



**SEDE EDUCATIVA UNIVERSITARIA
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR**



Trabajo Final Integrador para el curso de Hidrografía - Oceanografía

**Efecto de las Mareas Extraordinarias en los
principales apostaderos de la Armada: Puerto
Belgrano y Mar del Plata.**

Autor: TC Mariela del Milagro Choque
Tutor: TN Aníbal German Pistan

AÑO 2024

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO	5
1.1 Introducción	5
1.2 Objetivo	5
CAPÍTULO 2. INFORMACIÓN DE BASE.	6
CAPÍTULO 3. ÁREAS DE ESTUDIO.	16
3.1. Base Naval Puerto Belgrano	16
3.1.1. Descripción general	16
3.1.2. Descripción hidro-oceanografica	17
3.1.3. Meteorología.....	18
3.2. Base Naval Mar del Plata	18
3.2.1. Descripción general	18
3.2.2. Descripción hidro-oceanográfica.	20
3.2.3. Meteorología.....	21
CAPÍTULO 4. DATOS.	21
4.1. Datos mereográficos	21
4.2. Metodología y datos utilizados	23
4.3. Retardo de mareas y propagación	24
4.4. Descripción de eventos	26
4.4.1. BASE NAVAL PUERTO BELGRANO	26
4.4.2. BASE NAVAL MAR DEL PLATA.	35
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	45

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo:

Al Sr. Teniente de Navío Dn. Aníbal Germán Pistan, Jefe de Curso, a quien agradezco profundamente por su paciencia, tiempo y dedicación en el seguimiento de este trabajo, incluso en medio de sus exigentes responsabilidades diarias.

Al Departamento de Oceanografía, Sección Mareas, del Servicio de Hidrografía Naval, en especial al Sr. Fernando Oreiro y al Suboficial Principal Roberto Díaz, por su colaboración en la provisión de datos esenciales y su asesoramiento técnico.

Al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), cuya labor es fundamental para el monitoreo y análisis de los fenómenos meteorológicos que afectan nuestras costas.

A mis compañeros, amigos y familiares, por su constante apoyo y aliento en cada etapa de este trabajo.

RESUMEN

El presente trabajo analiza e interpreta las mareas extraordinarias registradas entre los años 2005 y 2023 en los principales puertos de la Armada Argentina: la Base Naval Puerto Belgrano y la Base Naval Mar del Plata. Estas mareas, que se desvían de los valores normales, se presentan con amplitudes fuera del rango esperado según las predicciones de las mareas astronómicas, lo que evidencia la influencia de factores externos, como meteorológicos y geográficos, en su comportamiento.

Para comprender la dinámica de las mareas, es importante conocer que el nivel instantáneo de la columna de agua, medido con un registrador de mareas, es el resultado de la interacción de tres componentes principales: el nivel medio, que corresponde a la altura promedio del mar en un período prolongado; la marea astronómica, generada por la atracción gravitatoria del Sol y la Luna; y el residuo meteorológico, que refleja las variaciones causadas por factores atmosféricos como el viento y la presión. Este residuo da lugar a fenómenos como las ondas de tormenta, los seiches y las olas, los cuales contribuyen significativamente a la complejidad del sistema mareal.

En concreto, para caracterizar la presencia de las mareas extraordinarias, tanto máximas como mínimas, y evaluar sus posibles efectos, se realizó un análisis detallado de los registros históricos, integrando las variables antes mencionadas a lo largo de varios años. Lo que permitió identificar y caracterizar su régimen extremal, destacando las problemáticas que generan para la estadía de las embarcaciones y la seguridad humana en ambos apostaderos navales. Esto resulta especialmente relevante considerando que este tipo de fenómenos pueden ser impredecibles y peligrosos.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO

1.1 Introducción

Las mareas extraordinarias son fenómenos de gran importancia para las actividades marítimas y costeras, especialmente en zonas estratégicas como los puertos principales de la Armada Argentina: Puerto Belgrano y Mar del Plata, dos localidades importantes y vulnerables para la defensa naval del país. Estos eventos, caracterizados por niveles de agua inusualmente muy altos o bajos, resultan de la combinación de factores astronómicos y meteorológicos, los cuales generan impactos significativos en la operatividad portuaria, seguridad de las embarcaciones y la infraestructura costera.

El estudio de las mareas extraordinarias radica en su capacidad de alterar las condiciones normales tanto de navegación como la estadía de los buques en los diferentes puertos, impactado además las actividades militares y civiles. Ambos puertos combinan funciones navales y pesqueras por lo que requieren de un estudio detallado para mejorar la planificación y la respuesta ante eventos adversos como el mencionado.

La parte inicial del trabajo se centra en una breve explicación del fenómeno de las mareas, dando una base sencilla de todos los temas que forman parte de la base del estudio de estos eventos. Otra parte se enfocará en explicar la finalidad del estudio, comparando las amplitudes de las mareas en dos puertos de nuestro país. Estas comparaciones serán las correspondientes a días en los que se produzca fenómenos tanto astronómicos como meteorológicos que originen que esta amplitud de marea sea superior o inferior a la habitual. Finalmente, se obtendrán conclusiones correspondientes al análisis de las amplitudes para determinar si existe una relación correlativa de sus variaciones, evaluando características de cada puerto, como fenómenos locales, que influyen en el comportamiento del nivel de agua.

1.2 Objetivo.

Este trabajo tiene como objetivo analizar el efecto de las mareas extraordinarias en estos dos puertos, utilizando datos históricos de mareógrafos proporcionados por el Servicio de Hidrografía Naval y registros meteorológicos del Servicio Meteorológico Nacional. Se evaluarán las mareas más altas y más bajas registradas entre los años 2005 y 2023. Se identificarán las causas que provocaron dicho fenómeno, su relación

en cuestiones de tiempo y su posible repetitividad. Del mismo modo, se considerará factores que contribuyen a estas variaciones, como la presión atmosférica, los vientos predominantes y otros fenómenos climáticos.

CAPÍTULO 2. INFORMACIÓN DE BASE.

El siguiente capítulo presenta conceptos esenciales relacionados con el fenómeno de las mareas, necesarios para comprender mejor el análisis de los datos que se desarrollarán en las secciones posteriores. Considero fundamental establecer una base sólida que permita interpretar las dinámicas mareales y su relación con las condiciones meteorológicas y oceanográficas que afectan a ambos puertos.

Para ello, haré referencia a estudios de autores ampliamente reconocidos en el ámbito de la hidrografía, quienes han dedicado gran parte de su trayectoria profesional al análisis de las mareas y sus implicancias. Algunos de ellos han trabajado directamente para el Servicio de Hidrografía Naval, contribuyendo con investigaciones importantes y siendo referentes en el estudio de los fenómenos mareales en la costa argentina.

2.1. Nivel del mar

Toda observación in situ del nivel del mar es el efecto de la suma de muchos factores componentes donde no necesariamente aparecen todos ellas en dicha observación instantánea. Es decir, un registrador de marea mide el resultado de: el nivel medio del mar, marea astronómica, y ondas de tormentas. Es decir, los fenómenos físicos que la producen son diferentes y sus representaciones espectrales en el dominio de la frecuencia permiten estudiarlas separadamente. Sin embargo, este hecho no implica que el efecto total esté dado por la suma de los individuales, ya que debido a los efectos no lineales en aguas poco profundas cada una de las partes componentes aquí mencionadas interactúan dinámicamente con las demás (WARRICK et al., 1992). En algunos casos, suelen encontrarse oscilaciones cuyos periodos son mayores que los de la ola y menores que los de la marea, llamados “seiches” (ondas de largo periodo) y, además, registros de tsunamis y meteotsunamis.

2.2. La marea astronómica

La marea astronómica o lunisolar se define como el ascenso y descenso rítmico en el nivel del mar que ocurre en un período determinado. Estos movimientos están directamente relacionados, en amplitud y fase, con las fuerzas gravitatorias ejercidas sobre la superficie de las masas de agua debido al movimiento relativo de la Tierra, el Sol y la Luna. Los restantes planetas del sistema solar también generan mareas, pero estas son despreciables en comparación con las primeras.

En este caso, consideraremos únicamente el sistema Tierra-Luna, ya que este cuerpo celeste genera el forzante geofísico dominante (entre 2 y 3 veces mayor que el del Sol, debido a su proximidad). Esto se debe a que ambos cuerpos giran alrededor de un centro de masas común (de acuerdo con la Ley de Gravitación Universal de Newton).

La combinación de estas fuerzas deforma la superficie del océano, generando un elipsoide ovalado.

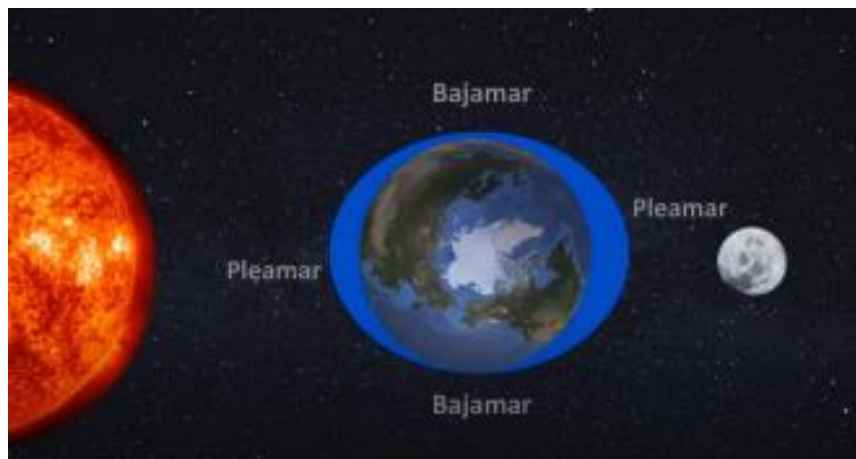


Fig. 1: Posición de la Luna y el Sol para bajamar y pleamar.

Cuando se observa la presencia de los ciclos y el tiempo en que se producen las mareas, y estas presentan dos mareas altas en cada día, se las conoce como “semidiurnas”. En este caso, cada ciclo dura aproximadamente 12 horas y 25 minutos (el tiempo correspondiente a la mitad del tránsito de la Luna).

Cuando las mareas alcanzan su máxima amplitud, se denominan “mareas vivas”, mientras que, cuando las amplitudes son mínimas, se las llama “mareas muertas”. Las mareas vivas tienen lugar unos pocos días después de la luna nueva y de la luna llena (cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineados, en sicigia). Por otro lado, las mareas muertas ocurren poco después de los cuartos creciente y menguante, cuando el Sol y la Luna están en cuadratura (formando un ángulo recto con la Tierra).

También puede observarse que la altura de la marea alta, en dos mareas consecutivas, no es la misma (y lo mismo ocurre con la marea baja). Estas diferencias se deben a la existencia de una marea con un período aproximado de un día, llamada “marea diurna”.

Por último, existen casos en los que encontramos mareas intermedias entre las diurnas y las semidiurnas, que generan una gran desigualdad entre las alturas de las pleamares y bajamares. Estas se denominan “mareas mixtas”.

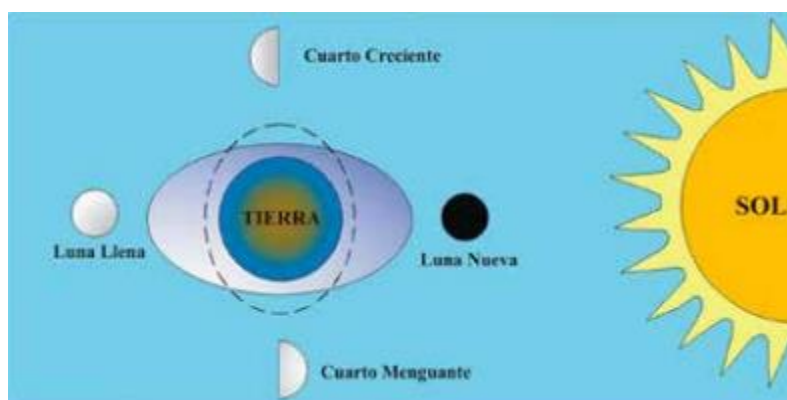


Fig. 2: Fase de la Luna en conjunción (Luna nueva), en oposición (Luna llena) y en cuadratura (Luna en cuarto creciente y menguante)

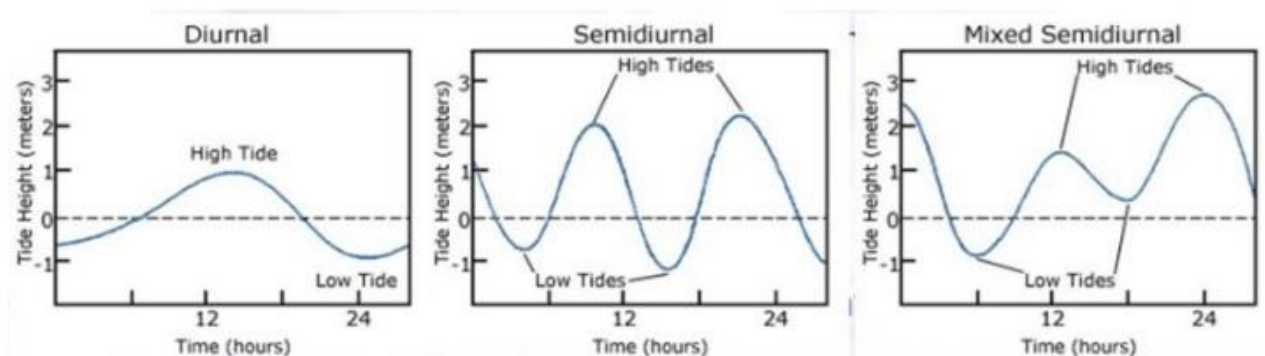


Fig. 3: Regimen de marea: diurno, semidiurno, mixto.

Este régimen mareal también se ve afectado por los continentes, que bloquean el libre movimiento del agua. La elevación y caída observables del nivel del mar están fuertemente influenciadas por la topografía de la costa, así como por la distribución de los océanos y los continentes. Como resultado de estas interacciones, se obtiene lo que se muestra en la figura 4.

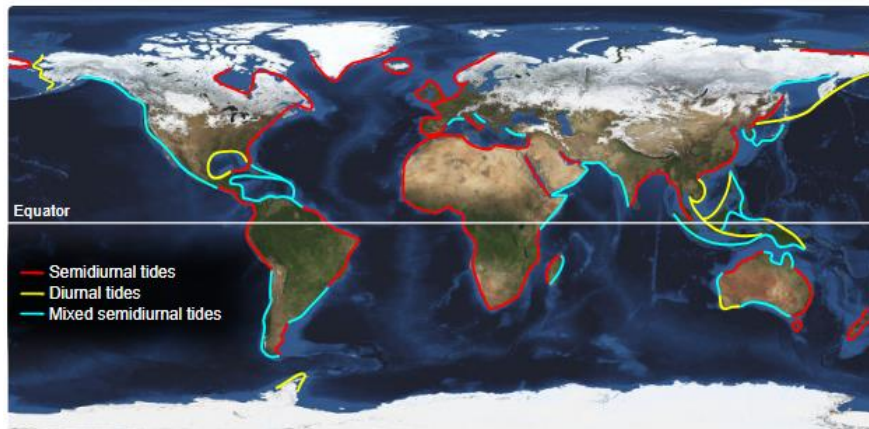


Fig. 4: Dsitrubucion de los ciclos de marea en la Tierra (imagen de la NOAA)

2.3. Mareas Extraordinarias

El fenómeno de las mareas extraordinarias produce variaciones en el nivel del mar con grandes amplitudes, que superan los valores normales de las mareas altas o bajas.

Las mareas se originan en las masas de agua de los océanos y se propagan hacia las costas, atravesando las plataformas continentales, lo que genera un aumento en sus amplitudes. En las provincias del sur de nuestro país, este fenómeno se refleja a lo largo de las áreas litorales de la Patagonia, donde la marea astronómica alcanza alturas de más de 10 metros en su amplitud.

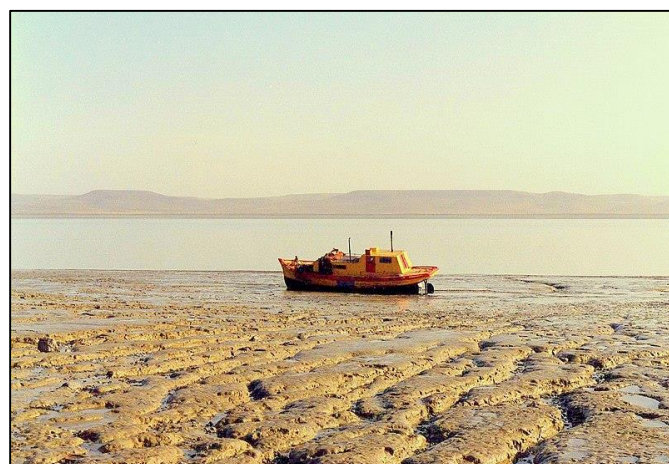


Fig. 5: Rio Santa Cruz - Provincia de Santa Cruz



Fig. 6: Pleamar de 12,7 metros en el estuario de Río Gallegos - Provincia de Santa Cruz

El patrón de marea a lo largo de la costa argentina no es homogéneo. En el norte, desde el Río de la Plata hasta Mar del Plata, las alturas tienden a ser menos pronunciadas, con amplitudes menores debido a la convergencia del estuario del Río de la Plata, donde la descarga fluvial modula los niveles del mar. A medida que avanzamos hacia el sur, las amplitudes de las mareas aumentan de forma notable, especialmente en zonas como Bahía Blanca, Puerto Belgrano y la Patagonia. Esta variabilidad se debe, en principio, a la configuración geográfica.

En estas regiones, las mareas alcanzan regímenes macromareales, causados por la combinación de factores geográficos, hidrodinámicos, astronómicos, meteorológicos y procesos de resonancia en bahías y ensenadas, que amplifican las oscilaciones naturales del nivel del mar. La extensa plataforma continental patagónica facilita el incremento de las variaciones mareales al acercarse a la costa. La atracción gravitacional de la Luna y el Sol, especialmente durante las fases de luna nueva y llena, genera mareas vivas de mayor amplitud.

La propagación de la marea a lo largo de la costa argentina ocurre principalmente desde el sur hacia el norte. Por la forma y distribución de las isóbatas que corren paralelas a la costa, el Mar Argentino constituye una extensa batea abierta a las grandes cuencas oceánicas circundantes, donde se generan las ondas de mareas lunisolares que se propagan de sureste a noroeste hacia su interior (Balay, 1961).

La plataforma continental de nuestro país, al ser tan extensa, junto con las condiciones meteorológicas y la rotación de la Tierra que actúan sobre las masas de agua en movimiento, contribuyen a aumentar la amplitud de las oscilaciones. Este proceso culmina en la costa, donde la marea alcanza en ciertos lugares niveles extraordinarios.

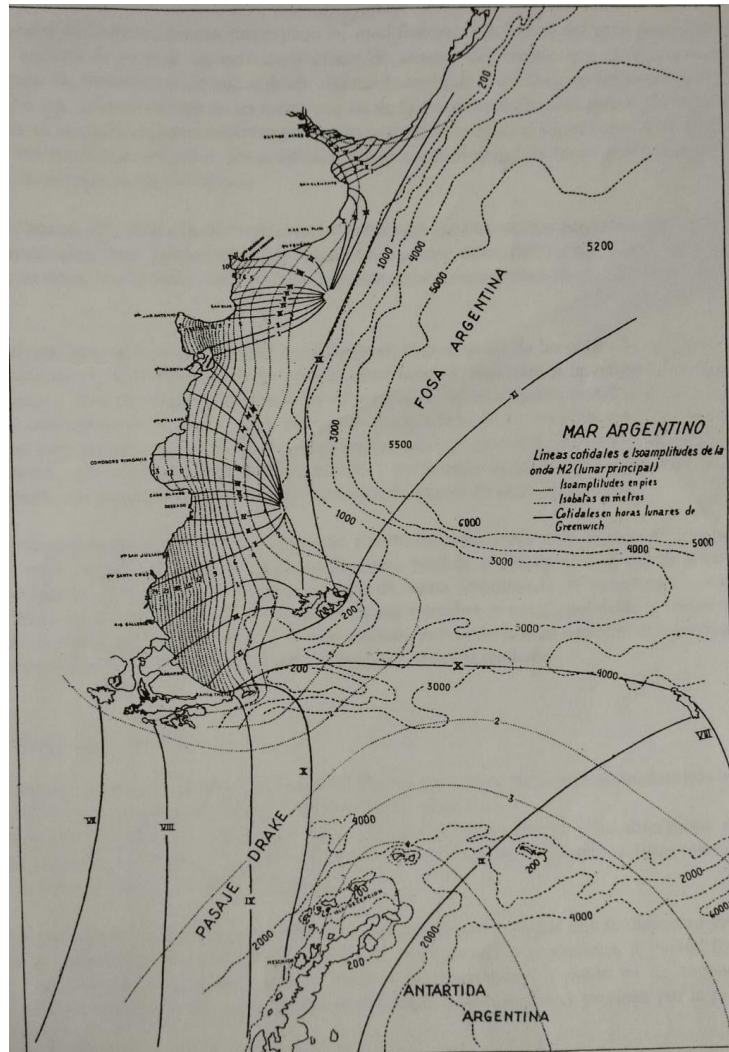


Fig. 7: líneas cotidales en mar Argentino

Del estudio de la carta de cotidales, se puede confirmar la existencia de dos poderosas ondas de marea de régimen predominantemente semidiurno. Una de ellas es una onda progresiva, proveniente de la confluencia Atlántico-Pacífico, que se interna en el Mar Argentino pasando entre el continente y las Islas Malvinas, propagándose a lo largo de todo el litoral hasta San Clemente del Tuyú en aproximadamente 26 horas, y demorando unas 12 horas en recorrer el estuario del Río de la Plata.

La otra es una onda estacionaria, generada por la refracción en el talud continental, que interfiere con la onda progresiva simultáneamente en toda la extensión de la plataforma. Esta interacción da origen a la formación de dos sistemas anfidrómicos (puntos de marea nula), uno localizado a la altura de Puerto Deseado y otro frente a San Blas (Balay, 1955).

2.4. Rangos mareales

El rango está influenciado por factores como la pendiente y la presencia de amplias zonas de bahías. En este sentido, la distribución de los rangos de marea está estrechamente vinculada a la configuración costera. Según su magnitud, los rangos de marea se dividen en tres categorías principales:

- ✓ Rangos micromareales: Incluyen rangos inferiores a 2 metros, generalmente observados en costas de mares abiertos y en mares casi completamente cerrados, como el Mediterráneo, el Negro y el Rojo.
- ✓ Rangos mesomareales: Comprenden alturas de marea que oscilan entre 2 y 4 metros (Komar, 1998; Masselink y Hughes, 2003).
- ✓ Rangos macromareales: Corresponden a rangos de marea superiores a 4 metros, típicos de mares semicerrados y cabeceras de estuarios. Superando los 6 metros, se podría considerar una nueva clasificación, los hipermareales.

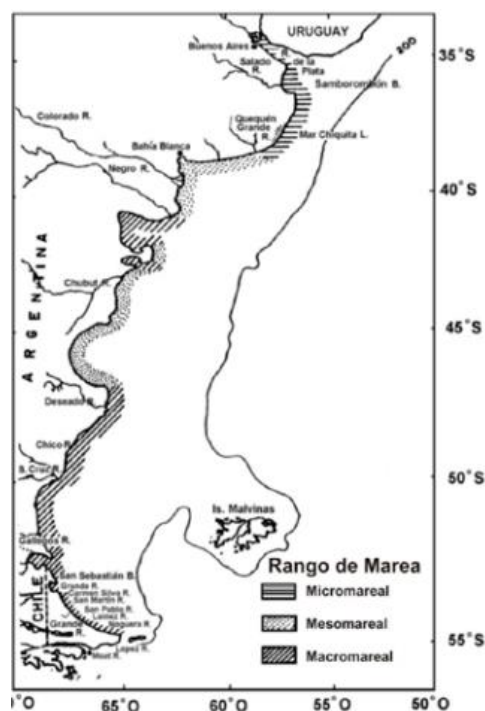


Fig.8: Distribución de los rangos de marea en la costa argentina.

En Argentina, se identifican los tres rangos tradicionales de marea. La provincia de Buenos Aires presenta rangos micromareales desde el norte hasta la desembocadura del río Quequén Grande, y mesomareales hacia el sur. En los golfos norpatagónicos, como San Matías, San José y Nuevo, así como al sur de Puerto Deseado, las mareas

son macromareas. El rango más alto se encuentra en la Bahía San Sebastián, donde alcanza los 12 metros, siendo una de las mareas más altas del mundo.

2.5. Nivel medio del mar

Definido como la media aritmética de las alturas horarias de marea durante un período adecuado que permita eliminar la influencia de la marea, el nivel medio del mar puede considerarse como una función del tiempo, resultando en cambios del orden de 10 a 30 centímetros aproximadamente por siglo, lo cual es mínimo en comparación con los cambios que ocurren en meses o años (siempre se deben contener ciclos completos de marea, como una serie de 18,67 años de observación). Estas variaciones son consecuencia de los cambios estacionales en la presión atmosférica, la densidad del agua y la circulación del océano.

Desde tiempos remotos se buscó el valor del nivel medio del mar para obtener una aproximación primaria al geoide, considerando que se vería afectado por distintos factores oceanográficos, mencionados en el párrafo anterior, lo que provoca diferencias que, en el peor de los casos, pueden exceder el metro, pero que generalmente son menores (Pugh, 1987).

Actualmente, se busca obtener tendencias absolutas del nivel medio del mar, utilizando equipos como el GPS, que monitorean puntos fijos en las estaciones mareográficas o cercanos a ellas para detectar movimientos verticales de la corteza terrestre. En consecuencia, el resultado de estas mediciones constituye un gran aporte a muchas tareas oceanográficas, entre otras.

Existen dos tipos de variaciones del nivel del mar: globales y locales.

Variaciones globales del nivel del mar: Se denominan eustatismo y se refieren a los procesos a gran escala, generalmente climáticos o tectónicos, que producen un cambio en el nivel del mar en todo el planeta. Estos procesos pueden involucrar fenómenos como el derretimiento de glaciares, la expansión térmica de los océanos debido al calentamiento global, o movimientos tectónicos que modifican la altitud de la corteza terrestre.

Variaciones locales del nivel del mar: Son aquellos cambios que afectan de manera específica a un lugar en particular debido a condiciones locales, como la subsidencia o el levantamiento de la corteza terrestre en una región determinada, o factores

meteorológicos como tormentas y vientos. En este caso, no hay un efecto significativo en la masa o volumen de aguas oceánicas ni en el espacio de acomodación de las grandes cuencas oceánicas.

Es el caso de la ciudad de Mar del Plata, donde, a pesar del incremento de construcciones y obras costeras artificiales, la erosión marina inducida por el aumento del nivel del mar permite que las olas avancen más, no solo sobre las playas, sino también sobre partes de la ruta interbalnearia.

2.6. Factores atmosféricos en las mareas

A las observaciones de las mareas se deben agregar los componentes de las variables meteorológicas. Entre los más importantes, encontramos la acción del viento y la presión atmosférica, que modifican el valor de la elevación de la columna de agua.

El viento es un fenómeno complejo. Cuando su presencia es dirigida hacia la costa, con una determinada duración e intensidad constante, se observa una retención de las aguas en el litoral, provocando crecidas en zonas como puertos, bahías y canales, que por sus características geográficas locales, como la inclinación del fondo, son ideales para su ocurrencia.

La presión atmosférica es el peso de la columna de aire en relación con el área que ocupa la base de dicha columna. Así, si la presión es alta, el nivel del mar sufrirá un descenso de la superficie, mientras que cuando haya una baja presión, ocurrirá lo contrario.

El contraste entre la marea predicha por un método armónico y la que efectivamente mide el mareógrafo en un determinado momento se conoce como residuo. Estos residuos, por lo general, son efectos de "ondas de tormenta".

2.7. Ondas de tormenta

Estas elevaciones anormales del nivel del agua son producidas por la acción combinada de fuertes vientos y presión atmosférica baja, que alteran las mareas astronómicas. En efecto, son muchos los factores que influyen en la generación de las ondas de tormenta y sus características:

- a) La distribución de la presión atmosférica y, asociada a la misma, la dirección, persistencia y área de arrastre del viento mencionado.
- b) La turbulencia del aire (que influye sobre el coeficiente de arrastre del viento).
- c) El avance de zonas frontales, así como las características geográficas, las condiciones geológicas e hidrodinámicas de la zona, la profundidad, cuán expuesta está al océano abierto y, por último, la orientación general de la costa con respecto a la dirección del viento y a la dirección de avance de la onda de marea. (Enrique E. D'Onofrio, 1998).

Este fenómeno suele ser peligroso en áreas costeras, en regiones relativamente poco profundas, cuando el viento sopla durante varios días y sobre superficies extensas. Su período de tiempo puede variar desde algunas horas hasta días (2-3), provocando cambios en la altura de la marea predicha (astronómica) con diferencias de más de un metro (Balay, 1961).

Por ejemplo, en el Río de la Plata, la marea astronómica se ve frecuentemente alterada por la presencia de ondas de tormenta causadas por fenómenos meteorológicos conocidos como “sudestadas”, que se caracterizan por vientos fuertes del sudeste que pueden provocar lluvias intensas y aumentar el nivel del agua en zonas costeras.

Las variaciones en las condiciones meteorológicas producen respuestas diferentes, lo que provoca que los eventos de ondas de tormenta no se repitan de la misma manera en un mismo lugar, debido a que factores como la dirección e intensidad del viento, la presión atmosférica y la topografía costera afectan de manera distinta cada evento. Esto significa que, aunque un área pueda ser susceptible a las mareas de tormenta, cada evento tendrá características únicas, en función de las condiciones meteorológicas específicas en ese momento. Estas variaciones hacen que los patrones de inundación, erosión y acumulación de sedimentos en las costas también cambien, aumentando la complejidad en la predicción y gestión de estos fenómenos.

Cuando el viento produce una elevación del agua, la onda de tormenta es positiva (ODT positiva) y cuando disminuye el nivel de la marea se la conoce como onda de tormenta negativa (ODT negativa). Luego, por ejemplo, eventos de ODT positivas y negativas son los que cumplen simultáneamente con las siguientes condiciones (Enrique E. D'Onofrio, 2006).

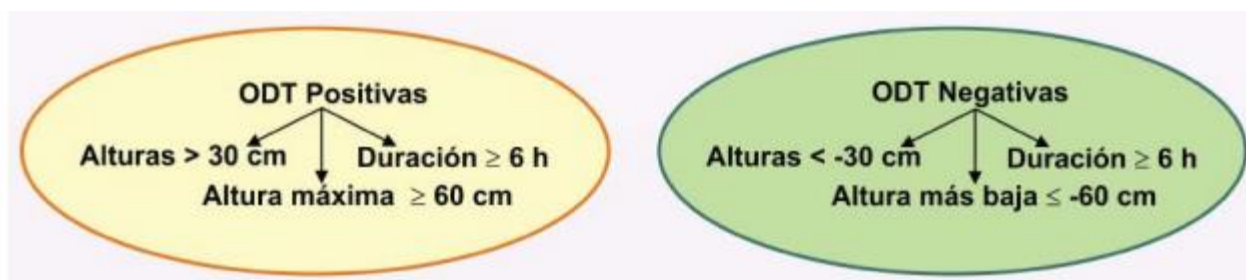


Fig. 9: condiciones que deben cumplir los eventos de ODT positivas y negativas en Mar del Plata. Fuente: Enrique E. D'Onofrio (2006)

CAPÍTULO 3. ÁREAS DE ESTUDIO.

En este capítulo se definirá y caracterizará las zonas bajo estudio.

3.1. Base Naval Puerto Belgrano

3.1.1. Descripción general

Puerto Belgrano es la mayor base naval de la República Argentina y constituye una infraestructura estratégica para la Armada Argentina. Concebido a fines del siglo XIX, su construcción comenzó en 1896 durante la presidencia de José Evaristo Urriburu, con el objetivo de proteger los intereses marítimos del país.

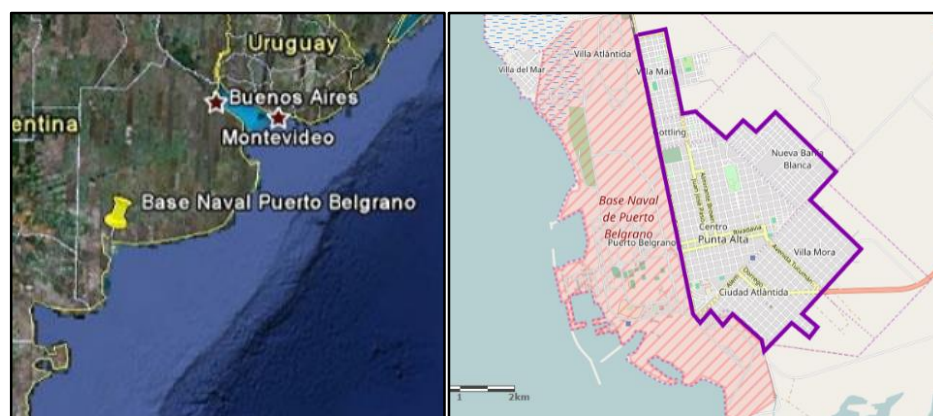


Fig. 10: Ubicación geográfica Puerto Belgrano.

Ubicado en Latitud $38^{\circ}53'13.0''$ S y Longitud $62^{\circ}05'52.0''$ W, a unos 20 kilómetros al suroeste de la ciudad de Bahía Blanca, Puerto Belgrano es la principal base militar de la Armada Argentina. Sus instalaciones portuarias incluyen una gran dársena de 243.000 m^2 , rodeada por una serie de muelles que en conjunto totalizan 2.472 metros de frente de atraque. En su lado norte se encuentran las esclusas de los diques de

carena, los edificios de talleres y la casa de bombas, esenciales para las operaciones de mantenimiento de las embarcaciones.

El puerto está protegido al sur por dos malecones cuya distancia de separación es de 172 metros. El malecón oeste tiene una longitud de 700 metros, mientras que el malecón este mide 500 metros. Además, en el muelle C se encuentra instalado un mareógrafo perteneciente al Servicio de Hidrografía Naval, que desempeña un papel clave en el monitoreo de las condiciones mareales y en el análisis hidrológico de la región.

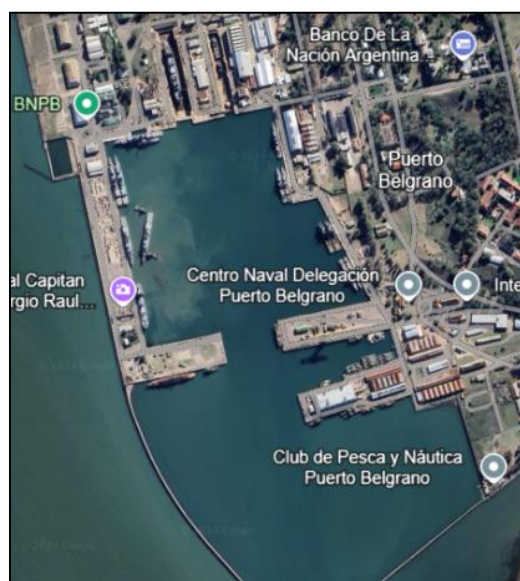


Fig. 11: imagen satelital de Puerto Belgrano.

3.1.2. Descripción hidro-oceanografica

El apostadero tiene una profundidad que varía de 6 a 8 metros de calado. El sistema está fuertemente dominado por las mareas, cuyas amplitudes varían de 2 a 4 metros, en este caso las mareas son semidiurno, tema que se explicara más adelante. Por su ubicación esta influenciado por el estuario (desembocadura de un río caudaloso en el mar) de Bahía Blanca. Este estuario es un complejo entramado de canales, planicies de marea y bancos de sedimentos que se extiende desde la desembocadura del río Sauce Chico hasta aguas más profundas del Atlántico Sur. Su dinámica hidrológica influye directamente en las condiciones oceanográficas del puerto.

Puerto Belgrano se beneficia por las aguas profundas de canal principal del estuario que permite el acceso de embarcaciones de gran tamaño. Este canal está protegido

por la configuración natural del sistema y por las infraestructuras construidas en el puerto, como los malecones. La circulación de las aguas en el estuario está influenciada por las corrientes mareales y los vientos predominantes del sector oeste y sudoeste, que pueden intensificar las mareas en ciertas condiciones meteorológicas.

La dirección de las corrientes, en proximidades de las escolleras, tiran atravesada al eje del canal por lo que hay que prestar atención a la guiñada del buque al entrar en aguas muertas.

Por último, es importante destacar que el estuario de Bahía Blanca es un sistema con un aporte fuerte de sedimentos, consecuencia de la interacción entre las mareas, los ríos que desembocan en él y el transporte de partículas por los vientos. Este impacta directamente en las condiciones de navegación en el puerto, por lo que requiere un monitoreo constante y tareas de dragado para mantener la operatividad de sus muelles y dársenas.

3.1.3. Meteorología

Caracterizada por la presencia de vientos predominantes del sector noroeste (NW) con intensidades media anual de 13 nudos, conservando estas particularidades a lo largo del año, sin diferencias significativas entre estaciones. Sin embargo, durante los meses de verano se registra una mayor frecuencia de eventos meteorológicos severos. Estos eventos están asociados a tormentas intensas que suelen ir acompañadas de vientos fuertes, superando los 25 nudos, lo que puede generar un impacto significativo en las condiciones marítimas y en las operaciones portuarias.

3.2. Base Naval Mar del Plata

3.2.1. Descripción general

El Puerto de Mar del Plata, ubicado al sudeste de la provincia de Buenos Aires en Latitud 38°01'00" S y Longitud 57°31'00" W, comenzó su construcción en 1911, pocos años después de que la ciudad fuera oficialmente declarada como tal mediante la Ley N° 6.499 del 11 de octubre de 1909. Este proyecto fue impulsado por el entonces Diputado Nacional Pedro Olegario Luro.

El puerto está conformado por un conjunto de dársenas y espigones que abarcan una superficie total de 2000 metros de largo por 1000 metros de ancho. Su estructura principal está delimitada por dos grandes escolleras:

- La Escollera Norte, con un trazado sensiblemente recto y orientación noroeste-sudeste (NO-SE), tiene una longitud aproximada de 1100 metros.
- La Escollera Sur, que presenta un diseño curvo con orientación general suroeste-noreste (SO-NE), alcanza los 2750 metros de longitud.

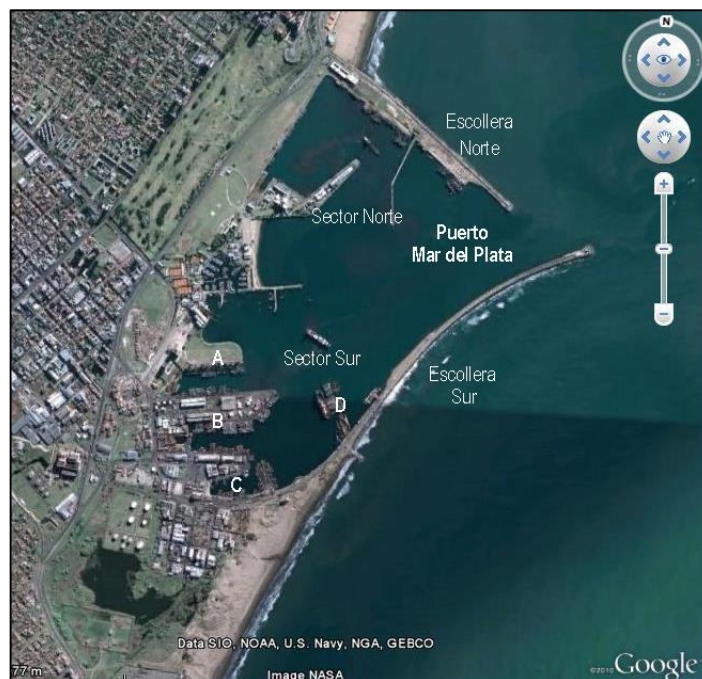


Fig. 12: Imagen satelital del puerto de Mar del Plata

Estas dos escolleras forman una boca de acceso al puerto hacia el noreste (NE) con un ancho de 300 metros. Internamente, el puerto está dividido en dos sectores principales: norte y sur.

La zona sur del puerto está destinada principalmente a actividades de carácter comercial. En esta área se llevan a cabo operaciones vitales para la economía, como la captura y exportación de productos pesqueros, la exportación de granos y la recepción de combustibles. Y la zona norte, de interés estratégico y militar, alberga la Base Naval Mar del Plata, área exclusiva para las operaciones de la Armada Argentina. Posee la escollera de abrigo, que se extiende desde la escollera Norte, con una longitud de 500 metros aproximadamente y orientación hacia el sudeste (SE), y

en su extremo la baliza de abrigo, sector reservado para el uso de buques militares de superficie y submarinas, donde tienen su apostadero habitual. Y contigua a la Dársena Militar, se encuentran las instalaciones de la Base Naval que brindan soporte logístico y operativo a las actividades militares.

3.2.2. Descripción hidro-oceanográfica.

El Puerto de Mar del Plata está diseñado para garantizar condiciones seguras y estables para las operaciones de los buques, gracias a la protección ofrecida por sus escolleras, que reducen significativamente la influencia de las condiciones hidrodinámicas de la zona.

En cercanía de la costa, en dirección norte, las corrientes se hacen paralelas a ellas y van disminuyendo su intensidad a medida que nos alejamos en igual dirección. En el radio de las 10 millas del puerto la creciente tira hacia el Norte y la bajante hacia el sentido opuesto: invirtiéndose el sentido de la corriente unas tres horas después de la pleamar o bajamar, con una velocidad de 0,7 nudos aproximadamente. En ocasiones, favorecido por los vientos fuertes SW se genera una corriente de esa dirección con velocidades mayores a 1 nudo. A una distancia de aproximadamente 60 millas náuticas de la costa, la dinámica cambia: la creciente se orienta hacia el noroeste (NW) durante un intervalo de cinco horas y la bajante fluye hacia el sureste (SE) durante seis horas, con velocidades que no suelen superar 1 nudo.

La profundidad operativa varía según el sector, con calados máximos de 9,75 metros en algunas áreas, permitiendo la entrada de buques de gran porte. La marea en la zona de Mar del Plata se caracteriza por su régimen mixto con influencia semidiurna y con amplitudes de marea de aproximadamente 1,2 metros. En esta zona las tendencias encontradas muestran un ascenso promedio del nivel medio del mar de $1,42 \pm 0,05$ mm/año. Se han registrado las “seiches” más grandes del litoral marítimo argentino, llegando a superar a veces la amplitud de la marea misma.

Las mareas en Mar del Plata aumentan desde un régimen micromareal con desigualdades diurnas (0.6-1 m) hasta mareas de 1,5 m. Los datos más recientes de la marea en la playa Bristol indican que la altura media es de 0,9 m, con un 37,7% de las alturas superiores a 1 m, y solo un 0,6% de las alturas superan los 3 m (Prario & Dragani, 2019). El oleaje más frecuente proviene del este-sudeste, y las olas mayores provienen de los cuadrantes este y sudeste.

3.2.3. Meteorología.

El clima de la ciudad marplatense presenta una gran variabilidad de condiciones meteorológicas por su ubicación geográfica frente al mar. Está afectada bajo la influencia de distintas masas de aires de diferentes orígenes, los frentes fríos provenientes de la Patagonia y los frentes cálidos, que llegan desde el norte del país.

La temperatura media anual es de 14 °C, mientras que las precipitaciones alcanzan los 928 mm anuales. Los meses invernales son de menor precipitación que, junto a una menor evaporación, provoca un balance hídrico negativo que se invierte desde octubre hasta marzo. La presión atmosférica media anual al nivel del mar es de 1012,1 hPa.

Predominan los vientos tanto de la región provenientes del sector noroeste (NW) con intensidades promedio de 9 nudos más frecuentes durante el verano, como los vientos del sector suroeste (SW), con velocidad promedio de 7,5 nudos, característicos durante todo el año, especialmente tras el pasaje de frentes fríos.

En otoño y primavera, los vientos tienden a ser más leves y provienen principalmente del continente. Sin embargo, en invierno y verano son frecuentes las sudestadas, eventos meteorológicos que ocurren debido a la rotación de vientos fríos desde el oeste hacia el sudeste, cargándose de humedad sobre el Atlántico. Estas sudestadas provocan lluvias intensas, fuertes oleajes y mar de fondo

Otro fenómeno meteorológico notable son los pamperos, vientos intensos del suroeste (SW) que se presentan después del pasaje de un frente frío. Estos vientos, de corta duración (hasta cuatro días), generan condiciones frescas y cielos despejados.

CAPÍTULO 4. DATOS.

4.1. Datos mereográficos

Los datos de mareas fueron suministrados por la Sección Mareas pertenecientes al Departamento Oceanografía del Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

En el caso del Puerto de Puerto Belgrano, el mareógrafo del SHN, ubicado en la Dársena Militar en Latitud 38°53'45" S y Longitud 62°06'05" W, ha sido

tradicionalmente el instrumento de referencia para la obtención de datos mareográficos en esta zona. Sin embargo, debido a fallas operativas recientes, los datos empleados en este trabajo fueron obtenidos a través del Consorcio de Gestión Puerto Bahía Blanca, el cual mantiene un sistema de monitoreo que complementa la información mareográfica de la región.



Fig. 13: estacion mareografica en Puerto Belgrano

Para el Puerto de Mar del Plata, el mareógrafo utilizado se encuentra ubicado en la cabecera del muelle del Club de Pesca de Mar del Plata, situado en Punta Iglesias. Este instrumento, también perteneciente al SHN, se encuentra en una posición estratégica que asegura el registro confiable de las condiciones mareales en esta área, caracterizada por su costa abierta y playa profunda.



Fig. 14: estacion mareografica en Mar del Plata.

Ambos mareógrafos de tipo analógicos a flotador consisten esencialmente en un cilindro que gira con velocidad constante, arrastrando una faja de papel, accionado por un mecanismo de relojería alimentado a cuerda/electricidad (reloj motor). Dicha faja se enrolla en un rodillo receptor, que es mantenido tenso por un mecanismo ad hoc.

Los movimientos del flotador accionan una polea que a su vez hace mover a la pluma sobre la faja de papel, siguiendo una generatriz del cilindro principal. La sumatoria de los movimientos de la faja y la pluma generan la curva de mareas conocidas como "mareograma". El objetivo del contrapeso del flotador es compensar la laxitud del cable del flotador cuando sube la marea. La escala del mareógrafo queda determinada por la relación de engranajes y el diámetro de la polea del flotador - contrapeso. El tubo del flotador debe instalarse verticalmente en el agua. Su longitud debe ser lo suficientemente grande para cubrir adecuadamente las alturas extremas de marea creciente y bajante. El fondo del tubo tiene una entrada de agua reducida con el fin de filtrar los efectos del oleaje.

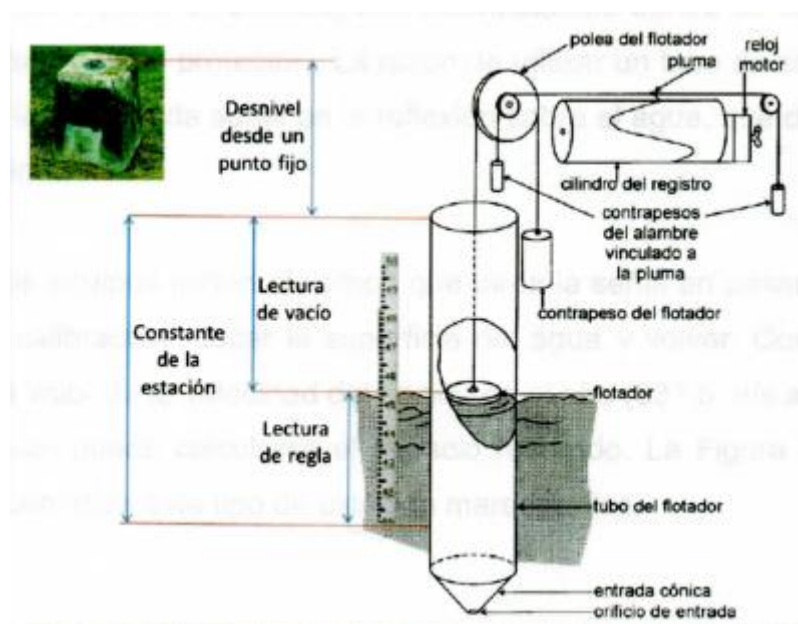


Fig. 15 : esquema de mareografo analogico a flotador.

4.2. Metodología y datos utilizados

Para el análisis de las presencias de las mareas extraordinarias, decidí iniciar con la recolección de datos históricos de los puertos Puerto Belgrano (PB) y Puerto de Mar del Plata (MDP). Estos datos fueron proporcionados por el mareógrafo del Puerto de Bahía Blanca para los datos de Puerto Belgrano y los de Mar del Plata los suministró

el mareógrafo del Servicio de Hidrografía Naval (SHN), garantizando así la precisión y consistencia en la información utilizada para el estudio.

Se seleccionó tres eventos observados máximos y mínimos de ambos puertos, que corresponden al período comprendido entre los años 2005 y 2023. Se discriminó en cada uno la altura observada en el momento, la altura por predicción astronómica y el residuo, cálculo de la diferencia entre la altura observada y la marea astronómica. Cada evento incluye un análisis gráfico de la altura de la marea en el momento registrado, acompañado de una descripción de las condiciones meteorológicas asociadas y una comparación con los valores registrados en el otro puerto naval, con el objetivo de verificar si existe una relación entre los eventos registrados en ambos puertos.

A medida que se vaya analizando cada uno de los eventos se consideraran además las condiciones meteorológicas del día de ambas zonas. Estos datos fueron solicitados y enviados por el Centro de Información Meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que permitirá identificar patrones y variaciones en los niveles de marea en relación con las condiciones meteorológicas, tales como la presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, y otros factores relevantes.

Cada evento será evaluado en función de su magnitud y retardo de marea de propagación entre ambos puertos, lo cual permitirá identificar el impacto específico de estos factores en la dinámica de las mareas extraordinarias.

4.3. Retardo de mareas y propagación

Es importante destacar que el retardo de las mareas entre Puerto Belgrano y Mar del Plata se calculó utilizando los datos de las tablas de mareas correspondientes a ambos puertos. Promediando los tiempos de pleamar y bajamar registrados en cada ubicación, se determinó que la marea tarda aproximadamente 2 horas en propagarse de un puerto al otro en condiciones normales. Este resultado refleja las diferencias en la dinámica mareal, influenciadas por la ubicación geográfica y las características específicas de cada puerto.

Cuadros Comparativos

A continuación, se presentan los cuadros que resumen los eventos analizados en ambos puertos, incluyendo la fecha, hora, amplitud de marea y las condiciones meteorológicas asociadas:

Base Naval Puerto Belgrano					
	Dia - hora	Altura de marea	Pres Atm. (hPa)	Precipitacion (mm)	Viento (direcc. / intensidad Ns.)
MAX.	29/07/2009	5,32 metros	1012.6	0	SUR / 20 Ns
	16/07/2017	5,42 metros	1016.2	0	230° (SW) / 25 Ns
	24/03/2022	5,67 metros	996.8	90.3	SUR / 54 Ns
MIN.	11/03/2007	-0,45 metros	996.6	0	320° (NW) / 43,2 Ns
	15/03/2008	-0,34 metros	1002.9	0	320° (NW) / 51 Ns
	27/08/2013	-0,82 metros	1007.7	0	320° (NW) / 39 Ns

Cuadro 1: Puerto Belgrano

Base Naval Mar del Plata					
	Dia - hora	Altura de marea	Pres Atm. (hPa)	Precipitacion (mm)	Viento (direcc. / intensidad Ns.)
MÁX.	22/07/2009	3,09 metros	995.3	14	250° / 37 Ns
	09/03/2016	2,85 metros	1016.5	0	SUR / 26 Ns
	09/06/2023	2,91 metros	1004.3	0	250° / 33 Ns
MIN.	22/08/2009	-0,48 metros	1012.6	0	320° / 32 Ns
	02/09/2011	-0,66 metros	1020.3	0	020° / 39 Ns
	10/08/2017	-0,48 metros	1020.2	0	070° / 26 Ns

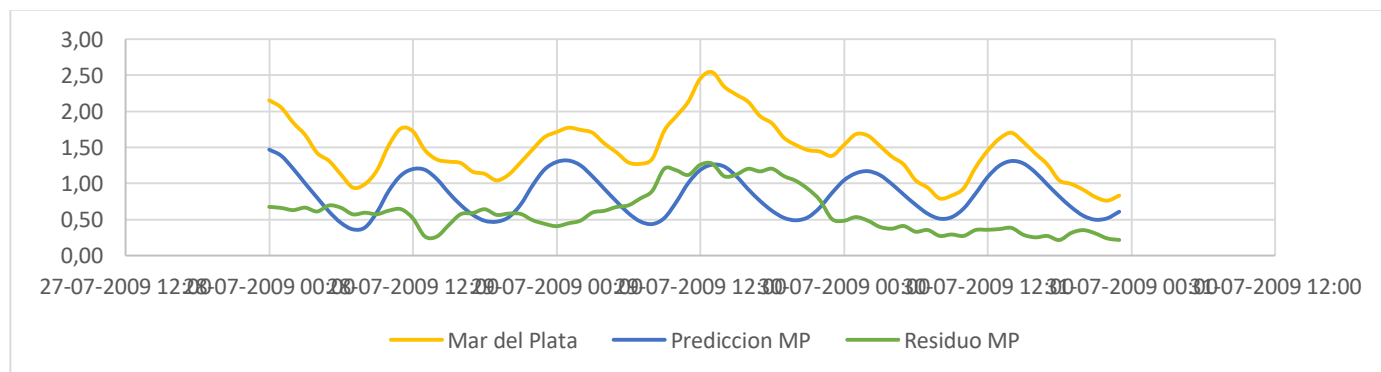
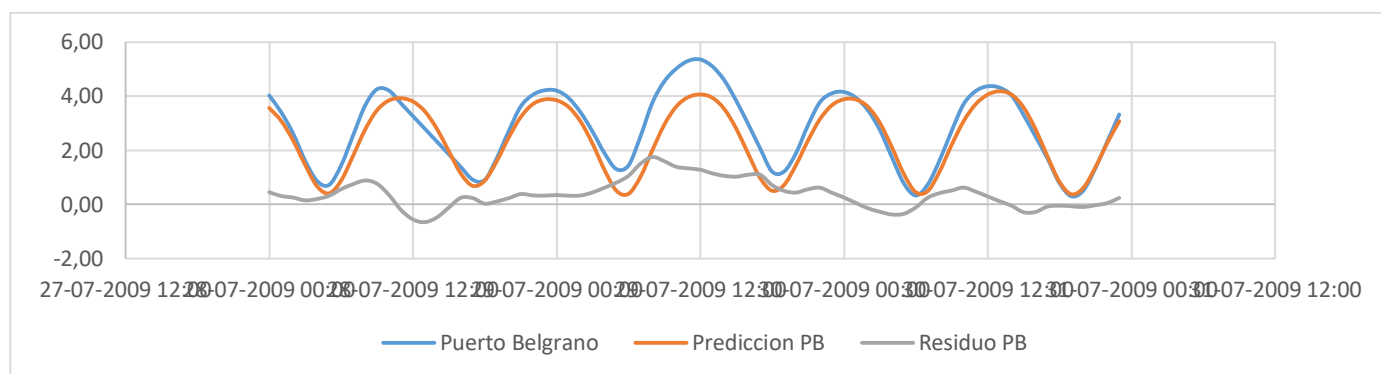
Cuadro 2: Mar del Plata

4.4. Descripción de eventos

Comenzare analizando los eventos de las tres mareas más altas observadas en los puertos, primero en Base Naval Puerto Belgrano y consecutivo Mar del Plata, dichas amplitudes representan las variaciones más significativas en el nivel del mar en las zonas.

4.4.1. BASE NAVAL PUERTO BELGRANO

EVENTO 1: 29 JUL 2009 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MAXIMAS)



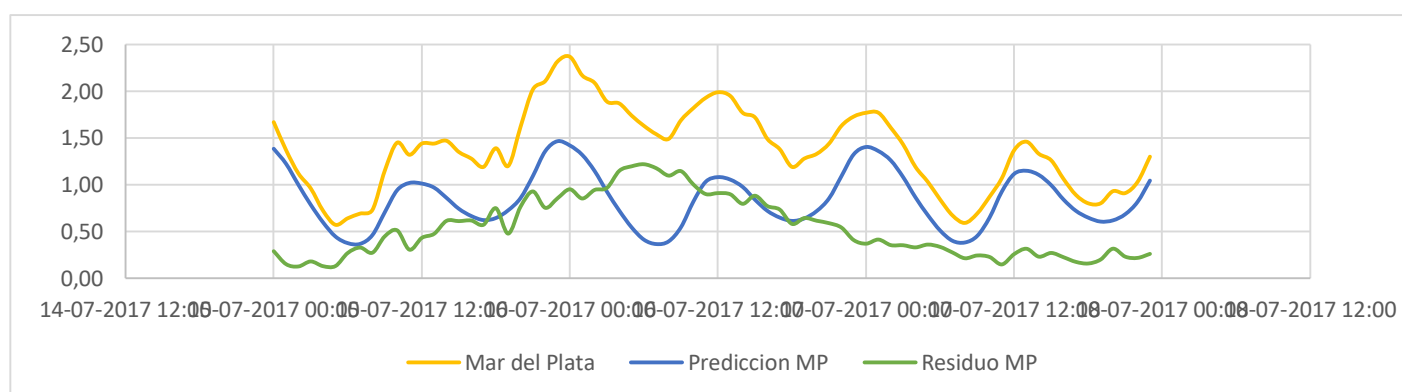
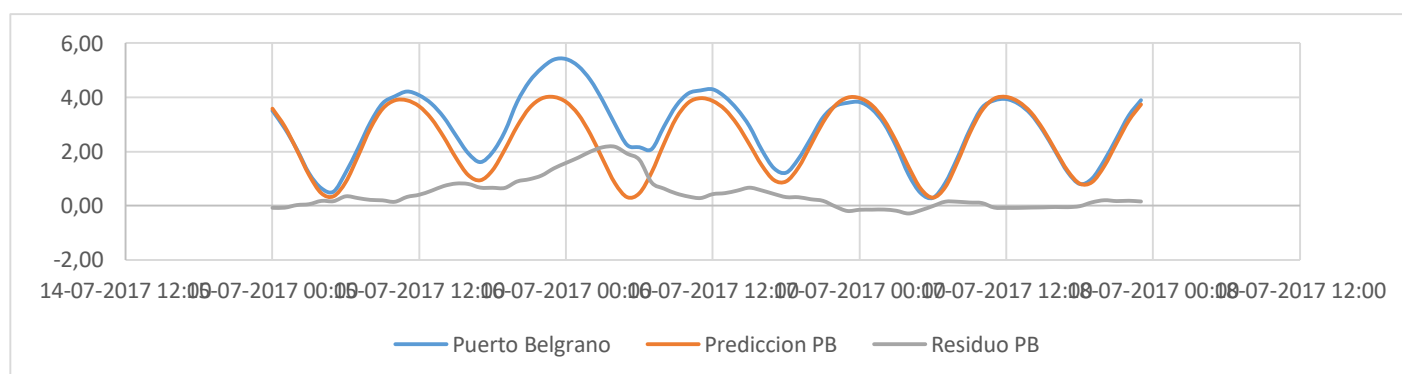
En Puerto Belgrano (PB), se registró una altura máxima de 5,32 metros sobre el Plano de Reducción de Sondajes (PRS) ¹ a las 12:00 horas. Cabe destacar que este plano de referencia se encuentra 2,52 metros por debajo del nivel medio. Este evento ocurrió en un contexto meteorológico adverso: días previos al registro, la ciudad de Punta Alta había experimentado una importante nevada, seguida por un temporal con lluvias intensas y ráfagas de viento que superaron los 40 nudos del sector Sur.

¹ El Servicio de Hidrografía Naval adoptó, desde el año 2004, la Bajamar Astronómica más baja (LAT) como plano de reducción de sondajes para las cartas en formato papel y electrónico.

En Mar del Plata (MDP), la altura máxima registrada fue de 2,54 metros sobre el PRS, a las 13:00 horas. En este caso, el plano de referencia se encuentra 0,91 metros por debajo del nivel medio. El retardo de propagación fue de aproximadamente una hora después.

El análisis gráfico de las mareas muestra que el comportamiento en Puerto Belgrano fue más armonioso, con la predicción de pleamar de 4,07 metros. No obstante, la estación mareográfica registró un nivel real que coincidió con la predicción hasta alcanzar la pleamar máxima, donde se evidenció una diferencia de 1,29 metros, atribuida a la marea residual.

EVENTO 2: 16 JUL 2017 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MAXIMAS)



La siguiente observación de un valor de pleamar máximo significativo en Puerto Belgrano (PB) ocurrió ocho años después del evento registrado en 2009, según los registros del Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

En este caso, las condiciones meteorológicas fueron similares al evento anterior. En Puerto Belgrano, se registraron días antes, nevadas en la región, junto con la entrada

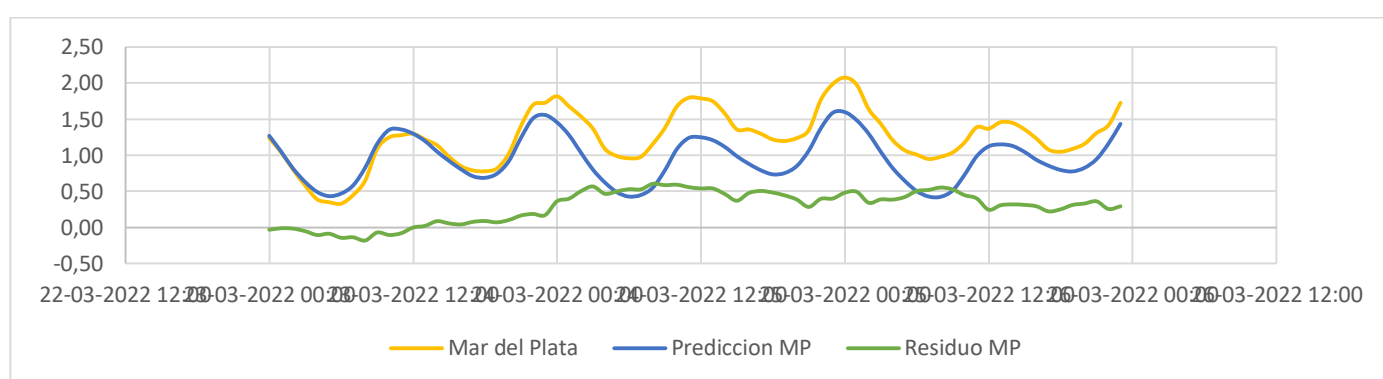
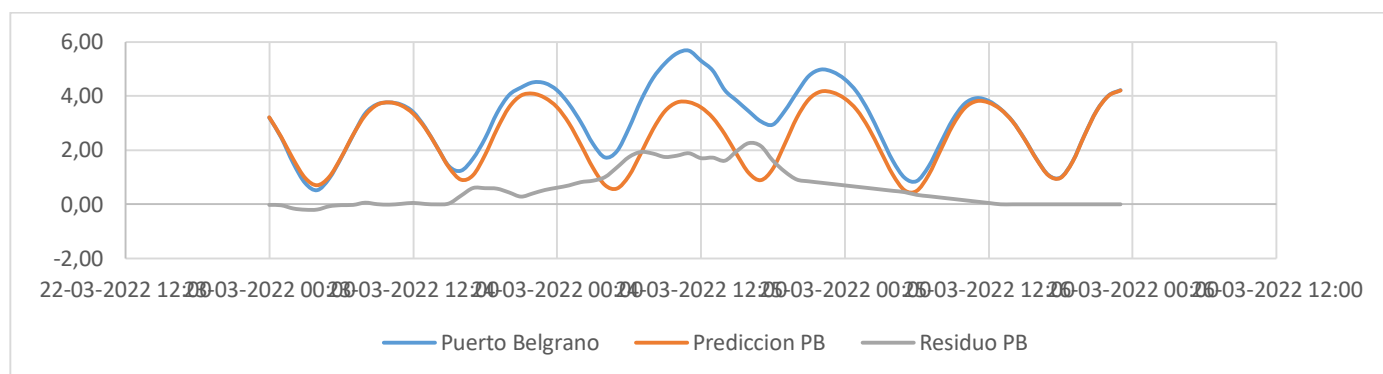
de aire frío polar, chaparrones persistentes y vientos del SW con intensidades de 25 nudos. Estas condiciones generaron una onda de tormenta (storm surge), un fenómeno caracterizado por un aumento anómalo en el nivel del mar debido a la interacción de los vientos sostenidos y la baja presión atmosférica. Como resultado, la marea registrada comenzó a superar los valores predichos desde el mediodía del 15 de julio, alcanzando un máximo de 5,42 metros a las 00:00 horas del 16 de julio. Este valor contrasta con la marea predicha de 3,83 metros, reflejando un residuo mareal de 1,59 metros, evidencia de la fuerte influencia meteorológica en la dinámica mareal.

El gráfico de las mareas muestra cómo, después del evento extremo, los valores predichos y observados retomaron su coincidencia, manteniendo una tendencia constante desde la bajamar registrada ese día a las 19:00 horas. Este comportamiento destaca la capacidad del sistema mareal de volver a su estado de equilibrio tras eventos extraordinarios.

En Mar del Plata (MDP), el mareógrafo reflejó un fenómeno similar, aunque de menor magnitud. El pico más alto registrado fue de 2,37 metros a las 00:00 horas del 16 de julio, coincidiendo temporalmente con el evento máximo en PB. Sin embargo, el menor residuo mareal observado en MDP resalta cómo las características geográficas locales moderan estos fenómenos. Mientras que PB, con su configuración estuarina, amplifica los efectos de las ondas de tormenta, MDP, con su costa abierta y menor influencia del viento del SW, muestra una respuesta más atenuada.

Este evento demuestra cómo las características geográficas y meteorológicas juegan un papel crucial en la dinámica de las mareas extraordinarias. La coincidencia temporal entre ambos puertos indica una conexión regional impulsada por las condiciones atmosféricas, pero la diferencia en las magnitudes subraya la importancia de las particularidades locales en la respuesta mareal.

Evento 3: 24 MAR 2022 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MAXIMAS)



Este evento, el más reciente registrado hasta la fecha, generó importantes inconvenientes para la estadía de los buques en la base de Puerto Belgrano (PB). Entre los días 23 y 25 de marzo, un sistema de baja presión atmosférica (995 hPa) afectó la región del partido de Coronel Rosales, acompañado de lluvias constantes y ráfagas de viento intensas de 54 nudos provenientes del sector Sur. Este fenómeno provocó una significativa crecida del nivel del mar en las zonas de Puerto Belgrano, Villa del Mar y Punta Alta, con impactos en localidades vecinas como Pehuen Co.

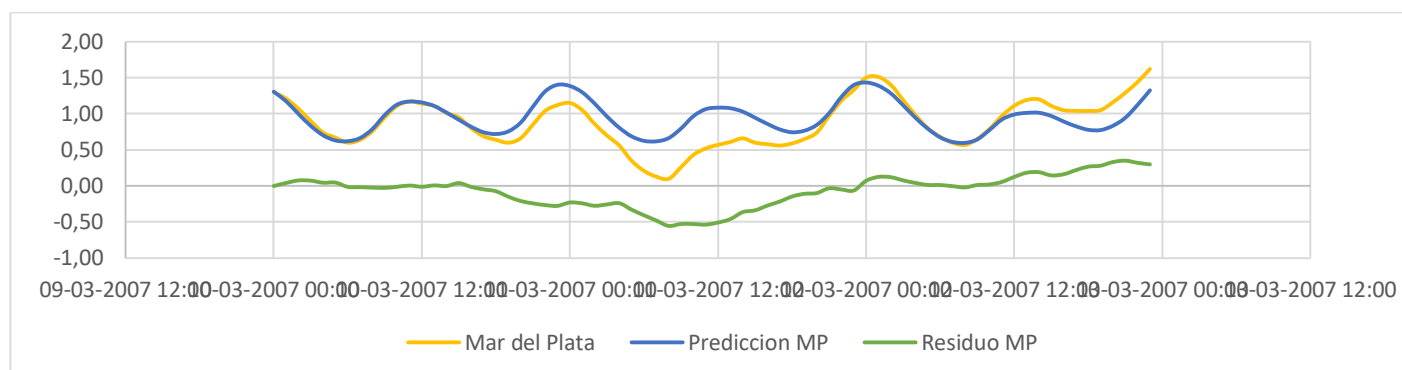
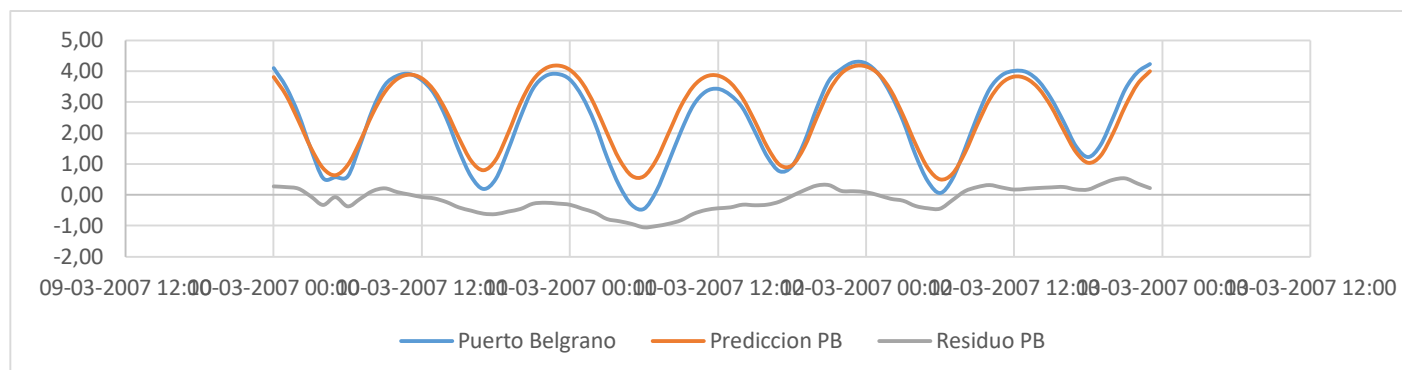
En el gráfico de mareas de Puerto Belgrano, se observa que el residuo mareal comienza a incrementarse a partir del 23 de marzo a las 15:00 horas, continuando su ascenso hasta alcanzar un máximo de 1,89 metros. La altura máxima registrada en ese momento fue de 5,67 metros, mientras que la predicción astronómica indicaba 3,78 metros, una diferencia significativa atribuida a la influencia de la onda de tormenta generada por las condiciones meteorológicas extremas. Este comportamiento se mantuvo hasta el 25 de marzo a las 12:00 horas, cuando los valores observados y predichos volvieron a coincidir.

En Mar del Plata (MDP), el mareógrafo registró una altura máxima de 1,98 metros el 25 de marzo a las 01:00 horas. Los gráficos muestran que las mareas en MDP también fueron afectadas durante el mismo período que en PB, lo que sugiere que este fenómeno de baja presión (ciclón) tuvo un impacto regional. Este sistema atmosférico se desarrolló sobre la provincia de Buenos Aires entre el 24 y el 27 de marzo, causando complicaciones en toda la región costera, desde Puerto Belgrano hasta el sector este de la provincia, incluida Mar del Plata, donde también se registraron los mayores acumulados de precipitaciones.



Fig. 16 : fotografía de buques afectados en el temporal de 24 MAR en PB.

EVENTO 4: 11 MAR 2007 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MINIMAS)



El 11 de marzo de 2007 a las 06:00 horas, la estación mareográfica de Puerto Belgrano (PB) registró una altura mínima de marea de -0,47 metros por debajo del Plano de Reducción de Sondeos (PRS). Este evento extraordinario se caracterizó por un descenso sostenido del nivel del mar, que comenzó el 10 de marzo a las 09:00 horas y se mantuvo hasta el 12 de marzo a las 06:00 horas. En el momento más bajo, el residuo mareal alcanzó los -1,06 metros, siendo la marea astronómica predicha de 0,61 metros.

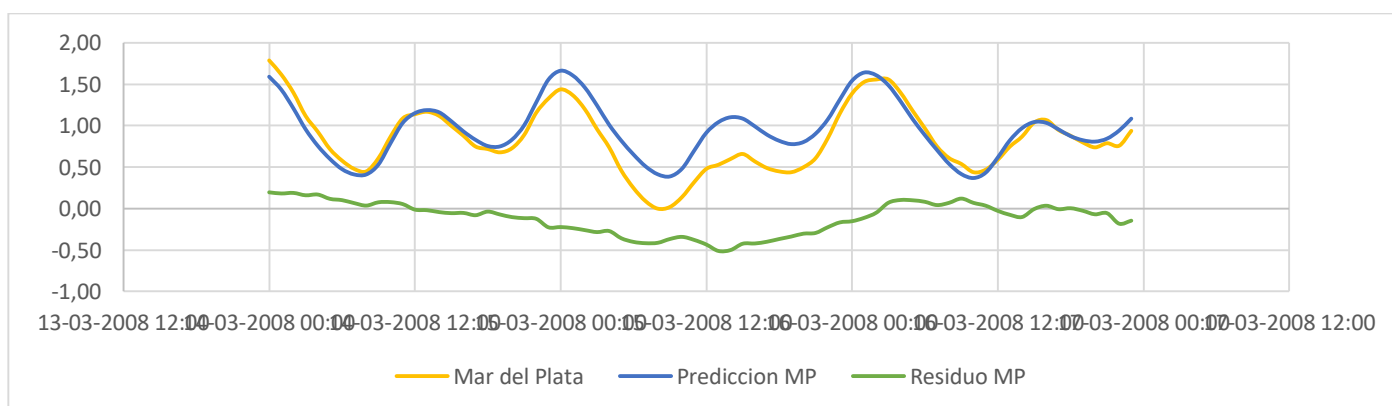
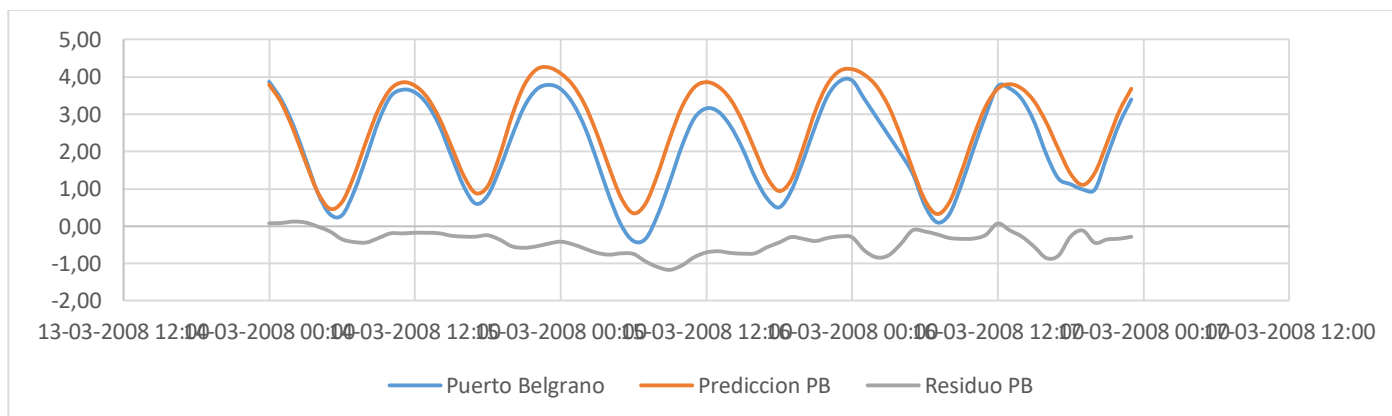
Las condiciones meteorológicas en el momento del evento incluyeron una presión atmosférica muy baja de 996,6 hPa y vientos del sector NW con intensidades de 43,2 nudos. Estos factores contribuyeron al fenómeno al empujar las aguas hacia el mar abierto, provocando un descenso temporal del nivel del agua en el puerto. Este comportamiento se alinea con el efecto de las ondas de tormenta negativas, donde los vientos fuertes y la baja presión generan un drenaje del agua hacia áreas más profundas, disminuyendo significativamente el nivel del mar en la costa.

Desde el punto de vista operativo, este descenso pudo haber comprometido la seguridad de los buques en la dársena de Puerto Belgrano, donde las profundidades oscilan entre 5 metros en los bordes y 8,5 metros en el centro. Considerando que los destructores MEKO 360, típicamente apostados en esta base, tienen un calado

promedio de 5,6 metros, la situación podría haber generado el riesgo de que los buques tocaran fondo, afectando su estabilidad.

En Mar del Plata (MDP), este evento se registró aproximadamente dos horas después, con una altura mínima de 0,10 metros a las 08:00 horas, aunque los vientos en esta zona mantuvieron su dirección del NW con intensidades de 35 nudos, la presión atmosférica fue menos extrema, registrándose en 1008,1 hPa. Esta diferencia en la presión atmosférica entre PB y MDP, junto con las características geográficas de cada puerto, explica las variaciones en las magnitudes de las mareas mínimas observadas.

EVENTO 5: 15 MAR 2008 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MINIMAS)

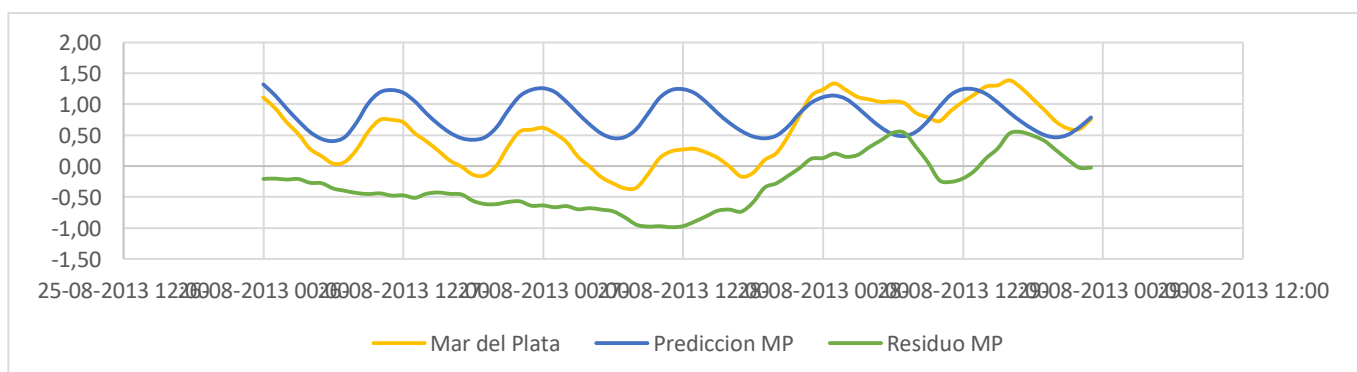
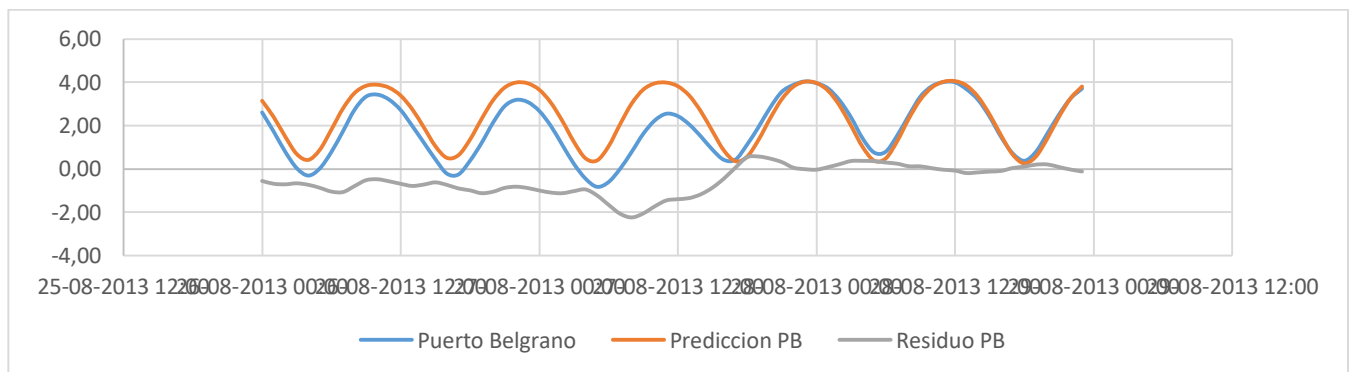


En Puerto Belgrano (PB), las alturas de marea comenzaron a registrar valores por debajo de la marea astronómica predicha un día antes de alcanzar su mínimo anual, el 15 de marzo de 2008 a las 07:00 horas, con un valor mínimo de -0,34 metros por debajo del Plano de Reducción de Sondeos (PRS). Los niveles permanecieron bajos durante un período prolongado, manteniéndose cercanos al mínimo hasta el día siguiente.

Este fenómeno estuvo asociado a condiciones meteorológicas adversas, con vientos persistentes del sector NW que alcanzaron una intensidad promedio de 51 nudos, acompañados de una baja presión atmosférica de 1002,9 hPa. Aunque no se registraron precipitaciones, la combinación de vientos fuertes y baja presión generó una onda de depresión que desplazó las masas de agua hacia mar abierto, provocando el descenso temporal del nivel del mar en el puerto. El impacto de este evento sobre las operaciones portuarias pudo haber sido significativo, especialmente en buques con calados mayores. Aunque la altura mínima registrada no fue tan extrema como en el evento de 2007, el descenso prolongado del nivel del agua pudo comprometer la maniobrabilidad de embarcaciones

En Mar del Plata (MDP), este fenómeno se registró horas más tarde, reflejando nuevamente el retardo de propagación entre ambos puertos. La altura mínima registrada fue de 0,02 metros sobre el PRS, un valor significativamente menor en magnitud en comparación con PB. Los vientos en MDP también se mantuvieron del NW, aunque con menor intensidad y una presión atmosférica algo más alta, lo que mitigó el efecto de la onda negativa. La configuración costera abierta de MDP permitió que las mareas se mantuvieran más estables, disminuyendo la amplitud del residuo mareal.

EVENTO 6: 27 AGO 2013 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MINIMAS)



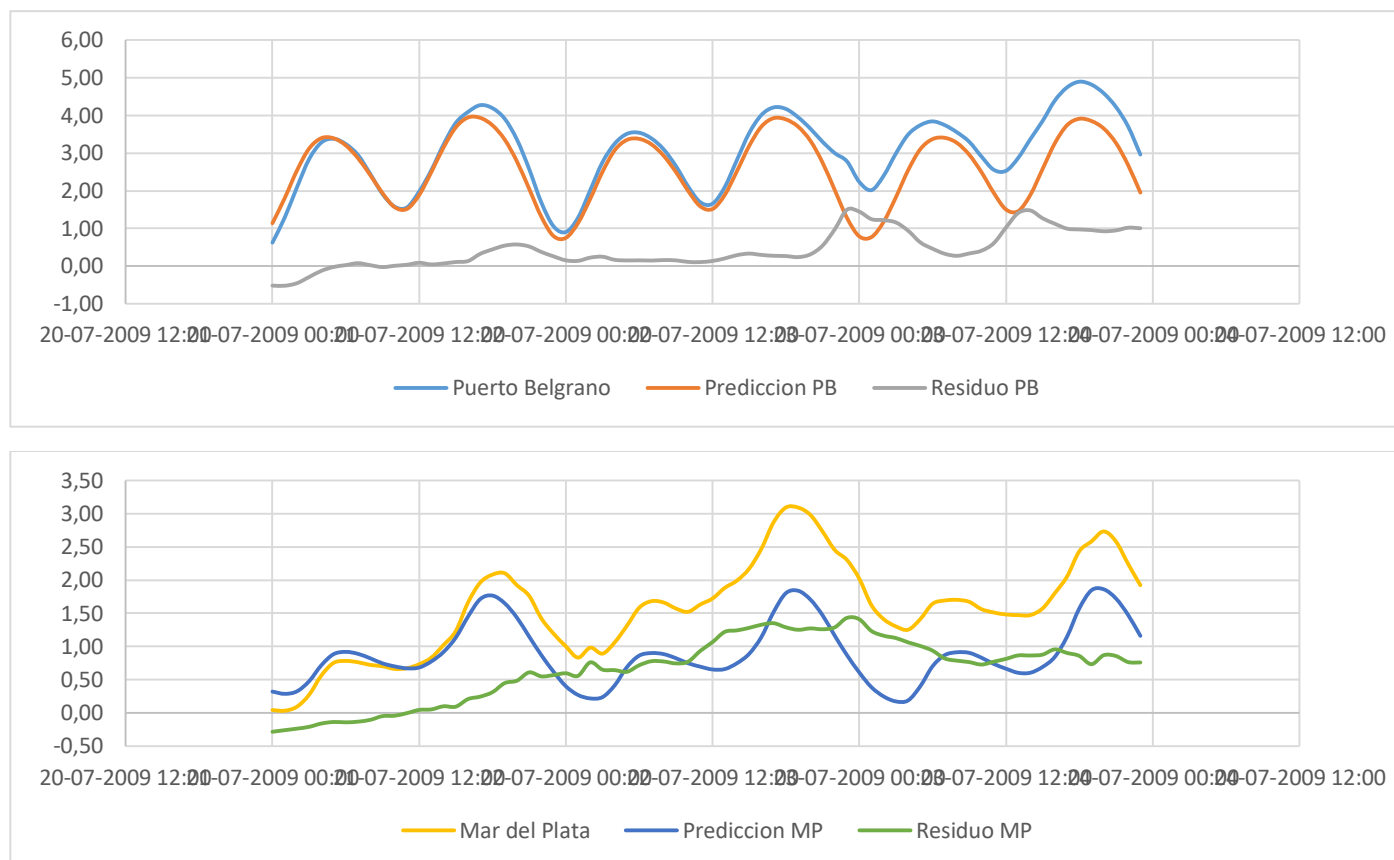
El 27 de agosto de 2013 a las 05:00 horas, se registró en Puerto Belgrano (PB) una altura de marea mínima de -0,82 metros por debajo del Plano de Reducción de Sondeos (PRS), convirtiéndose en el valor más bajo registrado en el período analizado. Este evento estuvo precedido por alturas de marea inferiores a las astronómicas desde varios días antes, con un descenso gradual que continuó hasta un día después del evento, momento en el que las mareas predichas y observadas volvieron a coincidir.

Las condiciones meteorológicas en PB fueron similares a las de eventos anteriores, con vientos persistentes del sector NW que alcanzaron una intensidad aproximada de 39 nudos y sin registro de precipitaciones. Este patrón atmosférico generó una onda de tormenta negativa, caracterizada por el empuje de las masas de agua hacia mar abierto, lo que resultó en un descenso anómalo y prolongado del nivel del mar. A pesar de que los vientos fueron menos intensos que en eventos como el de 2007, la magnitud del residuo mareal negativo sugiere que otros factores, como la duración de los vientos y la configuración local del estuario, contribuyeron significativamente a este evento.

En Mar del Plata (MDP), las condiciones meteorológicas fueron similares a las de PB, con vientos del sector NW y presiones bajas. Sin embargo, las mareas registradas en MDP también estuvieron por debajo de los valores predichos desde varios días antes, aunque la magnitud del residuo mareal fue menor en comparación con PB. La altura mínima observada fue de -0,35 metros, registrada a las 08:00 horas, aproximadamente tres horas después del evento en PB. Esto refuerza el retardo de propagación típico entre ambos puertos y pone de manifiesto cómo la costa abierta de MDP modera los efectos de las ondas de tormenta negativas

4.4.2. BASE NAVAL MAR DEL PLATA.

EVENTO 1: 22 JUL 2009 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MAXIMAS)



El 22 de julio de 2009 a las 19:00 horas, la estación mareográfica de Mar del Plata (MDP) registró una marea máxima de 3,09 metros, mientras que la marea astronómica predicha era de 1,84 metros, lo que generó un residuo mareal positivo de 1,27 metros. Este evento representa un valor que supera el rango micromareal típico de MDP, que generalmente no excede los 2 metros, indicando la influencia de factores meteorológicos extraordinarios.

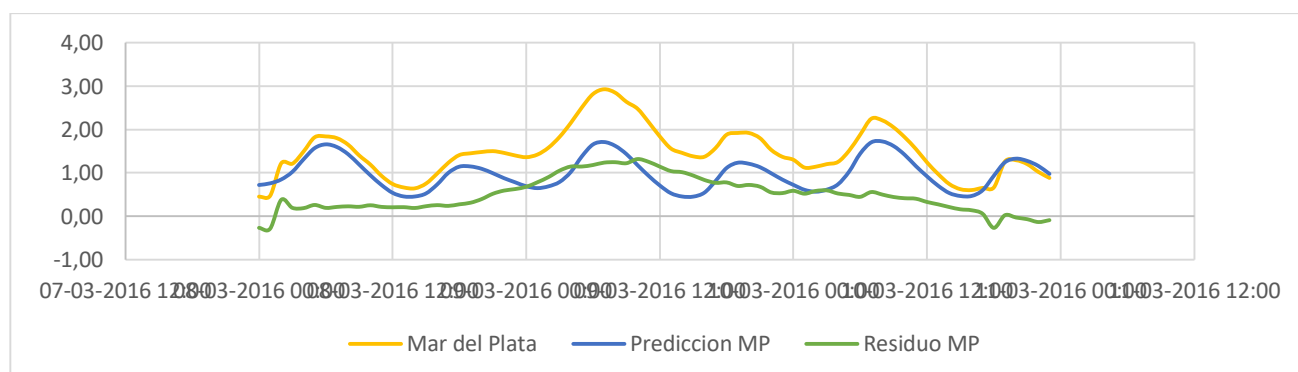
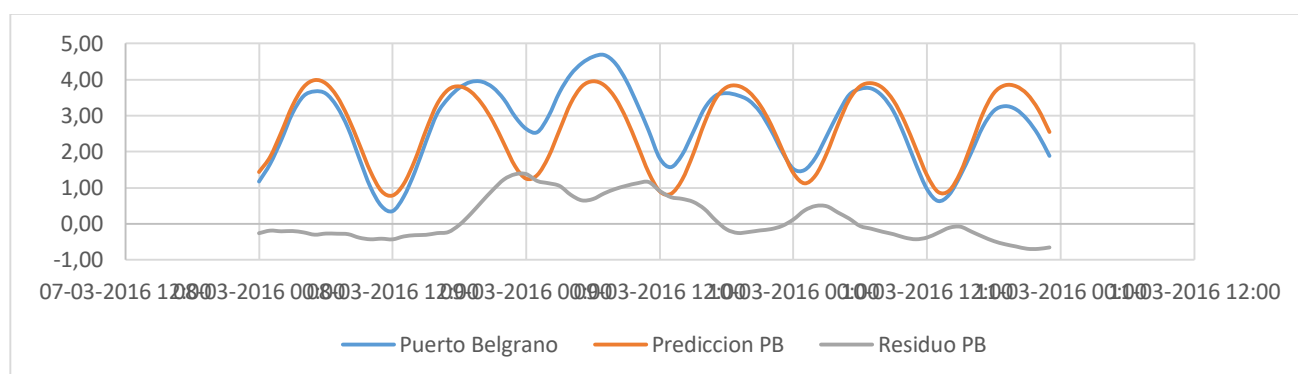
En el gráfico correspondiente a este evento se puede observar que el régimen de marea de MDP se caracteriza como mixto, predominantemente semidiurno, en contraste con el régimen estrictamente semidiurno de Puerto Belgrano (PB). Esta diferencia es clave para entender cómo las dinámicas locales afectan la respuesta mareal en cada puerto.

Este evento estuvo asociado a una baja presión atmosférica de 995,3 hPa, acompañada de lluvias moderadas y vientos del sector W con una intensidad aproximada de 37 nudos. Estos factores generaron una onda de tormenta positiva, que elevó significativamente el nivel del mar por encima de los valores predichos. La

dirección del viento, proveniente del continente, es menos habitual para MDP, lo que podría explicar una acumulación moderada de agua en la costa.

Mientras tanto, en Puerto Belgrano (PB), las mareas observadas y astronómicas coincidieron durante gran parte del día. Sin embargo, se observó un aumento gradual del residuo mareal a partir del mediodía del 22 de julio, aunque sin superar los 5 metros, límite crítico que comprometería la estabilidad de los buques apostados en el puerto. En esta región, los vientos también provenían del sector W con una intensidad similar (37 nudos), pero la configuración del estuario mitigó parcialmente el impacto de la onda de tormenta positiva.

EVENTO 2: 09 MAR 2016 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MAXIMAS)



El 9 de marzo de 2016, se registraron valores destacados de marea máxima tanto en Puerto Belgrano (PB) como en Mar del Plata (MDP), reflejando un fenómeno meteorológico regional con respuestas distintas debido a las configuraciones geográficas locales.

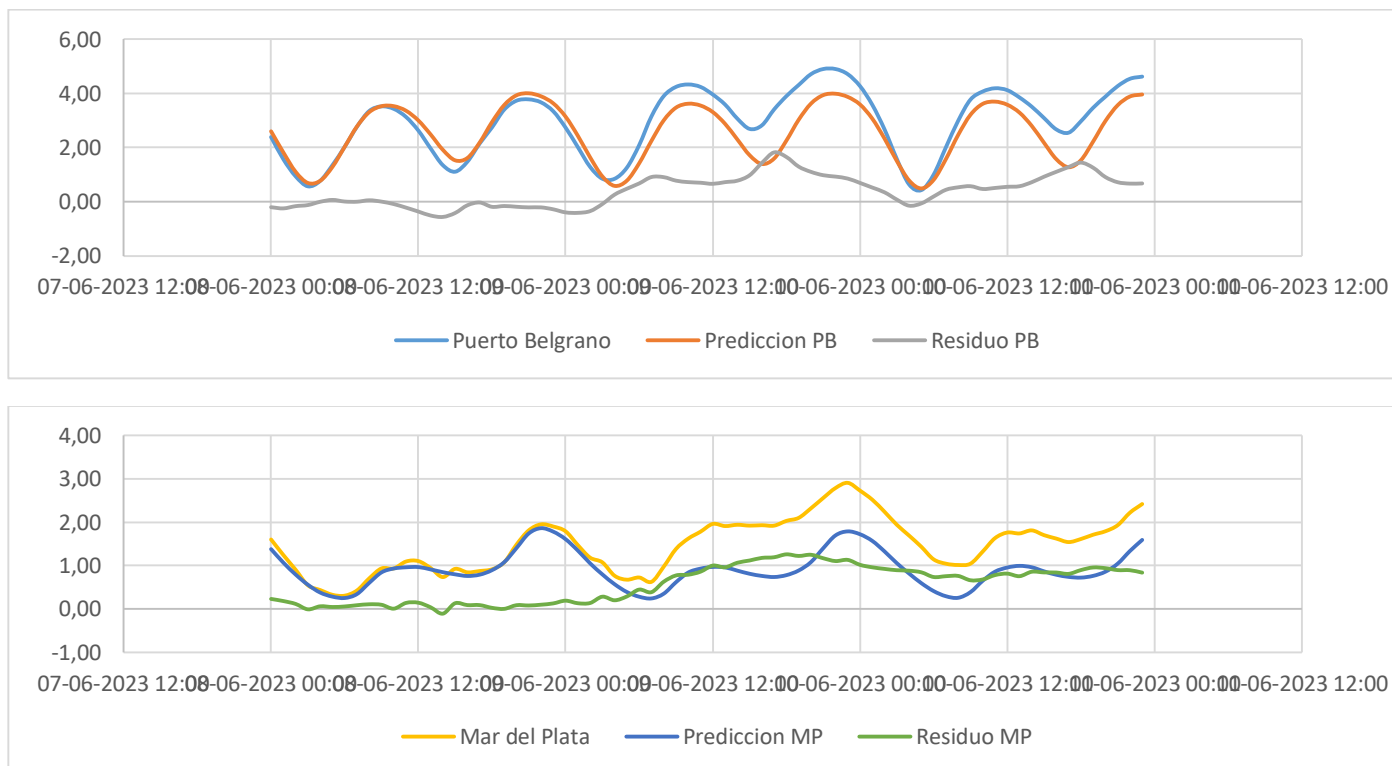
En Puerto Belgrano, la altura máxima registrada fue de 4,69 metros, observada a las 06:00 horas, dentro de los valores típicos de amplitud máxima para este puerto. Aproximadamente dos horas después, a las 08:00 horas, en MDP, se observó una

marea máxima de 2,64 metros, superando por más de un metro la amplitud máxima media típica de la zona, lo que resalta la influencia de factores no astronómicos.

En MDP, las condiciones meteorológicas estaban marcadas por una presión atmosférica de 1016,5 hPa, sin precipitaciones y vientos inicialmente bajos del sector Sur. Sin embargo, ese día se registró un aumento brusco en la intensidad del viento, alcanzando 25 nudos. Este cambio repentino generó una acumulación de agua en la costa, elevando el nivel del mar por encima de los valores predichos y causando un residuo mareal positivo.

En contraste, en PB, aunque se registraron valores elevados, las mareas se mantuvieron dentro de los rangos esperados, lo que indica que las condiciones locales (como la configuración estuarina) amortiguaron el impacto de las variaciones meteorológicas observadas en la región.

EVENTO 3: 09 JUN 2023 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MAXIMAS)



El 9 de junio de 2023 a las 23:00 horas, la estación mareográfica de Mar del Plata (MDP) registró una marea máxima de 2,91 metros, destacándose como uno de los eventos máximos recientes más significativos. Este nivel de marea estuvo influenciado por una presión atmosférica baja de 1004,6 hPa y vientos del sector W

con intensidades de 33 nudos. Estos factores meteorológicos contribuyeron a un residuo mareal positivo constante, que provocó que la sinusoide registrada por el mareógrafo reflejara una forma similar a la predicción astronómica, pero desplazada hacia valores superiores.

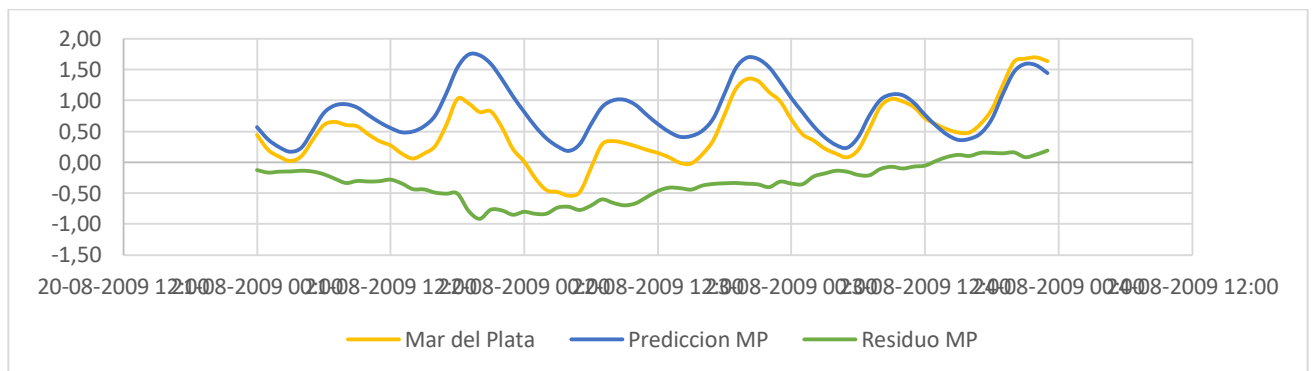
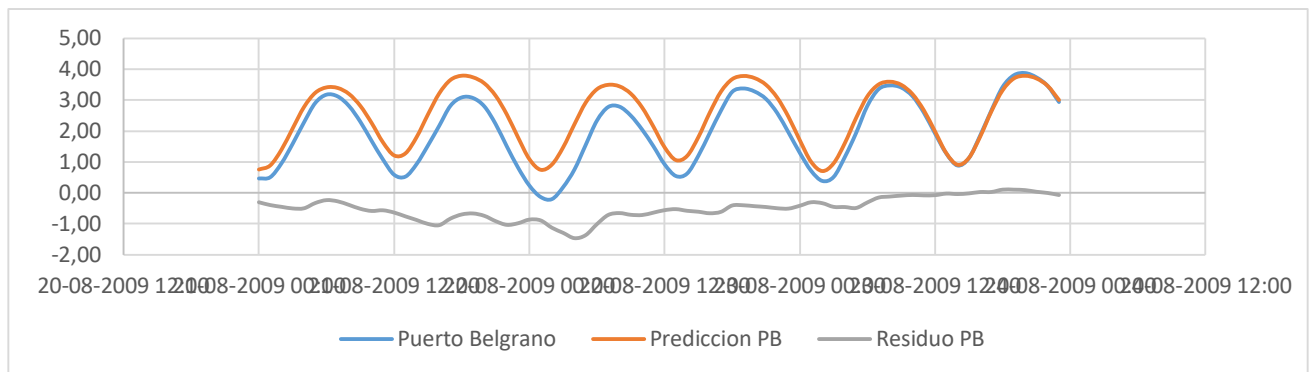
El desplazamiento rápido de la masa de agua hacia MDP fue impulsado por los mismos vientos del sector W registrados en Puerto Belgrano (PB), donde las condiciones atmosféricas se caracterizaban por vientos persistentes del mismo sector, generando un flujo regional que conectó los fenómenos en ambos puertos. Aunque las mareas máximas observadas en PB durante este período no alcanzaron valores extremos, el flujo atmosférico predominante facilitó la propagación del fenómeno hacia la costa abierta de MDP.

Este evento guarda similitudes con los eventos máximos de 2009 y 2016, donde los vientos del sector W y las presiones atmosféricas bajas fueron factores determinantes en la generación de residuos mareales positivos en MDP. Sin embargo, destaca una diferencia importante: mientras que en 2009 y 2016 se registraron fluctuaciones más abruptas en las mareas debido a cambios repentinos en las condiciones meteorológicas, en 2023 el residuo mareal mostró un crecimiento constante, manteniendo un comportamiento más predecible.

El retardo temporal observado entre los máximos en PB y MDP (aproximadamente 2 a 3 horas) sigue siendo un patrón constante entre ambos puertos, confirmando la conexión regional impulsada por los vientos predominantes. Además, la intensidad del residuo mareal en MDP refleja nuevamente cómo la configuración de su costa abierta permite una amplificación moderada, en contraste con el estuario de PB, donde las mareas máximas suelen ser más severas.

Este evento refuerza la importancia de las ondas de tormenta positivas en la generación de mareas extraordinarias máximas. En el caso de MDP, el comportamiento armónico del residuo mareal demuestra que incluso condiciones meteorológicas moderadas, como una presión baja sostenida y vientos persistentes del sector W, pueden generar residuos significativos si se mantienen de forma constante. Este fenómeno puede explicarse por la interacción entre las masas de agua desplazadas por el viento y la configuración geográfica local, que en MDP permite un patrón de acumulación gradual y uniforme.

EVENTO 4: 22 AGO 2009 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MINIMAS)



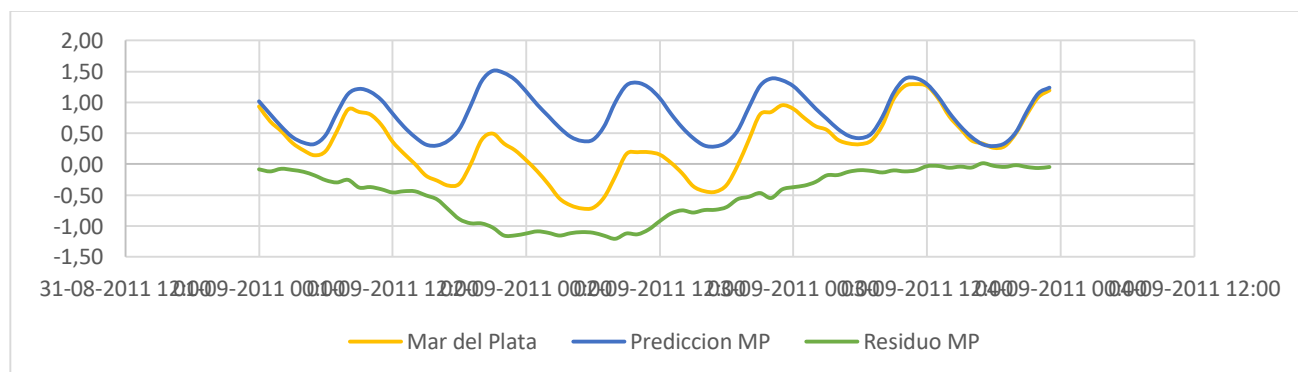
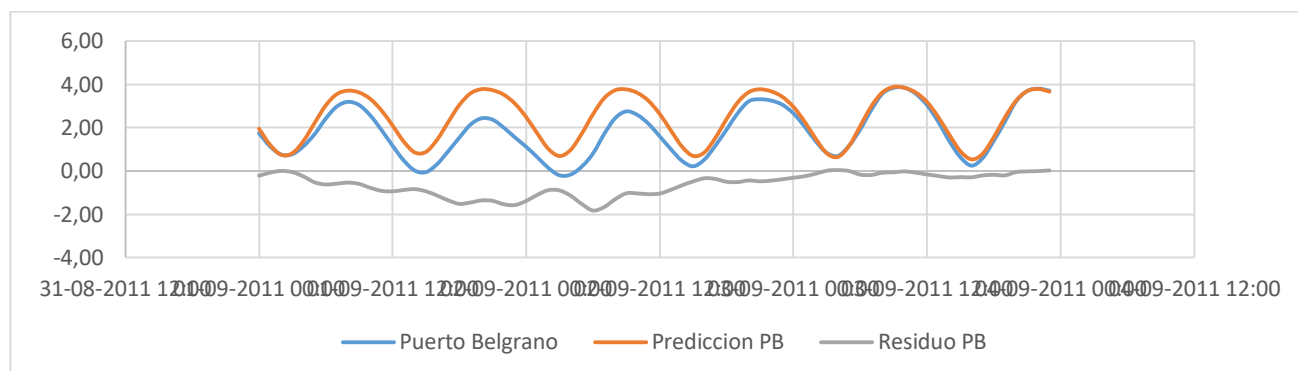
El 22 de agosto de 2009 a las 05:00 horas la estación mareográfica de Mar del Plata (MDP) registró una marea mínima de -0,48 metros por debajo del Plano de Reducción de Sondeos (PRS), con un residuo mareal negativo de -0,77 metros. La marea astronómica predicha para ese momento era de 0,18 metros. Este evento extraordinario estuvo acompañado de vientos del sector NW, que alcanzaron una intensidad de 32 nudos, en un contexto de presión atmosférica de 1012,6 hPa, tiempo cálido y sin precipitaciones.

El fenómeno comenzó a manifestarse varios días antes, con mareas observadas por debajo de los valores astronómicos predichos. Aunque las condiciones meteorológicas se mantuvieron relativamente estables, el día del evento se produjo un aumento abrupto en la intensidad del viento, alcanzando valores que duplicaron los días previos. Esto amplificó la onda de tormenta negativa, desplazando las masas de agua hacia el mar abierto y provocando el mínimo registrado. Las mareas volvieron a coincidir con los valores predichos al día siguiente.

En PB, se registró una bajamar de -0,21 metros por debajo del PRS aproximadamente dos horas antes que en MDP, reflejando la propagación del fenómeno entre ambos puertos. Los constantes vientos del NW, con una intensidad promedio de 30 nudos, favorecieron este desplazamiento regional del agua, conectando los eventos

registrados en ambas localidades. confirma nuevamente el patrón de propagación regional de estos fenómenos, mientras que la magnitud del residuo negativo en MDP pone de manifiesto la influencia de los vientos constantes del NW en una costa abierta como la de Mar del Plata.

EVENTO 5: 02 SEP 2011 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MINIMAS)



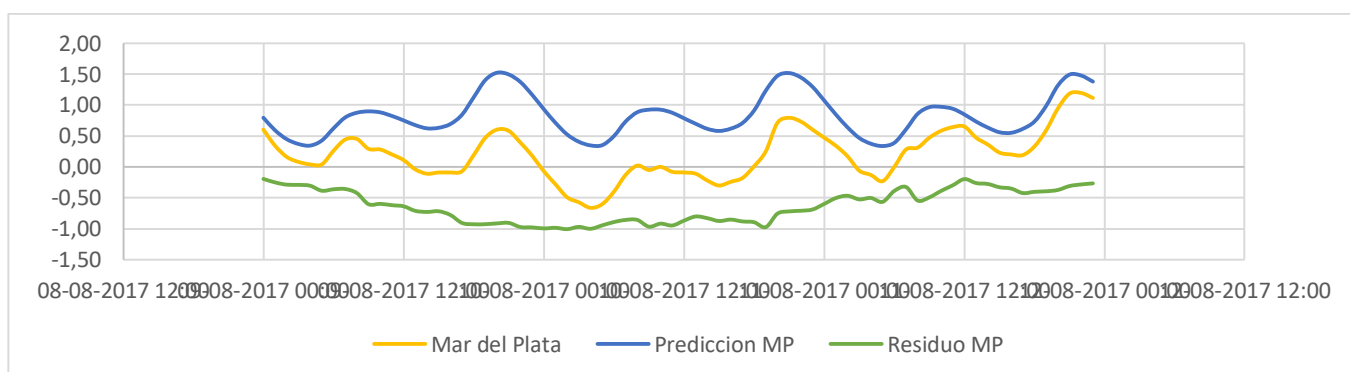
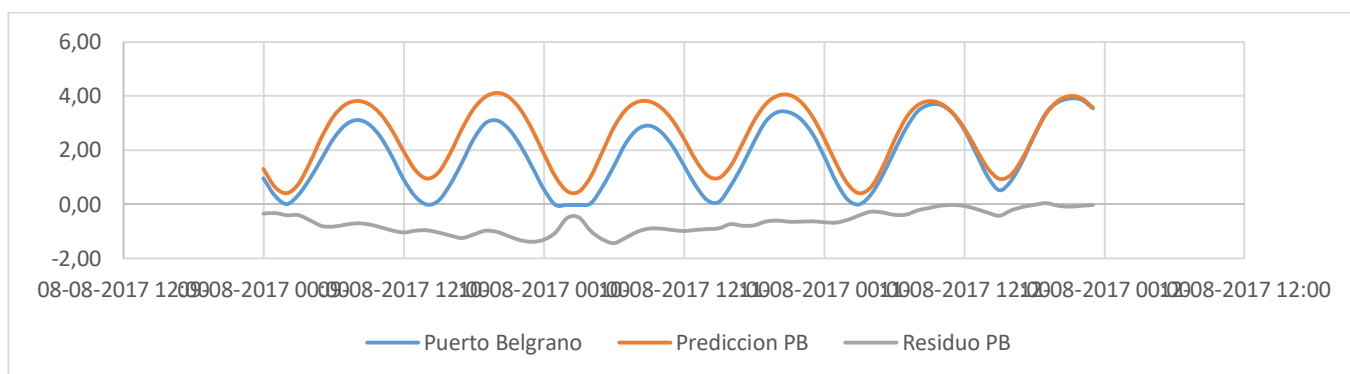
El 2 de septiembre de 2011, las condiciones meteorológicas en MDP generaron un fenómeno de bajamar extraordinaria, dejando registros destacados en la estación mareográfica local. Con vientos sostenidos del sector Norte alcanzando 39 nudos y una presión atmosférica de 1020 hPa, la altura mínima de la marea fue de -0,71 metros por debajo del Plano de Reducción de Sondeos (PRS). Este valor, acompañado de un residuo mareal negativo de -1,10 metros (siendo la marea astronómica predicha de 0,39 metros), se mantuvo durante aproximadamente 48 horas, marcando un evento prolongado y significativo en la dinámica costera de la región.

En paralelo, en Puerto Belgrano (PB) se observó una marea mínima menos pronunciada, con un valor de -0,10 metros por debajo del PRS. Las condiciones meteorológicas en PB incluyeron vientos del sector N-NE con intensidades más moderadas de 30 nudos, lo que explica la menor magnitud del residuo mareal en

comparación con MDP. Este contraste subraya cómo las configuraciones geográficas y los patrones de viento predominantes afectan de manera diferenciada la respuesta mareal en ambas ubicaciones.

El residuo mareal negativo de -1,10 metros en MDP es uno de los más significativos registrados en este período, superando los valores observados en PB. Esto refuerza el impacto amplificador de los vientos del sector Norte en una costa abierta como la de MDP, en contraste con la respuesta más moderada del estuario de PB.

EVENTO 6: 10 AGO 2017 (MAREAS EXTRAORDINARIAS MINIMAS)



El último evento extraordinario de mareas bajas registrado en Mar del Plata (MDP) durante este período ocurrió el 10 de agosto de 2017 a las 05:00 horas, con una altura de marea mínima de -0,66 metros por debajo del Plano de Reducción de Sondeos (PRS). Este valor estuvo acompañado de una presión atmosférica de 1020,2 hPa y vientos persistentes del cuadrante Este con intensidades de 26 nudos, condiciones que ya se mantenían desde días anteriores.

El fenómeno se caracterizó por mareas observadas consistentemente por debajo de las predichas durante varios días, con residuos mareales negativos cercanos a -1

metro. En el momento del mínimo, se registró un aumento transitorio en el residuo, que incrementó en 20 centímetros por un período corto, antes de retornar a valores más estables. Este comportamiento sugiere un evento puntual relacionado con un cambio temporal en la intensidad del viento o una alteración local en las condiciones meteorológicas.

En Puerto Belgrano (PB), el evento mínimo asociado se registró aproximadamente dos horas antes, a las 03:00 horas, con una altura de marea de -0,20 metros por debajo del PRS. Los residuos mareales en PB se mantuvieron más constantes durante este período, reflejando una respuesta más moderada en comparación con la costa abierta de MDP.

Este evento comparte similitudes con los mínimos registrados en 2009 y 2011, donde los residuos mareales negativos persistentes estuvieron impulsados por vientos constantes de una dirección predominante. Sin embargo, a diferencia de eventos anteriores, este caso presenta vientos del cuadrante Este, que generaron una respuesta menos intensa en MDP, aunque suficiente para registrar un valor notablemente por debajo de la marea predicha. El aumento puntual del residuo mareal negativo en MDP durante el momento del mínimo resalta cómo pequeños cambios en la intensidad o dirección del viento pueden amplificar temporalmente las mareas bajas.

El retardo temporal de dos horas entre los mínimos en PB y MDP sigue siendo consistente con los patrones observados en eventos previos, confirmando la conexión regional entre los puertos. Sin embargo, las magnitudes más bajas observadas en PB refuerzan nuevamente el papel de la configuración geomorfológica del estuario para amortiguar los efectos de las ondas de tormenta negativas.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

El análisis de las mareas extraordinarias máximas y mínimas en Puerto Belgrano (PB) y Mar del Plata (MDP) permitió comprender en profundidad los factores que influyen en estos fenómenos y su impacto en las operaciones de las embarcaciones en ambos puertos. Es importante destacar que, durante el período analizado entre 2005 y 2023, con datos proporcionados por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN), la ocurrencia de estos eventos no siguió un patrón predecible o periódico. En este lapso de 18 años, las mareas extraordinarias se manifestaron de forma irregular, y las alturas registradas

variaron considerablemente, lo que confirma que ningún evento se repite de la misma manera en dos ocasiones.

Asimismo, se observó que las condiciones meteorológicas locales pueden proporcionar indicios sobre la posible ocurrencia de niveles de marea que superen o se encuentren por debajo de los valores predichos por la marea astronómica. Sin embargo, la interacción compleja entre los factores atmosféricos, como los vientos y la presión, y las características geográficas de cada puerto, refuerza el carácter impredecible de estos fenómenos.

En la Base Naval Puerto Belgrano (PB), se determinó que las alturas de marea superiores a 5 metros comprometen la estadía de las embarcaciones, ya que el nivel del agua alcanza el borde del muelle, poniendo en riesgo la seguridad operativa del puerto. Por otro lado, valores de marea inferiores a -1 metro por debajo del Plano de Reducción de Sondeos (PRS) podrían comprometer la estabilidad de los buques al quedar expuestos al fondo del puerto. Aunque hasta el momento no se han registrado valores por debajo de este umbral, la bajamar extraordinaria de menor magnitud fue la del 27 de agosto de 2013, con una altura de -0,82 metros. Desde entonces, no se ha observado ningún evento con características similares.

En el Puerto de Mar del Plata (MDP), al tratarse de una zona con un rango micromareal y profundidades que oscilan entre 5 y 9 metros dentro de la dársena militar, los riesgos operativos son menores en comparación con PB, pero no inexistentes. La marea mínima más baja registrada fue de -0,71 metros, dejando aún una columna de agua relativamente adecuada para las embarcaciones de gran calado que operan en la zona, como el Buque Oceanográfico A.R.A. "Austral". Este buque, al tener designado generalmente un lugar de amarre en zonas con mayores profundidades se ve menos afectado por las mareas mínimas.

En el caso de las mareas extraordinarias máximas en MDP, estas alcanzaron valores cercanos a los 3 metros, superando significativamente las pleamares máximas esperadas según las tablas de marea. Estos eventos, aunque menos frecuentes, pueden generar desafíos adicionales para las operaciones portuarias y las maniobras en la dársena militar.

Desde el punto de vista teórico, las mareas extraordinarias representan una interacción compleja entre las mareas astronómicas y los factores meteorológicos, modulados por las características geomorfológicas de cada zona. La descripción de

las áreas de estudio también permitió contextualizar las diferencias. En PB, la configuración de la dársena y los muelles aporta cierta capacidad para manejar fluctuaciones moderadas, pero eventos extremos pueden comprometer la seguridad de embarcaciones como es el caso de los buques tipo destructores MEKO 360 que presentan un mayor calado, especialmente durante mareas extraordinarias máximas. Por otro lado, en MDP, el régimen mareal mixto predominantemente semidiurno y la exposición a vientos más intensos generan un riesgo mayor durante mareas mínimas prolongadas, dificultando las maniobras y aumentando el riesgo de que las embarcaciones queden varadas en algunos sectores de puerto. También, las diferencias geográficas entre PB y MDP resultaron fundamentales para entender cómo cada puerto responde a los fenómenos extraordinarios. Puerto Belgrano, con su configuración y aguas más confinadas, mostró una tendencia a amplificar las mareas máximas, mientras que las mínimas fueron atenuadas por la moderación natural del estuario. En cambio, en Mar del Plata, con su costa abierta y exposición directa al océano Atlántico, los residuos mareales fueron más extremos tanto en máximos como en mínimos, lo que evidencia una mayor sensibilidad a los factores meteorológicos.

Se comprobó que los fenómenos de mareas extraordinarias están íntimamente ligados a las condiciones meteorológicas predominantes, particularmente la dirección e intensidad de los vientos y la presión atmosférica. Los vientos del NW y SW, dependiendo de su intensidad y persistencia, fueron los principales generadores de ondas de tormenta positivas y negativas, amplificando las mareas máximas o provocando descensos extremos durante las mínimas. En este contexto, el residuo mareal se utilizó como un indicador clave para cuantificar la desviación entre la marea astronómica predicha y la observada.

Un hallazgo relevante fue la conexión regional entre ambos puertos, evidenciada por un retardo temporal promedio de 2 a 3 horas en la propagación de los fenómenos. Este retardo confirma que los patrones meteorológicos compartidos generan efectos sincronizados entre PB y MDP, aunque las magnitudes varían debido a las características locales de cada puerto.

El impacto operativo de las mareas extraordinarias es significativo. En PB, las mareas máximas pueden exceder los límites críticos de la dársena, poniendo en riesgo la estabilidad de las embarcaciones. En MDP, las mareas mínimas prolongadas representan un desafío adicional, ya que las embarcaciones con calados profundos

pueden quedar expuestas al fondo del puerto, dificultando sus maniobras y comprometiendo su seguridad.

Para mitigar estos riesgos, es fundamental fortalecer los sistemas de monitoreo mareográfico y meteorológico en ambas localidades. Esto incluye la integración de modelos predictivos en tiempo real que consideren tanto factores astronómicos como meteorológicos. Además, se recomienda realizar estudios adicionales que aborden el efecto combinado de las corrientes costeras, las precipitaciones y las condiciones del fondo marino en la dinámica mareal. Finalmente, se sugiere establecer protocolos específicos para gestionar las operaciones portuarias durante eventos extremos, adaptados a las características únicas de cada puerto.

BIBLIOGRAFÍA

D'Onofrio, E., Fiore, M., & Romero, S. (1994). *Tendencias del nivel medio del mar en el litoral argentino*. Servicio de Hidrografía Naval.

D'Onofrio, E., & Fiore, M. (1998). *Nivel medio del mar* (Primera versión borrador). Cátedra de Hidrografía y Oceanografía, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires (FIUBA).

D'Onofrio, E., (1998). *Mareas* (capítulo I). Servicio de Hidrografía Naval.

Castelli, M. (2000). *Nivel medio del mar*. Servicio de Hidrografía Naval.

TidesexplainedDiurnalTideandSemidiurnalTides.(s. f.). https://beltoforion.de/en/tides/tidal_cycles.php#idStart

Beltoforion. (s. f.). *Tides explained - Diurnal Tides and Semidiurnal Tides*. Recuperado de https://beltoforion.de/en/tides/tidal_cycles.php#idStart

Estación Mareográfica Puerto Belgrano. (2019). Recuperado de <http://emac.iadocnicet.gob.ar/2019/datosenvivo.php?idestacion=BNPB>

Sepúlveda, H. H., Maturana, A., y Correa, C. (2008). *Tsunamis y ondas de tormenta en la costa chilena: su influencia en el nivel del mar*. *Investigaciones Geográficas*, (41), 87-101. Recuperado de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022008000200006

Prario, M., & Dragani, W. (2019). *Las mareas y el oleaje en Mar del Plata: Análisis y variabilidad*. *Revista de Oceanografía*, 113(36), 85-97.