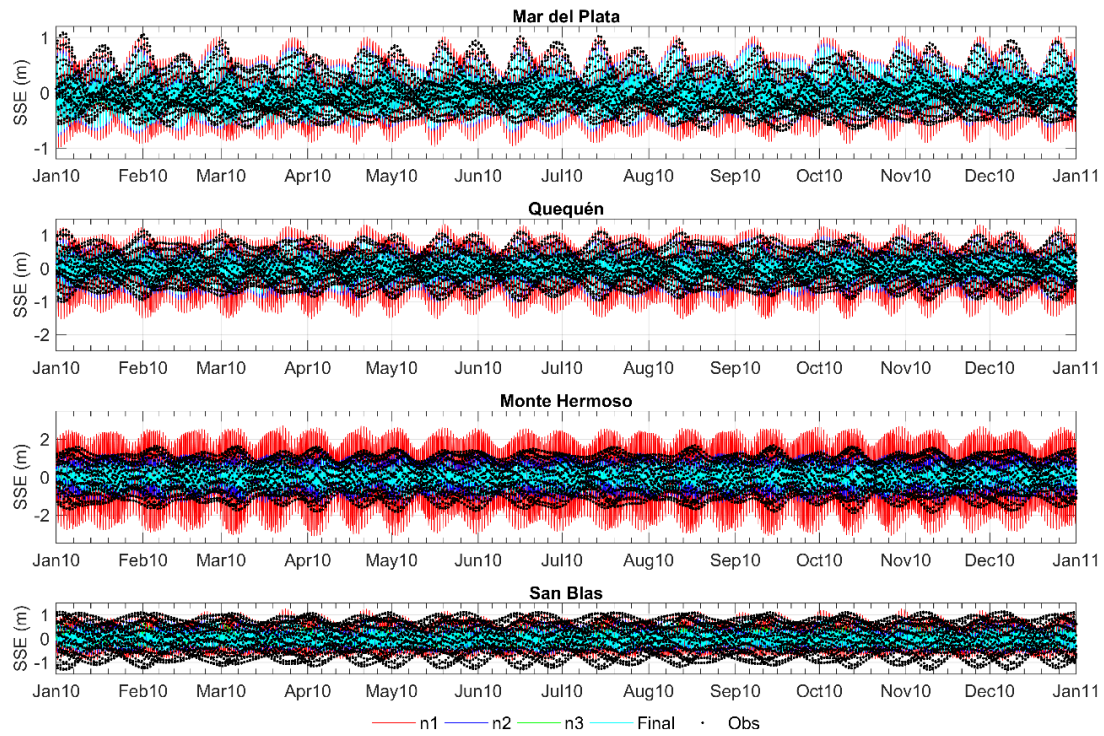


Figura 3.17. Componente astronómica de marea en las estaciones de Mar del Plata, Quequén, Monte Hermoso y San Blas durante el año 2010. Simulaciones con distintos coeficiente de fricción de fondo (Tabla 3.2).

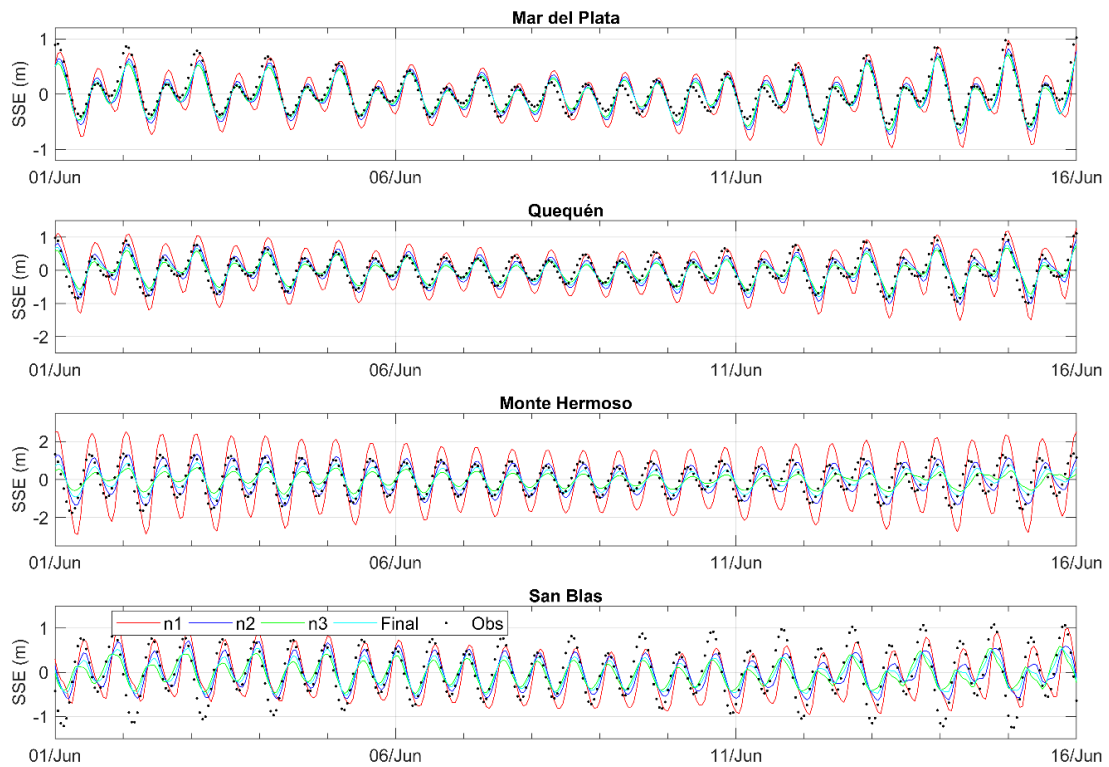
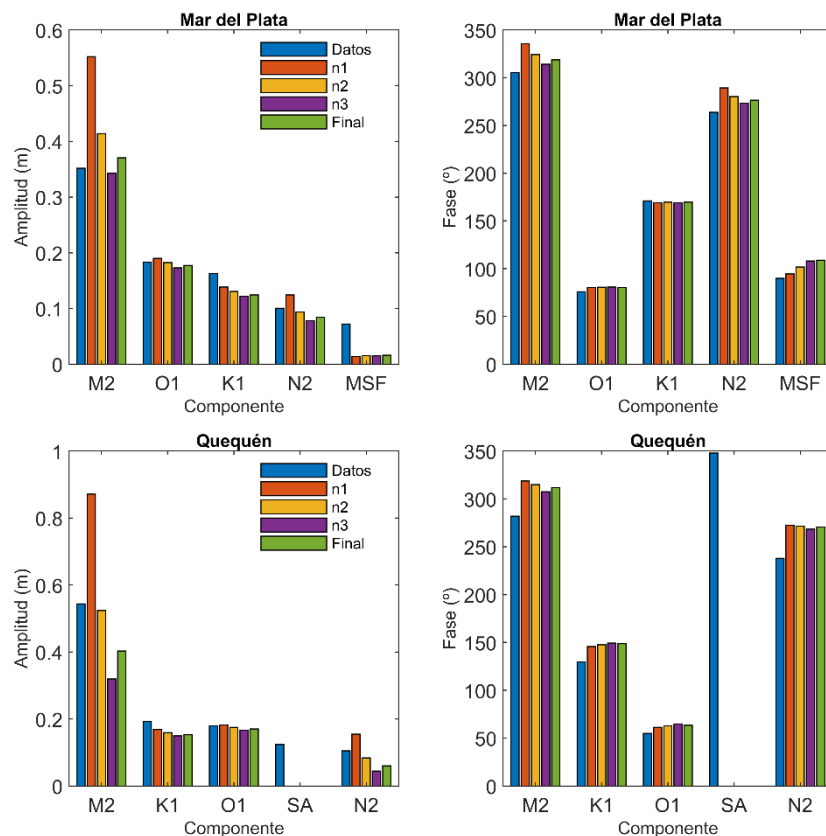


Figura 3.18. Componente astronómica de marea en las estaciones de Mar del Plata, Quequén, Monte Hermoso y San Blas durante la primera quincena de Junio de 2010. Simulaciones con distintos coeficiente de fricción de fondo (Tabla 3.2).



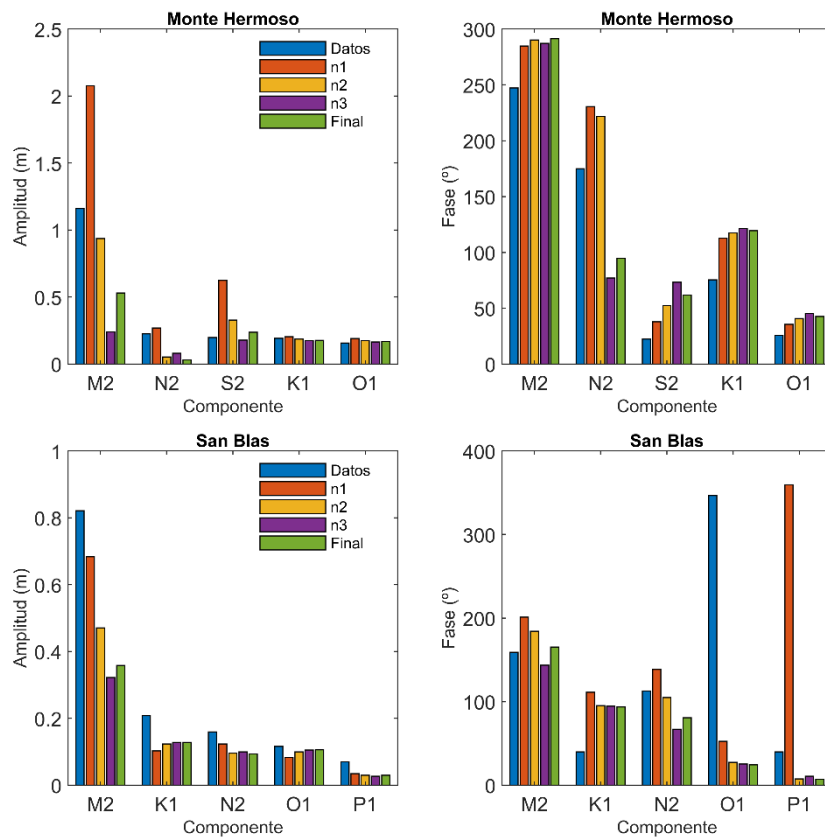


Figura 3.19. Comparación de las amplitudes (izq.) y fases (der.) esperadas y simuladas para las principales componentes de la marea astronómica en las estaciones de Mar del Plata, Quequén, Monte Hermoso y San Blas. Simulaciones con distintos coeficiente de fricción de fondo (Tabla 3.2).

En la Tabla 3.3 se muestran los estadísticos calculados para todas las simulaciones. Como se mencionó anteriormente el coeficiente de arrastre de viento muestra poca influencia sobre la dinámica astronómica en todas las estaciones. En la estación Mar del Plata se puede ver que se tiene un BIAS cercano a 12 cm en todas las simulaciones, por otra parte el incremento de la fricción de fondo mejora tanto los errores como la correlación alcanzando en la configuración Final un error de 15 cm (11% relativo) y una correlación de 0,9. La configuración de mayor fricción (n3) muestra estadísticos ligeramente mejores en Mar del Plata que la configuración Final, lo que sucede es que se tuvo en cuenta para seleccionar la configuración Final también el comportamiento de los resultados en las estaciones ubicadas al sur. En la estación de Quequén se tiene un BIAS de aproximadamente 3 cm en todas las simulaciones, el comportamiento obtenido es muy similar al de Mar de Plata en términos de respuesta al coeficiente de fricción obteniendo en la configuración Final un error de 23 cm (13% relativo) y una correlación de 0,86.

En la estación de Monte Hermoso se tiene un BIAS de 1 m, los mejores resultados se obtienen con un valor intermedio de fricción de fondo (simulación n2) notándose para mayores valores un deterioro tanto en términos de error como de correlación; la configuración Final presenta un error de 67 cm (19% relativo) y correlación de 0,64. Finalmente en la estación de San Blas los mejores resultados se obtienen con un valor intermedio de fricción de fondo (simulación n2) notándose para mayores valores un deterioro en la calidad de los resultados, la configuración Final presenta un error de 38 cm (15% relativo) y correlación de 0,88.

Tabla 3.3. Estadísticos para la marea astronómica en las estaciones de Mar del Plata, Quequén, Monte Hermoso y San Blas, para las simulaciones presentadas en la (Tabla 3.2).

		CD1	CD2	CD3	CD4	CD5	n1	n2	n3	Final
Mar del Plata	BIAS (m)	0,12	0,15	0,12	0,14	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12
	CRMSE (m)	0,17	0,17	0,16	0,17	0,17	0,26	0,17	0,14	0,15
	Correlación	0,89	0,88	0,89	0,89	0,89	0,83	0,89	0,91	0,90
	NCRMSE (%)	12,3	12,8	12,5	12,7	12,6	19,2	12,4	10,7	11,0
Quequén	BIAS (m)	-0,03	-0,02	-0,03	-0,02	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03
	CRMSE (m)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,43	0,25	0,24	0,23
	Correlación	0,85	0,84	0,84	0,84	0,85	0,79	0,84	0,88	0,86
	NCRMSE (%)	13,7	13,9	13,8	13,9	13,8	23,7	13,8	13,1	12,8
Monte Hermoso	BIAS (m)	-1,00	-1,01	-1,02	-1,02	-0,99	-1,03	-1,02	-1,02	-1,03
	CRMSE (m)	0,62	0,63	0,63	0,63	0,62	1,07	0,63	0,75	0,67
	Correlación	0,71	0,71	0,70	0,70	0,72	0,77	0,70	0,52	0,64
	NCRMSE (%)	18,0	18,1	18,2	18,3	17,9	31,0	18,2	21,7	19,3
San Blas	BIAS (m)	-0,42	-0,43	-0,44	-0,44	-0,42	-0,17	-0,44	-0,47	-0,47
	CRMSE (m)	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,47	0,36	0,41	0,38
	Correlación	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,67	0,84	0,83	0,88
	NCRMSE (%)	14,7	14,7	14,7	14,7	14,8	19,0	14,7	16,8	15,3

La comparación de los resultados del modelo con observaciones en términos de marea real se realizó con los datos de la estación de Mar del Plata. Los resultados se presentan como series temporales, gráficos de puntos y se calculan los estadísticos antes mencionados.

En la Figura 3.20 y la Figura 3.21 se muestran las series temporales de marea real para distintos coeficientes de arrastre de viento durante todo el año 2010 y durante julio de 2010 respectivamente. Se ve que dicho coeficiente tiene un claro impacto en la representación de los eventos de marea meteorológica. En los gráficos de dispersión (Figura 3.24) se puede ver que para los valores más bajos de CD (simulaciones CD1, CD2) el modelo subestima la amplitud de los eventos de marea meteorológica (tanto en valores máximos como mínimos de nivel). Además, se observa que los mejores resultados se obtienen con la simulación CD3, mientras que la formulación con coeficiente variable según la velocidad del viento (CD5) se asemeja mucho a las de valores de CD fijo bajos.

En lo que refiere a las simulaciones con distinto coeficiente de fricción (Figura 3.22 y Figura 3.23), naturalmente se observa el comportamiento antes descrito sobre la marea astronómica, mientras que sobre los eventos de marea meteorológica se tiene cierta incidencia, pero de menor orden que la generada por el coeficiente de arrastre del viento. Se puede ver en los gráficos de dispersión que los mayores valores de fricción arrojan los mejores resultados. Si bien los estadísticos de la configuración n3 son ligeramente mejores que los de la configuración final, ésta última representa mejor los valores máximos y mínimos y como se mencionó antes en términos de marea astronómica es mejor en las estaciones de la zona sur del tramo de costa de interés.

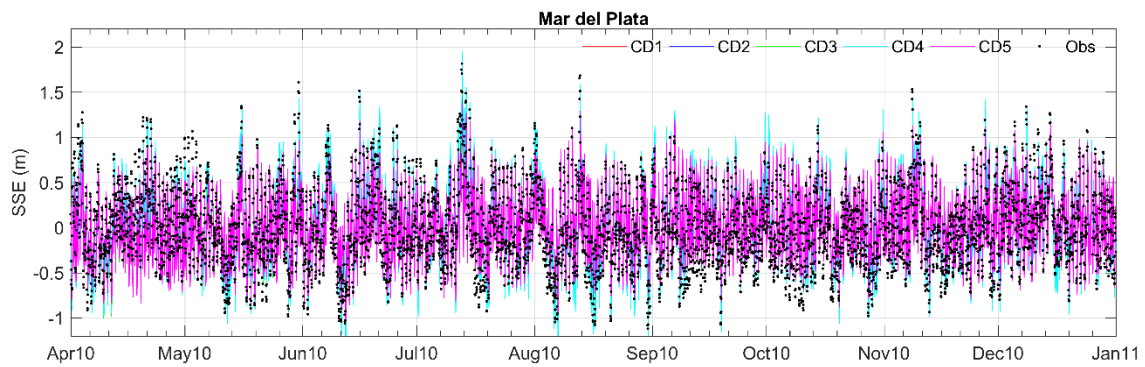


Figura 3.20. Serie temporal de niveles observados y simulados en la estación Mar del Plata durante el año 2010 para las simulaciones con distintos coeficientes de arrastre del viento (Tabla 3.2).

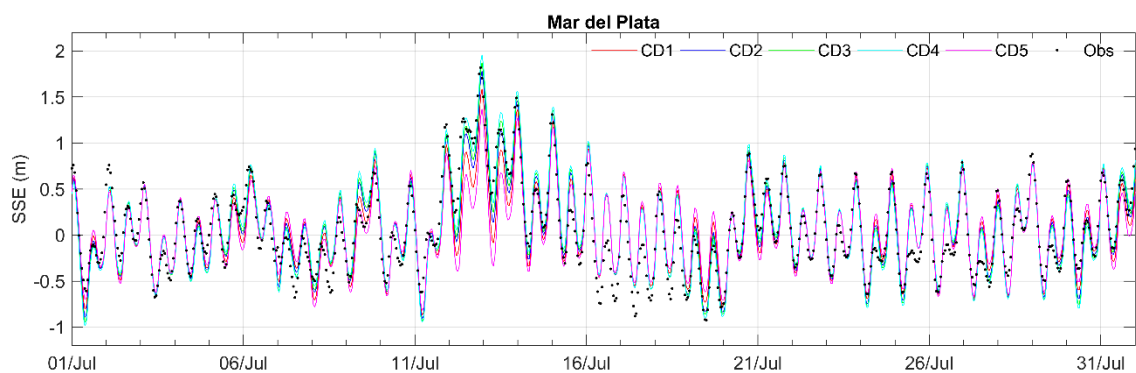


Figura 3.21. Serie temporal de niveles observados y simulados en la estación Mar del Plata durante el mes de Julio de 2010 para las simulaciones con distinto coeficiente de arrastre de viento (Tabla 3.2).

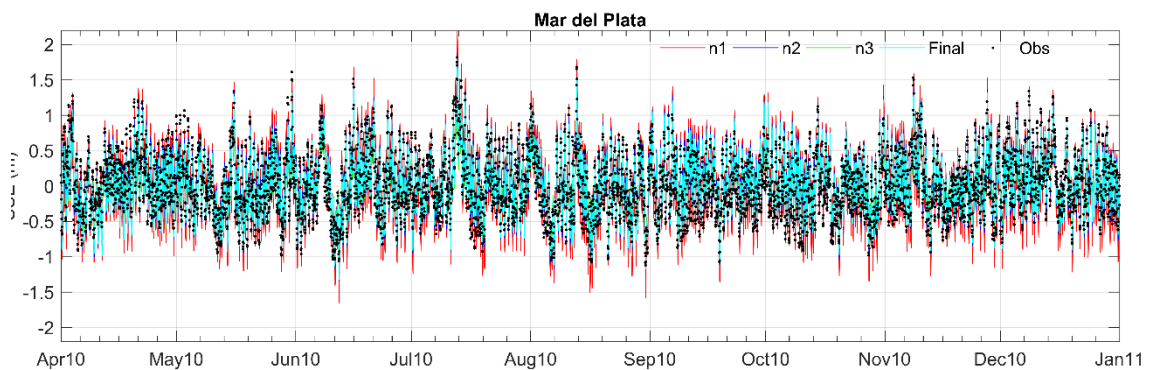


Figura 3.22. Serie temporal de niveles observados y simulados en la estación Mar del Plata durante el año 2010 para las simulaciones con distinto coeficiente de fricción de fondo (Tabla 3.2).

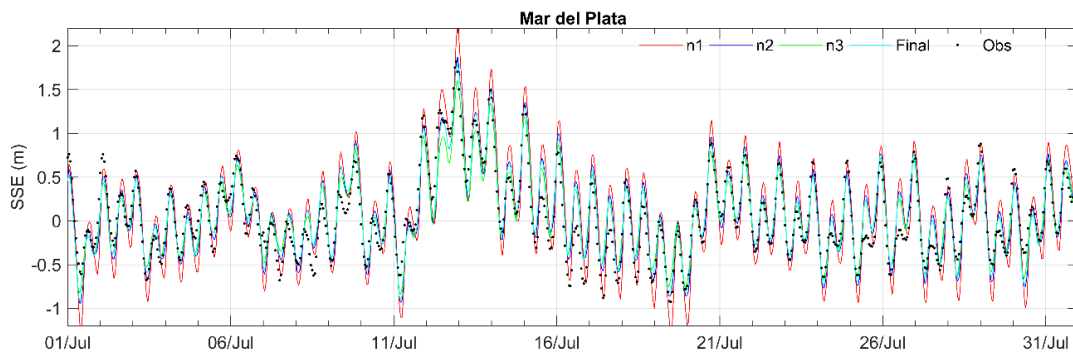
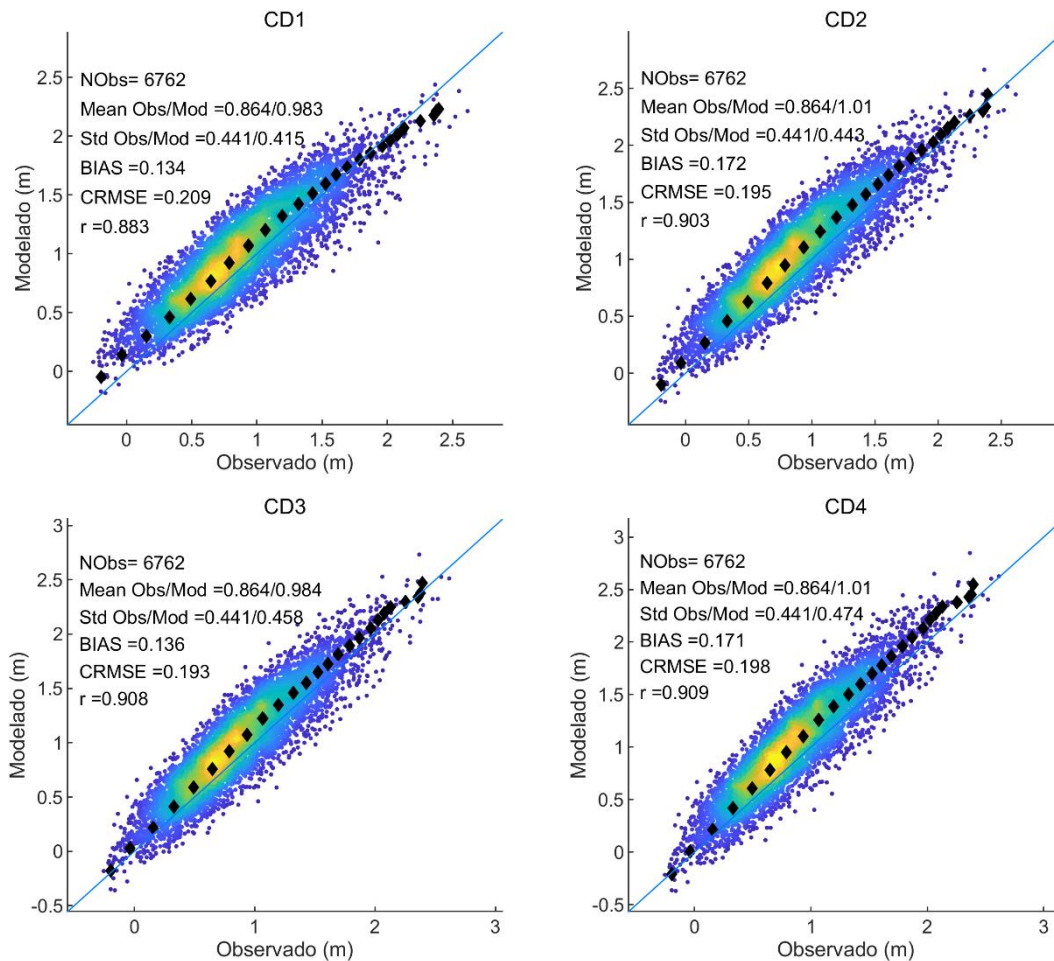


Figura 3.23. Serie temporal de niveles observados y simulados en la estación Mar del Plata durante el mes de Julio de 2010 para las simulaciones con distinto coeficiente de fricción de fondo (Tabla 3.2)



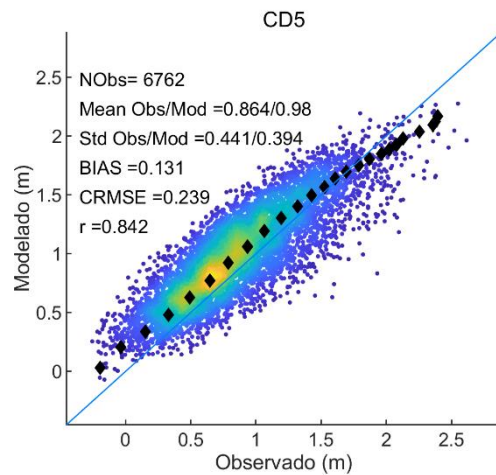


Figura 3.24. Gráficos de dispersión de niveles observados y simulados en la estación de Mar del Plata durante el año 2010 para distintos valores de coeficiente de arrastre de viento (Tabla 3.2)

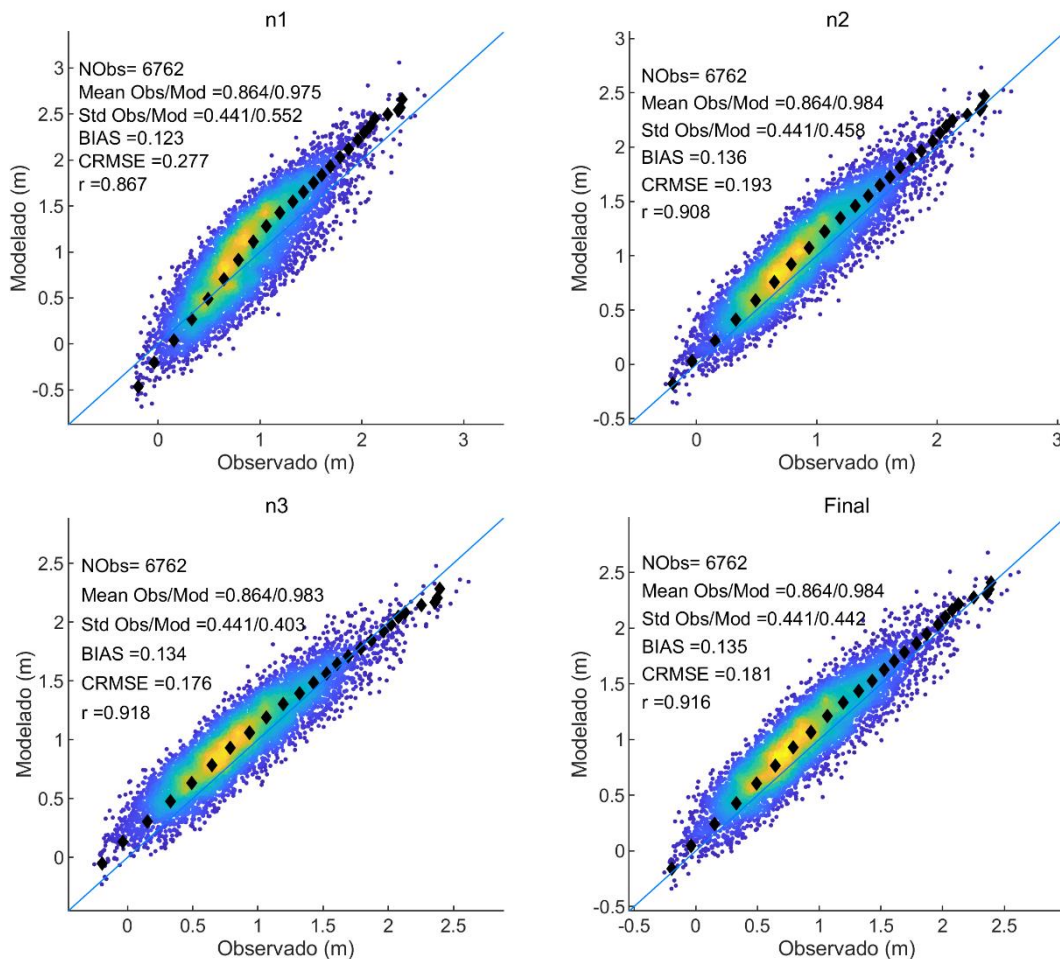


Figura 3.25. Gráficos de dispersión de niveles observados y simulados en la estación de Mar del Plata durante el año 2010 para distintos valores de coeficiente de fricción de fondo (Tabla 3.2)

En la Tabla 3.4 se presentan los estadísticos que surgen de comparar las series de marea real en la estación de Mar del Plata para todas las simulaciones. La configuración final escogida presenta un BIAS de 14 cm, un error de 18 cm (10,3% relativo) y una correlación de 0,92. Los resultados obtenidos con esta configuración se consideran satisfactorios y de esta forma se pasa a validar la calidad de los mismos comparando con la información disponibles en otros períodos y con datos de altimetría satelital.

Tabla 3.4. Estadísticos de comparación de marea real en la estación de Mar del Plata para las simulaciones presentadas en la (Tabla 3.2).

		CD1	CD2	CD3	CD4	CD5	n1	n2	n3	Final
Mar del Plata	BIAS (m)	0,13	0,17	0,14	0,17	0,13	0,12	0,14	0,13	0,14
	CRMSE (m)	0,21	0,20	0,19	0,20	0,24	0,28	0,19	0,18	0,18
	Correlación	0,88	0,90	0,91	0,91	0,84	0,87	0,91	0,92	0,92
	NCRMSE (%)	11,8	11,1	10,9	11,2	13,6	15,7	10,9	10,0	10,3

Validación

La validación del modelo se realizó comparando todos los datos de nivel medidos disponibles en Mar del Plata; se trata de aproximadamente 10 años completos de datos. A modo de ejemplo la Figura 3.26, la Figura 3.27 y la Figura 3.28 muestran las series temporales de niveles observados y simulados durante el año 2016. Se puede ver que el modelo es capaz de representar adecuadamente tanto la marea astronómica como los eventos de marea meteorológica. La Figura 3.29 muestra el gráfico de dispersión correspondiente a todos los datos, se tiene un BIAS de 4 cm y se observa una muy buena representación en términos de cuantiles totales. El error medio cuadrático centrado es de 19,3 cm (11% en términos relativos), mientras que la correlación es aproximadamente 0,90. Los estadísticos muestran que los resultados son satisfactorios, especialmente en esta zona donde hay una gran influencia de la marea meteorológica.

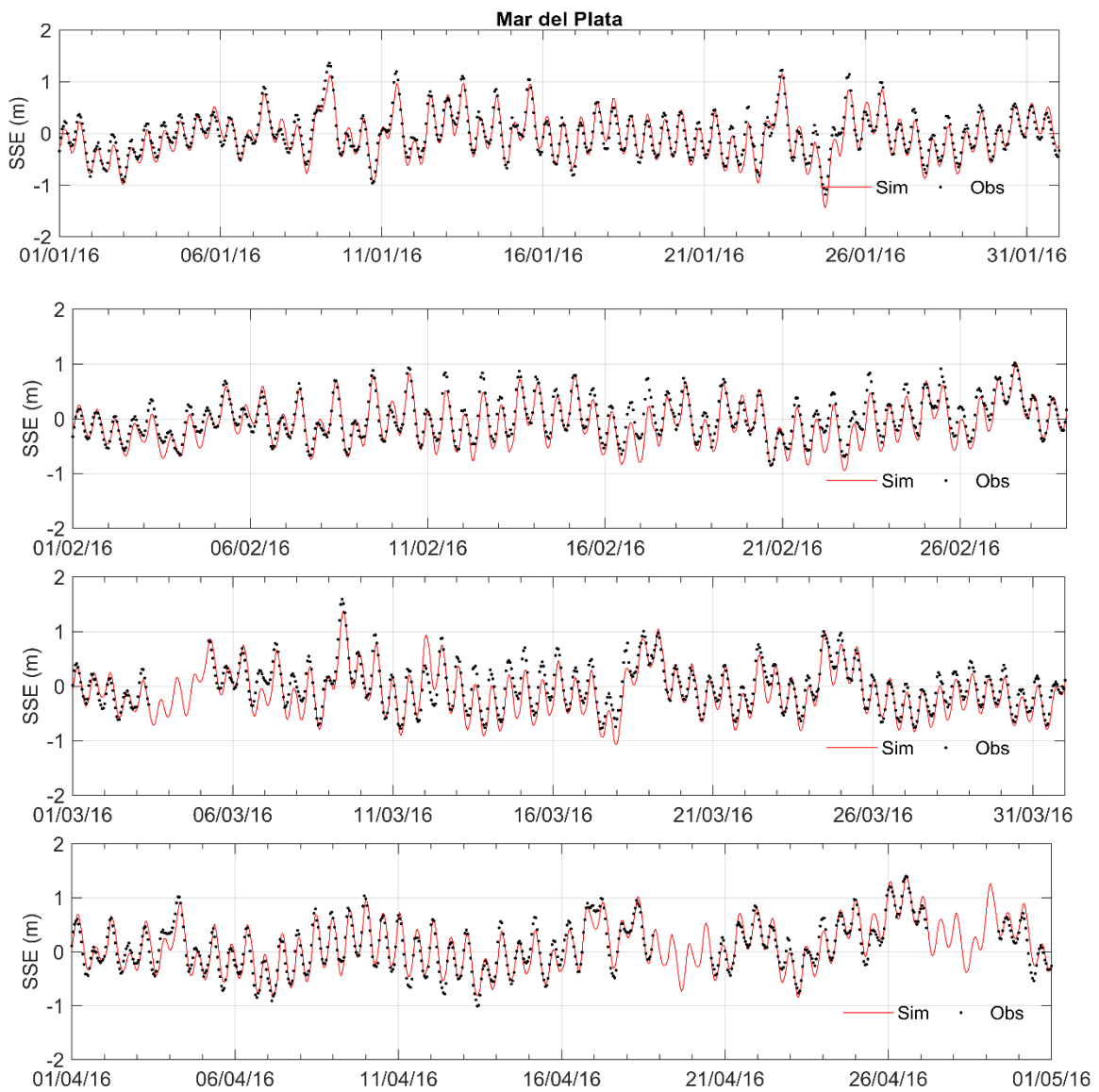


Figura 3.26. Series temporales de niveles observados y simulados en la estación Mar del Plata para el período enero – abril 2016.

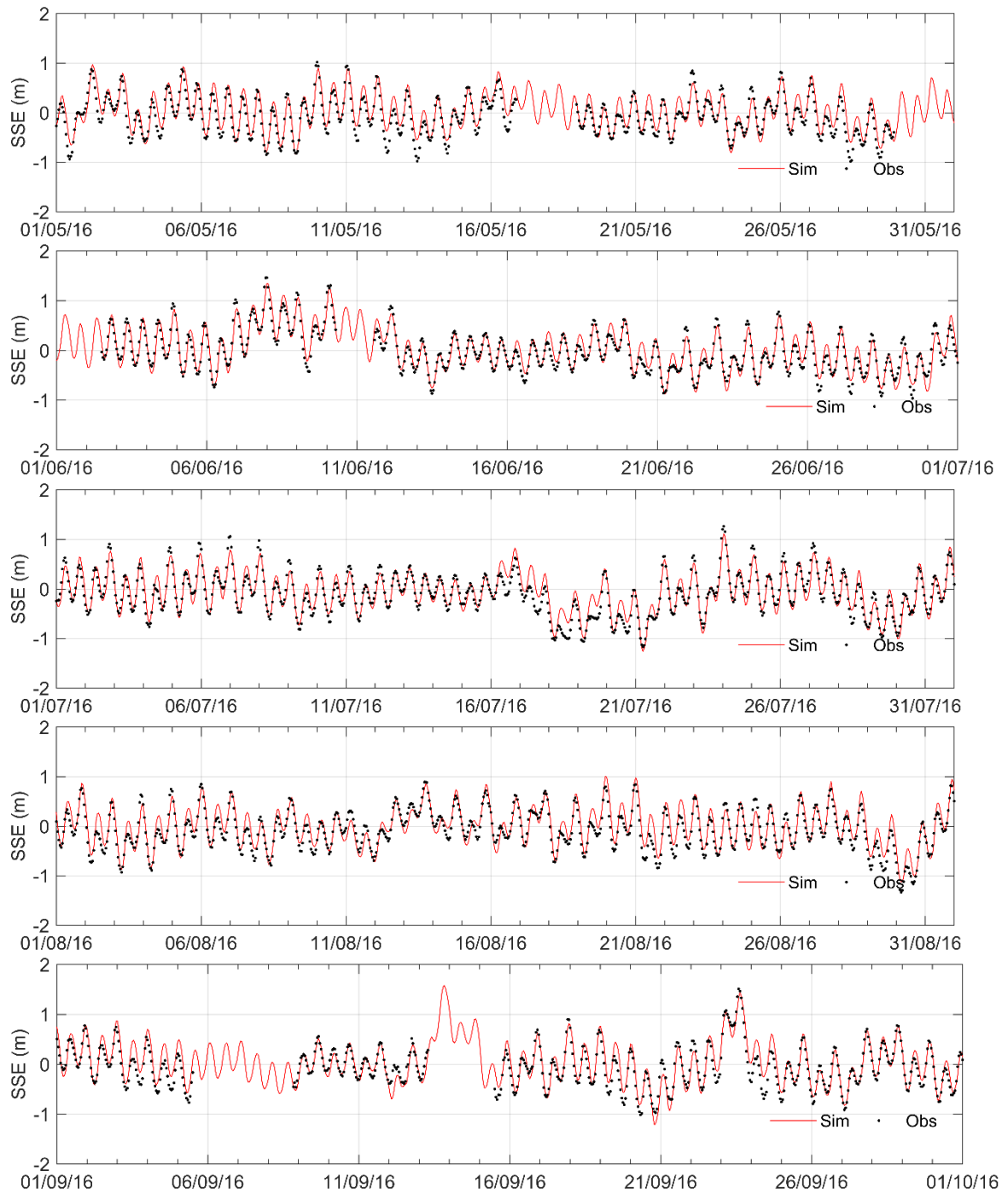


Figura 3.27. Series temporales de niveles observados y simulados en la estación Mar del Plata para el período mayo – septiembre 2016.

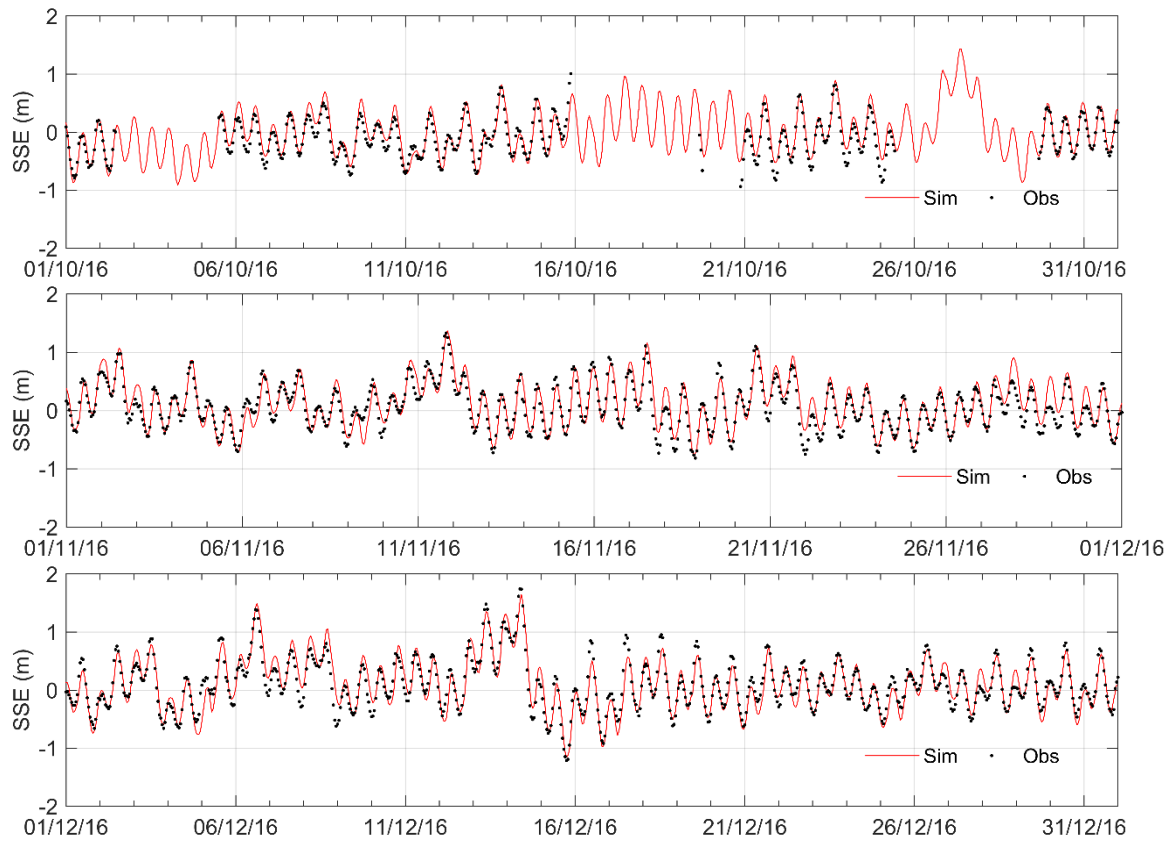


Figura 3.28. Series temporales de niveles observados y simulados en la estación Mar del Plata para el período octubre – diciembre 2016.

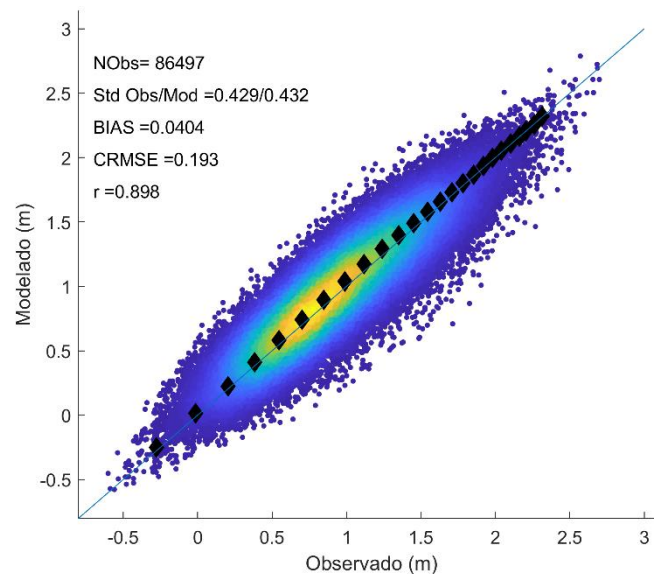


Figura 3.29. Gráfico de dispersión para los niveles observados y simulados en la estación de Mar del Plata utilizando todos los datos disponibles (Tabla 3.1)

En la Figura 3.30 se presentan los estadísticos de comparación entre los datos de altimetría satelital y los resultados del modelo en todo el dominio. El mapa de BIAS muestra valores en el

entorno de 5 a 10 cm en la zona costera de interés, incrementándose hacia la frontera oceánica. La correlación muestra valores cercanos a 0,9 en la zona norte del tramo de costa de interés, disminuyendo hacia el sur, alcanzando valores cercanos a 0,5 en Bahía Blanca. Esto es esperable considerando la discusión de los resultados en términos de marea astronómica presentados en la sección anterior, a pesar de esto en el tramo de costa de interés se tiene valores de correlación muy satisfactorios. De similar forma el error medio cuadrático centrado y su valor normalizado muestran un incremento hacia el sur, siendo los valores de error en términos relativos en general cercanos al 10%. Se destaca que los estadísticos obtenidos en la zona cercana a la estación de Mar del Plata son consistentes con los obtenidos a partir de la comparación con la serie media por mareógrafos. Este análisis permite entonces tener una idea de la calidad de los resultados en todo el tramo de costa de interés, mostrando que la misma es satisfactoria y similar a la obtenida en la estación en la cual se cuenta con datos de marea real (Mar del Plata).

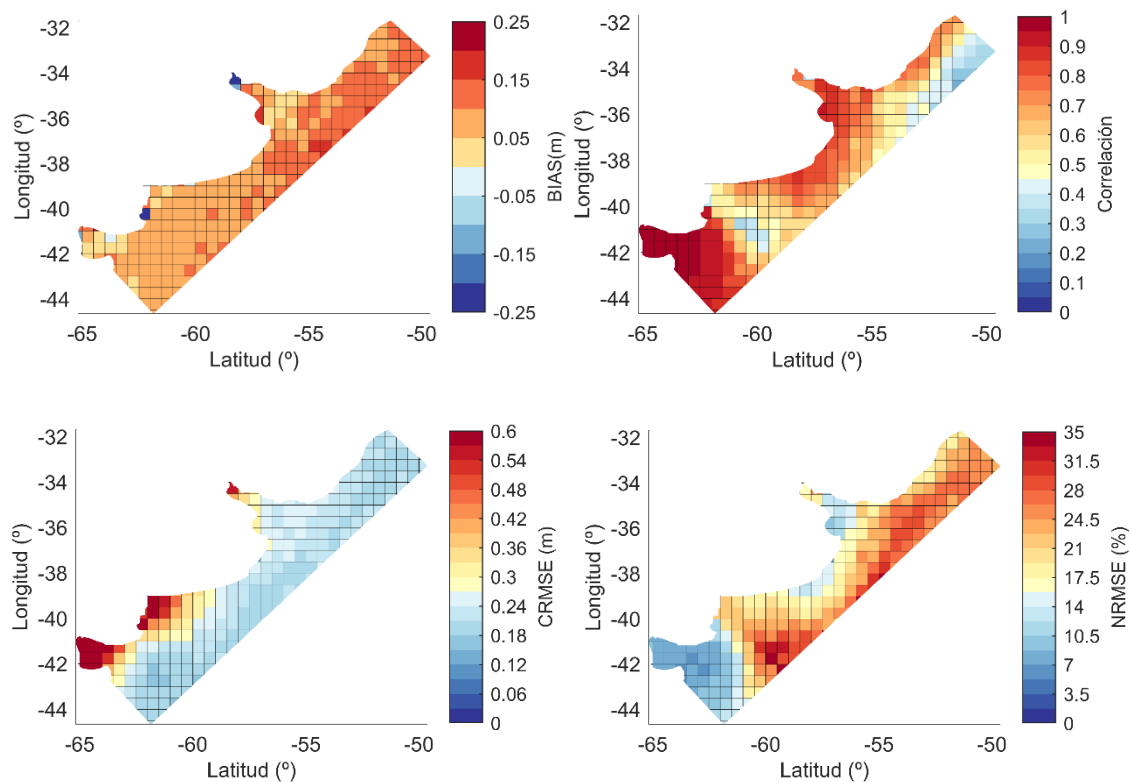


Figura 3.30. Mapas de estadísticos de comparación entre los datos de altimetría satelital disponibles y sus correspondientes valores simulados.

En la Figura 3.31 se presentan los gráficos de dispersión de los datos de altimetría satelital comparados con los simulados en todo el dominio de cálculo y en una zona acotada al tramo de costa de interés (Figura 3.32). La comparación cuantil-cuantil muestra una leve sobreestimación del modelo sobre todo en términos de valores mínimos. Los estadísticos muestran un BIAS cercano a 9 cm, un error medio cuadrático de 26 cm (17% relativo) y una correlación de 0,76. Los resultados utilizando todos los datos en el dominio simulado muestran un rango de variación de los niveles mucho mayor, los cuales tienen lugar en la zona sur del dominio, y muestran una

buena representación por parte del modelo tanto en términos de la comparación cuantil-cuantil como en los valores de loa estadísticos.

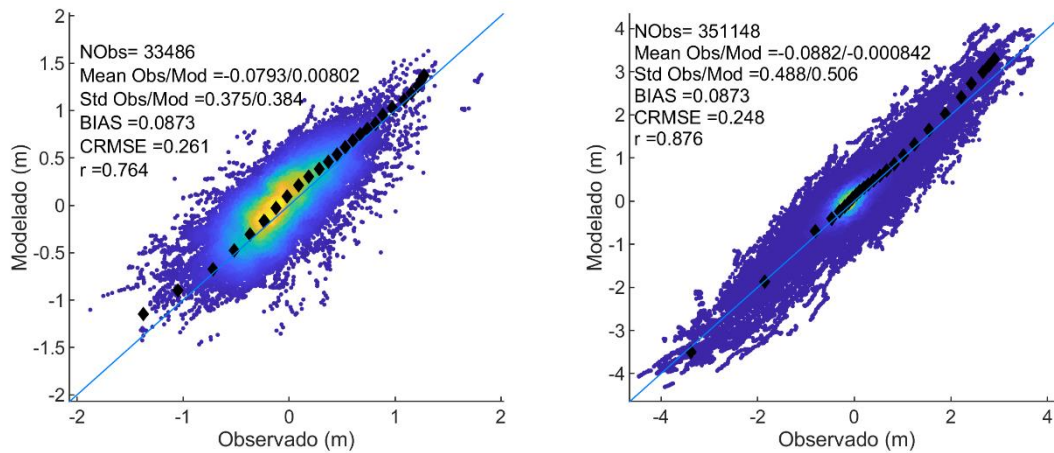


Figura 3.31. Gráficos de dispersión y cuantil-cuantil de los datos de altimetría satelital y simulados en una zona acotada al tramo de costa de interés (izq.) y en todo el dominio simulado (der.).

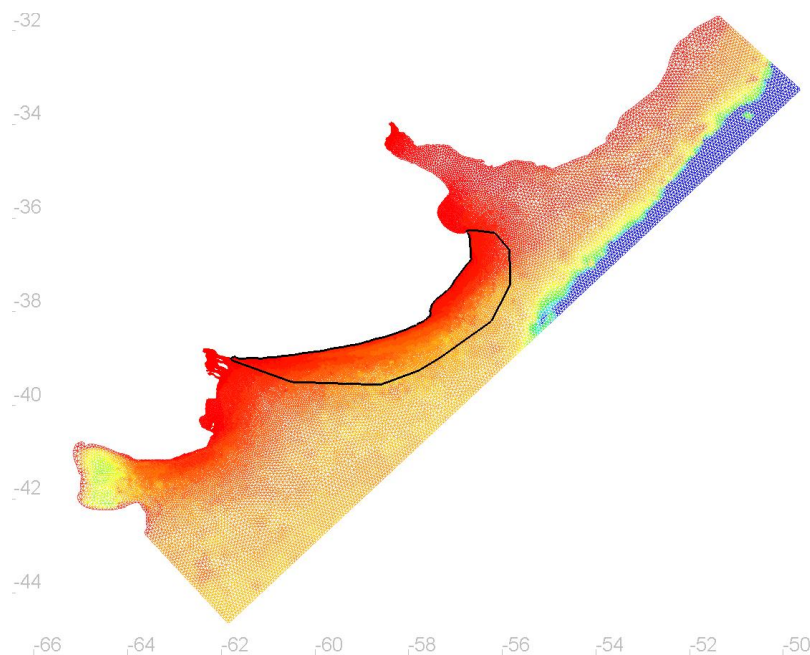


Figura 3.32. Polígono considerado para elegir los datos de altimetría satelital cercanos a la zona de interés.

3.4 Base de datos generada

En base a la implementación del modelo hidrodinámico local para la costa marítima de la Provincia de Buenos aquí presentada, se simuló un período de 31 años (1985 - 2016). Se extrajeron series de niveles y corrientes integradas en vertical con frecuencia horaria en estaciones correspondientes a localidades de interés como San Clemente, Mar del Plata,

Quequén, Monte Hermoso, San Blas; y además en 55 estaciones virtuales ubicadas a 13 Km de la costa equiespaciadas 10 Km entre sí y 12 estaciones virtuales ubicadas a 35 Km de la costa equiespaciadas 50 Km entre sí. En la Figura 3.33 se muestra la ubicación de estos puntos y en la Tabla 3.5 sus detalles. Sobre estas mismas estaciones se reportan los datos del *hindcast* de oleaje.

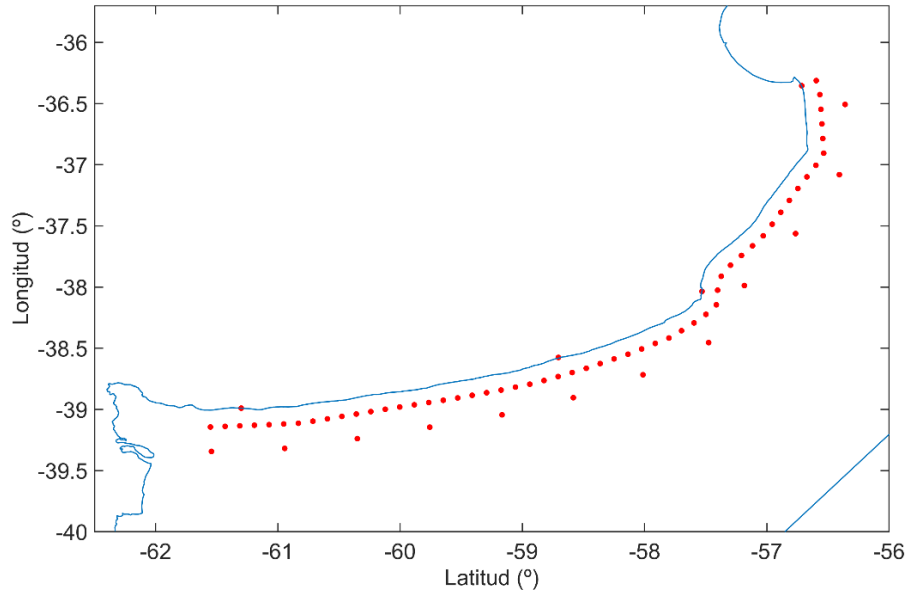


Figura 3.33. Ubicación de las estaciones donde se extrajeron las series del hindcast de niveles.

Tabla 3.5. Coordenadas de las estaciones donde se extrajeron las series del hindcast de niveles.

Nombre	Longitud (°)	Latitud (°)	Nombre	Longitud (°)	Latitud (°)	Nombre	Longitud (°)	Latitud (°)
BA1	298,448	-39,144	BA26	301,407	-38,699	BA51	303,457	-36,786
BA2	298,568	-39,139	BA27	301,522	-38,664	BA52	303,450	-36,666
BA3	298,688	-39,134	BA28	301,636	-38,625	BA53	303,442	-36,547
BA4	298,808	-39,129	BA29	301,750	-38,587	BA54	303,433	-36,427
BA5	298,928	-39,125	BA30	301,863	-38,549	BA55	303,404	-36,313
BA6	299,048	-39,119	BA31	301,975	-38,506	BA81	298,456	-39,343
BA7	299,167	-39,113	BA32	302,087	-38,461	BA82	299,056	-39,319
BA8	299,286	-39,096	BA33	302,198	-38,416	BA83	299,649	-39,239
BA9	299,405	-39,077	BA34	302,302	-38,357	BA84	300,242	-39,145
BA10	299,523	-39,057	BA35	302,404	-38,293	BA85	300,833	-39,044
BA11	299,641	-39,038	BA36	302,501	-38,223	BA86	301,416	-38,904
BA12	299,760	-39,018	BA37	302,586	-38,145	BA87	301,986	-38,717
BA13	299,878	-38,999	BA38	302,596	-38,025	BA88	302,523	-38,454
BA14	299,997	-38,980	BA39	302,626	-37,912	BA89	302,815	-37,988
BA15	300,115	-38,962	BA40	302,702	-37,821	BA90	303,235	-37,563
BA16	300,234	-38,944	BA41	302,792	-37,742	BA91	303,593	-37,081
BA17	300,353	-38,925	BA42	302,882	-37,663	BA92	303,639	-36,507
BA18	300,471	-38,906	BA43	302,970	-37,581	San Clemente	303,285	-36,355
BA19	300,589	-38,885	BA44	303,043	-37,486	Mar del Plata	302,469	-38,036
BA20	300,707	-38,863	BA45	303,113	-37,389	Quequén	301,294	-38,575
BA21	300,825	-38,842	BA46	303,183	-37,292	Monte Hermoso	298,700	-38,990
BA22	300,943	-38,818	BA47	303,254	-37,194	San Blas	297,769	-40,553
BA23	301,060	-38,794	BA48	303,327	-37,100			
BA24	301,176	-38,764	BA49	303,401	-37,005			
BA25	301,292	-38,731	BA50	303,465	-36,906			

4 ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE OLAJE

4.1 Introducción

El análisis retrospectivo (*hindcast*) de oleaje cubre un período de 40 años comprendido entre el 1 de febrero de 1979 y el 31 de diciembre de 2018. Los productos generados tienen una resolución temporal horaria y consisten en campos de los principales parámetros descriptores del oleaje y series temporales de espectros direccionales distribuidos en 72 puntos (boyas virtuales) a lo largo de toda el área de estudio.

Los productos resultantes se almacenaron y están a disposición en archivos que permiten, mediante el anidamiento de una grilla costera de mayor resolución, continuar aumentando la resolución del *hindcast* hacia la costa.

Los datos de entrada del modelo de oleaje son los campos de viento en superficie obtenidos del reanálisis atmosférico CFSR (Saha et al., 2010) y su prolongación CFSv2 (Saha et al., 2014) en su formato de mayor resolución. La validación de los datos de viento mencionados a los efectos de su uso en el *hindcast* de oleaje, así como el *hindcast* de niveles y corrientes se reportaron en un informe previo del presente proyecto.

Para la validación del *hindcast* se recurrió a datos altimétricos de altura de ola significativa (Hs). Estos datos fueron obtenidos de la base de datos multi-misión IMOS (Ribal y Young, 2019) que fuera utilizada para validar los vientos en superficie.

4.2 Modelo de oleaje

4.2.1 Software

El modelo numérico de oleaje utilizado se implementó en la plataforma de modelación de oleaje WAVEWATCH III® versión 5.16 (WW3DG, 2016), en la modalidad multi-grilla. El modelo WaveWatch III es un modelo de tercera generación desarrollado por el OMB (*Ocean Modeling Branch*) perteneciente al NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*).

En la Figura 4.1 se presenta el archivo *switch* utilizado para compilar el WAVEWATCH III. El significado de cada opción se encuentra en el manual del software (WW3DG, 2016). En particular se hace notar la elección de la opción ST4. Esta opción establece como modelar la parte del término fuente de la ecuación de acción del oleaje correspondiente al aporte de energía del viento y la disipación por rotura (i.e. whitecapping). Las referencias bibliográficas a esta parametrización son: Ardhuin et al., 2009, 2010; Leckler et al., 2013; Rascle y Ardhuin, 2013. Junto con la parametrización que se activa con la opción ST6 (Babanin, 2006, 2011; Rogers et

al., 2012; Zieger et al., 2015) constituyen el estado del arte en cuanto a la modelación de estos procesos.

La elección de ST4 se basa en los resultados de Stopa et al. (2016), Campos y Alves (2013) y Alonso et al. (2018). El primero muestra una comparación entre cuatro *hindcast* globales que se diferencian por la parametrización que utilizan (i.e. ST2, ST3, ST4 y ST6). Se observa que, para la región occidental del Atlántico Sur, ST4 es la que presenta la mejor performance (ver figuras 3 y 4 de Stopa et al., 2016). Por su parte, Campos y Alves (2013) y Alonso et al. (2018) constituyen antecedentes de modelación de oleajes en el Atlántico Sur donde ST4 mostró una buena performance.

```
F90 NOGRB NOPA LRB4 SHRD PR3 UQ FLX0 LN1 ST4 STAB3 NL1 BT1 DB1 MLIM TR0 BS0 IC0
REF1 XX0 WNT1 WNX1 CRT1 CRX1 IS0 00 01 02 03 04 05 06 07 011 014 016 OMPG OMPX
```

Figura 4.1. Archivo *switch* con el que se compiló el WAVEWATCH III.

4.2.2 Grillas de cálculo

El modelo se implementó en la modalidad multi-grilla. Se utilizaron tres grillas, partiendo de una grilla global de baja resolución espacial ($O(1^\circ)$), pasando por una grilla que cubre el Atlántico Sur con la misma resolución espacial que los campos de viento utilizados como forzante (i.e. $\sim 20'$) y alcanzando a cubrir el dominio $[65W,50W] \times [45S,30S]$ con una resolución de $5'$, lo que equivale a 8 km aproximadamente en las latitudes de la zona de estudio.

La grilla de menor resolución (*Grilla 1*) es de cobertura global a los efectos de prescindir de condiciones de borde. De esta forma todo el oleaje es generado dentro del modelo. La que le sigue (*Grilla 2*) abarca el Atlántico Sur con una resolución que se asimila a los campos de viento utilizados como forzante. Finalmente, la *Grilla 3* abarca la zona de estudio con una resolución de $5'$ ($\sim 8\text{km}$). En la Tabla 4.1 se presentan los detalles de las grillas y en la Figura 4.2 se delimitan las regiones que abarcan.

Tabla 4.1. Grillas de cálculo. Dominio y resolución espacial.

Grilla	Rango de Longitudes	Rango de Latitudes	Δlon	Δlat	Nlon	Nlat	# Puntos	# Puntos activos
Global (1)	-180° / 180°	-78.00° / 78.00°	1.250°	1.000°	288	157	45216	28869
AtlSur (2)	-70° / 20°	-77.89° / 10.14°	0.310°	0.310°	289	283	81787	59668
RegionBA (3)	-65° / - 50°	-45.0° / -33.0°	0.083°	0.083°	181	145	26245	17347

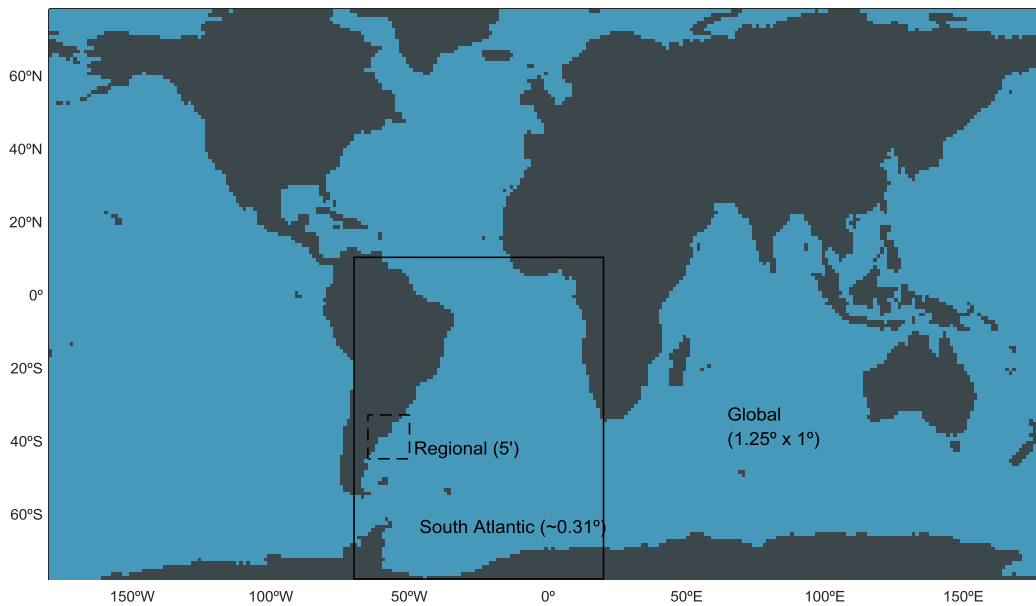


Figura 4.2. Delimitación de los dominios de las grillas de cálculo.

La discretización del dominio espectral en cada una de las grillas de cálculo se presenta en la Tabla 4.2. En las tres grillas se cubre el círculo completo con un incremento uniforme en direcciones de 10°, en las tres se fijó la frecuencia mínima en 0.0412 Hz ($T=24.27$ s) y se definió un factor de incremento geométrico de 1.1 (i.e. $f_{i+1}=1.1f_i$). La diferencia entre las grillas está en la cantidad de frecuencias utilizadas. En la *Grilla 3*, para capturar con mayor detalle el oleaje local, se usaron 30 frecuencias, lo que permite alcanzar una frecuencia máxima de 0.6532 Hz ($T=1.53$ s). Mientras que en las Grillas 1 y 2 se usaron 25 frecuencias, alcanzando una frecuencia máxima de 0.456 Hz ($T=2.46$ s), lo cual es un límite usualmente utilizado en la modelación del oleaje a escala de cuenca oceánica.

Tabla 4.2. Discretización del dominio espectral.

<i>Grilla</i>	<i>Número de direcciones</i>	<i>Incremento en direcciones</i>	<i>Número de frecuencias</i>	<i>Frecuencia a mínima</i>	<i>Factor de incremento geométrico</i>	<i>Frecuencia a máxima</i>
Global (1)	36	10°	25	0.0412 Hz	1.1	0.4056 Hz
AtlSur (2)	36	10°	25	0.0412 Hz	1.1	0.4056 Hz
RegionBA (3)	36	10°	30	0.0412 Hz	1.1	0.6532 Hz

El modelo avanza en el tiempo en base a una estrategia que se la conoce como “método del paso de tiempo fraccionado”. Esto significa que se divide la ecuación gobernante¹⁰ y cada parte se resuelve con un paso de tiempo acorde a la misma. WAVEWATCH III requiere de la definición de cuatro pasos de tiempo para cada grilla de cálculo. Estos son: paso de tiempo global (Δt_g), paso de tiempo asociado a la propagación espacial (Δt_{x-y}), paso de tiempo asociado a la

¹⁰ Ecuación de balance de la densidad acción del oleaje en el caso de este tipo de modelos de oleaje.

propagación intra-espectral ($\Delta t_{k-\theta}$) y un paso de tiempo para la integración del término fuente (Δt_s). En la Tabla 4.3 se presentan los pasos de tiempo utilizados en cada una de las grillas de cálculo.

Tabla 4.3. Discretización temporal.

Grilla	Δt_g (s)	Δt_{x-y} (s)	$\Delta t_{k-\theta}$ (s)	Δt_s (s)
Global (1)	3600	1800	1800	30
AtlSur (2)	1800	600	900	30
Region_BA (3)	900	300	450	20

3.2.3 Batimetría y línea de costa

Para cada una de las grillas, la batimetría, la definición de cada tipo de nodo en un *mask file* y los obstáculos sub-grilla, se definieron recurriendo al paquete *Automated grid generation for WAVEWATCH III* (Chawla y Tolman, 2007) desarrollado para MATLAB®.

La información de base fue obtenida de bases de datos globales de batimetría y línea de costa, y de una base de datos local generada a partir de las cartas náuticas disponibles. La base de datos global de batimetría utilizada es la ETOPO1 (Amante y Eatkins, 2009), mientras que la de línea de costa es la GSHHS (Wessel y Smith, 1996). La base de datos local se generó georreferenciando, digitalizando y llevando a un mismo cero de referencia las cartas náuticas disponibles. Esto se realizó en el software QGIS, generándose una línea de costa local de alta resolución y una grilla batimétrica regular de 0.04° de resolución que abarca el dominio $[-65^\circ - 50^\circ] \times [-45^\circ - 33^\circ]$. En la Tabla 4.4 se indica la información de base que se utilizó en cada grilla para definir su batimetría y línea de costa.

Tabla 4.4. Información de base para definir batimetría y línea de costa.

Grilla	Batimetría	Línea de costa
1	ETOPO1	GSHHS <i>high resolution</i>
2	ETOPO1	GSHHS <i>full resolution</i>
3	Cartas náuticas	GSHHS <i>full resolution</i>

3.2.4 Forzantes y condición inicial

Los campos de viento en superficie utilizados son los presentados y validados en el Capítulo 2.: CFSR y su prolongación CFSv2 en su formato de mayor resolución. Debido a que hay un aumento de la resolución espacial entre CFSR (1979-2010) y CFSv2 (2011–Actualidad), y a los efectos de mantener la misma resolución a lo largo de todo el período analizado, los campos de CFSv2 se llevaron mediante interpolación bilineal por componentes a la resolución de CFSR.

En las tres grillas de cálculo se usaron los mismos campos de vientos, los cuales están definidos en una grilla global regular de $0.3125^\circ \times 0.3122^\circ$. Debido a que los datos originales están en una grilla Gaussiana que, si bien presenta una resolución similar, fue necesario interpolar bilinealmente por componentes para el pasaje a la grilla regular utilizada, la cual quedó definida por el origen de coordenadas ($-180^\circ, -89.7575^\circ$) y la resolución mencionada anteriormente. A modo de referencia, en la Figura 4.3 se presentan los nodos de la grilla del campo de viento en lo que respecta a la zona en estudio.

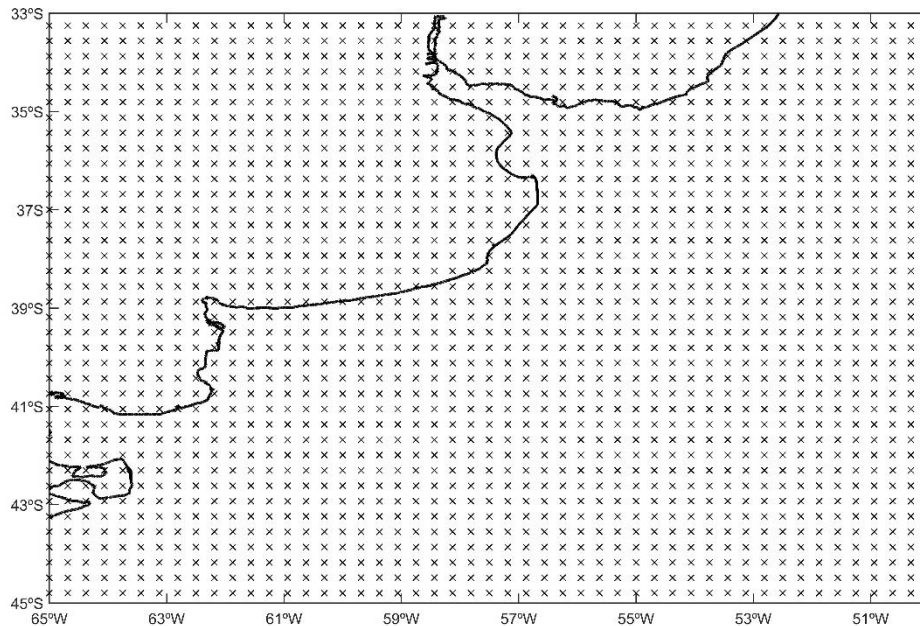


Figura 4.3. Nodos de la grilla en donde se definen los campos de viento utilizados como forzante. La grilla de vientos es global. Se muestra un recorte en la zona de estudio.

En cuanto a la condición inicial, en todas las simulaciones se partió del reposo y se descartaron los resultados correspondientes al primer mes. Típicamente las simulaciones fueron anuales, arrancando el 1 de diciembre del año anterior y guardando los resultados a partir del 1 de enero. La excepción fue el año 1979. Al no tener datos de viento de diciembre de 1978, la simulación se inició el 1 de enero de 1979 y se descarta el primer mes, quedando como inicio del análisis retrospectivo (*hindcast*) el 1 de febrero de 1979.

4.3 Validación

En base a los resultados de trabajos antecedentes de modelación de oleaje en el Atlántico Sur utilizando la parametrización ST4 (Campos y Alves, 2013, y Alonso et al. 2018), en el modelo WAVEWATCH III® se modificó el valor del parámetro BETAMAX a 1.55 para la grilla regional (*Grilla 3*). En las grillas 1 y 2 se mantuvo su valor por defecto, i.e. BETAMAX=1.43. BETAMAX es un parámetro adimensional que multiplica el término fuente asociado al aporte de energía por parte del viento. Para un determinado viento, un incremento en BETAMAX repercute en un aumento de la energía del oleaje generado por dicho viento.

Con BETAMAX=1.55 en la grilla regional se realizó una primera simulación de un año de duración. Específicamente se simuló el año 2000. Los resultados obtenidos se contrastaron con las mediciones altimétricas de altura significativa de ola (Hs). Para emparejar los datos altimétricos con los resultados del modelo, se recurre a una interpolación lineal de estos últimos al instante y punto de la medición. Para caracterizar los errores, se calcularon los siguientes estadísticos: BIAS, RMSE, SI y r.

En donde el subíndice e y o hacen referencia a estimación y a observación respectivamente, mientras que la barra superior refiere al promedio.

Los resultados obtenidos en esta simulación inicial se presentan en la Figura 4.4, donde los estadísticos de error se acompañan con los cocientes entre las medias y desviación estándar de ambas series y se presentan junto a un diagrama de dispersión superpuesto con un gráfico cuantil-cuantil.

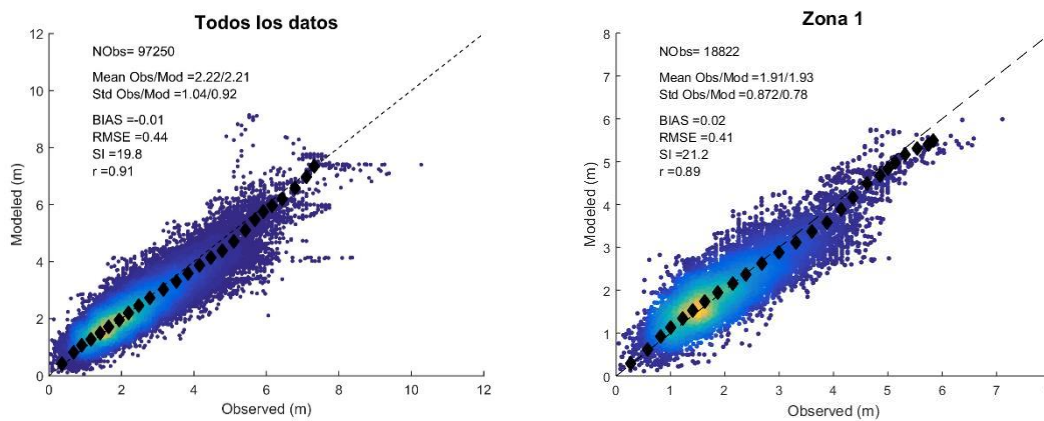


Figura 4.4. Resultados de Hs. Año 2000. Comparación de los resultados del modelo con datos altimétricos IMOS. El gráfico de la izquierda abarca todos los datos comprendidos en el dominio [63W 51W]x [44S 34S], mientras que el gráfico de la derecha se enfoca en un zona más reducida y centrada en el tramo de costa en estudio, i.e. [62W 55W] x [41S 37S].

En base a la buena performance obtenida en esta simulación inicial, se mantuvo la configuración propuesta (i.e. BETAMAX =1.55 en la grilla regional) para la realización del hindcast. Para la comparación entre el *hindcast* y los datos altimétricos, se consideraron las mismas regiones que en la validación del viento CFSR (Figura 4.5).

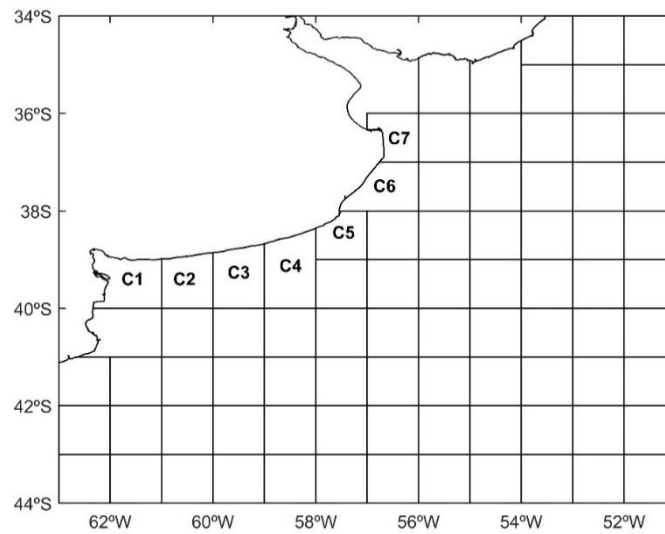


Figura 4.5. División del dominio para la comparación con los datos altimétricos.

En la Figura 4.6 se presentan los mapas de los distintos estadísticos de error, mientras que en las figuras Figura 4.7 a Figura 4.10 se presentan los resultados obtenidos en las regiones costeras mediante diagramas de dispersión superpuestos con gráficos cuantil-cuantil. Finalmente, en la Figura 4.11, se compara la performance del *hindcast* entre las distintas regiones costeras a partir de un diagrama de Taylor normalizado (Taylor, 2001).

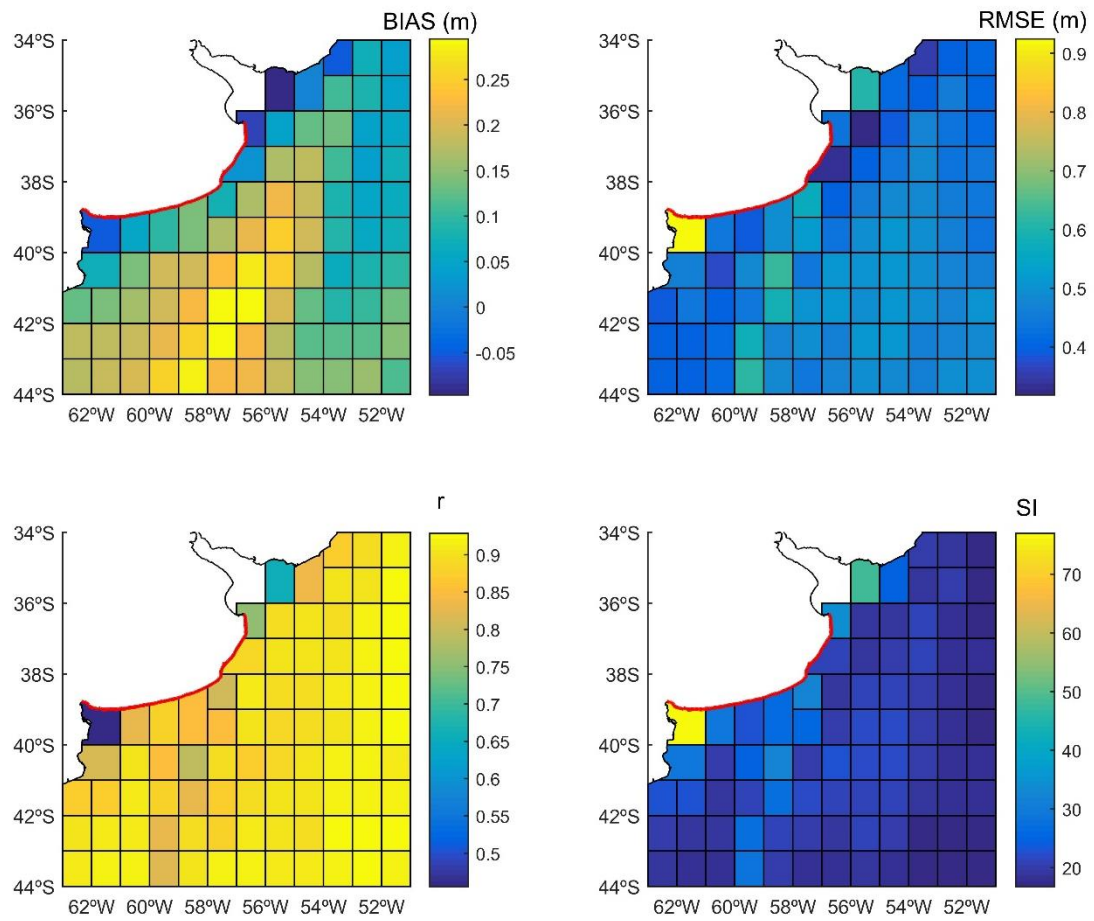


Figura 4.6. Hindcast vs Altimetría. Distribución espacial de los estadísticos BIAS, RMSE, r y SI.

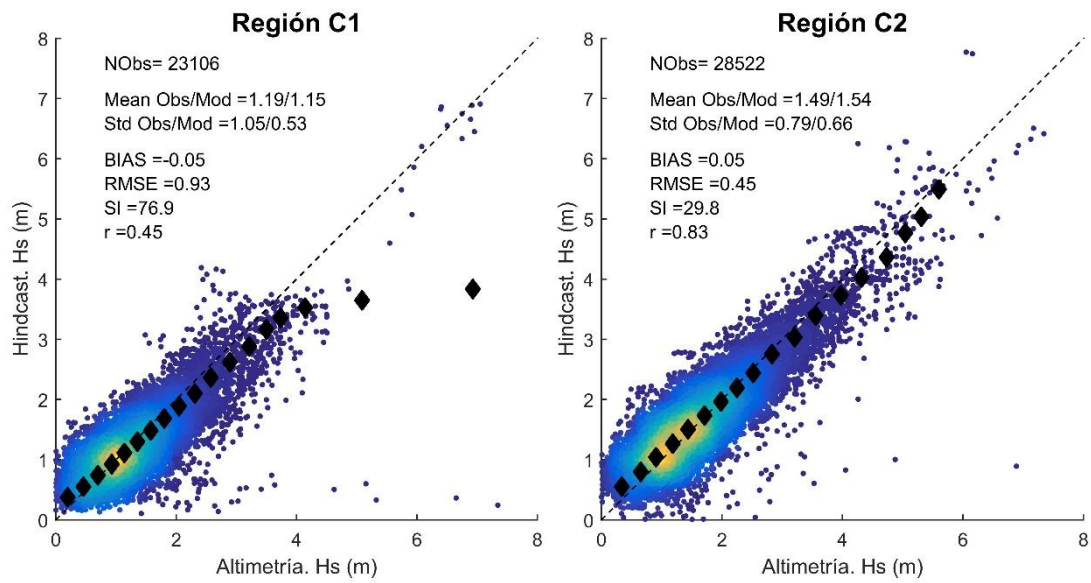


Figura 4.7. Hindcast vs Altimetría. Diagrama de dispersión y gráfico cuantil-cuantil para las regiones C1 y C2.

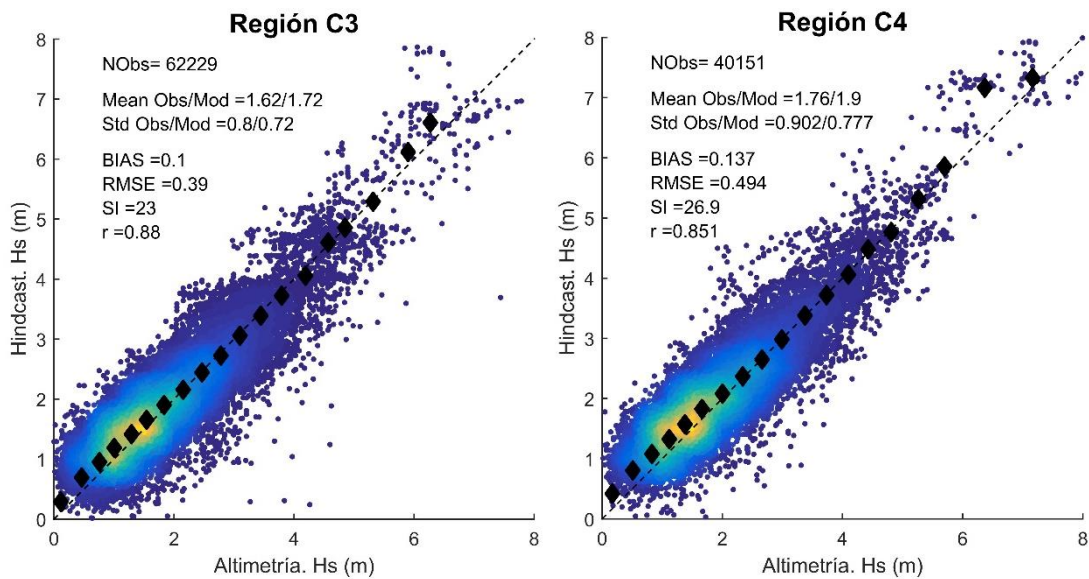


Figura 4.8. Hindcast vs Altimetría. Diagrama de dispersión y gráfico cuantil-cuantil para las regiones C3 y C4.

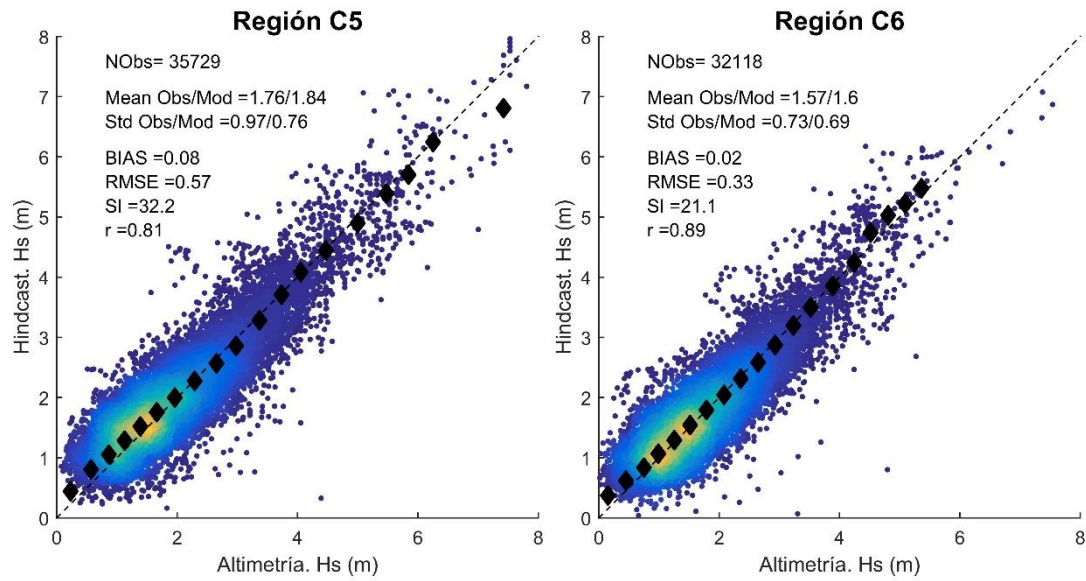


Figura 4.9. Hindcast vs Altimetría. Diagrama de dispersión y gráfico cuantil-cuantil para las regiones C5 y C6.

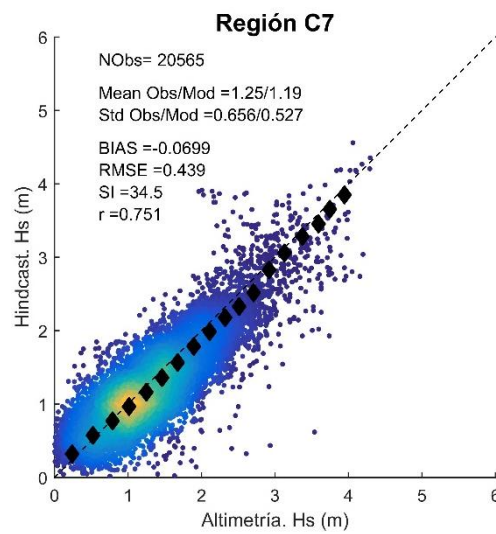


Figura 4.10. D Hindcast vs Altimetría. Diagrama de dispersión y gráfico cuantil-cuantil para la región C7.

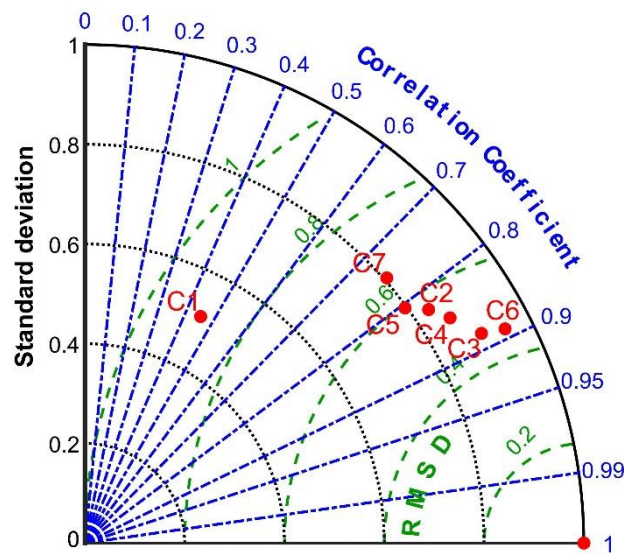


Figura 4.11. Comparación de la performance del hindcast para las distintas regiones costeras a partir de un diagrama de Taylor normalizado (i.e. Tanto la desviación estándar como RMSD están normalizados por la desviación estándar de la serie de observaciones concomitante).

Se observa una buena performance del *hindcast* en todo el dominio, lo cual incluye las regiones costeras. En las mismas, se aprecia un muy buen nivel de acuerdo en las regiones C2 a C6 con BIAS ~ 0.1 m, RMSE ~ 0.5 m, $r \sim 0.85$ y $SI \sim 25$. La performance presenta una menor calidad en los extremos norte (C7) y sur (C1) de la zona costera analizada, pero el nivel de acuerdo sigue siendo aceptable. Se destaca también, que en todas estas regiones el buen nivel de acuerdo abarca a los valores más altos.

4.4 Base de datos generada

Con la configuración de la modelación descrita, se simuló el período 1979-2018 generándose información de tres tipos: campos, series temporales en puntos establecidos e información para anidar una grilla costera de mayor resolución.

En cuanto a los campos, se proporcionan los campos de distintos parámetros que describen al oleaje. Estos campos están definidos en la *Grilla 3* (RegionBA) y tienen un paso temporal de una hora. Los datos están en archivos NetCDF (*Network Common Data Form*) que contienen un mes de datos. La nomenclatura del archivo es "Region_BAyyyyymm_VN.nc", en donde yyyyymm es la fecha (e.g. junio del 2000 = 200006) y VN es el nombre de la variable. Las variables que se brindan son: velocidad del viento (*wnd*, input del modelo), altura de ola significativa (*hs*), período medio calculado a partir del momento de orden 1 (*t01*), período medio calculado a partir del momento de orden 2 (*t02*), período medio calculado a partir del momento de orden -1 (*t0m1*), la dirección pico (*dp*), la frecuencia pico (*fp*), la dirección media (*dir*), la dispersión de energía entorno a la dirección media (*spr*) y la fracción de oleaje local considerando a todo el espectro (*tws*). A su vez, se consideró partición espectral, por lo que se proporciona el campo del número de particiones identificadas en cada espectro (*pnr*), así como los de altura de ola significativa (*phsNP*), dirección pico (*pdpNP*), período pico (*ptpNP*) y fracción de oleaje local (*pwsNP*) para las tres particiones principales. En el nombre de la variable de la partición espectral, NP refiere al número de partición. Se consideraron tres particiones, por lo que NP adopta los valores 0, 1 ó 2.

En lo que respecta a los resultados en puntos pre-establecidos se proporcionan tres tipos de archivos: uno con las series temporales de los espectros y otros dos con series temporales de parámetros (i.e. tab1 y tab2). El paso temporal en los tres es de 1 h. En el caso de los espectros se almacenan por mes en archivos con la siguiente nomenclatura “ww3.yyyymm_spec.nc” en donde yyyymm define el mes correspondiente. De forma análoga, los archivos con series de parámetros son “tab1.yyyymm_tab.nc” y “tab2.yyyymm_tab.nc”, en donde tab1 recoge variables de entrada al modelo (e.g. viento) y tab2 los principales parámetros que describen al oleaje.

Al igual que para el hindcast de niveles, en la Figura 4.12 se presenta la localización de los puntos establecidos para las salidas puntuales del modelo. Adicionalmente a los puntos presentados en la Tabla 3.5, en la Figura 4.5 se presentan los detalles de 5 puntos que se definieron en donde hay mediciones: Punta Médanos Norte (PMN), Punta Médanos Sur (PMS), Hidrovía (HV), Torre Bahía Blanca (BB) y Quequén (QQ).

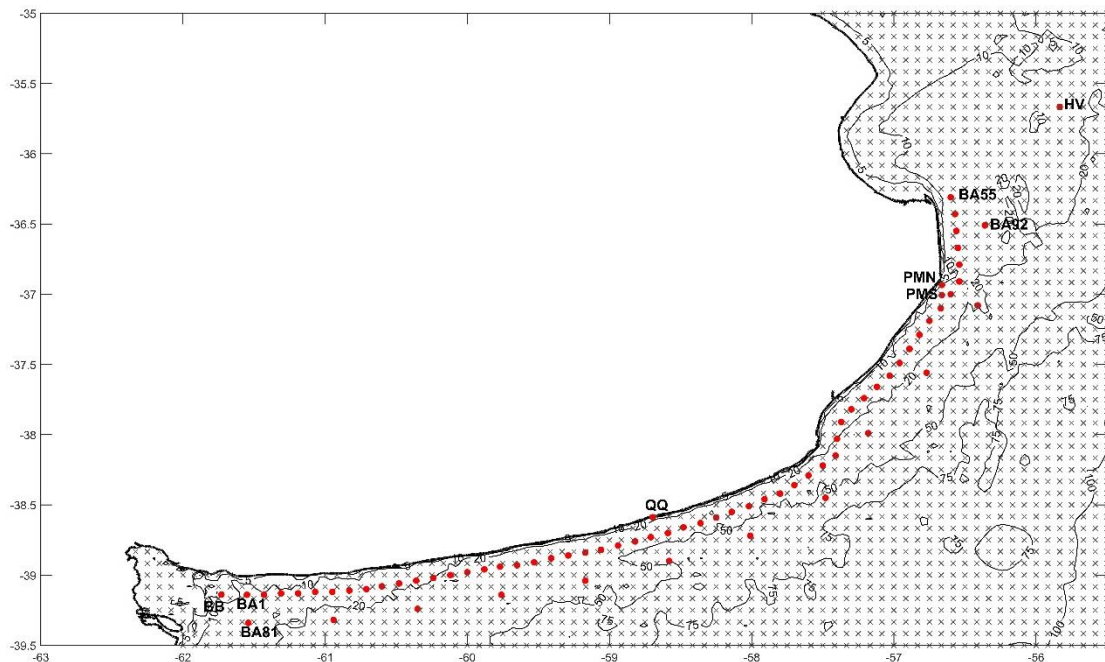


Figura 4.12. Puntos pre-establecidos para las salidas puntuales del modelo.

Tabla 4.5. Coordenadas de los puntos donde existen mediciones.

Nombre	Lon.	Lat.	Prof (m)
PMN	-56.663	-36.934	8.1
PMS	-56.663	-37.006	11.7
QQ	-58.696	-38.589	21.5
BB	-61.730	-39.139	9.1
HV	-55.833	-35.667	15.1

Finalmente, se almacenó la información para proporcionarle las condiciones de borde a la grilla que ocupa el dominio que se presenta en la Figura 4.13. Este anidamiento permitirá aumentar la resolución del hindcast en la zona costera, pasando a una resolución espacial de ~800 m.

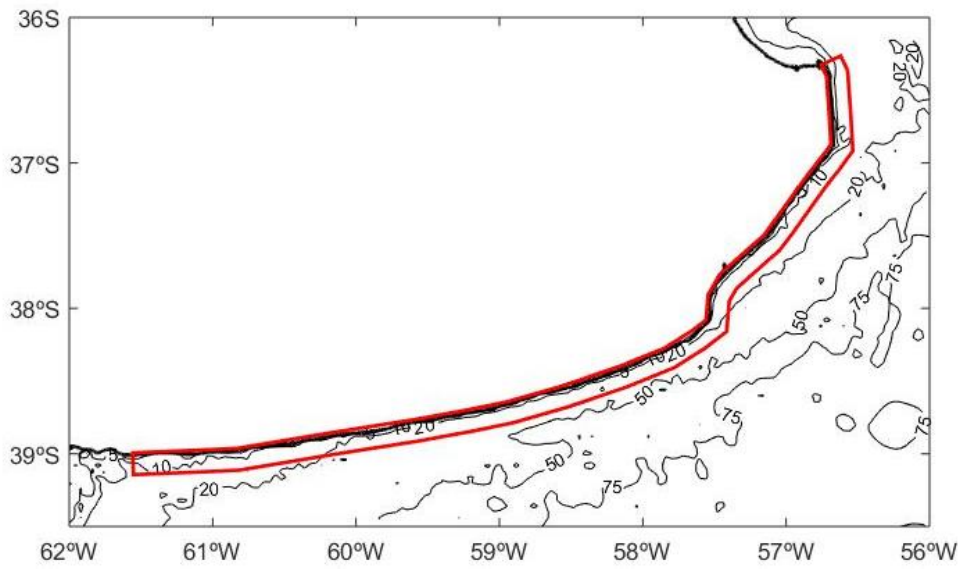


Figura 4.13. Dominio de la grilla costera en donde se cuenta con información para utilizar como condición de borde.

5 ESTADÍSTICA DE VARIABLES COSTERAS

5.1 Introducción

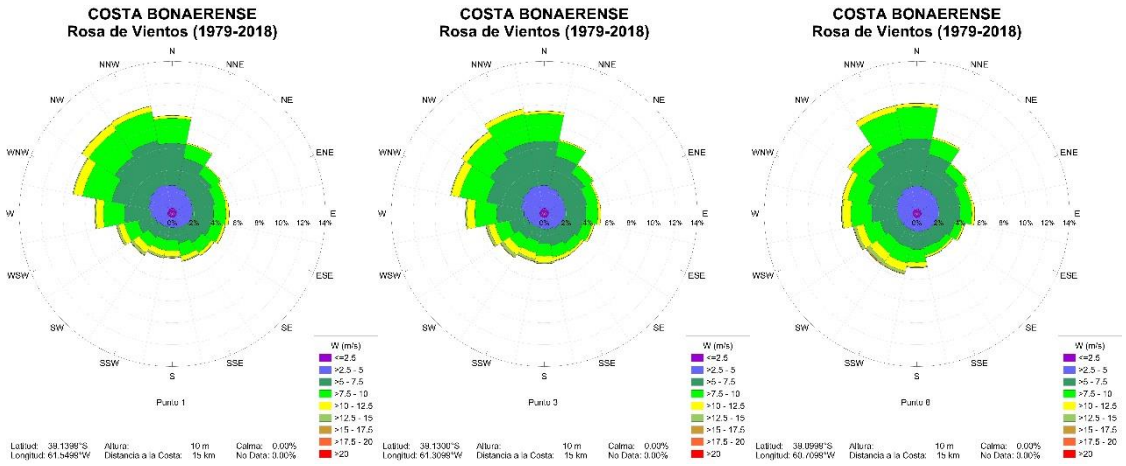
En cada una de las boyas virtuales que se presentan en este informe se cuenta con series históricas de variables asociadas a la dinámica costera (viento, niveles y oleaje). En este capítulo se presenta un análisis estadístico de las más importantes. En primer lugar, se analiza la intensidad y dirección de los vientos. Luego se realizó para los niveles de marea una estadística descriptiva y análisis de extremos, además de un estudio de la ocurrencia de ondas de tormenta (niveles máximos y duración). Por último, se obtuvo un clima de olas frecuente y un análisis de valores extremos de olas.

5.2 Vientos

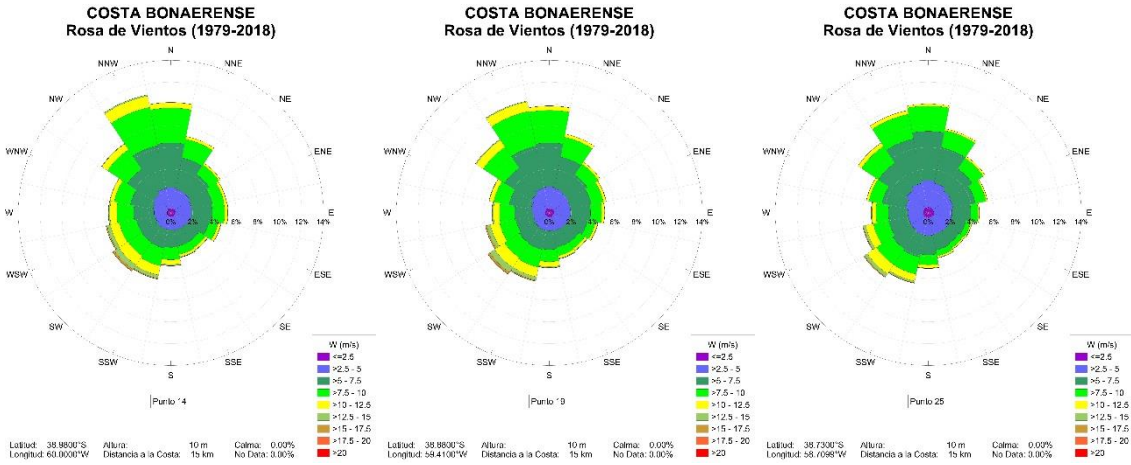
Con el objetivo de presentar los resultados representativos de la estadística de vientos en todo el tramo costero y representando a cada uno de los partidos se estudiaron 16 series temporales. El análisis de vientos consistió en realizar las rosas de viento de cada boya virtual estudiada permitiendo observar en un mismo grafico intensidad, dirección y ocurrencia del viento. La Figura 5.1 presenta las rosas de viento de las 16 boyas virtuales seleccionadas.

Las intensidades de mayor ocurrencia se ubican en el rango 6 a 10 m/s. Los vientos más intensos, preponderantemente en el rango 10 a 20 m/s, se presentan en general con componentes Sudoeste desde Pehuén Co hasta Mar del Plata y Sur desde Mar del Plata a Mar del Tuyu.

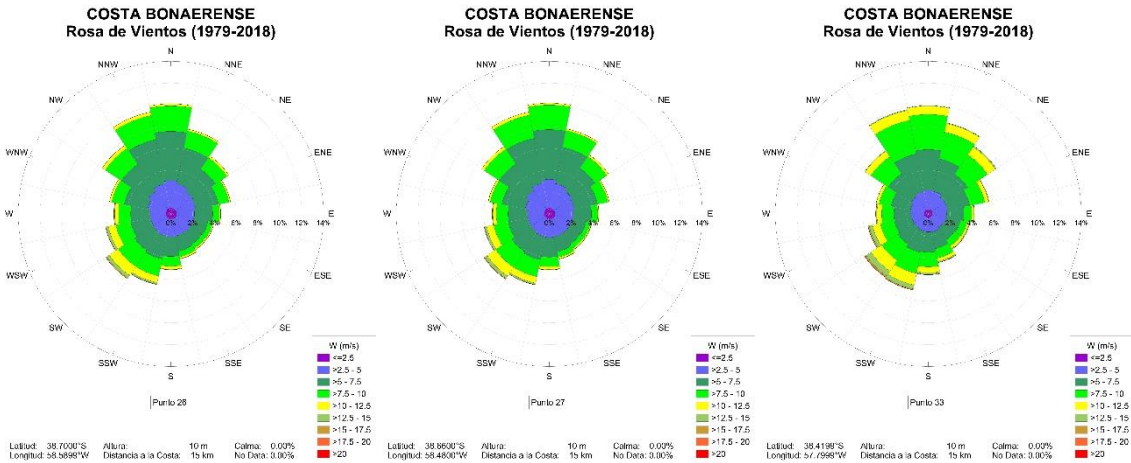
En cuanto a la dirección del viento se observa que en el sudoeste del tramo costero estudiado (Pehuén Co y Monte Hermoso) predominan vientos del Noroeste y hacia el tramo medio (entre Arroyo Los Gauchos y Arenas Verdes) vientos más hacia el Norte. Luego, desde Miramar hasta Camet Norte (en el tramo central de la costa analizada), junto con las componentes Norte comienzan a predominar componentes hacia el NE. Finalmente en el tramo costero restante, entre Mar de las Pampas y Mar del Tuyu las componentes predominantes son las del Nornordeste (NNE).



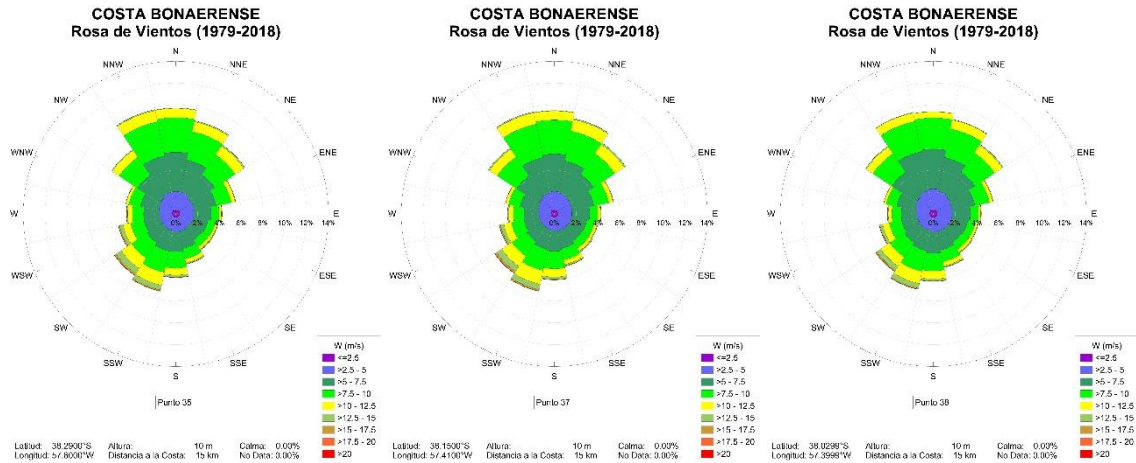
a) Pehuén Co (BV1), Monte Hermoso (BV 3) y Arroyo Los Gauchos (BV 8)



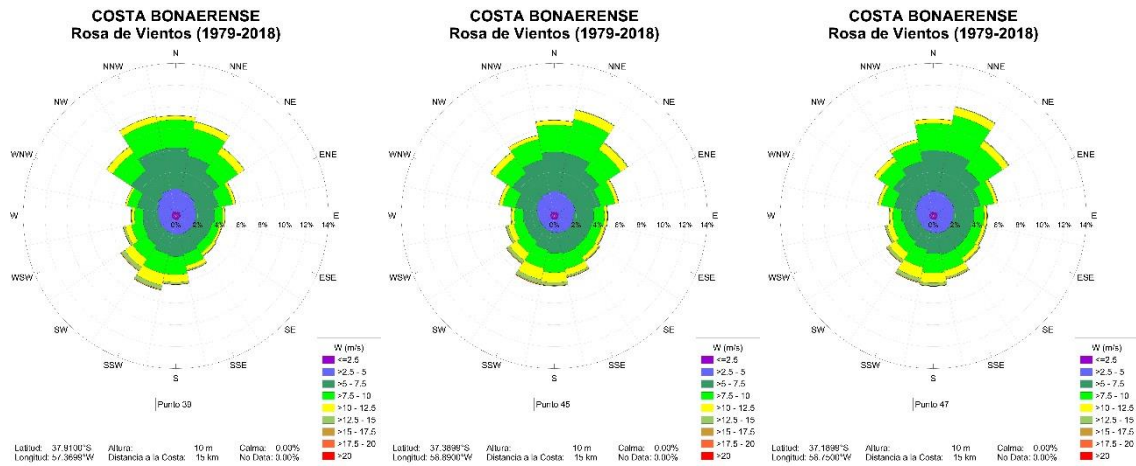
b) Balneario Barlovento (BV 14), San Cayetano (BV 19) y Necochea (BV 25).



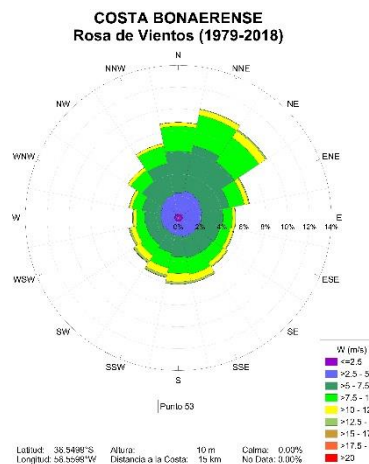
c) Bahía de los Vientos (BV 26), Arenas Verdes (BV 27) y Miramar (BV 33).



d) Chapadmalal (BV 35), Honu Beach (BV 37, Mar del Plata) y Luro (BV 38, Mar del Plata).



e) Camet Norte (BV 39), Mar de las Pampas (BV 45) y Pinamar (BV 47).



f) Mar del Tuyu (BV 53).

Figura 5.1. Rosas de vientos por boya virtual. Hindcast costa marítima de la provincia de Buenos Aires

5.3 Niveles de marea

El análisis de los niveles de marea a lo largo de la costa marítima bonaerense se concentró en la evaluación de las series obtenidas del análisis retrospectivo (serie 1985-2016) en algunas de las boyas virtuales de la primera línea costera. Para cada una de ellas se realizó un análisis de valores extremos y luego un estudio de ocurrencia de ondas de tormenta.

5.3.1 Estadística descriptiva

A partir de las series temporales de valores horarios de niveles de las 16 boyas virtuales representativas de toda la costa, se efectuó la estadística descriptiva de cada una de ellas para el período 1985-2016.

En la Figura 5.2 se presentan los diagramas de cajas de cada boya virtual analizada. Se observan niveles medios similares a lo largo de toda la porción costera. En la zona central (entorno de Mar del Plata) se dan las amplitudes menores, mientras que hacia el sur y hacia el norte aumentan.

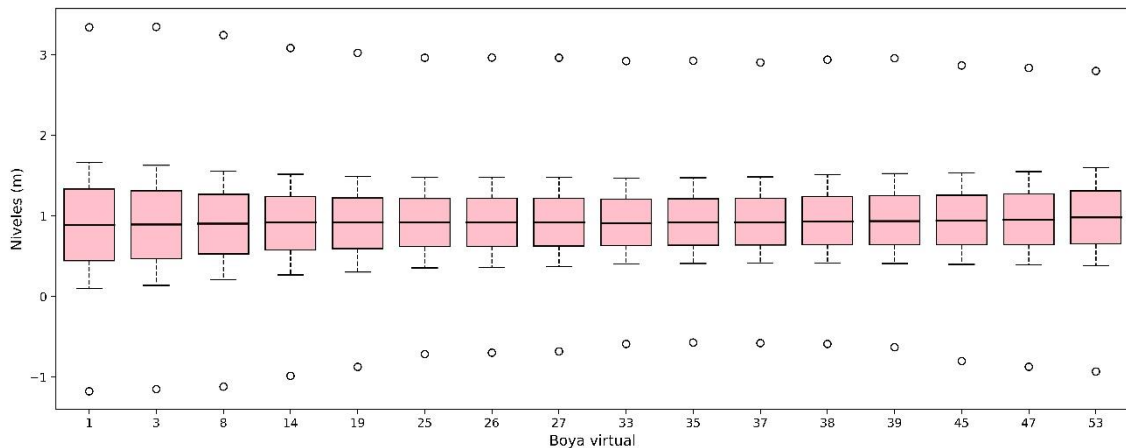


Figura 5.2. Diagrama de cajas de niveles (cuartiles y percentiles 10 y 90). Series *hindcast* costa marítima de la provincia de Buenos Aires (1985-2016).

Además, se llevó a cabo un análisis de frecuencia de ocurrencia de niveles. En la Figura 5.3 se presenta el histograma de frecuencias de cada una de las boyas virtuales seleccionadas. A modo ilustrativo, la Figura 5.3 muestra las frecuencias acumuladas de superación de niveles. Se destaca que los niveles más altos de la marea astronómica, por ejemplo, en Mar del Plata, resultan alrededor de 1.8 m, valor que solo se ve superado aproximadamente el 3 % del tiempo.

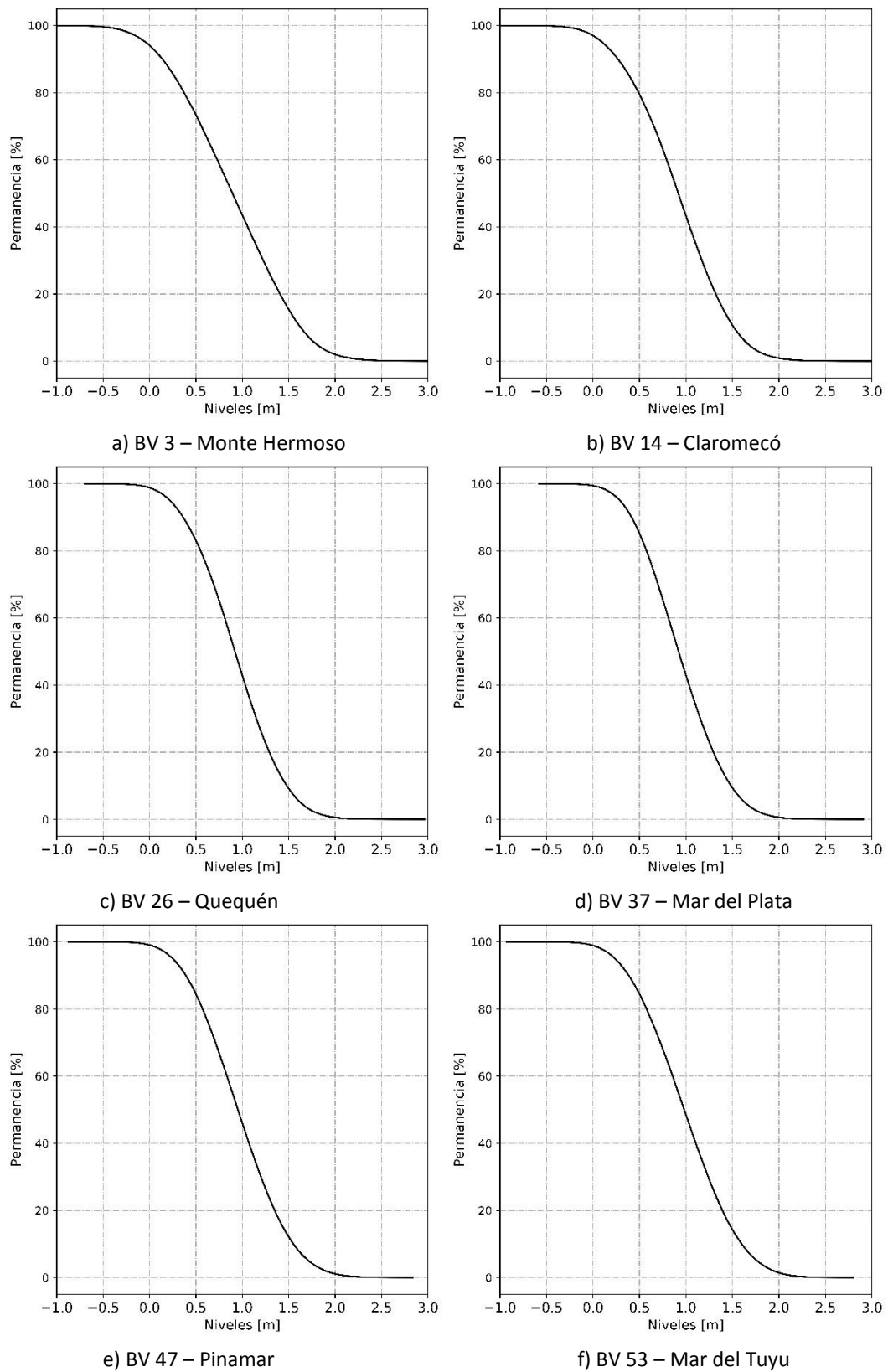
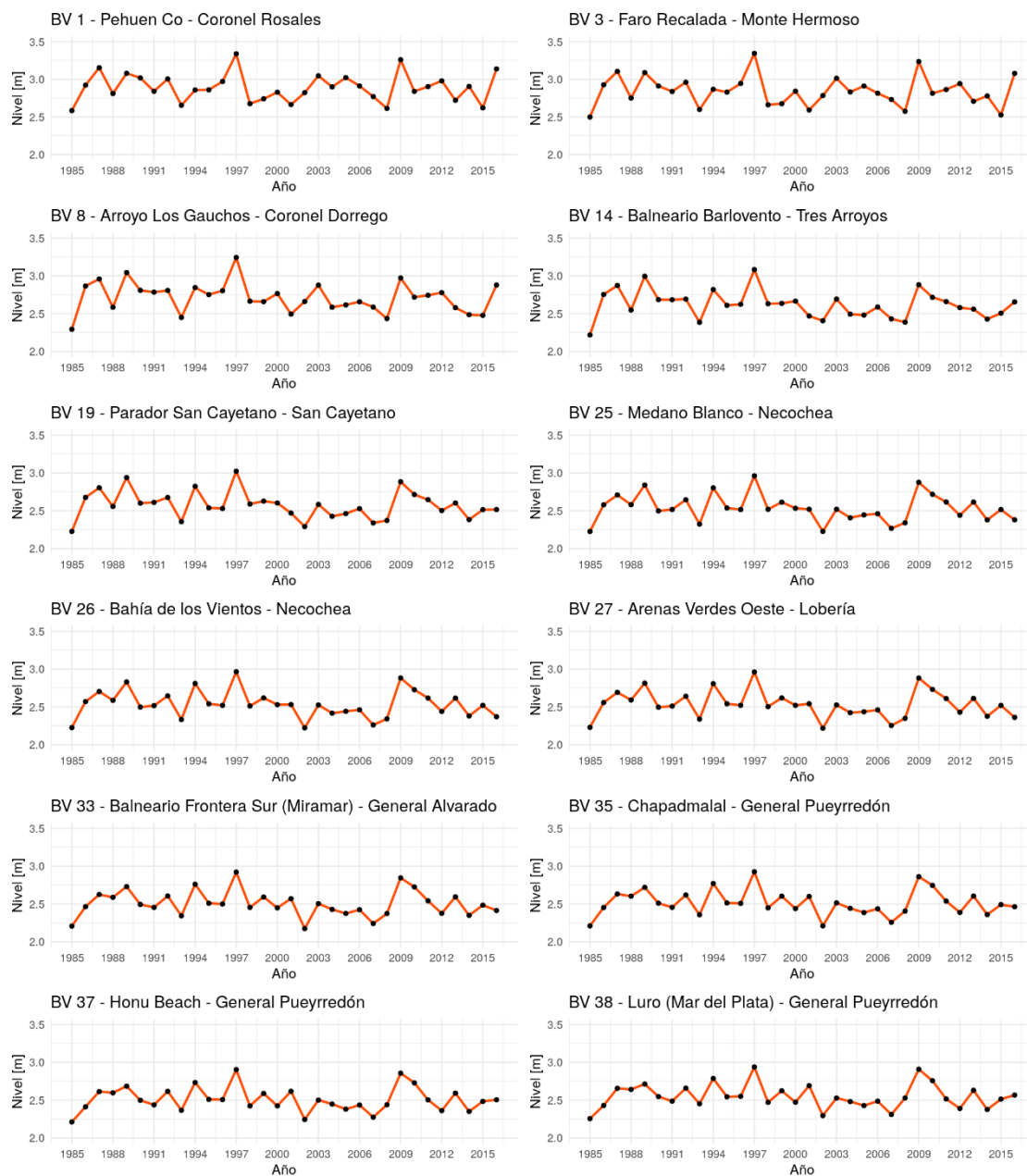


Figura 5.3. Frecuencia acumulada de superación de niveles. Serie *hindcast* (1985-2016).

5.3.2 Análisis de niveles extremos

Las series de niveles máximos anuales para las 16 boyas virtuales seleccionadas que se presentan en la Figura 5.4 fueron sometidas a un análisis de extremos ajustando sus valores a la Distribución Generalizada de Valor Extremo (GEV). El método de estimación de parámetros utilizado fue el Método de Máxima Verosimilitud (MLE). Los resultados de los ajustes, vinculando los niveles alcanzados en cada boya virtual con el tiempo de recurrencia o período de retorno (intervalo de tiempo medio entre repeticiones de un evento con ese nivel máximo o mayor), se presentan en la Figura 5.5 a Figura 5.10.



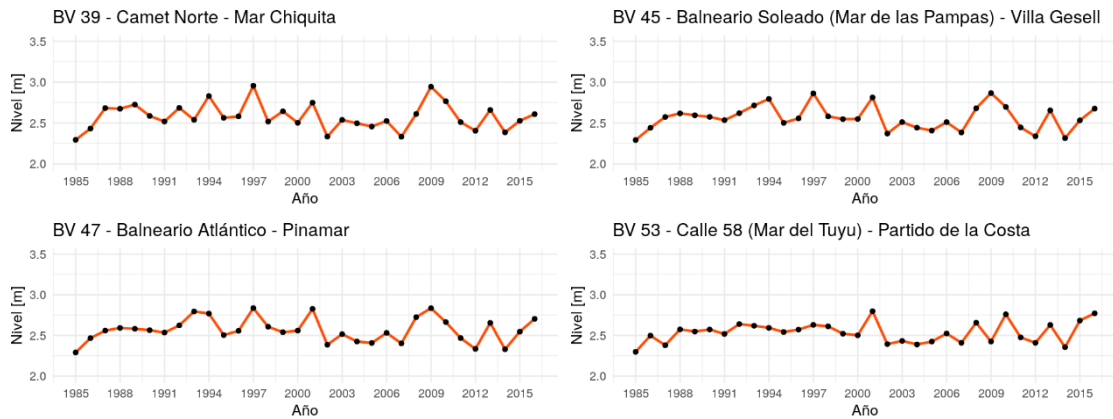


Figura 5.4. Series de niveles máximos anuales. Series *hindcast* costa marítima de la provincia de Buenos Aires (1985-2016).

Luego utilizando los coeficientes ajustados, con la metodología Método de Máxima Verosimilitud (MLE), de la Distribución Generalizada de Valor Extremo (GEV) para cada serie, se calcularon los niveles correspondientes a diferentes períodos de retorno: 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años (Figura 5.5 a Figura 5.10).

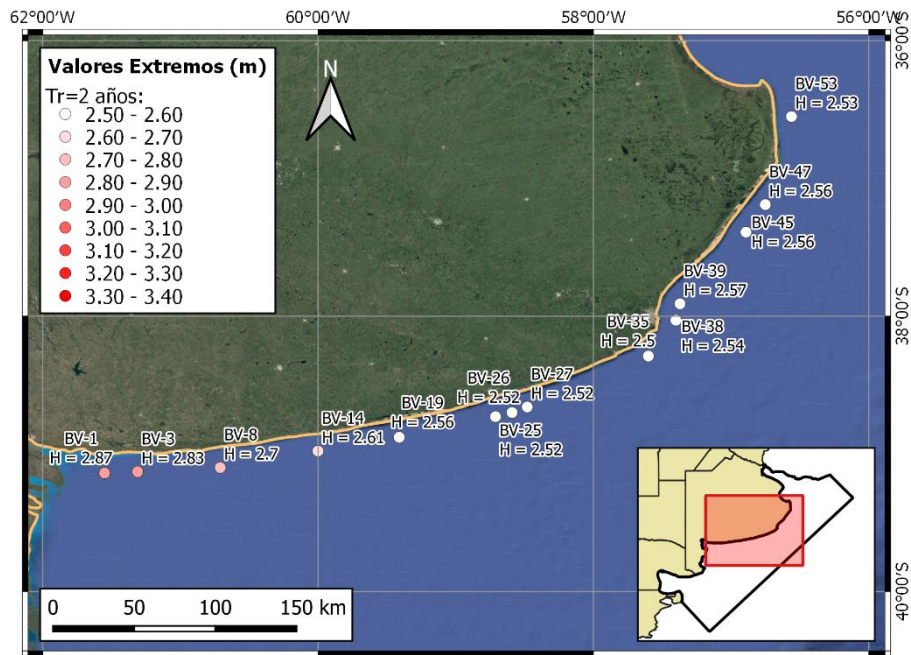


Figura 5.5. Niveles extremos de marea. Período de retorno: 2 años.

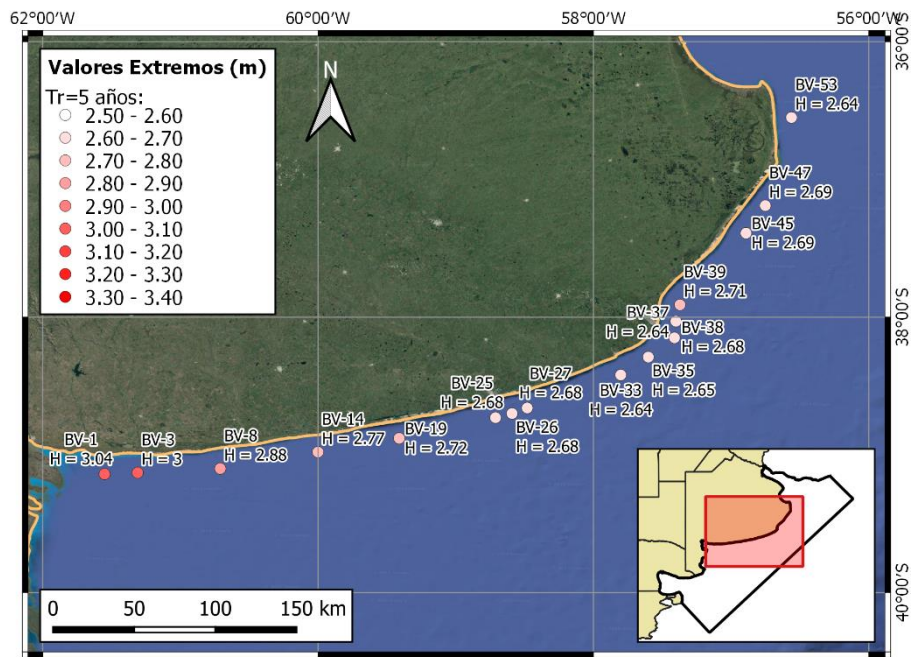


Figura 5.6. Niveles extremos de marea. Período de retorno: 5 años.

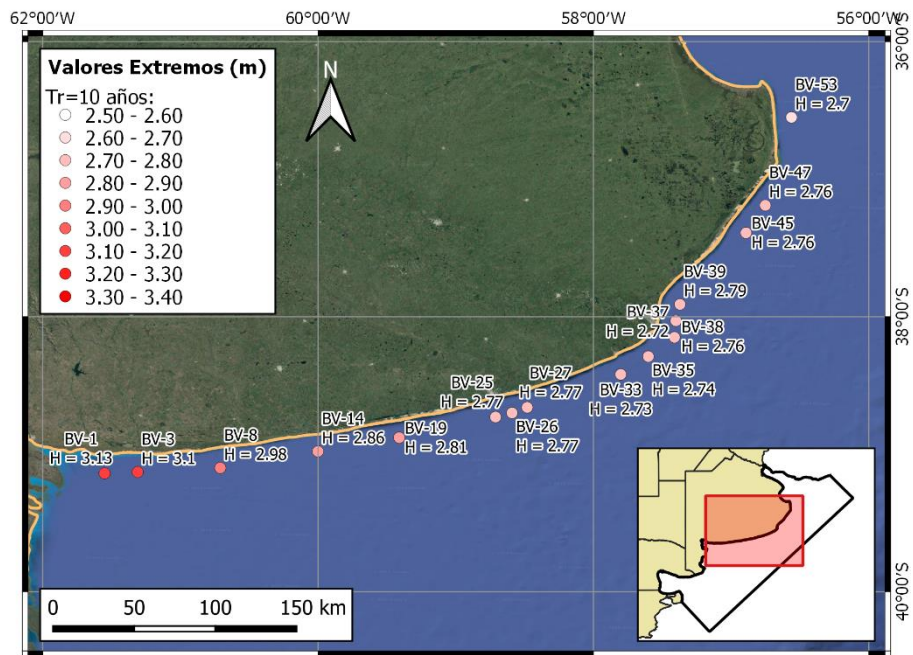


Figura 5.7. Niveles extremos de marea. Período de retorno: 10 años.

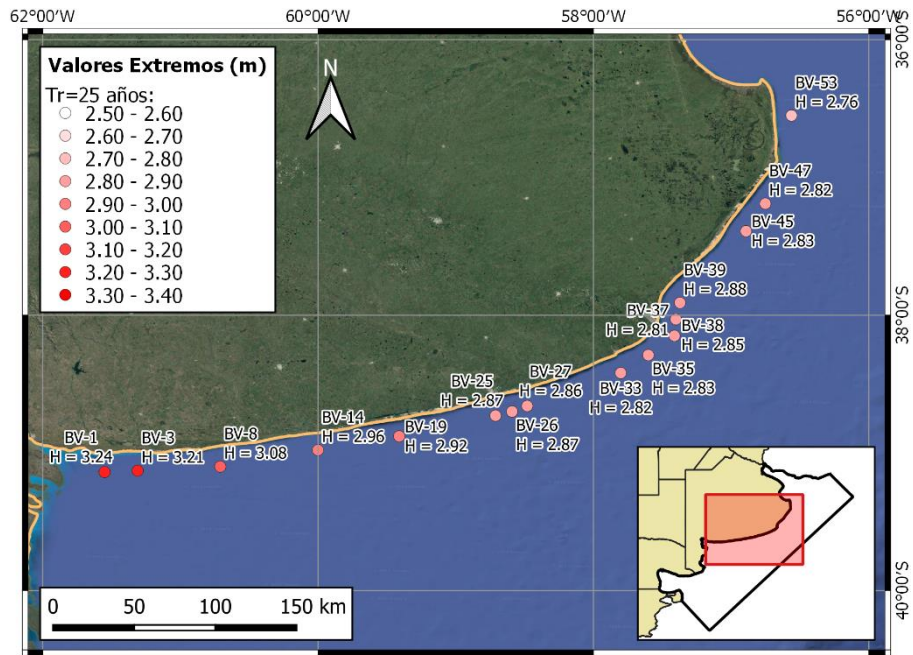


Figura 5.8. Niveles extremos de marea. Período de retorno: 25 años.

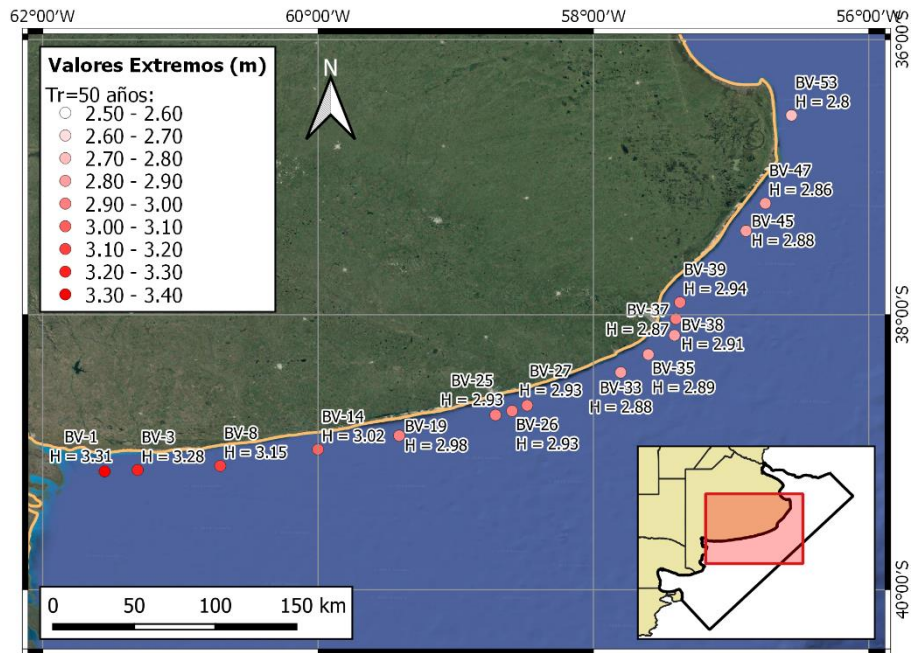


Figura 5.9. Niveles extremos de marea. Período de retorno: 50 años.

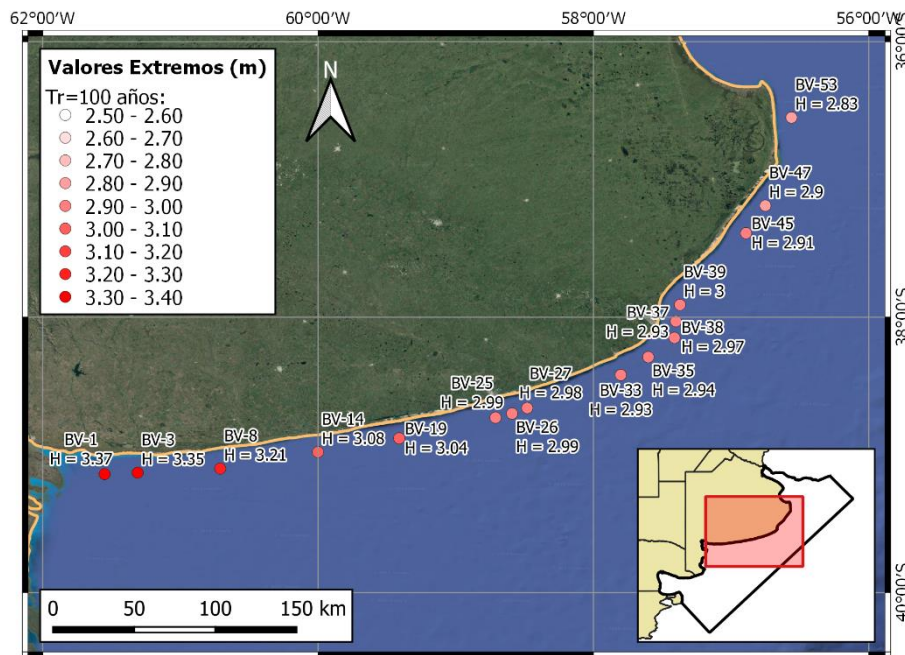


Figura 5.10. Niveles extremos de marea. Período de retorno: 100 años.

5.2.3 Análisis de ocurrencia de ondas de tormenta

Las ondas de tormenta (*storm surges*) son aquellos eventos en que la acción del viento aparta los niveles de marea de los que ocurren dada la componente de marea astronómica. Esta componente se denomina marea meteorológica y consiste en la señal indicada para analizar la ocurrencia de ondas de tormenta en ambientes costeros.

Para obtener de las series de niveles de las boyas virtuales la señal de marea meteorológica e independizarse del efecto de la marea astronómica se aplicó sobre cada una de ellas un filtro que elimina el efecto de ondas de baja frecuencia. Este consiste en una ventana móvil que recorre la serie y la multiplica por el vector de coeficientes que componen dicho filtro, denominado "120i913" diseñado por Thompson (1983). El criterio que subyace a la aplicación de este filtro en particular es que se considera a la marea meteorológica como una onda con período mayor a 1.7 días.

Habiendo obtenido la marea filtrada, el recuento y la duración de los eventos de tormenta se obtuvo mediante el cumplimiento simultáneo de dos criterios (Fiore et. al, 2009):

- La onda debe superar el valor mínimo de 30 cm de amplitud.
- El valor máximo de cada segmento de onda que cumple con el criterio anterior debe superar en amplitud dos desvíos estándar de la serie (95% de confianza).

Una vez filtradas las series de las boyas virtuales se realizó un ranking de las ondas de tormenta más importantes del período 1985-2016. Para ilustrar es análisis se presentan las Tabla 5.1 y Tabla 5.2 que muestran los eventos máximos en seis sitios representativos de todo el frente costero estudiado.

Tabla 5.1. Ranking de niveles máximos. Serie *hindcast* (1985-2016).

<i>Monte Hermoso</i>		<i>Claromecó</i>		<i>Quequén</i>	
<i>BV-3</i>		<i>BV-14</i>		<i>BV-26</i>	
<i>Fecha</i>	<i>Nivel [m]</i>	<i>Fecha</i>	<i>Nivel [m]</i>	<i>Fecha</i>	<i>Nivel [m]</i>
04/04/97 4:00	2.74	04/04/97 4:00	2.57	04/04/97 6:00	2.41
22/03/92 6:00	2.61	22/06/87 19:00	2.41	22/06/87 20:00	2.28
07/04/89 23:00	2.53	22/03/92 8:00	2.38	22/03/92 9:00	2.24
22/06/87 19:00	2.50	05/07/89 0:00	2.36	05/07/89 2:00	2.21
24/06/94 20:00	2.46	27/06/94 5:00	2.29	14/07/12 8:00	2.19

Tabla 5.2. Ranking de niveles máximos. Serie *hindcast* (1985-2016).

<i>Mar del Plata</i>		<i>Pinamar</i>		<i>Mar del Tuyu</i>	
<i>BV-37</i>		<i>BV-47</i>		<i>BV-53</i>	
<i>Fecha</i>	<i>Nivel [m]</i>	<i>Fecha</i>	<i>Nivel [m]</i>	<i>Fecha</i>	<i>Nivel [m]</i>
04/04/97 9:00	2.32	04/04/97 12:00	2.31	04/11/07 10:00	2.27
22/06/87 23:00	2.22	05/07/89 6:00	2.25	21/07/96 2:00	2.25
22/03/92 11:00	2.20	04/11/07 8:00	2.24	27/10/16 16:00	2.25
05/07/89 4:00	2.18	27/10/16 12:00	2.23	05/07/89 9:00	2.24
14/07/12 10:00	2.15	22/03/92 13:00	2.22	28/10/94 17:00	2.24

Luego, se analizó la frecuencia de ocurrencia de eventos de tormenta. En primer lugar, se obtuvo la cantidad de eventos de tormenta ocurridos por año en cada boya virtual de las 16 seleccionadas (Figura 5.11). Se observa en este caso que, en todos los años (exceptuando el 2006), se dan al menos 10 eventos de tormenta por año como mínimo. En general, se observa un promedio de alrededor de 15 eventos de tormenta por año, salvo en las boyas del norte de la zona analizada donde se dan más de 20 eventos anuales. También las cantidades máximas de eventos de tormenta muestran esta relación, donde en las boyas del norte (hasta un máximo de 40 eventos en un año) duplican a las cantidades de las del sur. En ninguno de los puntos estudiados se observa algún tipo de tendencia.

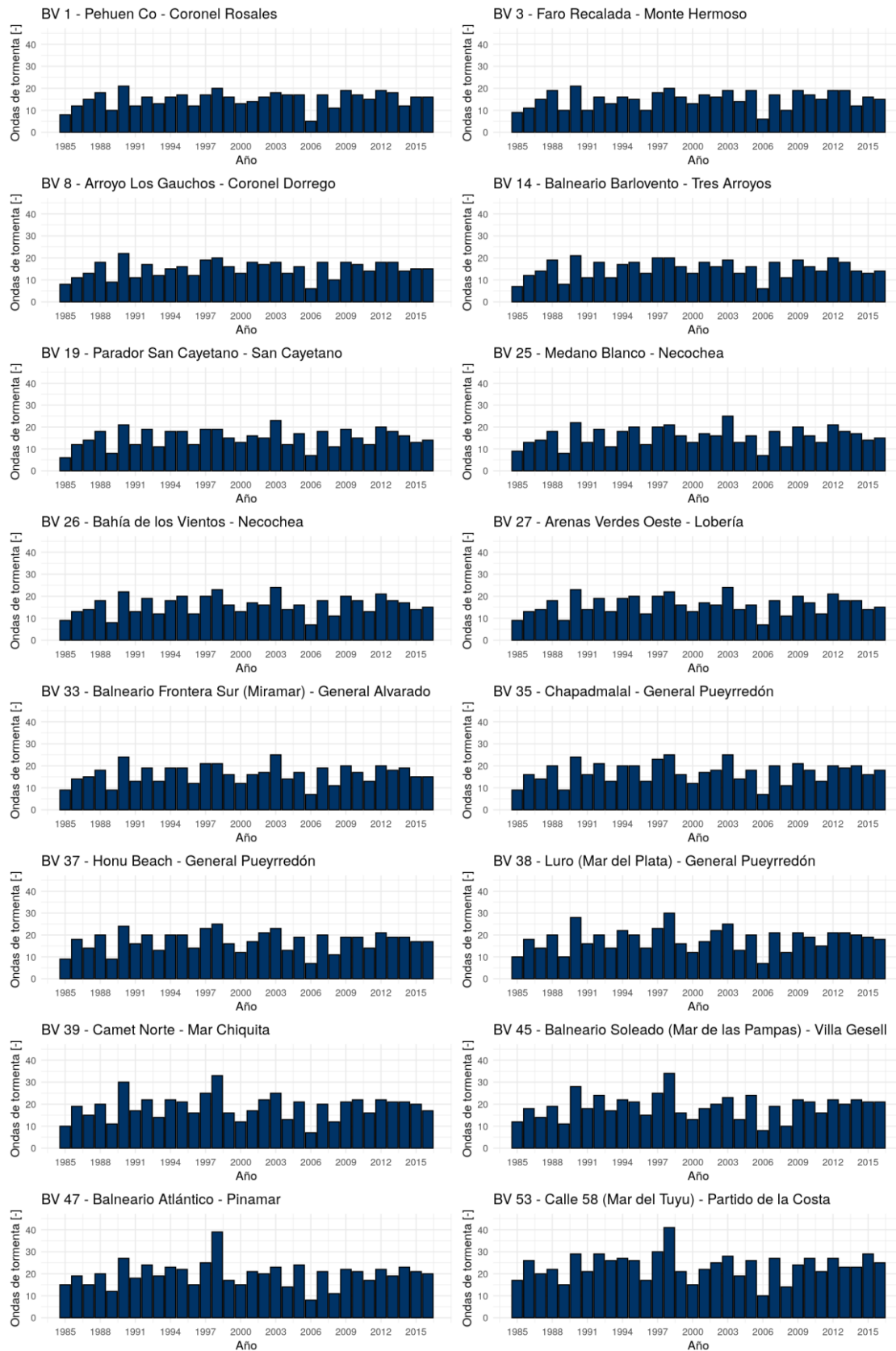


Figura 5.11. Frecuencia de ocurrencia de ondas de tormenta. Anual.

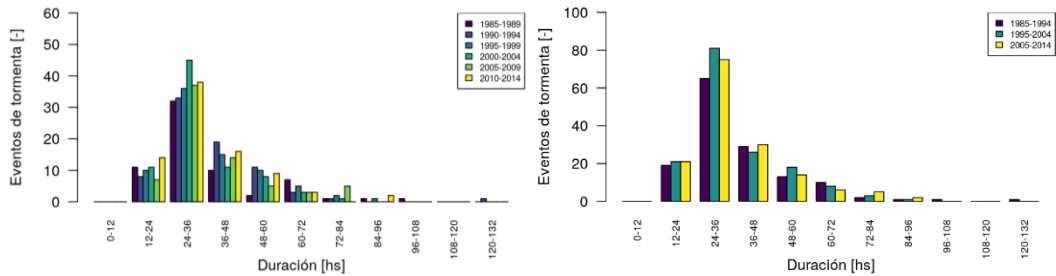
Para las mismas boyas, se analizó la frecuencia de ocurrencia de eventos que superan un determinado nivel umbral (en este caso 2 m) (Figura 5.12). Esta evaluación se realizó para cada año y para bloques de 2, 5 y 10 años. Al igual que en el caso anterior, no se observa ningún tipo de tendencia.



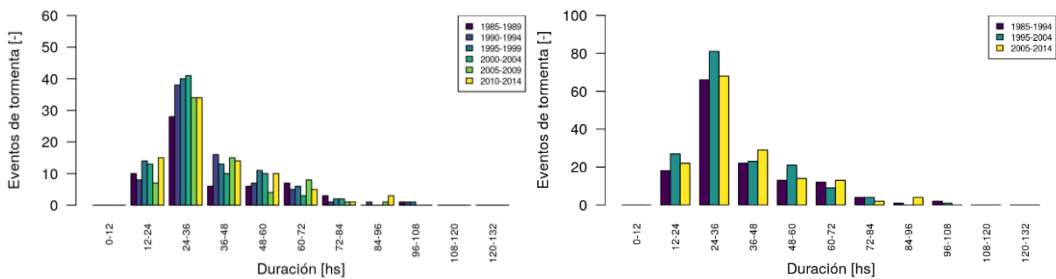


Figura 5.12. Frecuencia de ocurrencia de ondas de tormenta. Cantidad de ondas de tormenta que superan el umbral de 2 m. Anual, bianual, quinquenal y decadal.

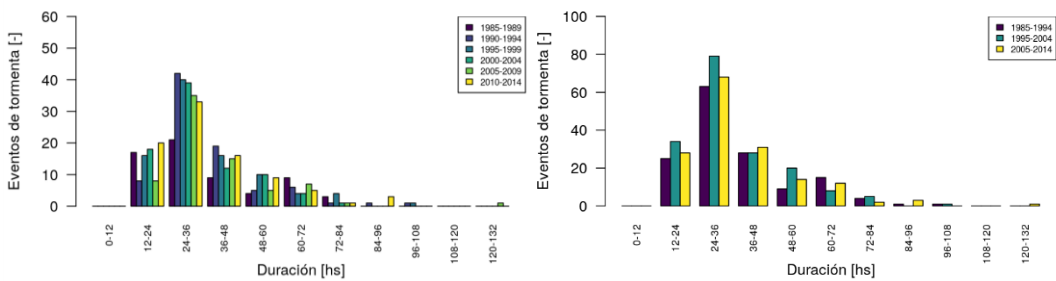
Además de la cantidad, se analizó también la duración de los eventos de tormenta detectados. Para esto se realizaron histogramas donde se contabilizaron los eventos según su duración (Figura 5.13), para un agrupamientos de 5 y 10 años. Se observa en ambos casos que la mayor cantidad de eventos se concentra en el rango de 24 a 36 horas, y que la distribución es consistente según la forma de contabilizar.



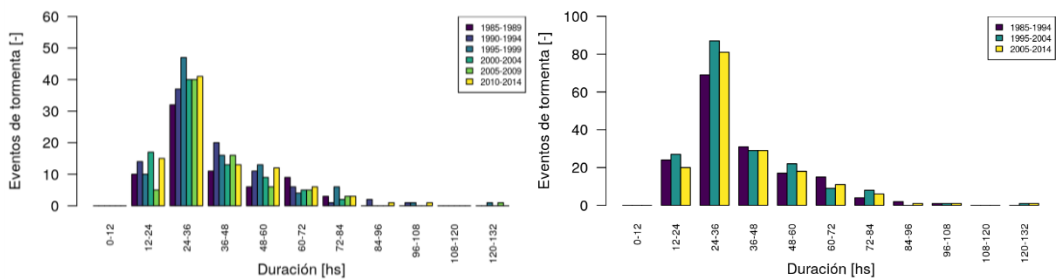
a) *BV 3 – Monte Hermoso*



b) *BV 14 – Claromec6*



c) *BV 26 – Quequ6n*



d) *BV 37 – Mar del Plata*

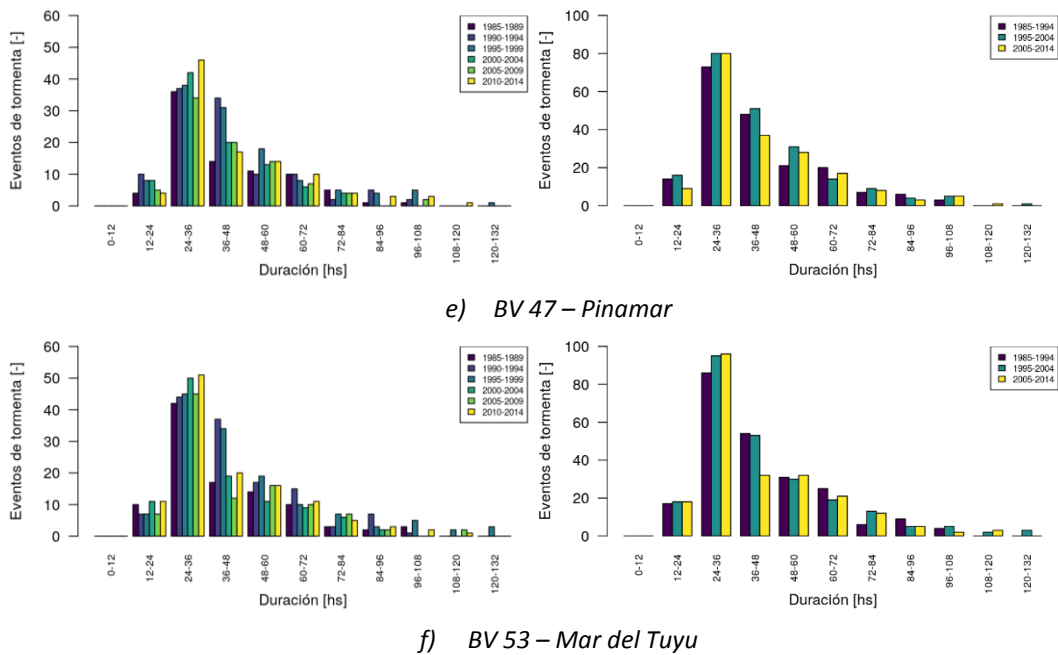
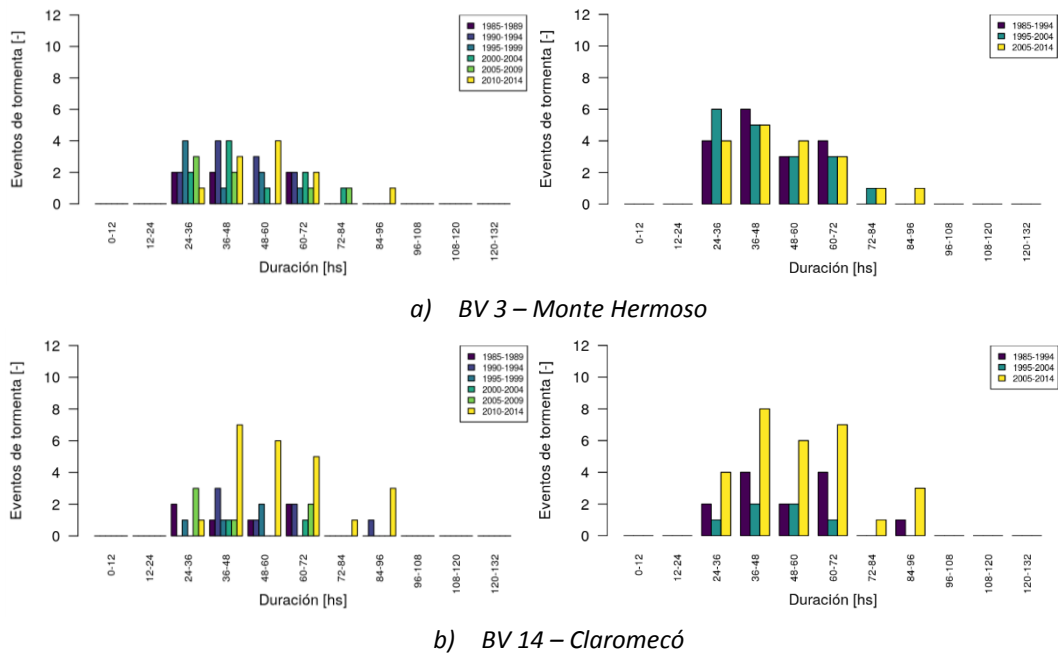


Figura 5.13. Frecuencia de ocurrencia de ondas de tormenta. Cantidad de ondas de tormenta según duración (quinquenal y decadal).

De igual manera, se avanzó con este análisis, pero solo contabilizando los eventos que superaron un nivel umbral de 2 m (Figura 5.14). En este caso, la cantidad de eventos es menor y resulta menos claro cuál es el rango de duraciones preponderante. Además, se observa que para los últimos 5 o 10 años la cantidad y la duración de los eventos de tormenta de estas características es considerablemente mayor.



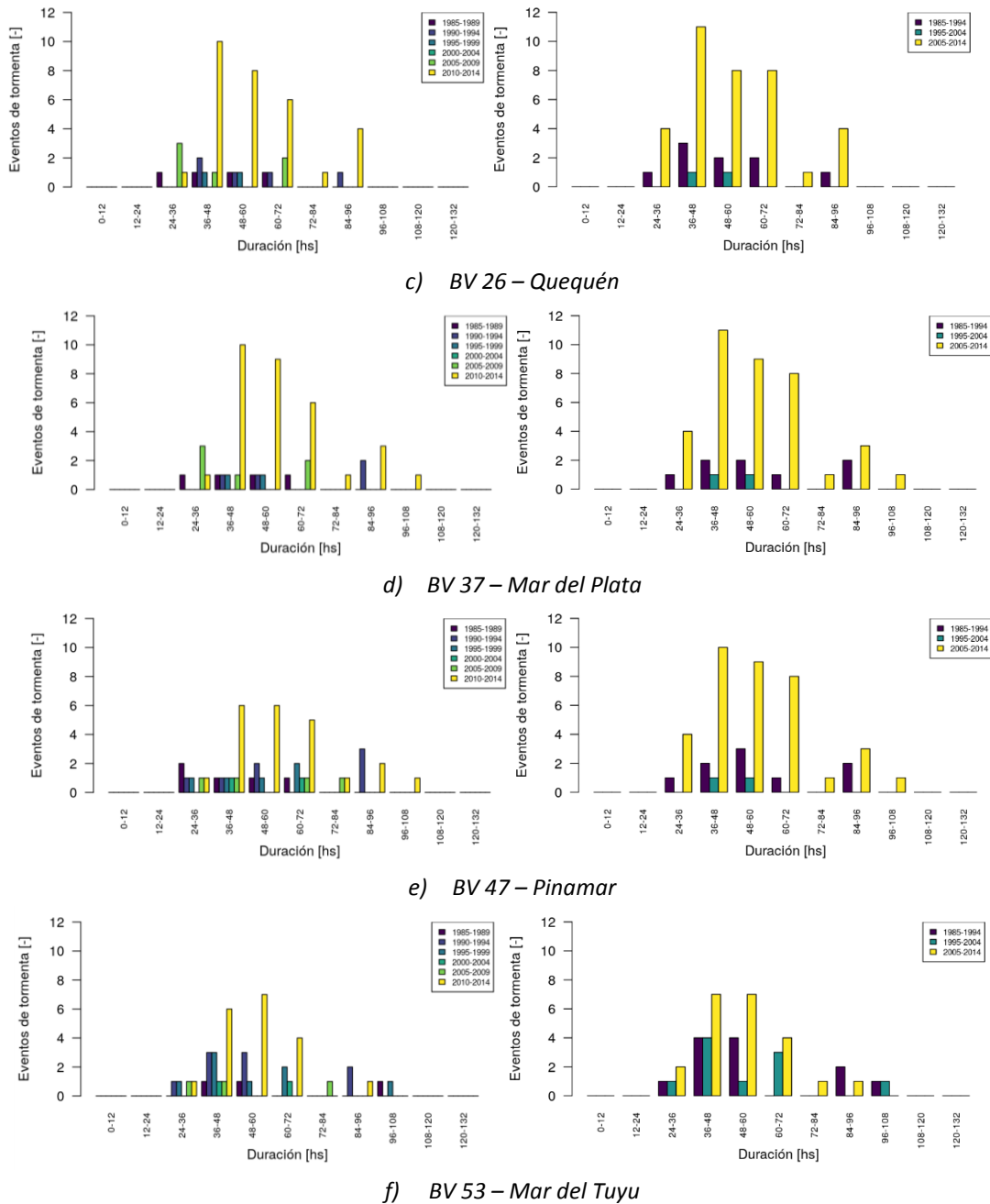


Figura 5.14. Frecuencia de ocurrencia de ondas de tormenta. Cantidad de ondas de tormenta que superan el umbral de 2 m según duración (quinquenal y decadal).

5.4 Oleaje

El análisis del oleaje a lo largo de la costa marítima bonaerense se concentró en la evaluación de las series obtenidas del análisis retrospectivo de cuarenta años (serie 1979-2018) en algunas de las boyas virtuales de la primera línea más próxima a la costa (distancia de 15 km). Esta evaluación permitió identificar tres sectores lo largo de toda la franja costera en estudio con características distintivas en cuanto al clima de olas, los cuales pueden delimitarse en forma aproximada de la siguiente manera: *Sector Noreste*, entre los partidos de La Costa y Mar

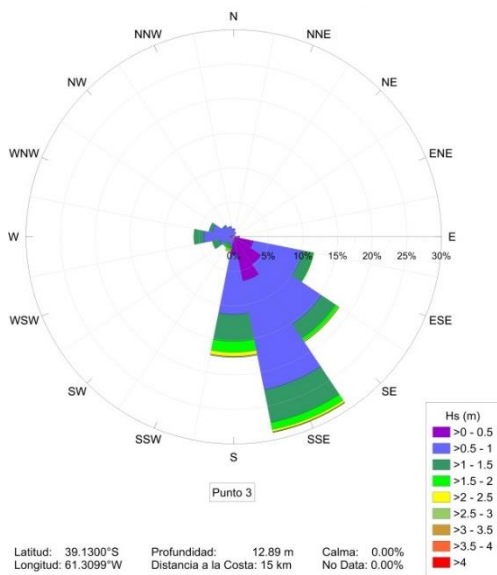
Chiquita; *Sector Central*, entre los Partidos de General Pueyrredón y San Cayetano; y el *Sector Sudoeste* entre los partidos de Tres Arroyos y Coronel Rosales.

Para cada uno de estos sectores se desarrolló un análisis sobre el clima de olas frecuente y sobre los de valores extremos del oleaje.

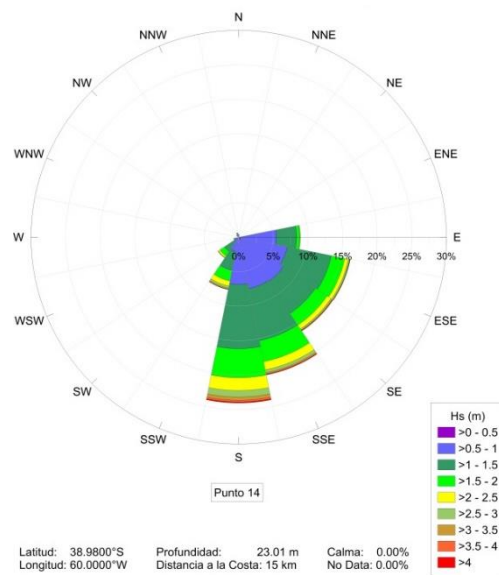
5.4.1 Clima de olas frecuente

El objetivo de este análisis consistió en identificar las características principales de cada tramo costero referidas a las alturas significativas, los períodos de pico, y las direcciones de propagación del oleaje. Para cada uno de los sectores mencionados se tomaron dos puntos representativos del mismo para la evaluación.

El resultado de análisis estadístico realizado sobre los datos se sintetiza en los gráficos de rosa de oleaje de la Figura 5.15. Rosas de oleaje a lo largo de la costa bonaerense., presentando la información analizada sobre un par de ejes en coordenadas polares. Este tipo de gráfico permite interpretar, en una misma figura, la distribución de diferentes rangos de alturas de ola para la totalidad de las direcciones de incidencia junto con frecuencia de ocurrencia de las mismas.



a) BV 03 – Monte Hermoso



b) BV 14 – Claromecó

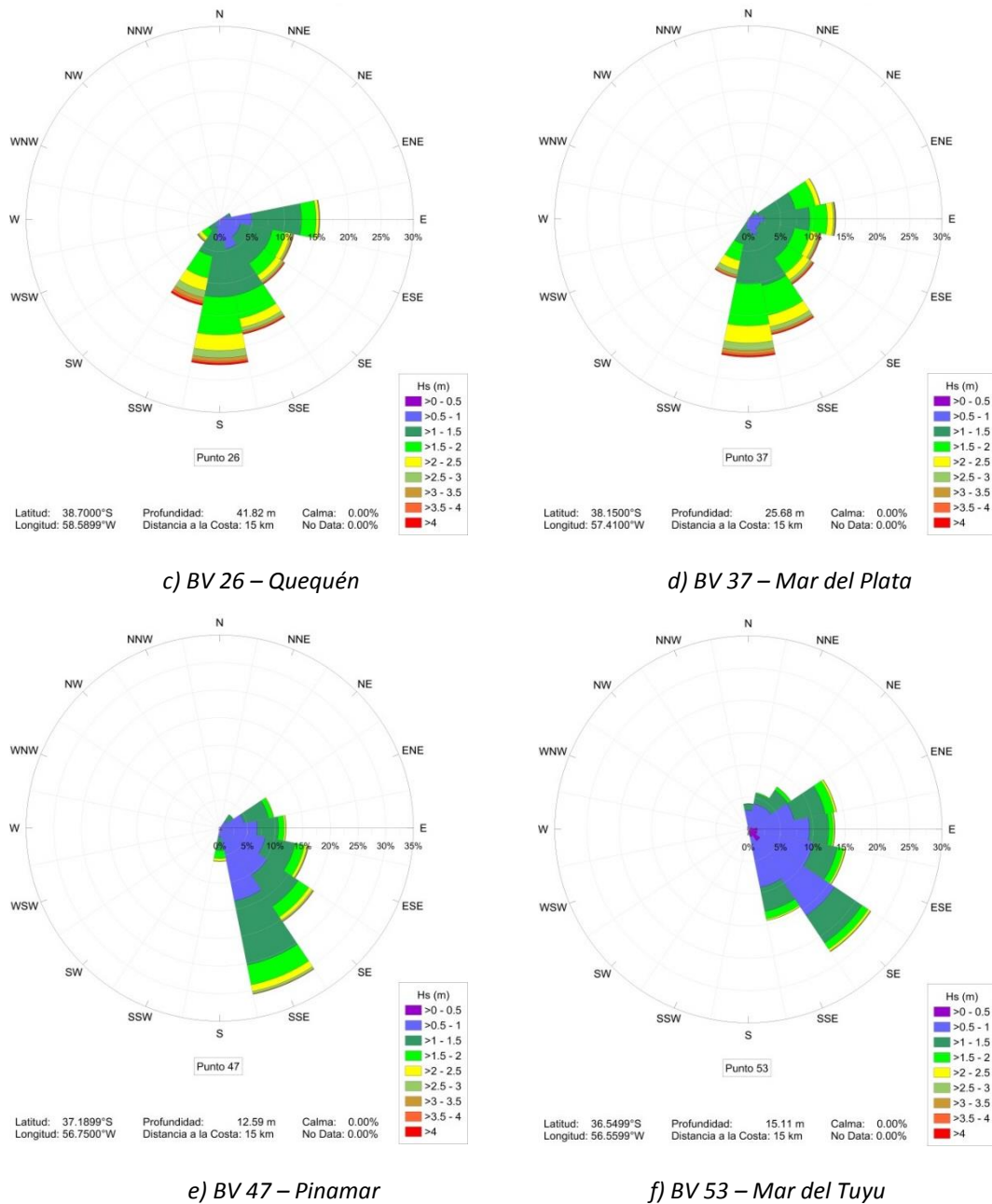


Figura 5.15. Rosas de oleaje a lo largo de la costa bonaerense.

Para el caso del *Sector Sudoeste*, donde la costa tiene una orientación predominantemente Oeste-Este, las rosas de Monte Hermoso y Claromecó muestran algunas diferencias en cuanto a los rangos de altura de ola y las direcciones del oleaje más frecuentes. Un dato relevante que afecta sensiblemente a los procesos de transformación del oleaje, y explica en parte esas diferencias, se refiere a la profundidad de la ubicación de la boya virtual en cada caso, siendo del orden de 13 m en Monte Hermoso y de 23 m en Claromecó.

En el *Sector Central*, los resultados de Necochea y Mar del Plata muestran una gran similitud sugiriendo características más homogéneas a lo largo de ese tramo, donde la orientación de la costa sigue una dirección aproximadamente de Oeste-Sudoeste a Este-Noreste. Se trata además

de la zona con mayores profundidades de la costa bonaerense, con valores de 41.8 m para la boya virtual de Necochea y de 25.7 m para la boya virtual de Mar del Plata.

También se observa una gran similitud en caso del *Sector Noreste*, donde se presentan los resultados correspondientes a las boyas virtuales de Pinamar y Mar del Tuyú. En este tramo existe un cambio importante en la orientación de la costa, con una primera zona donde la dirección es aproximadamente Sudoeste-Noreste y una segunda zona en el Partido de La Cota donde la orientación es Sur-Norte. En ambos casos las profundidades son notablemente reducidas, con valores de 12.6 en Pinamar y 15.1 en Mar del Tuyú.

Un análisis más completo sobre esta información puede desarrollarse a partir de los histogramas de distribución de frecuencias presentados en las Figura 5.16 a Figura 5.18.

Para el *Sector Sudoeste*, la distribución de altura significativa del oleaje (Figura 5.16) muestra que los valores más frecuentes para Monte Hermoso corresponden al rango de $H_s=0.5-0.75$ m (33.2%), mientras que el valor de $H_s = 2$ m no supera el 2% de los datos. Los resultados en Claromecó indican mayor energía del oleaje, con un 46,6 % de los datos en el rango de altura significativa del oleaje es de 0.75 a 1.25 m, al mismo tiempo que el valor de 2 m es superado con una frecuencia superior al 5.9%. En el *Sector Central*, pequeñas diferencias entre Necochea y Mar del Plata señalan que los valores más frecuentes para la altura significativa del oleaje se encuentran en el rango de 1 a 1.25 m. Asimismo, la altura de 2 m es superada por más del 10% de los datos en ambos casos y el valor de 3m tiene una frecuencia de superación del orden del 3%. Las alturas significativas de oleaje se vuelven a reducir sustancialmente en el *Sector Noreste*, donde predomina el rango de 0.75 a 1 m (con una frecuencia del orden de 29%). Mientras que son muy pocos los datos que superan el valor de 2 m, con frecuencias de 4.5% y 1.9% en Pinamar y Mar del Tuyú, respectivamente.

La Figura 5.17, por su parte, muestra resultados sobre el análisis de la estadística de los períodos de pico del oleaje (T_p) para las mismas series de datos. En el caso del *Sector Sudoeste*, se observa para Monte Hermoso una dispersión importante de valores de períodos de pico entre 2 y 12 s (con el predominio del rango 4 a 6 s; 28.4%). En tanto que en Claromecó los valores se concentran en un rango más reducido entre los 6 y los 12 s (79% de los datos), con el predominio del intervalo 8 a 10 s (31.5%). La frecuencia de eventos con períodos mayores a 12 s resulta similar en ambos casos con porcentajes del orden del 8%. Para el *Sector Central* la concentración es bien marcada en el rango entre 6 y 12 s, con porcentajes de 87.4 % en Necochea y 82.4% en Mar del Plata, predominando el intervalo de 8 a 10 s con porcentajes de 38.6% y 34.2%, respectivamente. La frecuencia de eventos con períodos mayores a 12 s resulta similar en ambos casos con porcentajes del orden del 9%. Por su parte, los datos del *Sector Noreste* muestran una dispersión importante entre los valores de 4 y 12 s para el caso de Pinamar (85.4%), predominando levemente el intervalo de 8 a 10 s con un 25% de los datos. Mientras tanto, en Mar del Tuyú se observa un porcentaje similar para el rango de valores de 4 y 12 s (85.1%), pero con una concentración muy marcada en el intervalo de 4 a 6 s, donde se computa el 43.5% de los datos. Eventos con períodos de pico superiores a 12 s registran porcentajes del orden de 12.8% en Pinamar y 9.3% en Mar del Tuyú.

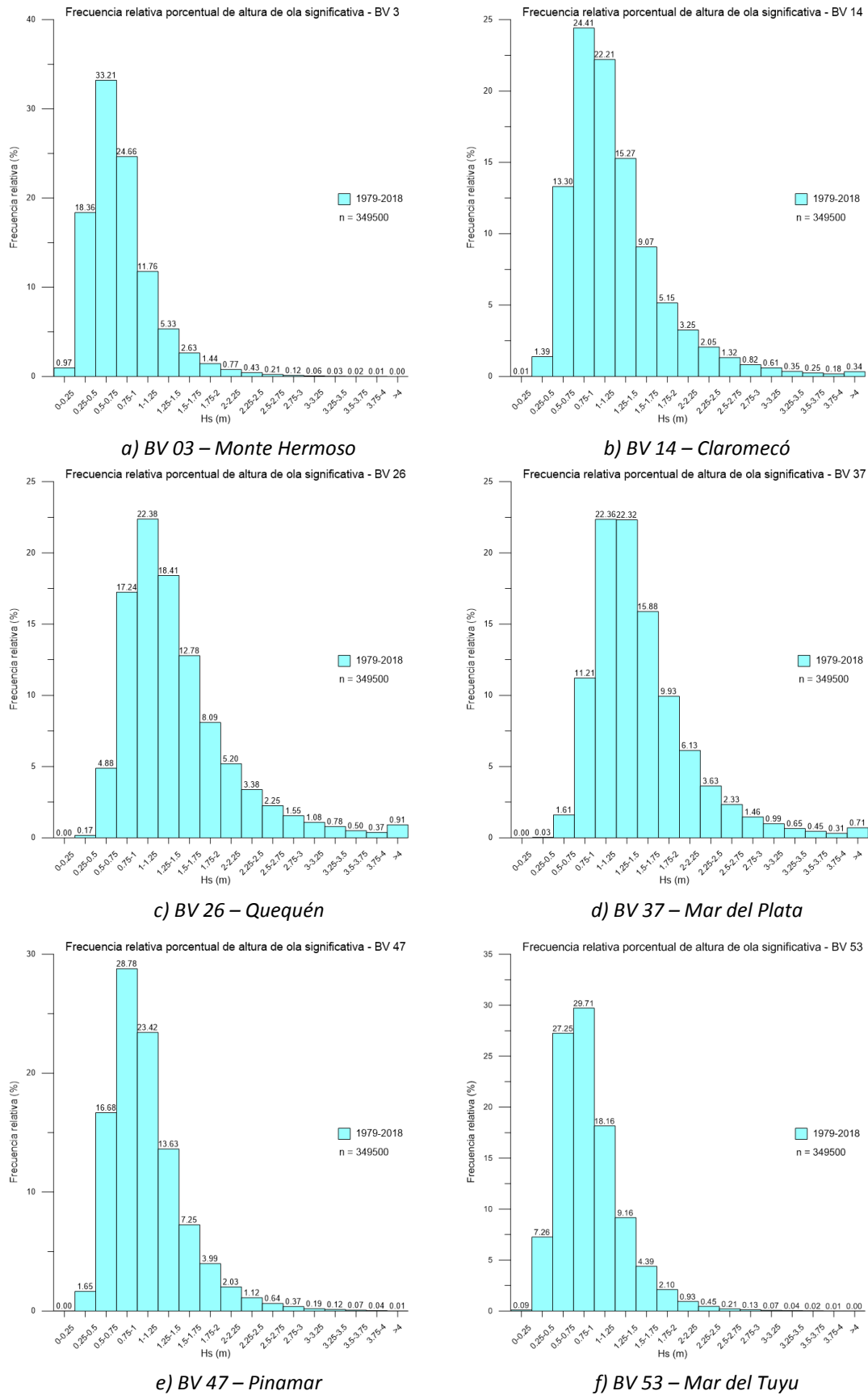


Figura 5.16. Distribución de frecuencias para la altura significativa del oleaje

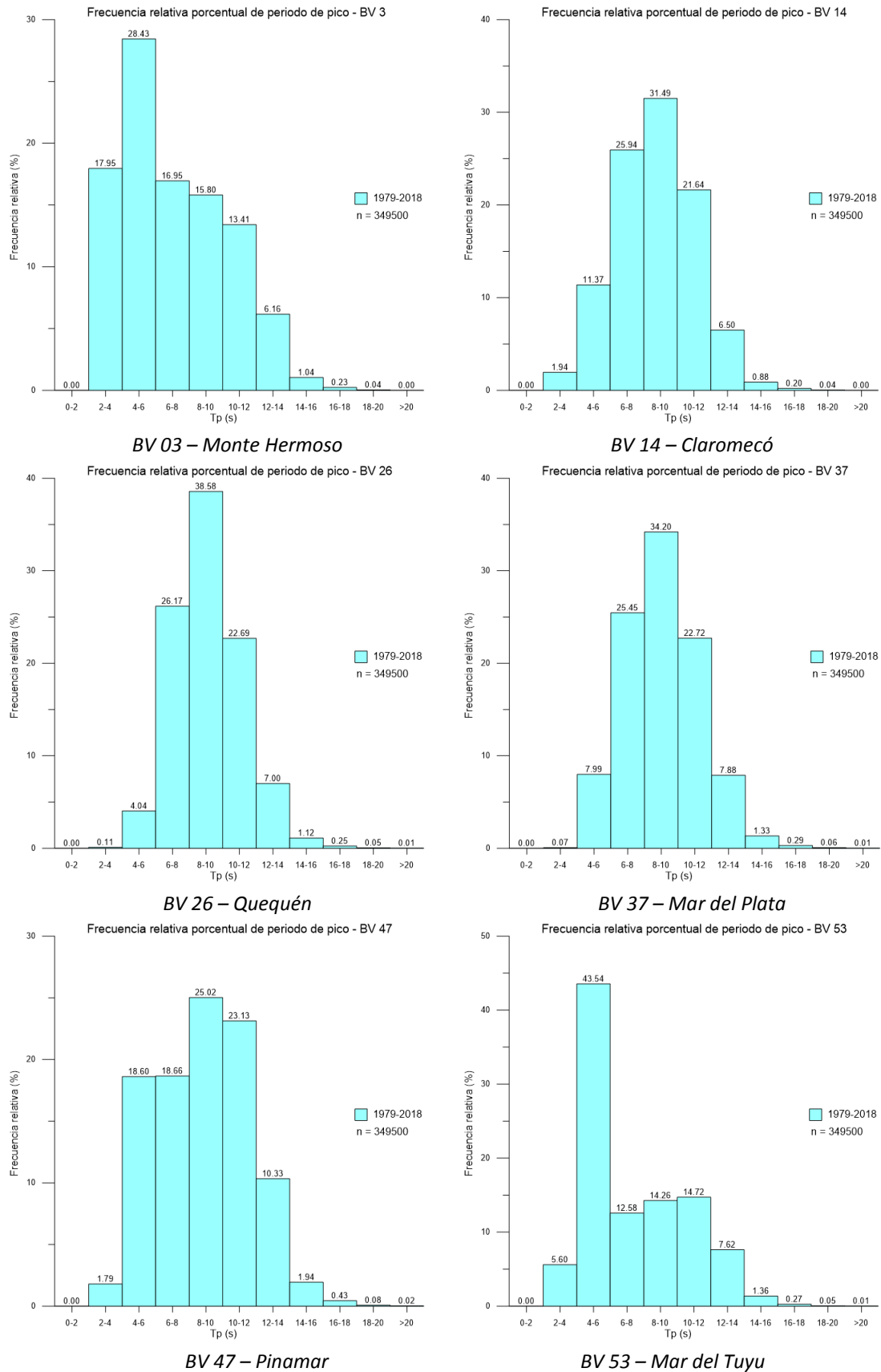
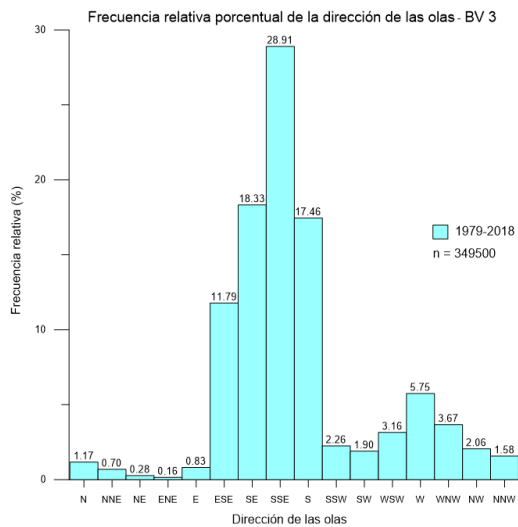


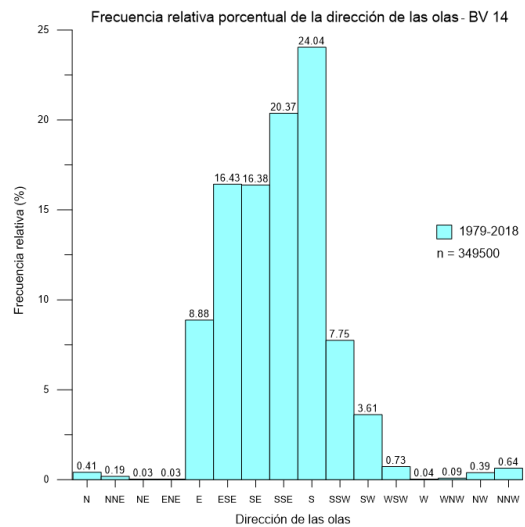
Figura 5.17. Distribución de frecuencias para el periodo de pico del oleaje

Los resultados del análisis estadístico sobre la distribución de frecuencias de las direcciones de propagación del oleaje se presentan en la Figura 5.18.

La distribución de frecuencias para la dirección del oleaje muestra para el *Sector Sudoeste* una concentración de eventos entre el ESE y el S, con porcentajes acumulados del 76.5% en Monte Hermoso y 77.2% en Claromecó. Para el primer caso se observa un predominio de la dirección SSE (28.9%), mientras que en el segundo caso el predominio es de la dirección S (24%). Como diferencias entre ambos se señalan los aportes no despreciables de las componentes E (8.9%) y SSW (7.8%) en Claromecó, mientras que en Monte Hermoso aparece una componente del W (5.8%). Para la zona del *Sector Central* se tiene una dispersión importante de eventos entre las direcciones E y SSW con porcentajes acumulados de 93.8% en Quequén y de 88.5% en Mar del Plata, con un predominio en ambos casos de la dirección S (22.6% y 21.5%, respectivamente). Las diferencias entre estos casos se destacan por el aporte del SW en Quequén (4.2%) en Quequén y del ENE en Mar del Plata (11.4%). En el *Sector Noreste* los resultados señalan que oleaje se concentra mayormente entre las direcciones ENE y SSE, con porcentajes acumulados de 89.5% en Pinamar y 80.0% para Mar del Tuyú. El predominio está dado para la dirección SSE (30.7%) en el primer caso y para la dirección SE (22.9%) en el segundo caso. Las diferencias entre ambos se destacan por el aporte del S en Pinamar (6.1%) en Pinamar y del sector NE-N en Mar del Tuyú (17.7% acumulado).



a) BV 03 – Monte Hermoso



b) BV 14 – Claromecó

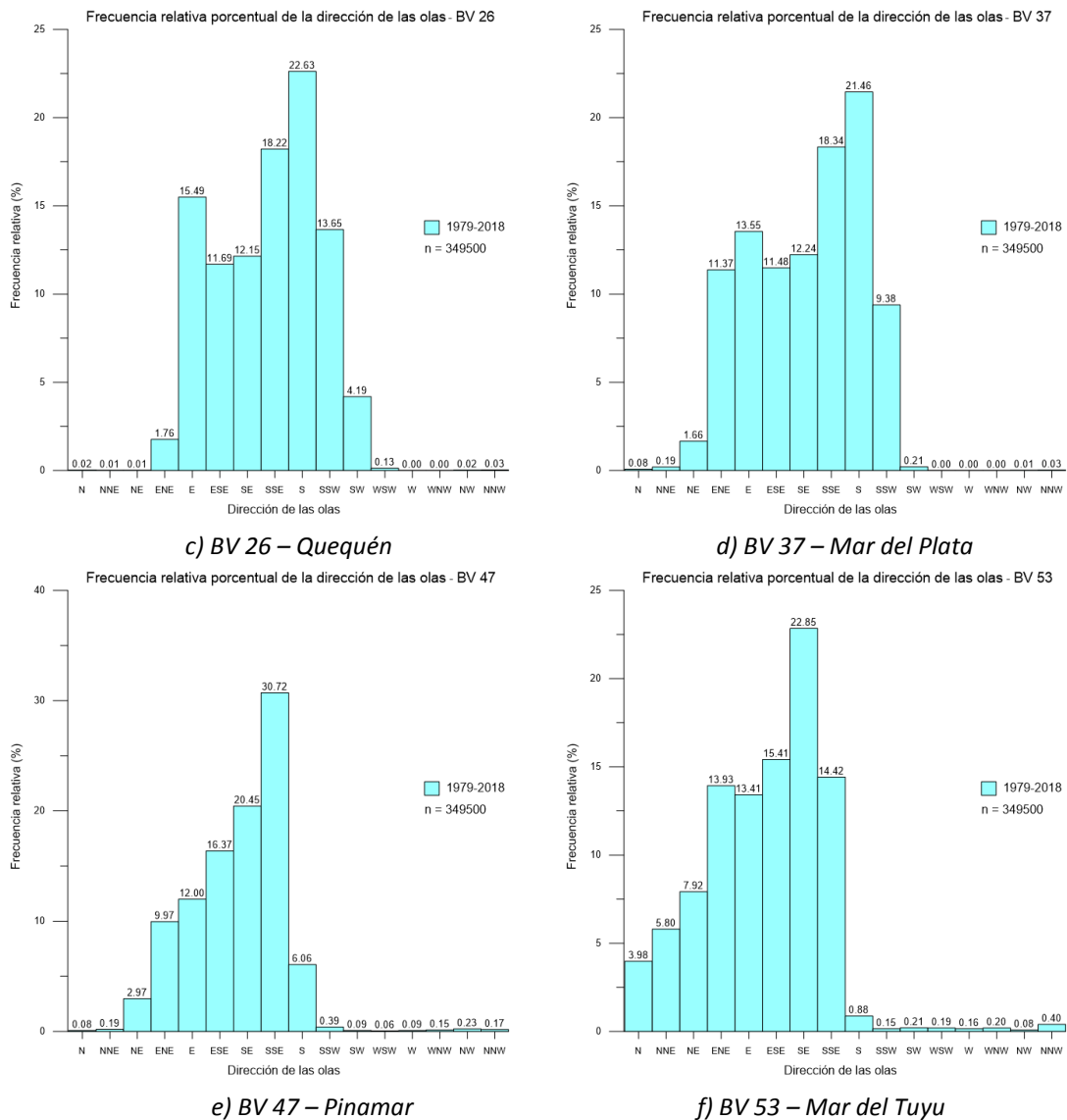


Figura 5.18. Distribución de frecuencias para las direcciones de propagación del oleaje

5.4.2 Análisis de valores extremos

Este análisis fue realizado utilizando las series de niveles máximos anuales correspondientes a las 6 boyas virtuales seleccionadas para caracterizar el clima de olas en los tres sectores de la costa bonaerense (*Sudoeste, Central y Noreste*).

La Figura 5.19 muestra en formato de gráficos de cajas la distribución de los valores de altura significativa de oleaje (H_s) que conforman cada una de las series de datos analizadas. Este esquema permite interpretar las diferencias en cuanto a la magnitud de las alturas máximas anuales del oleaje en cada sector, donde predominan claramente los valores que corresponde a las ubicaciones de Quequén (BV26) y a Mar del Plata (BV37).

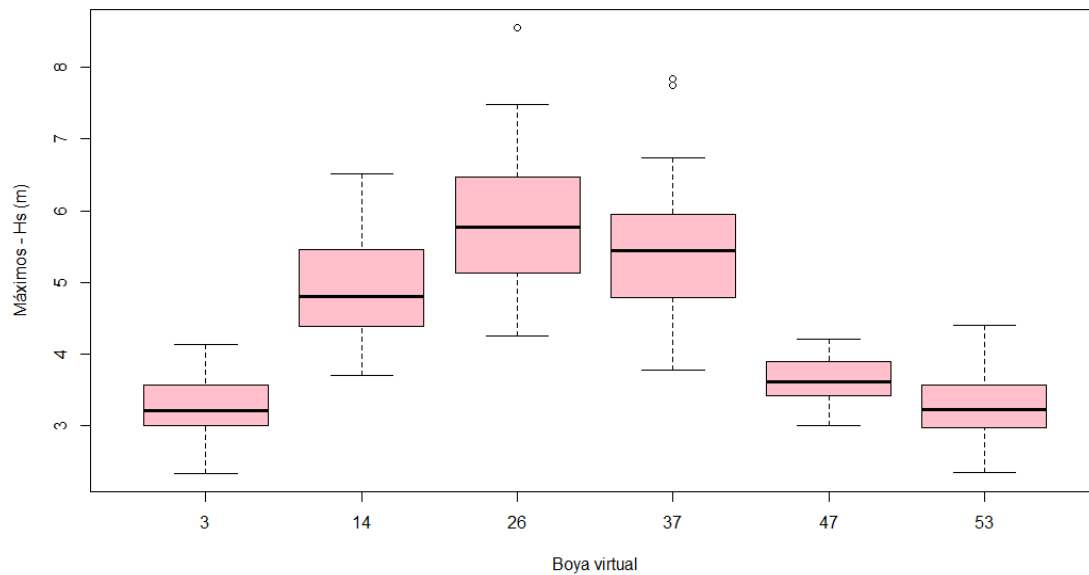


Figura 5.19. Series de valores máximos anuales de Hs (m)

Una síntesis que caracteriza estadísticamente las series de datos utilizadas para el análisis se presenta en la Tabla 5.3, donde se indican valores de Hs máximos y mínimos, la mediana, la media y los cuartiles (Q1 y Q3) para cada distribución.

Tabla 5.3. Valores estadísticos de Hs (m) para las series de máximos anuales

Parámetro estadístico	Boya Virtual					
	BV3	BV14	BV26	BV37	BV47	BV53
Mínimo	2.34	3.71	4.26	3.78	3.01	2.35
Q1 (25%)	3.04	4.39	5.15	4.80	3.43	2.99
Mediana	3.22	4.81	5.78	5.45	3.61	3.23
Media	3.28	4.96	5.87	5.46	3.62	3.30
Q3 (75%)	3.53	5.46	6.45	5.92	3.90	3.54
Máximo	4.14	6.52	8.55	7.83	4.21	4.40

Cada serie de datos fue sometida a un análisis de extremos, ajustándose a una función de Distribución Generalizada de Valor Extremo (GEV). En todos los casos se utilizó el método de Método de Máxima Verosimilitud (MLE) para estimar los parámetros de ajuste, obteniéndose en general un ajuste satisfactorio. En la Tabla 5.4 se presenta el resultado final del procedimiento de ajuste, señalando los valores de altura significativa del oleaje (Hs) asociado a diferentes períodos de retorno para cada una de las series de datos analizadas.

Tabla 5.4. Resultados del ajuste de valores extremos. Relación entre Hs (m) y período de retorno TR.

TR (años)	Boya Virtual					
	BV3	BV14	BV26	BV37	BV47	BV53
2	3.28	4.84	5.72	5.31	3.96	3.24
5	3.63	5.46	6.60	6.20	4.34	3.67
10	3.82	5.87	7.18	6.79	4.53	3.92
20	3.96	6.26	7.74	7.36	4.69	4.16
50	4.10	6.77	8.46	8.09	4.86	4.43
100	4.19	7.15	9.00	8.64	4.96	4.63

6 TRANSPORTE LITORAL

6.1 Introducción

El transporte litoral de los sedimentos a lo largo de la costa constituye una de las variables fundamentales para la caracterización morfológica del área de estudio. Este proceso depende fundamentalmente de la acción de las olas propagadas hasta las zonas costeras y de la variación de los niveles de la marea.

En este capítulo se presenta el desarrollo de una modelación numérica orientada a la estimación de tasas de transporte de sedimentos a lo largo de la costa bonaerense, identificando fundamentalmente volúmenes anuales correspondientes a los principales centros urbanos y áreas de interés.

La información necesaria para evaluar el transporte litoral incluye cuatro componentes principales, a saber:

- Características de oleaje
- Variaciones de los niveles de mar
- Geometría del perfil de playa
- Características granulométricas de los sedimentos

La definición de los perfiles sobre los cuales se desarrollaron los cálculos se realizó mediante la utilización de la información batimétrica disponible en la Base de Datos generada en esta Asistencia Técnica (cartas batimétricas del SHN y perfiles de playa observados por el Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario de la Universidad Nacional de Mar del Plata, IGGCC-UNMdP). Al mismo tiempo, se recopiló una importante cantidad de información referida a la granulometría de los sedimentos en las zonas costeras asociadas a dichos perfiles.

Para la caracterización del oleaje y las variaciones de nivel del mar se utilizó la fuente de datos generada mediante el análisis retrospectivo (*hindcast*) presentado en capítulos anteriores, lo cual constituye una información de base sumamente apropiada para el desarrollo de este análisis.

6.2 Modelo de transporte litoral

6.2.1 Software

El Sistema LITPACK se encuentra diseñado para abordar la problemática vinculada al análisis de los cambios morfológicos de largo plazo sobre una línea de costa, lo cual requiere una comprensión del transporte litoral en la región de estudio. LITPACK es una herramienta de

modelación que se utiliza para el estudio de cambios morfológicos en costas con perfiles de playa cuasi-uniformes donde los cambios de la línea de costa son graduales. LITPACK permite determinar la hidrodinámica del escurrimiento producido por las olas y las corrientes, y los fenómenos responsables de los movimientos de sedimentos en la costa. Basado en estas condiciones es posible predecir la evolución natural de la línea de costa y la influencia de modificaciones debido al uso de estructuras marinas como puertos, espigones, muelles, revestimientos, etc.

LITPACK está compuesto por una serie de programas de cálculo (módulos STP, LITDRIFT y LITLINE). El módulo STP (modelo de transporte) y los módulos LITDRIFT (modelo numérico determinístico integral que calcula las corrientes a lo largo de la costa, la deriva litoral y el balance de sedimentos) y LITLINE (modelo de evolución de costas) representan los procesos físicos principales de esta dinámica.

El modelo STP calcula el transporte total de sedimentos (qt) como la suma del transporte de fondo (qb) y el transporte en suspensión (qs). El transporte de material cohesivo como carga de fondo es calculado por el modelo de Engelund y Fredsøe (1976) que, a través de desarrollos posteriores, ha sido mejorado para cubrir la combinación de olas y corrientes, y las condiciones de la zona de rotura. El transporte de fondo es determinado en función de la tensión de corte por medio del parámetro de Shields θ :

$$\theta = \frac{U_f^2}{(s-1)gd}$$

donde s es la densidad relativa de sedimento, g la aceleración de la gravedad, d el diámetro del grano y U_f la velocidad de corte. El método asume que el transporte de fondo corresponde a la tensión de corte instantánea inducida por la acción de olas y la corriente. El transporte en suspensión q_s se describe por medio de la concentración de sedimentos C , la cual es determinada por la ecuación de difusión turbulenta vertical:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z}) + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

donde t es el tiempo, z la coordenada vertical, ε_s el coeficiente de difusión turbulenta, y w la velocidad de caída del sedimento. El factor ε_s se toma igual a la velocidad turbulenta de remolino del campo de flujo. La condición de borde cerca del fondo está dada como la concentración C_b para un nivel $z = 2d$, siendo d el tamaño del grano. El transporte de sedimentos suspendidos promedio q_s sobre un periodo T , se calcula como el producto de la concentración y la velocidad de flujo, integrados en el tiempo y en la vertical (entre $2d$ y la profundidad D ; Hedegaard et al., 1988):

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D C U dy dt$$

6.2.2 Perfiles

La lista de perfiles seleccionados para este estudio se presenta en la Tabla 6.1. La misma señala la orientación de la costa en cada ubicación, junto con el diámetro medio del sedimento D_{50} (en los casos en los que se encontró disponible dicha información), y la denominación de la boya virtual más cercana utilizada para el cálculo.

Tabla 6.1. Perfiles seleccionados para el cálculo del transporte litoral

<i>Partido</i>	<i>Nombre del perfil</i>	<i>Orientación [°]</i>	<i>D_{50} [mm]</i>	<i>Boya virtual</i>
La Costa	Almejas (San Clemente)	64.41	0.21	55
	Santa Teresita (Calle 32)	89.37	0.20	53
	Mar del Tuyú (Calle 58)	87.8	0.20	53
	San Bernardo (Calle Andrade)	89.43	0.20	52
	Punta Médanos	121.38	0.19	50
Pinamar	Pinamar Golf Club	121.09	0.34	47
	Balneario Cozumel (Cariló)	121.09	0.28	47
Villa Gesell	Calle 107	123.85	0.54	46
	Mar Azul	115.73	0.48	45
Mar Chiquita	Calle San Martín	128.3	0.30	40
	Av. Mar de Cobo	126.04	0.35	40
	Camet Norte	123.98	0.36	39
	Santa Clara del Mar	121.4	0.48	39
	La Manada	106.94	0.34	39
General Pueyrredón	Parque Camet	102.25	0.56	39
	Punta Mogotes	102.71	0.52	38
	Honu Beach	117.16	0.56	37
	Chapadmalal	137.91	0.43	35
General Alvarado	HR (Miramar)	134.46	0.29	34
	Balneario Cocoloco	146.96	0.35	32
Lobería	Arenas Verdes Oeste	167.09	0.59	27
Necochea	Costa Bonita	166.18	0.30	26
	Bahía de los Vientos	166.29	0.30	26
	Av. 75 Necochea	163.57	0.22	25
	Balneario Kabryl	157.02	0.23	25
San Cayetano	San Cayetano Parador	168.93	0.30	19
Tres Arroyos	Orense	158.21	0.25	16
	Balneario Barlovento (Dunamar)	173.00	0.20	14

	Reta Calle 48	166.79	0.32	11
Monte Hermoso	Faro Recalada	186.64	0.20	3
Coronel Rosales	Pehuén Co	173.68	0.20	1

La recopilación de información granulométrica incluyó la revisión de un número importante de trabajos locales en los cuales se presentan diferentes descripciones sobre las playas de la costa bonaerense, como es el caso de: Bértola (2006), Bértola et al. (2009 y 2013), Bustos et al. (2011), Medina et al. (2016), Merlotto et al. (2013), Spalletti et al. (1979). Para los casos en los que no se contó con información granulométrica, se adoptó el valor de $D_{50} = 0,2$ mm para el desarrollo del cálculo.

La Figura 6.1, Figura 6.2 y Figura 6.3 muestran la distribución de los sitios seleccionados para el cálculo de transporte de sedimentos a lo largo del frente costero de la provincia de Buenos Aires. En éstas se puede apreciar la ubicación de cada perfil analizado junto con la posición de la boya virtual más cercana, utilizada en cada caso como fuente de información de oleaje y niveles de marea.

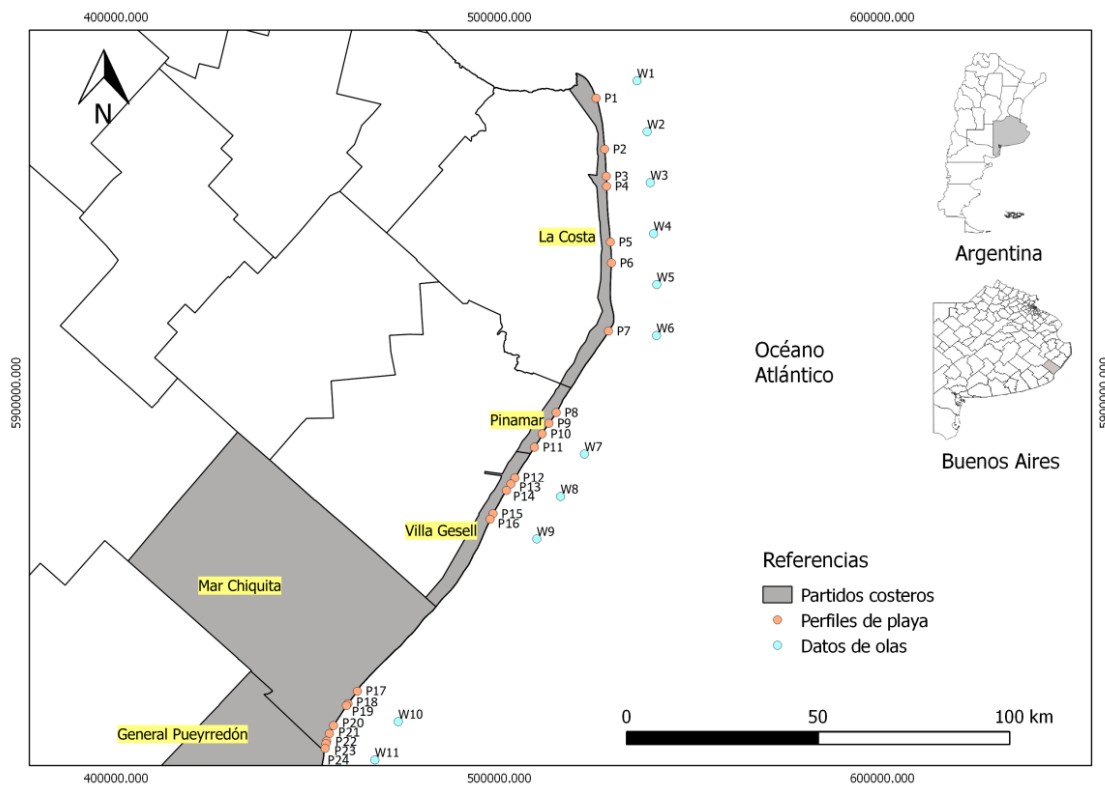


Figura 6.1. Partidos, perfiles de playa observados y boyas virtuales. Sector noreste.

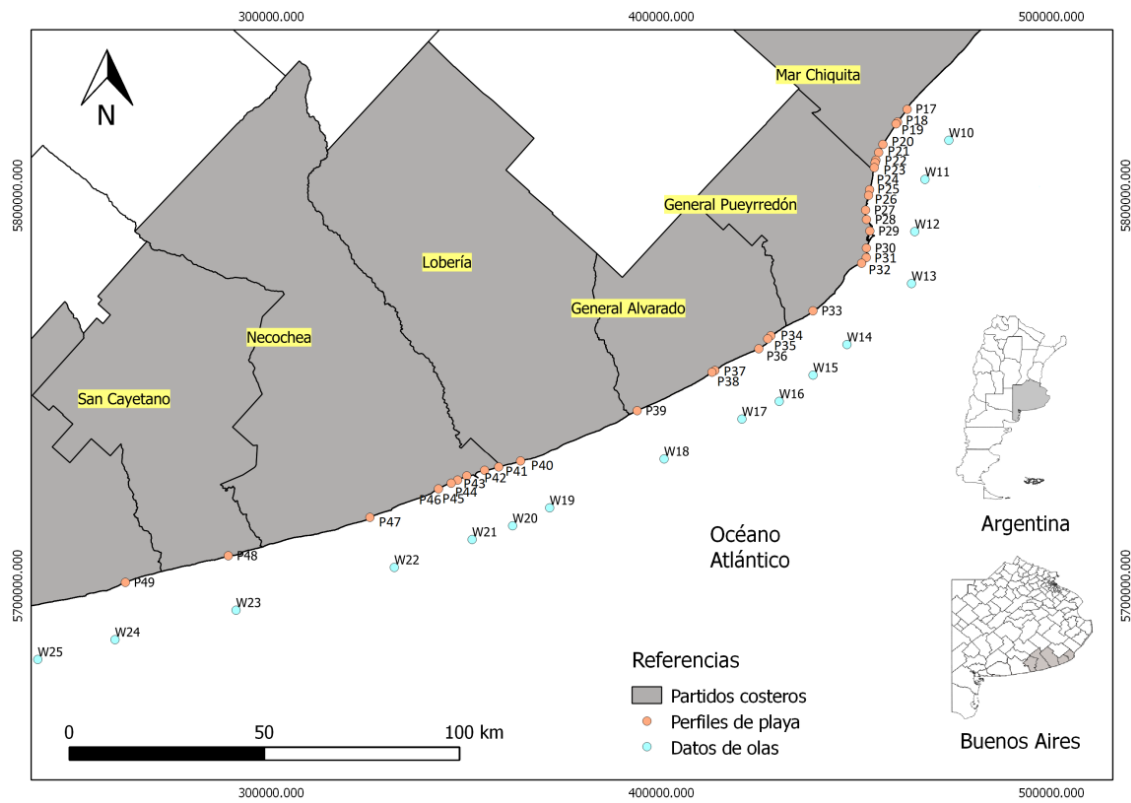


Figura 6.2. Partidos, perfiles de playa observados y boyas virtuales. Sector central (entorno Mar del Plata).

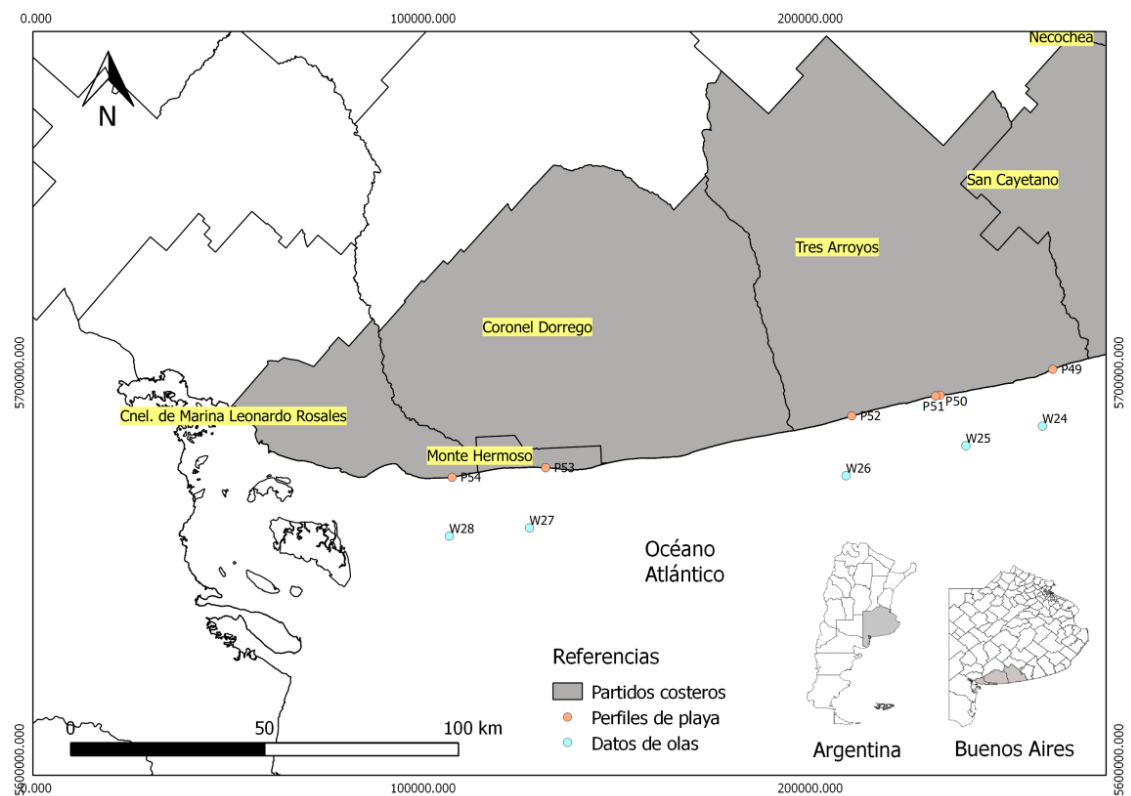


Figura 6.3. Partidos, perfiles de playa observados y boyas virtuales. Sector sudoeste.

La Figura 6.4 muestra el desarrollo de diferentes perfiles que representan la variación de la profundidad (referida al cero IGN) a lo largo de una progresiva de 10 kilómetros. Estos perfiles se presentan agrupados por zona para caracterizar las diferencias batimétricas observadas entre el sector noreste, el sector central, y el sector sudoeste de la costa bonaerense, respectivamente.

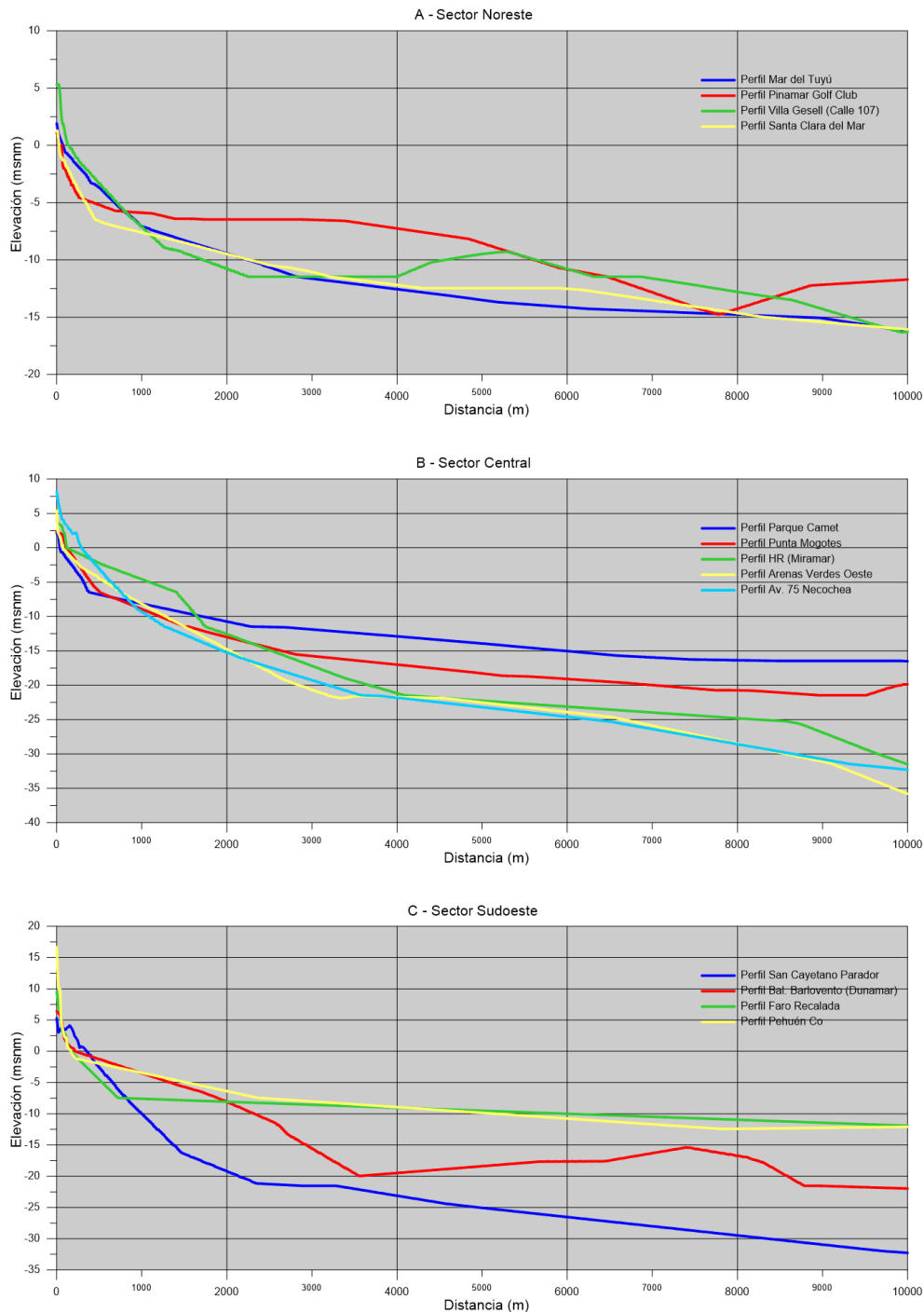


Figura 6.4. Perfiles batimétricos característicos de tres sectores de costa diferentes.

La comparación entre los perfiles de cada sector señala las diferencias que existen en las variaciones de profundidad de cada sector. Puede observarse que, en términos generales, las mayores profundidades corresponden al sector central, en la zona comprendida entre aproximadamente entre Mar del Plata y Necochea. A partir de allí las profundidades se reducen hacia el noreste y hacia el sudeste.

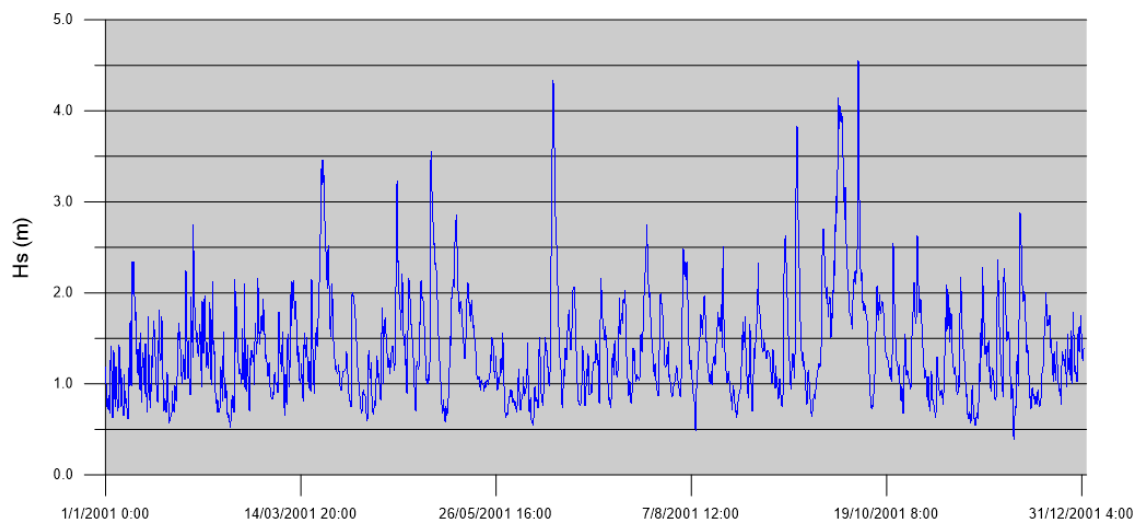
Estas características inciden fundamentalmente en la propagación de las olas desde la zona de ubicación de las boyas virtuales y, en consecuencia, tienen efecto sobre el transporte potencial de los sedimentos en el área costera en cada caso.

6.3 Series

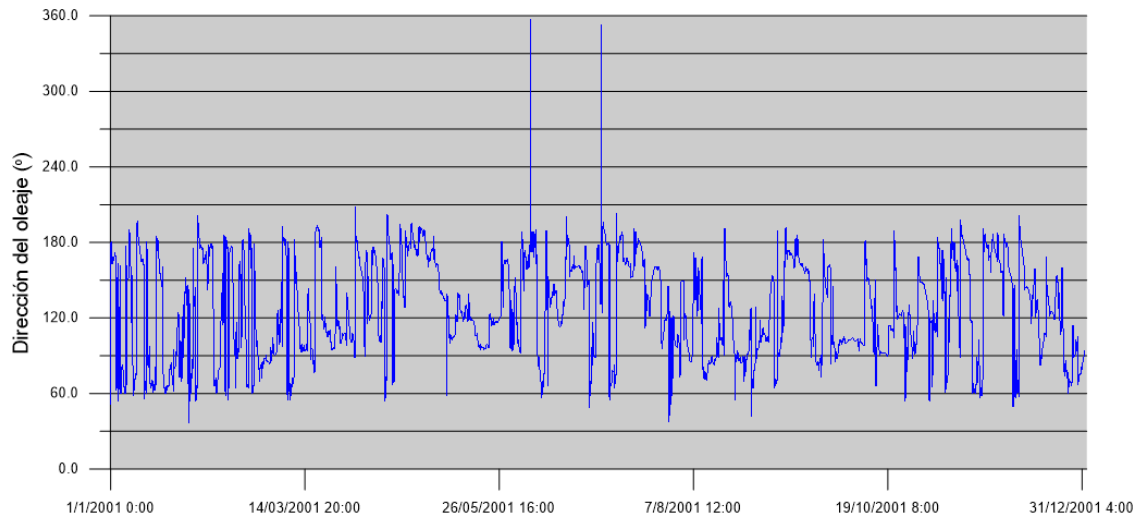
Para el cálculo del transporte litoral de sedimentos se utilizaron series cronológicas de olas y niveles correspondientes al período 2007-2016, realizando el análisis sobre la base de 10 años de información continua.

La Figura 6.5 muestra la variación temporal de las variables principales utilizadas para el cálculo tomando como ejemplo la información suministrada por la Boya Virtual 38 (Avenida Luro, Mar del Plata). Estos gráficos presentan un año completo (2001) de información continua de altura de ola, dirección del oleaje y niveles de marea.

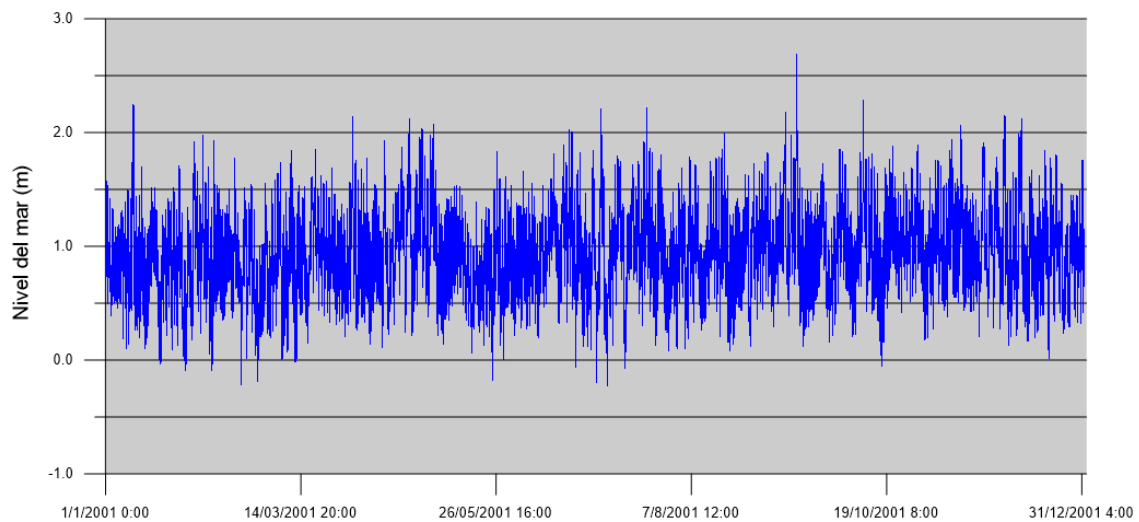
Para cada perfil se utilizó la información suministrada por la boya virtual más cercana. Como se indicó anteriormente, existe una variación significativa del clima de olas a lo largo de los 400 km de costa en estudio, lo cual también incide sensiblemente sobre el cálculo del transporte litoral.



a) Serie de alturas significativa del oleaje. Boya virtual 38, año 2001



b) Serie de dirección del oleaje. Boya virtual 38, año 2001



c) Serie de niveles de marea. Boya virtual 38, año 2001

Figura 6.5. Series temporales Información hidrodinámica utilizadas para el cálculo.

6.4 Resultados

La aplicación de la modelo modelación del transporte litoral demandó la definición sobre una serie de opciones y parámetro para la ejecución del cálculo, los mismos se encuentran sintetizados en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Definición de parámetros para la aplicación del software LITPACK.

Opciones de cálculo	Valores adoptados
<i>Sediment description</i>	Single. Implica que el cálculo de la deriva litoral se basa en el tamaño medio del grano D_{50} y en la velocidad media de asentamiento que se especificaron para los perfiles.
<i>Ripples</i>	Included. Esto significa que se incluye el efecto de los <i>ripples</i> sobre la tensión de corte en el fondo. Los <i>ripples</i> se describen mediante cuatro parámetros con los siguientes valores: $C1=0.1$, $C2=2$, $C3=16$, $C4=3$.
<i>Sediment transport parameters</i>	Densidad relativa del sedimento: 2.65 Parámetro crítico de Shields: 0.045 Porosidad del sedimento: 0.4
<i>Sediment calculation parameters</i>	Teoría de olas: Stokes (1 ^{er} orden). Términos convectivos: Incluidos. Descripción de la concentración de fondo: Determinístico.

La Figura 6.6 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos de la aplicación de LITPACK. En la misma se presentan valores medios anuales de transporte de sedimentos para el perfil de Punta Mogotes (Mar del Plata), graficándose la variación de los mismos en función de la distancia a la costa.

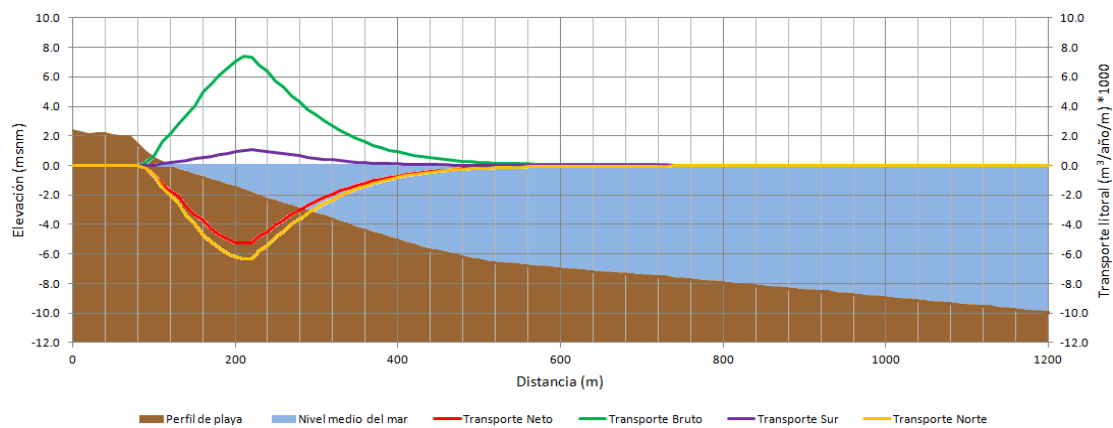


Figura 6.6. Volúmenes medios anuales de transporte. Resultado del cálculo sobre el perfil de Punta Mogotes (Mar del Plata).

La convención adoptada implica que los volúmenes de transporte que se movilizan en sentido noreste-sudoeste son identificados con signo positivo y los volúmenes de transporte que se movilizan en sentido sudoeste-noreste son identificados con signo negativo.

En la Tabla 6.3 se presentan los volúmenes medios anuales obtenidos para la totalidad de los perfiles estudiados. En la mayoría de los casos el transporte neto resulta en sentido sudoeste-noreste, con la excepción del tramo de costa comprendido entre los Partidos de Tres Arroyos y

Coronel Rosales, donde los resultados de este estudio indican una tasa de transporte neta en sentido contrario.

Tabla 6.3. Volumen medio anual.

<i>Partido</i>	<i>Perfil</i>	<i>Bruto [m³]</i>	<i>Neto [m³]</i>
La Costa	Almejas (San Clemente)	522386	-295241
	Santa Teresita (Calle 32)	827388	-414372
	Mar del Tuyú (Calle 58)	768528	-407948
	San Bernardo (Calle Andrade)	1169610	-720222
	Punta Médanos	1814830	-834422
Pinamar	Pinamar Golf Club	730846	-394484
	Balneario Cozumel (Cariló)	754796	-383871
Villa Gesell	Calle 107	799722	-362438
	Mar Azul	799243	-477304
Mar Chiquita	Calle San Martín	893067	-418804
	Av. Mar de Cobo	762233	-369200
	Camet Norte	1258120	-664595
	Santa Clara del Mar	1030440	-570439
	La Manada	1002250	-774065
General Pueyrredón	Parque Camet	1088460	-877300
	Punta Mogotes	1258670	-942076
	Honu Beach	1763800	-979088
	Chapadmalal	1341490	-596297
General Alvarado	HR (Miramar)	1223690	-629006
	Balneario Cocoloco	1136070	-431940
Lobería	Arenas Verdes Oeste	1167600	-160855
Necochea	Costa Bonita	1177910	-137783
	Bahía de los Vientos	1162390	-179761
	Av. 75 Necochea	2832210	-948589
	Balneario Kabryl	1834940	-781908
San Cayetano	San Cayetano Parador	1207570	-60208.5
Tres Arroyos	Orense	966584	-365114
	Balneario Barlovento (Dunamar)	1189700	214936
	Reta Calle 48	658009	78969
Monte hermoso	Faro Recalada	706954	549203
Coronel Rosales	Pehuén Co	316896	222273

El análisis de los resultados en escala regional muestra que el sector central de la costa bonaerense presenta las tasas de transporte potencial más elevadas, con valores cercanos a

volúmenes netos medios anuales de 1.000.000 m³ en las zonas de Mar del Plata y Necochea. Estos valores disminuyen, en términos generales, hacia ambos extremos, mostrando tanto en la región del Partido de la Costa como en Monte Hermoso / Pehuén Co volúmenes que pueden variar localmente entre 250.000 m³ y 750.000 m³, según sea el caso.

La Figura 6.7 muestra los resultados obtenidos presentando la distribución de las tasas netas del transporte de sedimentos a lo largo del tramo costero estudiado.

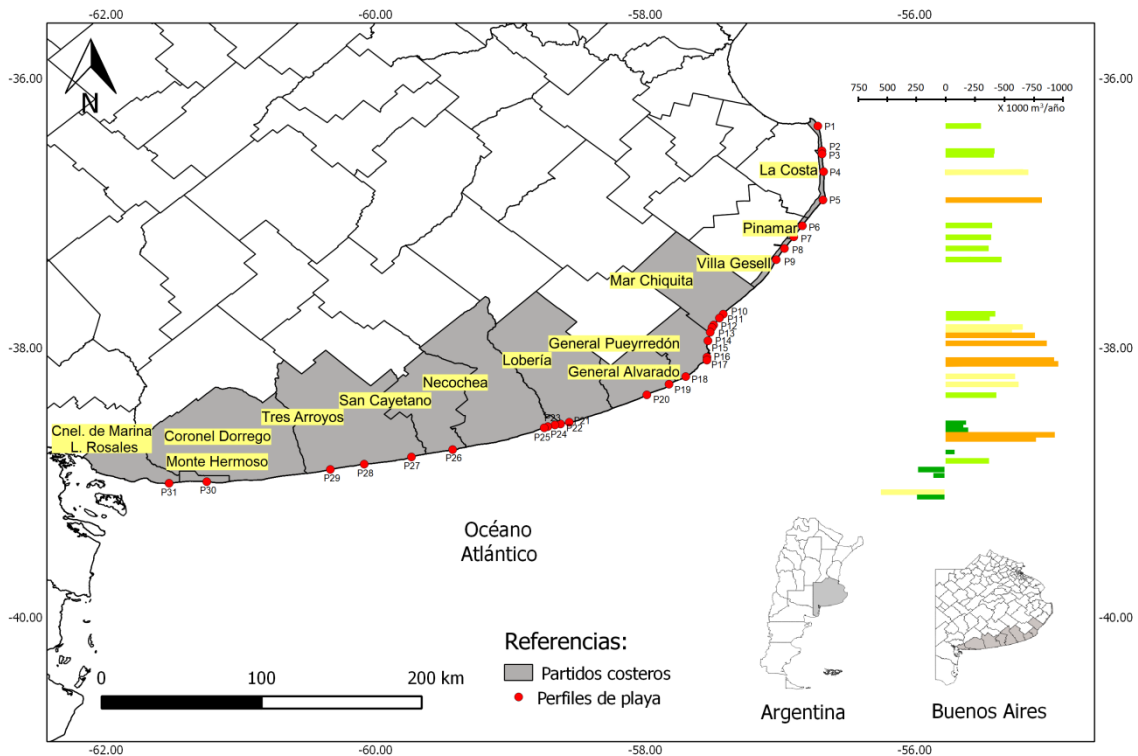


Figura 6.7. Partidos y tasas de transporte asociadas a los perfiles de playa observados.

Este conjunto de estimaciones realizadas para transporte litoral permiten identificar distintas situaciones a lo largo de la costa de la provincia de Buenos Aires que, en líneas generales, muestran similitudes con los resultados obtenidos por otros autores a pesar de las diferencias en las metodologías empleadas para el cálculo.

A lo largo del Partido de la Costa, se obtuvieron tasas netas de transporte de sedimentos del orden 300.000 m³/año en Punta Rasa y alrededor de 400.000 m³ para Santa Teresita y Mar del Tuyú, superando los 700.000 m³/año a partir de San Bernardo y hasta Punta Médanos. Verón y Bértola (2014), quienes utilizaron el método del flujo de energía para el cálculo de la deriva litoral, estimaron valores de transporte de entre 500.000 y 750.000 m³ para la zona litoral de este partido en el año 2009.

En los partidos de Pinamar, Villa Gesell y Mar Chiquita, los perfiles de playa evaluados arrojaron valores de deriva litoral hacia el noreste en el rango de 360.000 y 780.000 m³. Framiñan (1990) y Caviglia et al. (1992) estimaron para esta zona tasas de transporte de entre 250.000 y 700.000

m³. Verón y Bértola (2014), en cambio, obtuvieron valores más acotados de entre 500.000 y 750.000 m³.

Si tomamos el sur del partido Mar Chiquita, el partido de General Pueyrredón y el norte del partido de General Alvarado, tenemos los valores más altos de transporte de sedimentos (596.000-980.000 m³/año). Verón y Bértola (2014) obtuvieron para esta misma franja el mayor flujo de energía neto para el transporte de sedimentos, con una deriva potencial asociada de entre 750.000 y 1.000.000 m³/año y un máximo de 1.250.000 al norte de Mar del Plata. Framiñan (1990) y Caviglia et al. (1992) estimaron para los partidos de General Pueyrredón y General Alvarado una deriva litoral con dirección norte de entre 170.000 y 800.000 m³.

Hacia el sur, entre Miramar y Monte Hermoso, Verón y Bértola (2014) reportan una reducción paulatina del transporte al punto de ser la zona litoral con las tasas más bajas (0-500.000 m³/año). Aquí los resultados difieren, ya que si bien se obtuvieron los valores más bajos (e.g., 60.209 m³/año en el perfil San Cayetano Parador), también se encontró que la deriva litoral muestra sentido noreste-sudoeste en el tramo Claromecó (perfil Balneario Barlovento) - Pehuén Co. Además, se calcularon valores altos para los perfiles Av. 75 Necochea (948.589 m³/año) y Balneario Kabryl (781.908 m³/año). Esta situación se puede relacionar con el pico de energía descrito por Framiñan (1987) entre Claromecó y Necochea. Al respecto, Framiñan (1990) y Caviglia et al. (1992) estimaron máximos de 1.350.000 m³/año en los partidos de Lobería y Necochea.

En un trabajo con objetivos similares, Echeverría et al. (2018) estudiaron el flujo neto de energía de las olas (*PI*) para la costa de la provincia de Buenos Aires en el periodo 1980-2012. Al existir una relación directa entre *PI* y el transporte litoral, es posible realizar una comparación con los resultados obtenidos en esta asistencia técnica.

El máximo *PI* hallado por estos autores corresponde a un punto ubicado a 40 km al sur de Necochea; desde allí, hacia el sur, *PI* se reduce hasta llegar a su mínimo en Pehuén Co; en dirección norte, *PI* decrece muy levemente hacia Mar del Plata. Esta zona de alta energía que va desde Mar del Plata hasta el sur de Necochea, comienza más hacia el sur y es más amplia de lo que indican las tasas de transporte de sedimentos calculadas. A partir de Mar del Plata, *PI* decrece de manera importante hasta Punta Rasa, tendencia que sólo es interrumpida por un leve pico de energía a la altura de Punta Médanos. Efectivamente, los resultados muestran que la deriva litoral se reduce desde Mar del Plata hacia el norte, pero no sin antes volver a crecer en torno a Punta Médanos (834.422 m³/año). Cabe resaltar también que, en algunos tramos del sector litoral noreste, la dirección del flujo de energía mostró sentido sur según Echeverría et al. (2018). Sobre este punto, las simulaciones realizadas con LITDRIFT arrojaron en cada uno de los perfiles que la dirección de la deriva litoral siempre tiene sentido noreste.

7 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo se detallan a continuación:

- Los datos de viento sobre el mar del reanálisis CFSR mostraron un buen nivel de acuerdo con las observaciones disponibles para la zona de estudio. Este buen desempeño incluye las zonas próximas a la costa y contempla a los valores más altos asociados a eventos extremos. Este análisis, ha validado la utilización del viento de reanálisis CFSR como forzante de los modelos numéricos hidrodinámicos y de oleaje de escala regional implementados para atender los objetivos de esta Asistencia Técnica.
- Se generó un análisis retrospectivo (*hindcast*) de niveles de alta resolución espacial para la costa marítima de la Provincia de Buenos Aires cubriendo un período de 31 años (1985-2016). Este *hindcast* se basó en la implementación de un modelo hidrodinámico local, calibrado y validado en base a información de niveles medidos en diversas estaciones de la costa y datos de altimetría satelital.
- El modelo hidrodinámico implementado considera las principales características de la dinámica de la zona, marea astronómica y meteorológica, y forzantes meteorológicos locales. Este modelo es forzado en su frontera oceánica por un modelo hidrodinámico regional (ASTide) implementado para representar la propagación de la marea en el Atlántico Sur. Dicho modelo regional reproduce con buena calidad la propagación de la marea astronómica, con errores relativos de 4% y 6% en las estaciones de Puerto Deseado y Puerto Madryn. Así mismo es capaz de reproducir adecuadamente la generación y propagación de la marea meteorológica, mostrando el incremento de la misma desde las estaciones del sur Puerto Deseado y Puerto Madryn hasta la zona de interés representada por Mar del Plata (error en la marea total de 0,18m y 10% relativo).
- La calibración del modelo hidrodinámico local tuvo en cuenta el comportamiento de la marea astronómica en varias estaciones a lo largo de la zona costera de interés y el comportamiento de la marea real en la estación de Mar del Plata. Luego de calibrado, se validaron sus resultados en un período de tiempo más extenso y en la misma estación con datos disponibles de marea real. Los resultados obtenidos durante la validación en la estación de Mar del Plata presentan un BIAS de 4 cm, un error medio cuadrático centrado de 19 cm (11% relativo), y una correlación 0,9. La comparación con datos de altimetría satelital muestra que la calidad de los resultados obtenidos en la estación de Mar del Plata es similar en el resto de la zona de interés, y es muy satisfactoria

considerando que se trata de un cuerpo de agua con una dinámica con gran influencia de la marea meteorológica.

- Se desarrolló un hindcast de oleaje que provee resultados con una resolución espacial de 5' (~8 km) y temporal de 1h en un dominio que contiene a la costa oceánica de la provincia de Buenos Aires.
- El hindcast fue validado a partir de la comparación con datos altimétricos. La comparación mostró un buen nivel de acuerdo con las observaciones disponibles en toda la zona de estudio. Este buen desempeño incluye las zonas próximas a la costa y contempla a los valores más altos asociados a eventos extremos. De esta forma, se proporciona una base de datos fiable a partir de la cual es posible caracterizar la dinámica del oleaje en la zona de estudio asociada al estado presente del clima.
- Se realizó en cada una de las boyas virtuales un análisis de las series históricas de las variables asociadas a la dinámica costera (viento, niveles y oleaje). Se analizó la intensidad y dirección de los vientos, los niveles de marea y un estudio de la ocurrencia de ondas de. Por último, se obtuvo un clima de olas frecuente y un análisis de valores extremos de olas.
- Las intensidades de los vientos de mayor ocurrencia para toda la costa marítima bonaerense se ubican en el rango 6 a 10 m/s. Los vientos más intensos, preponderantemente en el rango 10 a 20 m/s, se presentan en general con componentes Sudoeste desde Pehuén Co hasta Mar del Plata y Sur desde Mar del Plata a Mar del Tuyu.
- Se observan niveles medios similares a lo largo de toda la porción costera. En la zona central (entorno de Mar del Plata) se dan las amplitudes menores, mientras que hacia el sur y hacia el norte aumentan.
- No se observan tendencias en la ocurrencia de eventos de tormenta. Solo se ve una modificación para los últimos 5 o 10 años en la cantidad y la duración de los eventos de tormenta que superan el umbral de los 2 m, encontrándose una cantidad considerablemente mayor.
- La distribución de altura significativa del oleaje muestra que los valores más frecuentes para el sector sudoeste se dan en el rango de 0.50 a 1.25, en el Sector Central se ve un rango más acotado entre 1,00 y 1.25 m, y en el sector noreste predomina el rango de 0.75 a 1.00 m.
- El análisis de la estadística de los períodos de pico del oleaje muestra para el caso del sector sudoeste valores dispersos entre 2 y 12 s, mientras que para el sector central la concentración es bien marcada en el rango de 6 a 12 s (predominando el intervalo de 8

a 10 s), y el sector noreste muestra una dispersión importante entre los valores de 4 y 12 s.

- Al analizar valores extremos de altura de oleaje, se observaron los valores máximos en la zona central, en coincidencia con las ubicaciones de Quequén y Mar del Plata, y adoptando valores máximos medios del orden de los 6 m.
- Se logró calcular la deriva litoral, a partir de la información de 31 perfiles topobatimétricos distribuidos a lo largo del frente costero marítimo de la provincia de Buenos Aires y utilizando la información de oleaje y niveles de marea de la boya virtual más próxima.
- En la mayoría de los perfiles estudiados, el transporte neto resulta en sentido sudoestenoeste, con la excepción del tramo de costa comprendido entre los Partidos de Tres Arroyos y Coronel Rosales, donde los resultados indican una tasa de transporte neta en sentido contrario.
- El análisis de los resultados de la deriva litoral a escala regional muestra que el sector central de la costa marítima bonaerense presenta las tasas de transporte potencial más elevadas en las zonas de Mar del Plata y Necochea. Estos valores disminuyen, en términos generales, hacia ambos extremos.

REFERENCIAS

- Alonso, R., Santoro, P., & Solari, S. (2018). New wave hindcast for the Río de la Plata Estuary. Proceedings of 36th Conference on Coastal Engineering, Baltimore, Maryland, 2018.
- Andersen, O. B., Knudsen, P., Kenyon, S., Factor, J. K., & Holmes, S. (2017). Global gravity field from recent satellites (DTU15) - Arctic improvements. *First Break*, 35(12), 37-40.
- Amante, C. and B.W. Eakins, 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5C8276M [access date].
- Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A., Filipot, J.-F., Magne, R., Roland, A., ... Collard, F. (2009). Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves: Part I, definition, calibration and validation, (1). <https://doi.org/10.1175/2010JPO4324.1>
- Babanin, A. V., Chalikov, D., Young, I. R., & Savelyev, I. (2010). Numerical and laboratory investigation of breaking of steep two-dimensional waves in deep water. *Journal of Fluid Mechanics*, 644(February 2010), 433–463. <https://doi.org/10.1017/S002211200999245X>
- Babanin, A. V., & Haus, B. K. (2009). On the Existence of Water Turbulence Induced by Nonbreaking Surface Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 39(10), 2675–2679. <https://doi.org/10.1175/2009JPO4202.1>
- Babanin, A. V. (2006). On a wave-induced turbulence and a wave-mixed upper ocean layer. *Geophysical Research Letters*, 33(20), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2006GL027308>
- Babanin, A. V., Ganopolski, A., & Phillips, W. R. C. (2009). Wave-induced upper-ocean mixing in a climate model of intermediate complexity. *Ocean Modelling*, 29(3), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.04.003>
- Bértola, G. (2006). Morfodinámica de Playas del Sudeste de la Provincia de Buenos Aires (1983 a 2004). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 13 (1): 31-57.
- Bértola, G.; Cortizo, L.; e Isla, F. (2009). Dinámica litoral de la costa de Tres Arroyos y San Cayetano, Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64 (4): 657-671.
- Bértola, G.; Merlotto, A.; Cortizo, L.; e Isla, F. (2013). Playas de Bolsillo en Mar Chiquita Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 70 (2): 267-278.
- Briere, C., Abadie, S., Bretel, P., Lang, P. (2007). Assessment of TELEMAC system performances, a hydrodynamic case study of Anglet, France. *Coast Eng*, 54, pp. 345–56.
- Bustos, M; Piccolo, M.; y Perillo, G. (2011). Efectos Geomorfológicos de Fuertes Vientos sobre Playas. El Caso de la Playa de Pehuén Co, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 37 (1): 121-142.
- Campos, R. M., & Alves, J. (2013). Estimating Extreme Waves in the South Atlantic Ocean Using Regional Frequency Analysis and Wave Model Hindcast Data, 2013.
- Chawla, A. and H. L. Tolman, 2007: Automated grid generation for WAVEWATCH III. Tech. Note 254, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 71 pp.
- Caviglia, F.; Pousa, J.; y Lanfredi, W. (1992). Transporte de Sedimentos: una alternativa de cálculo. II Congreso de Ciencias de la Tierra: 413-422
- Chawla, A. and H. L. Tolman, 2007: Automated grid generation for WAVEWATCH III. Tech. Note 254, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 71 pp.

- Codiga, D.L., 2011. Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp.
- Cox, A. T., Cardone V.J. and Swail V.R. (2011) "On the use of the Climate Forecast System Reanalysis Wind Forcing in Ocean Response Modeling". Proceedings of the 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and 3rd Coastal Hazards Symposium. Kholala coast, Hawaii October 31 – November 4, 2011.
- Echeverría, E.; Dragani, W.; y Wörner, S. (2018). A comprehensive study about alongshore wave energy flux in the coast of Buenos Aires, Argentina. *Journal of Coastal Conservation*.
- Engelund, F., Fredsoe, J. 1976. A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, 7(5), 293-306.
- Etala, P., (2009). Dynamic issues in the SE South America storm surge modeling. *Nat. Hazards* 51, 79–95.
- Filipot, J. F., & Ardhuin, F. (2012). A unified spectral parameterization for wave breaking: From the deep ocean to the surf zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(4), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2011JC007784>
- Fiore, M.E., D'Onofrio, E., Pousa, J.L., Schnack, E.J., Bértola, J.R., 2009. Storm surges and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. *Continental Shelf Research*, 29, 1643–1649.
- Fossati, M., Cayocca, F. & Piedra-Cueva, I., (2014). Fine sediment dynamics in the Río de la Plata. *Advanced Geosciences*. 39, 75-80.
- Framiñan M. (1987). Deriva litoral en la costa bonaerense. Informe final CONICET.
- Framiñan, M. (1990). Transporte de sedimentos en Pinamar, Provincia de Buenos Aires. II Jornadas de Oceanografía Física y XVI Reunión Científica de Geofísica y Geodesia de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas.
- Guillou, N., Chapalain, G. (2012). Modeling penetration of tide-influenced waves in Le Havre Harbor. *J Coast Res*. 28, pp.945–55.
- Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Erganzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A(8)*, 12, 95 pp
- Hedegaard, I.B., and Deigaard, R. 1988. A model for cross-shore sediment transport and coastal profile development. *Proceedings IAHR, 2nd International Symposium on Wave Research and Coastal Engineering*, Hannover.
- Hervouet, J.M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
- Huybrechts, N., Villaret, C., Lyard, F. (2012). Optimized predictive 2D hydrodynamic model of the Gironde estuary (France), *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 138 (4), pp. 312–322.
- Huybrechts, N., Villaret, C. (2013). Large scale morphodynamic modeling of the Gironde estuary, *Proc. Inst. Civ. Eng. Marit. Eng.* 166 (2), pp. 51-62.
- Jia, L., Wen, Y., Pan, S., Liu, J.T., Jiawei He (2015). Wave–current interaction in a river and wave dominant estuary: A seasonal contrast, *Applied Ocean Research*, Volume 52, pp. 151-166, ISSN 0141-1187, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2015.06.004>.
- Jones, JE, Davies, AM (2008). Storm surge computations for the west coast of Britain using a finite element model (TELEMAC). *Ocean Dyn* 58, pp. 337–63.
- Large, W. G., and S. Pond, 1981: Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Ocean.*, 11, 324-481

- Leckler, F., Arduin, F., Filipot, J. F., & Mironov, A. (2013). Dissipation source terms and whitecap statistics. *Ocean Modelling*, 70, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.03.007>
- Luo, J., Li, M., Sun, Z., O'Connor, B.A. (2013). Numerical modelling of hydrodynamics and sand transport in the tide-dominated coastal-to-estuarine region, *Mar. Geol.* 342, pp. 14-27.
- Lyard F., L. Carrere, M. Cancet, A. Guillot, N. Picot: FES2014, a new finite elements tidal model for global ocean, in preparation, to be submitted to *Ocean Dynamics* in 2016.
- Mateus, M., Neves, R. (Eds.), *Ocean Modelling for Coastal Management - Case Studies with MOHID*, IST Press, 2013.
- Medina, R.; Martínez, A.; Mormeneo, L.; y Richiano, S. (2016). Cambios Morfosedimentarios Causados por la Construcción de un Espigón en Camet Norte, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73 (2): 273-282.
- Merlotto, A.; Bértola, G.; y Piccolo, M. (2013). Clasificación morfodinámica estacional de playas del partido de Necochea, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciencias Marinas* 39 (4): 331-347.
- Ribal, A., & Young, I. R. (2019). 33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations. *Scientific Data*, 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0083-9>
- Santoro, P., Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (2013). Study of the meteorological tide in the Río de la Plata, *Cont. Shelf Res.*, 60, pp. 51-63.
- Saha, S., Moorthi, S.; Pan, H.-L.; Wu, X.; Wang, J. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. 91, No. 8, pp. 1015-1058.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., ... Becker, E. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185–2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- Sathish Kumar, S., Balaji, R. (2015). Effect of bottom friction on tidal hydrodynamics along Gulf of Khambhat, India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 154, 129.
- Scharroo, R., E. W. Leuliette, J. L. Lillibridge, D. Byrne, M. C. Naeije, and G. T. Mitchum, RADS: Consistent multi-mission products, in *Proc. of the Symposium on 20 Years of Progress in Radar Altimetry*, Venice, 20-28 September 2012, *Eur. Space Agency Spec. Publ.*, ESA SP-710, p. 4 pp., 2013.
- Spalletti, L. y Mazzoni, M. (1979). Caracteres Granulométricos de Arenas de Playa Frontal, Playa Distal y Médano de Litoral Bonaerense. *Asociación Geológica Argentina, Revista XXXIV* (1): 12-30.
- Stopa, J. E., Arduin, F., Babanin, A., & Zieger, S. (2016). Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models. *Ocean Modelling*, 103(July), 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.09.003>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. D7, April 2001, pp. 7183-7192.
- Thompson, R. O. R. Y. (1983) Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. *Journal of Physical Oceanography*, 13, 1077-1083.
- Verón, M. y Bértola, G. (2014). Aplicación del Método de Flujo de Energía en el Litoral de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* Vol. 21(1): 17-23
- Wessel, P. and W. Smith, 1996: A global self-consistent hierarchical high resolution shoreline database. *J. Geophys. Res.*, 101(B4), 8741-8743.
- WW3DG, the WAVEWATCH III® Development Group (2016). "User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 5.16". Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. + Appendices.
- Zieger, S., Babanin, A. V., Erick Rogers, W., & Young, I. R. (2015). Observation-based source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH. *Ocean Modelling*, 96(August 2016), 2–25. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.07.014>