



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**EVALUACIÓN DE LAS MEDICIONES SIMULTÁNEAS DE VIENTO Y
OLEAJE DE LA MISIÓN SATELITAL CFOSAT EN LA REGIÓN DEL
PACÍFICO SUDESTE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

ALEXANDRA NINOSKA FUENZALIDA ARTIGAS

PROFESOR GUÍA:
ORLANDO ASTUDILLO REYNOSO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JOSÉ RUTLLANT COSTA
RENÉ GARREAUD SALAZAR
CATALINA AGUIRRE GALAZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN FONDECYT 11190999
PROYECTO DE FORTALECIMIENTO DE CENTROS REGIONALES “CLAP”, CEAZA

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL GRADO DE MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA
Y CLIMATOLOGÍA
POR: ALEXANDRA NINOSKA FUENZALIDA ARTIGAS
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: ORLANDO ASTUDILLO REYNOSO

EVALUACIÓN DE LAS MEDICIONES SIMULTÁNEAS DE VIENTO Y OLEAJE DE LA MISIÓN SATELITAL CFOSAT EN LA REGIÓN DEL PACÍFICO SUDESTE

La circulación atmosférica a lo largo de gran parte de la costa oeste de América del Sur está controlada por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste, que favorece la surgencia costera y, así, el enfriamiento de la superficie del océano a través de la dinámica de Ekman. Dentro de esta región, se observa un área cerrada de máxima velocidad del viento entre las latitudes 26°S y 36°S (aprox. Chañaral y Cobquecura, respectivamente) asociada con el desarrollo de una corriente en chorro de bajo nivel (*Low Level Jet* o LLJ por su sigla en inglés) durante todo el año, favorable a la surgencia. Los máximos de viento en Chañaral ocurren en invierno-primavera y en Cobquecura en verano. Inmersos en esta estructura de LLJ, existen incluso máximos locales de viento muy cerca de la costa, denominados chorros costeros de bajo nivel (*Coastal Low Level Jets* o CLLJs por su sigla en inglés). Estos CLLJs ocurren frente a bahías abiertas al noroeste y cerradas al oeste-suroeste por prominencias de la línea costera, como Punta Lengua de Vaca y Punta Lavapié. La alta variabilidad espacio-temporal de estos *jets* refleja complejas interacciones océano-atmósfera-tierra. A la variabilidad del estado de la superficie del mar (oleaje) contribuyen tanto la circulación atmosférica local (*wind sea*) como la remota (*swell*). Sin embargo, la escasez de mediciones *in-situ* dificulta analizar correctamente la circulación atmosférica local-regional en superficie y su acción sobre el oleaje. Adicionalmente, existen diversos estudios que proyectan alteraciones en esta dinámica, tanto para la circulación atmosférica de gran escala como para las regionales, como resultado del cambio climático antropogénico.

El principal objetivo de este trabajo es caracterizar la dinámica entre el océano, la atmósfera y el continente. Es decir, documentar la comprensión de la circulación atmosférica superficial, tanto en mar abierto como a lo largo de la costa de Chile, simultáneamente con la respuesta del oleaje asociado, por medio de observaciones proporcionadas por *China-France Oceanography SATellite* (CFOSAT). Estas observaciones se comparan con salidas de modelos numéricos de viento (ERA5) y oleaje (CMEMS), obteniéndose coeficientes de correlación lineal de 91,18 % y 99,25 %, respectivamente. Las observaciones de viento se validan con datos de la misión satelital *Advanced SCATterometer* (ASCAT), lo que permitió identificar eventos de viento intenso del sur asociados con chorros costeros, cuyas velocidades medias excedieron los 5 m/s. Como resultado, se valida CFOSAT como una herramienta útil para contribuir con datos, por ejemplo, aportando en la toma de decisiones como cierres de puerto por eventos intensos de oleaje y viento.

Palabras clave: misión satelital CFOSAT, *Low Level Jet*, eventos intensos de viento y oleaje, mar de fondo, mar de viento.

*A mis bichitos, por
su infaltable compañía ♡*

Fentxen mañüm

Agradecimientos

Comienzo por mi *malle* (tío) **Roberto**: un 23 de febrero (su cumpleaños) entregué mi borrador, fue como un empujoncito desde donde esté. Estoy infinitamente agradecida de *tañi pichi isike* (mis bichitos) en mis distintos periodos de vida: **Minnie, Muñeka, Catitos, Chefsito, Princesa y Fritanga**, su infaltable compañía me ayudó a seguir adelante. *Nũke ka chaw* (mamá y papá), **Sandra y Juan Carlos**, han entregado todo de ustedes para que estudie, desde conseguirme profs. particulares en el colegio y liceo (aunque estuviesen cortos de plata), pagarme un preu, cuidarme en casa, levantarnos tempranísimo y dormirnos tarde, acompañarme en la micro, hacer lo imposible para postular por SIPEE y alentarme para mantenerme firme en la U. Impagable lo que han hecho por mí. Agradezco a **UCVE-FCFM**, me ayudaron a seguir adelante con las tutorías FCFM y darme una gran mano para no rendirme, sin importar las barreras. A **Cris** que me sacó del horrible hoyo en el que estuve el 2018. A **Gladys**, mi hermana perdida jaja por todas las conversaciones, escucharme y animarme como sea. Al **DGF**: a las generaciones anteriores (Dani Calle, Andreita, Tati, Migue, Tavito, David, Dani Montecinos, Jose, Ariel, Kaly...) y a sus funcionari@s (Pato, Álvaro, Marce, Elvira, Fco. y Berta) por recibirme. A los buenos compañeros que conocí: Tomy, Lucas, Álvaro, Nico risitas, Charlie, Camilo, Panchisca, por los buenos momentos que viví en la Pecera (mientras se pudo jaja) y Terraza. Especialmente a **Tomy**, eres un pilar fundamental para mí, casi mi hermano mayor por tus consejos. **Alvy** (sí, con Y)... No hay cartitas que expresen todo lo que agradezco por ser mi compañero y estar cuando más lo necesito. A **Handball Beauchef**, principalmente a mi entrenador Seba y a mis 1ras Capitanas (Luli-Coi y Pali), su enorme paciencia me impulsó a ser mejor handbolista y persona. Aprendí la perseverancia: luego de muchos años sí se pueden ver frutos. A Belén L. por tu pasión por el deporte y a Isa por acompañarme en un momento difícil. No alcanzo a mencionarlas a todas, pero gracias a uds. aprendí el compañerismo y que el equipo es primero, sin importar nuestras diferencias. Las quiero un montón. A **CEUS Chile** por reafirmarme que mis principios sí puedo llevarlos a lo profesional: Isa, Pau, Javi L., Kevin, Talo, con la ONG me aventuré a generar cambios. A la **SPI** por la confianza y permitirme demostrar mis habilidades “blandas” dentro de un ambiente ingenieril, a pesar de mis notas “bajas” (Rosita, siempre le agradeceré por esto). Además, agradezco la guía y el apoyo incondicional de la prof. Claudia. Conocí a Felisa: me enseñó mapuzungun y reencontré una parte de mí. Finalmente, agradezco enormemente a mi **profesor guía, Orlando**, y **co-guía, Pepe**, por su paciencia y apoyo para terminar la tesis. Me encaminaron para cerrar este difícil proceso y notaban que me costaba. Supieron guiarme y creo que tod@ estudiante debiera tener profesores como uds. ... Ha sido una dura y larga travesía, pero siempre resiliente si algo no resultaba (echarme un ramo ⇒ hacer algo extracurricular jaja). Los momentos buenos/malos son aprendizajes para cerrar ciclos, aunque tarden un tiempo. Agradezco a tod@s que se han cruzado en mi camino, tanto a quienes ya no son parte de mi vida actual como a quienes llegaron para quedarse en mi corazón. **Fentxen mañũm – Aski churata – Mesi ampil – Agradecida ~**

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Región de estudio	1
1.2. Circulación atmosférica en Pacífico Sudeste	3
1.3. Dinámica de la surgencia costera en Pacífico Sudeste	5
1.4. Clima del oleaje en Pacífico Sudeste	5
1.5. Contribución del cambio climático frente a las interacciones océano-atmósfera-tierra	7
1.6. Modelos de referencia ERA5 y CMEMS	8
1.7. Misión satelital ASCAT	9
1.8. Misión satelital Sentinel-6A y Jason-3	10
1.9. Misión satelital CFOSAT	11
1.10. Reportes de Restricciones de la Armada de Chile	14
1.11. Red de estaciones de monitoreo de CEAZAMET	15
1.12. Motivación	16
2. Objetivos de la investigación	17
2.1. Objetivo general	17
2.2. Objetivos específicos	17
3. Metodología	18
3.1. Estructuración y exploración de observaciones CFOSAT	19
3.2. Validación de observaciones CFOSAT con otras mediciones satelitales y su respectiva evaluación y comparación con modelos de atmósfera y oleaje	21
3.3. Caracterización de los eventos de chorros costeros y su impacto en el oleaje	22
3.4. Estudio del impacto teórico por procesos de Ekman	24
3.5. Estimación de los parámetros de oleaje a partir de CFOSAT	26
4. Resultados, análisis y discusión	32
4.1. Exploración de datos	32
4.2. Validación, comparación y estadística	37
4.3. Modos de variabilidad en el régimen de circulación costera y oceánica en el Pacífico Sudeste	41
4.4. Dinámica de Ekman	61
4.5. Espectros de oleaje y eventos de cierre de puerto	74
5. Conclusiones	86
Bibliografía	88

Anexo	92
A. Figuras que no se incluyeron en el cuerpo de este informe	92
A.1. Modos de variabilidad en el régimen de circulación costera y oceánica en el Pacífico Sudeste	92
A.1.1. Anomalías Intra-Estacionales	92
A.1.2. Oscilación de Madden-Julian	93

Índice de Tablas

4.1.	Estadística asociada a los datos procesados de CFOSAT (periodo 2020-2022 entre 18°S–45° S y 70°O–90°O).	33
4.2.	Porcentaje de datos CFOSAT por trayectoria (periodo 2020-2022).	33
4.3.	Estadística de las mediciones de la ola de Sentinel-6A en $[m]$ con respecto a los datos CFOSAT.	39
4.4.	Estadística de las mediciones de la ola de Jason-3 en $[m]$ con respecto a los datos CFOSAT.	39
4.5.	Estadística de las mediciones del viento ASCAT en $[m/s]$ con respecto a los datos CFOSAT.	39
4.6.	Estadística del modelo de viento (ERA5) en $[m/s]$ con respecto a los datos CFOSAT.	40
4.7.	Estadística del modelo de ola (CMEMS) en $[m]$ con respecto a los datos CFOSAT.	40
4.8.	Coincidencia de reportes de cierre de puerto de la Armada, cercanos a 30°S (Chañaral: ~26,34°S Tongoy: ~30,26°S Algarrobo: ~33,37°S) en fechas identificadas como evento de viento intenso.	48
4.9.	Umrales aproximados de viento y oleaje que miden las trayectorias CFOSAT en cada evento de viento intenso.	52
4.10.	Decaimiento del viento frente a PLdV (30,24°S y 71,63°O).	64
4.11.	Cantidad de tasas de decaimiento positivas (TD+) y negativas (TD-), y sus promedios $[10^{-4} (m/s)/s]$ (Prom. + y Prom. -, respectivamente), frente a PLdV.	68
4.12.	Precipitación en PLdV (30,24°S y 71,63°O).	70
4.13.	Tipos de eventos a estudiar para los espectros de oleaje de CFOSAT con trayectoria 184, frente a Punta Lengua de Vaca (PLdV) y frente a Punta Lavapié (PLP).	75
4.14.	Coincidencia de reportes de cierre de puerto de la Armada, cercanos a 30°S (Chañaral: ~26,34°S Tongoy: ~30,26°S Algarrobo: ~33,37°S) y a 37°S (Constitución: ~35,33°S Coronel: ~36,99°S Lebu: ~37,61°S) cuando la contribución es por mar de fondo.	75
4.15.	Análoga a Tabla 4.14, pero cuando la contribución dominante de la ola es por mar de viento.	76
A.1.	Contabilización de EVI, según amplitud RMM (Amp).	94

Índice de Ilustraciones

1.1.	Esquema del sistema climático del Pacífico Sudeste, obtenido de Mechoso et al. (2014)	2
1.2.	(a) Promedio primavera-verano (septiembre a febrero) de la presión del nivel del mar (contornos cada 2 <i>hPa</i>) y vectores de viento de 10 <i>m</i> (flechas) frente a la costa chilena, a partir de los datos de reanálisis NCEP-NCAR. (b) Promedio primavera-verano (sep-feb) de la velocidad del viento superficial (color en m/s), derivada de 4 años de observaciones con QuikSCAT. (c) Climatología primaveral (sep-nov) de la frecuencia de nubes bajas, derivada de imágenes GOES visibles (rosado es >80 %; azul es <30 %). Imagen obtenida de Garreaud et al. (2011)	4
1.3.	Frecuencias y periodos de los movimientos verticales de la superficie del océano. Imagen obtenida de Holthuijsen (2007)	7
1.4.	Ilustración del satélite CFOSAT con sus instrumentos SWIM y SCAT.	11
1.5.	Enmallado en el planeta que representa el recorrido completo de CFOSAT, de acuerdo al archivo de datos geográficos KML entregado por el centro de datos francés de misiones satelitales altimétricas AVISO+.	12
1.6.	Representación de la geometría de la antena SWIM del satélite CFOSAT, con sus respectivos ángulos de incidencia (0°: negro; 2°: rojo; 4°: verde; 6°: amarillo; 8°: cian; 10°: magenta) y sus rangos de medición. Imagen levemente corregida del manual simplificado del producto SWIM (AVISO+ Satellite Altimetry Data, 2020).	13
1.7.	Ejemplo del muestreo horizontal de los datos SWIM. Los puntos coloreados indican el centro de cada ángulo de incidencia de la antena, según la geometría del radar y seguidos de los datos del nivel L1A. Los recuadros sombreados azules son el área de las “celdas del producto” (cajas o <i>boxes</i> de medición), usados para generar los productos del nivel L2. Imagen y descripción extraídas del manual simplificado del producto SWIM (AVISO+ Satellite Altimetry Data, 2020).	13
1.8.	Captura de pantalla a la página 1 de uno de los Reportes de Restricciones de la Armada de Chile en Capitanía de Puerto Antofagasta para el año 2022.	15
3.1.	Demostración del método de partición espectral para una matriz plantilla con algunos puntos máximos intencionalmente ubicados. La flecha de cada número representa hacia dónde se encuentra su máximo local entre sus ocho valores vecinos (superior, inferior, izquierda, derecha y diagonales). Cuando las flechas se encuentran hacia un mismo máximo dentro de la grilla, se agrupan para formar una partición espectral. Imagen y explicación obtenidas de Hanson y Phillips (2001)	27

3.2.	Representación del espectro de la ola bidimensional a unidimensional, particularmente frente a la costa holandesa cuando un oleaje del norte por mar de fondo, generado por una tormenta frente a la costa de Noruega, se encuentra con un mar de viento del oeste formado localmente. Imagen obtenida de Holthuijsen (2007)	29
4.1.	Representación de las 27 <i>tracks</i> de CFOSAT que recorren la región de estudio.	34
4.2.	Variación zonal de una trayectoria en particular.	35
4.3.	Representación del porcentaje de datos por trayectoria durante el periodo de estudio.	35
4.4.	Viento promedio y SWH promedio por trayectoria durante el periodo de estudio para representar la variabilidad latitudinal.	37
4.5.	Validación de los datos de altura significativa de ola (SWH su sigla en inglés) entre CFOSAT y otras misiones satelitales: Sentinel-6A (izquierda) y Jason-3 (derecha), entre los años 2021 y 2022 en todo el dominio espacial de estudio. Las rectas magenta representan el ajuste lineal de la dispersión de datos.	38
4.6.	Validación de los datos de magnitud de viento entre CFOSAT y ASCAT, entre los años 2021 y 2022 en todo el dominio espacial de estudio. La recta magenta representa el ajuste lineal de la dispersión de datos.	38
4.7.	Diagramas de dispersión entre CFOSAT y modelos: ERA5 y CMEMS, respectivamente. (Izquierda) Datos de viento. (Derecha) Datos de SWH.	40
4.8.	Modos de variabilidad normalizados para la magnitud del viento, a partir de los datos ASCAT y ERA5, en escala adimensional. El primer modo (EOF1) captura un 47 % de la varianza, mientras que el segundo modo (EOF2) lo hace en un 24 %. La utilidad de estos mapas es para identificar la región del LLJ frente a las costas de Chile.	41
4.9.	Modos de variabilidad normalizados para el viento meridional, en escala adimensional. El primer modo (EOF1) captura un 59 % de la varianza, mientras que el segundo modo (EOF2) lo hace en un 21 %.	42
4.10.	Modo de variabilidad 1 para el viento meridional, seleccionando sólo la región de interés para mostrar el patrón espacial de la varianza del chorro explicada por este modo.	42
4.11.	(Izquierda) Mapa de la desviación estándar “climatológica” de la magnitud del viento, con datos ASCAT entre los años 2008 y 2022. (Centro y derecha) Los recuadros pequeños corresponden exclusivamente a los meses estacionales dentro del periodo de años mencionados, es decir, Nov-Ene para verano, Feb-Abr otoño, May-Jul invierno y Ago-Oct primavera.	43
4.12.	Análoga a la Figura 4.11, pero seleccionando sólo la región de interés para establecer el criterio 2.	43
4.13.	Series temporales de la primera componente principal (PC1) de los datos de la magnitud del viento de ASCAT. El primer perfil representa el PC1 desde el 2008 hasta el 2021. El segundo corresponde al periodo de tiempo ASCAT coincidente con los datos de CFOSAT (desde 2020 hasta 2022) con las fechas que se consideran como eventos de viento intenso (EVI) destacadas con puntos azules (superan el cuartil 75 % (Q) del PC1).	44

4.14.	Series temporales de la magnitud del viento en el centro del EOF1, señalando las fechas EVI en el periodo CFOSAT que cumplan con superar el cuartil 75 % del PC1 (criterio 1). Los puntos verdes muestran los casos en que la magnitud del viento excede un umbral definido (criterio 2).	44
4.15.	Análoga a Figura 4.13, pero con datos del viento meridional ASCAT.	45
4.16.	Análoga a Figura 4.14, pero con datos del viento meridional ASCAT.	45
4.17.	Representación de la ocurrencia de eventos de viento intenso que superan el cuartil 75 % entre los años 2020 y 2022, según el PC1 para la magnitud del viento y el viento meridional. A modo de ejemplo: en el caso del viento meridional, hay 1 sólo evento de viento intenso que duró 7 días y hubo 36 eventos de 2 días de duración.	46
4.18.	Primera fila: Condición del viento en promedio en la región de estudio para las fechas de EVI a 30°S, con datos de ERA5 con CFOSAT. Segunda fila: Análoga a la primera fila, pero para la SWH con datos de CMEMS con CFOSAT. Los perfiles rojo, verde, morado y magenta indican las trayectorias (184, 154, 154 y 336, respectivamente) sobre los mapas con sus fechas de pasada correspondientes sobre la región. Tercera fila: Observaciones de CFOSAT a lo largo de las latitudes de cada trayectoria. Las líneas segmentadas representan los resultados del modelo de viento. Cuarta fila: Análoga a la tercera fila, pero con datos de SWH.	50
4.19.	Análoga a Figura 4.18, pero sólo con datos de viento ASCAT con ERA5.	51
4.20.	Mediciones del dispersómetro SCAT de CFOSAT del Evento 1. Izquierda: Paso del satélite, los colores indican la fecha y hora UTC de pasada del satélite frente a Chile. Derecha: Perfiles de viento que permiten evaluar la actividad del chorro y la magnitud del viento de norte a sur. Los perfiles superiores (<i>tracks</i> descendentes, de norte a sur) son la medición comparativa del viento a lo largo de la costa de Chile (<i>track</i> 184) y en océano abierto (<i>track</i> 154). Los perfiles inferiores (<i>tracks</i> ascendentes, de sur a norte) representan la medición de la caída del viento al aproximarse la costa, particularmente las trayectorias 49 y 79.	54
4.21.	Análoga a Figura 4.20, pero para la SWH.	54
4.22.	Análoga a Figura 4.20, pero para el Evento 2.	55
4.23.	Análoga a Figura 4.22, pero para la SWH (no hay datos de modelo, pues su disponibilidad es a partir del año 2021).	55
4.24.	Análoga a Figura 4.20, pero para el Evento 3.	56
4.25.	Análoga a Figura 4.24, pero para la SWH.	56
4.26.	Análoga a Figura 4.20, pero para el Evento 4.	57
4.27.	Análoga a Figura 4.26, pero para la SWH.	57
4.28.	Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 1: 25/05/2022).	58
4.29.	Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 2: 26/05/2022).	58
4.30.	Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 3: 27/05/2022).	59
4.31.	Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 4: 28/05/2022).	59
4.32.	Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 5: 29/05/2022).	60

4.33.	Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 6: 30/05/2022).	60
4.34.	Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 7: 31/05/2022).	61
4.35.	Perfiles de las mediciones de viento ASCAT en distintas localidades costeras. Se enmarca el evento de viento intenso de 7 días de duración (Evento 1: 25/05/2022 – 31/05/2022).	62
4.36.	Análisis del transporte de masas de agua producto del viento, en la localidad de Tongoy.	63
4.37.	Comparativa de la magnitud del viento local (CEAZAMET) y a ~ 100 km de la costa (CFOSAT), frente a Punta Lengua de Vaca, en las fechas 26 de mayo de 2022 (izquierda) y 30 de mayo de 2022 (derecha). Paneles superiores: Perfiles del viento de CFOSAT (puntos) y CEAZAMET (asteriscos). Paneles inferiores: Acercamiento al perfil de viento de CFOSAT de los paneles superiores, debido a sus mediciones finas.	64
4.38.	Izquierda: Paso del satélite del evento de 7 días, los colores indican la fecha y hora UTC de pasada de CFOSAT frente a Chile. Derecha: Comparativa de sólo el promedio de la magnitud del viento local y a ~ 100 km de la costa, frente a Punta Lengua de Vaca, en las fechas 26 de mayo de 2022 (calipso) y 30 de mayo de 2022 (naranja). Los puntos son las mediciones CFOSAT, mientras que los asteriscos son de CEAZAMET.	65
4.39.	Comparativa de la magnitud del viento promedio local (CEAZAMET) y a ~ 100 km de la costa (CFOSAT: panel superior con la trayectoria 79 e inferior con la 184), frente a Punta Lengua de Vaca, durante todo el periodo de estudio.	66
4.40.	Perfiles del índice de decaimiento del viento entre las trayectorias de CFOSAT y las mediciones de Punta Lengua de Vaca de CEAZAMET, durante todo el periodo de estudio.	67
4.41.	Perfiles de la tasa de decaimiento del viento entre las trayectorias de CFOSAT y las mediciones de Punta Lengua de Vaca de CEAZAMET, durante todo el periodo de estudio.	67
4.42.	Perfiles del promedio diario de la dinámica de Ekman con datos de ERA5 en la región de estudio, específicamente en 30° S. Panel superior: Transporte y bombeo de Ekman. Panel inferior: Transporte total de la dinámica de Ekman.	69
4.43.	Condición del viento superficial en la región de estudio durante algunos días de precipitación en Punta Lengua de Vaca.	70
4.44.	Decaimiento del viento de las trayectorias 49, 79 y 109 (de izquierda a derecha, respectivamente). Paneles superiores: Promedio longitudinal del viento a lo largo de cada trayectoria, entre los años 2020 y 2022. Paneles inferiores: Promedio longitudinal de la desviación estándar del viento a lo largo de cada trayectoria, entre los años 2020 y 2022.	72
4.45.	Análoga a Figura 4.44, pero de las trayectorias 231, 261 y 291.	72
4.46.	Promedio longitudinal del viento a lo largo de las trayectorias 291, 79 y 261, entre los años 2020 y 2022.	73
4.47.	Perfiles del decaimiento del viento de las trayectorias de interés, en una extensión longitudinal de ~ 100 km. La línea continua representa el viento promedio de todas las pasadas de una misma trayectoria, mientras que las líneas segmentadas son su desviación estándar.	73

4.48.	Comparativa de la altura significativa de la ola frente a Punta Lengua de Vaca ($\sim 30^{\circ}\text{S}$). En el gráfico de barras, la SWH de CFOSAT es la barra verde, mientras que las SWH de ERA5 son la morada para la SWH combinada, la azul para la SWH por <i>swell</i> y la fucsia para la SWH por <i>wind sea</i> . Los perfiles representan los espectros de energía (<i>Energy</i>) del oleaje, con respecto al número de onda (<i>Wave number</i>), a partir de las mediciones CFOSAT para las fechas seleccionadas. Estos perfiles de energía son obtenidos con las rutinas de Python entregadas por AVISO+, las cuales son adaptadas para la presente tesis, pero se mantiene el idioma por defecto.	78
4.49.	Análoga a Figura 4.48, pero frente a Punta Lavapié ($\sim 37^{\circ}\text{S}$).	78
4.50.	Condición del viento superficial en la región de estudio cuando la SWH es máxima en la trayectoria 184 de las determinadas fechas. Paneles superiores: Frente a Punta Lengua de Vaca. Paneles inferiores: Frente a Punta Lavapié.	80
4.51.	Espectros direccionales bidimensionales y particiones (<i>Partition</i>) dominantes de dirección, longitud de onda y SWH para cada fecha cuando la contribución dominante es por <i>swell</i> frente a Punta Lengua de Vaca ($\sim 30^{\circ}\text{S}$ en <i>box</i> 162) con la trayectoria 184.	82
4.52.	Longitudes de onda (<i>Wavelength</i>) y direcciones dominantes del espectro de oleaje cuando la contribución es por <i>swell</i> frente a Punta Lengua de Vaca ($\sim 30^{\circ}\text{S}$; punto rojo en <i>box</i> 162) con la trayectoria 184, con una precisión del 10 % y 15°, respectivamente.	82
4.53.	Análoga a la Figura 4.51 cuando la contribución es por <i>swell</i> , pero frente a Punta Lavapié ($\sim 37^{\circ}\text{S}$, en <i>box</i> 172) con la trayectoria 184.	83
4.54.	Análoga a la Figura 4.52 cuando la contribución es por <i>swell</i> , pero frente a Punta Lavapié ($\sim 37^{\circ}\text{S}$; punto rojo en <i>box</i> 172) con la trayectoria 184.	83
4.55.	Análoga a la Figura 4.51, pero cuando la contribución es por <i>wind sea</i> frente a Punta Lengua de Vaca ($\sim 30^{\circ}\text{S}$) con la trayectoria 184.	84
4.56.	Análoga a la Figura 4.52, pero cuando la contribución es por <i>wind sea</i> frente a Punta Lengua de Vaca ($\sim 30^{\circ}\text{S}$) con la trayectoria 184.	84
4.57.	Análoga a la Figura 4.51, pero cuando la contribución es por <i>wind sea</i> frente a Punta Lavapié ($\sim 37^{\circ}\text{S}$) con la trayectoria 184.	85
4.58.	Análoga a Figura 4.52, pero cuando la contribución es por <i>wind sea</i> frente a Punta Lavapié ($\sim 37^{\circ}\text{S}$) con la trayectoria 184.	85
A.1.	Modos de variabilidad normalizados para la magnitud del viento, por estación del año, en escala adimensional. En promedio, el primer modo (EOF1) captura un 47,75 % de la varianza, mientras que el segundo modo (EOF2) lo hace en un 23,75 %.	92
A.2.	Modos de variabilidad normalizados para el viento meridional, por estación del año, en escala adimensional. En promedio, el primer modo (EOF1) captura un 58,75 % de la varianza, mientras que el segundo modo (EOF2) lo hace en un 21,25 %.	93
A.3.	Ocurrencia de cada fase RMM durante los días de eventos de viento intenso encontrados con el criterio 1 durante el periodo de estudio. Izquierda: Magnitud del viento. Derecha: Viento meridional. Por ejemplo, hubo 49 días EVI en la fase 4 del RMM, según la magnitud del viento, y hubo 18 días EVI en la fase 8 del RMM, según el viento meridional.	93

A.4.	Diagrama de fase RMM de los eventos de viento intenso en el periodo de estudio. Izquierda: Magnitud del viento. Derecha: Viento meridional.	94
A.5.	Análoga a Figura A.3, pero por estación del año durante el periodo de estudio.	94

Capítulo 1

Introducción

La presente tesis se organiza como sigue. En la Introducción se presentan la región de estudio, la circulación atmosférica en Pacífico Sudeste, la dinámica de la surgencia costera en Pacífico Sudeste, el clima del oleaje en Pacífico Sudeste, la contribución del cambio climático antropogénico frente a las interacciones océano-atmósfera-tierra, los modelos de referencia ERA5 y CMEMS, las misiones satelitales ASCAT, Sentinel-6A, Jason-3 y CFOSAT, los Reportes de Restricciones de la Armada de Chile, la red de estaciones de monitoreo de CEAZAMET y la motivación del trabajo a partir de las subsecciones anteriormente mencionadas. En la sección Objetivos, se enuncian tanto el objetivo general del trabajo como los objetivos específicos. En Metodología se presentan los pasos que se siguieron para obtener los resultados de este trabajo, particularmente, la estructuración de datos CFOSAT, validación con otras observaciones, evaluación y comparación de las mediciones CFOSAT con modelos y estudio del impacto teórico por procesos de surgencia de Ekman, caracterización de los eventos de chorros costeros y ejemplos de algunos espectros de oleaje a partir de CFOSAT. En Resultados se expone la revisión y el análisis de los resultados obtenidos. En Conclusiones se sintetiza lo discutido para formular el cierre de la tesis. Finalmente, en Anexos se muestran algunas figuras no presentadas en el cuerpo del informe.

Cabe destacar que este trabajo se enmarca en el proyecto de investigación FONDECYT 11190999, *Coupling between the ocean-atmosphere-land system off Central Chile: the non-linear response of the upwelling dynamics to coastal wind patterns*, del profesor Orlando Astudillo Reynoso y en el proyecto de fortalecimiento de centros regionales *Climate Action Planning* (CLAP) del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA).

1.1. Región de estudio

La región de interés se ubica en el Pacífico Sudeste, entre las latitudes 18°S y 45°S y longitudes 90°O y 70°O, focalizándose frente a las costas de Chile Central aproximadamente (30°S y 37°S). Dicha zona se caracteriza por la interacción existente entre el océano, la atmósfera y el continente. A nivel troposférico, una de estas interacciones está asociada con la influencia de las perturbaciones en el flujo de los oestes de latitudes medias. Estas producen ondas (vaguadas y dorsales) que se propagan de oeste a este, lo que imprime un sello característico en el clima de Chile central (e.g. bajas costeras, episodios de lluvia invernal) ([Garreaud y Rutllant, 2003](#)). Una de estas manifestaciones da origen a la ocurrencia periódica de eventos de corrientes en chorro costeras (*Coastal Low Level Jets*: CLLJs por sus siglas en inglés).

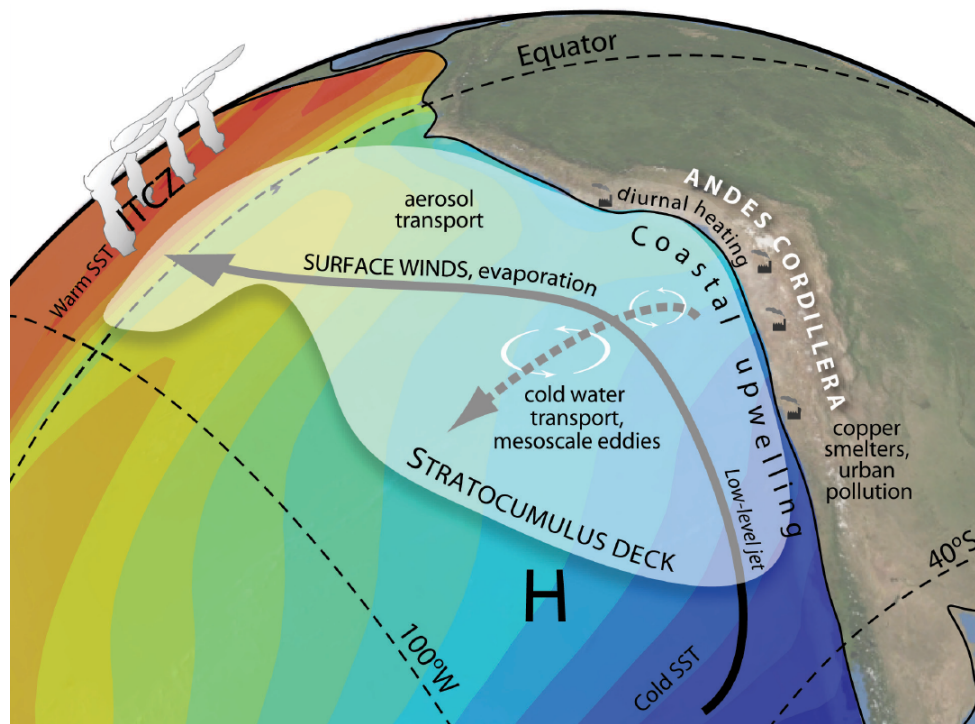


Figura 1.1: Esquema del sistema climático del Pacífico Sudeste, obtenido de [Mechoso et al. \(2014\)](#).

De la Figura 1.1 se puede destacar lo siguiente:

- A nivel superficial y cerca de la costa, la interacción océano-atmósfera-tierra ocurre en relación a que el Pacífico Sudeste alberga el más importante sistema de surgencia costera de borde oriental a nivel global (i.e. Perú-Chile *Eastern Boundary Upwelling System* (EBUS), conocido también como Sistema de Surgencia de Perú-Chile (*Peru-Chile Upwelling System*, PCUS por su sigla en inglés). Aquí domina la corriente superficial fría de Humboldt (parte del complejo sistema de Humboldt) que fluye de sur a norte en respuesta a la rama norte de la deriva de los oestes en latitudes medias y a los vientos asociados con el margen oriental del anticiclón subtropical del Pacífico Sudeste ([Astudillo et al., 2017](#)).
- La surgencia es el proceso de ascenso de aguas frías por vientos paralelos a la costa que se dirigen hacia el ecuador a través del transporte y bombeo de Ekman ([Renault et al., 2012](#)). Esto en respuesta a la acción permanente del Anticiclón del Pacífico Sudeste, confinado en esta región por la presencia de la Cordillera de Los Andes al Este ([Mechoso et al., 2014](#)).
- Las aguas surgentes son ricas en nutrientes, los que en presencia de la luz solar promueven el desarrollo de fitoplancton, primer eslabón en la cadena trófica que da origen a la gran abundancia de pesca en el PCUS ([Aguirre, Garreaud, et al., 2021](#)).
- Además, la variabilidad estacional y sinóptica de estos patrones de viento, asociados al anticiclón subtropical a escala regional y local en el Pacífico Sudeste, inciden sobre

el estado del mar y los patrones de oleaje. Lo anterior, modula la influencia del oleaje remoto o *swell* que se propaga por la acción del viento desde el cinturón de tormentas extratropicales (40°S a 60°S) hacia el ecuador (Aguirre et al., 2017).

- Estas características atmosféricas y oceanográficas de la circulación son la base de interacciones entre el océano y la atmósfera, así como la formación de estratocúmulos en esta región (Mechoso et al., 2014). Y también el contraste térmico océano-continente particularmente activo frente a zonas de surgencia (e.g. Bahía de Tongoy: ref. Garreaud et al. (2011) y Rahn, Garreaud, y Rutllant (2011)).

Dada la complejidad y variabilidad de la interacción océano-atmósfera-continente en la región del Pacífico Sudeste frente a Chile Central, caracterizada por la presencia de corrientes en chorro costeras de baja altura (e.g. CLLJ) por su impacto en la surgencia costera y en la productividad del ecosistema marino, sumado a las proyecciones de cambio climático y sus impactos en la circulación atmosférica regional, la disponibilidad de observaciones para su estudio resulta crítica. De hecho, la falta de mediciones cercanas a la costa dificulta el correcto análisis de la circulación atmosférica y su accionar sobre el oleaje. Por ello, la región de estudio de este trabajo es escogida en referencia al artículo “VOCALS-CUpEx: the Chilean Upwelling Experiment” (Garreaud et al. (2011), Rahn et al. (2011)), es decir, la zona que exhibe la presencia característica de LLJ y CLLJ. La ampliación del área de estudio tiene como propósito abarcar mayor espacio geográfico para la evaluación y validación de datos de la misión *China-France Oceanography Satellite*, cuyo acrónimo es CFOSAT.

1.2. Circulación atmosférica en Pacífico Sudeste

Una característica de la circulación atmosférica en el borde oriental del Pacífico Sudeste es la ocurrencia periódica de eventos de intensificación del viento prevalente en superficie proveniente del sur, asociado a la circulación en torno al borde oriental del Anticiclón Subtropical. Estos eventos, que en promedio pueden superar los 5 *m/s* (equivalente a 18 *km/h*), constituyen corrientes en chorro de bajo nivel o *Low Level Jets* (cuyo acrónimo en inglés es LLJs). Estas corrientes se extienden entre la superficie y el tope de la capa límite marina desde los 26°S a los 36°S (aprox. entre Chañaral y Cobquecura). Zonalmente abarcan unos 500 *km*, con un eje norte-sur ubicado a unos 150 *km* de la costa. Su influencia a escala regional se manifiesta en la dinámica de la capa límite marina. En superficie, fuerzan la circulación oceánica costera y la surgencia mediante la dinámica de Ekman, a lo largo de las costas de Chile y Perú. Estos eventos de LLJ tienen una duración entre 3-10 días con ocurrencia cuasi-semanal, los que se manifiestan preferentemente durante la primavera y el verano austral (Garreaud y Muñoz, 2005). Cabe recalcar que la generación de estos eventos responde al paso de anticiclones migratorios en el límite sur del dominio de estudio. Estos resultan del equilibrio entre el gradiente de presión a lo largo de la costa y la fricción turbulenta en la Capa Límite Marina (debido a la presencia de la topografía costera), lo que implica una fuerte modulación por la actividad de escala sinóptica en latitudes medias (Muñoz y Garreaud, 2005).

Superpuesto a este fenómeno, se observan máximos de viento local conocidos como *Coastal Low Level Jets* (CLLJ), que se manifiestan en puntos específicos a lo largo de la costa, a diferencia del LLJ que involucra una escala espacial mayor (tal como se presenta en (a) y (b) de la Figura 1.2). Por consiguiente, los CLLJ deben considerarse igualmente en la

interpretación de los mecanismos que fuerzan la surgencia a nivel local. Esto debido a su relación con la orografía y la línea de costa en localidades como Punta Choros, Punta Lengua de Vaca y Punta Lavapié, adyacentes a bahías que se orientan hacia el noroeste. Por ejemplo, en el caso de la bahía de Tongoy, se produce en las tardes una diferencia de temperatura entre el aire frío del mar y el aire cálido del continente, el cual es adveccionado desde las mesetas costeras hacia la bahía lo que implica una condición baroclínica sobre la bahía que favorece un refuerzo local de los vientos (Rahn y Garreaud, 2014). Además, contribuiría a la disipación temprana de las nubes costeras bajas (estratocúmulos) (Rutllant et al., 2013), tal como se visualiza en (c) de la Figura 1.2.

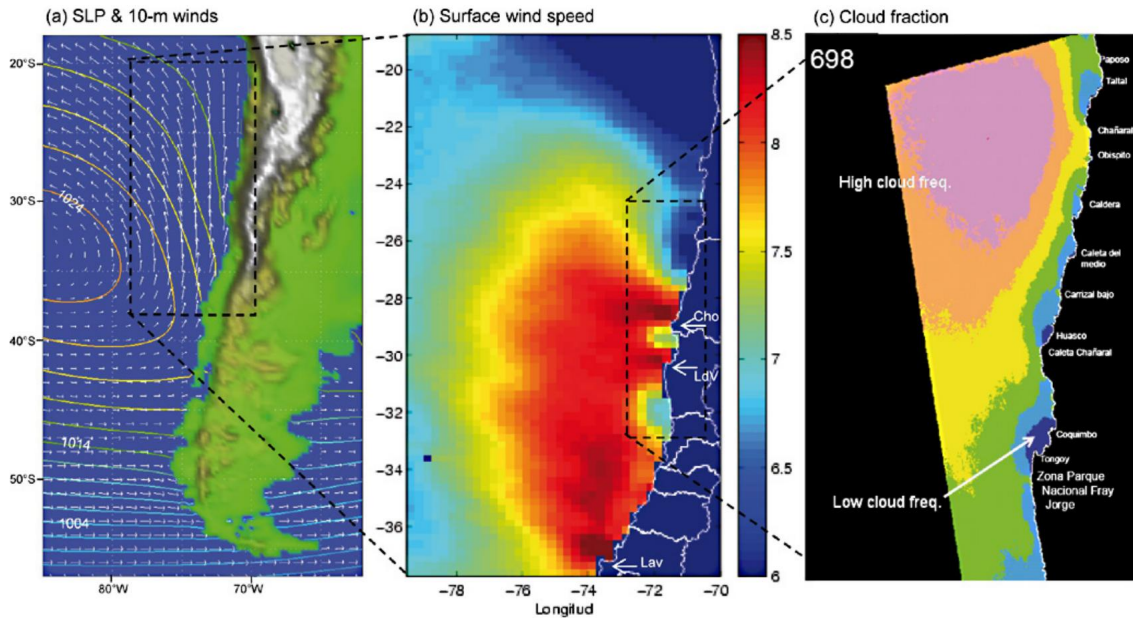


Figura 1.2: (a) Promedio primavera-verano (septiembre a febrero) de la presión del nivel del mar (contornos cada 2 hPa) y vectores de viento de 10 m (flechas) frente a la costa chilena, a partir de los datos de reanálisis NCEP-NCAR. (b) Promedio primavera-verano (sep-feb) de la velocidad del viento superficial (color en m/s), derivada de 4 años de observaciones con QuikSCAT. (c) Climatología primaveral (sep-nov) de la frecuencia de nubes bajas, derivada de imágenes GOES visibles (rosado es $>80\%$; azul es $<30\%$). Imagen obtenida de Garreaud et al. (2011).

De hecho, el experimento regional de surgencia “VOCALS-CUpEx” (del inglés *VAMOS Ocean-Cloud-Atmosphere-Land Study - Chilean Upwelling Experiment*) permitió describir la circulación atmosférica y la respuesta superficial oceánica a $30^{\circ}S$ frente a las costas de Chile Central, analizando la respuesta a eventos de intensificación, relajación e inversión del viento sur favorable a la surgencia mediante un amplio experimento observacional (Garreaud et al. (2011), Rahn et al. (2011)).

Además, la circulación atmosférica, controlada por el borde oriental del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (SPSA por su sigla en inglés), define un patrón dominante de viento en superficie que fluye hacia el ecuador a lo largo de la costa. Esto favorece la ocurrencia de surgencia costera y el consecuente enfriamiento de la temperatura superficial oceánica mediante procesos de Ekman (transporte y bombeo) (Bravo et al., 2016). Con respecto a la

variabilidad estacional, se destaca que hay “un aumento en el número días con vientos intensos del sur y en el número de eventos de CLLJ en la zona durante el invierno –austral–, a diferencia del verano que muestra una disminución en este número de días en latitudes bajas (29°S a 34°S) y un aumento entre 37°S y 44°S. En otoño, se observa un aumento en el número de días con vientos intensos del sur y de eventos CLLJ entre los 32°S y 39°S” (Aguirre, Flores-Aqueveque, et al., 2021). También, “durante el invierno, el SPSA migra hacia el norte, lo que permite el ingreso de ciclones de latitudes medias a la zona de estudio, provocando vientos del norte; mientras que en primavera y verano austral, el anticiclón migra hacia el sur, lo que favorece la surgencia y, así, la inclinación de las isotermas que se levantan hacia el este” (Aguirre, Garreaud, et al., 2021).

1.3. Dinámica de la surgencia costera en Pacífico Sudeste

En el Pacífico Sudeste, la respuesta oceánica a estos patrones de viento costero del sur se manifiesta a través de procesos del transporte y del bombeo de Ekman. El primero de éstos desplaza las aguas superficiales costa afuera, lo que, por continuidad, genera un flujo vertical de aguas profundas en la costa, las que son frías y ricas en nutrientes (surgencia costera). El segundo, responde a las variaciones espaciales del esfuerzo del viento sobre la superficie oceánica, activando una divergencia o convergencia en la capa superficial marina (Bravo et al., 2016).

Además, sobre el mar del Pacífico Sudeste frente a las costas de Chile, fluye la Corriente de Humboldt, la cual es una corriente oceánica fría y somera, cuya dirección es de sur a norte, impulsada por los vientos del flanco oriental del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (Wallace y Hobbs, 2006), contribuyendo así al enfriamiento de las aguas costeras (Oyarzún y Brierley, 2019).

En resumen, el transporte y bombeo de Ekman actúan sobre el campo de temperatura del mar y en la circulación oceánica. Esto modifica la estratificación de la columna de agua a lo largo de la costa mediante levantamiento de las isotermas, y acelera la corriente superficial costera, en particular la Corriente de Humboldt fluyendo hacia el ecuador (Astudillo et al., 2017).

1.4. Clima del oleaje en Pacífico Sudeste

El estudio de la dinámica oceánica per se y su acción recíproca con la atmósfera es fundamental para comprender los procesos que definen el estado del mar. Especialmente, en regiones costeras, donde estas interacciones tienen efectos no sólo físicos, sino que también biológicos y químicos, ya sea en ecosistemas marinos o en zonas costeras. En parte, es esencial analizar la física de cómo los diferentes tipos de olas, generadas de manera local o remota. Estos contribuyen al clima del oleaje en esta área y en su relación con otros factores como, por ejemplo, el viento y el cambio climático, para así comprender de mejor forma las implicaciones de estos sobre la costa chilena.

La climatología del oleaje en el Pacífico Sudeste se atribuye principalmente al paso de los ciclones extratropicales, cuya intensidad y recorrido varían debido al contraste estacional. Además, la dirección dominante de la ola en Chile es del oeste o suroeste, por lo que su altura significativa se verá influenciada por la presencia del chorro costero (Briceño de Urbaneja et al., 2023). De hecho, se reconoce que el promedio anual de la altura significativa de la ola (SWH por su sigla en inglés) refleja de manera evidente el patrón de la circulación superficial del viento en esta región (Aguirre et al., 2017).

En efecto, la variabilidad en el estado de la superficie del mar (i.e. oleaje) depende de las contribuciones de la circulación atmosférica local (mar de viento) y remota (mar de fondo). El mar de viento o *wind sea* corresponde a las olas “generadas por el viento local, son irregulares y de cresta corta” y de periodo cercano a los 5 segundos. El mar de fondo o *swell* corresponde a olas generadas remotamente y que se propagan “fuera de la zona de generación, son de aspecto regular, de cresta alta” y de periodos mayores a 10 segundos (Holthuijsen, 2007), tal como aparece en la Figura 1.3. Particularmente, en la zona de estudio, los eventos de viento intenso en la región costera del Chile Central fomentan a que el mar de viento responda al viento mismo en una porción comparable al efecto del mar de fondo (Aguirre, Flores-Aqueveque, et al., 2021).

Asimismo, la altura significativa de la ola cercana a la costa no varía significativamente a lo largo del ciclo anual, puesto que existe una compensación entre las contribuciones del mar de fondo y mar de viento. Esto significa que hay un incremento (reducción) del *swell* (*wind sea*) en el otoño y en el invierno austral y un aumento (disminución) del aporte del *wind sea* (*swell*) en la primavera y verano austral (Fig. 6b de Aguirre et al. (2017)). Por ende, hay una alternancia en la magnitud de la contribución de ambos forzantes del oleaje a lo largo del año.

Sin embargo, en las últimas dos décadas, se ha observado un aumento significativo en la magnitud del viento y SWH, incrementos que no siguen un patrón uniforme en el Pacífico Sudeste. Se sugiere que estas variaciones favorecen la recurrencia de eventos intensos, las cuales pueden producirse por una serie de factores, tales como: la influencia de corrientes oceánicas, alteraciones en la temperatura superficial del mar, fluctuaciones en los patrones de viento y contribución del cambio climático (Mediavilla et al., 2020). Este escenario se considera preocupante por sus implicancias en las comunidades costeras y la biodiversidad marina a lo largo de las costas chilenas como, por ejemplo, fuertes marejadas.

Por lo tanto, resulta crucial el estudio del océano y de la meteorología, tanto para la ciencia como para la planificación costera y gestión de riesgos en el contexto de cambio climático global. Esto se debe a la evidencia del aumento del nivel del mar (Montecino et al., 2017), lo cual impactaría significativamente en la erosión costera o inundaciones en la zona, ya sea por marejadas o por actividad antropogénica como la edificación, tal como ocurre en la Región de Valparaíso, Chile (Briceño de Urbaneja et al., 2023).

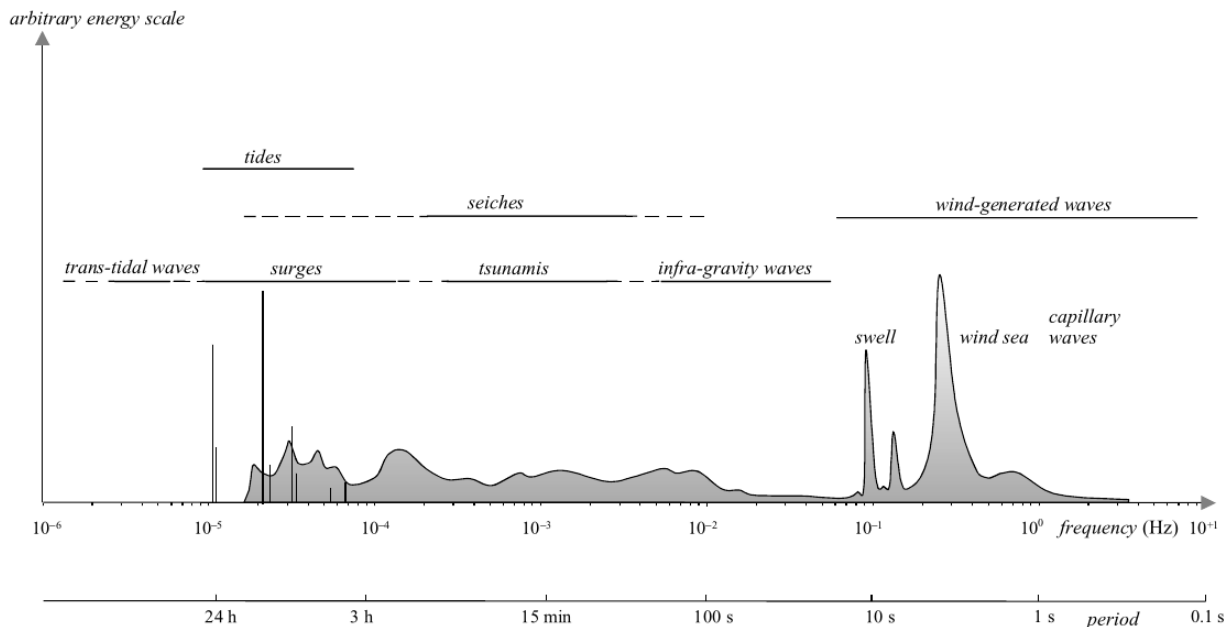


Figura 1.3: Frecuencias y periodos de los movimientos verticales de la superficie del océano. Imagen obtenida de [Holthuijsen \(2007\)](#).

1.5. Contribución del cambio climático frente a las interacciones océano-atmósfera-tierra

Se destaca que el forzamiento antropogénico podría ser uno de los responsables en la variabilidad decadal de las tendencias de la Presión al Nivel del Mar (PNM su sigla), al menos para la región de estudio. Esto se debe al “aumento de la PNM en el Pacífico Sudeste, con consecuencias para los vientos favorables (del sur) a la surgencia, la Temperatura Superficial del Mar (TSM) costera, la radiación solar, los nutrientes, la biomasa de fitoplancton y las concentraciones de oxígeno disuelto”. Si bien el rol de la Oscilación Decadal del Pacífico (conocida por su sigla en inglés como PDO) es forzar cambios en determinadas condiciones (atmosféricas y oceánicas, principalmente), “es posible que el cambio climático antropogénico también contribuya o amplifique estos cambios” ([Aguirre et al., 2018](#)).

Por una parte, el estudio de [Aguirre, Rojas, Garreaud, y Rahn \(2019\)](#), concluye que se esperan para fines de este siglo una migración hacia el polo, intensificación del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste y se proyecta un aumento en la frecuencia de generación de anticiclones migratorios en el margen sur del sistema de surgencia de Chile-Perú. También, estos últimos dos factores están directamente relacionados con los patrones de viento y oleaje regional de nuestra región de estudio, lo que refuerza la motivación del presente trabajo. Efectivamente, se proyecta que debido al cambio climático, los vientos del sur se fortalezcan y provoquen una mayor aridez en la región. Esto no solo indica un impacto en la dinámica océano-atmósfera-tierra, sino que también podría desencadenar una respuesta biogeoquímica ([Aguirre, Garreaud, et al., 2021](#)).

Por otra parte, la formación de una capa de nubes bajas (de tipo estratocúmulo, en condiciones de atmósfera estable) refleja la radiación solar y amplifica el enfriamiento de la zona, lo que permite mitigar el proceso de sobrecalentamiento global (Rutllant et al., 2013).

A pesar de que la duración de las mediciones CFOSAT es limitada, es esencial continuar con su recopilación para largo plazo, puesto que los efectos del cambio climático antropogénico ya se están manifestando de manera temprana en el Pacífico Sudeste (sobre todo en las costas chilenas), tal como el persistente déficit hídrico. Así, resulta imperioso secundar las actuales investigaciones proporcionando una base sólida para futuras políticas de adaptación, subrayando la urgencia de tomar medidas frente a esto (Winckler Grez et al., 2020). En consecuencia, resulta necesaria la calidad y precisión de mediciones –al menos de viento y oleaje– dados los cambios significativos en las condiciones oceánicas y atmosféricas. Se espera una intensificación de los vientos favorables a la surgencia en el sistema EBUS, debido al calentamiento global, aproximadamente a 15°S y entre las latitudes 30°S y 37°S (Goubanova et al., 2011).

1.6. Modelos de referencia ERA5 y CMEMS

ECMWF Reanalysis v5 (ERA5)¹ es la quinta generación de reanálisis del centro ECMWF², la cual incluye datos globales de la atmósfera, superficie terrestre y olas del mar a partir del año 1940 hasta el presente, de modo que ERA5 asimila datos de modelos con observaciones de todo el mundo.

Dado que los datos de CFOSAT no son asimilados en este reanálisis (Hersbach et al., 2020), se puede utilizar ERA5 como fuente de comparación para los años 2020, 2021 y 2022. Cabe mencionar que la resolución temporal de este reanálisis es cada 1 hora, mientras que la resolución espacial para los datos de viento es de 0,250° (~ 28 km) y para la altura significativa de la ola de 0,500° de grado (~ 56 km), la que se considera como un grillado muy extenso en el caso de la ola. Por consiguiente –como referencia– se toman los datos de otro modelo con mayor resolución espacial para el oleaje: *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS)³.

CMEMS es un servicio de monitoreo del medio marino, cuyo catálogo “proporciona datos y servicios marinos gratuitos y abiertos” a partir de observaciones y modelos in-situ y de algunos satélites⁴. En particular, el producto *Global Ocean Waves Analysis and Forecast* de CMEMS (CMEMS-GLO-WAV)⁵ es un sistema de pronóstico y análisis oceánico global que

¹ Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47)

² ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). ERA5: data documentation: Observations. [En línea] Disponible en: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5>

³ Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). [En línea] Disponible en: <https://marine.copernicus.eu/es>

⁴ Mercator Océan International. CMEMS. [En línea] Disponible en: <https://mercator-ocean.eu/place/cmems-copernicus-marine-environment-monitoring-service>

⁵ CMEMS. Global Ocean Waves Analysis and Forecast. [En línea] Disponible en: https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_ANALYSISFORECAST_WAV_001_027/description

se basa en el modelo de olas MFWAM⁶, el cual utiliza las aplicaciones de ECWAM⁷, y su resolución temporal es cada 3 horas y la espacial es de $0,083^\circ$ ($\sim 9 \text{ km}$). También, su sistema de asimilación es, por una parte, a partir de la misión altimétrica Sentinel-6A para la altura significativa de la ola y, por otra parte, a partir de CFOSAT para los espectros de ondas direccionales. Para los fines de este trabajo de tesis, se consideran los años 2021 y 2022 para la validación, dada la disponibilidad de datos de CMEMS-GLO-WAV.

En síntesis, para la validación de las observaciones de la magnitud del viento de CFOSAT se utilizarán los datos de ERA5 y para la altura significativa de la ola los datos de CMEMS-GLO-WAV, cuyas fuentes de datos son independientes a la misión satelital CFOSAT.

1.7. Misión satelital ASCAT

La misión satelital Advanced SCATterometer (acrónimo ASCAT)⁸, tal como su nombre indica, es un escaterómetro avanzado que orbita a $\sim 800 \text{ km}$ de altitud y realiza mediciones de vectores de viento en la superficie del océano (cuya resolución ronda entre los 12,5 y 25 km) 2 veces en el día y las promedia, con el fin de estudiar el hielo polar, la humedad del suelo y la vegetación. El principio de medición de un escaterómetro o dispersómetro es transmitir ondas de radar que se dispersan a través de un medio (aire, por ejemplo) y, en este caso, ASCAT envía pulsos de radar a 5,2 GHz (banda C)⁹ con tres antenas verticales polarizadas y se recibe la señal retrodispersada luego de eliminar el ruido.

El primer ASCAT fue lanzado en el satélite MetOp-A de *EUropean organisation for the exploitation of METeorological SATellites* (EUMETSAT)¹⁰ en octubre de 2006, mientras que otros dos ASCAT fueron lanzados en MetOp-B en septiembre de 2012 y MetOp-C en noviembre de 2018. A partir de estos últimos dos satélites –actualmente operativos– y del modelo ECMWF, se obtiene el campo horario del viento superficial del mar y su estrés, con una resolución espacial de $0,125^\circ$ (13,9 km)¹¹. Por consiguiente, se consideran los datos ASCAT en el periodo comprendido, entre los años 2008 y 2022 para la caracterización de los eventos de chorros costeros y su impacto en el oleaje, y entre los años 2021 y 2022 para la validación de observaciones CFOSAT.

⁶ Météo-France WAve Model (MFWAM). [En línea] Disponible en: windy.app/blog/mfwam-weather-model.html

⁷ ECMWF Ocean Wave Model (ECWAM). [En línea] Disponible en: <https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/2.2+Ocean+Wave+Model+-+ECWAM>

⁸ Remote Sensing Systems (RSS). ASCAT. [En línea] Disponible en: <https://www.remss.com/missions/ascat>

⁹ Banda C (IEEE): “Es una porción del espectro electromagnético en el rango de frecuencias de microondas, entre los 4 y 8 GHz”. Definición designada por el Instituto de Ingenieras/os Eléctricas/os y Electrónicas/os (IEEE). [En línea] Disponible en https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/C_band.html

¹⁰ European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT). The Metop-A, B and C polar orbiting meteorological satellites make up the EUMETSAT Polar System (EPS) series. [En línea] Disponible en: <https://eumetsat.int/metop>

¹¹ CMEMS. Global Ocean Hourly Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model. [En línea] Disponible en: https://data.marine.copernicus.eu/product/WIND_GLO_PHY_L4_NRT_012_004/description

Cabe destacar que las observaciones de los escaterómetros son útiles como base para comparar con otras misiones satelitales como es el caso de CFOSAT, el que permite adicionalmente establecer parámetros de calibración a partir de las mediciones ASCAT (Astudillo et al., 2017), el cual sigue en funcionamiento.

1.8. Misión satelital Sentinel-6A y Jason-3

Sentinel-6¹² es una misión satelital que cuenta con un altímetro de radar, diseñada para medir con precisión la altura del nivel del mar en todo el mundo y mejorar el pronóstico de eventos climáticos extremos y su impacto en las zonas costeras. Este satélite consiste en dos lanzamientos: Sentinel-6A (años 2020-2027) y Sentinel-6B (años 2025-2032), por lo que se considerará el primero para la validación de CFOSAT, ya que se encuentra en órbita. La resolución espacial de Sentinel-6A es de ~ 5 km (en promedio) en longitud y latitud, mientras que la temporal es de 1 segundo aproximadamente.

Jason-3¹³ también es una misión satelital que cuenta con un altímetro de radar (similar al utilizado en las misiones anteriores de la serie Jason, que se remontan a Jason-1 en 2001), el cual mide la distancia entre el satélite y la superficie del mar con una precisión de milímetros, lo que permite una observación detallada de las variaciones en el nivel del mar. Su resolución es $\sim 2,5$ km en longitud y $\sim 5,5$ km en latitud, cada 1 segundo.

En resumen, un altímetro es un radar con incidencia vertical, cuyo principio se basa en la medición del tiempo que tarda la señal del radar en viajar desde el satélite hasta la superficie de la Tierra y regresar al satélite con una reflexión cuasi-especular. Así, se determina la altura de la superficie marina dependiendo de la posición del satélite en órbita y de la corrección por efectos atmosféricos.¹⁴

Además, la importancia de medir la altura del mar es por las consecuencias en el aumento de su nivel debido al cambio climático, además de monitorear globalmente las circulaciones oceánicas¹⁵, por ende, estas observaciones contribuyen significativamente a la comprensión del cambio climático y su impacto en los océanos y las zonas costeras.

¹² Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR). Satellite Programme: Sentinel-6. [En línea] Disponible en: https://space.oscar.wmo.int/satelliteprogrammes/view/sentinel_6

¹³ Office of Satellite and Product Operations (OSPO) of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Jason-3 Products Handbook. [En línea] Disponible en: https://ospo.noaa.gov/Products/documents/hdbk_j3.pdf

¹⁴ Earth Online of the European Space Agency (ESA). A short course on Altimetry. [En línea] Disponible en: https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/0/01_Tuesday_OCT2013_Cipollini_Altimetry_1.pdf

¹⁵ EUMETSAT. Sentinel-6 reveals clues about the climate hidden in the ocean. [En línea] Disponible en: <https://eumetsat.int/features/sentinel-6-reveals-clues-about-climate-hidden-ocean>

1.9. Misión satelital CFOSAT

La misión *China-France Oceanography SATellite* (acrónimo CFOSAT)¹⁶, lanzada en octubre de 2018 a ~ 519 km de altitud sobre la superficie terrestre y que recorre todo el planeta, es la primera misión satelital con mediciones simultáneas de viento y oleaje, a diferencia de otras misiones satelitales que sólo miden viento u oleaje. CFOSAT es un proyecto observacional chino-francés a partir de dos instrumentos: (1) el radar francés SWIM (*Surface Wave Investigation and Monitoring*)¹⁷ que determina la dirección, amplitud y longitud de onda de las ondas superficiales, y (2) el dispersómetro o escaterómetro de vientos chino SCAT (*SCATterometer*)¹⁸ que mide la magnitud y dirección del viento (ver Figura 1.4).

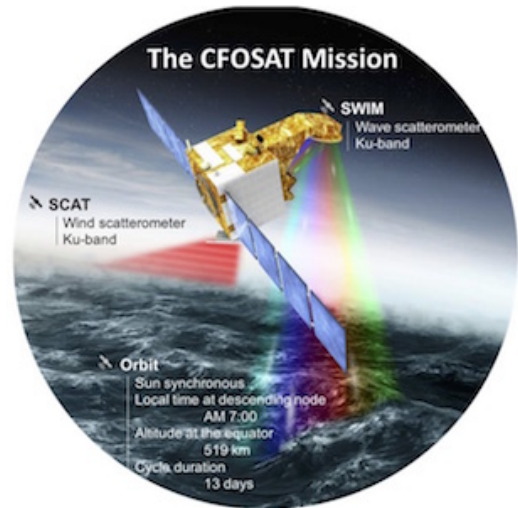


Figura 1.4: Ilustración del satélite CFOSAT con sus instrumentos SWIM y SCAT.

Además, la resolución espacial de las mediciones nadir¹⁹, tanto para la magnitud del viento como para la SWH, es de $\sim 0,014^\circ$ en latitud ($\sim 1,56$ km) y de $\sim 0,005^\circ$ en longitud ($\sim 0,56$ km). A parte de las mediciones nadir, en cada trayectoria (*track*) se calculan los espectros direccionales de ondas 2D dentro de una región acotada (70×90 km²) en cada paso de tiempo, con la finalidad de estimar la SWH, longitud, dirección y energía de la ola (Tison y Hauser, 2019). Asimismo, la disponibilidad de datos de los productos de viento y oleaje CFOSAT es instantánea, por ende, se pueden descargar de manera inmediata en la plataforma web de AVISO+.²⁰

Los recorridos que realiza la misión satelital CFOSAT son casi de manera sinusoidal a lo largo de toda la Tierra (ver Figura 1.5). Cada *track* recorre el planeta en 13 días, i.e. aparecerá en el mismo sitio cada 13 días. También, cada una tiene asignado un número, denominado como “número de *track*”. Frente a Chile, se encuentran 2 tipos de trayectorias: pares e impares, las que tendrán una función particular en el análisis de la presente tesis. Por un lado, las *tracks* “paralelas” a la costa (pares o descendentes, de norte a sur) son útiles para visualizar cómo fluctúan las variables (viento y oleaje) a lo largo de la costa de Chile.

¹⁶ AVISO+ Satellite Altimetry Data. CFOSAT mission. [En línea] Disponible en: <https://aviso.altimetry.fr/en/missions/current-missions/cfosat.html>

¹⁷ AVISO+ Satellite Altimetry Data. SWIM radar. [En línea] Disponible en: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/current-missions/cfosat/instruments/swim.html>

¹⁸ AVISO+ Satellite Altimetry Data. SCAT wind-scatterometer. [En línea] Disponible en: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/current-missions/cfosat/instruments/scat.html>

¹⁹ Nadir: “Es el punto de la superficie de la Tierra, situado directamente debajo del satélite”. Definición extraída de la Guía para el análisis y pronóstico de olas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (2018).

²⁰ AVISO+ Satellite Altimetry Data. Download Wave / wind CFOSAT products. [En línea] Disponible: <https://aviso.altimetry.fr/en/my-aviso-plus/my-products.html>

Por otro lado, las trayectorias “perpendiculares” (impares o ascendentes, de sur a norte) permiten caracterizar el decaimiento del viento, así favorecer la comprensión de la circulación atmosférica, tanto en mar abierto como cerca de la costa de Chile y de la dinámica de Ekman.

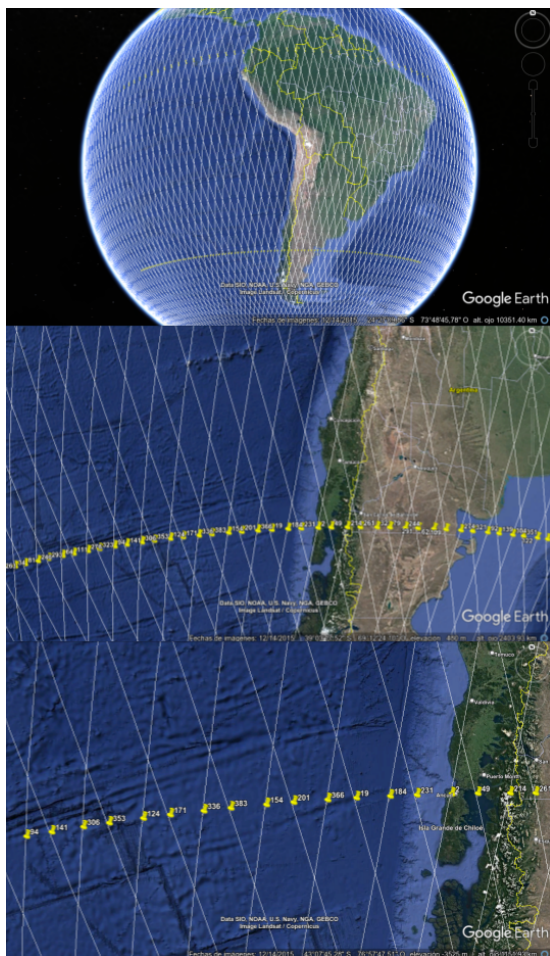


Figura 1.5: Enmallado en el planeta que representa el recorrido completo de CFOSAT, de acuerdo al archivo de datos geográficos KML^a entregado por el centro de datos francés de misiones satelitales altimétricas AVISO+.^b

^a Keyhole Markup Language. ¿Qué es KML?. [En línea] Disponible en: <https://developers.google.com/kml?hl=es-419>

^b AVISO+ Satellite Altimetry Data. KML file of CFOSAT traces. [En línea] Disponible en: https://aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/cfosat_trace_v2.1.kml

También, la base del instrumento SWIM gira a una frecuencia de 5,7 rpm y cada haz (compuesto por los ángulos de incidencia 0°, 2°, 4°, 6°, 8° y 10°, cada uno de ~ 18 km de diámetro) abarca un radio máximo de 88 km, tal como se representa en la Figura 1.6.

Cabe recalcar que los instrumentos SWIM y SCAT son escaterómetros de nivel L2 con radares de Banda Ku²¹, los que operan a $\sim 13,58$ y a $\sim 13,26$ GHz, respectivamente. Por un lado, SWIM, al medir “cerca del punto nadir, se destaca por ser el primero en producir sistemáticamente espectros direccionales de las olas oceánicas con un sistema de radar de barrido de apertura real”, además, la medición con el ángulo de 10° (menor incidencia, pues es el ángulo más externo) es más sensible al swell por ser de mayor apertura. Por otro lado, el haz del SCAT funciona en abanico con ángulos de incidencia de 26° a 46° (Hauser et al., 2021).

En efecto, la utilidad de esta misión es que, a partir de los datos de CFOSAT, se pueden describir los patrones de viento/oleaje costero y oceánico simultáneamente, lo cual posibilita la correcta caracterización de la influencia de la circulación atmosférica superficial local sobre el estado del mar, puesto que sus observaciones son co-localizadas en tiempo y en espacio. De este modo, con los datos del radar SWIM, se puede diferenciar entre la contribución del viento local (mar de viento o *wind sea*) y del remoto (mar de fondo o *swell*) gracias a la precisión de los productos nadir, por medio de su nuevo algoritmo *retracking*, lo que conlleva a mejores observaciones de viento y SWH, incluso un mayor rango de medición de longitudes de onda para las olas de mar (entre los 70 y 500 metros) (Hauser et al., 2021). De hecho, en comparación con misiones altimétricas previas como Jason-3, el error cuadrático medio y la desviación estándar son levemente menores en el caso de CFOSAT, por lo que

²¹ Tech-FAQ. Ku Band. [En línea] Disponible en: <https://tech-faq.com/ku-band.shtml>

CFOSAT podría destacarse como un avance respecto de la altimetría. Además, “la frecuencia de la forma de la ola de nadir de CFOSAT es más pequeña que la de Jason-3, debido a su algoritmo de *retracking* que funciona mejor que el MLE4²²” (Li et al., 2021).

Cabe destacar que actualmente sólo las mediciones satelitales de altimetría o misiones de *Synthetic Aperture Radar* (SAR)²³ proveen observaciones de oleaje. Las primeras proveen estimaciones de la altura significativa del oleaje que se restringen a longitudes de onda mayores a los 250 metros o menores, pero limitadas a la dirección perpendicular al barrido del satélite, por lo que excluye las condiciones mixtas (mar de viento y mar de fondo), así como las etapas iniciales de la ola. Sin embargo, las mediciones de la misión CFOSAT, al ser simultáneas las de viento y oleaje en alta resolución y mayores en su rango espectral de observación, se consideran mucho más precisas (Hauser et al., 2017). De hecho, el instrumento SWIM provee también información sobre el espectro direccional de la ola (Liang et al., 2021).

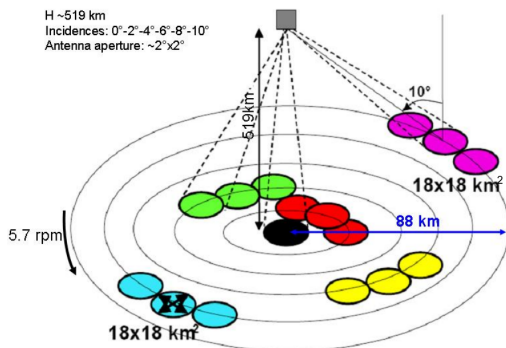


Figura 1.6: Representación de la geometría de la antena SWIM del satélite CFOSAT, con sus respectivos ángulos de incidencia (0°: negro; 2°: rojo; 4°: verde; 6°: amarillo; 8°: cian; 10°: magenta) y sus rangos de medición. Imagen levemente corregida del manual simplificado del producto SWIM (AVISO+ Satellite Altimetry Data, 2020).

La Figura 1.7 es la representación del paso del satélite. Particularmente, es el registro de medición del escaterómetro SWIM para cada ángulo de incidencia. En la presente tesis, sólo se tomará en consideración el ángulo nadir (0°), perpendicular a la superficie terrestre.

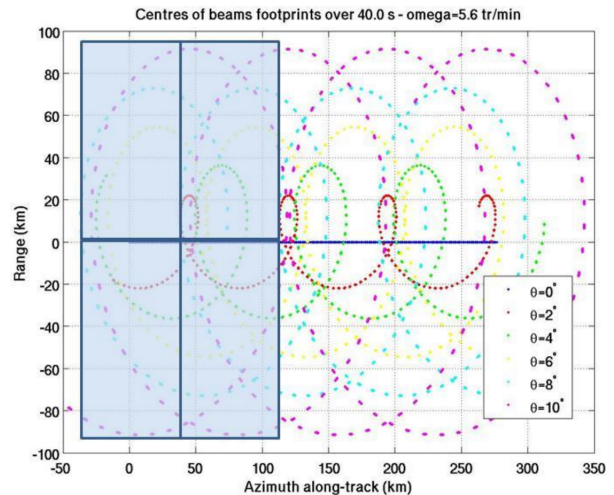


Figura 1.7: Ejemplo del muestreo horizontal de los datos SWIM. Los puntos coloreados indican el centro de cada ángulo de incidencia de la antena, según la geometría del radar y seguidos de los datos del nivel L1A. Los recuadros sombreados azules son el área de las “celdas del producto” (cajas o *boxes* de medición), usados para generar los productos del nivel L2. Imagen y descripción extraídas del manual simplificado del producto SWIM (AVISO+ Satellite Altimetry Data, 2020).

²² MLE4: “4-parameter retrieval by Maximum Likelihood Estimation”. Definición extraída textualmente de Li et al. (2021).

²³ NASA Earth Observation Data. What is Synthetic Aperture Radar?. [En línea] Disponible en: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>

1.10. Reportes de Restricciones de la Armada de Chile

Los Reportes de Restricciones de la Armada de Chile²⁴, como su nombre lo indica, son reportes que detallan el motivo de cierre temporal en los puertos de Chile, en un periodo de tiempo seleccionado a partir del 1 de agosto de 2020, levantado por la Armada de Chile. También señala la duración en que estuvo cerrado el puerto (Tiempo Efectivo de Cierre), tanto en días como en horas, con su fecha específica de inicio y finalización de la restricción (ver Figura 1.8). Por ejemplo:

- Capitanía de Puerto: Antofagasta
- Bahía: Caleta Coloso
- Tipo de Instalación Portuaria: Muelles, Malecón, Molo y Espigón
- Periodo: 01-01-2022 al 31-12-2022
- Tipo de Nave: Nave Mayor en Muelle Coloso
- Tipo de restricción: Límites operacionales
- Motivos de restricción: Ola - Marejada
- Tiempo Efectivo de Cierre (TEC) total: 6,23 días ~ 149,5 horas
- Motivos de restricción: Viento
- Tiempo Efectivo de Cierre (TEC) total: 0,26 días ~ 6,2 horas

En general, los motivos de cierre puerto (entre 18°S y 45°S aproximadamente) son: viento, mal tiempo, ola o marejada, visibilidad, temporal, corriente, sismo, huelga o manifestaciones, entre otros, pero para efectos de este trabajo, sólo se consideran los primeros cuatro.

Este insumo no indica los datos cuantitativos del motivo de restricción como, por ejemplo, la magnitud del viento que implicó un cierre de puerto, o la altura de la ola que provocó marejadas en la zona, por lo que sólo se utilizará como información complementaria para el análisis de eventos de viento intenso o de marejadas asociadas a frentes.

²⁴ Armada de Chile. Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR). Reporte de Restricciones - Sistema Visualización Instalaciones Portuarias - SVIP. [En línea] Disponible en: https://svip.directemar.cl/ui/reporte_restricciones?execution=e2s1

Los datos de tiempo efectivo de cierre (TEC*) entregado por el reporte de restricciones se agrupó según los siguientes criterios:

Capitanía de Puerto: CAPITANÍA DE PUERTO ANTOFAGASTA **Fecha de inicio:** 01-01-2022
Bahías: CALETA COLOSO **Fecha de término:** 31-12-2022
Tipo Instalación Portuaria: Muelles, Malecon, Molo y Espigón

Nave Mayor			Días	Horas
MUELLE COLOSO	Frente de Atraque : FRENTE DE ATRAQUE N°1			
	Sitio de Atraque : SITIO N°1			
	Tipo de restricción : Limites operacionales	TEC*	6,49	155,7
	Motivo de restricción : Ola - Marejada	TEC*	6,23	149,5
	12-01-2022 13:40 12-01-2022 18:56		0,22	5,3
	06-03-2022 00:50 08-03-2022 09:45		2,37	56,9
	08-03-2022 15:37 09-03-2022 08:51		0,72	17,2
	26-04-2022 18:50 29-04-2022 07:55		2,55	61,1
	23-05-2022 23:25 24-05-2022 08:25		0,38	9,0
	Motivo de restricción : Viento	TEC*	0,26	6,2
	02-06-2022 09:25 02-06-2022 10:56		0,06	1,5
	13-09-2022 14:20 13-09-2022 19:00		0,19	4,7
Tipo de restricción : Paralización de faenas de transferencia	TEC*	1,36	32,5	
Motivo de restricción : Asociados a elemento y/o IP	TEC*	1,36	32,5	
01-09-2022 11:18 02-09-2022 19:51		1,36	32,5	

TEC*

Tiempo Efectivo Cierre

Recordar*

TEC* del Tipo de Restricción puede ser menor o igual que la suma de los TEC* de los Motivos de Restricciones

Página 1

Figura 1.8: Captura de pantalla a la página 1 de uno de los Reportes de Restricciones de la Armada de Chile en Capitanía de Puerto Antofagasta para el año 2022.

1.11. Red de estaciones de monitoreo de CEAZAMET

El Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) de la Región de Coquimbo, Chile, opera como un centro multidisciplinario dedicado a la investigación en áreas como biotecnología, oceanografía, geociencias y meteorología. De esta última, se encuentra la unidad CEAZAMET²⁵, que se enfoca en el estudio del clima y la meteorología regional, cuya información se obtiene través de su plataforma web, ofreciendo detalles sobre la red de estaciones de monitoreo, la emisión de pronósticos tanto oceánicos como atmosféricos, la publicación de boletines climáticos y la disponibilidad pública de la base de datos de las estaciones.

La base de datos de CEAZAMET (abreviado en ocasiones como CMET) de una determinada estación puede proporcionar la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad de viento, dirección del viento, radiación solar, radiación de onda larga y corta (tanto reflejada

²⁵ CEAZAMET. Estado del tiempo y pronóstico & Red de estaciones meteorológicas. [En línea] Disponible en: <https://ceazamet.cl>

como incidente), presión atmosférica, precipitación, unidades de frío Utah, horas frío, punto de rocío, salinidad del agua, etc. Por ejemplo, los datos de la velocidad del viento para la estación Punta Lengua de Vaca (código de la estación: PLV; código de la variable de interés: PLVVV)²⁶ se entregan cada 10 minutos actualmente²⁷, indicando su fecha y hora de medición y el mínimo, máximo y promedio del viento en m/s .

Esta base resulta útil para comparar las mediciones de viento de alguna estación particular de la Región de Coquimbo, con las mediciones de viento costa afuera realizadas por CFOSAT, así caracterizar el índice del decaimiento del viento hacia la costa mediante su tasa cambio de la velocidad del viento, tal como lo plantea [Astudillo et al. \(2017\)](#).

1.12. Motivación

Los datos CFOSAT se consideran de gran relevancia, porque podrían favorecer la comprensión de la dinámica océano-atmósfera-continente en la región de estudio caracterizada por la baja disponibilidad de observaciones *in-situ*. Por lo tanto, a partir de lo expuesto en Introducción, la motivación principal de este trabajo es justamente avanzar en la comprensión de estos procesos de interacción y analizar los patrones de viento en la banda costera y en el océano abierto determinando su contribución sobre el oleaje. Para ello, se propone utilizar las observaciones de la misión *China-France Oceanography SATellite* (CFOSAT), cuyas mediciones satelitales de viento y oleaje se obtienen de manera co-localizadas en tiempo/espacio. A diferencia de otros altímetros, CFOSAT, con su amplio rango espectral de observación, permite identificar con mayor certeza las contribuciones relativas del mar de fondo y del patrón de viento local (mar de viento) en la variabilidad del oleaje.

²⁶ CEAZAMET. Estación Punta Lengua de Vaca: Especificación y listado de eventos de la estación y sus sensores. [En línea] Disponible en: https://ceazamet.cl/index.php?pag=mod_estacion&pag2=mod_estacion__hardware&e_cod=PLV&p_cod=ceazamet

²⁷ Se realizaron modificaciones en el intervalo de medición desde la instalación en el año 2013. Es decir, se llevaron a cabo mediciones cada 1 hora, cada 30 minutos o cada 15 minutos.

Capítulo 2

Objetivos de la investigación

2.1. Objetivo general

El objetivo general de esta investigación es evaluar las mediciones de viento y oleaje proporcionadas por la misión satelital CFOSAT en el Pacífico Sudeste. Esto permitirá caracterizar los patrones de viento costero, así como las contribuciones del viento local y remoto en el oleaje. De este modo, se documentará la comprensión de la dinámica océano-atmósfera-continente en la región de estudio, dada la baja disponibilidad de observaciones *in-situ*, a partir de los datos de CFOSAT.

2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- Validar los datos medidos por la misión satelital CFOSAT, con el fin de identificar su acuerdo y desvío para el área de estudio en relación a los dispersómetros, altímetros y reanálisis de viento/olas disponibles.
- Analizar la variabilidad temporal y espacial de la circulación atmosférica y los patrones de viento regional y costero, con el propósito de identificar y cuantificar los eventos de LLJ y CLLJ y el decaimiento costero del viento, mediante las observaciones satelitales CFOSAT y ASCAT.
- Caracterizar el oleaje (altura significativa y espectro direccional) y su respuesta al forzamiento remoto (mar de fondo o *swell*) y local del viento (mar de viento o *wind sea*) en los periodos de LLJ en la región oceánica y costera de Chile Central. Estas condiciones de viento y oleaje son útiles para anticipar periodos de cierre de puerto.

Capítulo 3

Metodología

Las mediciones principales de nivel L2 de la misión CFOSAT que se consideran para este trabajo son: fecha (se utilizan los datos a partir del 1 de enero de 2020 UTC al 31 de diciembre de 2022 UTC), hora exacta (incluyendo milisegundos), latitud y longitud (región de estudio: 18°S a 45° S y 70°O a 90°O), magnitud del viento, altura significativa y espectro direccional de la ola, número de trayectoria o *track* (1 a 394 *tracks*), número del día dentro del ciclo (1 a 13 días) y número de ciclo. Para este trabajo se considera desde el ciclo 33 al 118, en el que 1 ciclo orbital completo involucra 394 *tracks* obtenidas en un periodo de 13 días²⁸. Cabe recalcar que para este trabajo se utiliza el lenguaje de programación MATLAB²⁹.

Vale decir que las mediciones satelitales de viento y oleaje de CFOSAT están co-localizadas en tiempo y espacio, por ende, se tiene la ubicación y fecha de medición (Hauser et al., 2017), e involucran un mayor rango espectral a diferencia de otros altímetros. Por lo tanto, se propone como hipótesis que los datos de CFOSAT favorecerán la comprensión de la dinámica océano-atmósfera en la región de estudio caracterizada por la baja disponibilidad de observaciones *in-situ*.

En este capítulo se detalla la metodología seguida durante el proceso de evaluación y validación de las mediciones simultáneas de CFOSAT. Primero, se realiza un trabajo preliminar de definición de objetivos de la tesis, procesamiento de los datos de la misión satelital en cuestión y revisión bibliográfica en paralelo, para luego estructurar los datos de CFOSAT para procesarlos y analizarlos, de acuerdo a los objetivos del presente trabajo. Segundo, se valida el conjunto de datos de CFOSAT a partir de mediciones satelitales de altimetría y también se evalúan estos datos a partir de los modelos. Tercero, se caracterizan los eventos de *Low Level Jet* por medio de la técnica EOF con datos de ASCAT y aplicando ciertos criterios para la identificación de eventos de viento intenso. Cuarto, estudiar el impacto teórico en respuesta a los procesos de Ekman frente a un evento de LLJ y influencia en la surgencia costera. Quinto, se entregan los espectros direccionales y se identifican las contribuciones del mar de fondo y mar de viento.

²⁸ AVISO+ Satellite Altimetry Data. CFOSAT Orbit. [En línea] Disponible en: <https://aviso.altimetry.fr/en/missions/current-missions/cfosat/orbit.html>

²⁹ MathWorks. MATLAB. [En línea] Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

3.1. Estructuración y exploración de observaciones CFOSAT

El paso inicial es la definición de objetivos generales y específicos para la presente tesis que se enmarca en el proyecto de investigación FONDECYT 11190999 liderado por el profesor Orlando Astudillo Reynoso, tutor de esta propuesta, y del proyecto CLAP del CEAZA. Después, se obtiene y procesa el conjunto de datos CFOSAT en base al manual simplificado del producto SWIM ([AVISO+ Satellite Altimetry Data, 2020](#)) y al manual paso a paso de CFOSAT ([AVISO+ Satellite Altimetry Data, 2019](#)). En paralelo, se realiza la revisión bibliográfica, que incluye artículos sobre circulación atmosférica, oleaje, oceanografía espacial y cambio climático para la región de estudio, junto a los primeros estudios publicados basados en las observaciones satelitales CFOSAT.

De este modo, se da pie a la primera etapa de este trabajo que se basa en la estructuración del conjunto de datos nadir CFOSAT del nivel L2 para su procesamiento y análisis. Para ello, se trabaja con los parámetros derivados del tratamiento de las mediciones nadir, es decir, magnitud del viento (*Wind Speed*, WS es su sigla en inglés) y altura significativa de ola (*Significant Wave Height*, SWH su sigla en inglés), con el fin de generar un grillado a lo largo de las órbitas de medición (*tracks*) de viento y oleaje de la misión CFOSAT en Pacífico Sudeste.

La estructuración de las mediciones CFOSAT consiste en crear una matriz de datos, por lo que se serializan las variables de interés por año y para todo el planeta con las columnas de: día, mes, año, hora, minuto, segundo, longitud, latitud, WS, SWH, indicador de calidad del coeficiente de retrodispersión de radar³⁰, indicador de calidad de SWH³¹, número de ciclo y número del día dentro del ciclo. La dificultad de esta etapa radica en el gran número de archivos y de datos, puesto que hay 18 archivos diarios, por lo que se requiere una cierta recursividad en el procesamiento. Además, se hallan mediciones aisladas con fechas incorrectas o con valores NaN (*Not a Number* en inglés)³² en las fechas, por lo que se debieron eliminar estas filas de datos.

Después, se incorporan ocho columnas más: número de trayectoria o *track*, registro de fecha como dato numérico, celda³³ latitudinal y celda longitudinal. La asignación del número de trayectoria se realiza en “bloques” de millones de datos e ir identificando el cambio de número de *track* luego de cumplir un cierto tiempo, asociado a un determinado número de ciclo inicial³⁴. Se debe ejercer con cautela esta asignación, porque las trayectorias frente a Chile son ascendentes (impares, de sureste a noroeste) y descendentes (pares, de noreste a suroeste). A fin de grillar las mediciones en una matriz lat-lon general, se realiza un proceso

³⁰ El indicador de calidad del coeficiente de retrodispersión de radar (σ_0) “comprueba si el número de datos válidos para la compresión es suficiente, es decir, por sobre un umbral, y si la desviación estándar de esta está por debajo de un umbral” ([Tison y Hauser, 2019](#)).

³¹ Análogo al indicador de calidad de σ_0 , pero para los datos de la SWH.

³² MATLAB & Simulink. Infinito y NaN. [En línea] Disponible en: https://la.mathworks.com/help/matlab/matlab_prog/infinity-and-nan.html

³³ El número de celda, tanto en latitud como en longitud, es una asignación a los datos de la matriz CFOSAT que están dentro de la región de interés para generar matrices grilladas.

³⁴ AVISO+ Satellite Altimetry Data. TXT file giving the UTC starting dates of each cycle. [En línea] Disponible en: https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/cfosat_cycles_t0_v4.txt

de geolocalización y asignación de cada medición en esta grilla espacial “gaussiana”, la cual cuenta con 2.550 x 5.120 celdas lat-lon de igual área, es decir que en la región de estudio se asigna un número de celda a cada una de las mediciones CFOSAT para obtener promedios consistentes en el tiempo. También, se debe considerar que las mediciones son de alta resolución (por lo tanto, se cuentan varios datos para cada celda en cada ciclo de medición) y estas varían sutilmente en posición en cada ciclo de medición.

En seguida, se agregan otras cuatro columnas: coincidencia de dato³⁵ del viento, coincidencia de dato de la SWH, WS del modelo de viento y SWH del modelo de oleaje. De esta forma, se crea una sola matriz de datos para el periodo y región de estudio en cuestión. Es decir, se unifican las matrices por año en una sola, cuyo tamaño es de 3.338.177 de filas válidas (paso temporal UTC desde el 1 de enero de 2020 hasta 31 de diciembre de 2022) por 22 columnas. Dicha matriz es la que se utiliza para las siguientes subsecciones de la Metodología, la cual ya viene filtrada según el indicador de calidad para el viento y oleaje y de acuerdo a las trayectorias que recorren en la región de estudio.

Luego, se procede con la exploración de los datos CFOSAT conforme a lo siguiente:

- Primero, se contabiliza la disponibilidad de estos por año y en total.
- Segundo, se cuantifican cuántos datos hay por trayectoria (par e impar) dentro de la región de estudio y se calcula su respectivo porcentaje asociado al total.
- Tercero, se grafica la representación de las trayectorias presentes, tanto ubicándolas en la zona como en conocer el orden cronológico de su paso.
- Cuarto, se observa cómo es la variación zonal de una trayectoria en particular, dado que no necesariamente recorre exactamente el mismo punto geográfico. Esto implica que puede haber un ligero desvío entre la *track* del tiempo 0 con la *track* del tiempo siguiente, y así sucesivamente, pero manteniéndose dentro del rango correspondiente.
- Quinto, se identifica cuáles son las trayectorias de mayor interés y con porcentaje de datos más alto. Por ejemplo, las más cercanas a la costa de Chile para analizar la variación latitudinal del viento y oleaje, y las que cruzan el país para estudiar el decaimiento del viento.
- Finalmente, se representa el promedio del viento y de la SWH por trayectoria en la región de estudio, para tener una visión general de la interacción de estas variables.

En un principio, los datos CFOSAT resultan ser difíciles de manejar, pero una vez estructurados en matrices, se simplifica su manejo para representar de buena manera la región de estudio y tener una mejor comprensión de la dinámica que ocurre frente a Chile. En efecto, la adquisición y procesamiento de las mediciones CFOSAT, junto con una exhaustiva revisión bibliográfica, sientan las bases para la primera etapa del trabajo, centrada en la estructuración y análisis de las observaciones nadir de CFOSAT. Además, la exploración posterior de estos datos revela patrones interesantes en la disponibilidad y variabilidad espacio-temporal de las trayectorias, lo que permite identificar aquellas de mayor relevancia para el análisis

³⁵ La coincidencia de dato es referida a si hay dato de modelo para la determinada variable.

detallado. Por lo tanto, a pesar de la complejidad inicial, la adecuada estructuración de los datos CFOSAT proporciona una base sólida para su empleo y así comprender la interacción entre el océano y la atmósfera frente a las costas de Chile y, de esta forma, alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo.

3.2. Validación de observaciones CFOSAT con otras mediciones satelitales y su respectiva evaluación y comparación con modelos de atmósfera y oleaje

El segundo paso es evaluar los datos CFOSAT que han sido aprobados por el indicador de calidad que viene asociado a ellos, lo que significa que el número de datos válidos es suficiente. Estos datos se validan mediante la comparación estadística básica con observaciones satelitales de oleaje, como Sentinel-6A (resolución de $<35 \text{ km}$) y Jason-3 (resolución de 4 km), y de viento como ASCAT (resolución de $13,9 \text{ km}$). Además, se les aplica una medida de cercanía temporal y espacial entre estos satélites y CFOSAT mediante el cruce de datos, y no se consideran aquellos valores que superen tres desviaciones estándar de la diferencia entre las observaciones.

Luego se evalúan las mediciones de viento y de oleaje a lo largo de las trayectorias CFOSAT sobre la región. Estas mediciones se comparan con los modelos atmosféricos (ERA5, resolución de 31 km) y de oleaje (CMEMS, resolución de 10 km), respectivamente, por medio de un gráfico de dispersión. Adicionalmente, en la subsección “Estudio del impacto teórico por procesos de Ekman” se vinculan los datos de viento satelital con los de la estación meteorológica costera de Punta Lengua de Vaca, en la Región de Coquimbo.

En paralelo, se calculan los datos estadísticos pertinentes para comparar y evaluar la concordancia de las mediciones simultáneas CFOSAT. Entre los parámetros evaluados se incluyen la correlación (ec. 3.1), la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por su sigla en inglés) (ec. 3.2), el error del sesgo medio o *Mean Bias Error* (MBE su sigla en inglés) (ec. 3.3) y la desviación estándar (STD en inglés) (ec. 3.4).

$$corr = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2) (\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2)}} \quad (3.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_i - B_i|^2} \quad (3.2)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - B_i) \quad (3.3)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |C_i - \bar{C}|^2} \quad (3.4)$$

• $corr$ ³⁶: coeficiente de correlación lineal de Pearson entre los arreglos A y B . A representa

³⁶ MATLAB. Correlación lineal o de rango (corr). [En línea] Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/stats/corr.html>

las n mediciones CFOSAT y B las otras n observaciones satelitales o los datos de los modelos de referencia (\bar{A} y \bar{B} sus medias, respectivamente).

- RMSE³⁷: error cuadrático medio entre los arreglos A y B .
- MBE³⁸: error de sesgo medio entre los arreglos A y B .
- STD³⁹: desviación estándar de los elementos de C , el cual representa la diferencia entre los arreglos A y B .

Esta fase de la investigación es para demostrar el alto grado de concordancia y precisión con datos provenientes de misiones satelitales específicas (como Sentinel-6A, Jason-3 y ASCAT) con las mediciones CFOSAT. De igual manera entre los modelos de viento y ola con las observaciones simultáneas de CFOSAT.

3.3. Caracterización de los eventos de chorros costeros y su impacto en el oleaje

En el tercer paso, se identifican y caracterizan los eventos de LLJ, por medio de la técnica de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF su sigla en inglés)⁴⁰ con datos de viento diario ASCAT entre los años 2008 y 2022 en toda la región de estudio. A fin de completar los días sin observaciones ASCAT, se utilizan los promedios diarios de ERA5 que cuentan con igual resolución espacial a la de las observaciones satelitales. A cuyo producto, se le corrigen los sesgos persistentes en los campos horarios del viento superficial del mar a partir del reanálisis ERA5 del ECMWF.

Adicionalmente, con el objetivo de orientar el análisis hacia la detección de los eventos de LLJ que ocurren a escala temporal intra-estacional, se aplica el análisis EOF a las Anomalías Intra-Estacionales (AIE) de los datos diarios ASCAT. Cabe destacar que la obtención de las AIE se realiza de la siguiente manera: “Primero, se calculan los promedios mensuales de las series temporales diarias y se interpolan nuevamente a una grilla temporal diaria utilizando la función spline. Después el resultado se extrae de la serie temporal original para obtener las anomalías intra-estacionales diarias” (explicación extraída de \citeA{dewitte_modes_2011}).

Por una parte, este método permite describir los posibles modos de variabilidad espacial del régimen de viento cercano a la superficie (estandarizado a 10 m de altura sobre la superficie) en la escala intra-estacional. Además, proporciona información sobre su variabilidad temporal expresada como la Componente Principal (PC, por sus siglas en inglés) asociada a cada modo de variabilidad, indicando también el porcentaje de varianza capturado por cada

³⁷ MATLAB. Root-mean-square error between arrays (rmse). [En línea] Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/rmse.html>

³⁸ Turkish State Meteorological Service. Mean Bias Error (MBE). [En línea] Disponible en: <https://www.mgm.gov.tr/FTPDATA/arastirma/toz/sdswa/DescriptiveInformation.pdf>

³⁹ MATLAB. Desviación estándar (std). [En línea] Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/std.html>

⁴⁰ National Center for Atmospheric Research (NCAR). Empirical Orthogonal Function (EOF) Analysis and Rotated EOF Analysis. [En línea] Disponible en: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-tools/empirical-orthogonal-function-eof-analysis-and-rotated-eof-analysis>

EOF. En específico, la finalidad de esta caracterización es observar el patrón espacial general de desarrollo de los chorros costeros frente a Chile centro-norte y verificar su vínculo con los focos de surgencia que se encuentran a lo largo de la costa. Esto se logra mediante el análisis de la varianza de la magnitud del viento y, en particular, de su componente meridional del viento (V_y), asumiendo que esta última es la que fuerza principalmente la dinámica de la surgencia costera. Sin embargo, cabe recordar que la surgencia está determinada por la componente del viento a lo largo de la costa y que suele aproximarse por V_y , debido a que las costas de Chile se extienden primordialmente en dirección norte-sur.

De acuerdo a lo anterior, se identifican los periodos de chorro en superficie (V_{10}) como aquellos eventos que superan el cuartil 75 % (Q) de la distribución de la primera componente principal (PC1) de la magnitud del viento y de V_y . Esto proporciona información sobre la parte superior de la dispersión de los datos, por lo que esta identificación se denominará como criterio 1.

Por otra parte, se prosigue con la búsqueda de Eventos de Viento Intenso (EVI) mediante la aplicación de un segundo criterio. Este consiste en identificar la región costera en que se maximiza la desviación estándar de la magnitud del viento ASCAT en el período 2008-2022 utilizando para ello un valor límite de $\sigma \sim 2,8 \text{ m/s}$, siguiendo la metodología de Garreaud y Muñoz (2005). Luego se calcula el promedio diario de la magnitud del viento y el promedio diario del viento meridional dentro del área de máxima desviación estándar. Después se seleccionan aquellos días que están por sobre el cuartil 75 % de la serie de tiempo correspondiente. Cabe destacar que el criterio 1 es útil para reconocer cuándo el viento supera el 75 % de los registros y tener una noción de cuán intenso es el viento en la mayoría de los eventos. El criterio 2 se aplica como confirmación de que la identificación de eventos de viento intenso con el cuartil 75 % fue precisa.

En seguida, se contabiliza la cantidad de EVI encontrados y sus respectivas duraciones en días, para luego escoger cuatro periodos diferentes de EVI (en particular, algunos de los de mayor duración) y explorarlos exhaustivamente. Primero, se constata si hubo cierre de puerto en localidades aledañas a 30°S (ceranos al centro de los EOF de la magnitud del viento y del viento meridional). Segundo, se revisa cómo fue el viento promedio en esos eventos y su relación con la SWH a partir de las observaciones simultáneas de CFOSAT, dada su alta resolución espacial y temporal al atravesar la zona. Tercero, se analiza en detalle las mediciones dispersómetro SCAT de CFOSAT, trayectoria por trayectoria que recorre la región de estudio durante cada EVI, comparándolas con los datos de modelo disponibles. Posteriormente, a modo de ejemplo, se escoge sólo un evento para graficar los perfiles de viento y SWH de CFOSAT para cada trayectoria con respecto a su distancia de la costa, así presentar otra utilidad de los datos CFOSAT. En adición, se analiza de manera sucinta la ocurrencia de los EVI con las fases del Índice RMM de la Oscilación Madden-Julian (OMJ)⁴¹ de Wheeler y Hendon (2004), con el propósito de identificar si existe una influencia de la OMJ en la ocurrencia o intensidad de la LLJ.

Por lo tanto, el estudio de los eventos de LLJ mediante la técnica de EOF aplicada a datos de ASCAT proporciona una caracterización detallada de la variabilidad espacial y temporal

⁴¹ Japan Meteorological Agency. Explanation on the Products for the Madden-Julian Oscillation (MJO). [En línea] Disponible en: https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/mjo/explanation_mjo.html

de los chorros costeros en la región de Chile Central. En efecto, la identificación de eventos de viento intenso, basada en criterios estadísticos y umbrales específicos, permite un análisis profundo de su impacto. Esto incluye la exploración de su duración y la relación con el cierre de puertos, además del comportamiento promedio del viento para los cuatro eventos seleccionados y la interacción con la SWH. También, las mediciones de CFOSAT contribuyen a una comprensión más completa del comportamiento del viento y su influencia en el oleaje durante estos EVI, dada la limitada disponibilidad de datos *in-situ* en la región. Por tanto, las mediciones simultáneas de CFOSAT emergen como una herramienta significativa para el estudio de estos fenómenos.

3.4. Estudio del impacto teórico por procesos de Ekman

En la cuarta etapa se estudian los procesos de Ekman frente a un evento de LLJ y su influencia en la surgencia costera por medio de mediciones locales y de CFOSAT, particularmente frente a las costas de Tongoy (o Punta Lengua de Vaca). Asimismo, se analizan las variaciones significativas del decaimiento del viento durante las mañanas y las tardes.

Para ello, se obtienen las series temporales de viento con sus direcciones a partir de las mediciones de ASCAT en la Región de Coquimbo coincidiendo en las fechas del evento de viento intenso de 7 días revisado en la sección anterior (25/05/2022 al 31/05/2022). De esta forma, se puede visualizar el comportamiento del viento, tanto en superar una determinada magnitud como en sostener una cierta dirección consistente con un LLJ. Esto permite también reconocer posibles condiciones de relajación e intensificación del viento como procesos oceanográficos claves de la surgencia mediante el análisis de transporte de masas de agua frente a Punta Lengua de Vaca. Es decir, estimar la surgencia costera y analizar su relación con la temperatura superficial del mar (TSM) y el decaimiento del viento (Ramajo, 2020).

Luego se seleccionan dos trayectorias CFOSAT que crucen frente a Punta Lengua de Vaca ($\sim 30,24^\circ\text{S}$ y $\sim 71,63^\circ\text{O}$; localidad cercana a Tongoy) a ~ 100 km mar adentro y comparar sus mediciones de viento coincidentes con las de la estación meteorológica de CEAZAMET. Así, examinar el decaimiento del viento hacia la costa ante un evento de chorro costero, específicamente en los días 3 y 6 del evento de viento intenso de 7 días. Igualmente, estas dos trayectorias, 79 y 184, tienen la ventaja de recorrer la zona en la tarde y en la mañana, respectivamente. De este modo, contrastar sus diferencias en el índice y la tasa de caída del viento entre los años 2020 y 2022.

Por un lado, este índice se utiliza para caracterizar el decaimiento del viento de manera porcentual (*drop-off index* o *DEC*) entre dos puntos geográficos distantes como, por ejemplo, entre una medición mar adentro y otra en la costa (Astudillo et al., 2017) y se define como:

$$DEC = 100\% \left(\frac{W_{CFO} - W_{CMET}}{W_{CFO}} \right) \quad [\%], \quad \text{si } W_{CFO} \geq W_{CMET} \quad (3.5)$$

$$DEC = 100\% \left(\frac{W_{CFO} - W_{CMET}}{W_{CMET}} \right) \quad [\%], \quad \text{si } W_{CFO} < W_{CMET} \quad (3.6)$$

Suponiendo que no hay sesgo entre ambas bases de datos, se puede afirmar que:

- Si DEC es positivo (negativo), el viento CFOSAT es mayor (menor) que el de CEAZAMET, por lo que implica que sí (no) hay decaimiento del viento hacia la costa.
- Si DEC es 0, entonces el viento mar adentro es lo mismo que en la costa.
- Si DEC es igual a -100 %, entonces el viento CFOSAT es de magnitud 0.

Por otro lado, la tasa de decaimiento (*wind decay rate* o W_d) se utiliza para tener una aproximación del grado de caída del viento en relación con la distancia desde la costa (Astudillo et al., 2019) y se estima como:

$$W_d = \frac{\Delta W}{\Delta X} = \frac{W_{CFO} - W_{CMET}}{X_{CFO} - X_{CMET}} \left[\frac{m/s}{m} \right] \quad (3.7)$$

Adicionalmente, se utiliza el reanálisis ERA5 para estimar el transporte y bombeo de Ekman a escala diaria durante todo el periodo de estudio. En específico, se grafica el promedio diario del transporte (ec. 3.9), bombeo (ec. 3.10) y transporte total (ec 3.11) de Ekman en 30°S (Pickett, 2003). Luego, se relaciona el viento y la precipitación (lluvia, llovizna) comparando los resultados con observaciones in-situ. El propósito de esto es analizar la implicancia teórica que tiene esta dinámica en el movimiento del agua y cómo esto influye en la surgencia hacia el norte en 30°S. También para identificar si hay algún patrón en la dinámica de Ekman por el ciclo estacional y si existe alguna ocurrencia de precipitación (por frente, baja costera o baja segregada, según CEAZAMET) concordante con un transporte total de Ekman negativo⁴².

$$\tau = \rho_a \times C_d \times |v|v \quad (3.8)$$

$$M = \frac{1}{\rho_w f_c} \tau \times \hat{\mathbf{k}} \quad (3.9)$$

$$B = \frac{1}{\rho_w f_c} (\nabla \times \tau) \quad (3.10)$$

$$EK_{total} = M + B_i \quad (3.11)$$

En que:

- τ : estrés del viento (en $[N/m^2]$).
- ρ_a : densidad del aire igual a $1,22 \text{ kg}/m^3$.
- C_d : coeficiente de resistencia neutra; se asume igual a 0,0013.
- v : magnitud del viento (en $[m/s]$).
- M : transporte de Ekman (en $[m^3/s]$).
- ρ_w : densidad del agua del mar; se asume igual a $1.024 \text{ kg}/m^3$

⁴² Aclaratoria: La ocurrencia de frentes, bajas segregadas y costeras, son concordantes con un transporte total de Ekman positivo. Sin embargo, se multiplica por -1 el transporte de Ekman para facilitar la comparación con el bombeo, por lo que influye en el resultado del transporte total de Ekman y cambia su signo para el análisis del presente trabajo, puesto que el transporte de Ekman es la contribución predominante de la dinámica de Ekman en PLdV (ver posteriormente la Figura 4.42 y su análisis)

- f_c : parámetro de Coriolis (valor negativo en el Hemisferio Sur).
- $\hat{\mathbf{k}}$: vector vertical unitario.
- $(\nabla \times \tau)$: rotor del estrés del viento, o sea, es la divergencia superficial en el océano al acercarse a la costa.
- B : bombeo de Ekman (en $[m^2/s]$); en MATLAB se realiza una integración numérica trapezoidal para transformarlo en unidades del transporte de Ekman (B_i) y sean comparables.
- EK_{total} : transporte total de la dinámica de Ekman.

De manera posterior, se analiza el decaimiento del viento a lo largo de trayectorias que atraviesan la costa de Chile: 49, 79, 109, 231, 261 y 291. Para ello, se utiliza el grillado gaussiano de los datos CFOSAT para simplificar el graficado del promedio longitudinal del viento y de la desviación estándar de todas las pasadas de cada trayectoria. Después, se escogen tres trayectorias de interés para revisar en detalle su perfil de viento promedio entre los años 2020 y 2022 en una extensión longitudinal de ~ 100 km y así visibilizar de mejor forma la caída del viento al acercarse a la costa.

3.5. Estimación de los parámetros de oleaje a partir de CFOSAT

Por último, en esta sección se procesan y analizan los parámetros de oleaje derivados de los instrumentos SWIM (espectro direccional del oleaje y sus parámetros) y SCAT (altura significativa de ola y viento) de CFOSAT, identificando las contribuciones del mar de fondo y mar de viento a partir de la configuración de los espectros de oleaje SWIM a lo largo y en frente de la costa de la región de estudio.

En esta etapa, se emplean las rutinas proporcionadas por AVISO+⁴³, implementadas en el lenguaje de programación Python⁴⁴, cuyas variables para el espectro de la ola se pueden dividir en tres partes: (1) espectro omni-direccional, (2) espectro de olas bidireccionales (2D) y sus particiones asociadas y (3) parámetros de la ola (parámetros integrales) del espectro de olas 2D y de las particiones asociadas. Estas variables se proporcionan en base a cada una de las observaciones de los haces de 6°, 8°, 10° y combinado (combinación de los tres haces, definido como “haz 0”), denominados como haces espectrales (Tison y Hauser, 2019).

Además, a estas rutinas de Python se les aplican modificaciones puntuales para adaptarlas a los objetivos específicos de la presente tesis, contribuyendo así a la mejora y optimización de las funcionalidades requeridas, tales como acotar la región de estudio, fijar los límites de del despliegue gráfico, unificar los perfiles de energía de la ola en uno solo, corregir la nomenclatura, entre otros ajustes.

⁴³ AVISO+ Satellite Altimetry Data. Python visualization tools for CFOSAT SWIM L1A/L1B/L2 products. [En línea] Disponible en: <https://aviso.altimetry.fr/en/missions/current-missions/cfosat/how-to-visualize-and-use-the-cfosat-data/python-visualization-tools-for-cfosat-swim-products.html>

⁴⁴ Python. [En línea] Disponible en: <https://python.org>

Por una parte, los espectros de oleaje representan la dirección de la ola y su longitud por cada *box*⁴⁵ de medición y para cada *nadir side*⁴⁶. En términos generales, existe una relación entre la longitud de la ola y su contribución. Por ejemplo, en el caso de las olas de menor longitud, caracterizadas por una mayor frecuencia (periodo más corto), estas se asocian a una contribución directa del viento. Por el contrario, olas con una mayor longitud, caracterizadas por una frecuencia más baja (período más alto), son características del *swell*, indicando que el origen del oleaje es remoto.

Se recalca que los espectros bidireccionales, complementados con los gráficos de la dirección dominante de la ola, permiten visualizar la energía y longitud de la ola por medio de sus particiones. Por ejemplo, la partición 1 representa la mayor longitud de onda y altura de ola, es decir que en la partición 1, el número de onda suele concentrarse al centro del espectro, por lo que se asocia a “influencia por *swell*”. Mientras que si la concentración del número de onda se extiende desde el centro del espectro hacia afuera, significa que es por “influencia del viento” (i.e. menor longitud de la ola).

En efecto, se establecen hasta tres particiones mediante el algoritmo de delimitación de cuencas hidrográficas, agrupando dentro de una grilla espacial los puntos más próximos a un máximo local y dividir el espectro de acuerdo a su distribución de energía, tal como se representa en la Figura 3.1 (Hanson y Phillips, 2001). Vale decir que, si bien, estos espectros son especulares⁴⁷, se puede identificar la dirección de la partición dominante a partir de la representación vectorial de la primera partición. Notar que el manual simplificado del producto SWIM explicita que a veces las particiones no son representativas y corresponden más bien a una caracterización del oleaje, además de entregar el valor de la SWH y su longitud de la ola (Hauser et al., 2021).

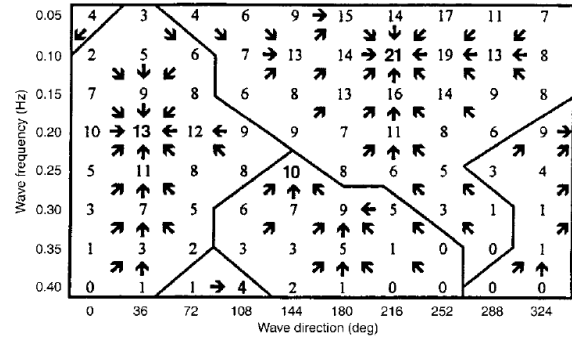


Figura 3.1: Demostración del método de partición espectral para una matriz plantilla con algunos puntos máximos intencionalmente ubicados. La flecha de cada número representa hacia dónde se encuentra su máximo local entre sus ocho valores vecinos (superior, inferior, izquierda, derecha y diagonales). Cuando las flechas se encuentran hacia un mismo máximo dentro de la grilla, se agrupan para formar una partición espectral. Imagen y explicación obtenidas de Hanson y Phillips (2001).

⁴⁵ Número de *box*: Es el número de la “caja” de visualización de la trayectoria, es decir, son las mediciones puntuales de CFOSAT a lo largo del recorrido y mide 70 x 90 km².

⁴⁶ *Nadir side*: Literalmente es el costado de la trayectoria de la medición nadir, es decir, una vez seleccionada una caja, se escoge el lado izquierdo (1: oeste) o derecho (0: este) de la trayectoria.

⁴⁷ Especular: Perteneciente o relativo a un espejo. Definición extraída de la Real Academia Española. [En línea] Disponible en: <https://dle.rae.es/especular>

Asimismo, el análisis detallado de estos espectros bidimensionales de oleaje permite observar que la partición 1 no solo engloba la mayor porción de SWH, sino que también abarca una extensión significativa en términos de longitud de onda. La relevancia de esta partición se refleja en la capacidad para incorporar la mayor porción de energía presente. La partición 2 se destaca al abordar la segunda sección de mayor energía en el espectro bidimensional del oleaje. A pesar de que la contribución de la partición 2 no es tan predominante como la de la partición 1, sigue siendo fundamental para obtener una visión completa de la distribución de energía en el sistema de oleaje estudiado. Se reitera que las particiones son sólo una representación, por ende, las particiones 1 y 2 logran abarcar una gran porción de energía en conjunto (para este trabajo, no será necesario tomar en cuenta la partición 3) y suelen tener una misma dirección de propagación. Por ende, ambas particiones logran revelar la magnitud de la altura de las olas y su longitud asociada. Además, estas dos primeras particiones proporcionan información valiosa sobre la dirección de propagación preferencial y la distribución de energía en distintas secciones del espectro bidimensional. Esto posibilita estimar las condiciones del mar y la contribución relativa del mar de fondo y del mar de viento. De hecho, mientras más al centro del espectro bidimensional se concentre el número de onda, implica una longitud de ola mayor y se relaciona a una contribución por mar de fondo. Sin embargo, si la energía se expande en el radio del espectro, la longitud de la ola va disminuyendo y se atribuye al mar de viento.

Por otra parte, los perfiles de energía son la representación unidimensional de los espectros de energía del oleaje (conocido en inglés como *Omni-directional wave spectra*, cuya unidad de medida es m^3/rad) de una determinada fecha para un *box* y haz en específico, con respecto al número de onda en (rad/m). En la ecuación 3.12 y en la Figura 3.2 se exhibe el paso bidimensional del espectro a unidimensional, descartando el ángulo de dirección de propagación de la ola.

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (3.12)$$

Estos perfiles de energía permiten identificar de mejor forma el tipo de contribución dominante del oleaje. De hecho, cuando esta contribución es por mar de viento, “sea cual sea el haz seleccionado (6° , 8° , 10° o combinado), si la energía de la ola es pequeña, se evidencia un ‘pico parásito’ (no relacionado con olas) en números de ondas pequeños... por lo que este ‘pico parásito’ se debe a la energía remanente asociada a la heterogeneidad del mar superficial”. Por ende, el salto de energía no se relaciona al oleaje en sí y que más bien se asocia al mar de viento (Xu et al., 2022). Además, su interpretación gráfica es cuando “el mar de fondo tendrá, por lo general, un espectro estrecho que concentrará la energía en una angosta franja de frecuencias (o longitudes de onda) en torno a un valor máximo” (Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2018). Por consiguiente, en el caso del mar de viento, el espectro abarcará un rango mayor de frecuencias o de longitudes de onda.

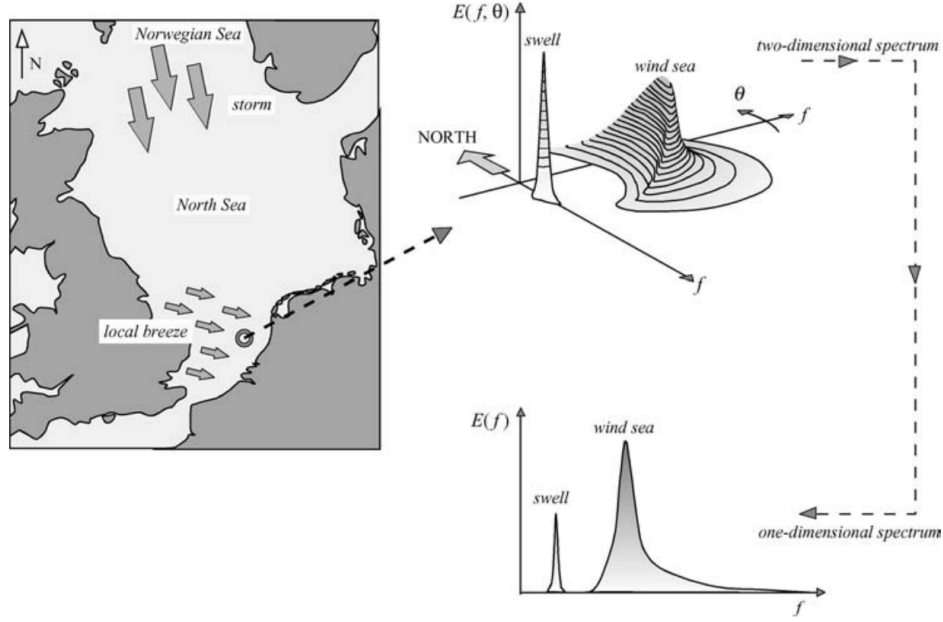


Figura 3.2: Representación del espectro de la ola bidimensional a unidimensional, particularmente frente a la costa holandesa cuando un oleaje del norte por mar de fondo, generado por una tormenta frente a la costa de Noruega, se encuentra con un mar de viento del oeste formado localmente. Imagen obtenida de [Holthuijsen \(2007\)](#).

Estos parámetros se definen de la siguiente manera, de acuerdo al manual de SWIM ([Tison y Hauser, 2019](#)) y a la guía de olas ([Organización Meteorológica Mundial \(OMM\), 2018](#)):

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (3.13)$$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \sqrt{\frac{g}{k}} \quad (3.14)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda} = \frac{\sqrt{kg}}{2\pi} \quad (3.15)$$

$$E(f) = \frac{\gamma g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-0.74 \left(\frac{g}{2\pi u f}\right)^4} \quad (3.16)$$

$$P_m(k, \phi) = \frac{2\pi}{L_y} \alpha^2(\theta) k^2 E(k, \phi) \quad (3.17)$$

$$L_y(\phi) = r \frac{\beta \phi}{2\sqrt{2 \ln 2}} \quad (3.18)$$

$$\alpha(\theta) = \cot \theta - \frac{1}{\sigma_0} \frac{\partial \sigma_0}{\partial \theta} = \cot \theta - 4 \tan(\theta) - \frac{1}{\cos^2(\theta)} \frac{\partial \ln[p(\tan(\theta))]}{\partial \tan(\theta)} \quad (3.19)$$

$$\text{SWH} = 4 \sqrt{E_{total}}, \quad \text{o bien: } \text{SWH}^2 = \text{SWH}_{wind\ sea}^2 + \text{SWH}_{swell}^2 \quad (3.20)$$

$$E_{total} = \int \int \frac{E_{part}(k, \phi) dk d\phi}{k} \quad (3.21)$$

En que:

- λ : longitud dominante de la ola (en $[m]$).
- k : número de onda (en $[rad/m]$).
- γ : cifra adimensional, igual a 0,0081.
- u : velocidad del viento superficial (en $[m/s]$).
- c : velocidad de la ola o velocidad de fase (en $[m/s]$).
- T : periodo de la onda (en $[s]$).
- g : gravedad de la Tierra (en $[m/s^2]$).
- f : frecuencia de la onda (en $[1/s]$).
- ϕ : dirección azimutal (en $[rad]$).
- θ : ángulo de incidencia hacia la superficie (en $[rad]$).
- $E(f)$: energía espectral de la ola (en $[m^2/s]$); esta puede estar en función al número de onda reemplazando la frecuencia ($E(k)$, espectro omni-direccional de la ola, en $[m^3/rad]$), según la ecuación 3.15.
- $P_m(k, \phi)$: modulación del espectro o partición.
- $E(k, \phi)$: espectro 2D de la altura de la ola.
- $k^2 E(k, \phi)$: espectro de la pendiente de la ola.
- $L_y(\phi)$: dimensión relacionada a la anchura del haz azimutal.
- $\alpha(\theta)$: expresión adimensional; también está en función del coeficiente de retrodispersión del radar (σ_0), pero si se asume que la retrodispersión puede representarse por el modelo de dispersión cuasi-especular, entonces $\sigma_0 \cos^4(\theta)$ es proporcional a $p(\tan \theta)$, donde p es la función de densidad de probabilidad (conocida como PDF en inglés) de las pendientes de superficie evaluada para la condición especular.
- r : distancia radial al haz central.
- β : antena de 3dB de ancho del haz azimutal (unidireccional).
- SWH: altura significativa de la ola; la primera equivalencia es una representación por las particiones del espectro de oleaje (Tison y Hauser, 2019); la segunda es la definición convencional (Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2018).
- E_{total} : energía total en la partición.
- E_{part} : densidad de energía del espectro de pendientes, restringida a una partición o al espectro completo.

En base a todo lo anterior, se comienza a definir las fechas y horas en que la trayectoria 184 CFOSAT aparece frente a la región de estudio, luego se busca el archivo NetCDF, el cual se identifica por su nombre de archivo, por ejemplo:

CFO_OP05_SWI_L2_____F_20200913T111431_20200913T124714.nc

Este contiene los datos SWIM de nivel L2 del día 13/09/2020 entre las 11:14 y 12:47 UTC, hora aproximada en que pasa la trayectoria 184 frente a las costas de Chile. Seguidamente, con las rutinas de Python se establece el *box*, se fija su *nadir side* como 0 y, por simplicidad, se utiliza el haz combinado (igual a 0). De este modo, se grafican el espectro bidimensional de oleaje, el mapa de la trayectoria CFOSAT seleccionada con la dirección de la ola y el perfil de energía con respecto al número de onda (*wave number*)⁴⁸. Con estas condiciones ya definidas, se buscan las fechas de interés.

⁴⁸ Número de onda: Este está asociado al largo de la ola (*wavelength*, λ), ya que se define como $2\pi/\lambda$.

Capítulo 4

Resultados, análisis y discusión

En la presente sección, se muestran los resultados obtenidos junto con sus descripciones y análisis. Estos se dividen en cinco subsecciones para cumplir con los objetivos de esta investigación: exploración de las mediciones CFOSAT; validación, comparación y cálculo de datos estadísticos entre CFOSAT con otras misiones satelitales y con modelos de viento y oleaje; caracterización de eventos de viento intenso por medio de los modos de variabilidad; estudio de la dinámica de Ekman a partir de las observaciones CFOSAT y, finalmente, revisión de los espectros de oleaje que podrían estar asociados a cierres de puerto.

A continuación, se enumeran tres notas a considerar para esta sección:

- **Nota 1:** En las figuras generadas con MATLAB, las tildes son intencionalmente omitidas. También en los gráficos de MATLAB se mantienen los puntos para los decimales, no así para el informe mismo y las tablas, en las que se utilizan las comas.
- **Nota 2:** Los gráficos generados en Jupyter Notebook sobre los espectros de oleaje (códigos Python creados por CFOSAT para visualizar su producto SWIM L1A/L1B/L2), por defecto, están en inglés, idioma que se mantendrá solamente en las figuras.
- **Nota 3:** En los gráficos o mapas, las longitudes se mantendrán en °W (*West*, u Oeste en inglés), que es la denominación por defecto que tienen MATLAB o Python, pero en el informe se tratará de conservar un mismo idioma, es decir, el castellano (°O, por ejemplo).

4.1. Exploración de datos

Las mediciones CFOSAT vienen en formato de archivo NetCDF⁴⁹, cuyo almacenamiento es multidimensional que permite guardar múltiples variables, tales como latitud, longitud, tiempo, magnitud del viento, altura significativa de la ola, etc. Al ser mediciones por milisegundo, hay 18 archivos por día, por lo que los datos requieren una estructuración previa por variable de interés y de una revisión de sus indicadores de calidad. De esta manera, se crea una matriz ordenada de datos por año, debido a la abundancia de archivos involucrados, pero abarcando el periodo definido entre 2020 y 2022. Posteriormente, se procede a la

⁴⁹ Unidata. Network Common Data Form (NetCDF). [En línea] Disponible en: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf>

concatenación de estas matrices anuales, así facilitar la exploración de la cantidad disponible en la región de estudio.

Tabla 4.1: Estadística asociada a los datos procesados de CFOSAT (periodo 2020-2022 entre 18°S–45° S y 70°O–90°O).

Cantidad de datos brutos	Total	3.652.328	100 %
	Año 2020	1.216.898	
	Año 2021	1.210.484	
	Año 2022	1.224.946	
Cantidad de datos válidos, tanto para viento como para oleaje	Total	3.338.177	91,40 %
	Año 2020	1.112.435	91,42 %
	Año 2021	1.104.433	91,24 %
	Año 2022	1.121.309	91,54 %

La Tabla 4.1 es la estadística base de las mediciones nadir de CFOSAT, a partir de los datos “brutos”, pues sólo se procesaron por periodo de tiempo (entre los años 2020 y 2022) y por espacio (latitud: 18°S–45° S; longitud: 70°O–90°O). Posteriormente, se estructuran estos datos para considerarlos como “válidos”: se eliminan los datos nulos y los que no aprueben el indicador de calidad, entregando que un ~ 91 % de los datos son válidos, ya sea en total en el periodo de estudio o por año. Esto garantiza una buena precisión de medición por parte de CFOSAT y, por consiguiente, esta es la porción de datos que se utilizan para los siguientes pasos.

Tabla 4.2: Porcentaje de datos CFOSAT por trayectoria (periodo 2020-2022).

Trayectorias pares			Trayectorias impares		
Nº track	% de datos	Cant. datos	Nº track	% de datos	Cant. datos
2	0,38 %	12.611	19	5,09 %	169.989
34	1,72 %	57.416	49	4,42 %	147.518
64	4,37 %	145.996	79	2,96 %	98.791
94	5,03 %	167.849	109	0,99 %	32.993
124	5,15 %	171.886	111	0,84 %	28.119
154	5,01 %	167.251	141	3,42 %	114.273
184	4,59 %	153.057	171	4,89 %	163.151
214	0,0003 %	10	201	5,01 %	167.127
246	3,08 %	102.877	231	4,97 %	165.961
276	5,19 %	173.263	261	3,27 %	109.251
306	5,25 %	175.332	291	1,95 %	64.953
336	5,13 %	171.239	323	2,10 %	69.979
366	5,25 %	175.315	353	5,06 %	168.832
-	-	-	383	4,89 %	163.138
En resumen:					
Cant. total de tracks		% total de datos		Cant. total de datos	
27		100,00 %		3.338.177	

La Tabla 4.2 presenta la estadística detallada de cada trayectoria a lo largo del periodo de estudio de tres años, en la región de interés. Esta tabla revela el porcentaje y la cantidad de datos por *track* en relación con el total de mediciones válidas, que alcanzó un número de 3.338.177. Proporciona una visión detallada de la distribución y el peso de cada trayectoria en el conjunto de datos analizados durante el periodo de estudio.

La Figura 4.1 representa las 27 trayectorias –de 394– de CFOSAT que pasan por la zona de interés y, cada una de ellas, tiene un número de *track* asociado. Las trayectorias en dirección sureste a noroeste son las *tracks* impares, las que se denominan como ascendentes o “cuasi perpendiculares” a la costa. Las trayectorias en dirección noreste a suroeste son las *tracks* pares (descendientes o “paralelas” a la costa). En particular, 13 trayectorias son pares (una de ellas, la n° 214, pasa sobre el continente, tal como se muestra con las líneas punteadas) y 14 impares. Cabe destacar que hay algunas líneas “separadas” en cada trayectoria, dado que el recorrido no es 100% homogéneo (ver ejemplo en Figura 4.2).

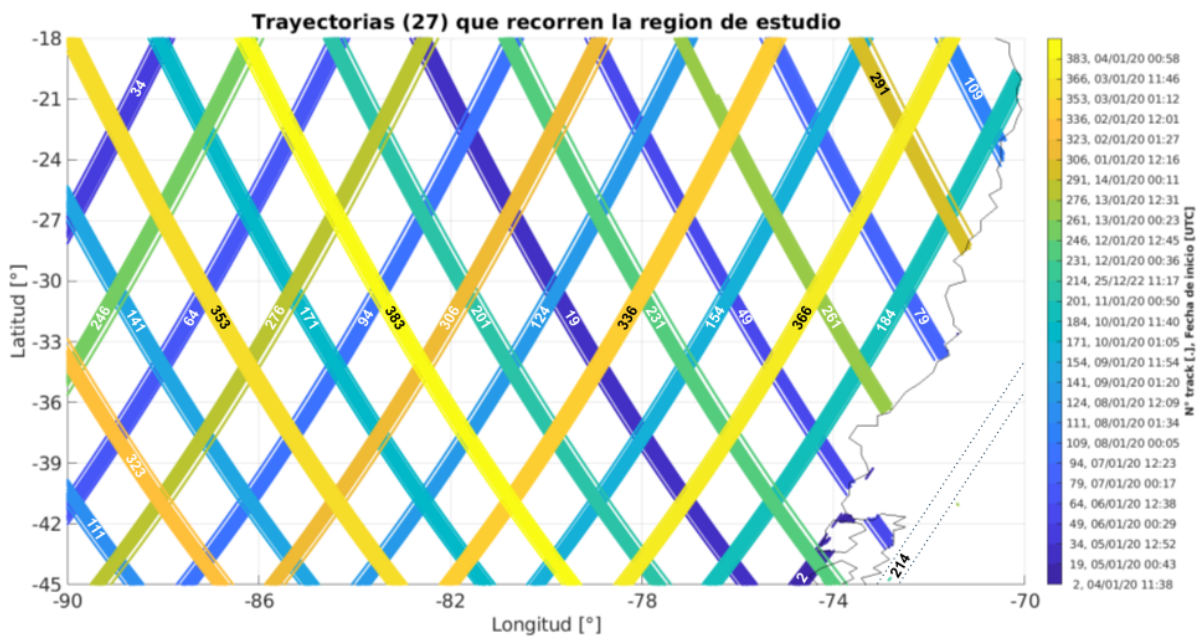


Figura 4.1: Representación de las 27 *tracks* de CFOSAT que recorren la región de estudio.

Además, los recorridos siguen un patrón cronológico específico: comienzan con una trayectoria par, luego continúan con una impar, aumentando secuencialmente. En este ciclo particular se inicia de la siguiente manera:

- La primera *track* es la par número 306 el 1 de enero de 2020 a las 12:16 hrs.
- La segunda es la impar número 323 el 2 de enero de 2020 a la 01:27 hrs.
- Prosigue hasta la *track* número 383 el 4 de enero de 2020 a las 00:58 hrs.
- Después de este punto, el conteo reinicia con la trayectoria 2 el día 4 de enero de 2020 a las 11:38 hrs.
- Luego, el patrón de incremento continúa con las trayectorias 19, 34, 49, y así sucesivamente, sin interrupción.

En efecto, al estudiar de cerca una trayectoria cualquiera, cada *track* tiene una cierta dispersión longitudinal, o sea, no siempre pasa exactamente en los mismos puntos. De hecho, al optar por una de las trayectorias con mayor porcentaje de datos (n° 306, con más del 5 % de disponibilidad) para 10 ciclos, se revela que no existe una sucesión predefinida para el recorrido (ver Figura 4.3). En particular, la *track* 306 inicia temporalmente en el ciclo 33 y finaliza en el 43, sin embargo, la secuencia de los ciclos de derecha a izquierda (este a oeste) es: 40, 41, 39, 42, 33, 43, 38, 34, 37, 35 y 36. Esto indica que la ruta de esta trayectoria es más bien aleatoria, aunque con la premisa de permanecer dentro del rango establecido, el cual se limita a no más de 51,93 km ($0,47^\circ$) de anchura zonal.

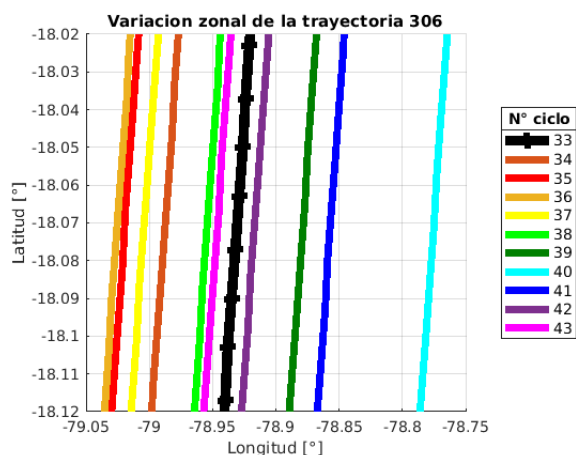


Figura 4.2: Variación zonal de una trayectoria en particular.

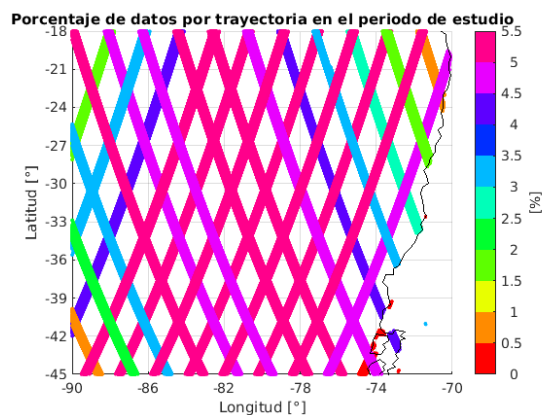


Figura 4.3: Representación del porcentaje de datos por trayectoria durante el periodo de estudio.

La Figura 4.3 muestra el porcentaje de datos por trayectoria entre los años 2020 y 2022. Es posible notar que el mayor porcentaje de datos corresponde a las trayectorias de mayor extensión dentro de la región de estudio, y viceversa. En específico, se detalla lo siguiente:

- La trayectoria 214 representa casi el 0 % de disponibilidad de datos, pues pasa justo “sobre el continente”, cuya zona en la que las variables se consideran nulas. De hecho, la Tabla 4.2 indica que esta *track* contiene 10 datos, los cuales han de corresponder al Río Uspallante de la Región de Aysén en Chile (aprox. entre 44°S – 45°S y 72°O – 73°O), por lo tanto, estas mediciones no son consideradas.
- La trayectoria 231 mide sobre una “isla” en 44°S y 74°O , sin embargo, se trata de los fiordos de la Región de Aysén, por ende, los datos en este sitio tampoco han de considerarse para el estudio.
- La trayectoria 261 también mide sobre un cuerpo de agua (41°S y 71°O aprox.), correspondiente al río Neuquén (o Río Negro) del Parque Nacional Nahuel Huapi en Patagonia. En consecuencia, se anulan las mediciones en este punto.
- Las trayectorias que representan menos del 1 % de datos son (orden de enumeración: desde más al este hacia el oeste):
 - Pares o “paralelas”: 214 y 2.
 - Impares o “perpendiculares”: 109 y 111.

- Las trayectorias con más del 4,5 % de datos son (orden de enumeración: desde más al este hacia el oeste):
 - “Paralelas”: 184, 366, 154, 336, 124, 306, 94 y 276.
 - “Perpendiculares”: 231, 19, 201, 383, 171 y 353.

Por una parte, las trayectorias paralelas de mayor interés son las “más cercanas a la costa” (de este a oeste: 184, 366, 154 y 336), debido a que contienen el mayor porcentaje de disponibilidad. Estas sirven para mostrar cómo fluctúan las variables (viento y oleaje) a lo largo de la costa de Chile. Por otra parte, las trayectorias perpendiculares de mayor interés son las que alcanzan a cruzar la costa chilena (de sur a norte: 231, 49, 261, 79, 291 y 109). Estas son de utilidad para evaluar el decaimiento del viento al acercarse a la costa y favorecer la comprensión de la circulación atmosférica, tanto en mar abierto como cerca de la costa de Chile, y de la dinámica de Ekman.

De manera simplificada, se grafican el viento promedio y la SWH promedio (ver Figura 4.4) por trayectoria cada $0,25^\circ$ grados de latitud entre los años 2020 y 2022 en la región de estudio, omitiendo las mediciones sobre el continente y en medio de la Isla de Chiloé (aprox. entre 41°S – 45°S y 72°O – 74°O). Exploratoriamente, se infiere lo siguiente:

- Al norte de Chile, entre las latitudes 18°S – 27°S aproximadamente, a 70°O – 74°O de longitud, los vientos promedios son menores a 6 m/s y la SWH es cercana a 2 m .
- Entre los 27°S y 39°S , el viento promedio es más intenso (entre los 6 y 8 m/s , y en algunos segmentos rondan entre los 5 y 9 m/s), particularmente entre los 72°O y 78°O que es de 7 m/s , zona coincidente con la estructura del LLJ. También, la SWH promedio es de 3 metros.
- Al sur de Chile, entre las latitudes 39°S y 45°S , el viento y la SWH promedios superan los 8 m/s y 4 m , respectivamente, acorde al cordón de tormentas del régimen de los oestes en latitudes medias.
- De las trayectorias “perpendiculares” que cruzan la costa, se visualiza la disminución del viento al aproximarse a esta. Por ejemplo, la trayectoria 79 (cruza el continente entre 33°S – 34°S y $71,5^\circ\text{O}$) presenta casi 1 o 2 m/s de decaimiento en promedio en 100 km ($\sim 1^\circ$ de longitud) de lejanía de la costa.
- En general, el mapa de la SWH promedio es un poco más homogéneo que el mapa del viento promedio, debido a que el viento cuenta con una mayor variabilidad meteorológica. Además, se asume que el oleaje tiene un tiempo de respuesta más tardío, al menos para la productividad biológica en el sistema de la Corriente de Humboldt durante eventos de surgencia (Aguirre, Garreaud, et al., 2021).

Hasta el momento, se desprende que los datos CFOSAT son concordantes a la teoría, por lo que se prosigue a su validación y comparación con otras misiones satelitales y con modelos de referencia para el viento y el oleaje.

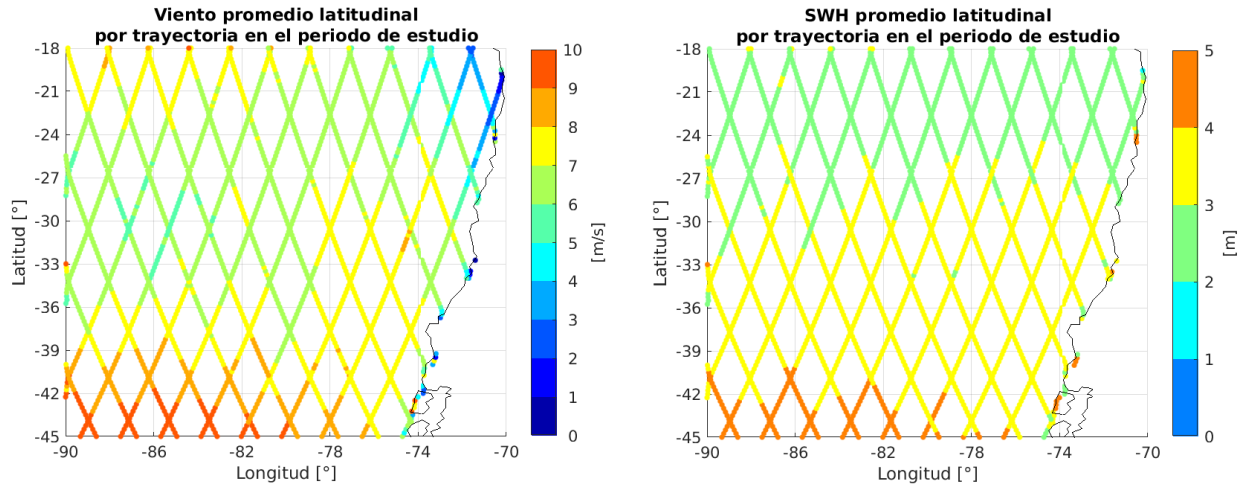


Figura 4.4: Viento promedio y SWH promedio por trayectoria durante el periodo de estudio para representar la variabilidad latitudinal.

4.2. Validación, comparación y estadística

Una vez procesadas y estructuradas las mediciones nadir CFOSAT, además de haber seleccionado las aprobadas por el indicador de calidad asociada a estas, se validan comparándolas con los datos de otras misiones satelitales que miden individualmente la SWH y el viento a 10 metros para la región de estudio. En efecto, como criterio de comparación entre las observaciones CFOSAT y las mediciones Sentinel-6A, Jason-3 y ASCAT, se utiliza una medida de cercanía temporal de 30 minutos y espacial de $\sim 12,5 \text{ km}$ para el oleaje y $\sim 7,5 \text{ km}$ para el viento. Este último es de menor distancia, puesto que la resolución espacial de ASCAT es mayor que la de Sentinel-6A y Jason-3. Del mismo modo, los pares de observaciones coincidentes que cumplen con los requerimientos de proximidad espacial y temporal son adicionalmente filtrados.

En particular, la Figura 4.5 representa la comparativa de SWH entre CFOSAT y las misiones satelitales de altimetría: (Izq.) Sentinel-6A y (Der.) Jason-3. Se aprecia una buena validación de SWH, con errores promedio menores a $0,59 \text{ m}$ en ambas misiones, y correlaciones lineales sobre el 77%. Otro punto a recalcar es que hay una concentración de datos (cerca del 60%) entre 2 y 3 m y, a partir del sesgo medio o MBE, Sentinel-6A tiene una SWH levemente más alta que en CFOSAT, mientras que en Jason-3 es un poco más alta que en Sentinel-6A ($4,5 \text{ mm}$). Por lo tanto, se puede concluir que gran parte de los datos de SWH de CFOSAT son concordantes con las mediciones de Sentinel-6A y Jason-3, sin embargo, la comparativa con Jason-3 tiene un mejor acuerdo con mayor correlación. Notar que el número de comparaciones difiere en cada caso con 19.115 y 29.722 coincidencias al validar con Sentinel-6 y Jason-3, respectivamente (ver Tabla 4.3 y Tabla 4.4).

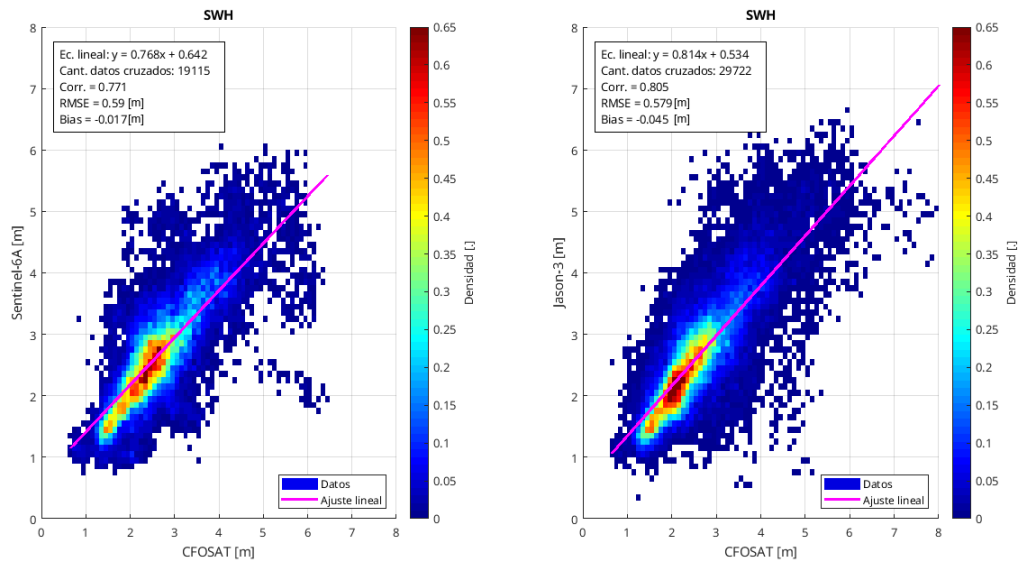


Figura 4.5: Validación de los datos de altura significativa de ola (SWH su sigla en inglés) entre CFOSAT y otras misiones satelitales: Sentinel-6A (**izquierda**) y Jason-3 (**derecha**), entre los años 2021 y 2022 en todo el dominio espacial de estudio. Las rectas magenta representan el ajuste lineal de la dispersión de datos.

Análogamente a la Figura 4.5 de la SWH, se validan las mediciones CFOSAT con los datos de viento de ASCAT (satélite que sólo mide dicha variable).

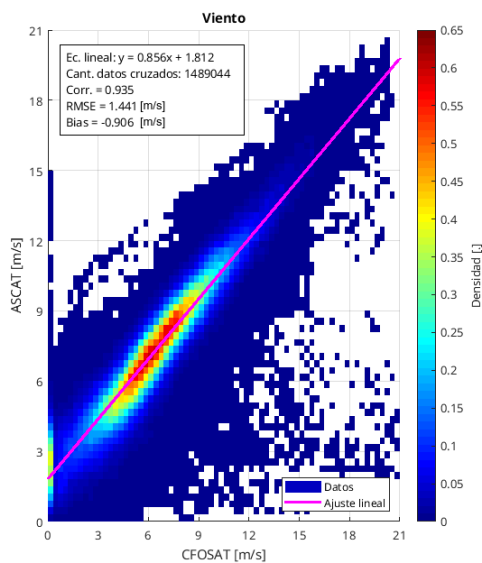


Figura 4.6: Validación de los datos de magnitud de viento entre CFOSAT y ASCAT, entre los años 2021 y 2022 en todo el dominio espacial de estudio. La recta magenta representa el ajuste lineal de la dispersión de datos.

La Figura 4.6 también representa la comparativa de datos entre ambos satélites, en las que hay 1.489.044 coincidencias. En ella, se tiene una buena validación de la magnitud del viento, es decir, los errores promedio son menores o iguales a $\sim 1,4 \text{ m/s}$ y la correlación supera el 93%. Además, hay una concentración de datos sobre el 50% entre los 6 y 9 m/s aproximadamente. Asimismo, se destaca que, a partir del MBE (o *bias*), ASCAT tiene una magnitud del viento levemente más alta que CFOSAT ($\sim 0,9 \text{ m/s}$). Por ende, se infiere que los datos de la magnitud del viento de CFOSAT con ASCAT son también concordantes, principalmente por su alta correlación y baja RMSE, es decir, CFOSAT se podría considerar como un buen instrumento por la precisión de sus mediciones (ver Tabla 4.5).

La Figura 4.7 representa la dispersión de datos –a modo de correlación– entre CFOSAT y

Tabla 4.3: Estadística de las mediciones de la ola de Sentinel-6A en [m] con respecto a los datos CFOSAT.

Datos en rango	Correlación	MBE
19.115	77,1 %	-0,02
Ec. del ajuste lineal	RMSE	STD
$y = 0,77*x + 0,64$	0,59	0,44

Tabla 4.4: Estadística de las mediciones de la ola de Jason-3 en [m] con respecto a los datos CFOSAT.

Datos en rango	Correlación	MBE
29.722	80,54 %	-0,05
Ec. del ajuste lineal	RMSE	STD
$y = 0,81*x + 0,53$	0,58	0,42

Tabla 4.5: Estadística de las mediciones del viento ASCAT en [m/s] con respecto a los datos CFOSAT.

Datos en rango	Correlación	MBE
1.489.044	93,47 %	-0,91
Ec. del ajuste lineal	RMSE	STD
$y = 0,86*x + 1,81$	1,44	0,87

los modelos de viento (ERA5) y oleaje (CMEMS) para verificar si CFOSAT logra representar la dinámica océano-atmósfera en las regiones de viento intenso (≥ 5 m/s).

La cantidad de datos en rango es mayor para el viento que para la SWH, debido a la disponibilidad de datos con los modelos, es decir:

- Viento: considera los años 2020, 2021 y 2022, es por esto que el gráfico muestra una dispersión de datos mucho más amplia.
- SWH: sólo considera los años 2021 y 2022. De hecho, el producto escogido de CMEMS no cuenta con datos de alta resolución espacial antes de 2021.

Por cierto, existe una alta correlación entre los modelos ERA5 (>91 %) y CMEMS (>99 %) con CFOSAT, con RMSE reducidos ($\sim 1,47$ m/s y $\sim 0,12$ m, respectivamente), sesgos ligeramente positivos ($\sim 1,02$ m/s y $\sim 0,07$ m). La desviación estándar del oleaje es cuasi nula ($\sim 0,07$ m), a diferencia del viento que es de $\sim 1,05$ m/s, pero igualmente es baja, por lo que las mediciones CFOSAT siguen siendo similares al modelo. Por tanto, los datos CFOSAT se ajustan bien a los modelos (ver Figura 4.7 y Tabla 4.6 y 4.7).

De manera general, se destaca la consistencia de CFOSAT, tanto en la representación de las olas como en el viento, debido a que revela una sólida validación con correlaciones elevadas y respaldada por bajos sesgos y de RMSE, lo que permite aseverar que las mediciones simultáneas CFOSAT pueden ser de utilidad para la comprensión de la interacción entre el oleaje y el viento frente a las costas de Chile. Por ende, CFOSAT destacaría por su fiabilidad para estudios oceanográficos y atmosféricos en regiones de viento intenso.

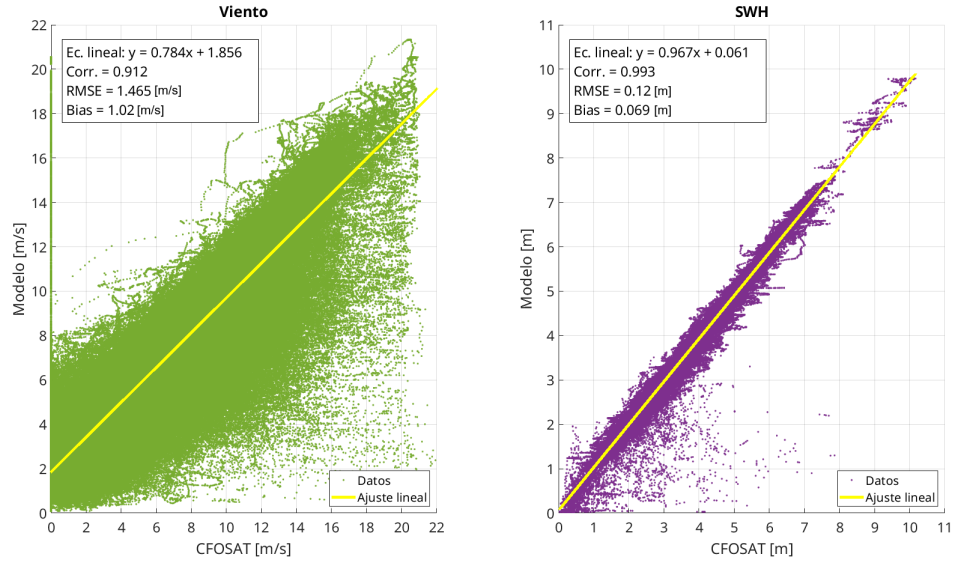


Figura 4.7: Diagramas de dispersión entre CFOSAT y modelos: ERA5 y CMEMS, respectivamente. **(Izquierda)** Datos de viento. **(Derecha)** Datos de SWH.

Tabla 4.6: Estadística del modelo de viento (ERA5) en $[m/s]$ con respecto a los datos CFOSAT.

Datos en rango	Correlación	MBE
3.338.177	91,18 %	1,02
Ec. del ajuste lineal	RMSE	STD
$y = 0,78 * x + 1,86$	1,47	1,05

Tabla 4.7: Estadística del modelo de ola (CMEMS) en $[m]$ con respecto a los datos CFOSAT.

Datos en rango	Correlación	MBE
1.148.937	99,25 %	0,07
Ec. del ajuste lineal	RMSE	STD
$y = 0,97 * x + 0,06$	0,12	0,07

4.3. Modos de variabilidad en el régimen de circulación costera y oceánica en el Pacífico Sudeste

Esta parte del estudio se realiza a partir de los datos de viento de ASCAT y ERA5⁵⁰ por medio de la técnica EOF, desde el 1 de enero de 2008 hasta el 31 de diciembre 2022, y reduciendo los límites latitudinales y longitudinales. Esto con el fin de observar de mejor forma los chorros costeros frente a las costas de Chile Central, es decir, entre 24°S y 40°S y entre 70°O y 80°O, porque, al mantener los límites iniciales (18°S y 45°S; 70°O y 90°O), los modos de variabilidad representaban mayoritariamente el Anticiclón del Pacífico.

A modo de exploración, se calculan los tres primeros EOF normalizados de las Anomalías Intra-Estacionales⁵¹ de la magnitud del viento (Figura 4.8) y del viento meridional (Figura 4.9). En el primer caso, se captura un 47% de la variabilidad del viento con el primer modo (EOF1), mientras que en el segundo caso se captura un 59%.

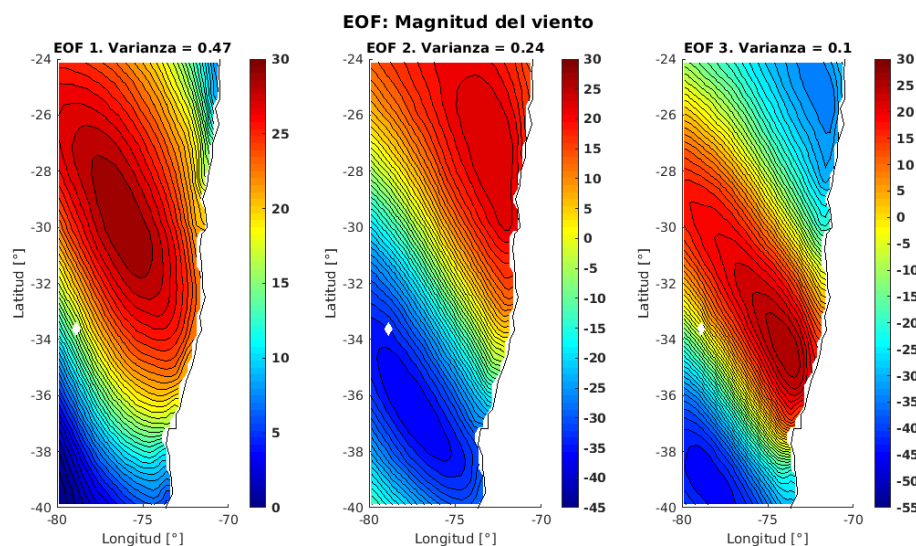


Figura 4.8: Modos de variabilidad normalizados para la magnitud del viento, a partir de los datos ASCAT y ERA5, en escala adimensional. El primer modo (EOF1) captura un 47% de la varianza, mientras que el segundo modo (EOF2) lo hace en un 24%. La utilidad de estos mapas es para identificar la región del LLJ frente a las costas de Chile.

⁵⁰ Cabe recordar que, a partir de los dos últimos satélites lanzados de ASCAT (MetOp-B y MetOp-C) y del modelo ECMWF, se obtiene el campo horario del viento superficial del mar.

⁵¹ El periodo a considerar es de todos los meses entre los años 2008 y 2022 (se definirá como “generalizada”). Se graficó igualmente por estación del año por separado (Figuras A.1 y A.2 en Anexos), pero no muestra mayores diferencias a la generalizada, tanto en el patrón como en la varianza.

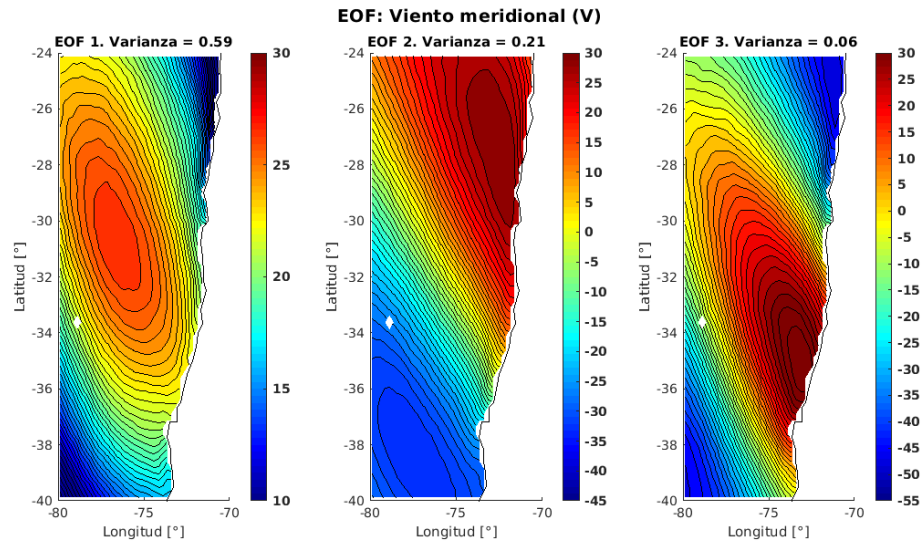


Figura 4.9: Modos de variabilidad normalizados para el viento meridional, en escala adimensional. El primer modo (EOF1) captura un 59 % de la varianza, mientras que el segundo modo (EOF2) lo hace en un 21 %.

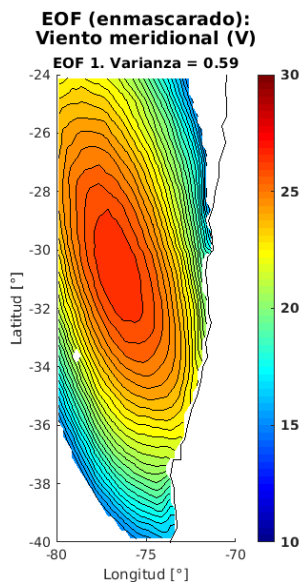


Figura 4.10: Modo de variabilidad 1 para el viento meridional, seleccionando sólo la región de interés para mostrar el patrón espacial de la varianza del chorro explicada por este modo.

En la Figura 4.10 se realiza el patrón espacial (típico de un chorro) del EOF1 del viento meridional que captura el 59 % de la variabilidad del viento norte-sur (mayor a la del EOF1 de la magnitud del viento). Este patrón se extiende a lo largo de la costa y abarca los dos mayores focos de surgencia: Punta Lengua de Vaca (PLdV, $\sim 30^{\circ}\text{S}$) y Punta Lavapié (PLP, $\sim 37^{\circ}\text{S}$). Dicho esto, se define como primer criterio para la identificación de eventos de viento intenso, aquellos períodos en que el valor de la primera componente principal (PC1) supere el cuartil 75 % de la distribución de los valores de PC1, que capturan el mayor porcentaje de varianza.

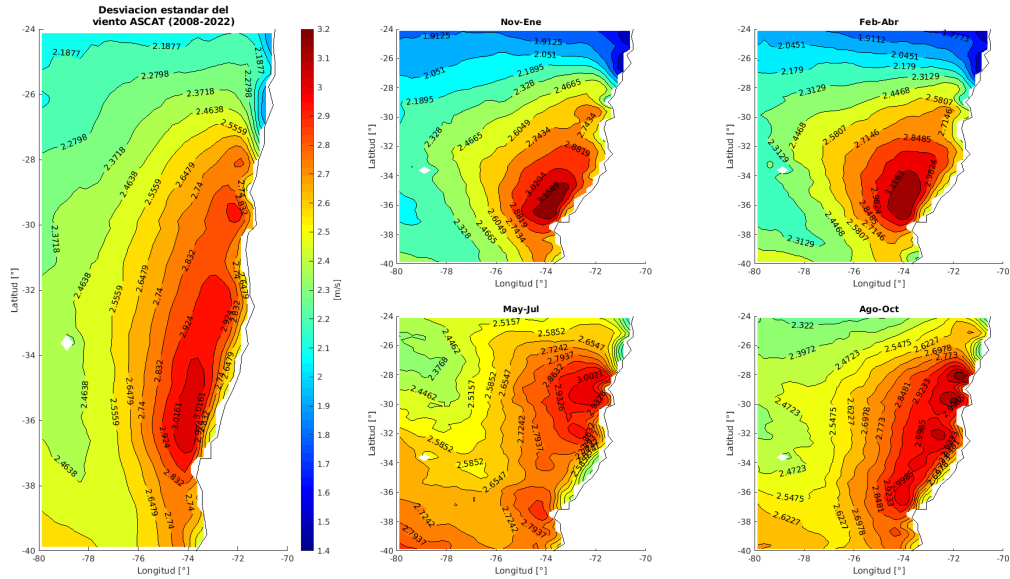


Figura 4.11: **(Izquierda)** Mapa de la desviación estándar “climatológica”^a de la magnitud del viento, con datos ASCAT entre los años 2008 y 2022. **(Centro y derecha)** Los recuadros pequeños corresponden exclusivamente a los meses estacionales dentro del periodo de años mencionados, es decir, Nov-Ene para verano, Feb-Abr otoño, May-Jul invierno y Ago-Oct primavera.

^a Se subentiende que, en este contexto, “climatológica” hace referencia a un intervalo extenso de años (particularmente a 15 años), en lugar del periodo histórico de 30 años.

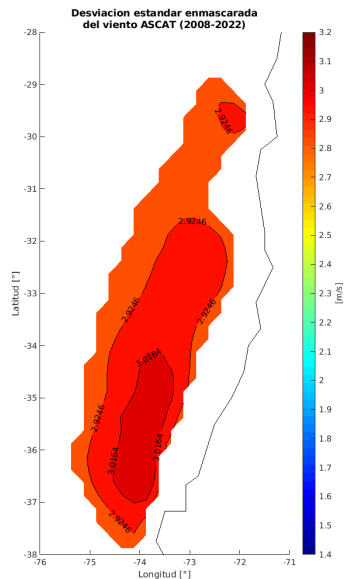


Figura 4.12: Análoga a la Figura 4.11, pero seleccionando sólo la región de interés para establecer el criterio 2.

Posteriormente, se genera el mapa de desviación estándar para la magnitud del viento (Figura 4.11, costado izquierdo). Esto con el fin de tener una representación gráfica de la dispersión o variabilidad de los datos en la región de estudio y, así, definir un segundo criterio de identificación de eventos de viento intenso. Se establece un umbral $\sigma \geq 2,832$ *m/s* para definir el área a promediar (ver Figura 4.12), el cual toma en consideración los dos focos de surgencia de interés (PLdV y PLP). Luego, se calcula el promedio diario de la magnitud del viento y su componente meridional dentro de esta área, seleccionando las fechas que sobrepasan el cuartil 75 % de la serie de tiempo correspondiente. Este proceso se define como segundo criterio para identificar los EVI.

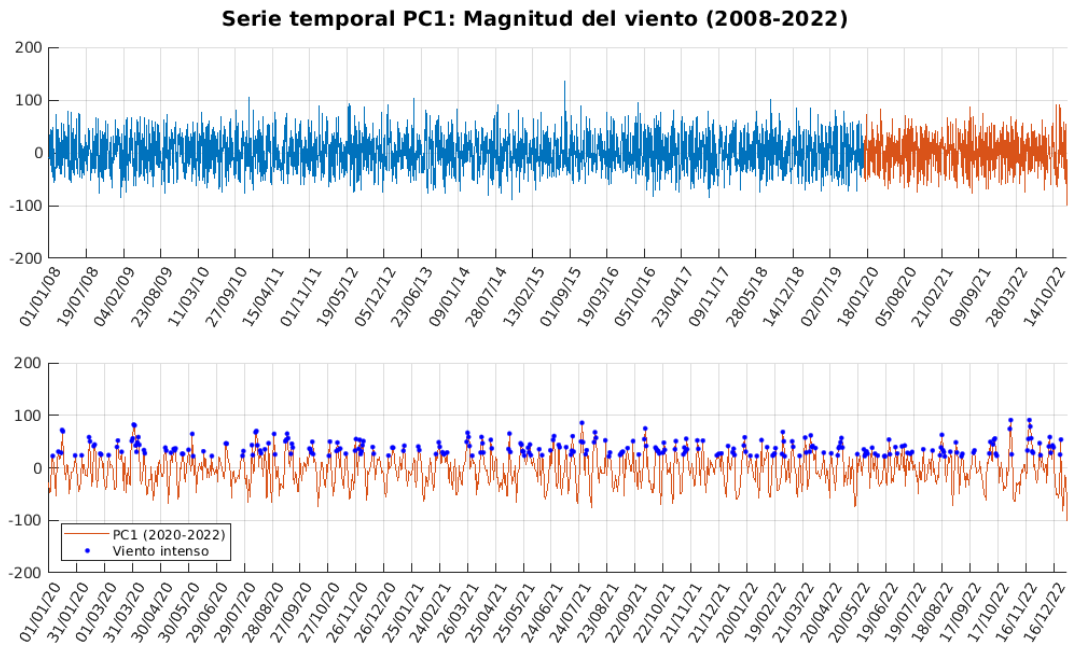


Figura 4.13: Series temporales de la primera componente principal (PC1) de los datos de la magnitud del viento de ASCAT. El primer perfil representa el PC1 desde el 2008 hasta el 2021. El segundo corresponde al periodo de tiempo ASCAT coincidente con los datos de CFOSAT (desde 2020 hasta 2022) con las fechas que se consideran como eventos de viento intenso (EVI) destacadas con puntos azules (superan el cuartil 75 % (Q) del PC1).

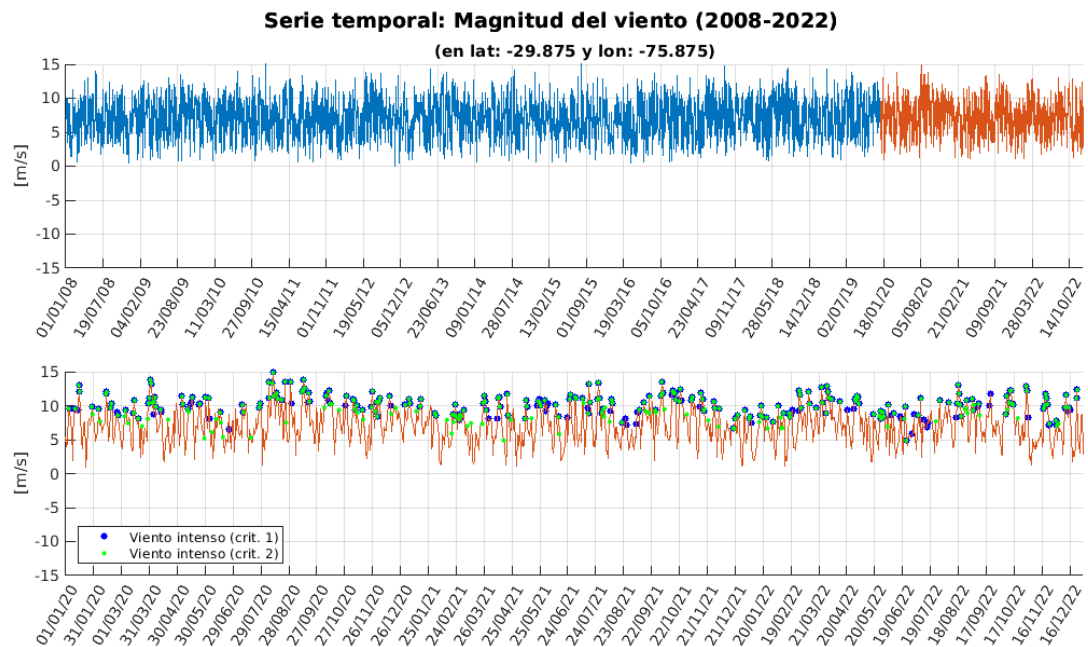


Figura 4.14: Series temporales de la magnitud del viento en el centro del EOF1, señalando las fechas EVI en el periodo CFOSAT que cumplan con superar el cuartil 75 % del PC1 (criterio 1). Los puntos verdes muestran los casos en que la magnitud del viento excede un umbral definido (criterio 2).

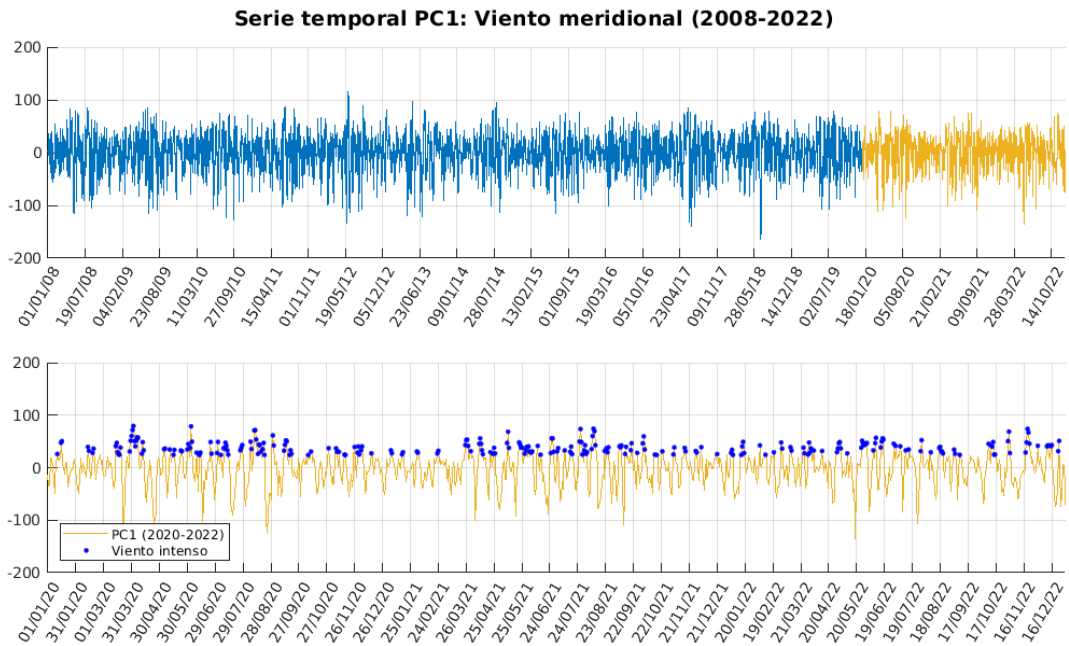


Figura 4.15: Análoga a Figura 4.13, pero con datos del viento meridional ASCAT.

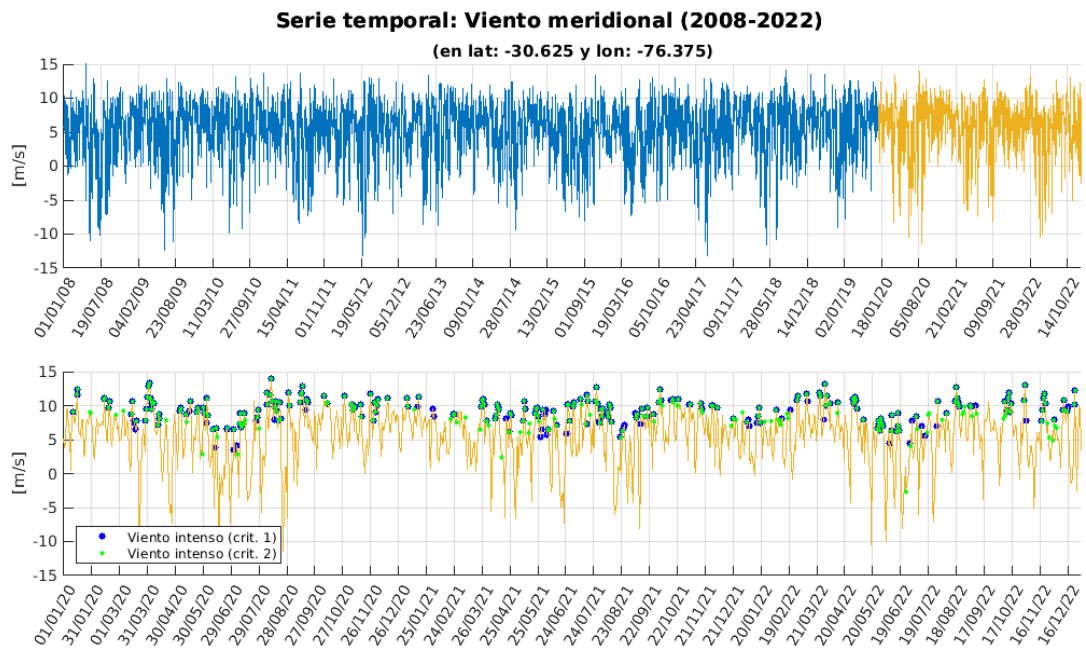


Figura 4.16: Análoga a Figura 4.14, pero con datos del viento meridional ASCAT.

Los mapas pequeños de la Figura 4.11, ubicados al centro y al costado derecho, son sólo una representación por estación de la desviación estándar (STD su sigla en inglés) para la magnitud del viento ASCAT en el período 2008-2022. Solamente son para mostrar los meses que definen cada estación del año⁵²: noviembre a enero para verano, febrero a abril para otoño, mayo a julio para invierno y agosto a octubre para primavera. Grosso modo, si se toma como referencia los $\sim 2,7 \text{ m/s}$, la intensidad del viento se concentra mayoritariamente en el sur, cercano a PLP, durante verano y otoño. También muestra la extensión del chorro que es en casi toda la región (abarcando PLdV y PLP) durante otoño e invierno. Inclusive, entre mayo y octubre se identifican algunos CLLJ frente a las bahías que están orientadas hacia el noroeste, tales como Punta de Choros, Punta Lengua de Vaca y Punta Lavapié (Garreaud et al., 2011).

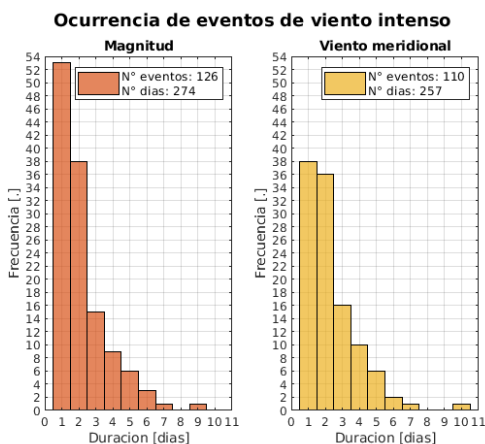


Figura 4.17: Representación de la ocurrencia de eventos de viento intenso que superan el cuartil 75 % entre los años 2020 y 2022, según el PC1 para la magnitud del viento y el viento meridional. A modo de ejemplo: en el caso del viento meridional, hay 1 sólo evento de viento intenso que duró 7 días y hubo 36 eventos de 2 días de duración.

Los eventos de chorro se encuentran aplicando estos dos criterios por separado: Primero, seleccionar en PC1 aquellos días que superan el cuartil 75 % (días destacados en azul de la Figura 4.13 y 4.15). Segundo, filtrar las fechas en que el promedio diario de la magnitud y de la componente meridional del viento (V_y) superan el cuartil 75 % de la serie de tiempo de cada variable (días destacados en verde de la Figura 4.14 y 4.16). De manera general con ambos métodos, se destaca que estos eventos también son coincidentes con las direcciones del viento de los chorros costeros que provienen del sur, puesto que los valores de V_y son positivos.

El segundo filtro sólo se contempla para visualizar si los eventos de viento intenso están bien seleccionados con sólo cumplir con el primer criterio.

⁵² Aclaratoria: No se utilizan los meses convencionales para las estaciones del año (por ejemplo: diciembre a febrero para verano). Se toma como referencia el artículo de Garreaud y Muñoz (2005) para comparar, principalmente, el mapa de la STD entre noviembre a enero.

Por lo tanto, la contabilización de eventos se hará de acuerdo al primer filtro, aún cuando el número de eventos encontrados con el criterio 2 resulta ligeramente mayor a la cantidad descubierta por el criterio 1, ya que incluye algunos casos de viento Norte (e.g. fecha cercana al 19/06/2022 en la Figura 4.16). De hecho, el criterio 2 sobreestima al criterio 1 en un $\sim 102,92\%$ para la magnitud del viento y en un $\sim 107,39\%$ para el viento meridional al encontrar más días EVI. Por ende, se considera el criterio 1 como método definitivo para escoger las fechas que sean de interés para inspeccionar minuciosamente algunos de los eventos de mayor duración.

El histograma de la Figura 4.17 representa la ocurrencia de eventos entre los años 2020 y 2022, distinguiéndolos por su duración en número de días. En dicho periodo, con la magnitud del viento (componente meridional) se contabilizan 274 (257) días que cumplen el primer filtro de superar el cuartil y en total ocurren 126 (110) eventos de viento intenso.

En calidad de información suplementaria sobre los eventos de viento intenso, se analiza la ocurrencia de estos para las diferentes fases del Índice RMM de la OMJ, cuyas gráficas se encuentran en Anexos. Por una parte, se obtiene que los EVI son más frecuentes en las fases 4 y 6, donde el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (SPSA) se refuerza y en menor frecuencia en las fases 7 y 8, en que el SPSA se debilita, tanto para la magnitud del viento como la su componente meridional (ver la Figura A.3 de Anexos).

Por otra parte, de acuerdo a los diagramas de fase RMM (Figura A.4 y Tabla A.1), más del 65% de los EVI predomina en la fase activa de OMJ (amplitud mayor o igual a 1) y, estacionalmente, la mayor / menor cantidad de EVI ocurre en las siguientes fases (ver Figura A.5):

- Verano: 4 / 1.
- Otoño: 4 y 6 / 2 y 8.
- Invierno: 1 y 2 / 8.
- Primavera: 2, 4 y 6 / 7.
- Las fases 3 y 5 no predominan aparentemente.

En general, se observa una alternancia en las fases RMM dependiendo de la estación del año, por ejemplo, los EVI en la fase 1 son más (menos) frecuentes en invierno (verano), lo que estaría vinculado con la migración del SPSA hacia el norte (sur) y que podría influir en la ocurrencia o intensidad de LLJ frente a las costas de Chile debido a la OMJ. De todos modos, esta relación entre los EVI y la OMJ es un análisis temprano, por lo que se propone como trabajo futuro para profundizar más en detalle.

Tabla 4.8: Coincidencia de reportes de cierre de puerto de la Armada, cercanos a 30°S (Chañaral: ~26,34°S | Tongoy: ~30,26°S | Algarrobo: ~33,37°S) en fechas identificadas como evento de viento intenso.

Tipo de evento	Fecha y hora CFOSAT	Días	Fecha de reporte	Localidad	Tipo de cierre de puerto	
Evento de viento intenso (EVI)	25/05/2022 al 31/05/2022	Evento 1: 7 días	-	Chañaral	No hubo en mayo 2022	
			24 al 25 /05/2022	Tongoy	Visibilidad	
		-	Algarrobo	No hubo en fecha cercana		
	08/07/2020 al 13/07/2020	Evento 2: 6 días	-	Chañaral	Registros post-agosto 2020	
			-	Tongoy	Registros post-agosto 2020	
			-	Algarrobo	Registros post-agosto 2020	
	29/04/2022 al 03/05/2022	Evento 3: 5 días	-	Chañaral	No hubo en abril 2022	
			22 al 23 /04/2022	Tongoy	Visibilidad	
		25 al 26 /04/2022 26 al 27 /04/2022	Algarrobo	25 al 26 /04/2022	Algarrobo	Visibilidad
				26 al 27 /04/2022	Algarrobo	Mal tiempo
	17/08/2022 al 21/08/2022	Evento 4: 5 días	17 al 20 /08/2022	Chañaral	Ola / Marejada	
			15 al 20 /08/2022	Tongoy	Ola / Marejada	
			19/08/2022		Visibilidad	
			14 al 16 /08/2022	Algarrobo	Ola / Marejada	

Mediante el análisis de los datos de CFOSAT y del escaterómetro ASCAT, se escogen cuatro periodos que hayan cumplido ambos criterios en la componente meridional del viento. Así, se exploran los eventos de chorro de mayor duración en días (se omiten el evento de 10 días y uno de los de 6 días, puesto que son datos previos a abril 2020 y antes de ese mes los datos CFOSAT son coincidentemente muy ruidosos). A modo de información adicional, en la Tabla 4.8 se muestran las coincidencias de cierre de puerto cercanos a 30°S durante los días de los Eventos 1, 2, 3 y 4 (considerados como eventos de viento intenso): en Chañaral a ~26,34°S, en Tongoy mismo a ~30,26°S y en Algarrobo a ~33,37°S. A partir de la tabla, se puede constatar que sí hubo algunos cierres de puerto en fechas cercanas a los EVI, al menos por Visibilidad, Mal tiempo y Ola / Marejada, por una extensión de 1 a 5 días aproximadamente, sin embargo, ninguno de estos cierres es atribuible exclusivamente a EVI. Esto sugiere que, en futuros trabajos, se debería ajustar la técnica de identificación de eventos de chorros. Por ejemplo, una posible mejora sería aumentar el umbral del cuartil y sea superior al 75 % (valor actualmente establecido). Alternativamente, podría existir un error humano al registrar el motivo del cierre de puerto, por lo que el viento pudo considerarse de menor relevancia, en comparación con otros factores como las marejadas.

Por una parte, con base en los datos obtenidos de ERA5 en conjunto con las mediciones de CFOSAT, la Figura 4.18 muestra los mapas del viento promedio y de la altura significativa de la ola promedio en la región de estudio durante las fechas correspondientes de los EVI identificados a 30°S. En los cuatro eventos, la condición del viento refleja chorros costeros fuertes que exceden los 8 m/s de dirección sur (primera fila de la Figura 4.18). También abarcan casi toda la región de estudio, a excepción del Evento 2 que su LLJ se dirige desde los 34°S hacia el norte, que aún así se considera de gran extensión de sur a norte. En relación a su SWH promedio (segunda fila de la Figura 4.18), para el Evento 2 no hay datos de olas del modelo CMEMS para el año 2020, pero sí para los demás eventos, ya que son del año 2022. De estos mapas, es posible apreciar que la SWH promedio es de 1,5 a 3 metros para el Evento 1 y 3, y de >3,5 metros para el Evento 4, en el que precisamente se produjo cierre de puerto por Ola / Marejada. Podría inferirse que hubo contribución por mar de fondo y en los días previos por mar de viento principalmente. Además, se proyectan los recorridos de una trayectoria paralela de CFOSAT por evento (se escoge un solo día y se revisa qué *track* pasa en ese momento, la cual es solamente una). De esta manera, visualizar los perfiles de viento y oleaje con respecto a la latitud y compararlos con los datos de los modelos y evaluar su precisión.

Por otra parte, la Figura 4.19 es similar a la Figura 4.18, pero con datos de ASCAT y ERA5, e igualmente presenta la misma condición del viento. Sin embargo, sus perfiles del viento con respecto a la latitud no están tan bien ajustados al modelo ERA5, a diferencia de los perfiles con CFOSAT, debido a su alta resolución espacial (13,9 km versus 1,5 km). De todos modos, hay pequeñas variaciones entre el viento CFOSAT y ERA5 a causa de la naturaleza altamente discreta de las mediciones CFOSAT. En adición, CFOSAT exhibe los perfiles de SWH que también se ajustan de buena forma al modelo de olas CMEMS, mientras que ASCAT no debido a que sólo contiene datos de viento.

En virtud de lo anterior, las mediciones nadir de la misión CFOSAT son capaces de captar con alta precisión las características del viento y del oleaje en superficie durante eventos de viento intenso (superior a 5 m/s) y/o que coincida con amplitudes altas de oleaje (superior a 3 m), los que igualmente propiciaron cierres de puertos y paralización de actividades marítimas a lo largo de la costa chilena cercana a 30°S. Por ende, estas mediciones simultáneas de CFOSAT se destacarían por su utilidad para las agencias de monitoreo chilenas a modo de prevención.

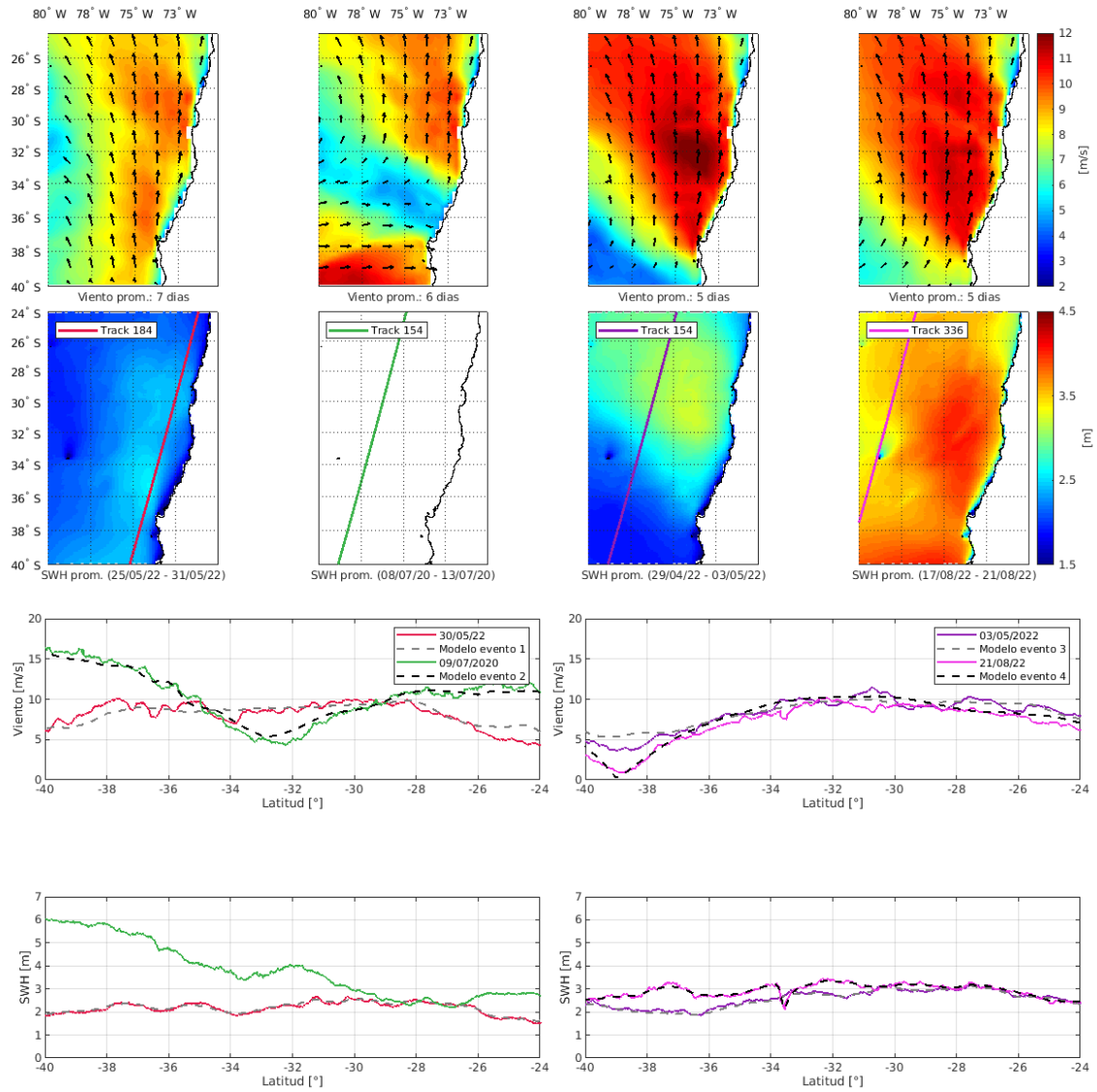


Figura 4.18: **Primera fila:** Condición del viento en promedio en la región de estudio para las fechas de EVI a 30°S, con datos de ERA5 con CFOSAT. **Segunda fila:** Análoga a la primera fila, pero para la SWH con datos de CMEMS con CFOSAT. Los perfiles rojo, verde, morado y magenta indican las trayectorias (184, 154, 154 y 336, respectivamente) sobre los mapas con sus fechas de pasada correspondientes sobre la región. **Tercera fila:** Observaciones de CFOSAT a lo largo de las latitudes de cada trayectoria. Las líneas segmentadas representan los resultados del modelo de viento. **Cuarta fila:** Análoga a la tercera fila, pero con datos de SWH.

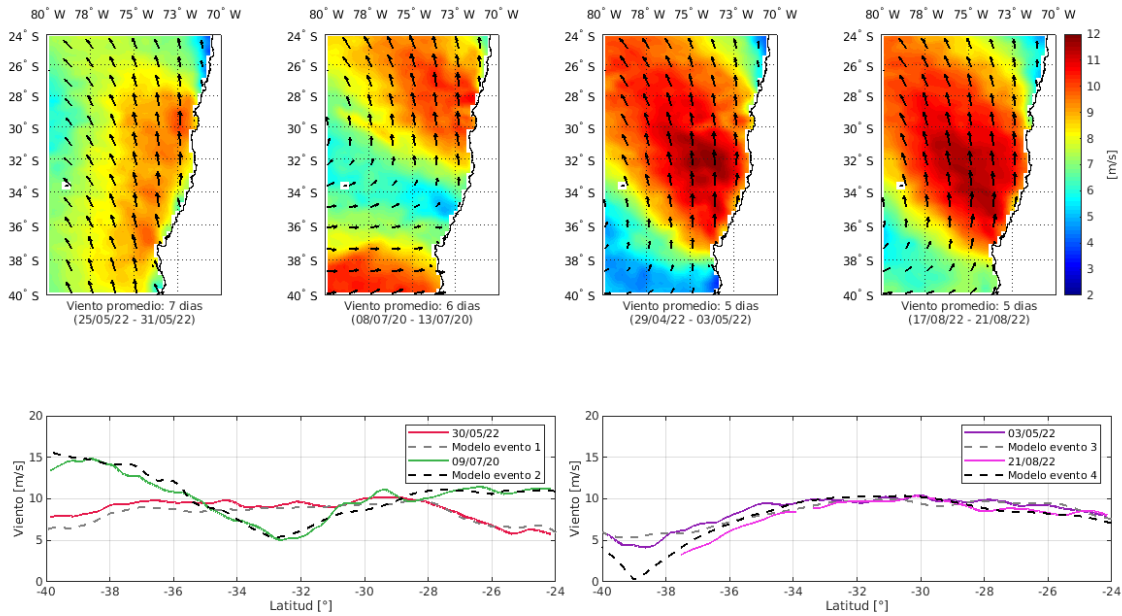


Figura 4.19: Análoga a Figura 4.18, pero sólo con datos de viento ASCAT con ERA5.

A partir de las Figuras 4.20, 4.22, 4.24 y 4.26, se muestra que las mediciones del viento CFOSAT facilitan observar las variaciones latitudinales del viento en la banda costera durante los eventos de LLJ, particularmente a lo largo de los focos de surgencia. Gracias a la alta resolución espacial de las mediciones CFOSAT ($1,5 \text{ km}$), se mide con precisión la caída del viento al aproximarse a la costa, tal como se ve en:

- La Figura 4.20 (Evento 1) con la trayectoria perpendicular o ascendente 19 y 49.
- La Figura 4.22 (Evento 2) con la trayectoria 261.
- La Figura 4.24 (Evento 3) con las trayectorias 49 y 79.
- La Figura 4.26 (Evento 4) con las trayectorias 261 y 291.

Esta característica es de importancia para estimar con mayor precisión la influencia del viento sobre la surgencia costera. Notar que en ciertos casos, al aproximarse a la costa, se observa el decaimiento en las mediciones que posteriormente experimentan un aumento significativo, tal como ocurre con el viento en la trayectoria 261 durante el Evento 2 (Figura 4.22). Estas variaciones inusuales podrían abordarse en un trabajo futuro y corregirlas.

De las Figuras 4.21, 4.23, 4.25 y 4.27 se infiere que las mediciones de la SWH de CFOSAT durante los eventos de viento intenso no solamente están asociados a marejadas en determinadas localidades, pues también hubo cierres de puerto por Visibilidad y por Mal tiempo (ver Tabla 4.8). En general, se tiene que el chorro controla el oleaje a lo largo de la costa chilena, es decir que a mayor magnitud del viento, mayor SWH, tal como ocurre en el Evento 3 (ver el viento de la Figura 4.25 cuando supera los 5 m/s y la ola de la Figura 4.25 en que la SWH es mayor a 2 m).

En términos generales, en cada evento hay variabilidad en el viento y en la ola, ya que a lo largo de la región de estudio pueden haber vientos desde 2 m/s hasta 16 m/s y SWH desde $1,5\text{ m}$ hasta 6 m , dependiendo del día y de la trayectoria CFOSAT. En la Tabla 4.9 se muestran detalladamente los umbrales que abarca cada uno de los cuatro EVI. En adición, el chorro en promedio frente a Coquimbo (entre 28°S – 32°S y 71°O – 75°O) tiene vientos que exceden los 8 m/s (sin considerar la trayectoria 291 del Evento 4, puesto que cruza la costa y suele haber decaimiento del viento) y las olas rondan entre los $2,2$ y 5 m .

Tabla 4.9: Umbrales aproximados de viento y oleaje que miden las trayectorias CFOSAT en cada evento de viento intenso.

N° evento	Región general		Chorro frente a Coquimbo		
	Viento [m/s]	SWH [m]	N° track	Viento [m/s]	SWH [m]
Evento 1	4 a 11	1,5 a 3,3	79	8 a 10	2,2 a 2,7
			184		2,3 a 2,7
Evento 2	2 a 16	2,0 a 6,0	184	10 a 14	3,5 a 4,0
			261	10 a 12	2,8 a 3,8
Evento 3	2 a 12	2,0 a 3,4	79	9 a 11	2,5 a 3,0
Evento 4	2 a 14	2,5 a 5,5	261	11 a 12	4,4 a 5,0
			291	1 a 4	2,5 a 3,5

Lamentablemente, para el Evento 2 no se tienen datos de ola del modelo CMEMS y tampoco registros de cierres de puerto por ser del año 2020. De igual manera, se puede deducir qué ocurrió, gracias a las mediciones simultáneas de viento y oleaje de CFOSAT y de los datos del modelo de referencia ERA5. Por un lado, de las trayectorias descendentes:

- Del costado superior derecho de la Figura 4.22: entre los 34°S y 38°S , el viento decae de manera significativa, coincidente con el área en que no está la influencia del LLJ.
- Del costado superior derecho de la Figura 4.23: en el extremo norte, la altura de la ola va decayendo. Además, cerca de la influencia del chorro, entre los 24°S – 28°S y 70°O – 73°O , la altura de la ola y el viento se minimizan en conjunto.

Por otro lado, de las trayectorias ascendentes, del costado inferior derecho de la Figura 4.22 y de la Figura 4.23, se muestran patrones similares de mínimos y máximos.

A modo de complemento, se presenta otra utilidad de las mediciones de viento y SWH de CFOSAT, particularmente para cada trayectoria del Evento 1 (7 días de duración). De la Figura 4.28 a la 4.34, se muestran los perfiles de estas variables a lo largo de las latitudes con respecto a su distancia de la costa. Es pertinente subrayar que este enfoque representa una implementación inicial, susceptible de mejoras y propuesta de trabajo a futuro. De hecho, hay algunas trayectorias lejanas a la costa, pero los gráficos muestran que están a 0 km de ella, debido a que considera alguna isla. Por ejemplo, la trayectoria 19 de la Figura 4.28 toma como referencia la Isla Robinson Crusoe ($33,6^{\circ}\text{S}$ y $78,8^{\circ}\text{O}$) o la trayectoria 49 y 184 de la Figura 4.29 y 4.33 que consideran como origen del continente la Isla Mocha ($38,4^{\circ}\text{S}$ y $73,9^{\circ}\text{O}$) frente a Tirúa. A pesar de esto, podría ser de utilidad conocer la magnitud del viento y la altura significativa de la ola cerca de estas islas, así contribuir en la información meteorológica local.

De forma generalizada, estos perfiles muestran que la ola se mantiene casi constante entre los 1,5 y 3 metros, mientras que el viento varía desde los 0 a 6 m/s , pero hay días o zonas en que supera los 7 m/s . Desglosando en detalle:

- En la Figura 4.28, la trayectoria 19 muestra que de los 38°S al sur, la ola es más fuerte ($\sim 3 m$) y el viento va de 6 a 7 m/s , pero cerca de Isla Robinson Crusoe, el viento es más fuerte ($\sim 7,5 m/s$). En general, la ola se mantiene a 2,5 m a lo largo de la trayectoria y el viento a menos de $\sim 5 m/s$.
- En la Figura 4.29, la trayectoria 49 exhibe que el viento supera los 8 m/s y ola es de 2,5 m mayoritariamente.
- En la Figura 4.30, la trayectoria 79 muestra que el viento desde la latitud 32°S hacia el norte es mayor a 8 m/s y hacia el sur es menor a 7 m/s , mientras que la SWH es casi constante entre los 2 y 2,5 m .
- En la Figura 4.31, la trayectoria 124 posee vientos menores a 7 m/s , incluso llegan a ser cercanos a 0 m/s a $\sim 29^\circ S$, pero la ola se mantiene cercana a los 2 m .
- En la Figura 4.32, la trayectoria 154 tiene mayoritariamente vientos superiores a 7 m/s , sin embargo, desde los 26°S hacia el norte son menores a 6 m/s ; la ola también es variable, de norte a sur va decayendo desde los $\sim 2 m$ hasta los $\sim 2,5 m$.
- En la Figura 4.33, la trayectoria 184 es análoga a la 154, aunque el viento es levemente más intenso en magnitud.
- En la Figura 4.34, la trayectoria 201 es la más corta en extensión y aún así registra $\sim 6 m/s$ y $\sim 1,5 m$ dentro de la región de estudio.

Entonces, CFOSAT logra mostrar correctamente el comportamiento del viento y de la SWH de esos EVI identificados, mediante los criterios en el análisis del primer modo de variabilidad con ASCAT. Esto sugiere que las mediciones simultáneas de CFOSAT emergen como una herramienta significativa para el estudio de los eventos de viento intenso, incluidos aquellos que provocan cierres de puerto.

Dado que se espera una intensificación de la surgencia debido al calentamiento global (Goubanova et al., 2011), que implicaría un aumento en la ocurrencia de eventos intensos, las observaciones CFOSAT serían de utilidad para este tipo de análisis.

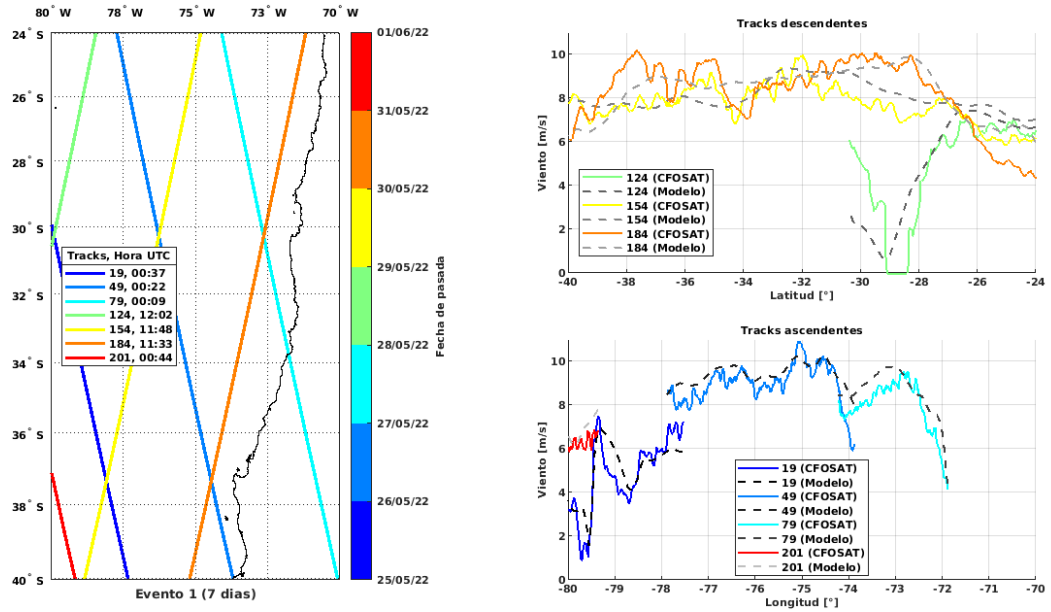


Figura 4.20: Mediciones del dispersómetro SCAT de CFOSAT del Evento 1. **Izquierda:** Paso del satélite, los colores indican la fecha y hora UTC de pasada del satélite frente a Chile. **Derecha:** Perfiles de viento que permiten evaluar la actividad del chorro y la magnitud del viento de norte a sur. Los perfiles superiores (*tracks* descendentes, de norte a sur) son la medición comparativa del viento a lo largo de la costa de Chile (*track* 184) y en océano abierto (*track* 154). Los perfiles inferiores (*tracks* ascendentes, de sur a norte) representan la medición de la caída del viento al aproximarse la costa, particularmente las trayectorias 49 y 79.

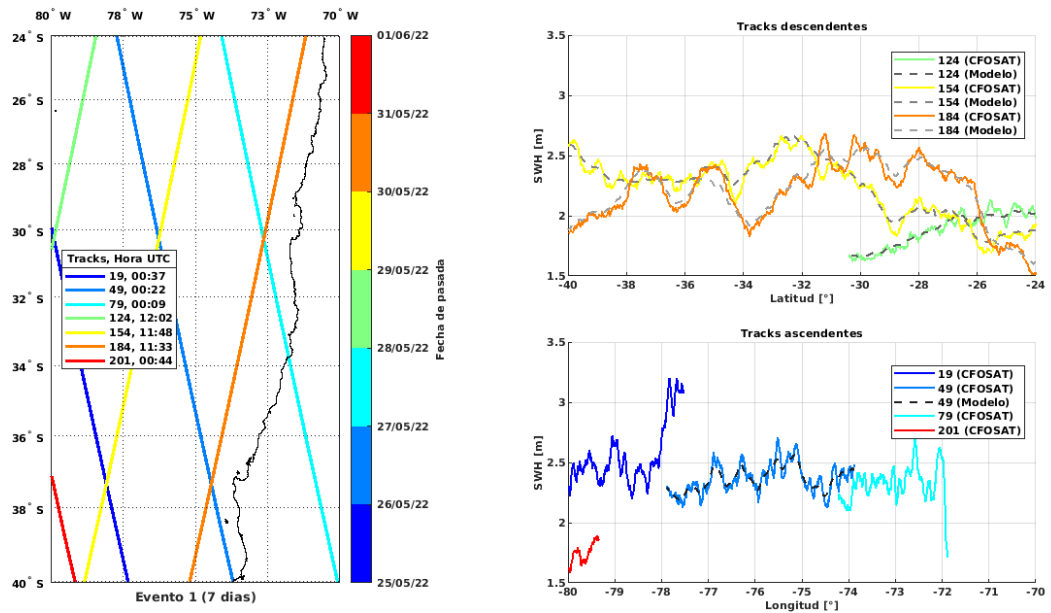


Figura 4.21: Análoga a Figura 4.20, pero para la SWH.

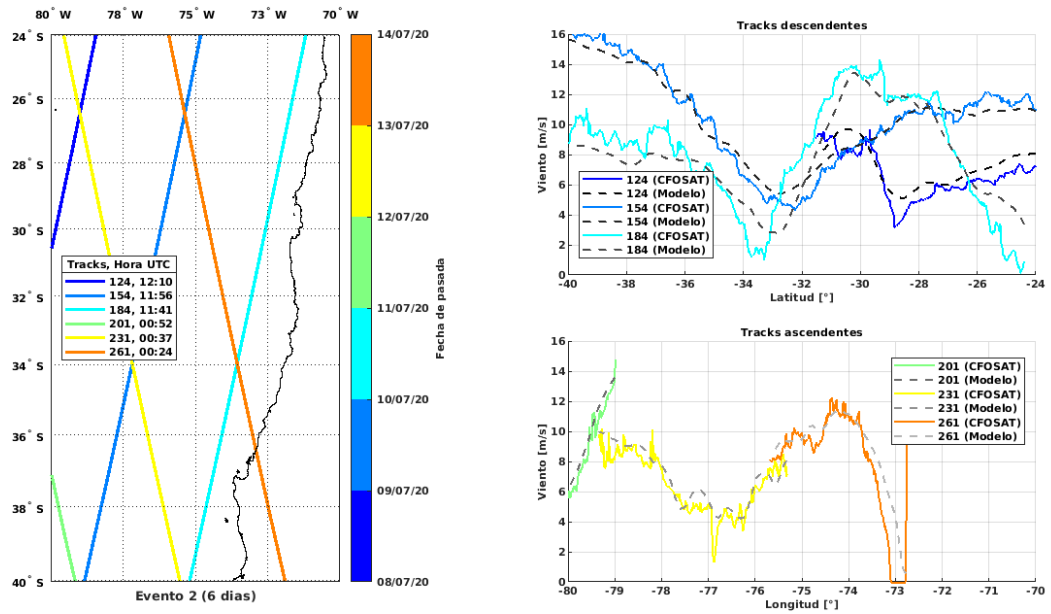


Figura 4.22: Análoga a Figura 4.20, pero para el Evento 2.

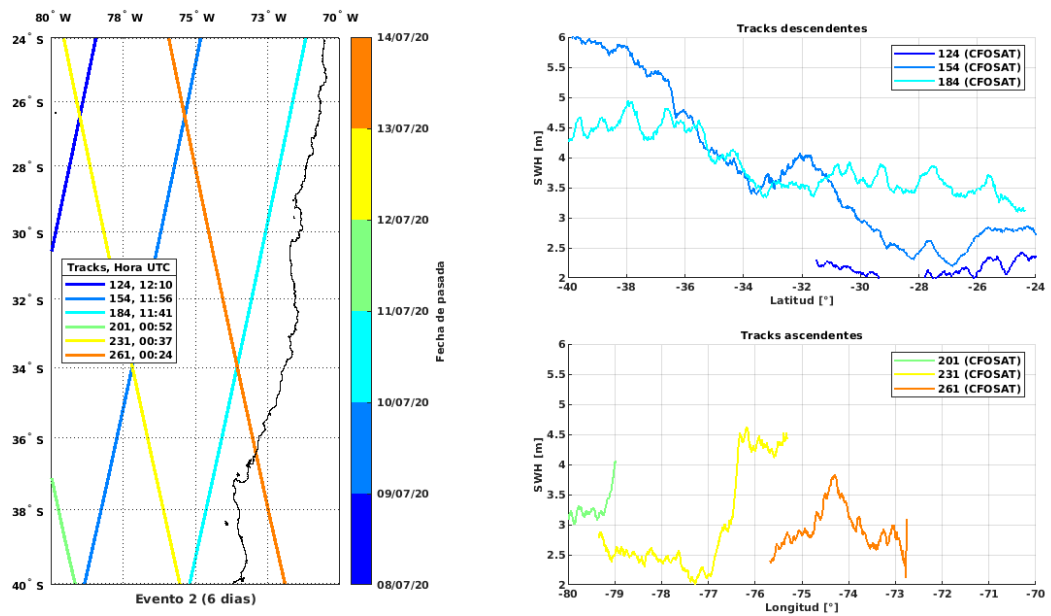


Figura 4.23: Análoga a Figura 4.22, pero para la SWH (no hay datos de modelo, pues su disponibilidad es a partir del año 2021).

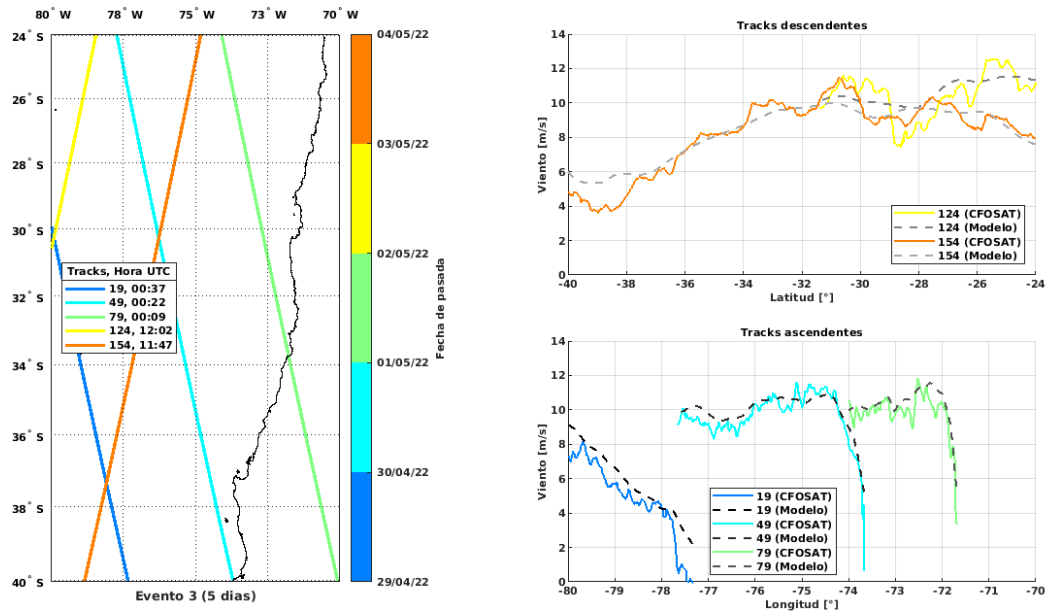


Figura 4.24: Análoga a Figura 4.20, pero para el Evento 3.

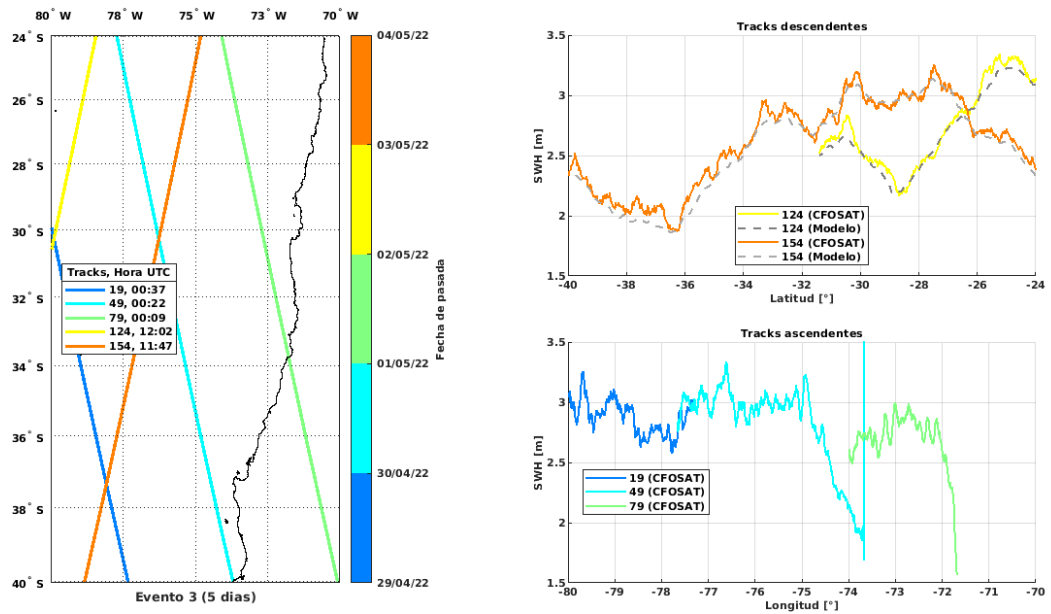


Figura 4.25: Análoga a Figura 4.24, pero para la SWH.

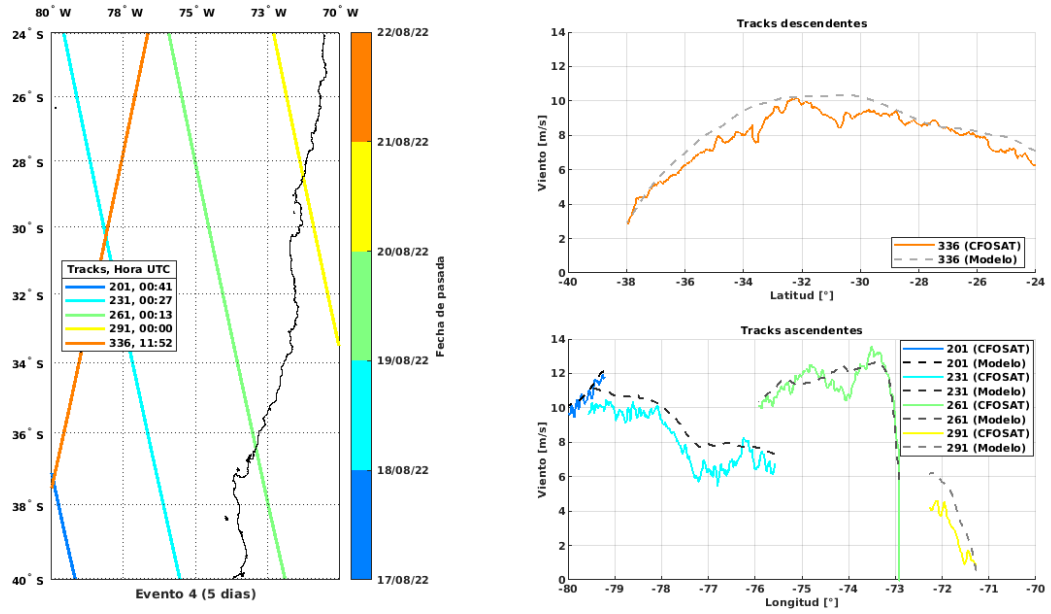


Figura 4.26: Análoga a Figura 4.20, pero para el Evento 4.

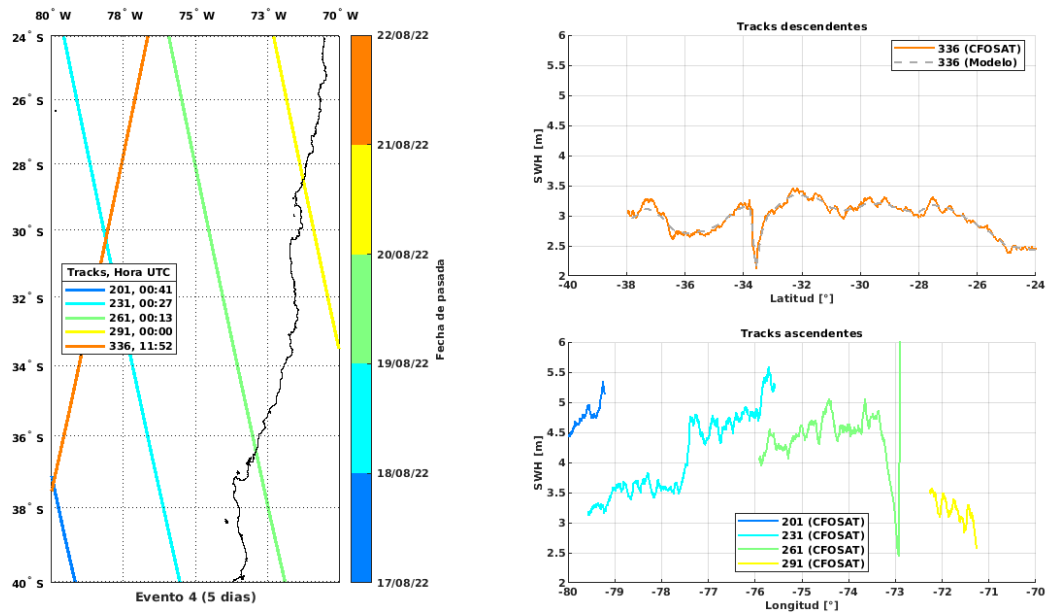


Figura 4.27: Análoga a Figura 4.26, pero para la SWH.

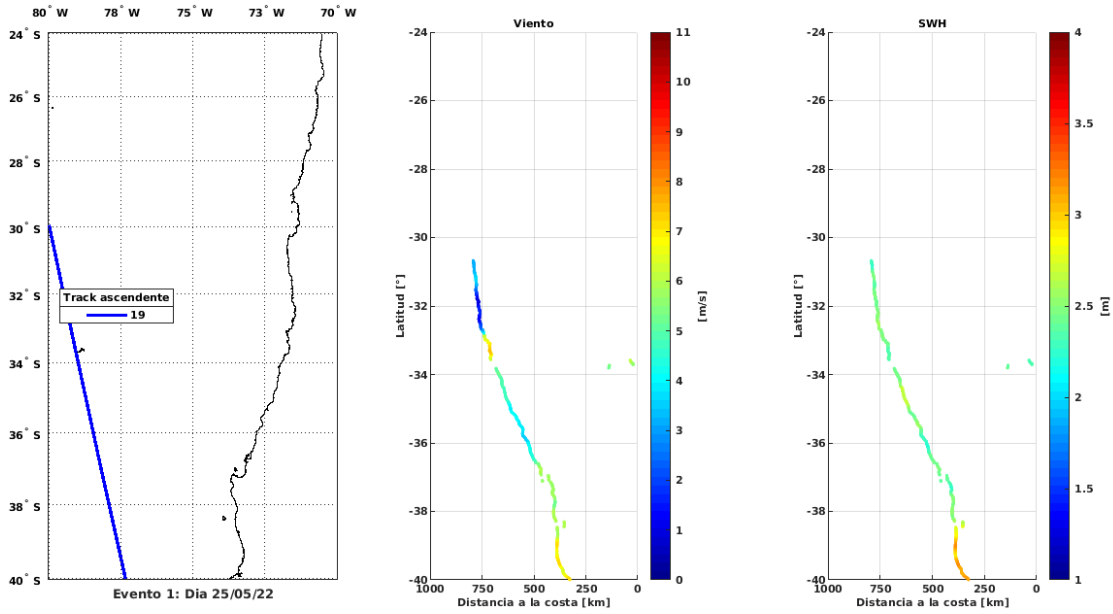


Figura 4.28: Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 1: 25/05/2022).

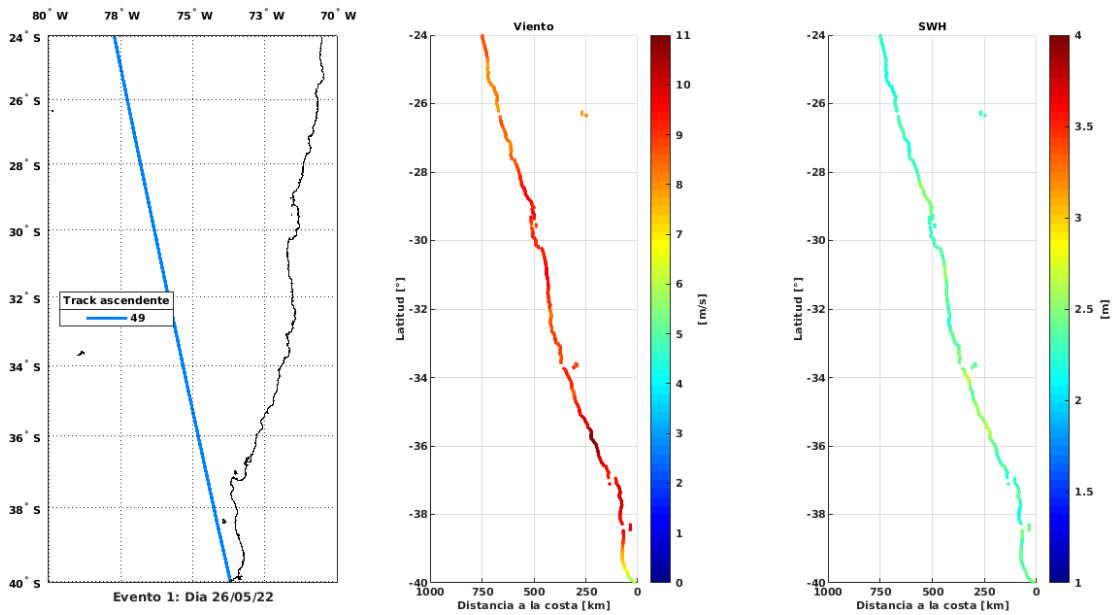


Figura 4.29: Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 2: 26/05/2022).

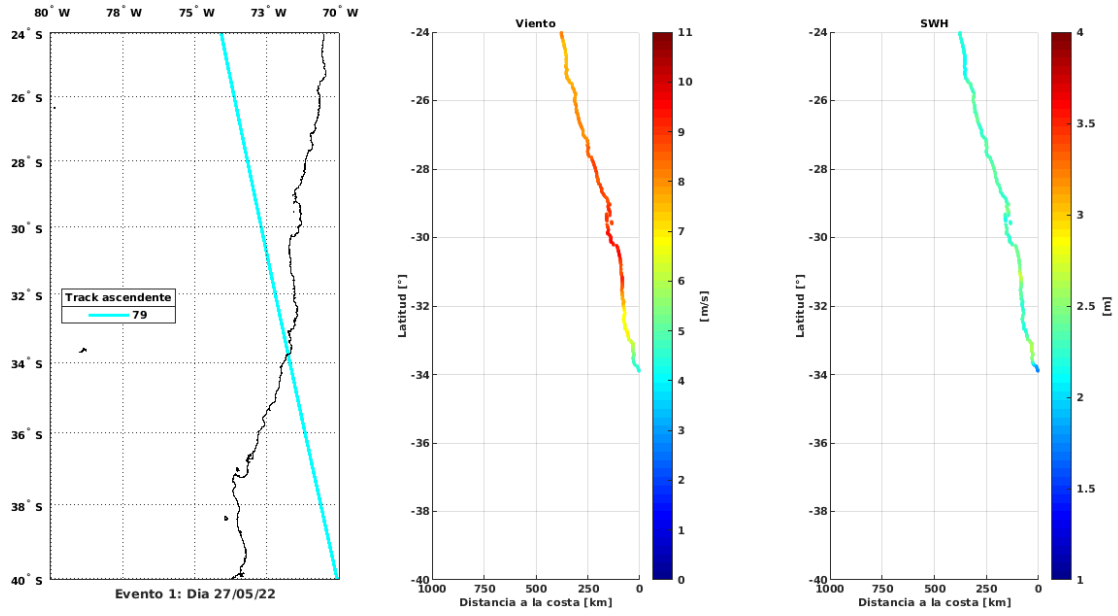


Figura 4.30: Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 3: 27/05/2022).

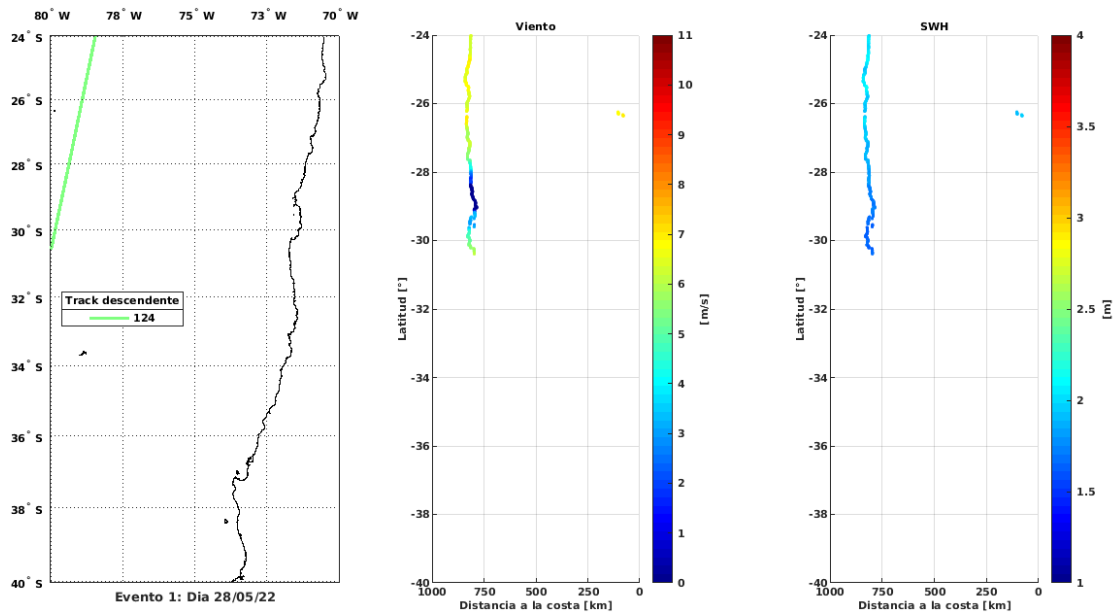


Figura 4.31: Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 4: 28/05/2022).

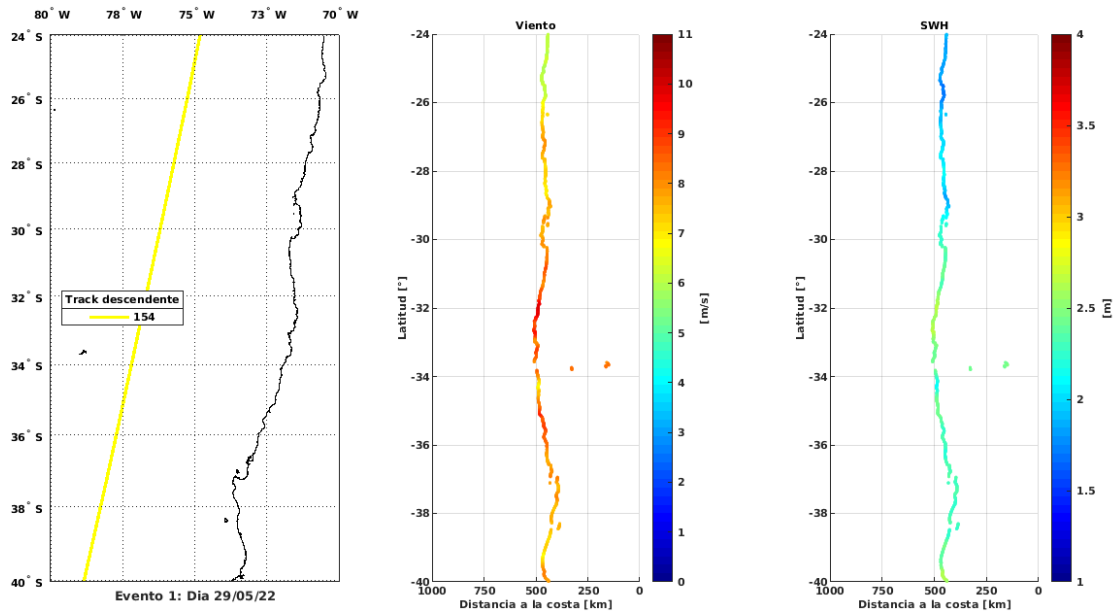


Figura 4.32: Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 5: 29/05/2022).

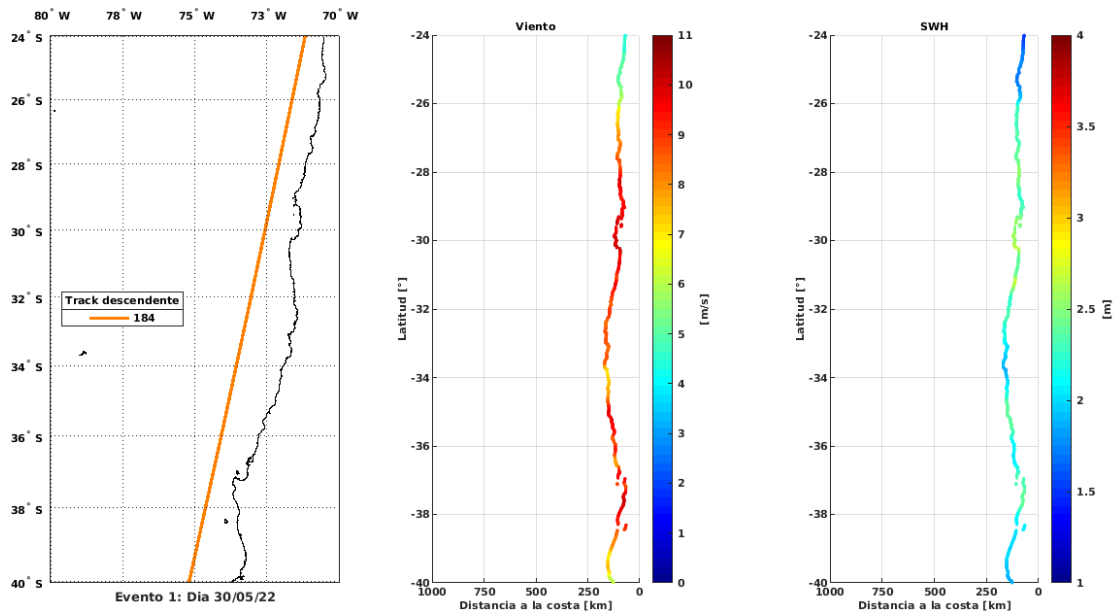


Figura 4.33: Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 6: 30/05/2022).

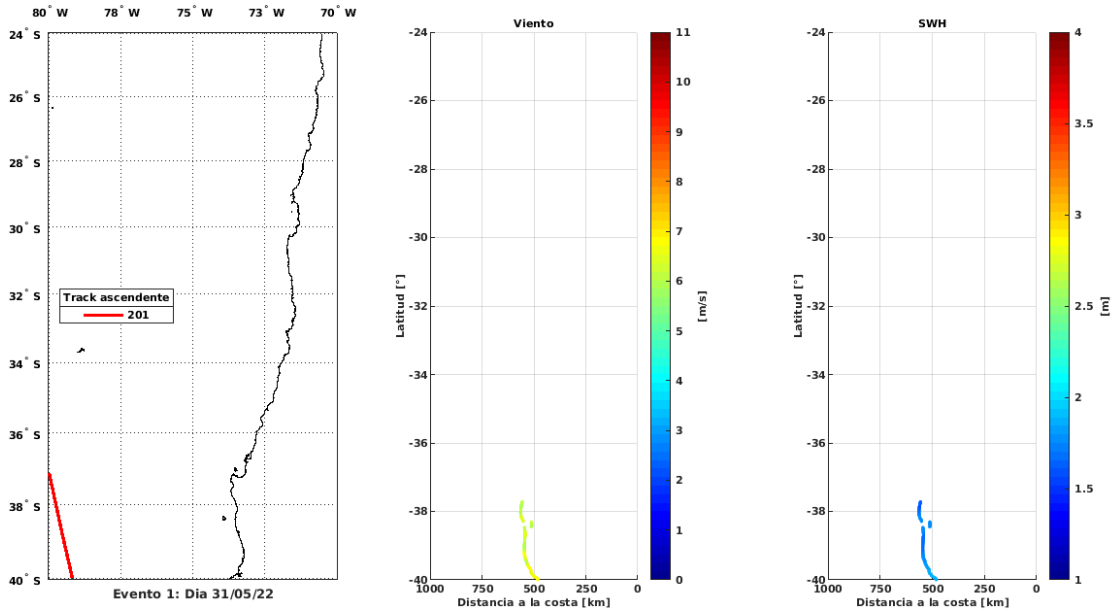


Figura 4.34: Perfiles de viento y SWH de las mediciones CFOSAT para las trayectorias del Evento 1 con respecto a su distancia de la costa (día 7: 31/05/2022).

4.4. Dinámica de Ekman

A continuación, se presentan las series de tiempo de viento de la Figura 4.35, las cuales representan el promedio diario satelital del viento ASCAT en curva azul punteada para el periodo del 16 de mayo al 13 de agosto de 2022. Se incluyen siete localidades de la región de Coquimbo: Isla Chañaral, Punta de Choros, Bahía de Coquimbo, Tongoy, La Cebada, Huentelauquén y Los Vilos. Adicionalmente, en curva negra y sombreado azul se muestran el promedio y la desviación estándar climatológica respecto al período histórico comprendido entre los años 2008 y 2020.

En la Figura 4.35 se identifica claramente el evento extendido de chorro costero entre el 25 y el 31 de mayo de 2022, analizado en las secciones previas (ver Figura 4.20). En efecto, durante la fecha del evento de 7 días, el promedio diario supera el promedio diario climatológico y sus vientos provienen del sur. Si bien, “no hay *peaks*” de viento que destaquen en el evento mismo, este es “continuo” (si se compara con fechas previas o siguientes, este evento se maximiza y se mantiene en ese periodo). Esto implica que el transporte y el bombeo de Ekman se incrementaron significativamente como uno de los efectos de este chorro que redujeron la temperatura del mar (ver Figura 4.36).

Particularmente, en Tongoy ($\sim 30,26^{\circ}\text{S}$ y $\sim 71,49^{\circ}\text{O}$) se superan los 10 m/s con un régimen sur sostenido, tal como se visualiza en los vectores de la dirección del viento diario en la parte superior de cada serie de la Figura 4.35 (dentro del recuadro azul). Por ende, se destaca el drástico cambio previo al inicio y término del evento, en las que hay caídas de viento. Notar que el promedio diario del viento satelital ASCAT se ajusta bien al obtenido con las mediciones de la estación meteorológica de CEAZAMET ubicada en Punta Lengua de Vaca.

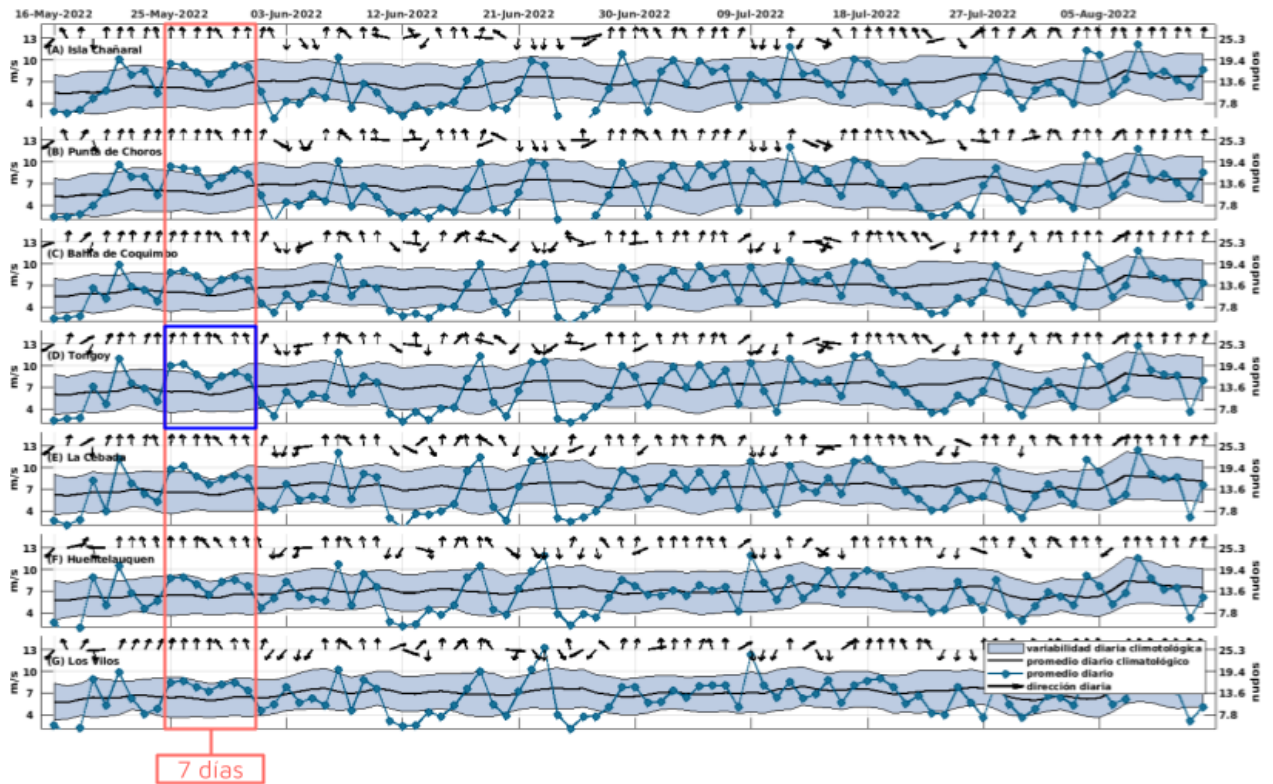


Figura 4.35: Perfiles de las mediciones de viento ASCAT en distintas localidades costeras. Se enmarca el evento de viento intenso de 7 días de duración (Evento 1: 25/05/2022 – 31/05/2022).

El transporte de masas de agua producto del viento alcanza los $2 \text{ m}^3/\text{s}$, de acuerdo a la estimación de surgencia costera (ver panel superior de Figura 4.36), la cual se multiplica por -1 para facilitar la comparación. También, el grado de enfriamiento, asociado al ascenso de aguas del fondo frente a Tongoy en dicho periodo, induce una reducción de temperatura de $1,5^\circ\text{C}$ y un enfriamiento integrado de $4,3^\circ\text{C}/\text{día}$, lo cual es significativo y consistente con la duración del evento (ver panel del medio e inferior de Figura 4.36).

Se destaca que este contraste de condiciones de relajación e intensificación del viento es clave para que el proceso de surgencia, gatillado por el evento, genere una respuesta biológica que impacte en el ecosistema marino. Esto se traduce en la retención de los nutrientes en la banda costera y promueve el desarrollo del fitoplancton (García-Reyes, 2014).

Una vez cuantificado el transporte de Ekman en el periodo de chorro costero en la bahía de Tongoy, se evalúa el bombeo de Ekman producto de la variación y decaimiento del viento al aproximarse a la costa. Inicialmente, se estima la caída del viento a partir de las observaciones a $\sim 100 \text{ km}$ de la costa de CFOSAT y de la estación meteorológica de CEAZAMET en Punta Lengua de Vaca, ubicada en el borde costero.

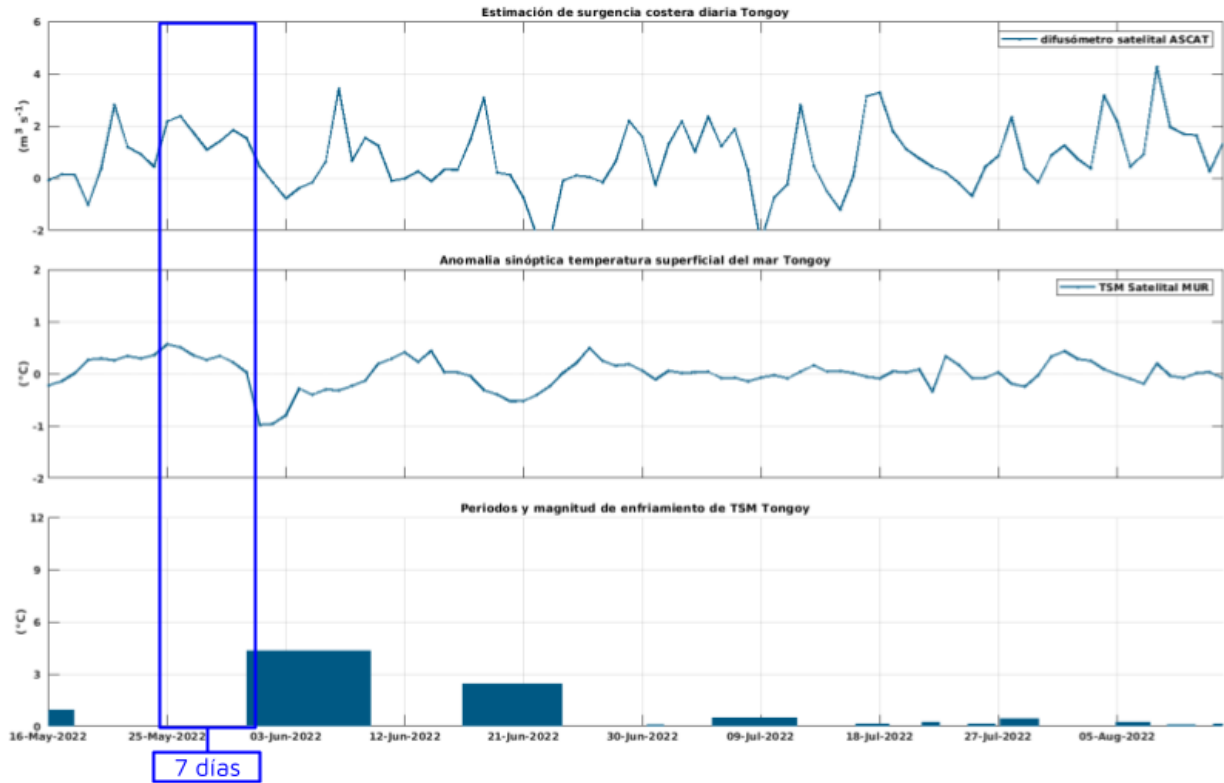


Figura 4.36: Análisis del transporte de masas de agua producto del viento, en la localidad de Tongoy.

Se seleccionan las *tracks* 79 y 184, debido a su proximidad con PLdV y la disponibilidad de observaciones satelitales en estas trayectorias durante el evento de larga duración. Para cada trayectoria, se promedian sus mediciones en el área comprendido entre las coordenadas 30°S–30,5°S y 72°O–74°O (ver costado izquierdo de la Figura 4.38) con un criterio de cercanía temporal de las mediciones satelitales e *in-situ* menor o igual a 10 minutos.

La Figura 4.37 representa la comparación entre las mediciones de magnitud de viento de ambas trayectorias CFOSAT y la estación meteorológica en Punta Lengua de Vaca de CEAZAMET, ubicada a 17 msnm en latitud $\sim 30,24^\circ\text{S}$ y longitud $\sim 71,63^\circ\text{O}$, cuyos datos son decaminutarios y en GMT-4. Los paneles superiores de la Figura 4.37 muestran los perfiles del viento de CFOSAT (puntos) y CEAZAMET (asteriscos: rojos el viento máximo en cada hora, azules el mínimo de viento y negros el promedio del viento por hora) para dos fechas distintas:

- 26/05/2022, 20:10 Hora Local o HL (27/05/2022, 00:10 UTC de CFOSAT): fecha en la que CEAZAMET concuerda con la *track* 79 (puntos calipsos).
- 30/05/2022, 07:30 HL (30/05/2022, 11:35 UTC de CFOSAT): fecha en la que CEAZAMET concuerda con la *track* 184 (puntos naranjos).

Comparativa de magnitud de viento local y a ~100 km de la costa, frente a PLdV (~30°S)

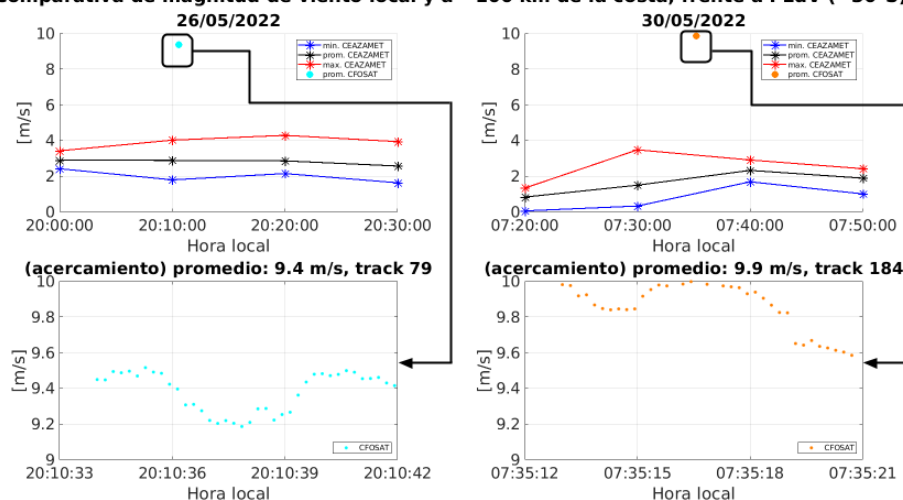


Figura 4.37: Comparativa de la magnitud del viento local (CEAZAMET) y a ~100 km de la costa (CFOSAT), frente a Punta Lengua de Vaca, en las fechas 26 de mayo de 2022 (izquierda) y 30 de mayo de 2022 (derecha). Paneles superiores: Perfiles del viento de CFOSAT (puntos) y CEAZAMET (asteriscos). Paneles inferiores: Acercamiento al perfil de viento de CFOSAT de los paneles superiores, debido a sus mediciones finas.

Tabla 4.10: Decaimiento del viento frente a PLdV (30,24°S y 71,63°O).

Fecha y hora CEAZAMET	Fecha y hora CFOSAT	Trayectoria CFOSAT	Distancia prom. de CFOSAT a PLdV	Decaimiento del viento
26/05/2022, 20:10 HL	27/05/2022, 00:10 UTC	79	129,04 km (1,16°)	6,50 m/s
30/05/2022, 07:30 HL	30/05/2022, 11:35 UTC	184	112,47 km (1,01°)	8,37 m/s

Dado que los datos CFOSAT son medidos a una alta frecuencia temporal (4-5 mediciones por segundo), en los paneles inferiores de la Figura 4.37 se grafica el detalle de las observaciones de viento de CFOSAT en el periodo de medición de la estación meteorológica de PLdV. Se nota una variabilidad entre mediciones, pero con vientos entre los 9,2 y 9,5 m/s para la primera fecha (trayectoria 79) y entre los 9,6 y 10 m/s para la segunda (trayectoria 184), cuyos promedios de viento son 9,4 m/s y 9,9 m/s, respectivamente.

Como se puede ver en la Tabla 4.10, las observaciones satelitales a 100 km de la costa y las mediciones locales en el borde costero, registran una caída de 6,50 y 8,37 m/s el 26 de mayo a las 20:10 hrs. y el 30 de mayo a las 07:30 hrs., respectivamente. Esto evidencia que la reducción en la magnitud del viento al aproximarse a la costa se manifiesta, incluso cuando se enfrenta a flujos locales destacados y/o en presencia de un evento de vientos intensos. En efecto, el aumento del esfuerzo del viento conlleva un incremento en el rotor del esfuerzo del viento.

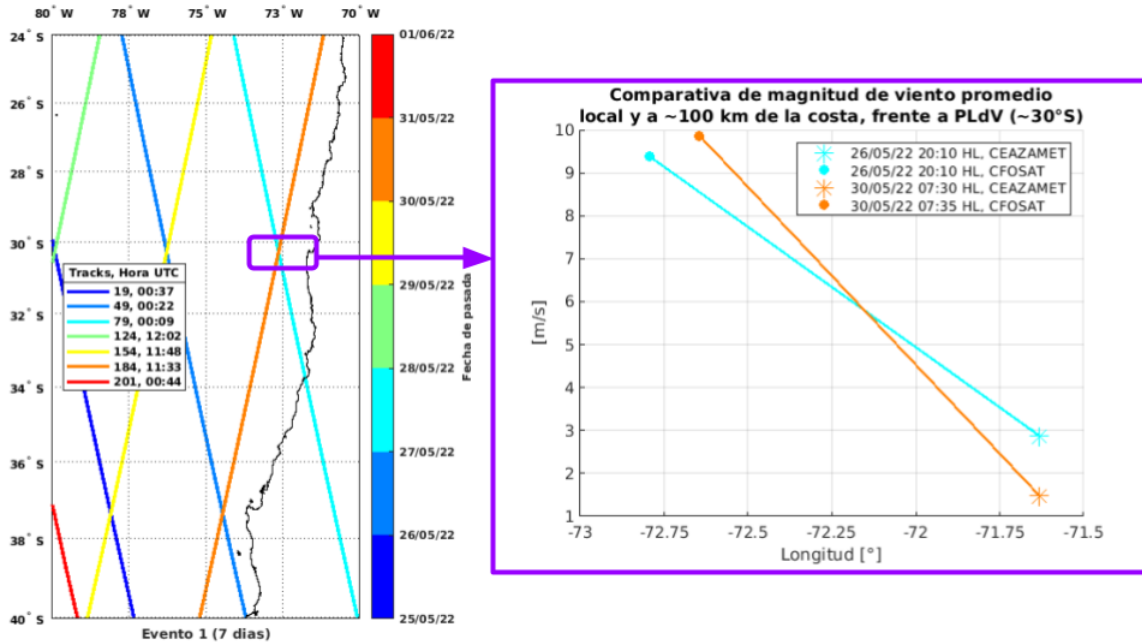


Figura 4.38: **Izquierda:** Paso del satélite del evento de 7 días, los colores indican la fecha y hora UTC de pasada de CFOSAT frente a Chile. **Derecha:** Comparativa de sólo el promedio de la magnitud del viento local y a ~ 100 km de la costa, frente a Punta Lengua de Vaca, en las fechas 26 de mayo de 2022 (calipso) y 30 de mayo de 2022 (naranja). Los puntos son las mediciones CFOSAT, mientras que los asteriscos son de CEAZAMET.

En dicho caso, se acentúa la influencia del ciclo diurno del viento, el cual reduce su magnitud en horas de la madrugada explicando un mayor decaimiento en dicho horario en esta latitud (30°S). Además, se destaca la complementariedad de las contribuciones del transporte y bombeo de Ekman. Es decir, durante el periodo del ciclo diurno cuando el viento se minimiza, se reduce el aporte a la surgencia por transporte y se incrementa el aporte por bombeo, debido a la tendencia al decaimiento del viento hacia la costa en dicho periodo.

Para ilustrar más claramente la caída del viento frente a PLdV, se grafica el viento promedio de CFOSAT y CEAZAMET de las fechas 26 de mayo de 2022 (calipso) y 30 de mayo de 2022 (naranja), en horas similares, con respecto a la longitud. El costado izquierdo de la Figura 4.38 muestra la ubicación de las mediciones CFOSAT frente a PLdV destacando con el recuadro en color morado el área en que se promediaron las mediciones CFOSAT para cada trayectoria por separada.

Asimismo, para proveer una estimación más generalizada de las variaciones del viento entre la costa y el océano abierto, se analizan las observaciones de CFOSAT durante el periodo del estudio entre los años 2020 y 2022. Este análisis se centra en las *tracks* 79 y 184, que coinciden con las mediciones realizadas en la estación de Punta Lengua de Vaca, y se emplea la misma metodología aplicada anteriormente en el estudio del evento de chorro costero de 7 días en mayo de 2022. Bajo esta misma línea, la Figura 4.39 exhibe los perfiles de viento promedio para establecer una comparación entre una trayectoria en particular de CFOSAT y los datos de CEAZAMET (seleccionando la hora más próxima a las mediciones de CFOSAT) frente a PLdV, durante todo el periodo de estudio (2020–2022). Es relevante destacar

que ambas rutas se encuentran a una distancia promedio de aproximadamente 100 km de la costa: *track* 79 a unos 104,25 km y *track* 184 a unos 93,16 km. También, cada trayectoria aparece cada 13 días en el mismo sitio.

El panel superior de la Figura 4.39 muestra la serie temporal de la trayectoria 79 que mide el viento en esta región a las 20:14 hrs. en cada ciclo orbital. El panel inferior es la serie de tiempo de la trayectoria 184 que mide el viento en esta región a las 07:38 hrs. En general, las mediciones CFOSAT a 100 km de la costa son mayores en magnitud a las de la estación meteorológica en el borde costero. Sin embargo, se observan registros con magnitudes de viento mayores en PLdV en relación al océano abierto. En promedio, se registra una caída del viento de 1,36 y 2,74 m/s, con una desviación estándar de 3,44 y 3,96 m/s para el horario de la tarde (20:14 HL) y de la mañana (07:38 HL), respectivamente. Esto indica que el decaimiento del viento es mayor durante la mañana, lo cual responde al ciclo diurno del viento en PLdV que minimiza su amplitud en este horario. Por lo tanto, se observa una cierta alternancia: la mayor contribución a la surgencia es por bombeo de Ekman en las mañanas y por transporte de Ekman en las tardes, tal como se mencionó anteriormente.

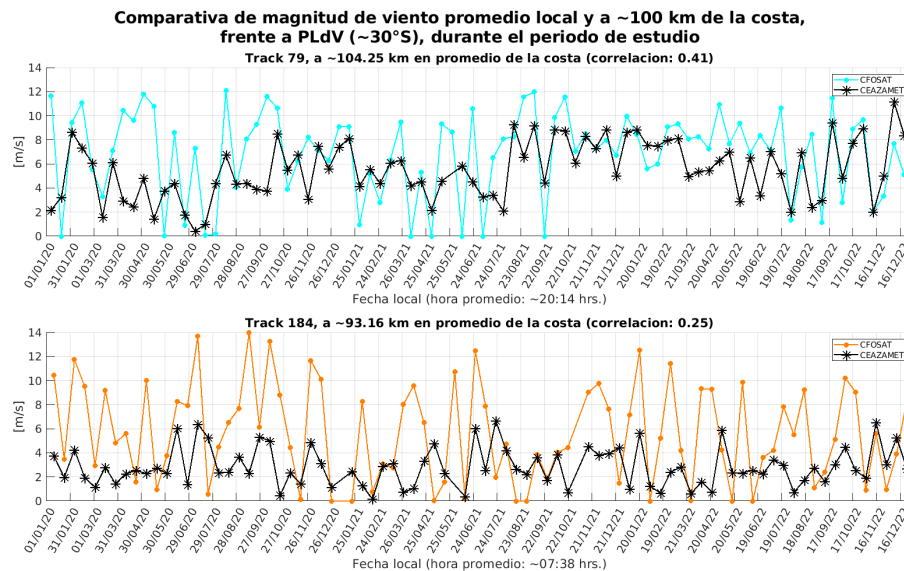


Figura 4.39: Comparativa de la magnitud del viento promedio local (CEAZAMET) y a ~100 km de la costa (CFOSAT: panel superior con la trayectoria 79 e inferior con la 184), frente a Punta Lengua de Vaca, durante todo el periodo de estudio.

También, durante la tarde se observa una variabilidad similar entre CFOSAT y CEAZAMET (panel superior de la Figura 4.39) en comparación a la mañana (panel inferior de la Figura 4.39). Esto muestra que las diferencias en magnitud del viento son más abruptas, es decir, hay más decaimiento. En efecto, la correlación del viento satelital e *in-situ* es mayor durante la tarde (0,41) en relación a la mañana (0,25). Por ejemplo, de la Figura 4.39:

- Panel superior: entre el 17 de septiembre de 2022 y el 16 de noviembre de 2022, se aprecia una gran similitud del viento de la tarde en PLdV y CFOSAT
- Panel inferior: entre enero y marzo de 2020 durante la mañana, se registra una marcada diferencia en magnitud entre CEAZAMET y CFOSAT.

Lo anterior indica que en las mañanas se maximiza la contribución del bombeo de Ekman a la surgencia, mas su acción igualmente se registra en las tardes cuando se maximiza el viento y el transporte de Ekman.

Índice de decaimiento del viento entre CFOSAT (~100 km de la costa) y CEAZAMET (PLdV)

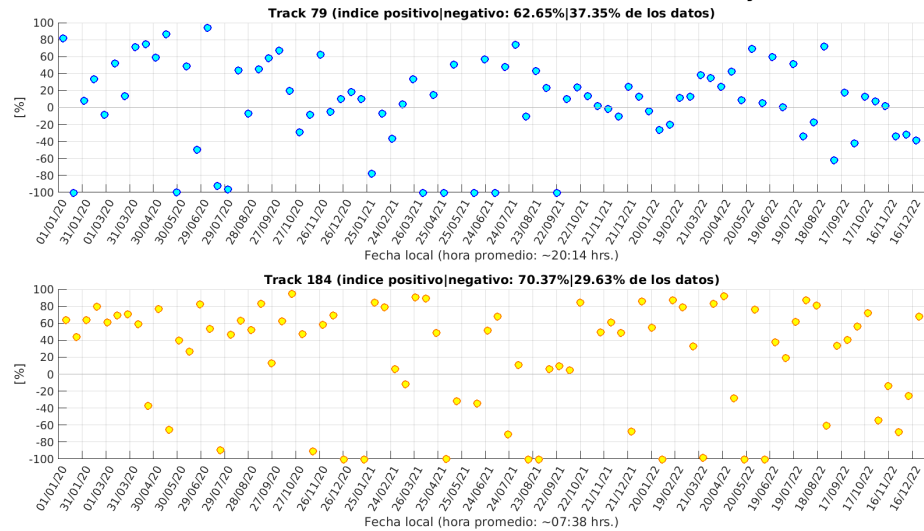


Figura 4.40: Perfiles del índice de decaimiento del viento entre las trayectorias de CFOSAT y las mediciones de Punta Lengua de Vaca de CEAZAMET, durante todo el periodo de estudio.

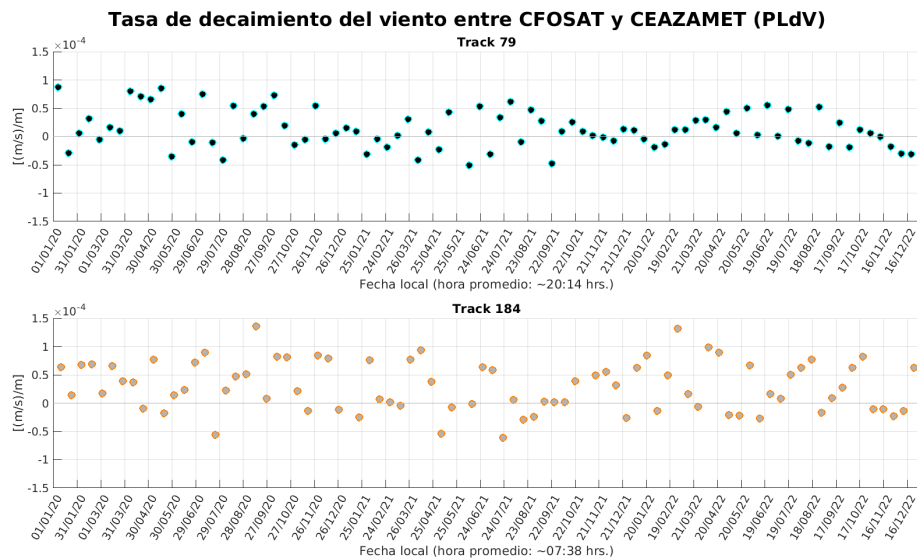


Figura 4.41: Perfiles de la tasa de decaimiento del viento entre las trayectorias de CFOSAT y las mediciones de Punta Lengua de Vaca de CEAZAMET, durante todo el periodo de estudio.

La cuantificación del decaimiento del viento hacia la costa con mayor exactitud se muestra en la Figura 4.40 a partir de las ecuaciones 3.5 y 3.6. Esta corresponde a un índice de decaimiento del viento entre las trayectorias 79 y 184 de CFOSAT y las mediciones de PLdV

de CEAZAMET, durante todo el periodo de estudio. Como se puede ver, el índice del decaimiento del viento en PLdV se mantiene positivo: un 62,65 % para el caso de la trayectoria 79 y un 70,37 % para la trayectoria 184. Es decir, entre los años 2020 y 2022 el decaimiento del viento fue observado en gran parte del periodo y con mayor intensidad en la mañana en relación a la tarde.

Análoga a la Figura 4.40, la Figura 4.41 muestra la tasa de decaimiento del viento (definida en la ecuación 3.7) para tener una aproximación del grado de decaimiento del viento en relación con la distancia desde la costa. La tasa es cercana a cero si el viento CFOSAT es similar al viento CEAZAMET como, por ejemplo, en los días cercanos a 24 de febrero de 2021 para ambas trayectorias. Asimismo, se destaca que el decaimiento del viento es más intenso durante las madrugadas, puesto que la concentración de datos que superan los $0,5 \times 10^{-4}$ (m/s)/s de tasa de decaimiento es mayor en el caso de la trayectoria 184 (07:38 HL) que la 79 (20:14 HL). En resumen, esto podría señalar que el decaimiento del viento es mayor en las mañanas (*track* 184), lo que implica que también se produce una alta surgencia en las madrugadas por el aporte del bombeo y no sólo en las tardes en respuesta al transporte de Ekman.

Tabla 4.11: Cantidad de tasas de decaimiento positivas (TD+) y negativas (TD-), y sus promedios [10^{-4} (m/s)/s] (Prom. + y Prom. -, respectivamente), frente a PLdV.

N° track	Hora local	Periodo 2020-2022		Año 2020		Año 2021		Año 2022	
		TD+	Prom. +	TD+	Prom. +	TD+	Prom. +	TD+	Prom. +
79	20:10 hrs.	52	0,32	18	0,49	16	0,25	18	0,23
		TD-	Prom. -	TD-	Prom. -	TD-	Prom. -	TD-	Prom. -
		31	-0,19	10	-0,16	11	-0,24	10	-0,17
184	07:38 hrs.	TD+	Prom. +	TD+	Prom. +	TD+	Prom. +	TD+	Prom. +
		57	0,51	23	0,55	16	0,38	18	0,59
		TD-	Prom. -	TD-	Prom. -	TD-	Prom. -	TD-	Prom. -
		24	-0,21	5	-0,22	9	-0,26	10	-0,16

La Tabla 4.11 exhibe la cantidad de tasas de decaimiento positivas (TD+) y negativas (TD-) de la Figura 4.41, además de los promedios de sólo las tasas positivas (Prom. +) y de sólo las tasas negativas (Prom. -). El propósito es mostrar hacia dónde tiende TD+ y TD- en la mañana y en la tarde frente a Punta Lengua de Vaca entre los años 2020 y 2022 de las trayectorias 79 y 184. De este modo, se vislumbra que la razón TD+/TD- es más pronunciada en la *track* 184 (mediciones AM) en comparación a la 79 (mediciones PM), tanto para el periodo completo de estudio como para los años por separado. Esto demuestra que durante las mañanas igualmente hay decaimiento del viento hacia la costa y, en este caso, hay más eventos de decaimiento (TD+) que de incremento (TD-).

A fin de generalizar los resultados obtenidos con las observaciones satelitales e *in-situ*, se utilizan los datos del reanálisis ERA5. Esto permite derivar las estimaciones del transporte y bombeo de Ekman, tanto a escala horaria como diaria, abarcando la totalidad del periodo de estudio. La Figura 4.42 muestra el promedio diario de la dinámica de Ekman en 30°S entre los años 2020 y 2022. Se utilizan datos de ERA5 y se multiplica el transporte de Ekman por -1 para facilitar la comparación con el bombeo.

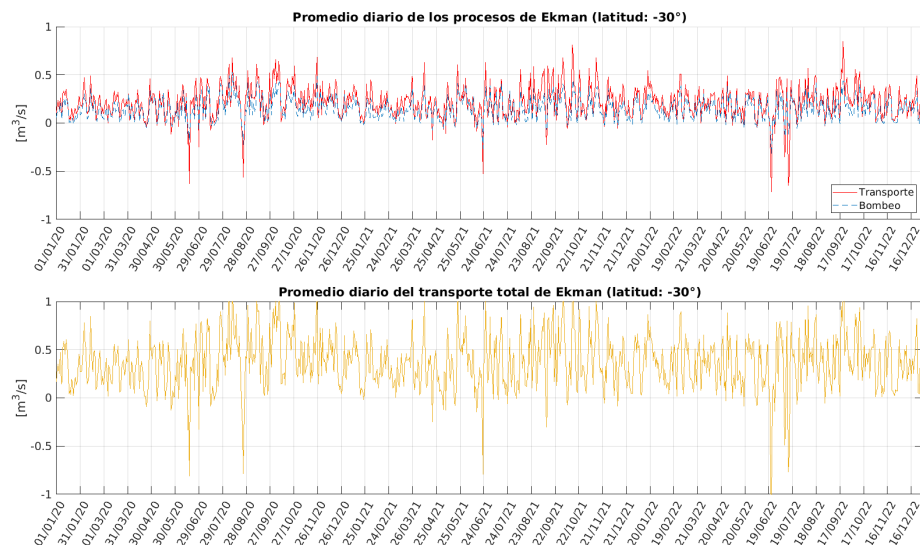


Figura 4.42: Perfiles del promedio diario de la dinámica de Ekman con datos de ERA5 en la región de estudio, específicamente en 30°S. **Panel superior:** Transporte y bombeo de Ekman. **Panel inferior:** Transporte total de la dinámica de Ekman.

De acuerdo al perfil superior de la Figura 4.42, se observa que tanto el transporte como el bombeo de Ekman en 30°S (frente a PLdV) presentan valores positivos en su mayoría. Esto implica que el movimiento del agua se orienta en dirección costa afuera a causa del bombeo, y conlleva un ascenso de agua, lo que fomenta el proceso de surgencia. En contraste, un transporte de Ekman negativo se asocia con vientos del norte, fenómeno que se manifiesta principalmente en invierno austral, como en ciertos eventos frontales o de bajas segregadas con precipitación. Estos eventos pueden corroborarse con los registros de CEAZAMET en los gráficos de precipitación de la estación de Punta Lengua de Vaca⁵³ y en los mapas de la condición del viento superficial de la Figura 4.43, cuyas fechas coinciden con transportes totales de Ekman menores o iguales a $-0,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

El perfil inferior de la Figura 4.42 representa el transporte total de los procesos de Ekman (suma entre el transporte y bombeo) en 30°S. En promedio, el 66,56 % de este total corresponde al transporte y el 33,44 % al bombeo, por tanto, la contribución predominante de la dinámica de Ekman en PLdV es debido a su transporte. Por una parte, esta diferencia suele ocurrir, porque el transporte de Ekman opera directamente en la capa superficial del océano costa afuera, debido a la circulación vertical en profundidad del mar. Por otra parte, el bombeo de Ekman es un resultado secundario del transporte de Ekman, activando la divergencia en la superficie oceánica.

⁵³ CEAZAMET. Estación Punta Lengua de Vaca: Precipitación. [En línea] Disponible en: https://ceazamet.cl/index.php?pag=mod_sensor&p_cod=ceazamet&e_cod=PLV&zs_cod=PLVPP

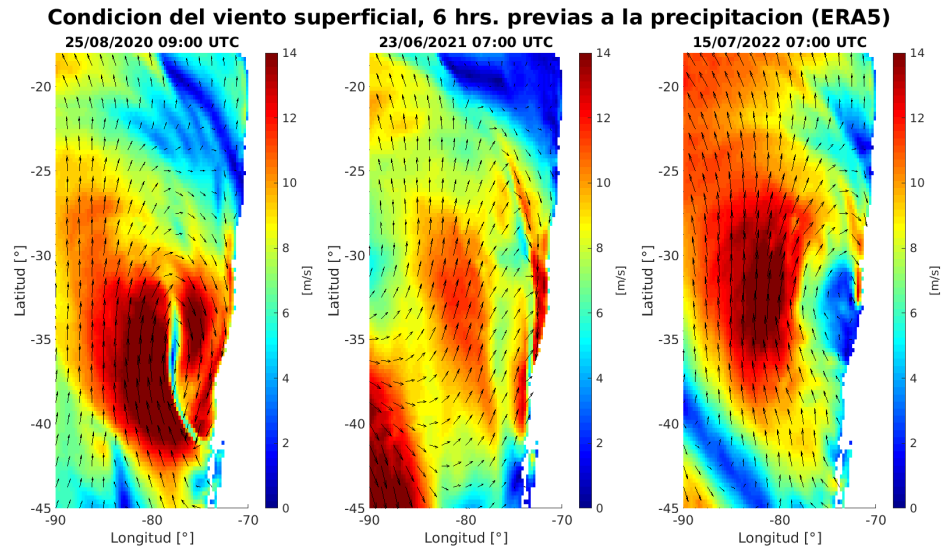


Figura 4.43: Condición del viento superficial en la región de estudio durante algunos días de precipitación en Punta Lengua de Vaca.

Tabla 4.12: Precipitación en PLdV (30,24°S y 71,63°O).

Fecha y hora CEAZAMET	Precip. en el día [mm/día]	Precip. en la hora [mm]	Fecha y hora ERA5 (6 hrs. antes)	Tipo de evento	Cierre de puerto en Tongoy
25/08/2020 11:00 HL	5,2	2,6	25/08/2020 09:00 UTC	Frente	Ola / Marejada
23/06/2021 09:00 HL	17,3	4,4	23/06/2021 07:00 UTC	Frente	Mal tiempo
15/07/2022 09:00 HL	32,6	11,3	15/07/2022 07:00 UTC	Baja segregada	Mal tiempo

La tasa de decaimiento del viento de las trayectorias 79 y 184 (Figura 4.41) presenta valores mayores o iguales a cero en algunas fechas⁵⁴ en que el transporte total de Ekman es menor o igual a $-0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 4.42). Esto indica que el viento registrado por CFOSAT a $\sim 100 \text{ km}$ de la costa supera las mediciones de la estación PLdV de CEAZAMET. De hecho, ha de ser consistente con la aproximación de un evento frontal al continente (Figura 4.43: 25/08/2020 y 23/06/2021) o aparición de baja segregada (Figura 4.43: 15/07/2022), 6 horas antes de la precipitación en el lugar.

⁵⁴ CFOSAT no necesariamente recorrió la zona con las trayectorias 79 y 184 en todas las fechas en que el promedio diario del transporte total de Ekman es menor o igual a $-0,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Una utilidad adicional de la base de datos CFOSAT es estudiar el decaimiento del viento a lo largo de trayectorias que atraviesan la costa, tal como se representa en las Figuras 4.44 y 4.45 con las *tracks* número 49, 79, 109 y 231, 261, 291, respectivamente. Para ello, se utiliza el grillado gaussiano de los datos CFOSAT para simplificar el graficado del promedio longitudinal del viento y de la desviación estándar de todas las pasadas de cada trayectoria.

De las Figuras 4.44 y 4.45:

- El viento y la desviación estándar de las trayectorias 79, 261 y 291 son menores en la costa en comparación a 1°–2° de longitud de lejanía (hacia el oeste).
- Mientras que en las trayectorias 49, 109 y 231 no muestran variaciones notorias.

Por ello, se seleccionan tres trayectorias de interés: 291, 79 y 261 (orden de norte a sur), puesto que en dichos recorridos se visualiza de mejor forma la diferencia de viento en ~ 100 *km* de longitud desde la costa hacia mar adentro (ver Figura 4.46).

En efecto, de acuerdo a la Figura 4.47, la caída del viento en ~ 100 *km* de longitud es de 6, 8 y 5,5 *m/s* aprox. para las trayectorias 291, 79 y 261, respectivamente. Esto también se refleja en su tasa de decaimiento, en la que la mayor es de $0,75 \times 10^{-4} s^{-1}$ de la *track* 79 a $\sim 33,64^\circ S$ en la costa.

Por lo tanto, el análisis exhaustivo de las series de tiempo del viento a lo largo de la Región de Coquimbo revela la influencia significativa del chorro costero en el océano y en la atmósfera. En efecto, incide en el transporte y bombeo de Ekman, con consecuencias importantes en la temperatura del mar y la surgencia costera. Además, el estudio detallado del decaimiento del viento hacia la costa, tanto a partir de observaciones satelitales como *in-situ*, proporciona una comprensión más profunda sobre los procesos físicos que operan en esta región.

Se destaca que CFOSAT ha permitido una caracterización más precisa de esta dinámica costera, así comprender el comportamiento del viento a lo largo de trayectorias que atraviesan la costa y su decaimiento en relación con la distancia desde la misma. Se subraya también la importancia de la variabilidad diurna en la contribución al proceso de surgencia y sus efectos en las bahías de la Región de Coquimbo.

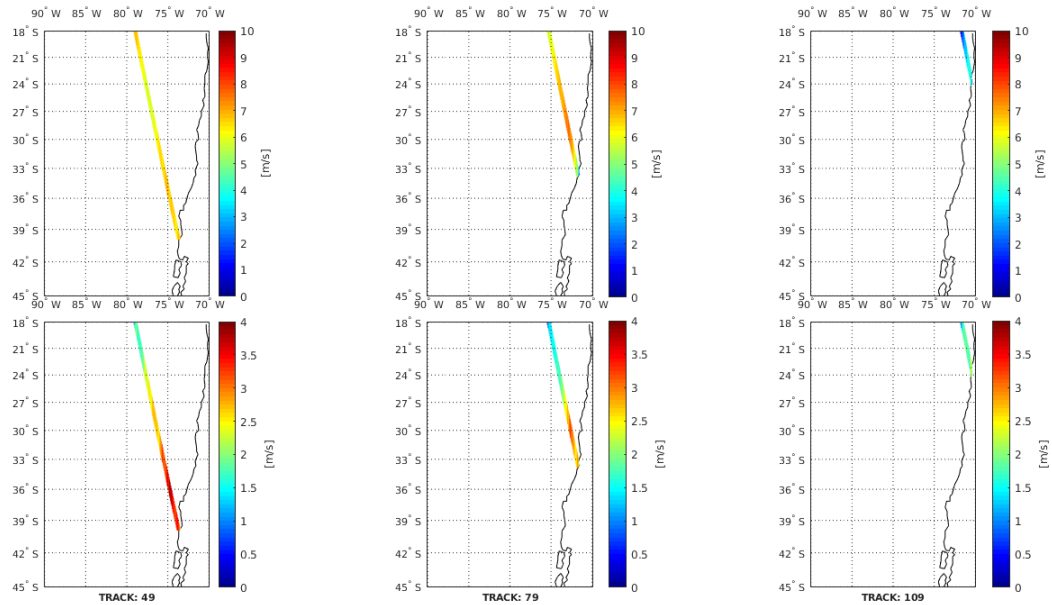


Figura 4.44: Decaimiento del viento de las trayectorias 49, 79 y 109 (de izquierda a derecha, respectivamente). **Paneles superiores:** Promedio longitudinal del viento a lo largo de cada trayectoria, entre los años 2020 y 2022. **Paneles inferiores:** Promedio longitudinal de la desviación estándar del viento a lo largo de cada trayectoria, entre los años 2020 y 2022.

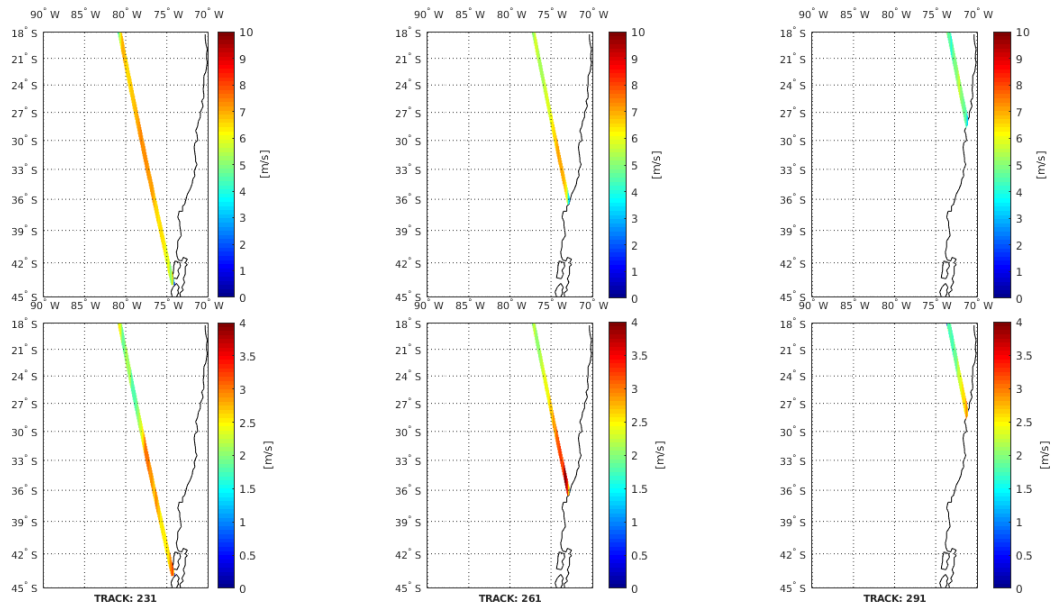


Figura 4.45: Análoga a Figura 4.44, pero de las trayectorias 231, 261 y 291.

Promedio longitudinal del viento de las trayectorias de interés, durante el periodo de estudio

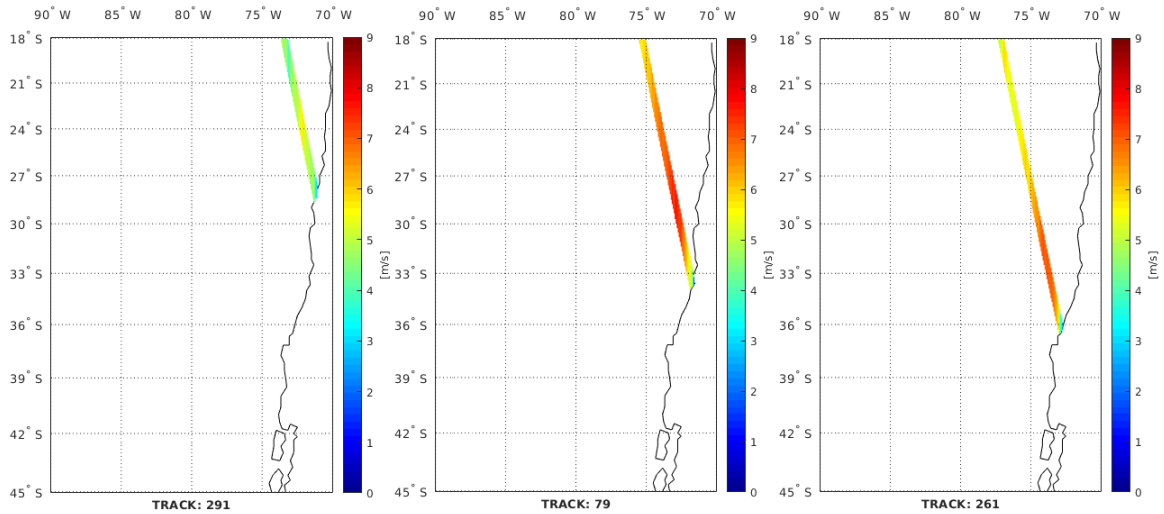


Figura 4.46: Promedio longitudinal del viento a lo largo de las trayectorias 291, 79 y 261, entre los años 2020 y 2022.

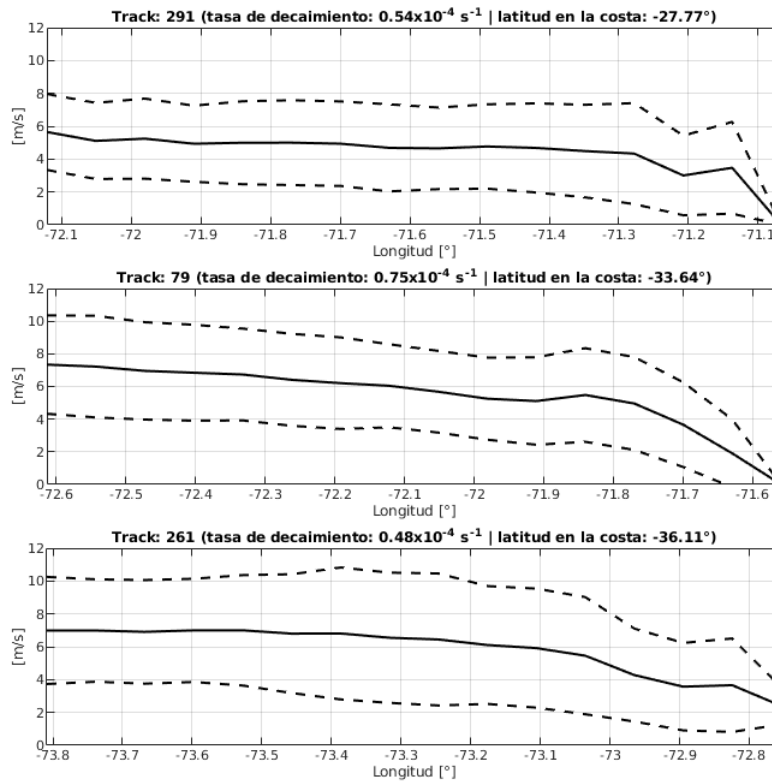


Figura 4.47: Perfiles del decaimiento del viento de las trayectorias de interés, en una extensión longitudinal de ~ 100 km. La línea continua representa el viento promedio de todas las pasadas de una misma trayectoria, mientras que las líneas segmentadas son su desviación estándar.

4.5. Espectros de oleaje y eventos de cierre de puerto

Otra relevancia de CFOSAT es que permite monitorear eventos, ya sea de chorros costeros, frentes fríos o sucesos en que hay altas SWH, gracias a su sensor de olas SWIM L2. De allí, se obtiene al menos la dirección de la ola en una determinada trayectoria y su espectro de energía. Esto posibilita la distinción entre las contribuciones del mar de fondo (*swell*) y mar de viento (*wind sea*).

En este análisis se presentan algunos tipos de eventos con la trayectoria 184 frente a Punta Lengua de Vaca (PLdV, *box* 162 a $\sim 30^\circ\text{S}$) y frente a Punta Lavapié (PLP, *box* 172 $\sim 37^\circ\text{S}$). Dichos eventos se clasifican según su contribución dominante, tanto por mar de fondo como por mar de viento. Cabe recordar que la trayectoria 184 es la paralela más cercana a la costa, aproximadamente a unos 100 *km* de distancia. Estos eventos se escogen a partir de la clasificación de cuando la SWH de CFOSAT es máxima en la trayectoria 184 durante los tres años de periodo de estudio. Seguidamente, se ordenan de manera descendente desde la mayor SWH máxima y se revisan las primeras fechas.

Para empezar, se exploran las primeras ocho fechas de SWH máxima frente a Punta Lavapié. Se crea un gráfico simple de magnitud de la ola (SWH combinada, SWH por mar de viento y SWH por mar de fondo) con respecto al tiempo con datos de ERA5 a las 12:00 UTC⁵⁵, coincidentes con la pasada de la trayectoria 184 frente a PLP. Se identifican los eventos en que la SWH por *swell* ($\text{SWH}_{\text{swell}}$) es sustantivamente mayor a la SWH por *wind sea* ($\text{SWH}_{\text{wind sea}}$) y viceversa, después se escogen sólo dos fechas para cada caso (cuatro en total frente a PLP). Estos gráficos no se muestran en el informe.

De manera análoga, se buscan otras fechas de SWH máxima, pero frente a Punta Lengua de Vaca, viendo si hay alguna formación de frente, baja segregada o chorro costero con los mapas de viento con ERA5, así tener una mayor cantidad de días a analizar. Se seleccionan cuatro fechas más, asegurando que también se cumpla la condición de que dos sean en que $\text{SWH}_{\text{swell}}$ es mayor a $\text{SWH}_{\text{wind sea}}$ y otras dos de manera contraria, tal como se muestra en la Tabla 4.13.

En la Tabla 4.13 se resume la información relevante de las ocho fechas a estudiar para los espectros de oleaje de CFOSAT con la trayectoria 184, frente a PLdV y frente a PLP, segregadas según su contribución dominante de la ola (mar de fondo o mar de viento). Además se indica su distancia respectiva con respecto a la costa, su magnitud del viento y su altura significativa de la ola de CFOSAT. En general, las mediciones CFOSAT frente a la costa de Chile de estos eventos están a 147,3 *km* en promedio y sus SWH son similares en promedio (4,2 *m* por mar de fondo y 4,7 *m* por mar de viento).

No obstante, hay una evidente desigualdad en las magnitudes del viento cuando la contribución dominante de la ola es por mar de viento, puesto que en promedio es de 14,6 *m/s* (versus 6,1 *m/s* cuando es por mar de fondo). Por ende, se espera que exista una diferencia en los espectros de energía de la ola para cada tipo de contribución.

⁵⁵ 12:00 UTC de ERA5 es la hora más cercana a las mediciones CFOSAT para la trayectoria 184, la cual recorre la región de estudio a las 11:38 UTC en promedio.

Tabla 4.13: Tipos de eventos a estudiar para los espectros de oleaje de CFOSAT con trayectoria 184, frente a Punta Lengua de Vaca (PLdV) y frente a Punta Lavapié (PLP).

Tipo de contribución dominante de la ola	Fecha y hora CFOSAT	Nº box, frente a...	Latitud [°]	Longitud [°]	Distancia aprox. de CFOSAT a la costa	Viento CFO [m/s]	SWH CFO [m]
Mar de fondo o <i>swell</i>	26/09/2020, 11:43 UTC	162, PLdV	-30,2	-72,7	122,3 km (1,1°)	6,0	3,4
	08/07/2022, 11:33 UTC		-30,2	-72,8	133,4 km (1,2°)	4,7	4,2
	10/07/2020, 11:44 UTC	172, PLP	-36,9	-74,3	155,7 km (1,4°)	9,8	4,5
	12/12/2021, 11:41 UTC		-36,8	-74,6	189,0 km (1,7°)	3,9	4,8
Mar de viento o <i>wind sea</i>	13/09/2020, 11:43 UTC	162, PLdV	-30,1	-72,6	111,2 km (1,0°)	13,8	4,4
	09/10/2020, 11:43 UTC		-30,2	-72,8	133,4 km (1,2°)	13,4	4,1
	16/11/2021, 11:40 UTC	172, PLP	-36,7	-74,4	166,8 km (1,5°)	15,6	4,8
	24/12/2022, 11:29 UTC		-36,8	-74,4	166,8 km (1,5°)	15,6	4,7

Tabla 4.14: Coincidencia de reportes de cierre de puerto de la Armada, cercanos a 30°S (Chañaral: ~26,34°S | Tongoy: ~30,26°S | Algarrobo: ~33,37°S) y a 37°S (Constitución: ~35,33°S | Coronel: ~36,99°S | Lebu: ~37,61°S) cuando la contribución es por mar de fondo.

Tipo de contribución dominante de la ola	Fecha y hora CFOSAT	Frente a...	Fecha de reporte	Localidad	Tipo de cierre de puerto
Mar de fondo o <i>swell</i>	26/09/2020, 11:43 UTC	~30°S, PLdV	-	Chañaral	No hubo en fecha cercana
			-	Tongoy	No hubo en fecha cercana
			19 al 20 /09/2020	Algarrobo	Ola / Marejada
	08/07/2022, 11:33 UTC	~30°S, PLdV	3 al 4 y del 11 al 12 /07/2022	Chañaral	Ola / Marejada
			02/07/2022	Tongoy	Visibilidad
			8 al 16 /07/2022	Tongoy	Mal tiempo
			9 al 11 /07/2022	Algarrobo	Mal tiempo
	10/07/2020, 11:44 UTC	~37°S, PLP	-	Constitución	Registros post-agosto 2020
			-	Coronel	Registros post-agosto 2020
			-	Lebu	Registros post-agosto 2020
	12/12/2021, 11:41 UTC	~37°S, PLP	6 al 7 /12/2021	Constitución	Viento
			12 al 13 /12/2021		Ola / Marejada
			-	Coronel	No hubo en diciembre 2021
			5 al 7 /12/2021	Lebu	Viento
			8 al 10 /12/2021		Ola / Marejada
			16 al 17 /12/2021		Visibilidad
18 al 20 /12/2021	Viento				

Tabla 4.15: Análoga a Tabla 4.14, pero cuando la contribución dominante de la ola es por mar de viento.

Tipo de contribución dominante de la ola	Fecha y hora CFOSAT	Frente a...	Fecha de reporte	Localidad	Tipo de cierre de puerto
Mar de viento o <i>wind sea</i>	13/09/2020, 11:43 UTC	~30°S, PLdV	12 al 13 /09/2020	Chañaral	Ola / Marejada
			10 al 16 /09/2020	Tongoy	Ola / Marejada
			10 al 16 /09/2020	Algarrobo	Ola / Marejada
	09/10/2020, 11:43 UTC	~30°S, PLdV	05/10/2020	Chañaral	Viento
			3 al 4 /10/2020	Tongoy	Viento
			4 al 5 /10/2020	Algarrobo	Viento
			7 al 8 /10/2020		Ola / Marejada
			12/10/2020		Visibilidad
	16/11/2021, 11:40 UTC	~37°S, PLP	14 al 18 /11/2021	Constitución	Viento
			15 al 18 /11/2021	Coronel	Ola / Marejada
			18 al 19 /11/2021		Viento
			18 al 20 /11/2021	Lebu	Ola / Marejada
			20 al 23 /11/2021	Lebu	Viento
	24/12/2022, 11:29 UTC	~37°S, PLP	28 al 29 /12/2022	Constitución	Viento
			22 al 23 /12/2022	Coronel	Viento
			23 al 25 /12/2022		Ola / Marejada
23 al 25 /12/2022			Lebu	Ola / Marejada	
25 al 26 /12/2022				Visibilidad	

Continuando el análisis de estos eventos, se revisan si hubo cierres de puerto en fechas cercanas a la pasada de la trayectoria 184 en lugares aledaños a las localidades en cuestión. Se seleccionan tres: en la zona misma o parecida, unos grados de latitud al norte y unos grados de latitud al sur, tal como se expone resumidamente en la Tabla 4.14 y 4.15. Habitualmente, se presentan cierres de puerto por: Ola / Marejada, Visibilidad, Mal tiempo y Viento, sobre todo cuando la contribución es por mar de viento.

Por un lado, de la Tabla 4.14 cuando la contribución dominante es por mar de fondo, los reportes de la Armada en las zonas cercanas a 30°S suelen extenderse entre 1 a 3 días⁵⁶, a excepción del 08/07/2022, cuyo motivo fue por Mal tiempo con una duración de 8 días. Es importante señalar que estos reportes comenzaron en agosto de 2020 por parte de la Armada de Chile, por lo tanto, no se dispone de información sobre posibles cierres de puerto para el 10/07/2020.

Por otro lado, cuando la contribución dominante es por mar de viento (ver Tabla 4.15), los puertos cierran por una mayor extensión. Por ejemplo, el 16/11/2021 en Constitución se cerró por 4 días por Viento, en Coronel por 4 días también y en Lebu por 5 días (primero por Ola / Marejada y luego por Viento en ambas localidades).

$$H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad (4.1)$$

⁵⁶ Incluso hay fechas en que no hubo cierre, como el 26/09/2020 en Chañaral y Tongoy o el 12/12/2021 en Coronel.

Se prosigue con la comparación de la altura significativa de la ola medida por CFOSAT y la SWH obtenida por ERA5⁵⁷, tanto la combinada (SWH_{comb} ⁵⁸, definida también como la ecuación 4.1 con N cantidad de olas, según Holthuijsen (2007)) como la asociada por mar de fondo (SWH_{swell}) y por mar de viento ($SWH_{\text{wind sea}}$). También, los datos de ERA5 se promedian latitudinalmente sus variables por separado para tener una mejor representación del estado del oleaje en las localidades de interés (su resolución espacial es de $0,5^\circ$ para la SWH). Es decir que frente a Punta Lengua de Vaca se promedia cada SWH entre $29,5^\circ\text{S}$ y $30,5^\circ\text{S}$ y frente a Punta Lavapié entre $36,5^\circ\text{S}$ y $37,5^\circ\text{S}$, dentro del rango de longitudes de medición de CFOSAT para la determinada fecha. De este modo, se obtiene una única cifra por variable (análogamente para la SWH de CFOSAT, pero esta es de mayor resolución, o sea, $0,014^\circ$ en latitud y $0,005^\circ$ en longitud).

Se destaca que las fechas se clasifican dependiendo de si SWH_{swell} es mayor a $SWH_{\text{wind sea}}$ y viceversa, frente a Punta Lengua de Vaca (Figura 4.48, costado izquierdo) y a Punta Lavapié (Figura 4.49, costado derecho). De acuerdo a los gráficos de barras, el contraste entre la SWH de CFOSAT y la de ERA5 es leve, con diferencias máximas de $\sim 1 \text{ m/s}$, considerando que la resolución espacial de CFOSAT es mucho más precisa. Al analizar las SWH de ERA5, la SWH_{comb} no corresponde a la suma exacta entre SWH_{swell} y $SWH_{\text{wind sea}}$, pero –en promedio tomando en cuenta ambas localidades costeras en cuestión– SWH_{comb} se acerca en un 89,18 % a la suma cuando la contribución es por mar de fondo y en un 72,85 % cuando es por mar de viento.

Además, cuando la contribución dominante de la ola es por *swell*, la SWH_{swell} es semejante a la SWH_{comb} , por lo que el oleaje es mayormente controlado por el mar de fondo. Por contraparte, cuando la contribución es por *wind sea*, $SWH_{\text{wind sea}}$ no logra igualar por completo a la SWH_{comb} , sin embargo, se equipara considerando una parte de la contribución del oleaje remoto. Esto último también se revela en los espectros de energía omni-direccional (costado derecho de Figura 4.48 y costado izquierdo de Figura 4.49). Se aprecian sus máximos en torno a los $0,02 \text{ rad/m}$ y sus energías empiezan a decaer al aproximarse a los $0,04 \text{ rad/m}$, incluso se acercan a cero desde el número de onda $0,10 \text{ rad/m}$. Este patrón de máxima y caída de energía es similar a lo que presenta Xu et al. (2022). Particularmente:

- En 30°S , cuando la contribución dominante de la ola es por mar de fondo, los niveles más altos de energía son previos a $0,02 \text{ rad/m}$ y superan los $50 \text{ m}^3/\text{rad}$. Pero cuando es por contribución del mar de viento, los máximos de energía ocurren a los $0,02 \text{ rad/m}$ y no sobrepasan los $40 \text{ m}^3/\text{rad}$.
- En 37°S , cuando la contribución es por mar de fondo, los máximos de energía son cercanos a $0,02 \text{ rad/m}$ y superan los $55 \text{ m}^3/\text{rad}$. Sin embargo, ocurre una singularidad cuando es por mar de viento, ya que sus máximos también rodean los $0,02 \text{ rad/m}$, pero no sobrepasan los $60 \text{ m}^3/\text{rad}$.

⁵⁷ Este reanálisis se considera como un complemento para la presente tesis, por lo que permite definir de mejor forma el tipo de contribución dominante de la ola.

⁵⁸ Altura significativa de las olas combinadas de viento y oleaje: “Este parámetro representa la altura media del tercio más alto de olas oceánicas/marinas de superficie, generadas por el viento y el oleaje. Representa la distancia vertical entre la cresta y la depresión de la ola”. Definición extraída de Copernicus Climate Data Store (ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present). [En línea] Disponible en: [10.24381/cds.adbb2d47](https://cds.adbb2d47)

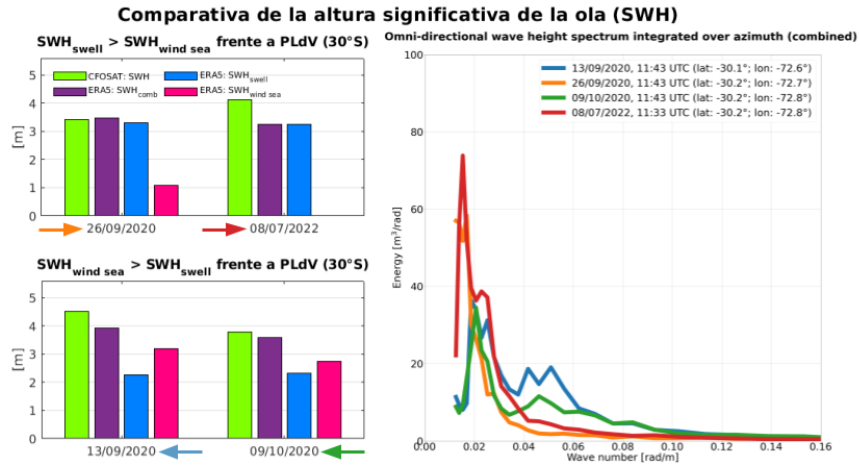


Figura 4.48: Comparativa de la altura significativa de la ola frente a Punta Lengua de Vaca ($\sim 30^{\circ}\text{S}$). En el gráfico de barras, la SWH de CFOSAT es la barra verde, mientras que las SWH de ERA5 son la morada para la SWH combinada, la azul para la SWH por *swell* y la fucsia para la SWH por *wind sea*. Los perfiles representan los espectros de energía (*Energy*) del oleaje, con respecto al número de onda (*Wave number*), a partir de las mediciones CFOSAT para las fechas seleccionadas. Estos perfiles de energía son obtenidos con las rutinas de Python entregadas por AVISO+, las cuales son adaptadas para la presente tesis, pero se mantiene el idioma por defecto.

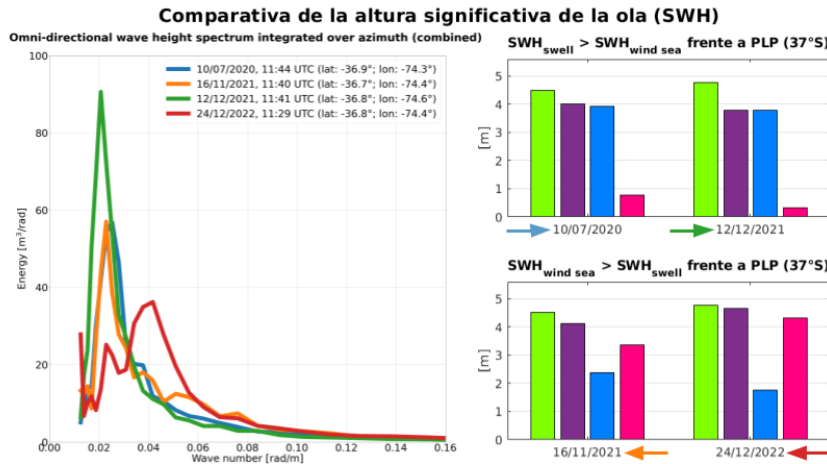


Figura 4.49: Análoga a Figura 4.48, pero frente a Punta Lavapié ($\sim 37^{\circ}\text{S}$).

Otro detalle a notar es entre las fechas frente a PLP por contribución por mar de fondo, puesto que una leve intensificación del viento genera un aumento significativo en la energía, casi un tercio de incremento (10/07/2020: $\sim 60 \text{ m}^3/\text{rad}$; 12/12/2021: $\sim 90 \text{ m}^3/\text{rad}$), a pesar de que las SWH combinadas entre ambos días sean similares.

En base a la contribución por mar de viento frente a PLP, es posible decir que la relación entre la SWH y la energía es no lineal, debido a que la diferencia entre $\text{SWH}_{\text{wind sea}}$ con $\text{SWH}_{\text{swell}}$ del 24/12/2022 es mucho mayor significativamente que la del 16/11/2021. Esto no se refleja necesariamente en el perfil de energía, dado que el máximo de energía se alcanza el día 16/11/2021.

En la Figura 4.50 se muestran las condiciones del viento superficial de ERA5, correspondientes a las fechas en consideración a las 12:00 UTC en la región de estudio. Estas fechas están dispuestas en orden cronológico ascendente en la fila superior para los días frente a PLdV y en la fila inferior para los días frente a PLP. En común, próxima de la costa:

- En los paneles superiores a 30°S , sus vientos provienen del sur que superan los 8 m/s –algunos más fuertes como el del 13/09/2020, cuya contribución es por mar de viento y tiene múltiples máximos de energía previos a $0,06 \text{ rad/m}$ (ver Figura 4.48)–. A excepción del 08/07/2022 (contribución por mar de fondo), en el que el viento se debilita ($< 4 \text{ m/s}$) y se trataría del paso de un frente frío con viento norte intenso acercándose a los 37°S , cuyo cierre de puerto fue por Mal tiempo en Tongoy y Algarrobo (ver Tabla 4.14). Además, el 26/09/2020, a pesar de la presencia localizada de un chorro costero leve (vientos de 8 m/s aprox. entre los 27°S y 30°S), la contribución dominante de la ola es por mar de fondo. Para un chorro mayor como el del 09/10/2020 (vientos sobre 10 m/s entre 25°S y 35°S), la contribución es por viento.
- En los paneles inferiores a 37°S , también el viento es sur con magnitudes que superan los 10 m/s , sobre todo los días 16/11/2021 y 24/12/2022 (contribuciones por mar de viento). De hecho, se manifiestan chorros costeros que se extienden incluso hacia los 30°S , menos durante los días 10/07/2020 y 12/12/2021 (contribuciones por mar de fondo), cuyos vientos son oestes en la costa y un poco más débiles en magnitud (cerca de 6 m/s).

También, existe otra peculiaridad en los días 16/11/2021 y 24/12/2022 frente a PLP. Primero, entre 16/11/2021 ($\text{SWH}_{\text{wind sea}} > \text{SWH}_{\text{swell}}$) y 10/07/2020 ($\text{SWH}_{\text{swell}} > \text{SWH}_{\text{wind sea}}$), sus perfiles de energía son sólo sutilmente diferentes. Estos se distinguen por su segundo punto más alto cercano a $0,04 \text{ rad/m}$, el cual ocurre ligeramente antes en número de onda el día 10/07/2020, lo que podría deberse a la influencia del oleaje remoto (ver Figura 4.49). El 16/11/2021 continúa teniendo otros máximos con el avance del número de onda, posiblemente gracias a la influencia del viento debido al chorro costero localizado en PLP (ver Figura 4.50).

Segundo, la energía del 24/12/2022 exhibe variabilidad, caracterizada por la existencia de múltiples máximos en números de onda bajos (inferiores a $0,05 \text{ rad/m}$) y el mayor se sitúa en $0,04 \text{ rad/m}$ con una energía de $37 \text{ m}^3/\text{rad}$ (ver Figura 4.49). Esta variación se puede atribuir a la presencia del chorro costero intenso del sur, que se extendió desde los 27°S hasta los 43°S , con vientos superiores a 10 m/s en superficie (ver Figura 4.50).

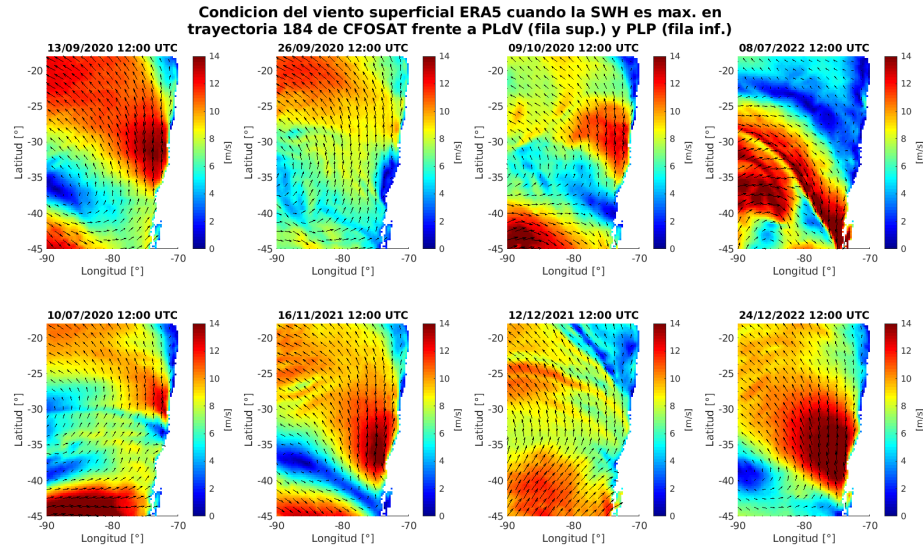


Figura 4.50: Condición del viento superficial en la región de estudio cuando la SWH es máxima en la trayectoria 184 de las determinadas fechas. **Paneles superiores:** Frente a Punta Lengua de Vaca. **Paneles inferiores:** Frente a Punta Lavapié.

A su vez, se adjuntan los espectros bidimensionales de energía del oleaje (Figuras 4.51, 4.53, 4.55 y 4.57), los cuales se complementan con los gráficos de dirección de la ola (Figuras 4.52, 4.54, 4.56 y 4.58), tal como se especifica en la Metodología. En estos espectros se aprecian las particiones dominantes de dirección, longitud de onda y altura significativa de la ola para cada día en los *box* de interés (puntos rojos en el mapa) para ubicarse frente a PLdV y PLP en la trayectoria 184. A grandes rasgos, tomando en cuenta sólo las particiones 1 y 2:

- Cuando la contribución dominante de la ola es por mar de fondo, la dirección de propagación de la ola está entre los 30 y 70 grados (hacia el noreste hasta el este). El número de onda se concentra al centro del espectro para longitudes de onda mayores. La longitud de la onda en el *box* suele ser de unos 200 hasta 400 metros, con una altura significativa de la ola cercana a 3 a 4 metros.
- Cuando es por mar de viento, la dirección de la ola oscila entre los 4 y 49 grados (hacia el norte y hasta el noreste). El número de onda alto se extiende a mayor radio en el espectro, pero implica que la energía se distribuye en longitudes de onda menores (“hacia afuera” del círculo del espectro). Además, la longitud de la onda en el *box* va de los 100 a 200 metros (un poco menos extensa que por mar de fondo), con una altura significativa de la ola cercana a 2 a 3 metros, aproximadamente.

En el espectro de la Figura 4.51 para PLdV por contribución de mar de fondo, se observa que la partición 1 de los días 26/09/2020 y 08/07/2022 abarca una altura significativa de la ola entre los 2,8 y 3,4 metros. Sus longitudes son de 390,4 y 322,6 metros en dirección hacia el NNE (~ 33 grados), de acuerdo a la rosa de los vientos.

En la Figura 4.52 se refleja la longitud y dirección de la ola de la partición 1 en el *box* 162. En la partición 2 se alcanza una SWH de 1,2 y 1,5 metros con longitudes de la ola de 209,0 y 143,7 metros. Su propagación es hacia el NNE (33,2 grados) y NEbN (40,6 grados), respectivamente.

De manera análoga, pero para PLP por contribución de mar de viento (Figura 4.57), la partición 1 de los días 16/11/2021 y 24/12/2022 alcanza una SWH de 3,4 y 3,8 metros aproximadamente. Las longitudes de la ola son de 252,4 y 153,0 metros en dirección hacia el NE (48,9 grados) y NbE (18,1 grados), respectivamente.

En la Figura 4.58 también plasma la longitud y dirección de la ola de la partición 1 en el *box* 172. La partición 2 comprende una SWH de 2,1 y 2,0 metros con longitudes de 98,2 y 78,4 metros en dirección al NNE (35,6 grados) y al N (4,7 grados), respectivamente.

En síntesis, cuando se trata de mar de fondo, la ola es más alta y de mayor longitud (Figura 4.52 y 4.54); mientras que por mar de viento, la ola es de menor tamaño (Figura 4.56 y 4.58). Esto debido a la energía asociada (tal como se muestra en los perfiles de energía de las Figuras 4.48 y 4.49) y al periodo de los movimientos verticales de la superficie del océano, dependiendo de su tipo de contribución (el cual es mayor para el caso del mar de fondo, ver Figura 1.3).

Adicionalmente, estos espectros muestran que la partición 1 engloba la mayor porción de SWH y de longitud. Esta incorpora la mayor porción de energía junto con la dirección dominante de propagación, identificada por un número de onda concentrado en el centro del espectro. La partición 2 cubre la segunda sección de mayor energía del espectro bidimensional del oleaje (Hauser et al., 2017).

Por lo tanto, la relevancia de clasificar por tipo de contribución dominante radica en la capacidad de identificar el tipo específico de la ola. Esto contribuiría en la anticipación de eventos intensos en las costas chilenas. Efectivamente, facilitaría la realización de pronósticos para adelantar cierres de puertos como medida preventiva, ya sea por Viento o por Ola / Marejada, gracias a que se dispone de las mediciones simultáneas de viento y SWH con CFOSAT.

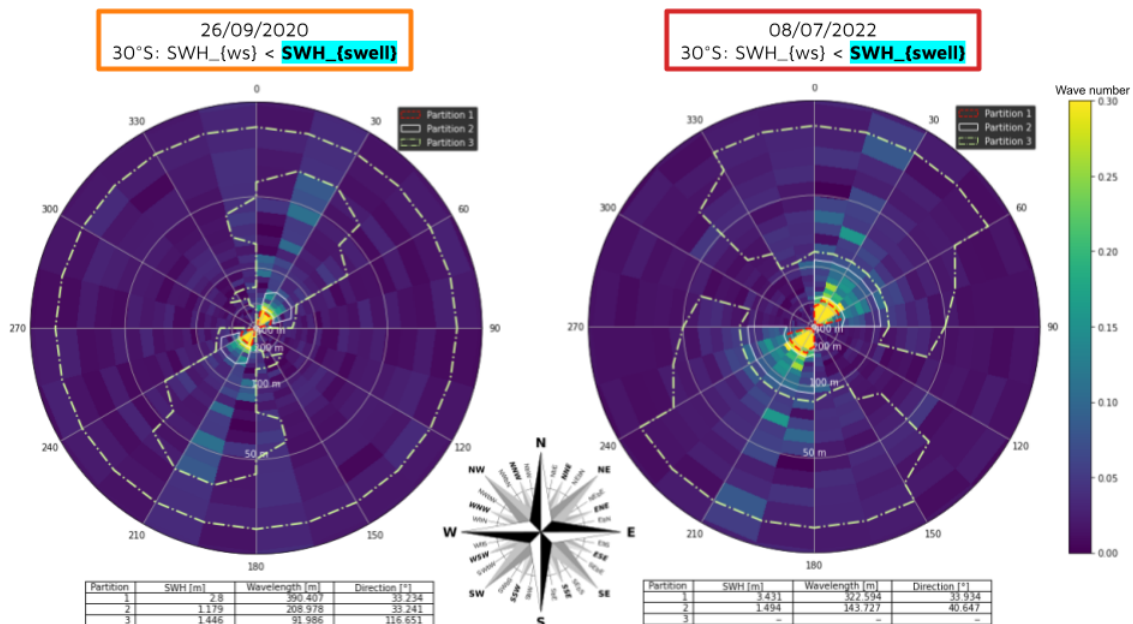


Figura 4.51: Espectros direccionales bidimensionales y particiones (*Partition*) dominantes de dirección, longitud de onda y SWH para cada fecha cuando la contribución dominante es por *swell* frente a Punta Lengua de Vaca (~30°S en *box* 162) con la trayectoria 184.

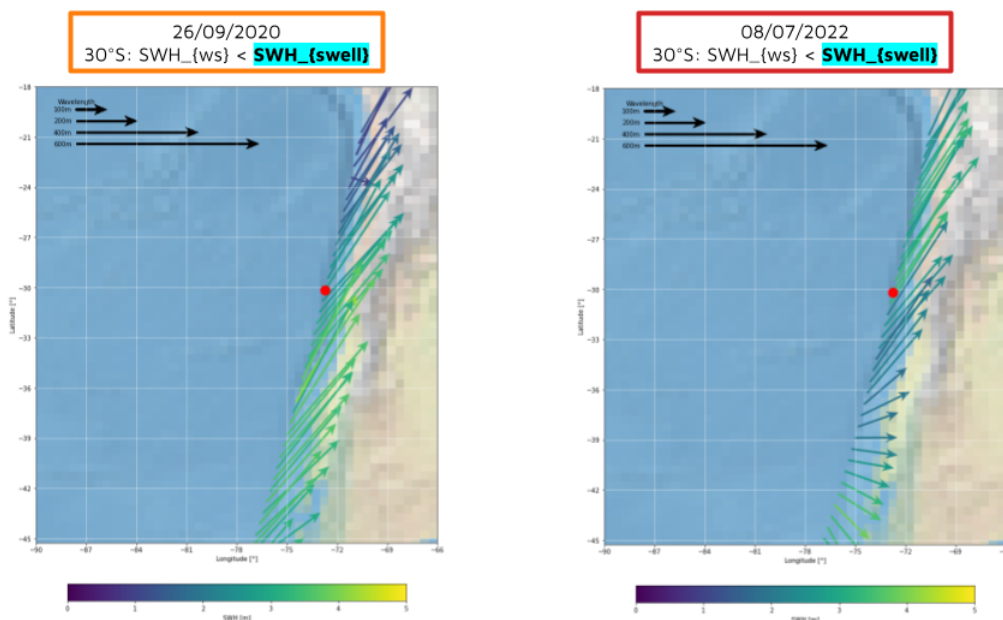


Figura 4.52: Longitudes de onda (*Wavelength*) y direcciones dominantes del espectro de oleaje cuando la contribución es por *swell* frente a Punta Lengua de Vaca (~30°S; punto rojo en *box* 162) con la trayectoria 184, con una precisión del 10% y 15°, respectivamente.

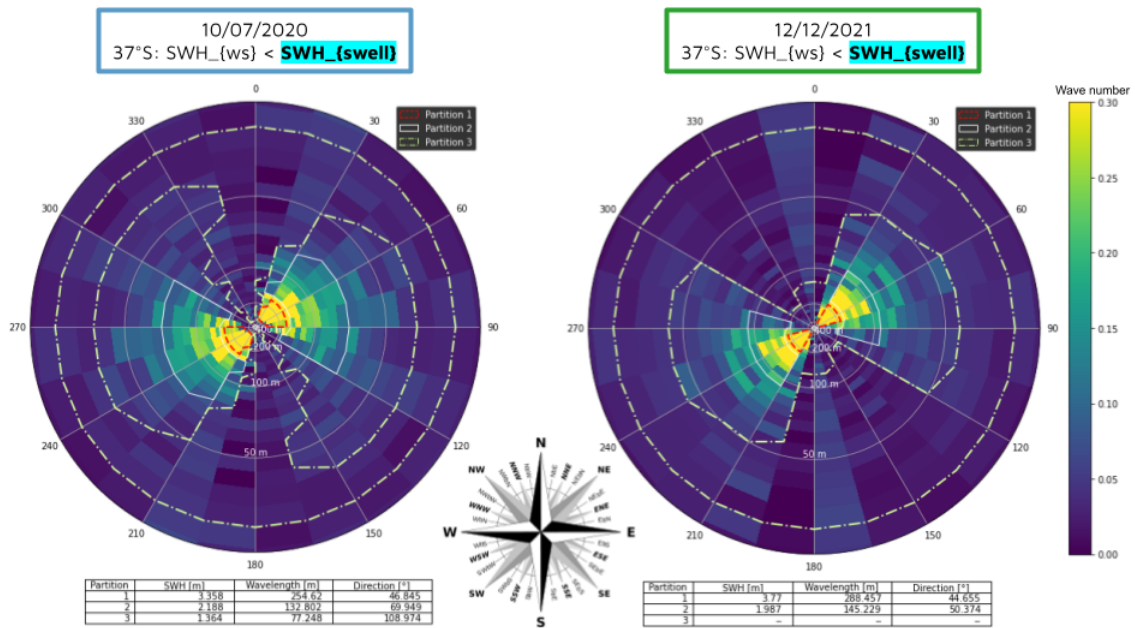


Figura 4.53: Análoga a la Figura 4.51 cuando la contribución es por *swell*, pero frente a Punta Lavapié (~37°S, en *box* 172) con la trayectoria 184.

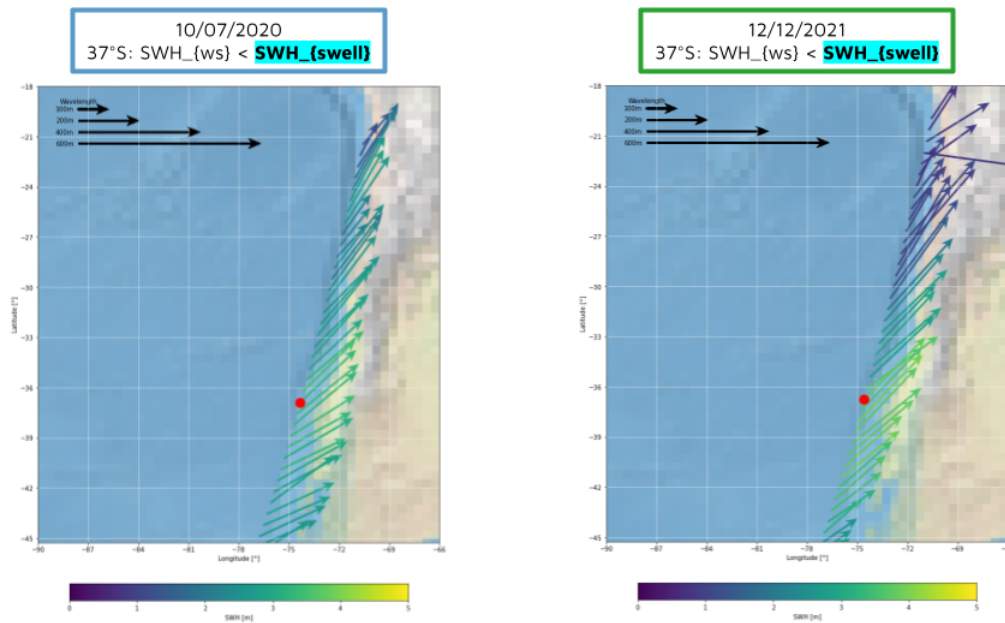


Figura 4.54: Análoga a la Figura 4.52 cuando la contribución es por *swell*, pero frente a Punta Lavapié (~37°S; punto rojo en *box* 172) con la trayectoria 184.

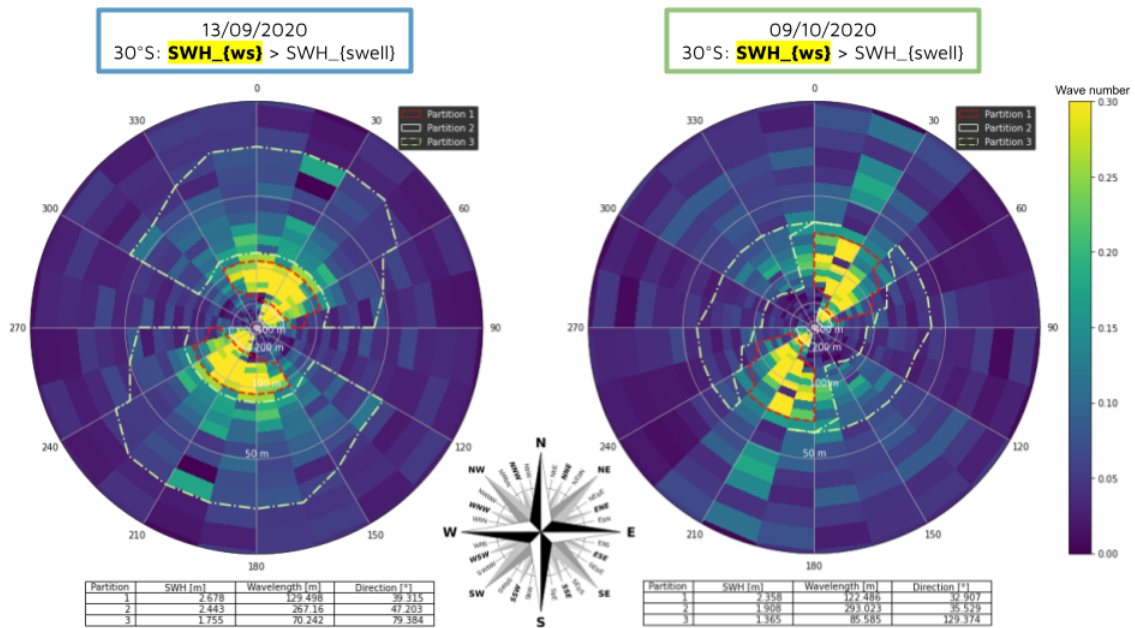


Figura 4.55: Análoga a la Figura 4.51, pero cuando la contribución es por *wind sea* frente a Punta Lengua de Vaca (~30°S) con la trayectoria 184.

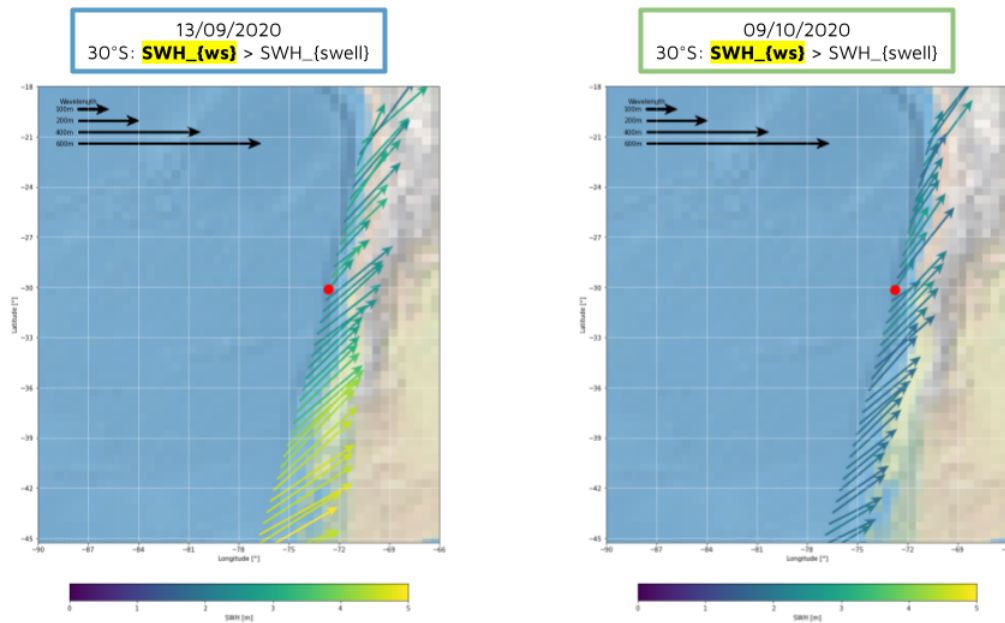


Figura 4.56: Análoga a la Figura 4.52, pero cuando la contribución es por *wind sea* frente a Punta Lengua de Vaca (~30°S) con la trayectoria 184.

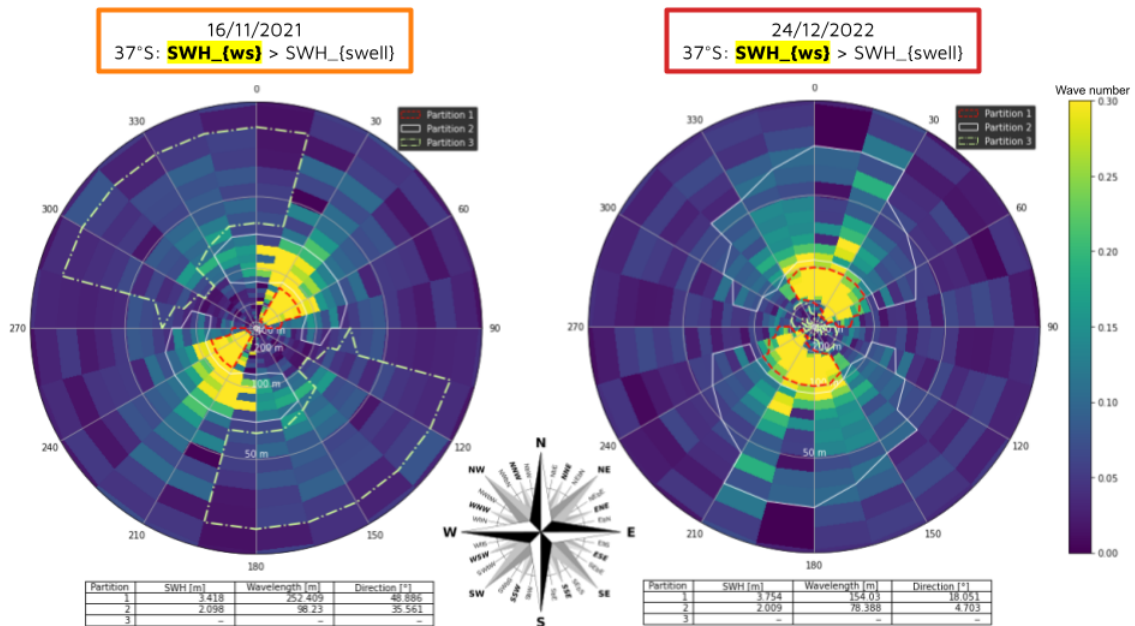


Figura 4.57: Análoga a la Figura 4.51, pero cuando la contribución es por *wind sea* frente a Punta Lavapié (~37°S) con la trayectoria 184.

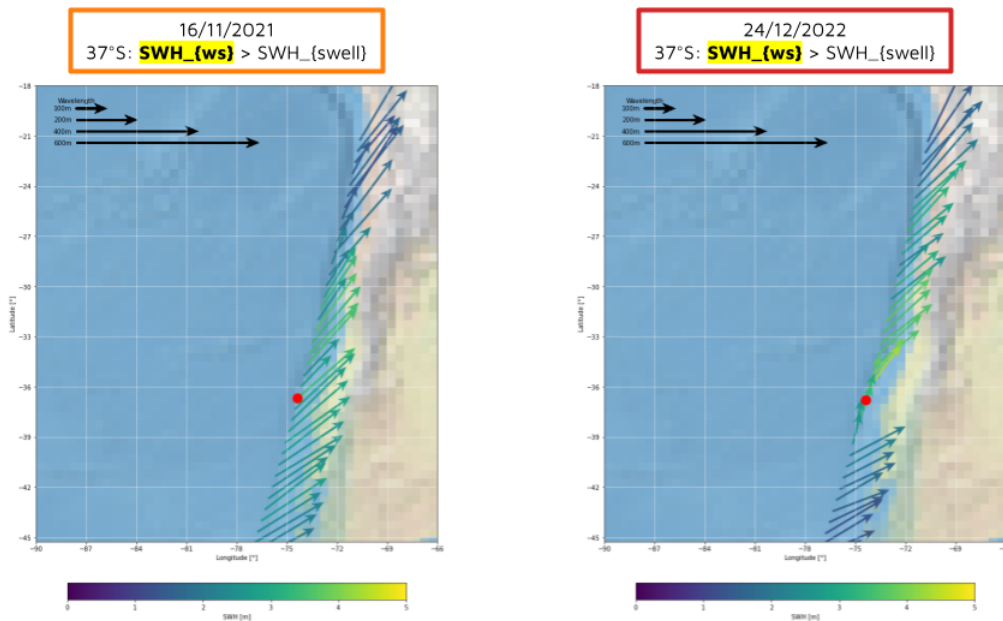


Figura 4.58: Análoga a Figura 4.52, pero cuando la contribución es por *wind sea* frente a Punta Lavapié (~37°S) con la trayectoria 184.

Capítulo 5

Conclusiones

Los datos estructurados de viento superficial (10 m) y oleaje, provenientes de la misión CFOSAT, resultaron consistentes con la teoría y observaciones *in-situ* en la zona costera de Chile central sometida a la influencia de la corriente en chorro atmosférica de baja altura. En efecto, se observan características tales como el decaimiento del viento al aproximarse a la costa, la intensificación general de los vientos costeros en torno a los principales focos de surgencia, con un régimen de oleaje en zona centro norte y su aumento en magnitud al acercarse hacia el sur (Figura 4.4). Asimismo, los datos CFOSAT resultaron estadísticamente consistentes con los obtenidos de las salidas de los modelos de viento y ola; ECMWF y CMEMS, respectivamente. La comparación con datos similares provenientes de otras misiones satelitales muestran también altas correlaciones y errores reducidos (ver sección de “Validación, comparación y estadística”). Por ende, se puede concluir que la misión CFOSAT proporciona una base sólida de datos para estudios de interacción océano-atmósfera en regiones de viento intenso. Además, los datos CFOSAT son favorecidos por su alta resolución espacial y su capacidad única de observar simultáneamente el oleaje.

De hecho, las observaciones nadir de la misión CFOSAT son capaces de captar con alta precisión las características del viento y del oleaje en superficie durante eventos de viento intenso (superior a 5 m/s) y de mar de fondo con gran amplitud de oleaje (superior a 2 m). Estos eventos están asociados a cierres de puertos y paralización de actividades marítimas a lo largo de la costa chilena (Figuras 4.18 y 4.43 y Tabla 4.12). Por consiguiente, estos datos son de utilidad para las agencias costeras de monitoreo y pronóstico de eventos de viento intenso, particularmente en zonas en que se prevé un incremento en la ocurrencia de estos.

Las observaciones CFOSAT complementan las *in-situ* de la red costera CEAZAMET para la influencia del chorro costero (en el océano y en la atmósfera) en la dinámica de Ekman, la temperatura superficial del mar y en procesos biológicos asociados con procesos de surgencia costera (e.g. frente a Punta Lengua de Vaca en la Región de Coquimbo).

Las mediciones de vanguardia del radar de olas SWIM proveen el espectro direccional completo del oleaje, en celdas de $70\text{ km} \times 90\text{ km}$. Esto permite diferenciar y cuantificar las contribuciones del mar de fondo (*swell*) y del mar de viento (*wind sea*) distinguiendo longitudes de ondas desde los 70 a los 500 metros (Figuras 4.51 a 4.58). Por consiguiente, las observaciones CFOSAT –con su mayor resolución– permiten detectar olas de longitudes de onda menores que en las misiones anteriores. Por ende, los datos CFOSAT permiten anticipar eventos intensos de viento y marejadas en las costas chilenas gracias a sus mediciones simultáneas de viento y altura significativa de olas (SWH, por su sigla en inglés), así evaluar cierres de puertos.

A pesar de que cada trayectoria de CFOSAT recorre la región cada 13 días, se dispone igualmente de una pasada diaria frente a Chile en una banda entre 80 y 2.000 km de distancia de la costa. Así, esta información permite anticipar condiciones de oleaje desfavorables para la actividad portuaria y seguridad ciudadana en zonas costeras, complementando las observaciones locales disponibles y salidas de modelos en caso de ser necesario.

Asimismo, este trabajo tiene un potencial significativo en múltiples aspectos. En primer lugar, estos resultados contribuyen al avance del conocimiento en el campo de la circulación atmosférica y su interacción con el viento y el oleaje. En segundo lugar, la presente tesis puede tener aplicaciones prácticas, tales como el desarrollo sistemático y ordenado de reportes de cierres de puerto por eventos intensos de viento y oleaje. Además, se considera necesario complementar este estudio con las marejadas de verano austral que provienen del noroeste, asociado a sistemas frontales de invierno en el Hemisferio Norte ([Universidad de Valparaíso, 2016](#)).

Por último, se destaca la necesidad de caracterizar mejor el resultado del forzamiento antropogénico en la interacción océano-atmósfera-continente que, posiblemente, provoque una mayor frecuencia de eventos de viento intenso y/o de marejadas. Por ejemplo, con las observaciones de la misión satelital CFOSAT se puede monitorear la evolución e intensificación del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (SPSA), analizando su variabilidad estacional y su influencia tanto en la surgencia costera como en el régimen pluviométrico del Norte y Norte Chico del país, debido a su migración hacia el sur. Finalmente, la mayor disponibilidad de mediciones permitiría mejorar las simulaciones de los modelos regionales de la atmósfera y del océano y, de este modo, obtener una mejor comprensión de la variabilidad climática y de los mecanismos asociados.

Bibliografía

- Aguirre, C., Flores-Aqueveque, V., Vilches, P., Vásquez, A., Rutllant, J. A., y Garreaud, R. (2021, abril). Recent Changes in the Low-Level Jet along the Subtropical West Coast of South America. *Atmosphere*, 12(4), 465. Descargado 2023-04-06, de <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/4/465> doi: 10.3390/atmos12040465
- Aguirre, C., García-Loyola, S., Testa, G., Silva, D., y Farías, L. (2018, enero). Insight into anthropogenic forcing on coastal upwelling off south-central Chile. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6, 59. Descargado 2023-04-06, de <https://online.ucpress.edu/elementa/article/doi/10.1525/elementa.314/112828/Insight-into-anthropogenic-forcing-on-coastal> doi: 10.1525/elementa.314
- Aguirre, C., Garreaud, R., Belmar, L., Farías, L., Ramajo, L., y Barrera, F. (2021, agosto). High-Frequency Variability of the Surface Ocean Properties Off Central Chile During the Upwelling Season. *Frontiers in Marine Science*, 8, 702051. Descargado 2023-04-06, de <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.702051/full> doi: 10.3389/fmars.2021.702051
- Aguirre, C., Rojas, M., Garreaud, R. D., y Rahn, D. A. (2019, noviembre). Role of synoptic activity on projected changes in upwelling-favourable winds at the ocean's eastern boundaries. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1), 44. Descargado 2023-04-06, de <https://www.nature.com/articles/s41612-019-0101-9> doi: 10.1038/s41612-019-0101-9
- Aguirre, C., Rutllant, J. A., y Falvey, M. (2017, octubre). Wind waves climatology of the Southeast Pacific Ocean. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4288–4301. Descargado 2023-04-06, de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.5084> doi: 10.1002/joc.5084
- Astudillo, O., Dewitte, B., Mallet, M., Frappart, F., Rutllant, J., Ramos, M., ... Illig, S. (2017, marzo). Surface winds off Peru-Chile: Observing closer to the coast from radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 191, 179–196. Descargado 2021-08-16, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003442571730010X> doi: 10.1016/j.rse.2017.01.010
- Astudillo, O., Dewitte, B., Mallet, M., Rutllant, J. A., Goubanova, K., Frappart, F., ... Bravo, L. (2019, junio). Sensitivity of the Near-Shore Oceanic Circulation Off Central Chile to Coastal Wind Profiles Characteristics. *Journal of Geophysical Research*.
- AVISO+ Satellite Altimetry Data. (2019). *Description of CFOSAT tool for pass-over determination*. Descargado de https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/cfosat_passover_tool_user_manual.pdf
- AVISO+ Satellite Altimetry Data. (2020). *SWIM Product Simplified Handbook*. Descargado

de https://aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/SWIM_simplified_handbook.pdf

- Bravo, L., Ramos, M., Astudillo, O., Dewitte, B., y Goubanova, K. (2016, septiembre). Seasonal variability of the Ekman transport and pumping in the upwelling system off central-northern Chile ($\sim 30^\circ$ S) based on a high-resolution atmospheric regional model (WRF). *Ocean Science*, 12(5), 1049–1065. Descargado 2021-08-16, de <https://os.copernicus.org/articles/12/1049/2016/> doi: 10.5194/os-12-1049-2016
- Briceño de Urbaneja, I., Pérez-Martínez, W., Martínez, C., Pardo-Pascual, J., y Palo, J. (2023). Quantification of Coastal Erosion Rates Using Landsat 5, 7, and 8 and Sentinel-2 Satellite Images between 1986-2022—Case Study: Cartagena Bay, Valparaíso, Chile.
- García-Reyes, M. (2014). Synoptic-scale upwelling indices and predictions of phyto- and zooplankton populations. *Progress in Oceanography*.
- Garreaud, R. D., y Muñoz, R. C. (2005, agosto). The Low-Level Jet off the West Coast of Subtropical South America: Structure and Variability. *Monthly Weather Review*, 133(8), 2246–2261. Descargado 2023-04-06, de <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/MWR2972.1> doi: 10.1175/MWR2972.1
- Garreaud, R. D., y Rutllant, J. (2003, mayo). Coastal Lows along the Subtropical West Coast of South America: Numerical Simulation of a Typical Case. *Monthly Weather Review*, 131(5), 891–908. Descargado 2024-02-29, de [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0891:CLATSW>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493(2003)131<0891:CLATSW>2.0.CO;2) doi: 10.1175/1520-0493(2003)131<0891:CLATSW>2.0.CO;2
- Garreaud, R. D., Rutllant, J. A., Muñoz, R. C., Rahn, D. A., Ramos, M., y Figueroa, D. (2011, marzo). VOCALS-CUpEx: the Chilean Upwelling Experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(5), 2015–2029. Descargado 2023-04-06, de <https://acp.copernicus.org/articles/11/2015/2011/> doi: 10.5194/acp-11-2015-2011
- Goubanova, K., Echevin, V., Dewitte, B., Codron, F., Takahashi, K., Terray, P., y Vrac, M. (2011, abril). Statistical downscaling of sea-surface wind over the Peru–Chile upwelling region: diagnosing the impact of climate change from the IPSL-CM4 model. *Clim Dyn*, 36(7-8), 1365–1378. Descargado 2024-02-17, de <http://link.springer.com/10.1007/s00382-010-0824-0> doi: 10.1007/s00382-010-0824-0
- Hanson, J. L., y Phillips, O. M. (2001, febrero). Automated Analysis of Ocean Surface Directional Wave Spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(2), 277–293. Descargado 2023-09-11, de [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0277:AAOOSD>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0426(2001)018<0277:AAOOSD>2.0.CO;2) doi: 10.1175/1520-0426(2001)018<0277:AAOOSD>2.0.CO;2
- Hauser, D., Tison, C., Amiot, T., Delaye, L., Corcoral, N., y Castillan, P. (2017, mayo). SWIM: The First Spaceborne Wave Scatterometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(5), 3000–3014. Descargado 2023-04-06, de <http://ieeexplore.ieee.org/document/7869295/> doi: 10.1109/TGRS.2017.2658672
- Hauser, D., Tourain, C., Hermozo, L., Alraddawi, D., Aouf, L., Chapron, B., ... Tran, N. (2021, enero). New Observations From the SWIM Radar On-Board CFOSAT: Instrument Validation and Ocean Wave Measurement Assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(1), 5–26. Descargado 2023-04-06, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/9104702/> doi: 10.1109/TGRS.2020.2994372

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... Thépaut, J. (2020, julio). The ERA5 global reanalysis. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 146(730), 1999–2049. Descargado 2023-04-06, de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3803> doi: 10.1002/qj.3803
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Descargado de www.cambridge.org/9780521860284
- Li, X., Xu, Y., Liu, B., Lin, W., He, Y., y Liu, J. (2021, febrero). Validation and Calibration of Nadir SWH Products From CFOSAT and HY-2B With Satellites and In Situ Observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(2). Descargado 2023-04-06, de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020JC016689> doi: 10.1029/2020JC016689
- Liang, G., Yang, J., y Wang, J. (2021, febrero). Accuracy Evaluation of CFOSAT SWIM L2 Products Based on NDBC Buoy and Jason-3 Altimeter Data. *Remote Sensing*, 13(5), 887. Descargado 2023-04-06, de <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/5/887> doi: 10.3390/rs13050887
- Mechoso, C. R., Wood, R., Weller, R., Bretherton, C. S., Clarke, A. D., Coe, H., ... Zuidema, P. (2014, marzo). Ocean–Cloud–Atmosphere–Land Interactions in the Southeastern Pacific: The VOCALS Program. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(3), 357–375. Descargado 2023-09-11, de <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-11-00246.1> doi: 10.1175/BAMS-D-11-00246.1
- Mediavilla, D., Sepúlveda, H. H., y Alonso, G. (2020, febrero). Wind and wave height climate from two decades of altimeter records on the Chilean Coast (15°–56.5° S). *Ocean Dynamics*, 70(2), 231–239. Descargado 2023-09-12, de <http://link.springer.com/10.1007/s10236-019-01316-9> doi: 10.1007/s10236-019-01316-9
- Montecino, H. D. C., Ferreira, V. G., Cuevas, A., Castro-Cabrera, L., Soto-Báez, J. C., y De Freitas, S. R. C. (2017, febrero). Vertical deformation and sea level changes in the coast of Chile by satellite altimetry and tide gauges. *International Journal of Remote Sensing*. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1288306> doi: 10.1080/01431161.2017.1288306
- Muñoz, R. C., y Garreaud, R. D. (2005, diciembre). Dynamics of the Low-Level Jet off the West Coast of Subtropical South America. *Monthly Weather Review*, 133(12), 3661–3677. Descargado 2023-04-06, de <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/MWR3074.1> doi: 10.1175/MWR3074.1
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2018). *Guía para el análisis y pronóstico de las olas*. Descargado de <https://library.wmo.int/viewer/29183>
- Oyarzún, D., y Brierley, C. M. (2019, enero). The future of coastal upwelling in the Humboldt current from model projections. *Climate Dynamics*, 52(1-2), 599–615. Descargado 2023-04-06, de <http://link.springer.com/10.1007/s00382-018-4158-7> doi: 10.1007/s00382-018-4158-7
- Pickett, M. H. (2003). Ekman transport and pumping in the California Current based on the U.S. Navy’s high-resolution atmospheric model (COAMPS). *Journal of Geophysical Research*, 108(C10), 3327. Descargado 2023-04-06, de <http://doi.wiley.com/10.1029/2003JC001902> doi: 10.1029/2003JC001902

- Rahn, D. A., y Garreaud, R. D. (2014, marzo). A synoptic climatology of the near-surface wind along the west coast of South America: SURFACE WIND SYNOPTIC CLIMATOLOGY ALONG THE SOUTH AMERICAN WEST COAST. *International Journal of Climatology*, 34(3), 780–792. Descargado 2023-04-06, de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3724> doi: 10.1002/joc.3724
- Rahn, D. A., Garreaud, R. D., y Rutllant, J. A. (2011, noviembre). The Low-Level Atmospheric Circulation near Tongoy Bay–Point Lengua de Vaca (Chilean Coast, 30°S). *Monthly Weather Review*, 139(11), 3628–3647. Descargado 2023-04-06, de <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/MWR-D-11-00059.1> doi: 10.1175/MWR-D-11-00059.1
- Ramajo, L. (2020). Upwelling intensity modulates the fitness and physiological performance of coastal species: Implications for the aquaculture of the scallop *Argopecten purpuratus* in the Humboldt Current System. *Science of the Total Environment*.
- Renault, L., Dewitte, B., Marchesiello, P., Illig, S., Echevin, V., Cambon, G., ... Ayers, J. K. (2012, febrero). Upwelling response to atmospheric coastal jets off central Chile: A modeling study of the October 2000 event: UPWELLING RESPONSE TO ATMOSPHERIC CJ. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C2), n/a–n/a. Descargado 2023-09-16, de <http://doi.wiley.com/10.1029/2011JC007446> doi: 10.1029/2011JC007446
- Rutllant, J. A., Muñoz, R. C., y Garreaud, R. D. (2013, marzo). Meteorological observations on the northern Chilean coast during VOCALS-REx. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(6), 3409–3422. Descargado 2023-04-06, de <https://acp.copernicus.org/articles/13/3409/2013/> doi: 10.5194/acp-13-3409-2013
- Tison, C., y Hauser, D. (2019). SWIM Products Users Guide: Product description and Algorithm Theoretical Baseline Description. Descargado de https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/SWIM_ProductUserGuide.pdf
- Universidad de Valparaíso. (2016). *Atlas de oleaje de Chile*. Descargado de <https://oleaje.uv.cl/seccion/01%20introduccion.pdf>
- Wallace, J. M., y Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (2nd ed ed.) (n.º v. 92). Amsterdam ; Boston: Elsevier Academic Press. (OCLC: ocm62421169)
- Wheeler, M. C., y Hendon, H. H. (2004, agosto). An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index: Development of an Index for Monitoring and Prediction. *Monthly Weather Review*, 132(8), 1917–1932. Descargado 2024-03-11, de [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493(2004)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2) doi: 10.1175/1520-0493(2004)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2
- Winckler Grez, P., Aguirre, C., Farías, L., Contreras-López, M., y Masotti, I. (2020, noviembre). Evidence of climate-driven changes on atmospheric, hydrological, and oceanographic variables along the Chilean coastal zone. *Climatic Change*, 163(2), 633–652. Descargado 2023-09-17, de <https://link.springer.com/10.1007/s10584-020-02805-3> doi: 10.1007/s10584-020-02805-3
- Xu, Y., Hauser, D., Meng, J., Fan, C., Liu, M., y Chen, P. (2022). Statistical Comparison of Ocean Wave Directional Spectra Derived From SWIM/CFOSAT Satellite Observations and From Buoy Observations. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 60.

Anexo

Anexo A. Figuras que no se incluyeron en el cuerpo de este informe

A.1. Modos de variabilidad en el régimen de circulación costera y oceánica en el Pacífico Sudeste

A.1.1. Anomalías Intra-Estacionales

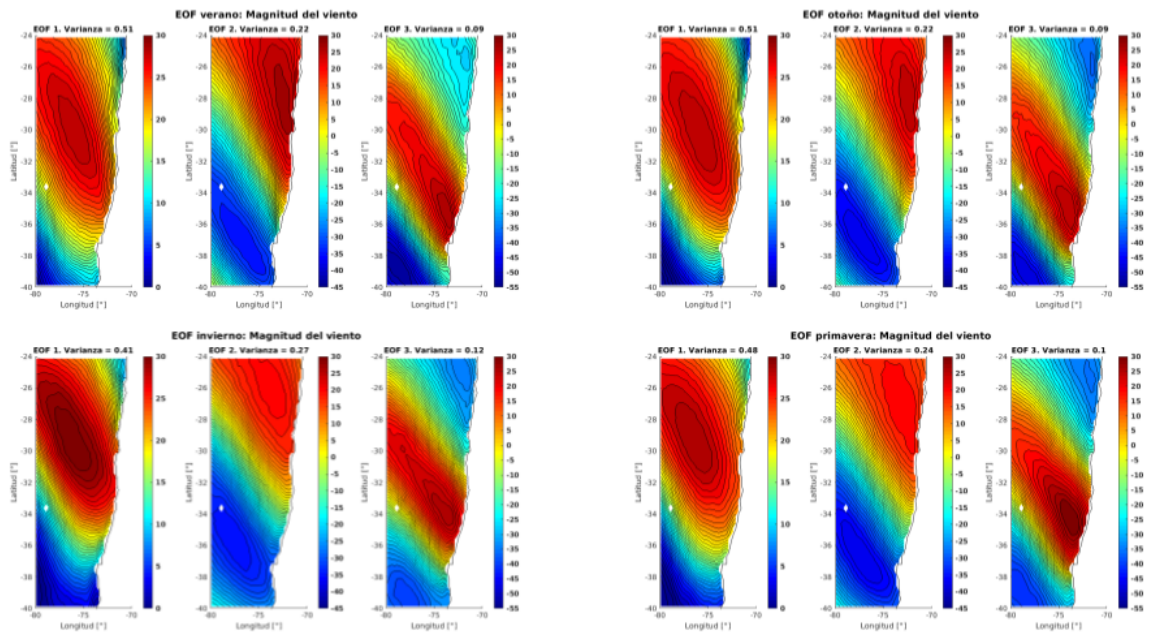


Figura A.1: Modos de variabilidad normalizados para la magnitud del viento^a, por estación del año, en escala adimensional. En promedio, el primer modo (EOF1) captura un 47,75 % de la varianza, mientras que el segundo modo (EOF2) lo hace en un 23,75 %.

^a Recordar que el campo horario del viento superficial del mar es a partir de los dos últimos satélites lanzados de ASCAT (MetOp-B y MetOp-C) y del modelo ECMWF.

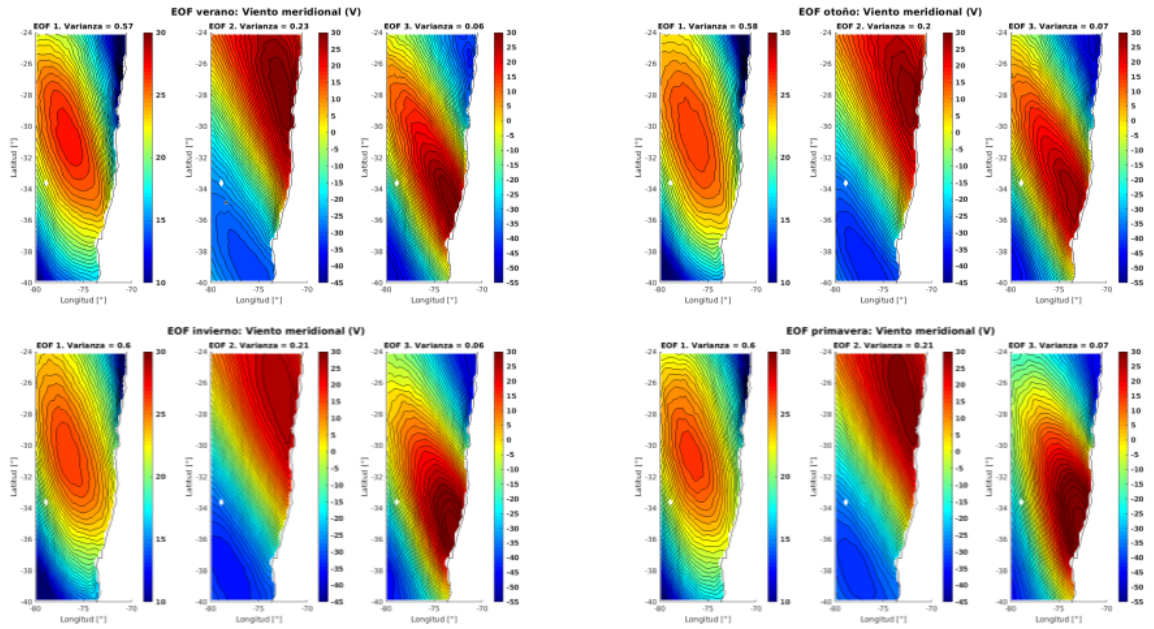


Figura A.2: Modos de variabilidad normalizados para el viento meridional, por estación del año, en escala adimensional. En promedio, el primer modo (EOF1) captura un 58,75 % de la varianza, mientras que el segundo modo (EOF2) lo hace en un 21,25 %.

A.1.2. Oscilación de Madden-Julian

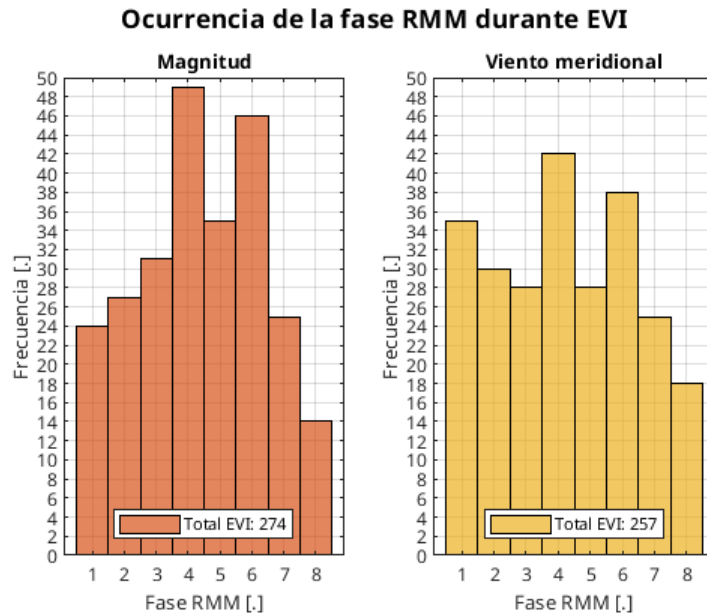


Figura A.3: Ocurrencia de cada fase RMM durante los días de eventos de viento intenso encontrados con el criterio 1 durante el periodo de estudio. **Izquierda:** Magnitud del viento. **Derecha:** Viento meridional. Por ejemplo, hubo 49 días EVI en la fase 4 del RMM, según la magnitud del viento, y hubo 18 días EVI en la fase 8 del RMM, según el viento meridional.

Tabla A.1: Contabilización de EVI, según amplitud RMM (Amp).

Magnitud del viento		Viento meridional	
Amp < 1	Amp ≥ 1	Amp < 1	Amp ≥ 1
94	180	77	180
34,31 %	65,69 %	29,96 %	70,04 %
Total EVI: 274		Total EVI: 257	

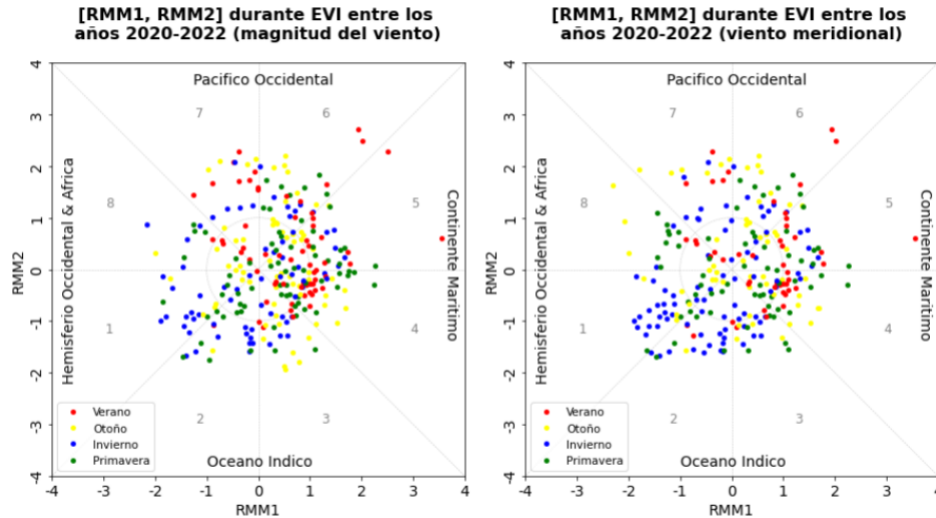


Figura A.4: Diagrama de fase RMM de los eventos de viento intenso en el periodo de estudio. **Izquierda:** Magnitud del viento. **Derecha:** Viento meridional.

Los diagramas de la Figura A.4 representan la amplitud del RMM y sus fases, de acuerdo a las fechas EVI entre los años 2020 y 2022. Los cuatro colores representan la estación del año, para así diferenciar su tendencia, por ejemplo, en verano presentan su máximo de amplitud en la fase 5 y 6, es decir, en el Continente Marítimo y Pacífico Occidental, respectivamente.

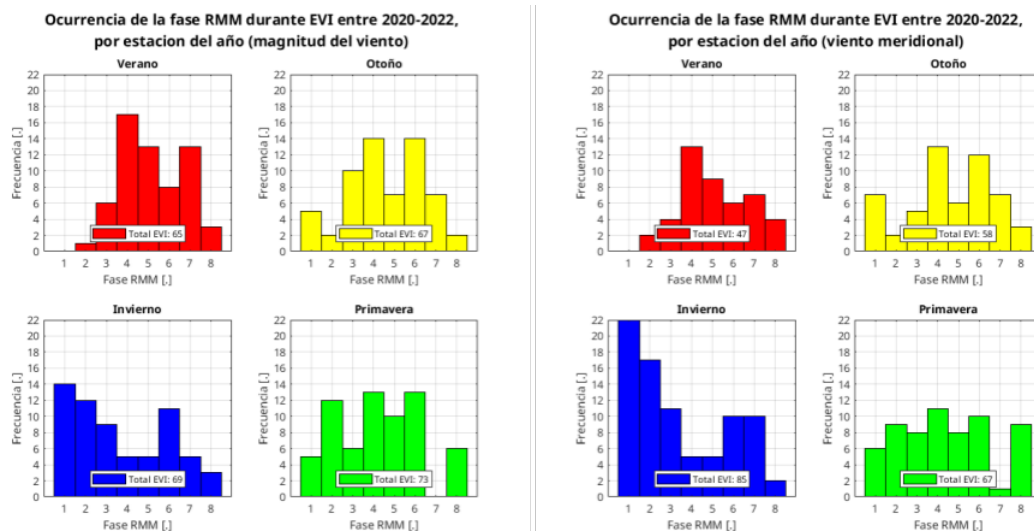


Figura A.5: Análoga a Figura A.3, pero por estación del año durante el periodo de estudio.