



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



Trabajo Final Integrador

RELACIÓN ENTRE LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA PLACA SCOTIA Y LAS VARIACIONES EN EL NIVEL DEL MAR: IMPLICACIONES PARA LOS LEVANTAMIENTOS HIDROGRÁFICOS ANTÁRTICOS.

Autor: TFCDNA Leonardo Martin LACENTRE.
Tutor: Dra. María Alejandra ARECCO.

AÑO 2024

**"RELACIÓN ENTRE LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA PLACA SCOTIA Y LAS
VARIACIONES EN EL NIVEL DEL MAR: IMPLICACIONES PARA LOS LEVANTAMIENTOS
HIDROGRÁFICOS ANTÁRTICOS"**

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	6
INTRODUCCIÓN	7
OBJETIVOS	9
ACTIVIDAD ANTÁRTICA DE LA REPÚBLICA ARGENTINA	10
Presencia ininterrumpida desde 1904	10
La República Argentina miembro signatario del Tratado Antártico	11
La República Argentina como miembro de la Organización Hidrográfica Internacional y la responsabilidad de producir cartografía náutica en su zona de responsabilidad	12
MARCO GEOLÓGICO	14
Placa Scotia	14
La Actividad Sísmica	16
Red sismográfica	18
Red geomagnética	20
MARCO OCEANOGRÁFICO	21
La Corriente Circumpolar Antártica	21
Campo de hielo marino	22
Nivel del mar	22
Mareas	22
Tsunamis en la región	23
INFORMACIÓN METEOROLÓGICA	27
BASES ARGENTINAS EN LA ZONA DE ESTUDIO	28
Base Antártica Esperanza	28
Base Carlini	28
Base Orcadas	29
Base Cámara	30
Base Petrel	30
DATOS Y METODOLOGÍA DE ESTUDIO	32
Datos geológicos	32
Datos sismológicos	33
Datos mareográficos	34

Datos meteorológicos.....	34
ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS	35
Resultados sismológicos.....	35
Resultados mareográficos.....	37
Variaciones del nivel del mar en relación a cada evento sísmico	38
Resultados Meteorológicos	51
CONCLUSIONES.....	57
REFERENCIAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sectorización del área de estudio.	9
Figura 2 Bases argentinas en la Antártida.....	10
Figura 3 Bases de distintos países en la península antártica.	11
Figura 4 Bases en Isla Signy y Laurie, en Islas Orcadas del Sur.....	12
Figura 5 Sector del mapa geológico de las placas Scotia y Sandwich.	14
Figura 6 Caracterización de los límites y esfuerzos de las Placas Scotia y Sandwich.....	15
Figura 7 Configuración tectónica del arco de Scotia.....	16
Figura 8 Zona de triple Unión de las Placas del Pacífico, Nazca, y Antártica.....	17
Figura 9 Imagen representativa de la actividad sísmica del área de estudio.....	18
Figura 10 Red sísmográfica Antártica Argentino-Italiana (ASAIN).....	19
Figura 11 Red de observatorios geomagnético (INTERMAGNET).....	20
Figura 12 Principales flujos de las masas de agua en la región de Scotia.....	21
Figura 13 travel time de la onda de tsunami generada por el sismo del 12/08/2021.....	24
Figura 14 Penetración de las aguas sobre el istmo de Isla Laurie.....	25
Figura 15 Bloques de hielo marino fracturados por el tsunami.	25
Figura 16 Vista de la Base Esperanza.	28
Figura 17 Vista de la Base Carlini.	29
Figura 18 Vista de la Base Orcadas.....	29
Figura 19 Vista de la Base Cámara.....	30
Figura 20 Vista de rasgos generales del relieve de la zona de la Base Petrel.....	31
Figura 21 Ubicación de las bases y epicentros de sismos en estudio.	35
Figura 22 Ubicación de mareógrafos.....	37
Figura 23 Serie temporal de altura de marea de Puerto Williams. 17/11/2013.	39
Figura 24 Serie temporal de altura de marea de Puerto Deseado. 17/11/2013.....	39
Figura 25 Serie temporal de altura de marea de King Eduard Point. 17/11/2013.	40
Figura 26 Serie temporal de altura de marea de Base Prat. 17/11/2013.	40
Figura 27 Serie temporal de altura de marea de Base Vernadsky. 17/11/2013.	40
Figura 28 Serie temporal de altura de marea de Puerto Deseado. 25/11/2013.	41
Figura 29 Serie temporal de altura de marea de Puerto Williams. 25/11/2013.	41
Figura 30 Serie temporal de altura de marea de King Eduard Point. 25/11/2013.	41
Figura 31 Serie temporal de altura de marea de Base Prat. 25/11/2013.	42
Figura 32 Serie temporal de altura de marea de Base Vernadsky. 25/11/2013.	42
Figura 33 Serie temporal de altura de marea de Puerto Deseado. 19/08/2016.	43
Figura 34 Serie temporal de altura de marea de Puerto Williams. 19/08/2016.	43
Figura 35 Serie temporal de altura de marea de King Eduard Point. 19/08/2016.	43
Figura 36 Serie temporal de altura de marea de Base Prat. 19/08/2016.	44
Figura 37 Serie temporal de altura de marea de Base Rothera. 19/08/2016.	44
Figura 38 Serie temporal de altura de marea de Puerto Argentino. 19/08/2016.	44
Figura 39 Serie temporal de altura de marea de Puerto Deseado. 23/01/2021.	45
Figura 40 Serie temporal de altura de marea de Ushuaia. 23/01/2021.....	45
Figura 41 Serie temporal de altura de marea de Base Prat. 23/01/2021.	45
Figura 42 Serie temporal de altura de marea de Base O´Higgins. 23/01/2021.....	46
Figura 43 Serie temporal de altura de marea de Base Vernadsky 23/01/2021.....	46
Figura 44 Serie temporal de altura de marea de Base Rothera. 23/01/2021.	46
Figura 45 Serie temporal de altura de marea de Puerto Argentino. 23/01/2021.	47
Figura 46 Serie temporal de altura de marea de Puerto Deseado. 12/08/2021.	47

Figura 47 Serie temporal de altura de marea de Ushuaia. 12/08/2021.....	47
Figura 48 Serie temporal de altura de marea de King Eduard Point. 12/08/2021.	48
Figura 49 Serie temporal de altura de marea de Base Prat. 12/08/2021.	48
Figura 50 Serie temporal de altura de marea de Base O´Higgins. 12/08/2021.....	48
Figura 51 Serie temporal de altura de marea de Base Vernadsky.12/08/2021.....	49
Figura 52 Meteogramas para el día 17/11/2013.....	51
Figura 53 Meteogramas para el día 25/11/2013.....	52
Figura 54 Meteogramas para el día 18/08/2016.....	53
Figura 55 Meteogramas para el día 23/01/2021.....	54
Figura 56 Meteogramas para el día 13/08/2021.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sismos del área de estudio.....	33
Tabla 2 Distancias en (km) desde los epicentros a las bases de mareográficas. Fecha, hora y magnitud.....	36
Tabla 3 Datos de marea disponibles en relación a cada evento sísmico.	38
Tabla 4 Altura significativa del mar y hora de inicio de registro, debido a la perturbación producto del tsunami, registrada por los mareógrafos.....	50

“El mundo surgió de una condición más ordenada en el pasado que en el presente.”

Richard Phillips Feynman (1918 – 1988)

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas e instituciones que han sido fundamentales para la realización de este trabajo de investigación.

En primer lugar, deseo manifestar mi profunda gratitud a mi tutora, la Dra. María Alejandra ARECCO, por sus valiosos consejos, su constante apoyo y el seguimiento cercano al desarrollo de este trabajo. Aprecio especialmente la libertad que me brindó para abordar diversos aspectos dentro de este complejo tema de estudio, así como por invitarme, de manera indirecta, a adentrarme en el comprometido mundo de la investigación, especialmente en el ámbito de la Defensa.

A la Plana Mayor de la Escuela de Ciencias del Mar, por proveerme de las condiciones necesarias para llevar adelante este proyecto y por otorgarme la autonomía suficiente para decidir el enfoque de este proceso de aprendizaje.

Mi agradecimiento también va dirigido a la Plana Mayor y al personal científico embarcado del Buque Oceanográfico A.R.A. "AUSTRAL", quienes, durante las navegaciones de prueba de sistemas previas a la campaña oceanográfica YTEC-GTGM 6, me brindaron valiosas instrucciones en maniobras oceanográficas e hidrográficas. Estos aprendizajes han sido esenciales para la formación integral de todos los participantes del curso.

Agradezco al Lic. Walter GRIESMEYER, docente de la capacitación, por sus guías iniciales que marcaron el punto de partida de este trabajo, así como a todos los docentes de la Escuela de Ciencias del Mar por la formación recibida. La capacitación ha permitido comprender de manera profunda y multidisciplinaria el ámbito complejo en el que se desarrollan las actividades hidrográficas y oceanográficas, destacando la importancia de un camino formativo largo y sostenido, cuyo impacto es de gran relevancia para el desarrollo de nuestro país.

Mi agradecimiento se extiende al Sr. Teniente de Navío D. Germán Aníbal PISTÁN, Jefe del Curso de Capacitación, por poner a nuestra disposición los recursos necesarios para que este proceso formativo se llevara a cabo de manera exitosa.

También quiero expresar mi agradecimiento al personal militar y civil de la Escuela de Ciencias del Mar, cuyo esfuerzo diario hace posible que las actividades del curso se desarrollen de la manera más eficiente y productiva posible.

Finalmente, a la Armada Argentina, por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente en este aspecto de la carrera, que me ha permitido ampliar mis horizontes de conocimientos.

INTRODUCCIÓN

Las áreas que comprenden, fundamentalmente, la Placa Scotia, son regiones sísmica y tectónicamente activas. Las implicancias que ello tiene en la variación del nivel del mar en las bases antárticas seleccionadas y en zonas adyacentes, es motivo del presente trabajo, Arecco et al. (2023) detectaron registros de altura del agua en estaciones mareográficas entre 0,30 m y 1,3 m sobre el nivel de la marea predicha momentos posteriores a sismos mayores a 6.5 Mw.

La República Argentina lleva adelante, desde el año 1904 la actividad ininterrumpida en el continente antártico. Dentro del Sector Antártico Argentino, nuestro país administra trece bases o estaciones, de las cuales seis son permanentes (operativas todo el año) y el resto, temporarias (operativas sólo en verano).

Como afirman Maldonado et al., (2014):

“Algunos aspectos del marco tectónico y ambiental del Arco de Scotia están ahora relativamente bien establecidos, incluido el desarrollo magmático y estructural terrestre y la mayor parte de la historia de la expansión del fondo marino a lo largo de las dorsales occidental y oriental de Scotia, aunque muchos otros son objeto de un debate en curso. Se han producido nuevos descubrimientos importantes que han llevado a una mejor comprensión del Arco de Scotia en las últimas dos décadas. Sin embargo, gran parte del registro marino en esta región predominantemente submarina, incluido el desarrollo tectónico del Mar de Scotia Central clave, la edad y la importancia de las pequeñas cuencas oceánicas en el sur del Mar de Scotia, la relación de los registros paleoambientales terrestres y marinos, la evolución paleoceanográfica y el desarrollo de la biota marina, entre otros, aún son poco conocidos o se debaten activamente. La erosión y sedimentación glaciogénicas controladas por los avances y retrocesos de las capas de hielo han modificado plataformas y pendientes. Por lo tanto, es una región excepcional para la ciencia ambiental multidisciplinaria, donde se plantean importantes cuestiones sobre la evolución del sistema terrestre.”

La placa Scotia está formada por litosfera oceánica y pequeños fragmentos de corteza continental. Puede verse como el nexo entre dos placas mayores, la placa Sudamericana al norte, y la placa Antártica al sur y al oeste, estando su origen relacionado con la interacción entre estas placas durante el Cenozoico. Se asocia a la separación de la península Antártica de América del Sur, la fragmentación de bloques y el desarrollo de pequeñas cuencas oceánicas; así como la generación de las dorsales de Scotia y de la placa Sandwich. (Yamin & Anselmi, 2020). En términos generales, el movimiento de la placa Scotia es hacia el oeste-suroeste, a razón de 2,2 cm/año, (Gordon et al., 1988).

La acción conjunta de un tsunami, incluso de baja magnitud, la marea local y otros fenómenos como oscilaciones periódicas debido a las configuraciones costeras en algunas áreas (seiches) u ondas de tormenta, pueden agravar la situación, especialmente en el caso de zonas bajas situadas a pocos metros sobre el nivel del mar (Rabinovich, 2010).

En este trabajo se utilizaron datos de marea disponibles desde el sitio web de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (IOC) de la UNESCO (Sea Level Station Monitoring Facility) el programa sobre el nivel del mar se refiere a programas y actividades relacionados con la medición, monitoreo y análisis del nivel del mar, ofreciendo datos en tiempo real e históricos de las mediciones hechas por las estaciones de monitoreo. Los datos sísmológicos utilizados se descargaron del Servicio Geológico de los EEUU (USGS).

Comparando los valores de las estaciones de monitoreo con los valores predichos y la situación meteorológica se obtuvieron los valores que corresponden a las alturas causadas principalmente por los eventos sísmicos.

Los resultados del presente trabajo tienen el propósito de ampliar el conocimiento, para su aplicación a operaciones en la región, y dar continuidad a los estudios de variación del nivel del mar en las zonas tratadas.

OBJETIVOS

El objetivo del presente Trabajo Final Integrador, es lograr comprender el efecto que la actividad sísmica de la placa Scotia y la placa Sandwich, en conjunto con las placas: Sudamericana y Antártica, tienen sobre el nivel del mar en la región antártica y zonas adyacentes, en el marco de los levantamientos hidrográficos, en la figura 1 se esquematiza el área de estudio.

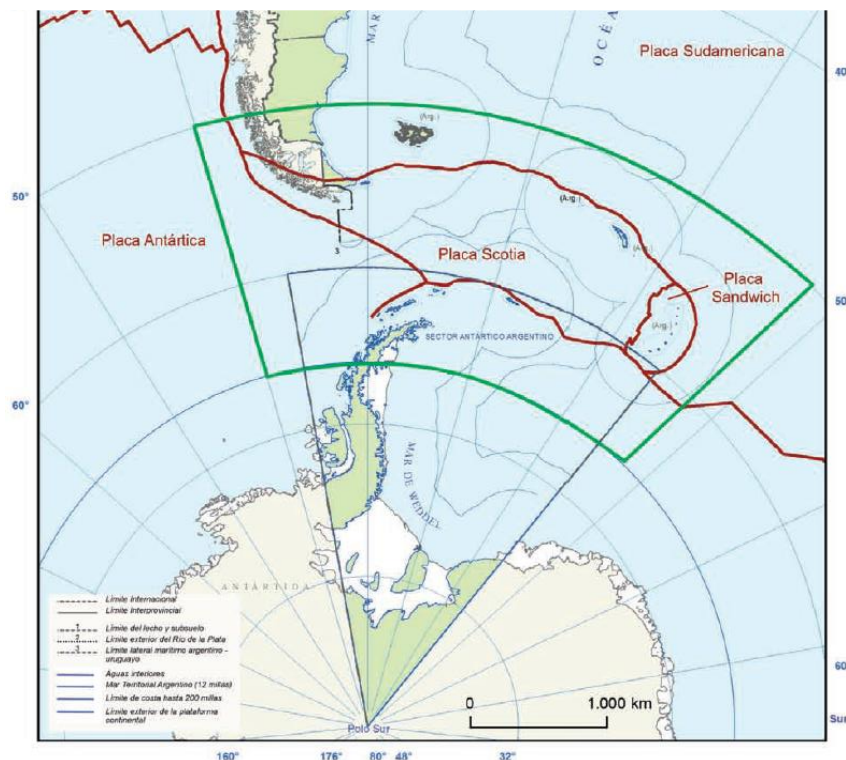
Para lograr el objetivo general fue necesario lograr objetivos específicos como:

- Obtener registros de series temporales de la altura del mar en las estaciones mareográficas de: Puerto Deseado, Ushuaia, Puerto Williams, King Edward Point, O'Higgins, Prat, Vernadsky y Rhotera.
- Obtener información de los sismos del área de estudio.
- Procesar, a partir de filtros matemáticos los registros de altura del agua para identificar posibles tsunamis.
- Obtener información de la presión atmosférica a nivel del mar en grillas y series temporales de datos globales.

Como objetivos secundarios derivados de los específicos:

- Observar la perspectiva general sobre cómo funciona el sistema y el grado en que los procesos geológicos, oceanográficos, atmosféricos, actúan sobre la zona.
- Integrar los conceptos estudiados a lo largo del presente curso de especialización.
- Mostrar el marco de situación a la hora de realizar los estudios batimétricos de las zonas de interés para la navegación en la región, el potencial riesgo que pueda representar para las bases costeras asentadas y futuras en la región y aquellas actividades que tengan estrecha relación con las zonas costeras.

Figura 1
Sectorización del área de estudio.



Nota: Limite de placas y zona de estudio (sector delimitado con líneas verdes).
(Yamin & Anselmi, 2020).

ACTIVIDAD ANTÁRTICA DE LA REPÚBLICA ARGENTINA

Presencia ininterrumpida desde 1904

Desde 1904 mantiene su presencia permanente e ininterrumpida en el continente luego de la instalación de la primera estación científica y meteorológica "Orcadas". Esta presencia se consolidó durante el siglo XX y hoy tiene seis bases permanentes y siete temporarias en el sector antártico donde la República Argentina sostiene reclamaciones de soberanía (Figura 2), además durante los meses de verano, se desarrollan actividades desde campamentos provisorios en sitios que están relativamente distantes de las bases antárticas, usualmente en distintos puntos del archipiélago de la isla James Ross, al este de la Península Antártica, en un radio de hasta 100 km desde la Base Marambio.

Figura 2
Bases argentinas en la Antártida.



Nota: Imagen disponible en <https://www.marambio.aq/confraternidadantartica4.html>

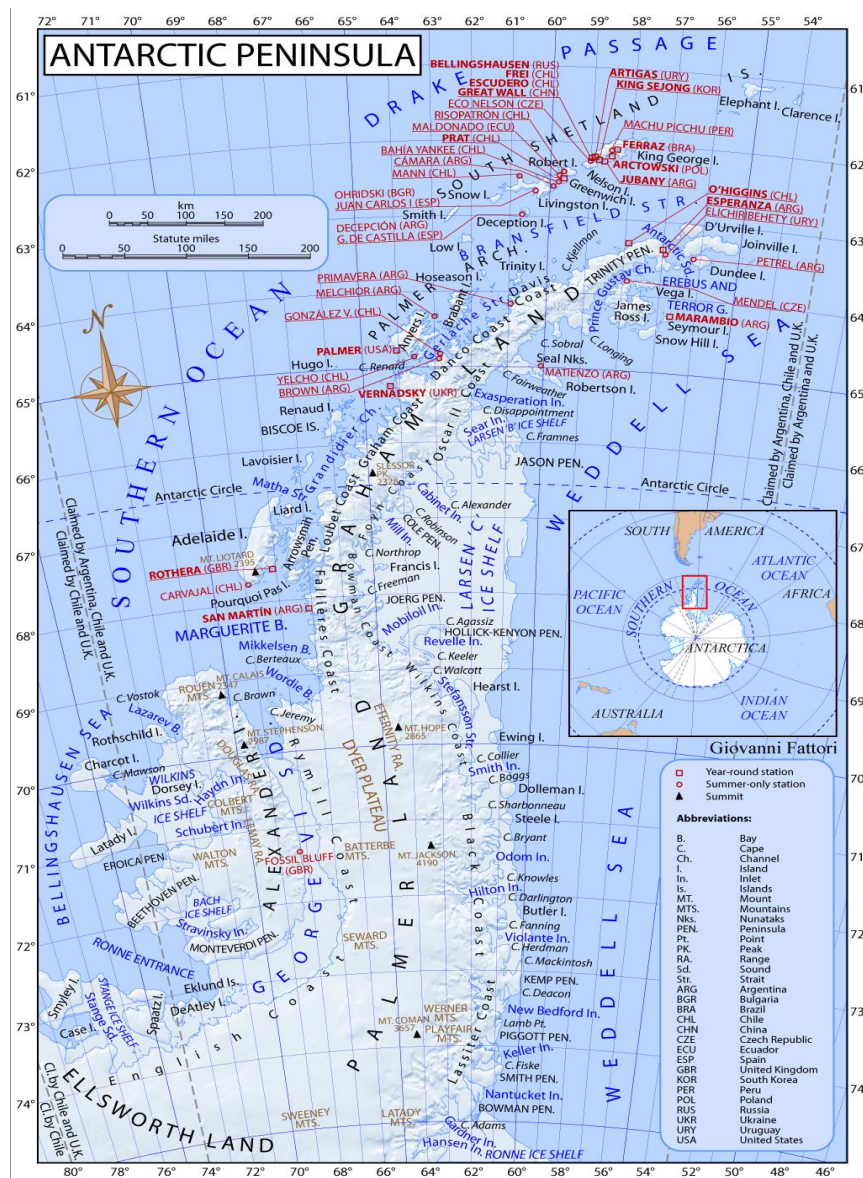
La República Argentina miembro signatario del Tratado Antártico

La Argentina es uno de los doce países firmantes originales del Tratado Antártico celebrado en 1959, y desde entonces al objetivo de afianzar su soberanía en el continente, se suma también el de ejercer influencia, como actor principal, en el Sistema del Tratado Antártico. Ello se lleva a cabo a través de la ciencia, la protección del medio ambiente antártico y la cooperación internacional, herramientas principales que celebra el Tratado.

Este tratado prohíbe la extracción y explotaciones de sus recursos minerales, ensayos nucleares y eliminación de residuos de los mismos, y también las actividades militares, apoya las investigaciones científicas y protege zonas ambientales en el continente. A la fecha, forman parte del Sistema de Tratado Antártico 57 países.

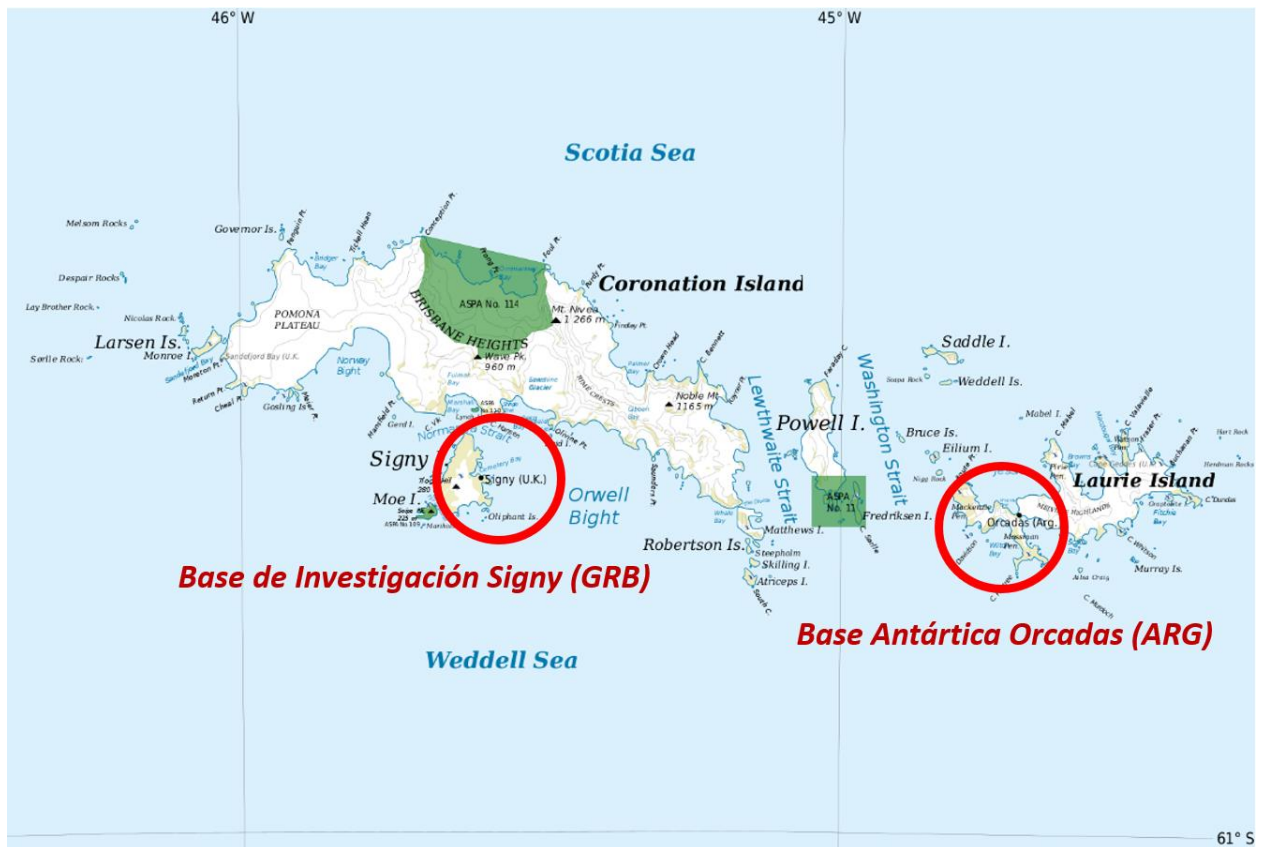
En las figuras 3 y 4, se muestran la disposición de las bases tanto argentinas como de otros países, asentadas en la zona de estudio.

Figura 3
Bases de distintos países en la península antártica.



Nota: Imagen disponible en <https://contactosilvestre.blogspot.com/2012/04/mapa-de-la-peninsula-antartica.html>

Figura 4
Bases en Isla Signy y Laurie, en Islas Orcadas del Sur.



Nota: Imagen del sitio <https://alegriamarineros.com/islas-orcadas-del-sur/>.

La República Argentina como miembro de la Organización Hidrográfica Internacional y la responsabilidad de producir cartografía náutica en su zona de responsabilidad

La Organización Marítima Internacional (OMI) promulgó el Convenio Internacional para la Salvaguarda de la Vida Humana en el Mar (SOLAS 1974), que asigna a los servicios hidrográficos la responsabilidad de llevar a cabo las actividades necesarias para garantizar condiciones de navegación seguras, preparación y edición de cartas náuticas, y otras ayudas a la navegación.

La Organización Hidrográfica Internacional (OHI) calcula que en la región de la Península Antártica no se han efectuado levantamientos hidrográficos en un 85% en zonas con profundidades menores a los 200 metros y en un 87% en zonas con profundidades mayores a 200 metros; salvo en zonas limitadas, la cobertura mediante cartas a escala no es adecuada en general para la navegación costera, (Amaya, 2021).

Además, menciona que la constante evolución de las barreras de hielos, sufridas durante los últimos años ha alterado los contornos de costas, dejando al descubierto rocas y tierras firmes no relevadas, siendo esto un potencial peligro para los buques. En regiones de costas escarpadas y hielo desprendido pueden existir pequeñas rocas o bancos no señalados. Por consiguiente, la cartografía actual en la zona no debe considerarse infalible. Sumado al creciente aumento de buques que navegan por las aguas antárticas se encuentra estrechamente relacionado al turismo; esta actividad se presenta con un alto desarrollo en las últimas décadas. La mayor cantidad de buques que transitan los mares antárticos implican una mayor probabilidad de accidentes náuticos y la falta de relevamientos actualizados, incrementa los riesgos relacionados a la navegación. Algunos accidentes náuticos, como los protagonizados por el A.R.A. Zapiola, el A.R.A. Bahía Paraíso y el Greg Mortimer, dan claras muestras de la importancia de contar con una cartografía náutica actualizada y precisa.

Además, afirma que la información batimétrica y de marea es relativamente escasa. En estas cartas muchos accidentes costeros están representados en líneas generales y los sondajes son dispersos y mucho más escasos que en otras regiones del mundo. Siendo necesario en ocasiones contar con cartografía de diversos servicios hidrográficos a fin de salvar la escasa información de algunas zonas.

MARCO GEOLÓGICO

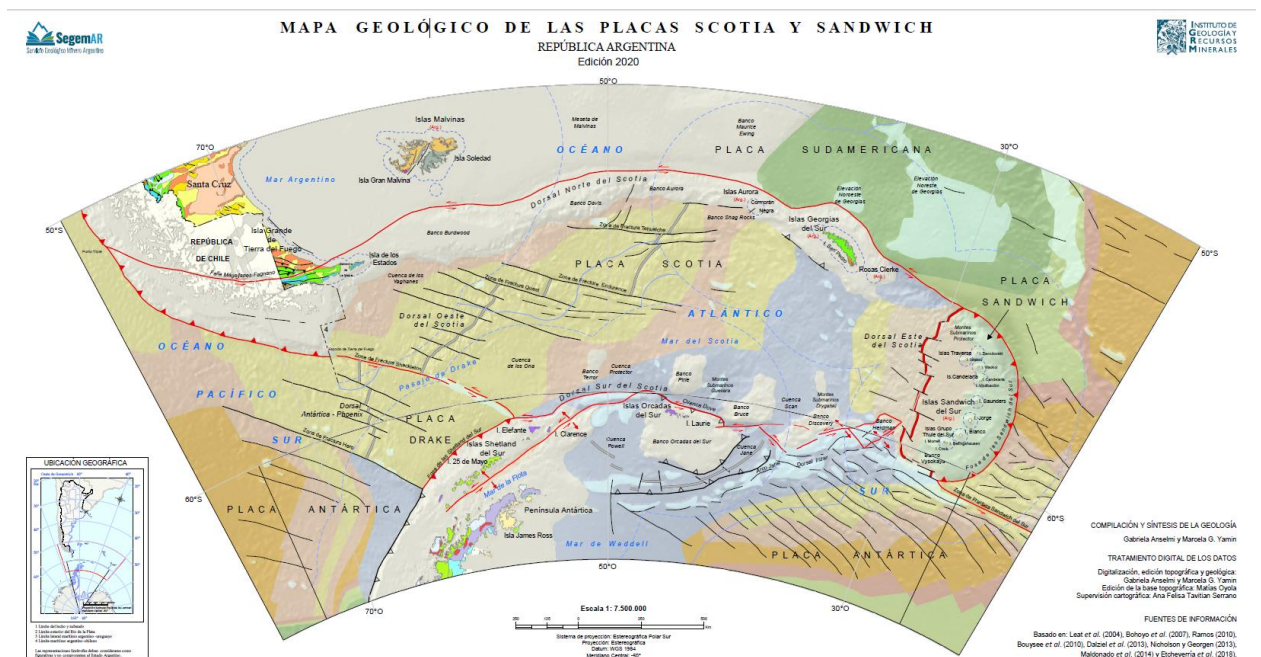
Placa Scotia

La Placa Scotia está formada por litosfera oceánica y pequeños fragmentos de corteza continental. Puede verse como el nexo entre dos placas mayores, Sudamericana al norte, y Antártica al sur y al oeste, estando su origen relacionado con la interacción entre estas placas durante el período Cenozoico. Se asocia a la separación de la península Antártica de América del Sur, la fragmentación de bloques y el desarrollo de pequeñas cuencas oceánicas; así como la generación de las dorsales del Scotia y de la placa Sandwich, al este (Yamin & Anselmi, 2020). En términos generales, el movimiento de la placa Scotia es hacia el oeste-suroeste, a razón de 2,2 cm/año (Gordon et al., 1988) en un régimen tectónico simultánea de un proceso de formación de fallas de desplazamiento de rumbo y la compresión, o convergencia, de la corteza terrestre de toda la placa, (Giner-Robles et al., 2003).

A través del mapa geológico de la figura 5 se muestran las principales estructuras tales como cuencas, bancos, fallas, zonas de fractura y dorsales. Los bordes de la placa Scotia están representados por las dorsales Norte, con la placa Sudamericana, Sur, con la placa Antártica. Al Oeste se separa de la placa Drake a través de la Zona de Fractura Shackleton y al Este de la placa Sandwich. Mientras que la micro placa de Sandwich se separa, al Norte, Este y Sur de la placa Sudamericana a través de la Fosa de las Sandwich del Sur.

Todas se encuentran activas, y con distintos tipos de interacciones. Se pueden identificar las características del tipo de corteza y las edades del fondo oceánico, las dorsales, y las zonas de subducción.

Figura 5
Sector del mapa geológico de las placas Scotia y Sandwich.



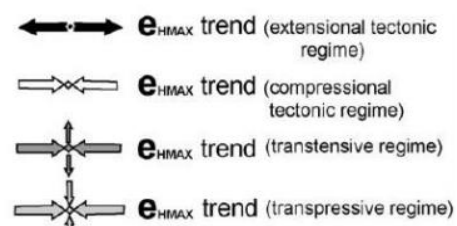
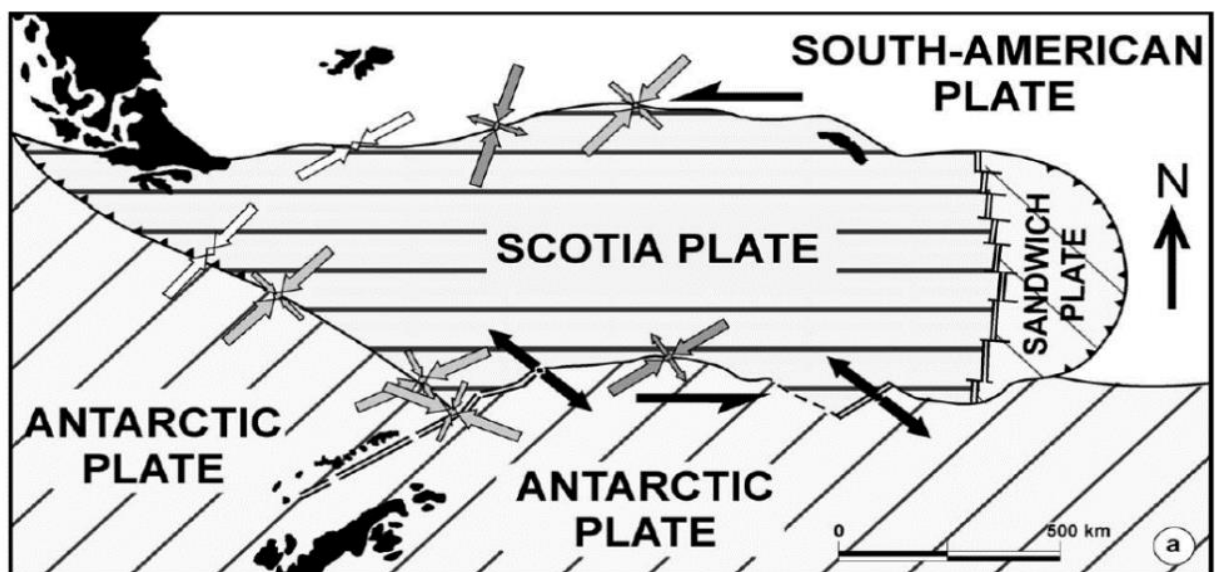
Nota: Extracto del mapa geológico de las Placas Scotia y Sandich.
(Yamin & Anselmi, 2020)

(disponible en <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/4058>)

Los bordes norte y sur presentan movimientos transcurrentes hacia la izquierda, lo que se refleja en la falla Magallanes-Fagnano (en la Isla Grande de Tierra del Fuego), así como en la dorsal Norte y la dorsal Sur del Scotia. La caracterización de los límites y esfuerzos de las Placas Scotia y Sandwich se representan en las figuras 6 y 7. La parte sur de la trinchera chilena está formada por la zona de Fractura Shackleton, que delimita la placa Scotia con la Antártica, incluida la antigua placa Drake. Por otro lado, al este, la dorsal Este del Scotia marca el límite entre las placas Scotia y Sandwich. (Yamin & Anselmi, 2020), además como menciona Maldonado et al, (2014): de presentarse la subducción activa hacia el oeste de la placa Sudamericana debajo de la placa Sandwich que está asociada con el arco volcánico activo, principalmente submarino, de las Islas Sandwich del Sur (Leat et al., 2010, 2013, 2014; Nicholson & Georgen, 2013), generando una zona de vulcanismo activo en las Islas Sandwich del sur.

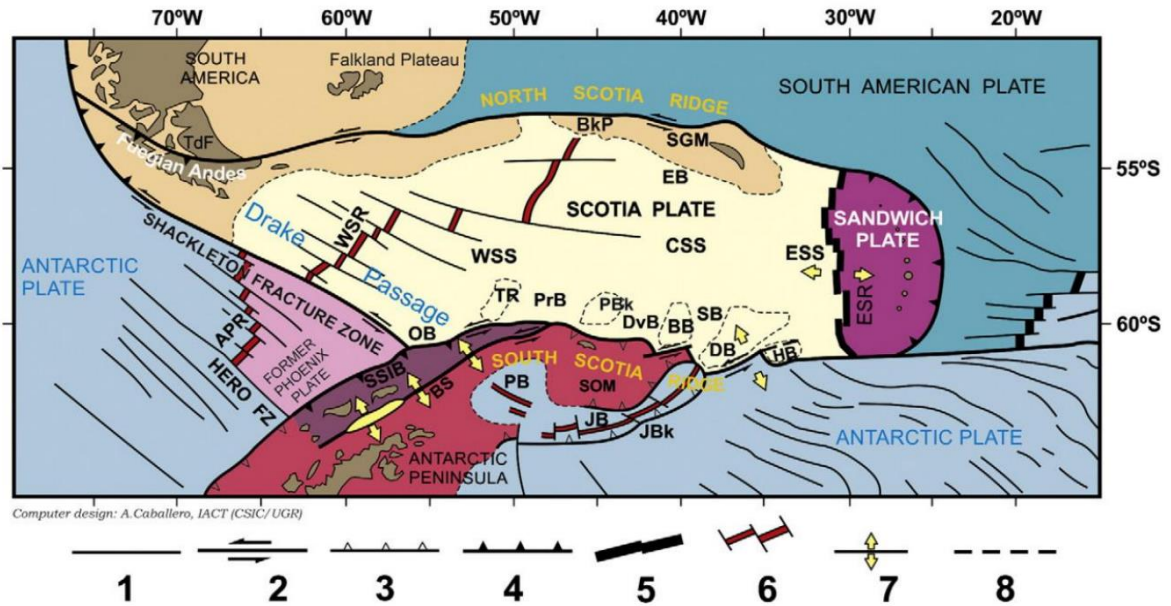
Figura 6

Caracterización de los límites y esfuerzos de las Placas Scotia y Sandwich.



Nota: Representación esquemática de los límites de la placa principal ubicados en la zona de la placa Scotia. (Mora, 2023).

Figura 7
Configuración tectónica del arco de Scotia.



Nota: Configuración tectónica del Arco de Scotia. Leyenda: 1, falla transformante inactiva; 2, falla transcurrente activa; 3, zona de subducción relicta; 4, zona de subducción activa; 5, dorsal activa; 6, dorsal relicta; 7, zona extensional activa; y 8, límite entre continente y corteza oceánica. APR, dorsal antártica-fénix; BB, banco Bruce; BkP, meseta Barker; CSS, mar de Scotia central; DB, banco Discovery; DvB, cuenca Dove; EB, cuenca Endurance; ESR, dorsal oriental de Scotia; ESS, mar de Scotia oriental; HB, banco Herman; JB, cuenca Jane; JBk, banco Jane; OB, cuenca Ona; PB, cuenca Powell; PBk, banco Protector; PrB, cuenca Protector; SB, cuenca Scan; SGM, microcontinente de Georgia del Sur; SOM, microcontinente de Orcadas del Sur; SSIB, Bloque de las Islas Shetland del Sur; TdF, Tierra de Fuego; TR, Terror Rise; WSR, Dorsal de Escocia Occidental; y WSS, Mar de Escocia Occidental. (Modificado de Maldonado et al., 2006). (Maldonado et al. 2014).

Tanto en el mapa geológico como en las figuras 6 y 7, se aprecian los movimientos resultantes y la dirección general de los esfuerzos de ellos.

En la zona, el denominado Arco de Scotia, ayuda a comprender los procesos los procesos tectónicos, paleoambientales y biológicos en los océanos australes y la Antártida. Además, su evolución tiene importancia paleoclimática global. El Arco de Scotia ha sido el foco de numerosos estudios científicos. Se extiende desde el Pasaje de Drake en el oeste, donde la Zona de Fractura de Shackleton forma una dorsal batimétrica prominente, pero discontinua, entre el sur del continente sudamericano y el extremo norte de la Península Antártica, hasta el arco volcánico intraoceánico activo que forma la Isla Sandwich del Sur en el este. El arco tectónico comprende también los límites de margen Norte y Sur, ambos márgenes de placa transcurrentes que incluyen respectivamente los microcontinentes Georgia del Sur y Orcadas del Sur. Las placas tectónicas de Scotia y Sandwich forman la cuenca principal dentro de estos márgenes.

La Actividad Sísmica

Según Kanao, (2014), la placa antártica tiene un entorno tectónico único, ya que está rodeada por márgenes casi completamente divergentes, con una cantidad muy pequeña de márgenes convergentes o transformados. La región oceánica presenta tres veces mayor actividad sísmica que cualquier otra.

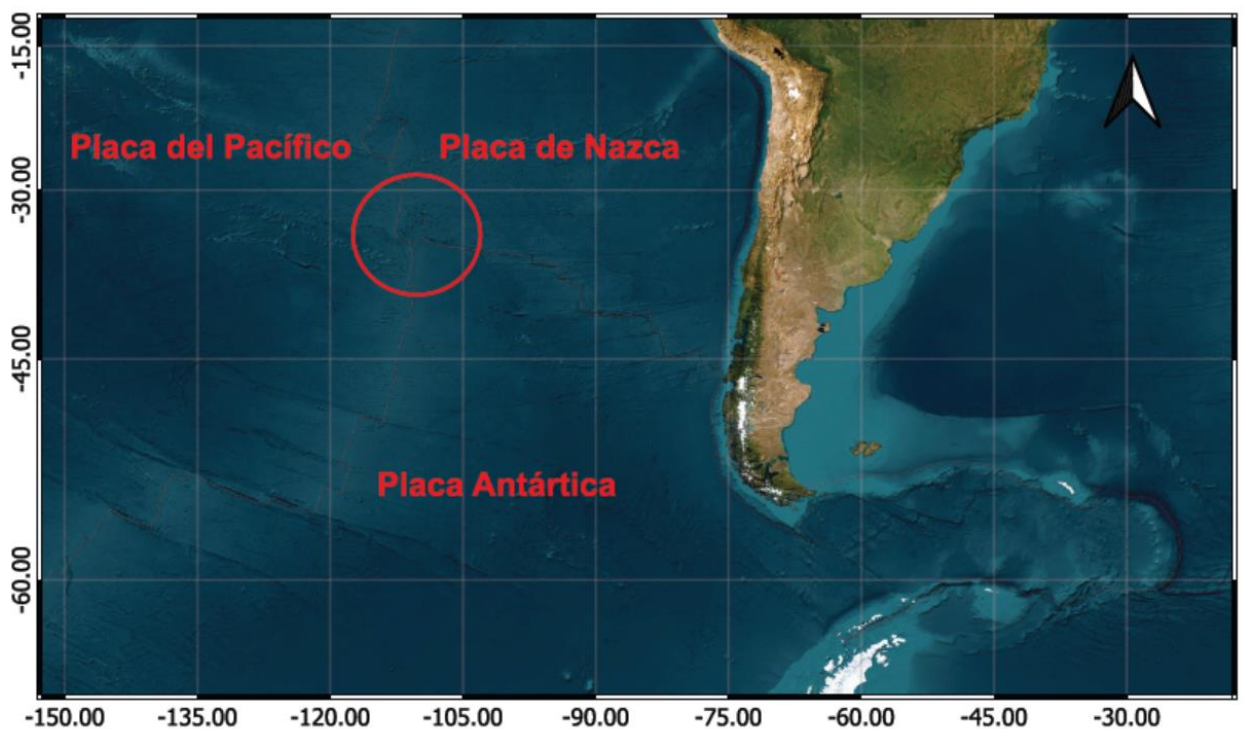
Afirmando que, puede considerarse que ello está relacionado con una concentración de tensiones tectónicas hacia la Triple Unión de la Isla de Pascua entre la placa Antártica, la placa del Pacífico y la placa de Nazca (Figura 8). Además, se ha descubierto que tres áreas volcánicas: la Isla Decepción, los montes Erebus y Melbourne, presentan una alta actividad sísmica en contraste con las áreas circundantes (Kanao, 2014).

Para comprender el entorno tectónico de la Placa Scotia, y ver la relación con la actividad de la Placa Antártica: Kanao, (2014), afirma que el 92 % de las zonas sísmicas que circundan la Placa Antártica son de características divergentes, mientras que los convergentes son menos del 2 % y se ubican en la zona de las Islas Shetland del Sur, y la región de los límites de la Placa Scotia son de carácter transformantes, siendo estas dos últimas áreas las que presentan la mayor actividad sísmica, incluidas las áreas volcánicas en la Isla Decepción. Otro aspecto a observar es que en su mayoría las profundidades focales de los terremotos son menores a 40 km. (Kaminuma, 2000).

Mencionando los sucesos ocurridos del terremoto de magnitud 4,7 acompañado por las erupciones volcánicas de la Isla Decepción el 4 de diciembre de 1967 (Kaminuma, 1995). Esta erupción fue la primera explosión reconocida de la Isla Decepción por la humanidad. Los edificios de las estaciones en la Isla Decepción fueron destruidos por las erupciones y todos los miembros de las estaciones de Argentina, Chile y el Reino Unido fueron evacuados de manera segura después de la erupción.

Figura 8

Zona de triple Unión de las Placas del Pacífico, Nazca, y Antártica.



Nota: Representación de la zona de triple unión de las Placas del Pacífico, Nazca y Antártica.

Por otro lado, los eventos sísmicos también provienen de otras fuentes, en este caso relacionadas con el hielo y según Anandakrishnan y Alley (1995). También Kanao (2017), estudió los eventos sísmicos desde observaciones en la estación japonesa de Syowa, y asegura que: eventos sísmicos en la región también “se forman con mayor frecuencia en asociación con

movimientos de masas de capas de hielo relacionados con glaciares, o con hielo marino, grietas de marea e icebergs en las otras áreas polares.” La dinámica del hielo marino y de los icebergs también afecta a las señales sísmicas. Por ejemplo, un gran volumen de hielo marino fue observado durante el invierno austral de 1997. Los sismógrafos de banda ancha de la estación japonesa Syowa, de la Antártida, registraron formas de onda distintas asociadas con los eventos. Además, identificó una relación entre las condiciones del hielo marino y la dinámica de los icebergs mediante comparación con las imágenes satelitales MODIS. (Kanao, 2017).

Se sugiere firmemente que el efecto del cambio de volumen y forma de la capa de hielo causa algunos fenómenos en la corteza y el manto superior, como el levantamiento de la corteza, la ocurrencia de terremotos y la deformación litosférica.

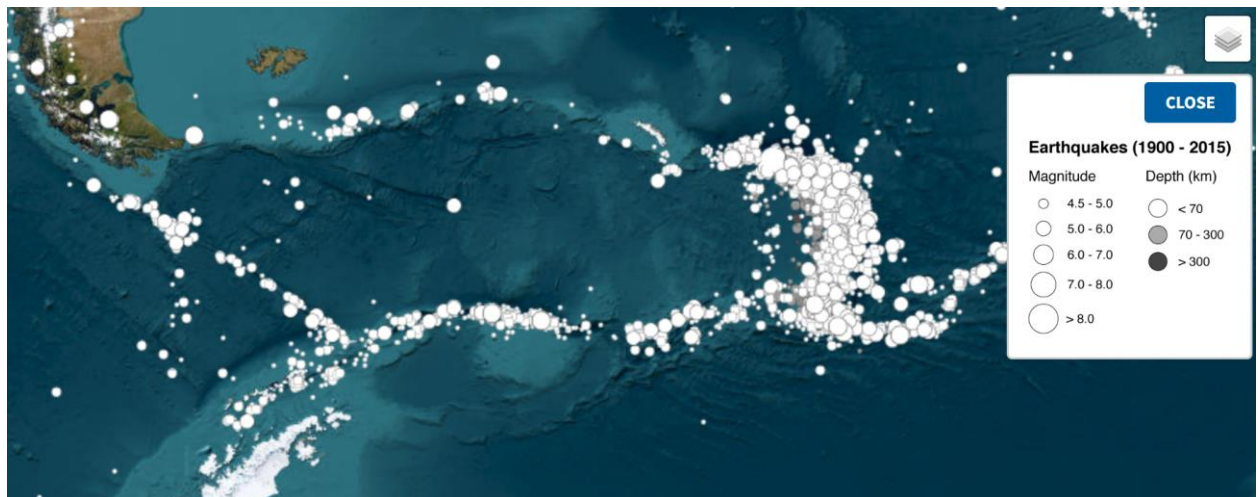
Red sismográfica

“Según la base de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) en el período abarcado entre los años 1970 y 2021, ocurrieron en el área de estudio, un total de 117 sismos a profundidades variables entre 57 km y 5 km, estando la mayoría cercanos al promedio de 13 km de profundidad. En cuanto a sus magnitudes, la mayoría fueron de entre 5 y 6 Mw, con un mínimo de 4 Mw y un máximo del orden de 7 Mw.” (Mora, 2023).

Yamin y Anselmi (2020) afirman que: “La mayor actividad sísmica por lo general se asocia a los límites de placas, lo que queda claramente en evidencia para las placas Scotia y Sandwich” (Figura 9).

Figura 9

Imagen representativa de la actividad sísmica del área de estudio.



Nota: Sismos registrados desde 1900 al 2015, con magnitudes mayores a 4,5 Mw. Indicando la elevada actividad sísmica de la región y concentrada en los bordes de la placa.

(disponible en <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb0001633/map?historic-seismicity=true&shakemap-intensity=false>)

El área de estudio es una zona de tectónica compleja, caracterizada por numerosos procesos activos y cambios en el movimiento y configuración de las placas. Se está llevando a cabo un amplio proceso de estudio de toda la zona, en cuanto a sus características tectónicas y geológicas.

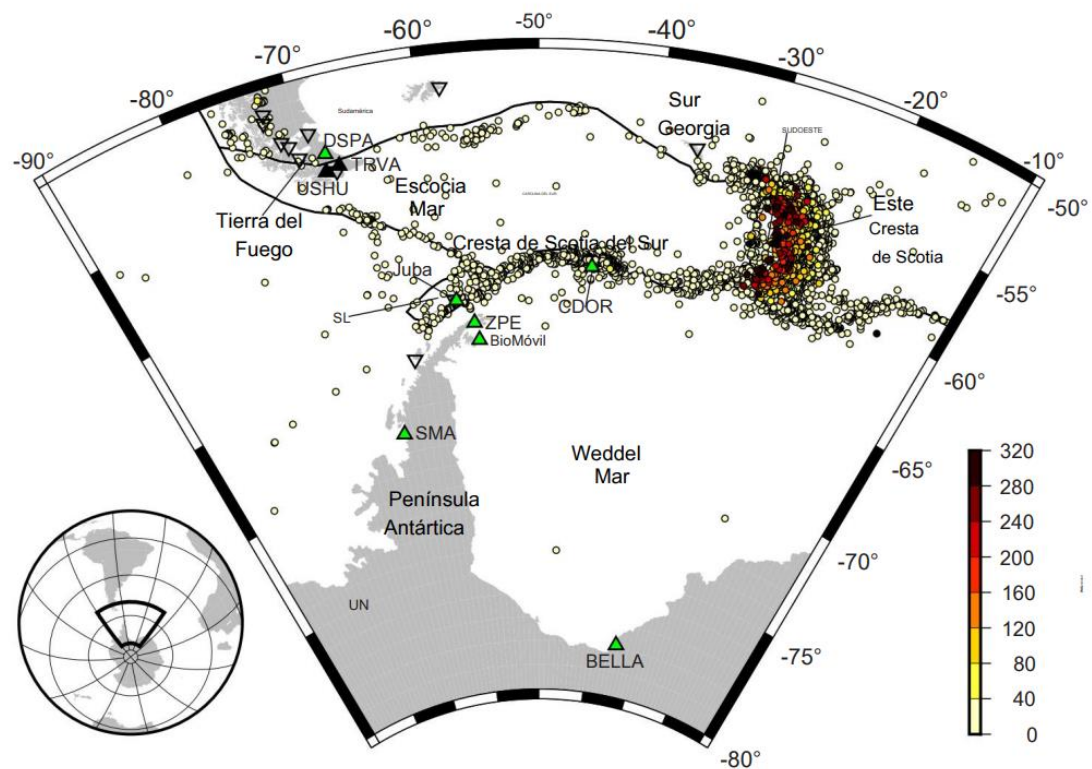
La Red Sismográfica Antártica Argentino Italiana (ASAIN) es una red sísmica permanente de banda ancha que opera desde 1995 en la región del Mar de Scotia, la península Antártica y

la zona polar. Fue desarrollada por un proyecto de cooperación científica internacional entre las Repúblicas Italiana y Argentina, en el marco de Cooperación Internacional del Instituto de

Oceanografía y Geofísica Aplicada (OGS) y Dirección Nacional del Antártico (DNA) – Instituto Antártico Argentino (IAA).

Está compuesta por siete estaciones de recopilación de datos ubicadas en seis de las bases permanentes de Argentina: Carlini, Orcadas, Marambio, Belgrano II, Esperanza y San Martín, y una en la Isla Grande de Tierra del Fuego (Figura 10). Esos datos son fundamentales para comprender el comportamiento sísmológico y geodinámico de la Antártida y para conocer cómo afectan a ese territorio los movimientos sísmicos a nivel global, tanto en tiempo real como a través de su base de datos y red de cooperación con otros servicios sísmológicos, como el del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), desde donde se recabó los datos para el presente trabajo.

Figura 10
Red sísmográfica Antártica Argentino-Italiana (ASAIN).



Nota: Ubicación de las estaciones de la Red Sísmográfica Antártica Argentino-Italiana (ASAIN): los triángulos negros representan estaciones ASAIN anteriores, los triángulos de color claro representan estaciones ASAIN, los triángulos vacíos invertidos representan estaciones de otras redes permanentes. Los círculos de colores indican la sísmicidad y la profundidad en el área desde 1970 hasta septiembre de 2018. (Linares, et al., 2021).

Red geomagnética

Kushwah et al. (2009), Ruiz et al. (2011), Takla et al. (2018), Arecco et al. (2020) y Larocca et al. (2021), encontraron pequeñas perturbaciones del campo magnético terrestre, de unos pocos nanoteslas (nT), poco antes de un sismo, (Arecco et al., 2022). Teniendo en cuenta que la predicción a corto plazo de un evento sísmico sigue siendo motivo de estudio al igual que el desarrollo de sistemas de alertas.

La red INTERMAGNET agrupa una gran cantidad de observatorios magnéticos con datos precisos y estándares modernos de medición que son públicos y están disponibles en la red (Figura 11).

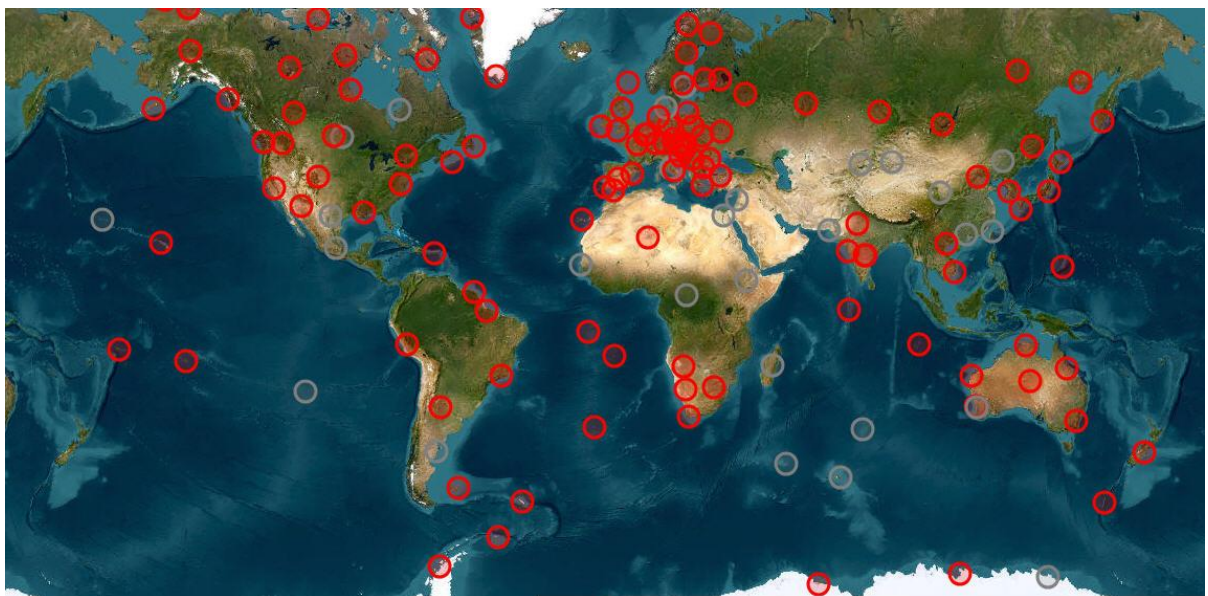
Los observatorios presentes en la zona tienen como finalidad monitorear la actividad geomagnética debido a diversas fuentes como sismos, actividad solar etc.

Una tormenta geomagnética es una perturbación significativa de la magnetósfera, consecuencia directa del intercambio de energía desde el viento solar al ambiente espacial terrestre. En particular, la energía intercambiada durante estos eventos se disipa en el entorno de la Tierra, con consecuencias importantes sobre los cinturones de radiación, la ionósfera y el campo geomagnético.

El índice DST (Disturbance Storm Time, en inglés) y el índice KP permiten estimar la intensidad de la tormenta geomagnética en curso. Estos índices se obtienen a partir de datos medidos por magnetómetros. En Argentina se encuentra una amplia red de magnetómetros pertenecientes a diferentes instituciones.

Figura 11

Red de observatorios geomagnético (INTERMAGNET).



Nota: Mapa de ubicación de los observatorios de la red INTERMAGNET. Observatorios activos (círculos rojos), observatorios cerrados (círculos grises). Los observatorios más cercanos a área de estudio son PST (Puerto Argentino) en Malvinas, KEP (King Edward Point) en Georgias, ORC en Orcadas y AIA (Islas de Antártida Argentina- Base Vernadsky) en la Antártida (datos disponibles en <https://intermagnet.org/metadata/#/map>)

MARCO OCEANOGRÁFICO

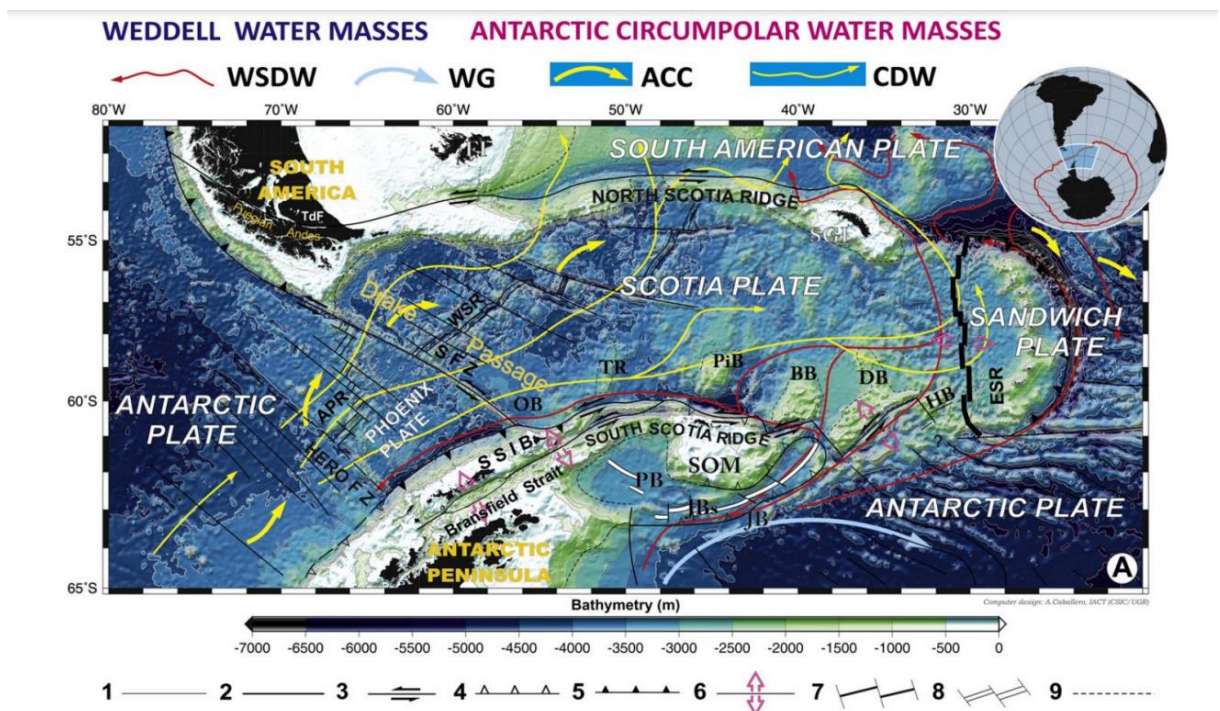
La Corriente Circumpolar Antártica

El océano Austral se localiza desde el Frente Sub-Antártico (aproximadamente entre las latitudes 50° y 60° S) hasta la costa del continente antártico. El océano Austral es el único cuyas aguas rodean todo el globo, lo cual es un elemento crucial para el motor calórico mundial. Los fuertes vientos, las bajas temperaturas y la dinámica del hielo marino antárticos, conducen patrones de corrientes que influyen fuertemente el clima de la Tierra. Donde el principal sistema de circulación del océano Austral es la Corriente Circumpolar Antártica, menciona Rodrigo, (2008), en el Boletín Antártico Chileno, Volumen 27 N° 2.

La Corriente Circumpolar Antártica es un elemento clave del sistema climático global, ya que conecta las principales cuencas oceánicas mientras fluye hacia el este alrededor de la Antártida, (Donohue et al., 2016). En la figura 12 se esquematiza los principales flujos de masas de agua en circulación en el área de estudio. Maldonado et al, (2014), afirman que el Arco de Scotia es fundamental para comprender el comportamiento de la Corriente Circumpolar Antártica y su influencia en el desarrollo del clima global, la evolución y estabilidad de las capas de hielo antárticas y la biodiversidad del hemisferio sur (Barker y Burrell, 1977; Kennett, 1977; Maldonado et al., 2003; Livermore et al., 2004; Scher y Martin, 2006; Maldonado et al., 2014).

Figura 12

Principales flujos de las masas de agua en la región de Scotia.



Nota: Mapa simplificado de batimetría derivada de la altimetría satelital y sondeos de barcos de la región del Arco de Scotia (Smith y Sandwell, 1997) con el contexto tectónico de placas general del Mar de Scotia y la distribución de los principales flujos oceanográficos en la región. **Leyenda de elementos geológicos:** APR, Antarctic-Phoenix Ridge; BB, Bruce Bank; DB, Discovery Bank; ESR, East Scotia Ridge; HB, Herman Bank; JB, Jane Bank; JBs, Jane Basin; OB, Ona Basin; PB, Powell Basin; PiB, Pirie Bank; SGI, South Georgia Island; SSIB, South Shetland Islands Block; SFZ, Shackleton Fracture Zone; SOM, South Orkney Microcontinent; TR, Terror Rise; TdF, Tierra del Fuego; WSR, West Scotia Ridge. **Leyenda de corrientes oceanográficas:** ACC, Antarctic Circumpolar Current; CDW, Circumpolar DeepWater; WG, Weddell Gyre; WSDW, aguas profundas del mar de Weddell. (Modificado de Maldonado et al., 2014).

El Pasaje de Drake está situado entre el extremo sur de Sudamérica y la Península Antártica. La apertura de la compuerta ha influido en los flujos oceanográficos entre los océanos Pacífico y Atlántico y, por ende, como se ha especulado ampliamente, en la evolución climática del Océano Austral y la Antártida y en el cambio climático global en general (Kennett, 1977, Barker, 2001; Livermore et al., 2005, 2007; Dalziel et al., 2013b; Martos et al., 2013, entre otros).

La zona del Pasaje de Drake es la “puerta oceánica” que ejerce mayor influencia sobre la circulación de las principales masas de agua del Océano Austral. En este sentido Piola et al. (2003) en su trabajo sobre “Convergencia de las ramas de la Corriente de Malvinas cerca de los 44° S” afirman que la Corriente Circumpolar Antártica da origen a la Corriente de Malvinas que transporta aguas frías hacia el norte a lo largo del Frente Subantártico desde el norte del Mar de Scotia a 55° S hasta la Confluencia Brasil-Malvinas a alrededor de 38°S (Peterson y Whitworth, 1989). Corriente de gran importancia para nuestro país, favorecido por una de las zonas de productividad primaria oceánica más importantes de los océanos.

Campo de hielo marino

La evolución del campo de hielo antártico tiene modificaciones a lo largo del año. Es así que, a través de las investigaciones del Servicio de Hidrografía Naval, se puede observar que el campo de hielo marino muestra su mínima extensión en el mes de febrero para la mayor parte de la Antártida, y en algunos sectores en el mes de marzo.

Desde fines de marzo y principios de abril el campo de hielo marino comienza a crecer de sur a norte debido al congelamiento del agua del mar. Sin embargo, la máxima extensión del hielo marino ocurre entre los meses de agosto y septiembre, dependiendo nuevamente del sector antártico que se analice.

Las observaciones aseguran que el campo de hielo amortigua y atenúa las ondas generadas por los sismos. Tal como lo mencionan Medina et al, (2018) en la evocación del sismo de 7,3 Mw ocurrido el 4 de agosto de 2003, a 70 km de la Base Orcadas.

Nivel del mar

El registro del nivel del mar se compone de una variedad de fenómenos, como el nivel medio del mar, las mareas, seiches, ondas de tormenta (ODT), tsunamis, meteotsunamis y olas. Cada una de estas se caracteriza por tener distinta longitud de onda y en consecuencia diferente análisis.

Mareas

Usualmente la marea, la ODT, los tsunamis y los meteotsunamis son registrados por un mismo instrumento, es decir, un sensor del nivel del mar, conocido popularmente como mareógrafo. Es así que, aunque la costa bonaerense no presente vulnerabilidad a los tsunamis y no exista ningún sistema de alerta al respecto, el provocado por el terremoto submarino ocurrido en Indonesia en 2004 quedó registrado en los mareógrafos de Santa Teresita, Mar del Plata, Puerto Belgrano (Bahía Blanca) (Dragani et al., 2006) y de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (Palermo) (Dragani et al., 2011).

El 26 de diciembre de 2004 a las 00:59 UTC en el Océano Índico ocurrió dicho terremoto de magnitud de momento (Mw) 9.3 que generó un tsunami que se propagó a escala global (Titov

et al., 2005). Este fue uno de los terremotos más intensos del que se tenga registro en la “era instrumental”, es decir, desde que hay mediciones con instrumentos. El terremoto fue tan violento que el tsunami originado pudo ser detectado en casi todas las zonas costeras del mundo, causando daños en regiones ubicadas a miles de kilómetros del epicentro del sismo. Sin embargo, terremotos submarinos de tal intensidad ocurren muy esporádicamente, siendo muy poco probable que se produzcan en el Océano Atlántico Sur (Pugh y Woodworth, 2014).

Para el estudio de los casos se emplearon los datos de la red de estaciones mareográficas adheridas al sistema de la Comisión Oceanográfica Internacional para el monitoreo del nivel del mar. Nuestro país forma parte de la misma, con estaciones mareográficas en el continente sudamericano, se utilizaron los datos suministrados por las estaciones argentinas administradas de Ushuaia y Puerto Deseado.

Tsunamis en la región

Diversos autores han estudiado la actividad sísmica y más precisamente su vinculación con los riesgos de tsunamis en la región, así como también, estudios de eventos puntuales. Como el impacto que tuvo el sismo del 12 de agosto de 2021 (Figura 13).

Los tsunamis son olas causadas por movimientos en la capa exterior de la Tierra o corteza, la cual mueve el agua del océano, un terremoto o un volcán en el océano pueden causar un tsunami, así como desprendimientos de grandes volúmenes de roca o hielo al mar. También se habla de meteotsunamis, aquellos causados por fenómenos meteorológicos.

Estos fenómenos pueden ser amplificados o disminuidos por otras variables como seiches, ondas de tormenta, por el contrario, pueden ampliar la altura del nivel de mar ocasionados por los sismos. Shirshov, (2009) afirma que los tsunamis en combinación con los seiches, cuando sus frecuencias de resonancia coinciden con las de la bahía, los efectos pueden ser inesperados. Como también lo demuestran los análisis de terremotos y tsunamis recientes: que algunas bahías tienen una clara tendencia a resonar con los modos costeros y de plataforma (Aranguiz et al., 2019; Cortés et al., 2017) y la actividad de olas de borde (Catalán et al., 2015; Yamazaki & Cheung, 2011). En algunos casos, se ha encontrado que ciertas bahías presentan amplitudes mayores que las áreas circundantes, incluso para tsunamis distantes. (Catalán et al., 2020).

El Arco de Scotia es una de las dos regiones del Océano Atlántico con mayor potencial de generación de tsunamis a partir de fuentes sísmicas y volcánicas. Se realizó un estudio de modelado numérico y simulaciones para determinar la generación de tsunamis a partir de fuentes postuladas a lo largo del Arco y la amplificación o atenuación de las olas de tsunami a lo largo de la plataforma continental patagónica (Figura 13).

A partir de las simulaciones numéricas pudieron observar que la propagación del tsunami se vió altamente afectada por la refracción batimétrica en la plataforma continental patagónica y la amplitud de la onda se atenúa significativamente en la plataforma continental interna. Las amplificaciones máximas se obtuvieron alrededor de las Islas Malvinas y Banco Burdwood ya que la onda se propaga casi sin refractarse y el efecto de bajío es muy significativo allí. Según los estudios hechos por Dragani, et. Al., (2009).

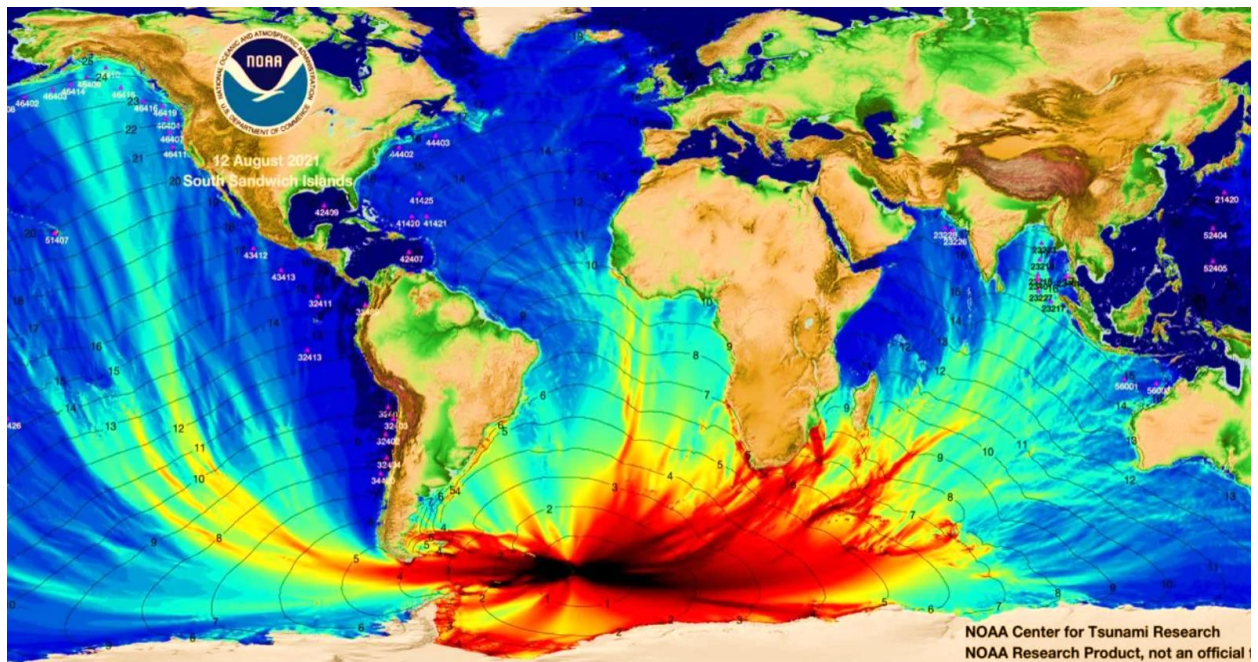
Además, agregan que:

“Es evidente que el tectonismo, el magmatismo, el vulcanismo y los deslizamientos submarinos en diferentes puntos del Arco de Scotia y sus alrededores deben tenerse muy en cuenta al evaluar la posibilidad de generación de olas oceánicas que afecten al Océano Atlántico Suroccidental. Sin embargo, y con la única excepción conocida del terremoto de 2003 en las Islas Orcadas del Sur, mencionado anteriormente, no se han reportado otras olas similares a un tsunami. Además, no se han mencionado evidencias de paleotsunamis para las costas argentinas ni para los registros geológicos marinos. Sin embargo, y considerando el contexto geotectónico, no debe desestimarse el riesgo potencial de la región sudafricana.”

Si bien la costa patagónica muestra una vulnerabilidad relativamente baja a los tsunamis, se han realizado estudios teniendo en cuenta su impacto potencial debido a la alta tasa de ocurrencia de procesos geológicos violentos en las cercanías (Dragani et al., 2009; Larocca et al., 2021; Jia et al., 2022).

Figura 13

Travel time de la onda de tsunami generada por el sismo del 12/08/2021.



Nota: imagen representativa de los tiempos de viaje e intensidad de la onda generada por el sismo de magnitud 8,1 Mw, del 12 de agosto de 2021, cuyo epicentro se ubicó en latitud 58.375° S y longitud 25.264° O, al este de las islas Sandwich del Sur.

En el año 2020, con motivo de la reunión de Administradores de Programas Antárticos Latinoamericanos, celebrado en Argentina; el Observatorio Geofísico del Uruguay presentó en su publicación: “Sismicidad 2020 en la base científica antártica Artigas”, afirma que según una se indica que los terremotos sub-oceánicos pueden ser causales de tsunamis, tal como ocurrió en agosto del 2003 cuando un terremoto de magnitud 7,6 Mw de desplazamiento vertical afectó la costa de la bahía donde se encuentra la estación científica Argentina “Orcadas”, ubicada en la Isla Laurie. Según las fuentes, la masa de hielo que se encuentra bajo el océano lo amortiguó de manera que no generó impactos, tal como ya varios autores han observado. Se agregan en las figuras 14 y 15 imágenes tomadas en la base Orcadas luego del evento del 2003. En 2013

también se registró un evento de magnitud 7,3 Mw, próximo a esta estación con generación de importantes olas, pero sin llegar a generar un tsunami.

Figura 14

Penetración de las aguas sobre el itsmo de Isla Laurie.



Nota: Imagen obtenida del sitio <https://www.marambio.aq/tsunamiorcadas.html>.

Figura 15

Bloques de hielo marino fracturados por el tsunami.



Nota: Imagen obtenida del sitio <https://www.marambio.aq/tsunamiorcadas.html>.

Su estudio se centra principalmente en los eventos provenientes de las fallas ubicadas en la cuenca de Bransfield, al sudeste de las Islas Georgias. Los autores mencionan a eventos sísmicos del tipo “enjambre sísmico”, en donde no se identifica un evento principal. Además de darse en una cantidad elevada y en un período de tiempo relativamente corto. Para los eventos dados en el área.

Otro estudio de evento significativo y reciente, del 12 de agosto del 2021, en donde Jia Z et al. (2022), encontraron que el terremoto de magnitud 8,2 que ocurrió en las Islas Sándwich del Sur fue inesperado, ya que inicialmente se registró como un evento de magnitud 7,5 a gran profundidad (47 km). A pesar de esto, provocó un tsunami de alcance global, algo que normalmente se asociaría con un terremoto más intenso y menos profundo (Figura 13). Al analizar datos sísmicos, se identificó un evento lento oculto de magnitud 8,16 en aguas poco profundas, este evento lento aportó el 70% del momento sísmico y duró tres minutos, afectando una sección de 200 km de la interfaz de la placa. Este terremoto representa un caso extremo de los variados comportamientos espectrales de los sismos en zonas de subducción, destacando la importancia de investigar y monitorear eventos similares. Una observación notable de este terremoto son sus tsunamis de largo alcance. Los tsunamis se extendieron a los océanos Atlántico Norte, Pacífico e Índico, donde los mareógrafos midieron amplitudes máximas de ~20 cm a más de 10.000 km de distancia de la fuente.

INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

El continente posee los climas más fríos y más inhóspitos de todo el planeta, además de registrar los vientos más intensos, registra las temperaturas más frías, aún más frías que en el Ártico, debido a que la superficie en la Antártida se encuentra a más de 200 metros sobre el nivel de mar, registrando una altura media de 2 Km, y la barrera térmica que representa la circulación de la corriente circumpolar antártica

La circulación general de las masas de aire, es predominantemente en sentido oeste – este. Con sistemas de baja presión muy profundizadas. Sobre todo, en la zona del Pasaje de Drake. En cambio, al ingresar estos sistemas en interacción con la topografía de la zona de estudio, adopta diferentes configuraciones de presión, dirección e intensidad de viento, humedad, entre otras variables. Dando por resultado un complejo comportamiento del tiempo, que requiere un seguimiento continuo de su evolución a lo largo del paso de las horas.

Estos efectos del clima tienen un efecto directo sobre todo en las variables que contribuyen a los objetivos de este trabajo. El nivel del mar experimenta variaciones por los vientos y en menor medida por la presión atmosférica.

Fracaro (2023) asegura que los efectos de los centros de baja presión más profundos, que son de elevada frecuencia y alcanzan velocidades de desplazamiento de hasta 40 Nds. Estos causales, afectan a la circulación superficial del mar, influyendo en su dirección, velocidad, altura de olas, altura de nivel, entre otras.

BASES ARGENTINAS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Las bases argentinas en la zona norte de la península antártica, las Islas Shetland y Orcadas. Presentan diferentes características en relación a su cota de nivel de emplazamiento con respecto al nivel mar, a las configuraciones de la costa y condiciones de abrigo.

Base Antártica Esperanza

Ubicada en el extremo noreste de la Península Antártica o Tierra de San Martín, en latitud $63^{\circ} 24' S$, y longitud $056^{\circ} 59' O$. Las edificaciones de la base se encuentran entre los 5 a 25 m.s.n.m. (Figuras 16)

Figura 16

Vista de la Base Antártica Esperanza.



Nota: Vista desde la Bahía Esperanza. Disponible en el sitio: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/la-base-antartica-esperanza-recibio-las-familias-que-invernaran-este-ano>

Base Carlini

Ubicada sobre la costa sur de la caleta Potter, en latitud $62^{\circ} 14' S$ y longitud $058^{\circ} 40' O$, en la península del mismo nombre, sobre la bahía Guardia Nacional, isla 25 de Mayo. Las edificaciones de la base se encuentran a 10 m.s.n.m. (Figura 17)

Figura 17

Vista de la Base Carlini.



Nota: Vista desde la Bahía Guardia Nacional. Disponible en el sitio:

<https://www.argentina.gob.ar/ejercito/antartida/base-carlini>

Base Orcadas

La Base Orcadas se encuentra en la Isla Laurie, en el Istmo de Iburguren, en Orcadas del Sur, en latitud 60°44' S y 044°44' O. Las edificaciones de la base se encuentran a 4 m.s.n.m. (Figura 18)

Figura 18

Vista de la Base Orcadas.



Nota: Vista de la Base Orcadas. Disponible en el sitio:

<https://cancilleria.gob.ar/es/iniciativas/dna/antartidaargentina/bases/orcadas#:~:text=La%20Base%20Orcadas%20fue%20la,Isla%20Laurie%2C%20Orcadas%20del%20Sur.>

Base Cámara

La Base Cámara se encuentra en la isla Media Luna, en Caleta Menguante, en latitud $62^{\circ}36'S$ y longitud $059^{\circ}54'O$. (Figura 19)

Figura 19

Vista de la Base Cámara.



Nota: Vista de la Base Cámara, nótese la gran altura de emplazamiento de las edificaciones sobre el nivel del mar. Imagen disponible en

https://www.hispanospress.com/la-antartida-argentina-registra-temperaturas-record/#google_vignette

Base Petrel

La Base Petrel se encuentra en la Isla Dundee, en latitud $63^{\circ}28'S$ y longitud $056^{\circ}12'O$ se ubica:

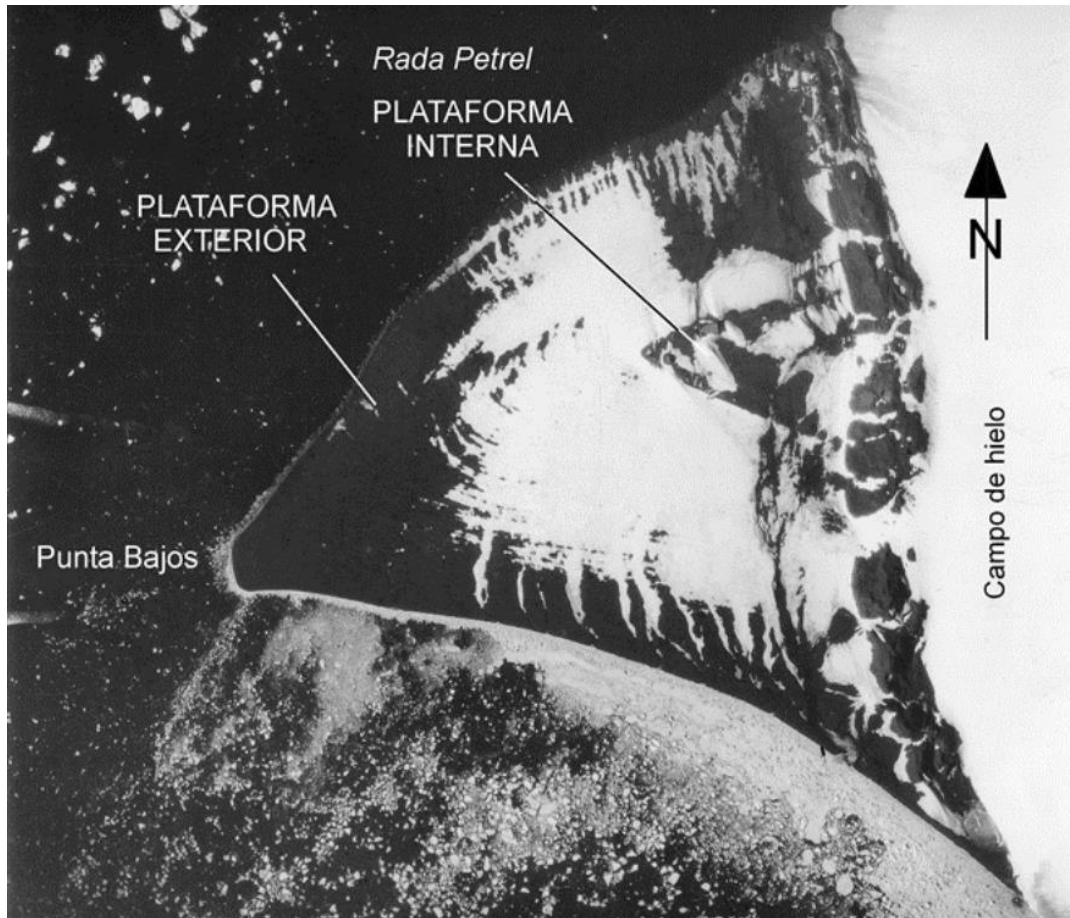
“...sobre rocas a 18 m s. n. m. al pie del glaciar Rosamaría en la rada Petrel, punta Bajos del cabo Welchness de la isla Dundee en el archipiélago de Joinville. El Cabo Welchness consiste en una plataforma exterior suavemente ondulada, de forma triangular y escasa altura sobre el nivel del mar (entre 1 a 7 m.s.n.m.) que incluye una terraza marina ascendida hasta 15 a 16 m.s.n.m., de mucho menor superficie e igualmente triangular y plana.”

(Evaluación Inicial Ambiental” - Obras de Reparaciones y Mantenimiento - Campaña Antártica de Verano e Invierno 2021-2022. Programa de Gestión Ambiental y Turismo (2021) Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto. Dirección Nacional del Antártico).

En la figura 20 se muestra una vista de los rasgos generales descritos.

Figura 20

Vista de rasgos generales del relieve de la zona de la Base Petrel.



Nota: Imagen obtenida del estudio: "Evaluación Inicial Ambiental" - Obras de Reparaciones y Mantenimiento - Campaña Antártica de Verano e Invierno 2021-2022. Programa de Gestión Ambiental y Turismo (2021) Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto. Dirección Nacional del Antártico.

DATOS Y METODOLOGÍA DE ESTUDIO

En este apartado se exponen los datos con los que se realizó el estudio, el criterio para su selección y las fuentes de selección.

También se describen como se procesaron los datos obtenidos.

Datos geológicos

Fueron recopilados del SEGEMAR, y de diversos autores ya citados, con el fin de describir las características geológicas de las áreas. Precisamente la conformación del tipo de roca de las placas y las características de la actividad sísmica.

Datos sismológicos

Se seleccionaron los eventos de magnitud de 6 Mw o mayores. Obteniéndose los datos de fecha, hora (UTC), posición geográfica (WGS 84), profundidad (km), y magnitud (Mw). Recopilados del sitio <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>, representados en la tabla 1.

Tabla 1

Sismos del área de estudio.

Nº	FECHA	HORA (TU)	LAT (°)	LONG (°)	PROF (km)	MAG (Mw)	REGIÓN
1	23/01/2021	23:36	61.810	055.503	15	6.9	Shetland
2	12/08/2021	18:35	58.375	025.264	22.8	8.1	Sandwich
3	19/08/2016	07:32	55.285	031.877	10	7.4	Sandwich
4	25/11/2013	06:27	53.945	055.003	11.8	7	Malvinas
5	17/11/2013	09:04	60.274	046.401	10	7.7	Orcadas

Nota: Información de los eventos sísmicos Fuente Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards>

Procesamiento de los datos:

Se realizaron mapas en el software libre de información geográfica “QSIG” versión 3.34.13, a los fines de procesar:

- a) Ubicación de los sismos.
- b) Ubicación de bases en la Antártida, y en el continente.
- c) Obtención de distancias desde los epicentros hacia las bases en estudio.

Datos mareográficos

Se emplearon los datos de nivel de mar de la red de estaciones mareográficas adheridas al sistema de la Comisión Oceanográfica Internacional para el monitoreo del nivel del mar.

Seleccionando una serie de datos que represente los tiempos en donde las olas producidas por los sismos son detectadas por los mareógrafos.

Estaciones mareográficas, junto con el país que la administra:

- A) Puerto Deseado (ARGENTINA).
- B) Puerto de Ushuaia (ARGENTINA).
- C) Puerto Williams (CHILE).
- D) King Eduard Point (REINO UNIDO).
- E) Base Capitán Arturo Prat (CHILE).
- F) Base O'Higgins (CHILE).
- G) Base Vernadsk (UCRANIA).
- H) Base Rothera (REINO UNIDO).
- I) Puerto Argentino (REINO UNIDO).

Procesamiento de los datos:

- a) Se graficarán las series temporales de la altura del mar en las estaciones mareográficas en planillas de cálculo.
- b) Se filtrarán con filtros pasa banda las alturas del mar para identificar tsunamis luego de los sismos.
- c) Se relacionarán los horarios de ocurrencia de sismos, con el horario donde las perturbaciones son registradas por los mareógrafos. En contraste con las distancias entre epicentros y los mareógrafos.

Datos meteorológicos

Obtenidos desde el Servicio Meteorológico Nacional, se solicitó al Centro de Información Meteorológica. Los datos de: viento y presión atmosférica; en el nivel de superficie.

Procesamiento de los datos:

- a) Se graficarán las series temporales (meteogramas) de la presión atmosférica y viento, representando la evolución de la situación en los momentos previos, durante y después de los sismos, para las zonas donde se encuentran los mareógrafos.
- b) Se relacionará la situación atmosférica con las alturas del mar registradas.

ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

Se mostrarán los resultados obtenidos del estudio de los datos, para cada aspecto trabajado.

Comparando y relacionando los resultados sismológicos, mareológicos, meteorológicos y topográfico de las zonas de interés.

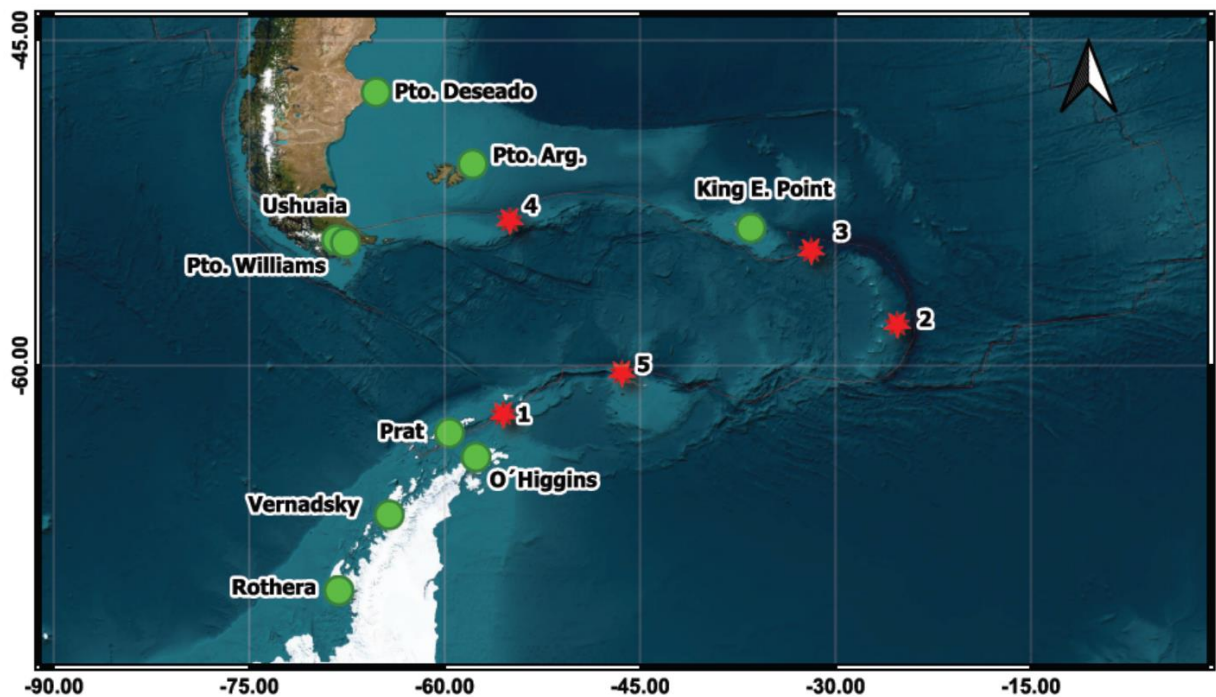
Resultados sismológicos

Se posicionaron las ubicaciones de los sismos y bases, en un sistema de representación geográfica y se midieron las distancias hacia los mareógrafos de los cuales se obtuvieron los datos (Figura 21).

Con el objetivo de: obtener relaciones de los mismos con las bases de estudio y otras áreas de interés, en base a la distancia desde los epicentros a las bases y la hora en la cual los mareógrafos registraron las variaciones de altura del nivel del mar, que se verán en el apartado del análisis de los datos mareológicos.

Figura 21

Ubicación de las bases y epicentros de sismos en estudio.



Nota: Mapa de ubicación de sismos en la región del Atlántico Sur. Sismo (estrella roja), estación mareográfica (círculo verde). Epicentros de sismos disponibles en Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards>

Referencias (Nº, magnitud y fecha): **1** – 6.9 Mw, 23/01/2021; **2** – 8.1 Mw, 12/08/2021; **3** – 7.4 Mw, 19/08/2016; **4** – 7 Mw, 25/11/2012; **5** – 7.7 Mw, 17/11/2013.

La tabla 2 representa las distancias en km hacia las bases.

Tabla 2

Distancias en (km) desde los epicentros a las bases de mareográficas. Fecha, hora y magnitud.

	FECHA / HORA (UTC) / MAGNITUD				
	17/11/2013 09:04 7.7 MW	25/11/2013 06:27 7 MW	19/08/2016 07:32 7.4 MW	23/01/2021 23:36 6.9 MW	12/08/2021 18:35 8.1 MW
PUERTO DESEADO	1900	1200	2500	1700	3100
USHUAIA	1500	880	2300	1200	2650
PUERTO WILLIAMS	1400	830	2250	1150	2600
KING E. POINT	900	1300	310	1500	830
BASE PRAT	750	980	1800	230	1900
BASE O'HIGGINS	700	1000	1700	200	1800
BASE VERNADSKI	1200	1400	2100	600	2300
BASE ROTHERA	1500	1700	2500	960	2550
PUERTO ARGENTINO	1200	340	1900	1150	2200

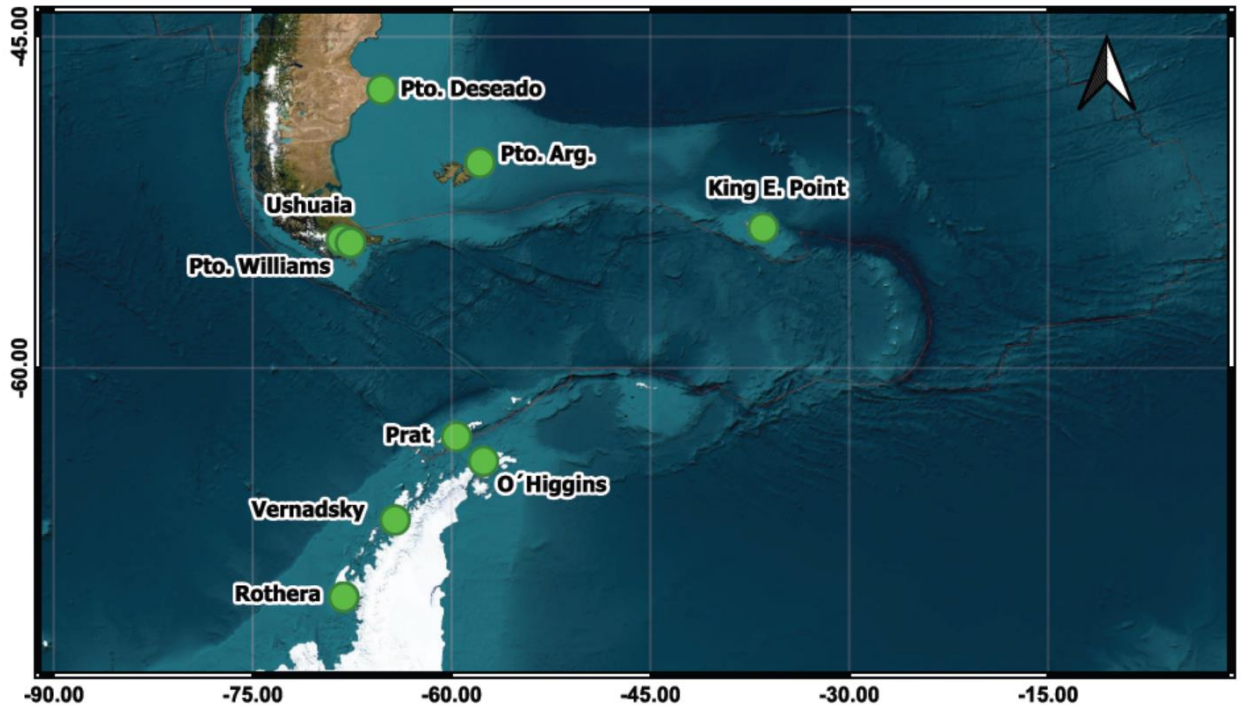
Nota: Distancias medidas en software "QGIS", versión 3.34.13.

Resultados mareográficos

Se emplearon los datos de la red de estaciones mareográficas adheridas al sistema de la Comisión Oceanográfica Internacional para el monitoreo del nivel del mar. En la figura 22 se representan las ubicaciones de las estaciones de medición.

Figura 22

Ubicación de mareógrafos.



Nota: Mapa de estaciones mareográficas consultadas, que forman parte de la red de monitoreo del nivel de mar de la Comisión Oceanográfica Internacional. Estación mareográfica (círculo verde)

<https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>

Relación de datos obtenidos en relación a cada evento sísmico, según tabla 3:

Tabla 3

Datos de marea disponibles en relación a cada evento sísmico.

	FECHA / HORA (UTC) / MAGNITUD				
	17/11/2013 09:04 7.7 MW	25/11/2013 06:27 7 MW	19/08/2016 07:32 7.4 MW	23/01/2021 23:36 6.9 MW	12/08/2021 18:35 8.1 MW
PUERTO DESEADO	X	X	X	X	X
USHUAIA	S/D	S/D	S/D	X	X
PUERTO WILLIAMS	X	X	X	S/D	S/D
KING E. POINT	X	X	X	S/D	X
BASE PRAT	X	X	X	X	X
BASE O'HIGGINS	S/D	S/D	S/D	X	X
BASE VERNADSKI	X	X	S/D	X	X
BASE ROTHERA	S/D	S/D	X	X	S/D
PUERTO ARGENTINO	S/D	S/D	X	X	S/D

Nota: Las cruces indican la disponibilidad de datos y S/D "Sin datos".

Variaciones del nivel del mar en relación a cada evento sísmico

Se graficaron los datos de las series temporales de altura de marea para cada evento. Y se obtuvieron las variaciones de nivel a causa de los sismos.

Imágenes extraídas de las series temporales de altura de marea registrada durante aproximadamente 24 horas el día del evento sísmico. Altura (m), tiempo (h).

Evento del 17 de noviembre del 2013, magnitud 7.7 Mw, 9:04 UTC.

Figura 23

Serie temporal de altura de marea de Puerto Williams. 17/11/2013.

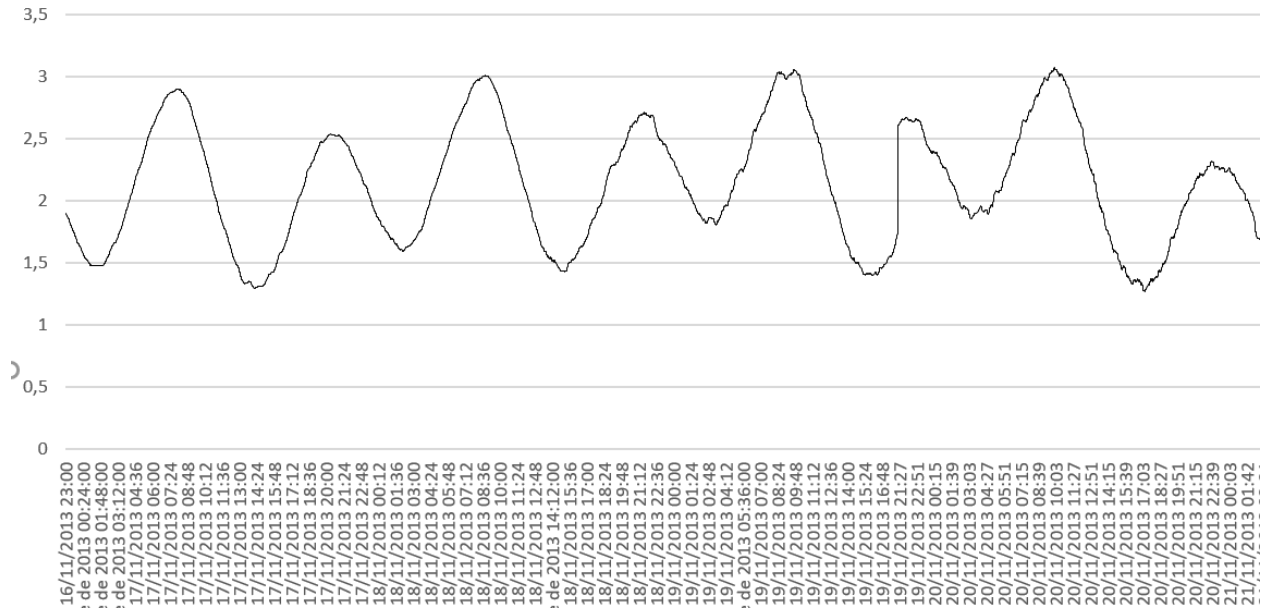


Figura 24

Serie temporal de altura de marea de Puerto Deseado. 17/11/2013.

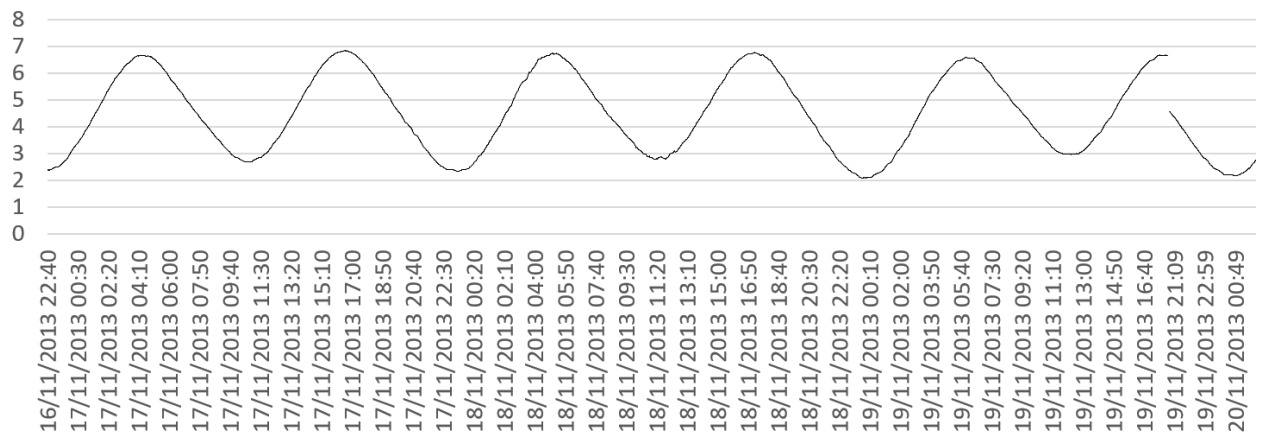


Figura 25
Serie temporal de altura de marea de King Eduard Point. 17/11/2013.

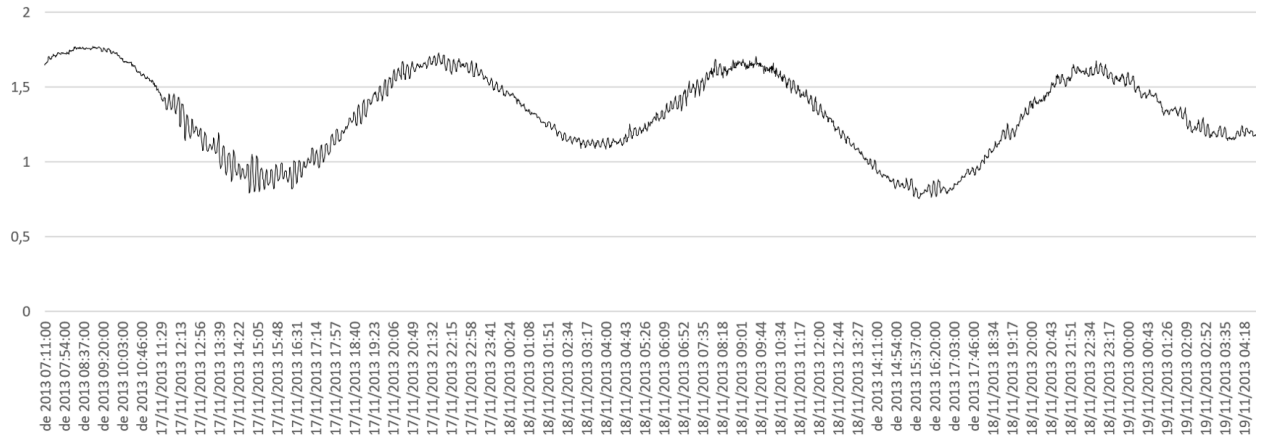


Figura 26
Serie temporal de altura de marea de Base Prat. 17/11/2013.

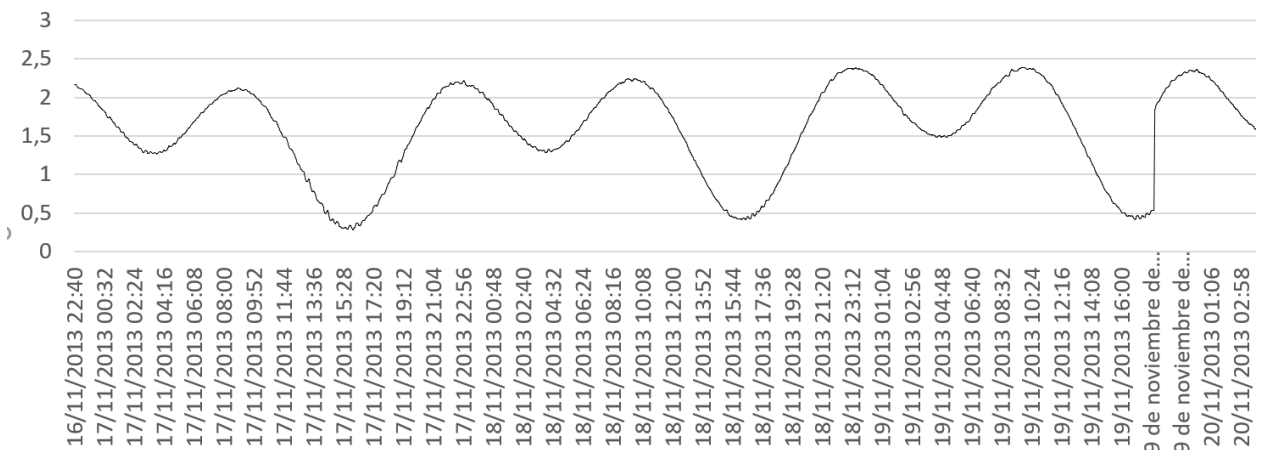
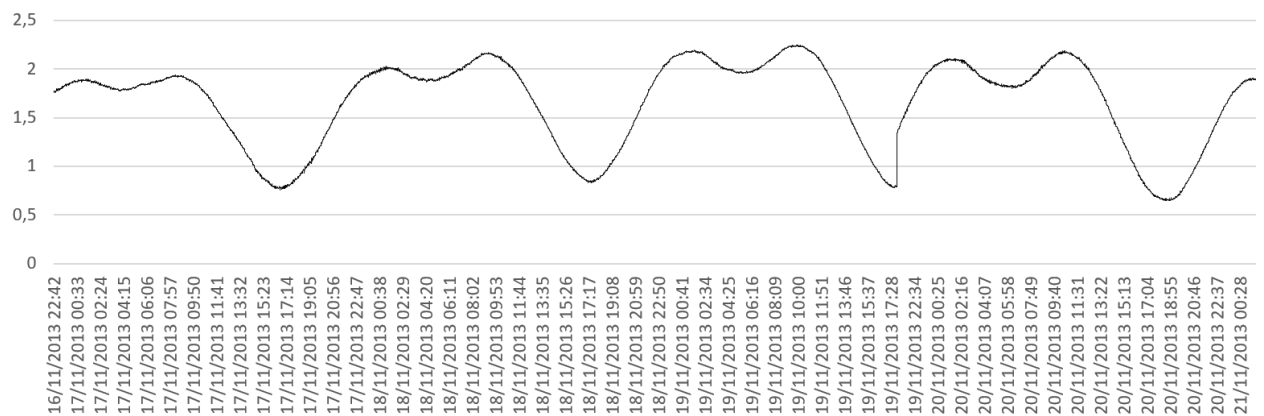


Figura 27
Serie temporal de altura de marea de Base Vernadsky. 17/11/2013.



Evento del 25 de noviembre del 2013, magnitud 7.7 Mw. 6:27 UTC.

Figura 28

Serie temporal de altura de marea de Puerto Deseado. 25/11/2013.

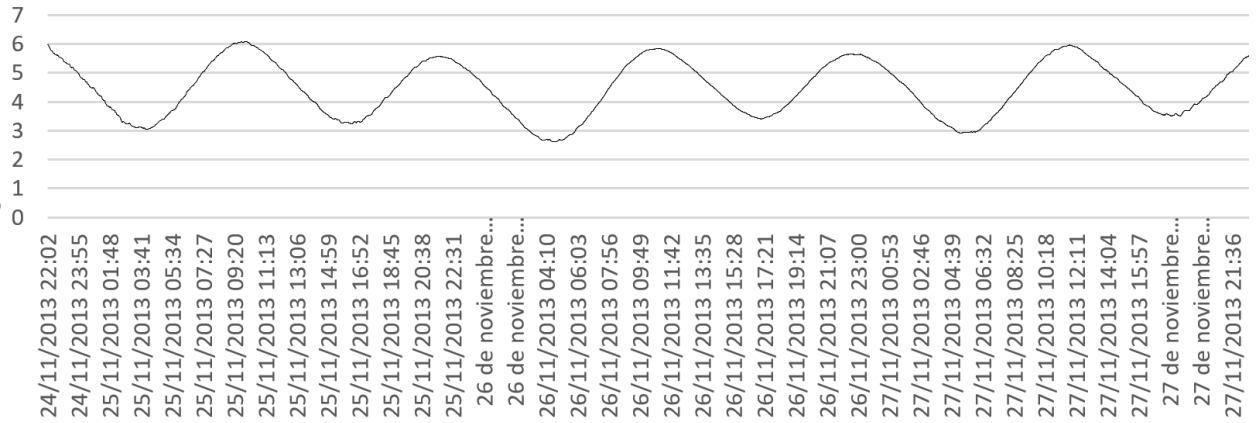


Figura 29

Serie temporal de altura de marea de Puerto Williams. 25/11/2013.

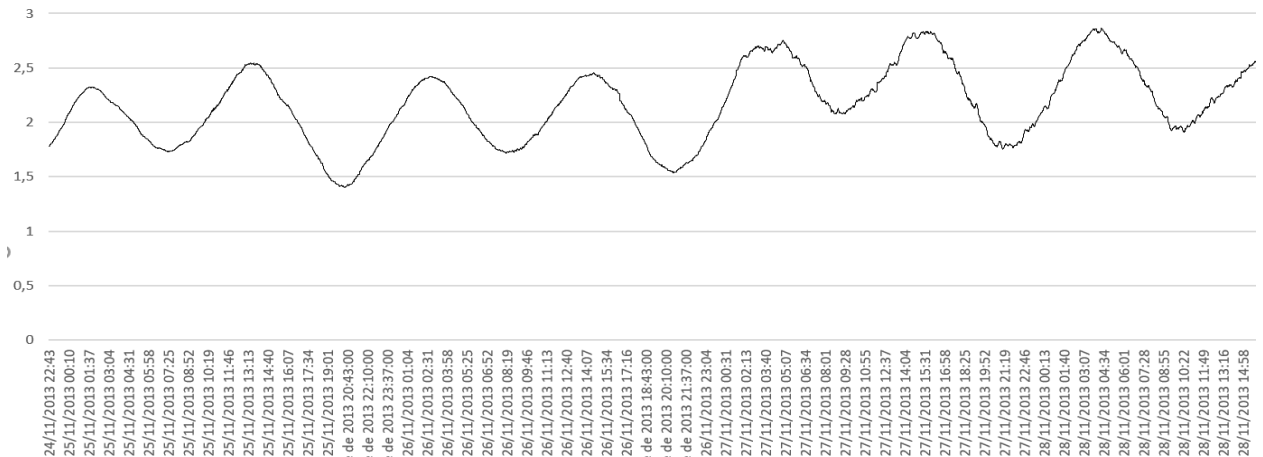


Figura 30

Serie temporal de altura de marea de King Eduard Point. 25/11/2013.

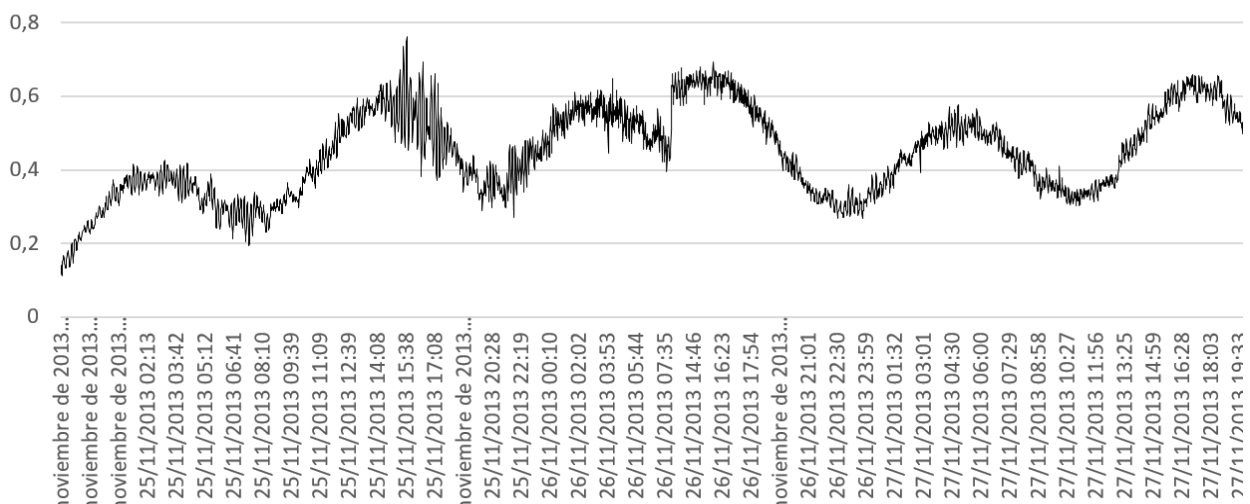


Figura 31
Serie temporal de altura de marea de Base Prat. 25/11/2013.

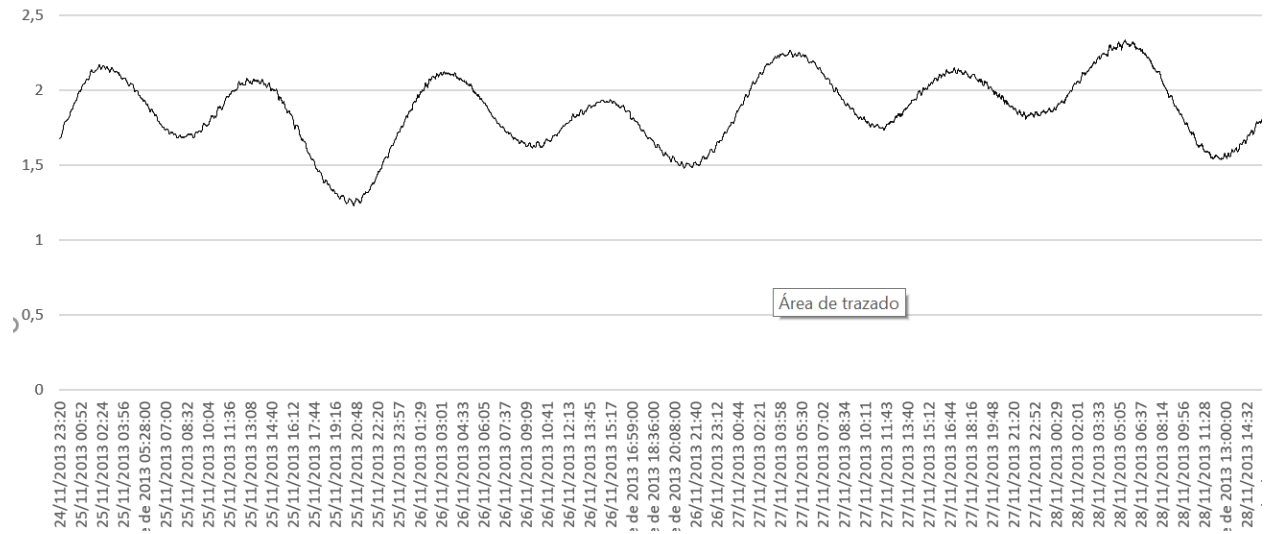
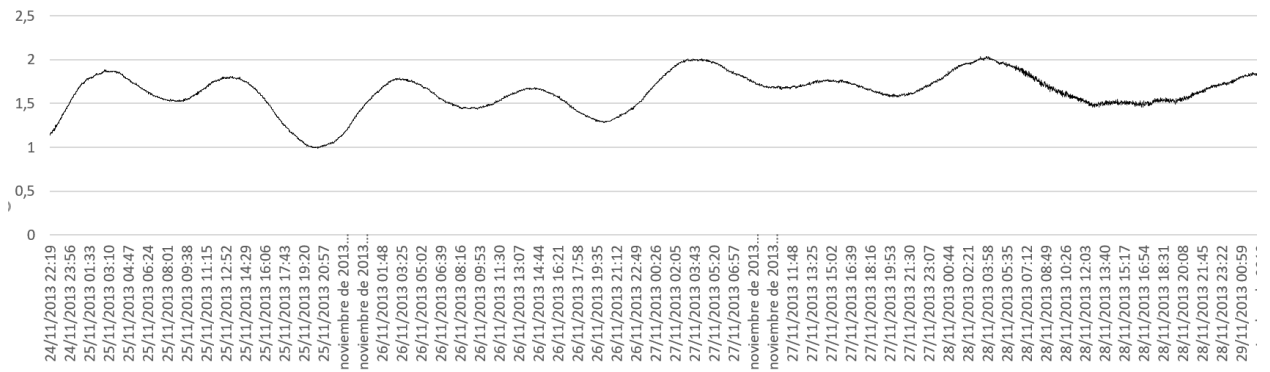


Figura 32
Serie temporal de altura de marea de Base Vernadsky. 25/11/2013.



Evento del 19 de agosto del 2016, magnitud 7.4 Mw. 7:32 UTC.

Figura 33

Serie temporal de altura de marea de Puerto Deseado. 19/08/2016.

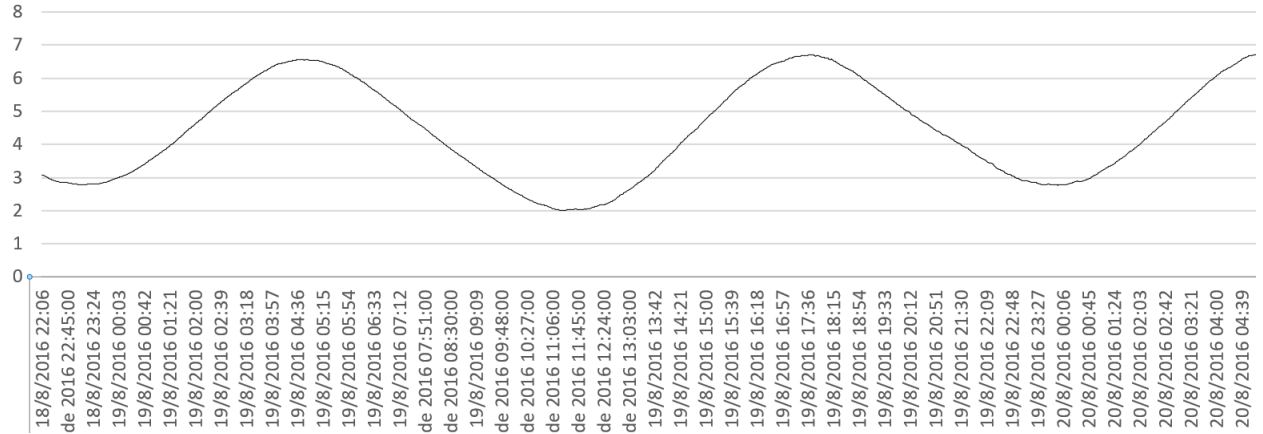


Figura 34

Serie temporal de altura de marea de Puerto Williams. 19/08/2016.

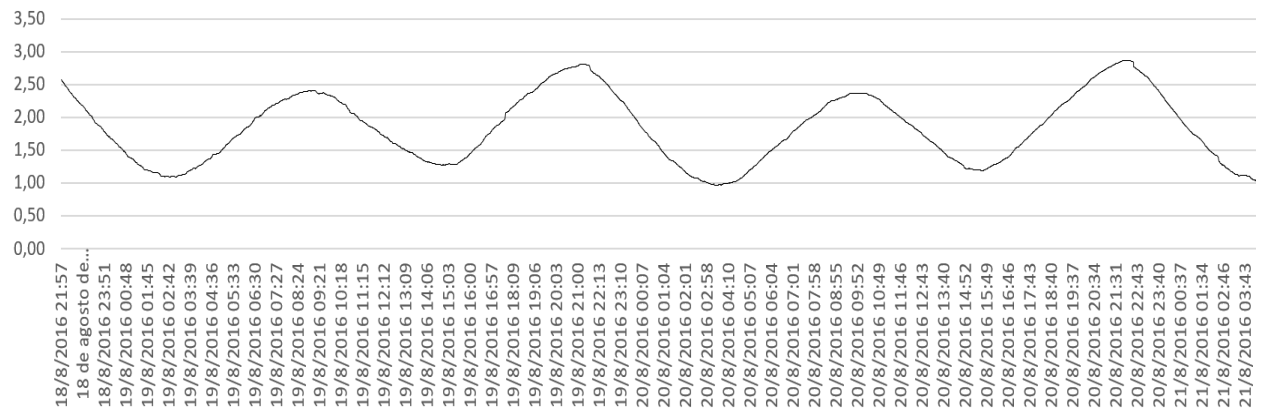


Figura 35

Serie temporal de altura de marea de King Eduard Point. 19/08/2016.

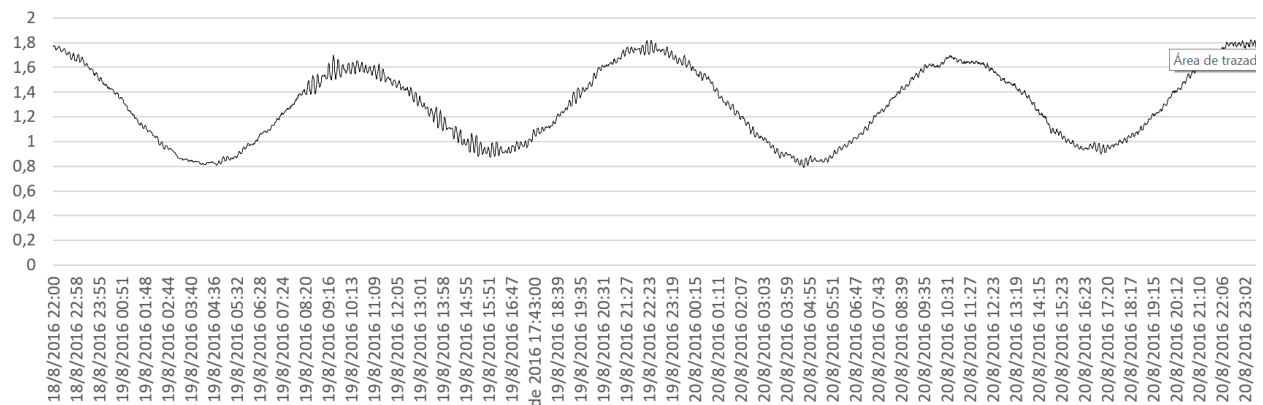


Figura 36
Serie temporal de altura de marea de Base Prat. 19/08/2016.

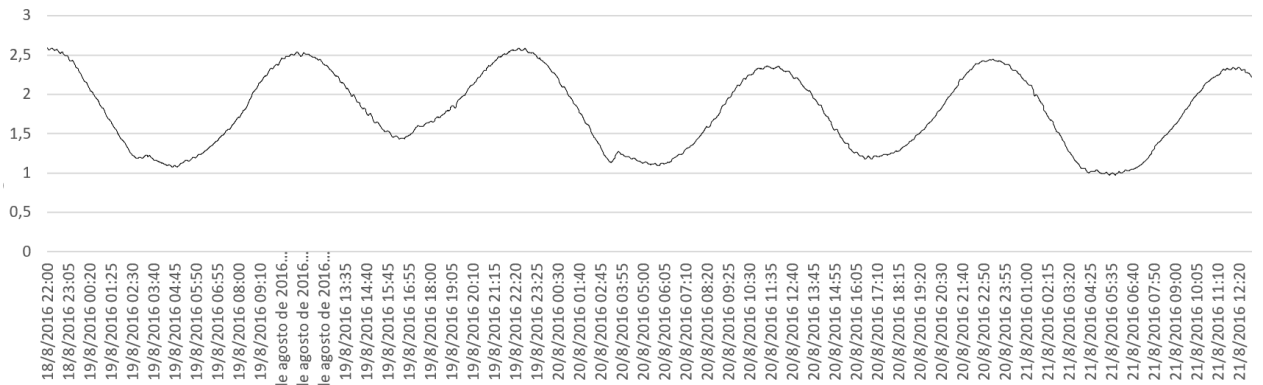


Figura 37
Serie temporal de altura de marea de Base Rothera. 19/08/2016.

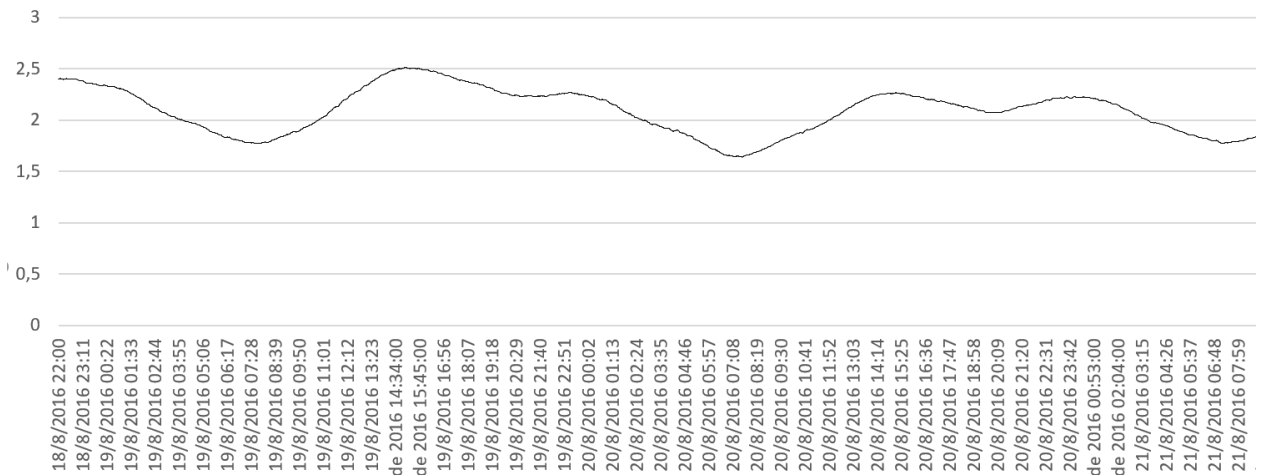
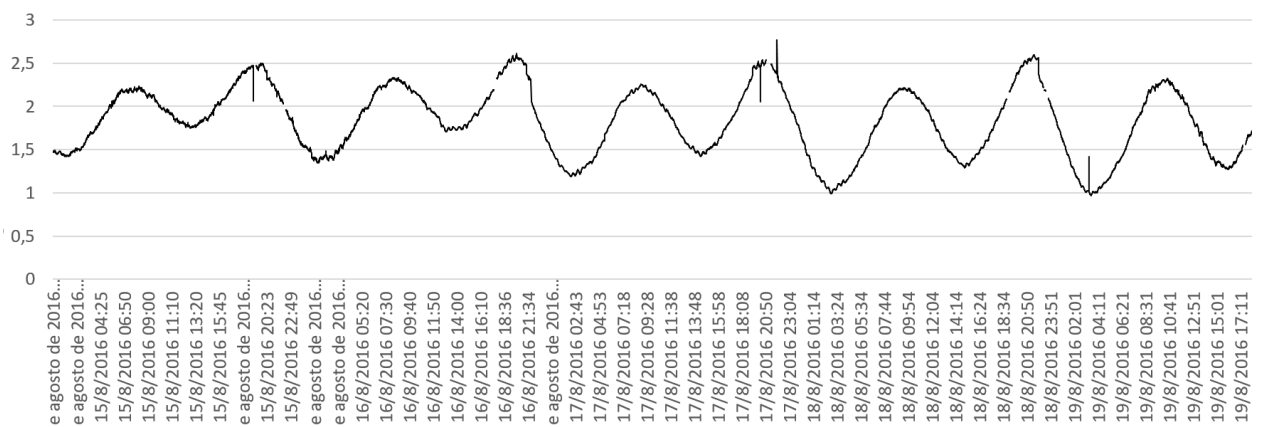


Figura 38
Serie temporal de altura de marea de Puerto Argentino. 19/08/2016.



Evento del 23 de enero del 2021, magnitud 6.9 Mw. 23:36 UTC.

Figura 39

Serie temporal de altura de marea de Puerto Deseado. 23/01/2021.

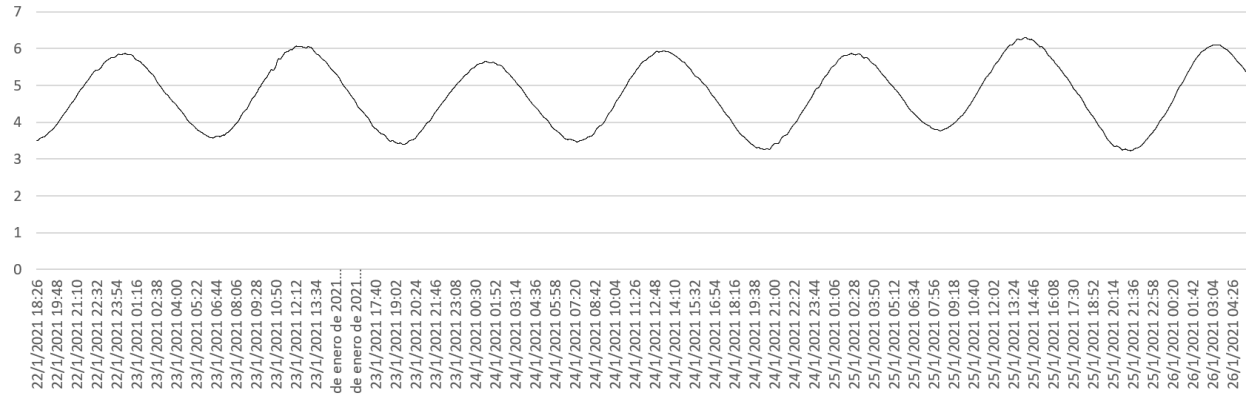


Figura 40

Serie temporal de altura de marea de Ushuaia. 23/01/2021.

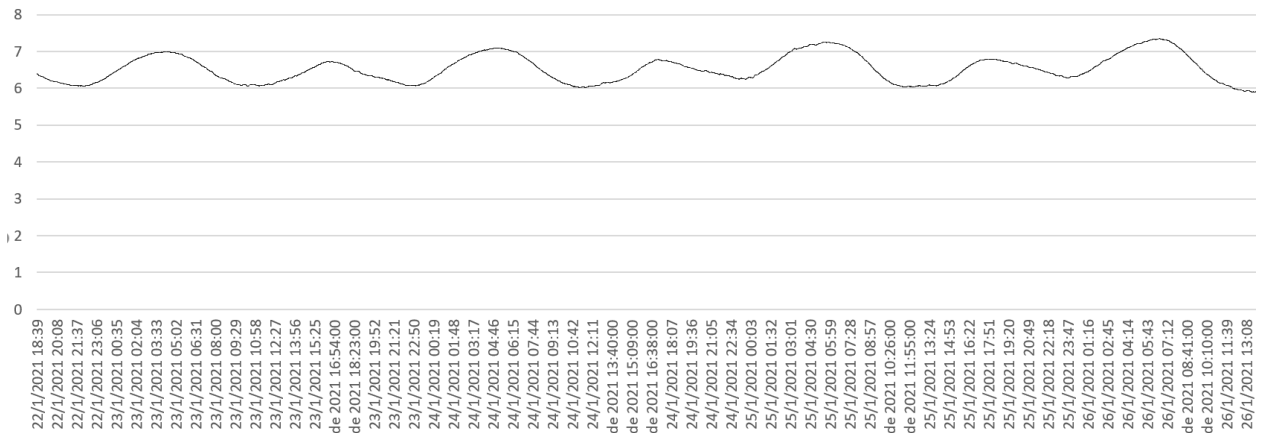


Figura 41

Serie temporal de altura de marea de Base Prat. 23/01/2021.

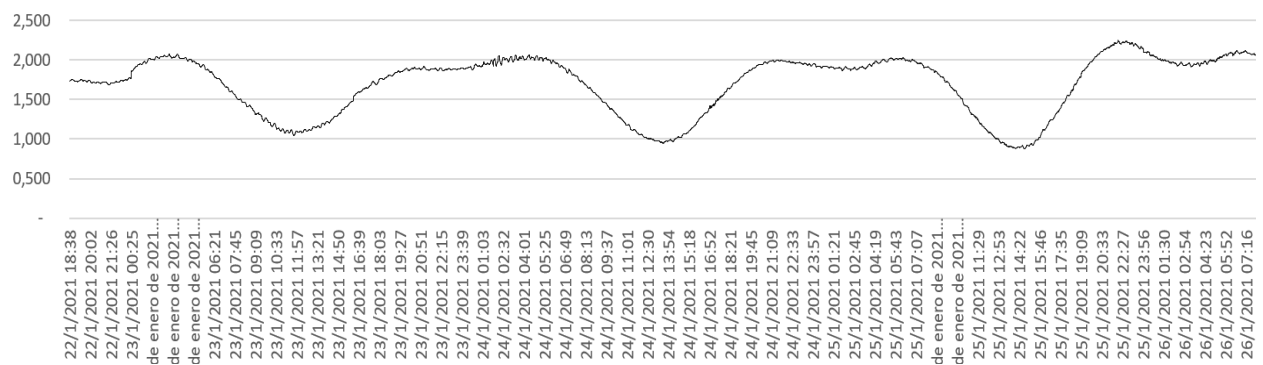


Figura 42
Serie temporal de altura de marea de Base O'Higgins. 23/01/2021.

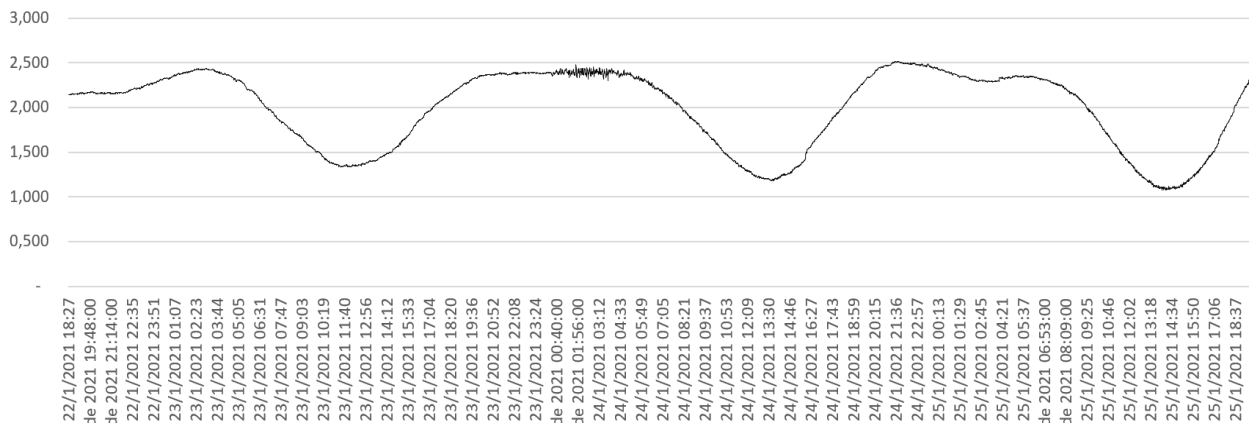


Figura 43
Serie temporal de altura de marea de Base Vernadsky 23/01/2021.

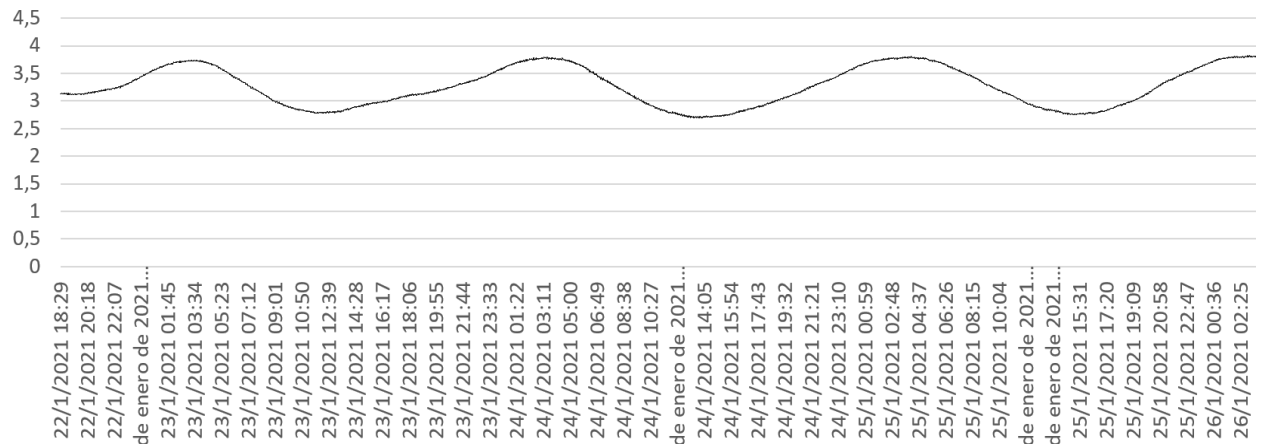


Figura 44
Serie temporal de altura de marea de Base Rothera. 23/01/2021.

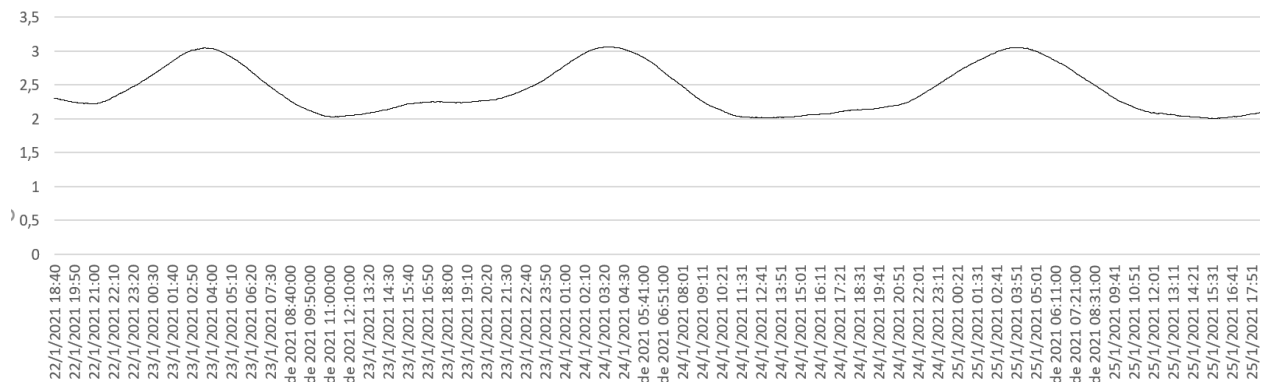
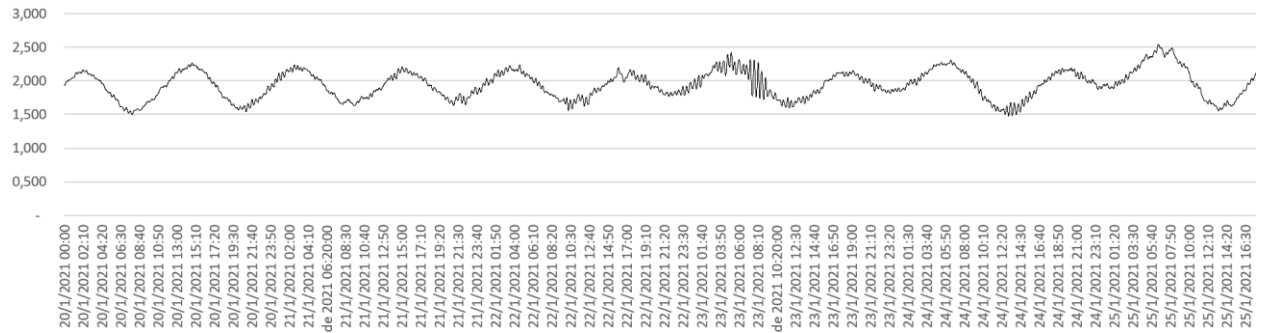


Figura 45

Serie temporal de altura de marea de Puerto Argentino. 23/01/2021.



Eventos del 12 de agosto del 2021, magnitud 7.5, 18:32 UTC y 8.1 Mw. 18:35 UTC.

Figura 46

Serie temporal de altura de marea de Puerto Deseado. 12/08/2021.

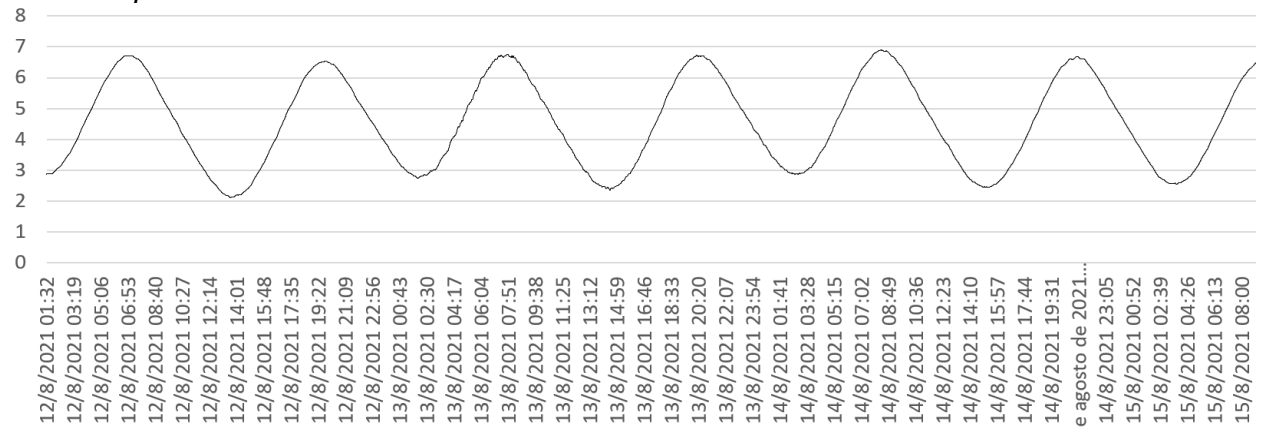


Figura 47

Serie temporal de altura de marea de Ushuaia. 12/08/2021.

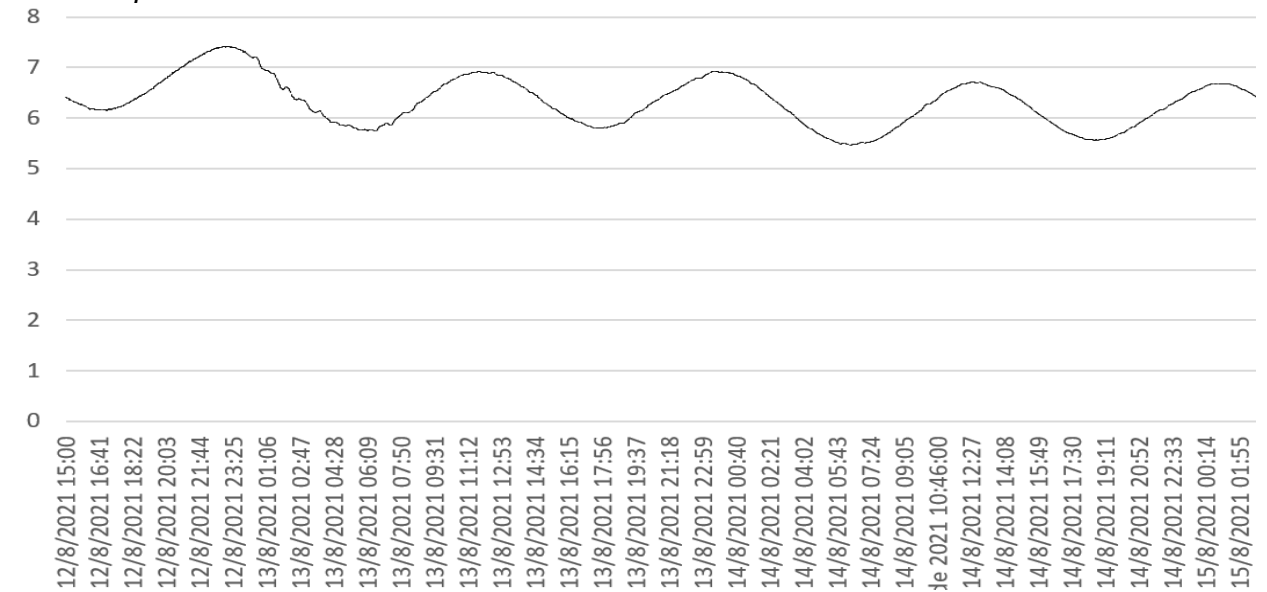


Figura 48

Serie temporal de altura de marea de King Eduard Point. 12/08/2021.

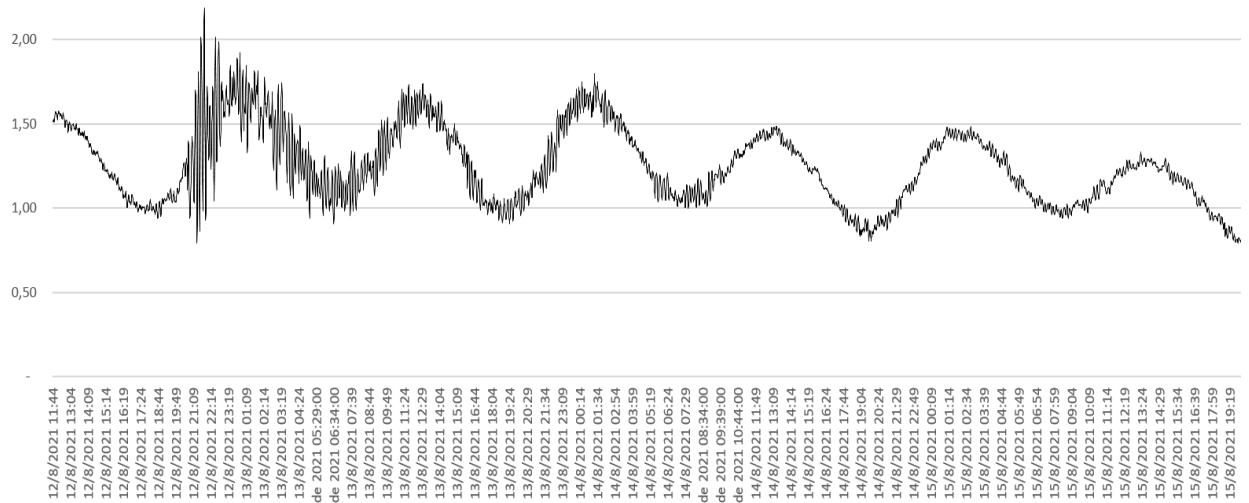


Figura 49

Serie temporal de altura de marea de Base Prat. 12/08/2021.

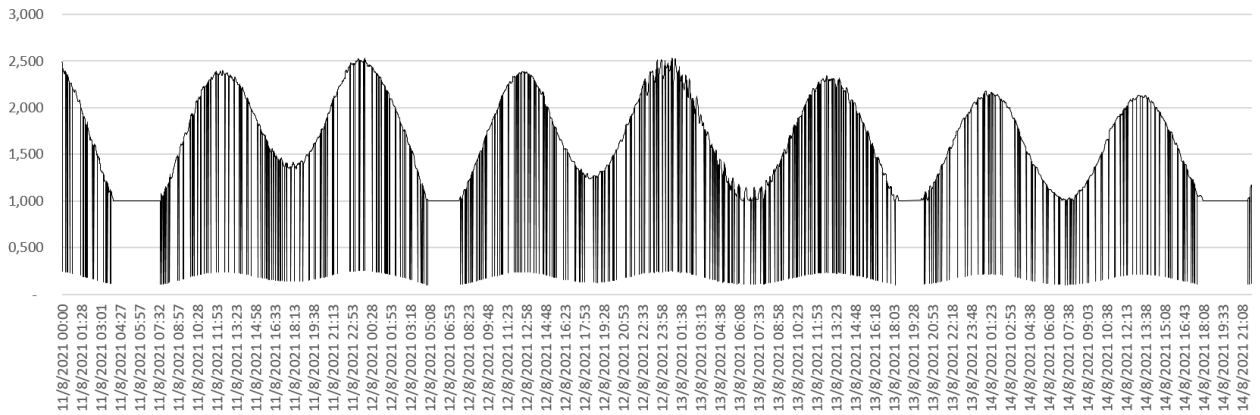


Figura 50

Serie temporal de altura de marea de Base O'Higgins. 12/08/2021.

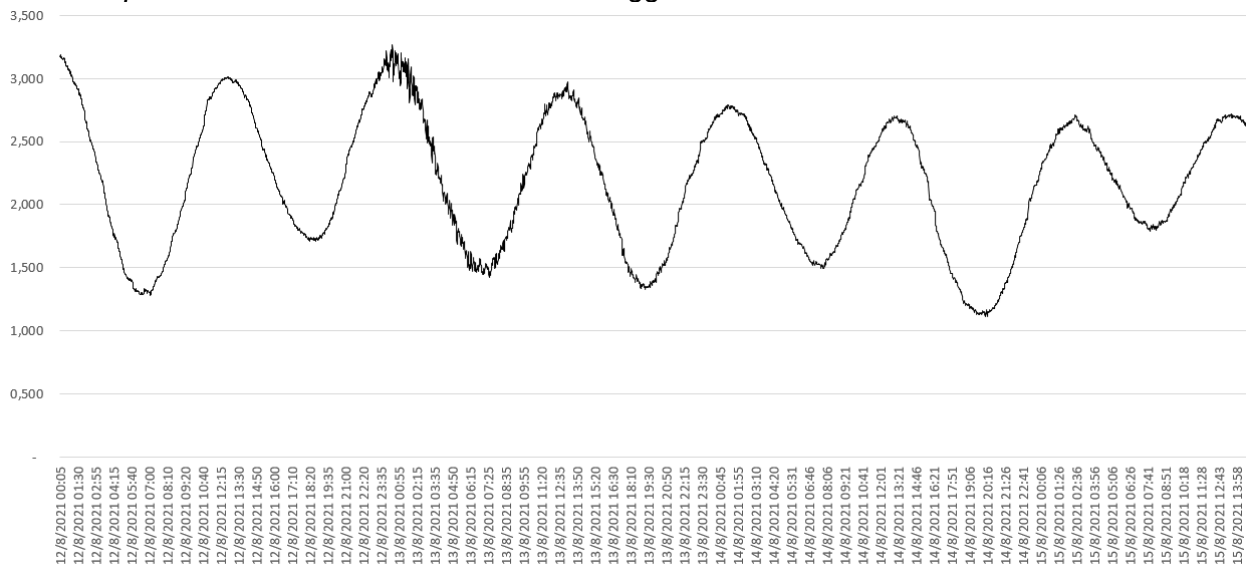
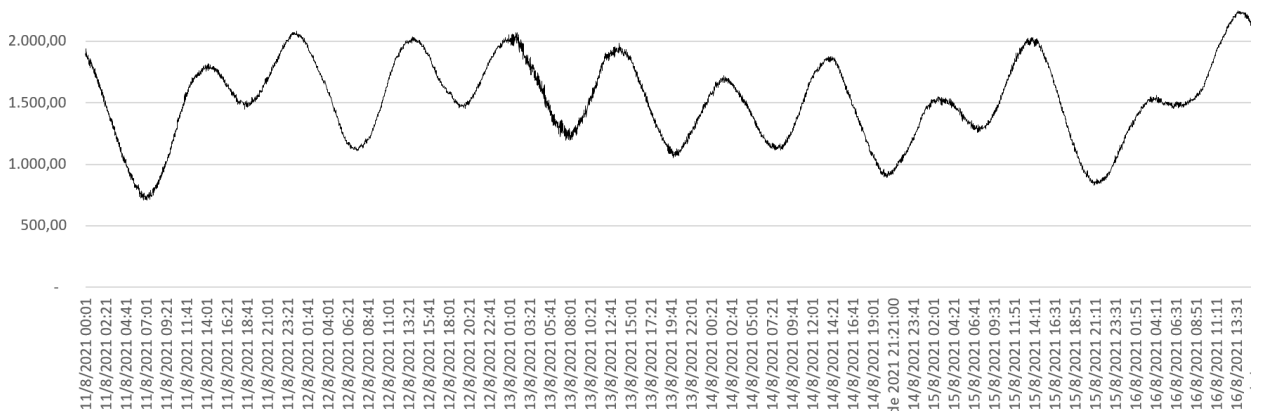


Figura 51

Serie temporal de altura de marea de Base Vernadsky. (Alturas en cm). 12/08/2021.



Análisis de alturas de marea significativas

Se representará en la tabla 4, las alturas significativas registradas por cada mareógrafo, dando cuenta que las perturbaciones tienen una duración en el tiempo que en algunos casos superan las 12 horas.

Tabla 4

Altura significativa del mar y hora de inicio de registro, debido a la perturbación producto del tsunami, registrada por los mareógrafos.

	FECHA / HORA (UTC) / MAGNITUD				
	17/11/2013 09:04 7.7 MW	25/11/2013 06:27 7 MW	19/08/2016 07:32 7.4 MW	23/01/2021 23:36 6.9 MW	12/08/2021 18:35 8.1 MW
PUERTO DESEADO	N/A	N/A	N/A	N/A	0,15 13/08 08:00
USHUAIA	S/D	S/D	S/D	N/A	0,15 13/08 00:15
PUERTO WILLIAMS	N/A	N/A	N/A	S/D	S/D
KING E. POINT	0,30 17/11 11:00	0,30 25/11 14:30	0,30 19/08 08:30	S/D	1,50 12/08 21:00
BASE PRAT	0,15 17/11 13:00	N/A	0,10 19/08 15:00	0,20 24/01 01:00	0,30 13/08 00:44
BASE O'HIGGINS	S/D	S/D	S/D	0,20 24/01 01:00	0,30 13/08 00:00
BASE VERNADSKI	N/A	N/A	S/D	N/A	0,15 13/08 00:00
BASE ROTHERA	S/D	S/D	N/A	N/A	S/D
PUERTO ARGENTINO	S/D	S/D	N/A	N/A	S/D

Nota: Alturas en metros. Tiempo referido al UTC. S/D: "Sin datos". N/A: "No apreciado".

Resultados Meteorológicos

Los siguientes meteogramas o series de tiempo de variables meteorológicas, están realizadas en base a la información proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional. Y, corresponden a los datos recopilados en la Base Antártica Esperanza (ARG). Los mismos están en UTC (0-24 hs).

Figura 52
Meteogramas para el día 17/11/2013.

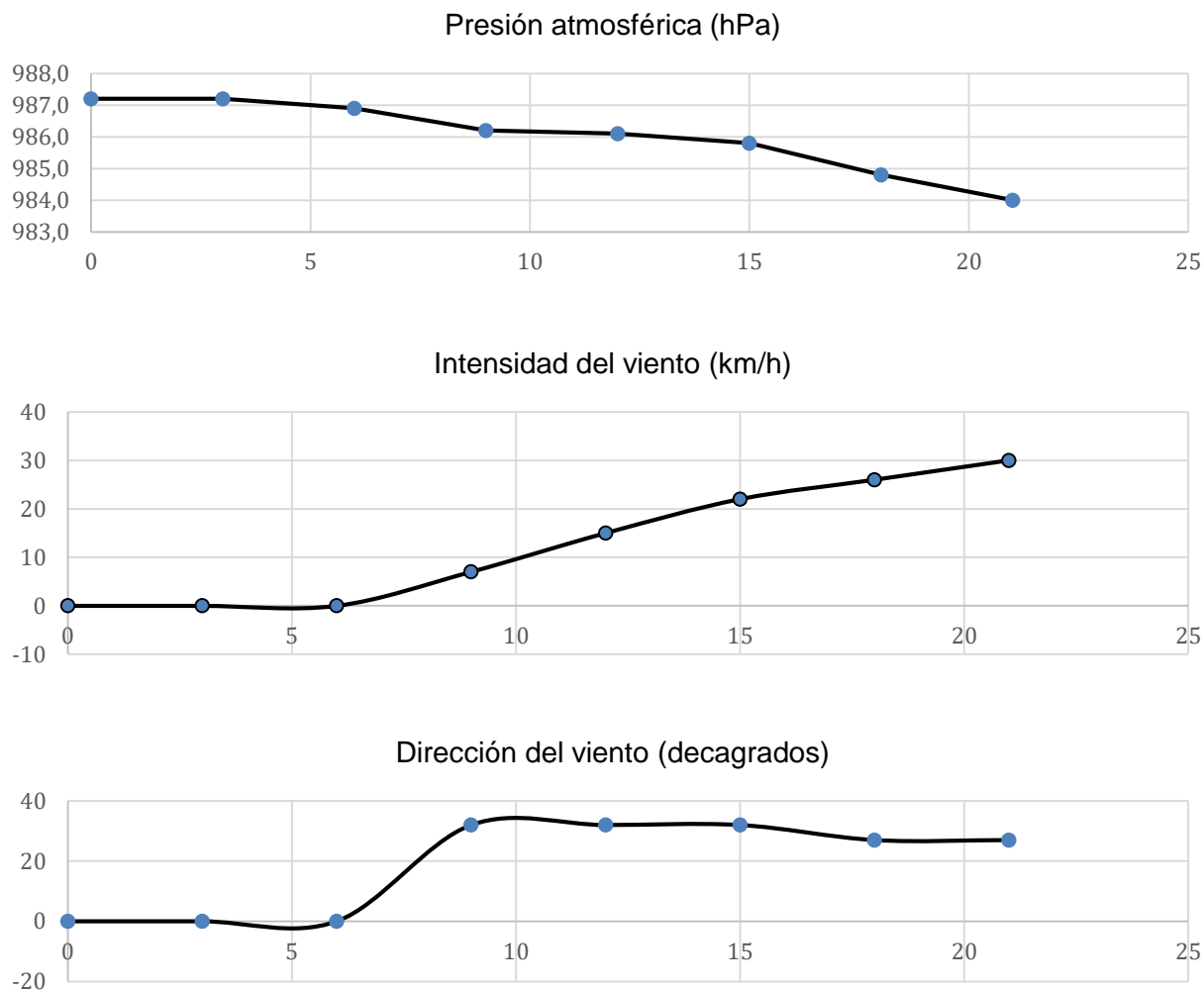


Figura 53
Meteogramas para el día 25/11/2013.

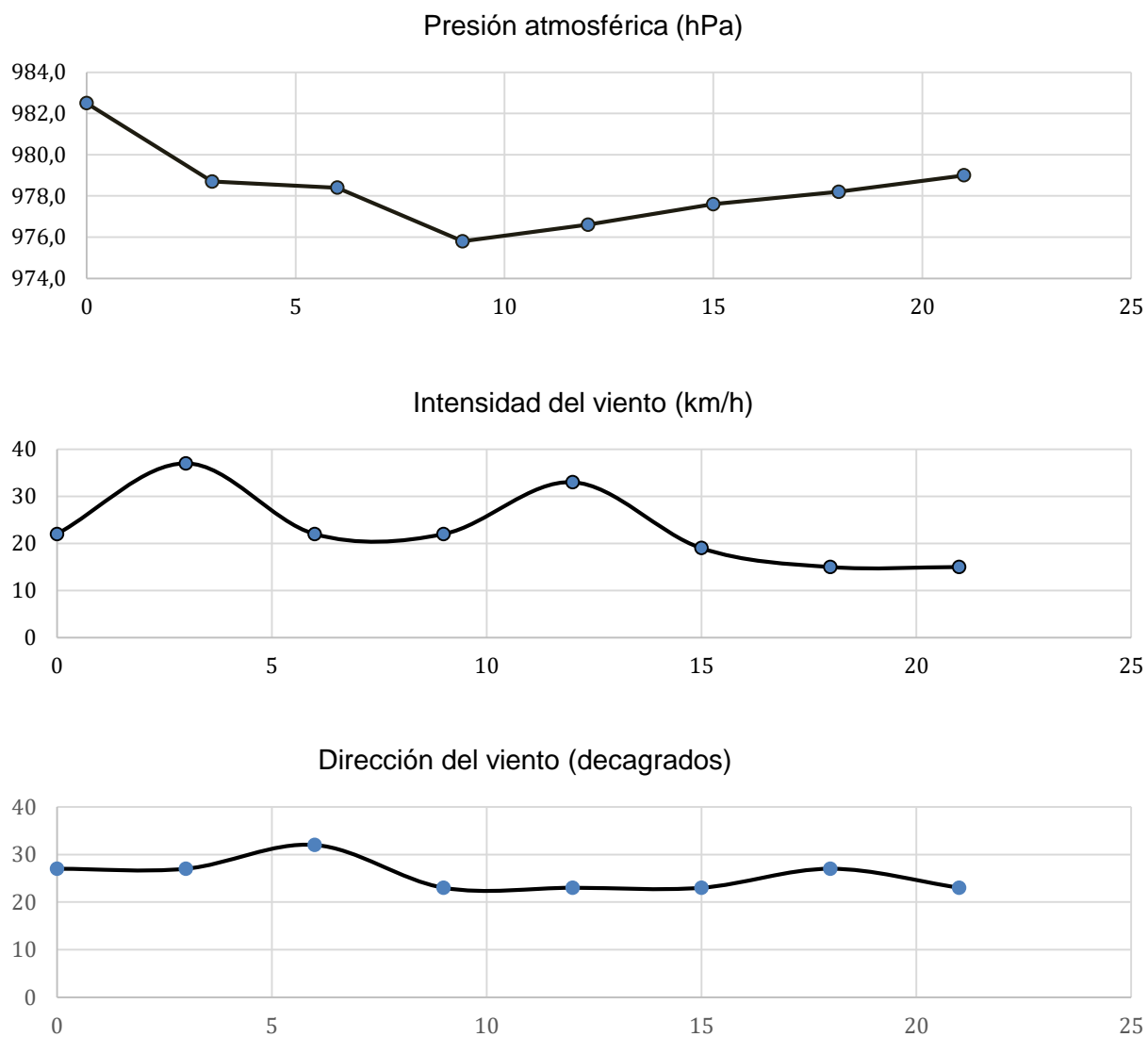


Figura 54
Meteogramas para el día 18/08/2016.

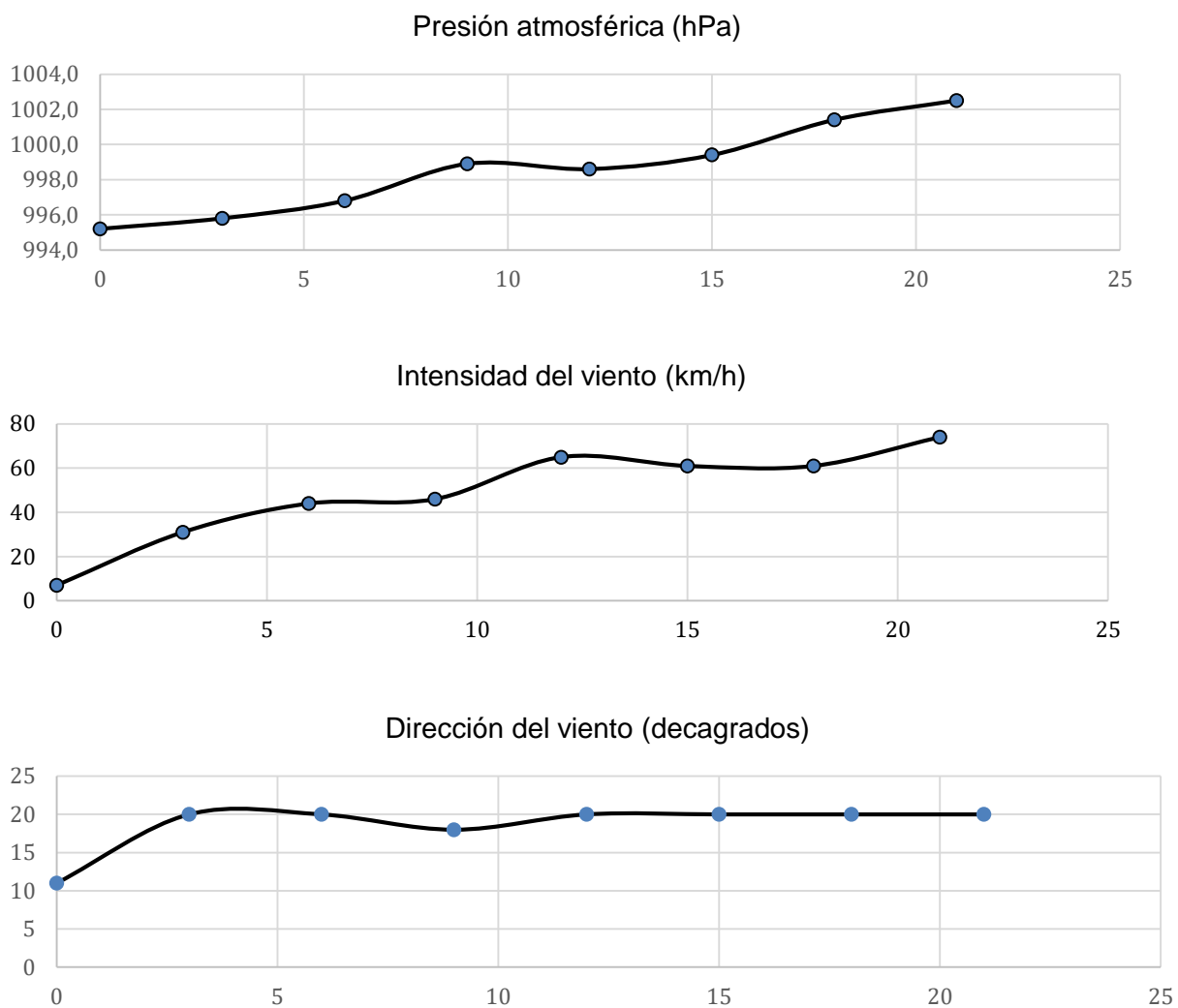


Figura 55
Meteorogramas para el día 23/01/2021.

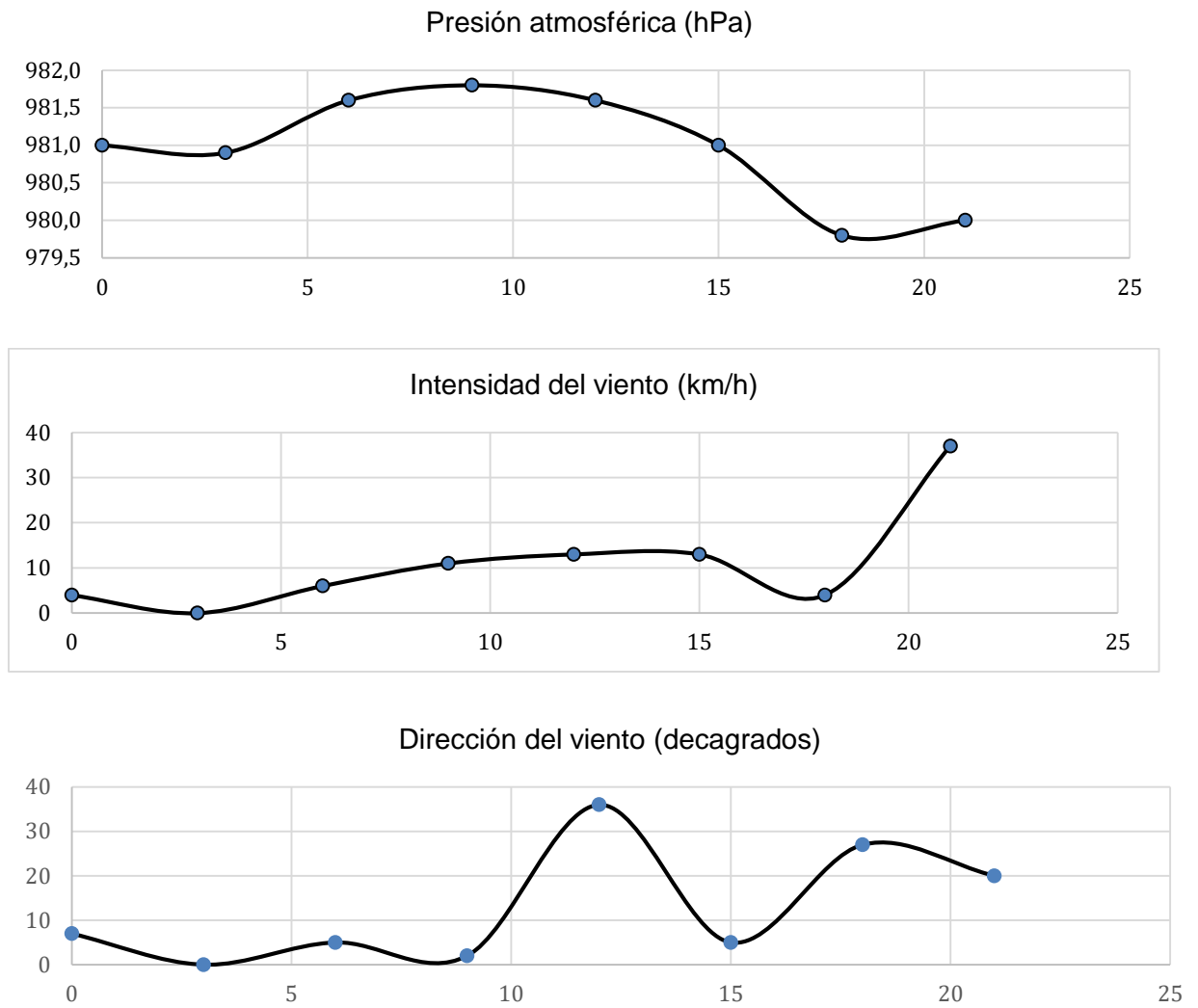
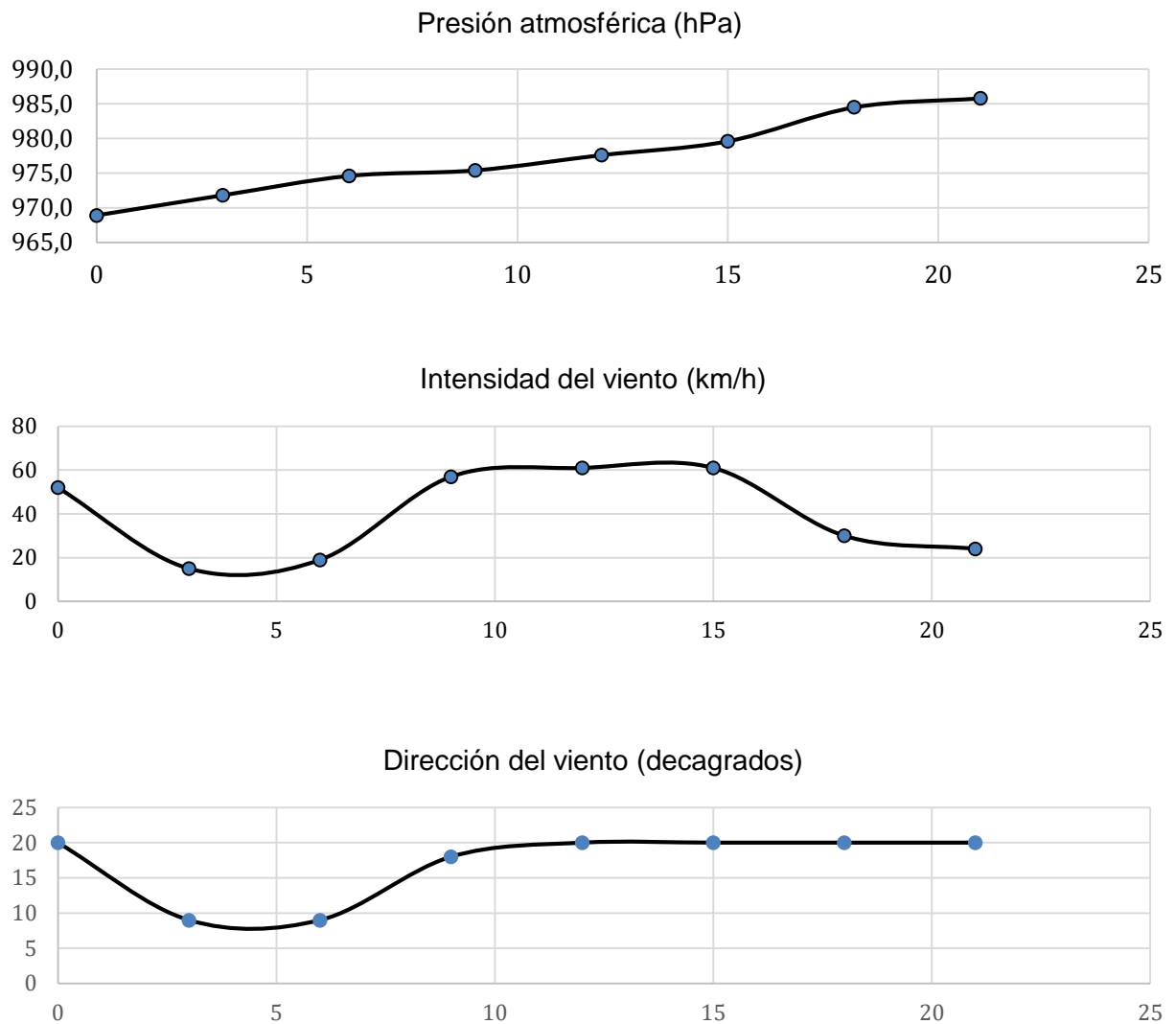


Figura 56
Meteogramas para el día 13/08/2021.



Resumen de datos meteorológicos

17 de noviembre del 2013

Hacia las horas del mediodía la zona experimentó un cambio en la dirección e intensidad del viento. Soplando desde el sector norte con intensidad del orden de los 5 km/h, para luego rotar al sudoeste hasta los 15 km/h.

25 de noviembre del 2013

Hacia las horas del mediodía, el viento se mantuvo soplando desde el sudoeste, con intensidades variables, en el rango de los 25 km/h.

19 de agosto del 2016

Para las 15:00 (UTC), el viento se mantuvo soplando desde el sudoeste, con intensidades variables, en el rango de los 50 km/h.

23 de enero del 2021

Hacia las 24:00 (UTC), el viento experimentó una rotación desde el noreste al sudoeste, con intensidades de 40 km/h.

13 de agosto del 2021

Hacia las 00:00 (UTC), el viento experimentó una rotación desde el sudoeste al noreste, con intensidades de 60 km/h.

De las observaciones de la dirección del viento en Base Esperanza, surge que:

- a) predomina la dirección sudoeste, con vientos superiores a los 25 km/h. Estas observaciones son válidas para la zona de la Base argentina Esperanza. Sin embargo, es una muestra de las condiciones generales a la que se encuentra la zona de estudio de Base O'Higgins.
- b) Se asume que: por las características de la región, que las zonas cercanas que incluyen: Base Prat, y King Eduard Point. Podrían estar bajo condiciones de tiempo similares.

CONCLUSIONES

1. Los resultados, muestran valores de perturbaciones de la altura en el orden de 40 cm a 1,5 m para King Eduard Point y 20 cm como máximo en la zona norte de la península antártica.
2. Que el estudio y visualización de perturbaciones de amplitudes menores, requieren de filtros matemáticos específicos.
3. El aumento del nivel del mar producto de los tsunamis en la región, no significaría un riesgo de inundaciones en la mayoría de nuestras bases, se desconoce, por falta de datos: los riesgos a los que se encuentra la Base Orcadas.

El efecto causado por estas variaciones de altura del nivel del mar ha desencadenado otros eventos de riesgo:

- a) Ruptura del campo de hielo y su desplazamiento tierra adentro.
 - b) Desplazamiento vertical de hielos flotantes, que en zonas costeras puede significar un riesgo para actividades en inmediaciones.
4. Se aprecia la duración de estos eventos sobre los registros mareográficos, en el orden de las 24 hs.

Del efecto causado por estas duraciones en el tiempo de la variación de la altura del nivel del mar, surge que:

- a) Las actividades de relevamiento hidrográfico pueden ser afectadas tanto en el trabajo de campo como en el proceso de edición de los datos obtenidos. Se recomienda el inicio de actividades de levantamiento 24 hs como mínimo luego de un evento sísmico de magnitud superior a 6 Mw en la región.

En caso de que los modelos de marea no contemplen estas perturbaciones y, considerando además que la incertidumbre que provocará la perturbación de 20 cm arrojará resultados poco confiables y no ajustados a las exigencias que las normas de la OHI dictan sobre la certidumbre de la información.

5. Las actividades que tienen estrecha relación con la costa y la actividad náutica podrían verse afectadas por estas perturbaciones, que según estudios se ha hallado el efecto que estas fuerzas tienen sobre el hielo marino y las barreras de hielo.
6. Las bases que arrojaron valores N/A posiblemente se ha debido a la presencia del campo de hielo que ha atenuado la perturbación ondulatoria del tsunami.
7. Que los desprendimientos de bloques de gran tamaño también representan causas de eventos sísmicos, y grandes variaciones del nivel del mar en proximidades.
8. Se recomienda la difusión de los efectos que las perturbaciones tienen sobre todo en el campo de hielo y la representación de alto riesgo que ello implica para las operaciones con embarcaciones menores en la región, si no se opera con precaución.
9. Que el campo de hielo representa una barrera natural ante las variaciones del nivel del mar, pero también una potencial fuente de riesgo ante su ruptura y desprendimiento.
10. Se recomienda la atención a las alertas de eventos sísmicos en la región, para la gestión del riesgo de las operaciones desde buques y en zonas costeras en la zona de estudio.

11. Que la falta de observaciones de altura de marea en bases propias, dificulta la obtención de los datos de nivel del mar en la región. No solo a los efectos del estudio de la sismicidad y sus efectos, sino también a los oceanográficos y sus aplicaciones.
12. La obtención de datos de marea de otros países dificulta la determinación de otros datos como:
 - a) Sistema de referencia vertical al cual está referido el mareógrafo.
 - b) Conocer pormenores de funcionamiento de/del equipo, que, a la hora de interpretar los datos, ayudan a su interpretación y procesamiento.
 - c) Se desconoce si los datos provistos a la plataforma de obtención de datos (IOC), han sido previamente procesados y si lo fuera, cuáles son sus métodos empleados y criterio para ello.
13. Que la falta de observaciones de altura de marea en la región, introduce demoras logísticas y operativas a la hora de realizar estudios vinculados al nivel del mar. Por ejemplo: levantamientos hidrográficos.
14. Que el campo de hielo y las condiciones de abrigo de las bases influyen en la instalación de mareógrafos en la región. Y es necesario el desarrollo de técnicas constructivas y emplazamiento que sea de alta resistencia a las condiciones extremas de la región.
15. Que la cooperación científica internacional de investigación y el desarrollo de este aspecto fue clave para la elaboración de este trabajo. Al obtener los datos en su mayoría, de fuentes extranjeras.

REFERENCIAS

- Amaya, A. J. M., (2021). La situación de la cartografía nacional en el Sector Antártico Argentino. Trabajo Final Integrador. Escuela de Guerra Naval.
- Arecco, M. A., et al., (2022) Análisis de Anomalías del Campo Geomagnético y de la Presión Atmosférica Vinculadas con Actividad Sísmica en las Placas Scotia y Sandwich.
- Arecco, M. A., Larocca P. A., Oreiro F. A., Fiore M. E., Otero L. A. and Canero M. F. (2023). Disturbances in the Geomagnetic Field, Water Level and Atmospheric Pressure associated with Mw> 6.6 earthquakes in the South Atlantic Ocean. Geofísica Internacional (unpublished).
- Catalán, P., Gubler, et al. (2020). Diseño e implementación operativa del sistema integrado de pronóstico de tsunamis y sistema de alerta en Chile (SIPAT), Revista de Ingeniería Costera.
- Dirección Nacional del Antártico, (2023). Renovación Base Antártica Petrel, Isla Dundee, Antártida Evaluación Ambiental Global (EMG). Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto.
- Dirección Nacional del Antártico. Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto. Evaluación Inicial Ambiental Obras de Reparaciones y Mantenimiento - Campaña Antártica de Verano e Invierno 2021-2022. Programa de Gestión Ambiental y Turismo (2021).
- Donohue, K.A., et al., (2016). Transporte medio de la corriente circumpolar antártica medido en el Pasaje de Drake, Geophys.
- Dragani, W. C., D'Onofrio E. E., Grismeyer, W., Fiore, M., Violante, R. A., Rovere, E., (2008). Vulnerabilidad de la costa atlántica patagónica a tsunamis generados por sismos submarinos ubicados en la región del Arco de Scotia. Algunos experimentos numéricos.
- Fracaro, D. A. (2023). Trabajo Final Integrador. Operaciones Navales de Avisos Clase Neftegaz en el Continente Antártico. Escuela de Ciencias del Mar.
- Frey, D. I., Piola, A. R. y Morozov, E. G. (2003). Investigación en aguas profundas, parte I: Documentos de investigación oceanográfica. Convergencia de las ramas de la Corriente de Malvinas cerca de los 44°S.
- Giner - Robles et al., (2003). A kinematic model of the Scotia Plate (SW Atlantic Ocean). Journal of South American Earth Sciences 16(4):179-191. DOI:10.1016/S0895-9811(03)00064-6
- Gordon, R. G., et al., (1988). Current Plate Motions, Eos D'ansactions. American Geophysical Union, N° 69.
- Jia, Z., Zhan, Z., Kanamori H., (2022). El terremoto de magnitud 8,2 de 2021 en la Isla Sándwich Sur: un evento lento e intercalado entre rupturas regulares.
- Kaminuma, k. (1995), "Sismicidad alrededor de la península Antártica". Polar Geoscience, Vol. 8, págs. 35-42.
- Kaminuma, K., (2000). Una reevaluación de la sismicidad en la Antártida, Polar Geoscience, vol. 13, págs. 145-146.
- Kanao, M. (2014). Seismicity in the Antarctic Continent and Surrounding Ocean. Open Journal of Earthquake Research, 3, 5-14.
- Kanao, M., K. Kaminuma, (2006). Actividad sísmica asociada con cambios ambientales superficiales del sistema terrestre, alrededor de la estación Syowa, Antártida oriental, en: DK Futterer, et al., Eds., Antártida: Contribuciones a las ciencias de la Tierra globales, Springer-Verlag, Berlín, Heidelberg, Nueva York, 2006, págs. 361-368.

- Kanao, M. (2017). Statistics of Seismic Tremors with Harmonic Overtones Recorded at Syowa Station, Antarctica: October 2014-March 2015. *International Journal of Geosciences*, 8, 811-820. doi: 10.4236/ijg.2017.86046.
- Maldonado et al., (2014). The global relevance of the Scotia Arc: An introduction.
- Medina, R. A., Dragani, W.C., Violante, R. A., (2018). *Revista Digital* N° 65. CONICET.
- Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto. <https://cancilleria.gob.ar/es>
- Mora, M. C., (2023). Modelado Gravimétrico para la Caracterización de Fallas al SE de las Islas Malvinas. Postgrado de Especialización en Ingeniería Geodesta-Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires.
- Plasencia Linares, M.P., et al., (2021). The Antarctic Seismographic Argentinean Italian Network (ASAIN): Recording Earthquakes in the Scotia Sea Region.
- Portal Oficial del Estado Argentino. <https://www.argentina.gob.ar/>
- Rabinovich, A. B. (2010). Seiches and harbor oscillations. *Handbook of coastal and ocean engineering* (pp. 193–236).
- Repositorio Institucional (SEGEMAR). <https://repositorio.segemar.gov.ar/>
- Sea level station monitoring facility. (s/f). <https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>
- Secretaría del Tratado Antártico. <https://www.ats.ag/s/antarctictreaty.html>
- Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). <https://www.argentina.gob.ar/economia/segemar>
- Servicio Meteorológico Nacional. <https://www.argentina.gob.ar/smn>
- Shirshov, P., (2009). *Revista Ciencia Ambiental*, Seiches y Oscilaciones del Puerto.
- Yamin, M.G., Anselmi G., (2020). Geología de las placas Scotia y Sandwich. Revisión y mapa geológico. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas - Geología N° 8, 29 pp.