



Universidad de Buenos Aires

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera

Climatología actualizada de ciclones extratropicales en el Mar Argentino y su impacto en la seguridad náutica

Tesista: Julieta Camila Arce

Directora: Dra. María Paula Llano

Co-director: Lic. Alvaro Santiago Scardilli

2024

A Valeria, Rubén, Angelina y Francisca.

Agradecimientos

A la Universidad de Buenos Aires, a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, al Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. A la universidad pública, gratuita y de calidad, que fue mi otra casa durante todos estos años. A estos pabellones que me mantuvieron de pie cuando afuera todo se derrumbaba.

A todos los profesores que me formaron, en especial a María Paula, quien compartió conmigo este último tiempo y no dudó en subirse a este barco. Por su calidez, su apoyo y sus ganas de sacarme siempre una sonrisa. No importaba cuántas veces por día me acercara a su computadora, estaba dispuesta a escucharme. Esta tesis no hubiese sido posible sin ella, y sin Clarita trayendo peluches a las ocho de la mañana. A Claudia Campetella por no solo ser una gran docente, sino por ayudarnos todas las veces que tocamos la puerta. A los jurados, por tomarse el tiempo de leer mi trabajo. A todos mis compañeros temporales de oficina que hicieron este último tiempo más divertido y ameno de lo que esperaba.

Al Servicio de Hidrografía Naval y al Departamento Meteorología, el lugar que me introdujo en la vida profesional. En especial, a Alvaro, quien confía en mí hace casi 4 años y siempre priorizó que termine esta carrera. Gracias por guiarme y tomarte esta tarea de forma tan personal, espero que haya dado el fruto que siempre esperaste. Muchas gracias también a todo el personal militar y civil del departamento, que me abrió los brazos y me enseñó un mundo nuevo.

A mis compañeros que compartieron los nervios de parciales y las risas en los intervalos. A mis amigos del CBC, en especial a Inés, responsables de que haya pasado esa etapa tan desafiante. A Lucas, Julián, Sergio y Tomás, que siempre estuvieron para bancar, aunque algunos tomaron caminos diferentes. A Ezequiel, quien se convirtió en mi compañero de decisiones y de vida académica. Por volverse fundamental en este camino, y por sobre todo, por compartir al menos cinco minutos todos los días que estuviésemos en la facultad. A Agustín, por enseñarme que la vida se puede ver de otra manera y que las cosas de alguna forma u otra siempre se van a resolver. A Juan, por mostrarme la luz cuando todo se veía oscuro.

A Nair, con quien deseo compartir la vida siempre.

A Paula, quien siempre confió que iba a poder terminar esta etapa, pero no pudo verlo. Gracias por festejar tan fuerte en un lejano marzo de 2023 mi final de termodinámica, como si eso pudiera salvarte la vida en las semanas siguientes.

A todos mis abuelos, que no llegaron a ver la persona maravillosa en la que me convirtieron mis padres.

A mis hermanas, que son la razón de mi vida y las dueñas de mi corazón. A ellas les dedico este esfuerzo y el de todos los días.

A mi mamá y a mi papá, que son responsables de quien soy. Me parece que ellos todavía no entienden mucho lo que estudié durante todos estos años, pero jamás me cuestionaron y contrario a eso, me apoyaron desde el primer día. Soportaron cada una de mis lágrimas cuando todo se volvía difícil, y celebraron conmigo cada paso que dí. Antes de ser tesista, estudiante, amiga, novia o hermana, soy hija de los mejores padres. Gracias por criarme con sus ojos de amor y hacer que nunca me falte nada. Al final tenían razón, todos los sacrificios valieron la pena.

Resumen

Los ciclones extratropicales son fundamentales en la planificación náutica, ya que el conocimiento de su comportamiento permite mitigar su impacto en las embarcaciones. Este estudio empleó datos de presión a nivel del mar y viento del reanálisis NCEP/DOE (2003-2022), analizados mediante un algoritmo automatizado para la identificación y seguimiento de ciclones, complementado con técnicas estadísticas.

En el océano Atlántico Sudoccidental, particularmente en el Mar Argentino, se construyó una climatología estacional de características ciclónicas como origen, duración, distancia recorrida, profundización de presión e intensidad del viento. Se identificó un máximo de ciclones en otoño, mientras que la primavera registró los casos más longevos. Las mayores distancias recorridas y profundizaciones de presión se observaron en otoño e invierno. Espacialmente, se determinaron tres áreas de ciclogénesis constantes: la región costera de Argentina, Uruguay y sur de Brasil, y dos al sur de Tierra del Fuego y el Pasaje de Drake, próximas a la Península Antártica. Las trayectorias predominantes coincidieron con las áreas de mayor ciclogénesis e indicaron que primavera y otoño son más oceánicas.

En términos de severidad, los vientos más intensos se concentraron en invierno y otoño, mayoritariamente en el sector norte de los ciclones. Considerando la escala Beaufort, se estableció un umbral de riesgo de 35 nudos, relevante para la seguridad marítima. El análisis mostró que el invierno presentó la mayor cantidad de ciclones que mantuvieron este umbral durante toda su vida, destacándose como la estación con mayor impacto potencial en la seguridad.

Índice

1. Introducción	1
2. Datos y Metodologías	12
2.1 Región de estudio	12
2.2 Datos de NCEP/DOE Reanalysis II	13
2.3 Metodologías	14
2.3.1 Algoritmo de reconocimiento y seguimiento de ciclones extratropicales	14
2.3.2 Mann Kendall	16
2.3.3 Función de densidad de Kernel	17
2.3.4 Fórmula de Haversine	18
2.3.5 Tasa de profundización	18
2.3.6 Análisis de <i>clusters</i>	18
3. Resultados	21
3.1 Climatología de ciclones extratropicales en el Mar Argentino y en el Océano Atlántico Sudoccidental	21
3.1.1 Ciclogénesis	21
3.1.2 Tiempo de vida	27
3.1.3 Distancia total recorrida	31
3.1.4 Intensidad y profundización	32
3.1.5 Trayectorias preferenciales (<i>storm tracks</i>)	35
3.2 Viento y severidad en los ciclones extratropicales	41
3.2.1 Caso de estudio en el Mar Argentino	50
3.2.1.1 Buque pesquero Repunte	50
3.2.1.2 Situación sinóptica	51
3.2.1.3 Evolución temporal de los hechos y campos de las variables intervenientes	51
3.2.1.4 Consecuencia del evento	55
4. Conclusiones	56
Bibliografía	60

Índice de figuras

Figura 2.1 Dominio de estudio.	12
Figura 2.2 Esquema del algoritmo de seguimiento de los ciclones extratropicales.	15
Figura 3.1 Distribución de ciclones extratropicales por año.	22
Figura 3.2 Distribución de ciclones extratropicales por estación.	23
Figura 3.3 Frecuencia relativa (%) de ciclones extratropicales por estación por año.	24
Figura 3.4 Distribución espacial del número de eventos de ciclogénesis detectados para cada estación para el periodo de 20 años.	25
Figura 3.5 Densidad de ciclogénesis, a partir de la interpolación de la Figura 3.4 para cada estación para el periodo de 20 años.	26
Figura 3.6 Distribución del tiempo de vida de los ciclones extratropicales con un ciclo de vida mínimo de 1 día, por estación, para los años 2003 a 2022.	29
Figura 3.7 Distribución del tiempo de vida de los ciclones extratropicales clasificados por cantidad de días, por estación, para los años 2003 a 2022.	30
Figura 3.8 Distribución de la distancia total recorrida de los ciclones extratropicales por estación para los años 2003 a 2022.	32
Figura 3.9 Distribución de la tasa media de profundización, ajustada geoestróficamente a 45°S, por estación para los años 2003 a 2022.	33
Figura 3.10 Distribución de la tasa máxima de profundización, ajustada geoestróficamente a 45°S, por estación para los años 2003 a 2022.	34
Figura 3.11 Resultados de los análisis de silueta (“silhouette analysis”) y método del codo (“elbow method”) para la identificación del número correcto de <i>clusters</i> .	35
Figura 3.12 <i>Clusters</i> de trayectorias por estación luego de aplicar K-means con k=3.	37
Figura 3.13 <i>Clusters</i> de trayectorias por estación luego de aplicar K-means con k=2.	37
Figura 3.14 <i>Clusters</i> de trayectorias por estación luego de aplicar K-means con k=4.	38

Figura 3.15 Esquema de clasificación para la variable V_{\max} en cuadrantes.	41
Figura 3.16 Distribución de la posición del V_{\max} en los cuadrantes preestablecidos.	43
Figura 3.17 Distribución de la tasa de aceleración de V_{\max} , por estación para los años 2003 a 2022.	44
Figura 3.18 Distribución de la diferencia en horas entre la máxima profundización y la máxima aceleración del V_{\max} , por estación para los años 2003 a 2022.	45
Figura 3.19 Distribución del porcentaje de vida con V_{\max} igual o mayor a 35 nudos de los ciclones extratropicales, por estación.	48
Figura 3.20 Densidad de ciclones con todo su tiempo de vida con V_{\max} igual o mayor a 35 nudos, por estación. En negro se grafican las trayectorias de cada uno de ellos.	49
Figura 3.21 Campo de presión a nivel del mar (hPa) y de dirección e intensidad del viento a 10 m (kt) para el 16 de junio de 2017 a las 06 UTC (03 HOA).	53
Figura 3.22 Idem Figura 3.21 para el 16 de junio de 2017 a las 18 UTC (15 HOA).	53
Figura 3.23 Idem Figura 3.21 para el 17 de junio de 2017 a las 06 UTC (03 HOA).	54
Figura 3.24 Idem Figura 3.21 para el 17 de junio de 2017 a las 12 UTC (09 HOA).	54

Índice de tablas

Tabla 1.1 Resumen de estudios realizados desde 2010 hasta 2020 en los que se han utilizado diferentes reanálisis para identificar ciclones y sus tendencias. Adaptada de Marrafon et. al., 2020.	6
Tabla 3.1 Resumen estadístico para la variable V_{\max} (kt) para todas las estaciones del año, de 2003 a 2022.	42
Tabla 3.2 Escala Beaufort para el viento y la altura de las olas.	46
Tabla 3.3 Porcentaje de todos los tiempos de vida de todos los ciclones extratropicales donde se supera el umbral de 35 kt.	47

1. Introducción

El término ciclón se utiliza para hacer referencia a los sistemas meteorológicos de circulación en sentido horario (antihorario) en el hemisferio sur (norte) asociado a áreas de baja presión que pueden desarrollarse en todos los niveles atmosféricos. Estos fenómenos no sólo desencadenan condiciones climáticas extremas en tierra firme, sino que también ejercen un impacto significativo en las costas y en la navegación marítima (Gramcianinov et al., 2019). Las regiones afectadas por estos sistemas transitorios sufren un gran número de patrones de tiempo tales como el pasaje de frentes, precipitaciones, vientos y ráfagas persistentes, oleaje agitado, ondas de tormenta, entre otros. Los intensos vientos generados por los sistemas de baja presión a menudo están vinculados a una serie de efectos adversos, tales como cambios en el nivel del mar que incrementan los riesgos a lo largo de las costas, inundaciones en las zonas cercanas a los estuarios, daños a las estructuras costeras e intrusión de agua salada en los acuíferos, entre otros (Possia et al, 2011; Pousa et al., 2013). Por esta razón, la ampliación del conocimiento previo y el estudio continuo de la evolución de los ciclones es necesario para contar con información actualizada, relevante para distintas aplicaciones y usuarios en el ambiente meteorológico.

Dentro de esta tesis, se empleará el término "ciclón" para hacer referencia a los sistemas de baja presión de superficie en la escala de tiempo sinóptica, la cual hace referencia a sistemas atmosféricos cuya extensión espacial varía alrededor de los 1000 kilómetros, y que suelen tener una duración que va desde uno hasta varios días. En líneas generales, los ciclones pueden clasificarse según las condiciones en las que se originan, siendo categorizados como tropicales, subtropicales y extratropicales. Esta clasificación se basa en la premisa de que las áreas dentro del mismo rango de latitud comparten un entorno de génesis similar (Reboita et al., 2017). Los ciclones extratropicales (de ahora en más, CE), también conocidos como de latitudes medias, generalmente se forman en las regiones de transición entre las masas de aire frío y cálido, donde existen gradientes horizontales de temperatura en la superficie, creando entornos altamente baroclínicos. Por esta razón, serán los de interés para el desarrollo de esta tesis.

La ciclogénesis, o el proceso de formación de estos ciclones, ocurre típicamente debido a la inestabilidad baroclínica, caracterizada por una fuerte cortante vertical del viento como resultado de gradientes de temperatura (Walker et al., 2020). Los CE actúan

para reducir estos gradientes mediante el transporte de calor hacia los polos. Generalmente, los CE siguen rutas preferenciales o trayectorias específicas conocidas, en inglés, como *storm tracks*, que son regiones donde se intensifican las perturbaciones a escala sinóptica. En el hemisferio norte, estas trayectorias características son más activas durante el invierno, especialmente en los océanos Pacífico Norte y Atlántico Norte. En el hemisferio sur, forman un patrón circular alrededor de la Antártida durante el verano, volviéndose más asimétrica en invierno. El comportamiento de los *storm tracks* está influenciado por diversos factores, incluyendo la corriente en chorro subtropical, la baroclinicidad y las temperaturas superficiales del mar, así como por fenómenos de gran escala como El Niño-Oscilación del Sur y la Oscilación Antártica. Los cambios en su posición e intensidad pueden afectar significativamente el clima y las condiciones meteorológicas locales en grandes áreas.

Dada la complejidad de la dinámica de los CE, se han desarrollado diversos métodos para identificarlos y seguirlos, para luego obtener características de frecuencia, tiempo de vida, desplazamientos preferenciales, entre otros. Estos métodos varían en sus definiciones de lo que constituye un ciclón, lo que ha llevado a resultados diferentes a lo largo de las investigaciones académicas.

1.1 Estado del arte

Numerosos estudios han contribuido a la comprensión de la distribución y desarrollo de CE en el hemisferio sur, utilizando diversas fuentes de datos. Los primeros trabajos sobre este tema se realizaron a través de mapas sinópticos construidos con observaciones, como es el caso de Taljaard (1967), quien analizó campos a nivel del mar y en altura entre los años 1957 y 1958. Este estudio se enfocó no sólo en la ciclogénesis, identificando su máximo alrededor de los 45°S en todas las estaciones del año, sino que también trabajó sobre la anticiclogénesis y algunos casos de bajas segregadas. Dentro de estos trabajos, las definiciones de los sistemas eran más generales y menos precisas que las que se pueden encontrar ahora. Por ejemplo, se definían los ciclones como centros de baja presión con al menos una isobara cerrada, sin ninguna condición adicional.

Posteriormente, Gan y Rao (1991) desarrollaron otro de los primeros estudios de ciclogénesis sobre el sector, abarcando el período 1979-1988. Detectaron y rastrearon sistemas ciclónicos mediante la inspección visual de cartas de presión de superficie. El

método utilizado para identificar CE requería, como en Taljaard (1967), que se encontrara al menos una isobara cerrada alrededor de un centro de baja presión para un análisis de intervalos de 2 mb. Descubrieron que los CE sobre el sector de América del Sur son más frecuentes en invierno que en el resto de las estaciones.

Con distintas fuentes de información, como la proporcionada por los satélites, trabajos como el de Satyamurty et al. (1990) estudiaron los ciclones a partir de patrones nubosos formados por centros ciclónicos, cubriendo Sudamérica y un área sobre el Atlántico Sur. Partiendo de imágenes infrarrojas del satélite geoestacionario GOES-EAST (siglas provenientes de su nombre en inglés: Geostationary Operational Environmental Satellites) entre 1980 y 1986, se analizaron diversos casos de ciclogénesis, concluyendo que el máximo de estos eventos se produce en verano. Además, recalcaron que el sur de Sudamérica es una región preferente para el paso de vórtices y la formación de ciclones. Con este resultado, propusieron que la ciclogénesis máxima en la temporada estival podría deberse no solo a la baroclinicidad, sino también a la convergencia de vapor de agua y al calor sensible como factores activos en el desarrollo de ciclones en Sudamérica.

Los estudios mencionados anteriormente muestran resultados contradictorios en aspectos como la estación de máxima frecuencia, lo cual puede deberse al tipo de dato utilizado. Sin embargo, ambos coincidieron en que las áreas de ciclogénesis más activas eran cercanas al Golfo de San Matías ($42,5^{\circ}\text{S}$, 62°O) durante el verano y sobre Uruguay (alrededor de 31°S , 55°O) durante el invierno.

Finalmente, la herramienta más utilizada para este tipo de trabajos a nivel global en la actualidad son los reanálisis, que son una combinación de datos observados y modelados. Dado que existen diferentes métodos de asimilación de datos, así como distintas configuraciones y resoluciones horizontales en los modelos atmosféricos, los conjuntos de reanálisis varían entre sí, lo que puede generar incertidumbres en los resultados del estudio de centros ciclónicos. Simmonds y Keay (2000) presentaron una climatología basada en 40 años de reanálisis del National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), y encontraron que la mayor densidad de ciclones se ubica entre los 45° y 70°S en todas las estaciones, con un eje de mayor densidad al sur de los 60°S . En otoño e invierno, los valores más altos se observan en los océanos Índico y Pacífico occidental, y la estructura es similar en verano, pero con menor densidad. Además, discutieron la importancia de definir un índice

cuantitativo de la fuerza e influencia de un sistema ciclónico: trabajaron con el laplaciano del campo de presión, la tasa de profundidad y el radio del sistema como medidas posibles, siendo la profundidad media del ciclón la que mostró mejores resultados. Las mayores profundidades climatológicas se encuentran alrededor de los 60°S, al norte de la mayor densidad ciclónica. Con sus datos, también reconstruyeron el tiempo de vida de los ciclones, constatando un promedio de poco más de 3 días. La distancia recorrida por los ciclones varía ampliamente, con una longitud media de la trayectoria de aproximadamente 2300 km en invierno y 1950 km en verano.

Con el fin de lograr un mejor entendimiento de este tema y utilizando datos de reanálisis, muchos autores han emprendido trabajos climatológicos sobre los CE. En particular, Mendes et al. (2010) propuso continuar y ampliar la climatología de los trabajos previos, centrándose en los datos de reanálisis del NCEP/NCAR entre los años 1949 y 2003. Construyó un conjunto de datos aplicando un método automatizado para detectar y rastrear mínimos en los campos de presión a nivel del mar (MSLP). Identificaron un candidato a ciclón como un mínimo local de MSLP, imponiendo condiciones sobre el valor central de la presión y del gradiente de dicha variable sobre un área determinada. Incluyeron, como en Simmonds y Keay (2000), un análisis del tiempo de vida de los ciclones, su desplazamiento y su profundización. Como el objetivo de esta tesis es continuar y completar hasta casi actualidad esta climatología, las conclusiones más relevantes y útiles de este trabajo son mencionadas con más detalle en la sección “identificación de los ciclones” en el capítulo de Datos y metodologías. En primer lugar, encontraron nuevamente una región significativa para la formación de CE, ubicada cerca de la costa de Argentina, Uruguay y el sur de Brasil. El invierno y el verano son las estaciones con mayor cantidad de ciclones formados, predominando la estación fría. En segundo lugar, en relación con el tiempo de vida, existe una similitud entre los CE formados en la región del sector sudamericano y los formados en todo el hemisferio sur, con una duración principal de 2 a 3 días. Por último, en relación con la frecuencia de la profundización máxima, el invierno es la estación con mayor intensificación de ciclones comparado con el resto de las estaciones. A su vez, es la estación con la mayor distancia media recorrida, con alrededor de 1500 km.

Los cambios en las condiciones atmosféricas y oceánicas, incluidos los cambios asociados con el calentamiento global, son factores a los que los CE son sensibles. Estudiar

cómo están cambiando estos sistemas a lo largo del tiempo puede proporcionar información valiosa sobre la magnitud y la naturaleza del cambio climático, esencial para evaluar los modelos climáticos y entender los mecanismos dinámicos del cambio y sus consecuencias. Además, los CE juegan un papel crucial en los patrones climáticos y meteorológicos, lo que refuerza la necesidad de entender cómo se simulan en los modelos climáticos y se proyectan en escenarios futuros. El cambio climático, al disminuir los gradientes de temperatura entre el ecuador y los polos, especialmente en la troposfera baja, podría reducir la cantidad de CE. Por otro lado, el aumento de las temperaturas podría intensificar los CE debido a un mayor liberación de calor latente (Walker et al., 2020). Durante el periodo más reciente, los estudios basados en reanálisis muestran un desplazamiento general hacia los polos de la actividad ciclónica, y como consecuencia, una disminución en el número de ciclones en el hemisferio sur, particularmente entre 40°S-60°S. (Simmonds y Keay, 2000; Wang et al., 2006). En Pezza y Ambrizzi (2003), al igual que en otros trabajos, se encontró un aumento en la ocurrencia de ciclones profundos (aquellos con una presión en el núcleo por debajo de 980 hPa). Este y otros estudios aclaran que existe una fuerte dependencia de los resultados de las tendencias dependiendo el criterio de selección de los ciclones. Determinar dicha tendencia presenta un desafío significativo debido a la influencia de múltiples variables. Estos incluyen la elección del conjunto de datos en base a los reanálisis mundiales disponibles, las metodologías y las variables específicas utilizadas para establecer los criterios de identificación de ciclones, así como la delimitación espacial del área de estudio y el período temporal abarcado. Cada uno de estos factores puede introducir variaciones sustanciales en los resultados, dificultando la obtención de conclusiones consistentes y comparables a lo largo del tiempo y entre diferentes estudios.

Diversos autores han abordado climatologías de CE para estudiar estos patrones y su evolución, para continuar aportando nuevo conocimiento relacionado con los aspectos mencionados anteriormente, como la estación de máxima frecuencia, tiempo de vida, profundización, entre otros. En estos estudios, se han utilizado distintas variables meteorológicas, lo que ha llevado a diferentes enfoques y resultados. Se pueden utilizar múltiples parámetros para determinar el comportamiento de los CE, incluyendo vientos meridionales, vorticidad relativa, energía cinética de eddies, altura geopotencial y presión media a nivel del mar (MSLP). La opción más común es utilizar mínimos locales en MSLP

o máximos en vorticidad en un solo nivel de geopotencial, y dependiendo del algoritmo de seguimiento empleado, los resultados pueden variar considerablemente. Por ejemplo, en Vessey et al. (2020) encontraron que se detectaron menos ciclones en el Ártico utilizando la presión media a nivel del mar en lugar de la vorticidad. De manera similar, Crespo (2019) comparó dos climatologías de ciclones usando datos ERAI entre 1979 y 2017: una basada en MSLP y la otra en la vorticidad relativa del viento a 925 hPa. Sus hallazgos mostraron que la densidad de ciclogénesis obtenida con ambas variables es similar en regiones subtropicales, sobre el continente y cerca de la costa. Sin embargo, en latitudes medias, la frecuencia de ciclones es mayor cuando se utiliza la vorticidad relativa, y los sistemas aparecen ligeramente desplazados hacia el suroeste en comparación con aquellos identificados mediante MSLP.

Similar a estos trabajos existen varios que comparan las características ciclónicas, es por eso, que Marrafon et al. (2021) resume las climatologías comparativas desarrolladas entre 2010 y 2020 sobre la identificación de ciclones utilizando distintos reanálisis y las diversas variables atmosféricas, en varias zonas del globo. Además, sintetizan los resultados de las tendencias obtenidas en cada uno de estos estudios. A continuación se muestra en la Tabla 1.1, una adaptación de la tabla presentada por los autores, donde se resume la información relevante para el hemisferio sur, que es el área de interés de esta tesis. El tipo de climatología está referido a si los autores de cada trabajo analizan todos los ciclones o solo los más intensos o de mayor profundización.

Tabla 1.1: Resumen de estudios realizados desde 2010 hasta 2020 en los que se han utilizado diferentes reanálisis para identificar ciclones y sus tendencias. En la tabla, HS significa hemisferio sur; HN, hemisferio norte; MSLP, presión media a nivel del mar; y Vort, vorticidad. Adaptada de Marrafon et. al., 2020.

Referencia	Reanálisis	Periodo	Variable utilizada	Área de estudio	Tipo de climatología	Reanálisis con más y menos ciclones	Tendencia de la frecuencia
Allen et. al. (2010)	ERA40, ERAI, NCEP2, JRA25	1979-2008	MSLP	HS y HN	Ciclones intensos	+ERA1, -NCEP2	+ ERAI, ERA40, NCEP2 y JRA-25
Hodges et. al. (2011)	ERA1, JRA25, CFSR, MERRA	1979-2009	MSLP y Vort	HS y HN	Todos e intensos	MERRA produce más ciclones intensos usando mslp que el CFSR usando	No fue analizada

						vorticidad.	
Wang et. al. (2013)	NCEP1, NCEP20C	1951-2010	MSLP	HS y HN	Todos	+NCEP1, -NCEP20C	+ NCEP1 y NCEP20C
Reboita et. al. (2015)	NCEP1	1980-2012	MSLP	HS	Todos, intensos y débiles	-	+Todos, +Intensos, -Débiles
Wang et. al. (2016)	ERA20C, NCEP20C, JRA55, MERRA, CFSR, ERAI, ERA40, NCEP1, NCEP2	1979-2001	MSLP	HS y HN	Todos	+ MERRA, - NCEP20C	En general, los datos muestran una tendencia positiva en ambos hemisferios.
Befort et. al. (2016)	NCEP20C, ERA20C	1901-2008	MSLP	HS y HN	Todos	+ERA20C con una diferencia sustancial entre 1931-1960	HN: + ERA20C y -NCEP20C HS: + ERA20C
Grieger et. al. (2018)	ERAI	1979-2008	MSLP, Vort	Región antártica	Todos	-	Positiva
Reboita et. al. (2018)	CFSR, ERAI, ERA40, NCEP1, NCEP2	1979-2005	Vort	Atlántico Sur	Todos	+ CFSR, -NCEP1, -NCEP2	No fue analizada
Kayano et. al. (2019)	NCEP2	1970-2017	Vort	Pacífico Sur y Atlántico Sur	Intensos	-	Negativa en la temporada cálida y positiva en la temporada fría
Crespo (2019)	ERAI	1970-2017	MSLP y Vort	HS	Todos	-	No fue analizada
Crespo et. al. (2020)	ERAI, ERA5, CFSR	1979-2018	Vort	Atlántico Sur	Todos	+CFSR, -ERAI	No fue analizada
de Jesus et. al. (2020)	Ensamble CFRS y ERAI	1979-2005	Vort	Atlántico Sur	Todos	-	De 1979 a 1989 negativa, luego positiva

En resumen, los trabajos analizados a lo largo de esta sección llegaron a conclusiones similares, donde los CE en el hemisferio sur ocurren principalmente entre

los 35°S y 60°S, obteniendo su máxima frecuencia alrededor de los 45°S, y cerca del círculo Antártico. Incluso, han destacado el este de Sudamérica, en especial de Argentina, como una región generadora de ciclones. Sin embargo, han diferido en cuestiones como la significancia de la tendencia y el signo de ésta.

1.2 Severidad de los eventos e impacto en la seguridad náutica y costera

Los CE tienen un impacto significativo en el clima del sudeste de Sudamérica, donde la mayoría de la población vive en ciudades costeras rodeadas de áreas propensas al desarrollo de ciclogénesis. Esto adquiere una importancia crucial en el contexto argentino, especialmente en relación con la actividad náutica de la región. Su extensa línea costera con el mar asociado, se encuentra expuesta a la influencia directa de sistemas meteorológicos dinámicos, entre ellos, los CE. Con el nombre de Mar Argentino se conoce al sector del Océano Atlántico Sudoccidental que cubre la porción menos profunda del margen continental argentino. En esta tesis se centrará la atención a dicha porción del océano Atlántico, pero por continuidad atmosférica puede extenderse por fuera de este límite teórico.

La exposición a eventos extremos es una preocupación significativa en regiones de navegación debido a fenómenos como las ondas de tormenta, fuertes vientos, oleaje intenso y precipitaciones abundantes. Stephenson (2008) describe que la definición, clasificación y diagnóstico de eventos extremos son procesos complejos y no existe una definición universalmente aceptada de lo que constituye un evento extremo. Esto añade una capa de dificultad a los estudios que intentan analizar y comparar tales eventos, ya que las interpretaciones pueden variar según los criterios y las metodologías utilizadas. El autor en su libro plantea la diferencia entre los eventos severos de los extremos. Aquellos que son severos causan grandes pérdidas en términos de vidas humanas, capital o calidad ambiental, donde el riesgo dependerá de la probabilidad del evento, la exposición al peligro y la vulnerabilidad del lugar afectado. En resumen, la severidad no solo depende del peligro meteorológico, sino también de las condiciones humanas. En cambio, los eventos extremos son aquellos que presentan valores extremos en ciertas variables meteorológicas importantes (superan umbrales previamente establecidos): grandes cantidades de precipitación, altas velocidades de viento o temperaturas elevadas.

Un ejemplo de trabajos relacionados con los ciclones extratropicales y variables de importancia en la navegación, como el viento, es el de Laurila et al. (2021) quienes investigaron los CE en el norte de Europa, analizando sus características, evolución espacial y temporal, y precursores, entre 1980 y 2019. Este trabajo clasificó a los CE según las ráfagas de viento asociadas a ellos, encontrando que los CE asociados a ráfagas intensas tienden a originarse y ocurrir sobre áreas marinas, mientras que los ciclones sin ráfagas intensas ocurren principalmente sobre tierra. Esto podría estar relacionado con la fricción superficial. Los resultados también muestran que las ráfagas máximas de viento ocurren aproximadamente al mismo tiempo que la presión mínima a nivel del mar. Sin embargo, este estudio también reconoce que una de las principales limitaciones es la dependencia de la definición utilizada para clasificar los ciclones con las ráfagas de viento para indicar severidad. Otra limitación importante es la precisión de los reanálisis los cuales pueden no capturar adecuadamente las ráfagas de viento debido a que estas son parametrizadas y no resueltas directamente.

Entre los impactos derivados de la generación y el paso de ciclones, particularmente en la actividad náutica, se destaca que los vientos sostenidos sobre el océano son responsables de la formación de olas. Las condiciones de tormenta representan uno de los desafíos más difíciles durante la navegación en ruta (Mateichuk et al., 2023). El oleaje prolongado y la necesidad de mantener una concentración constante afectan a la tripulación, lo que puede llevar a la toma de decisiones erróneas. Los métodos existentes de navegación en tormenta muestran una efectividad limitada, lo que subraya la relevancia de investigarlos a nivel global. De hecho, diversos estudios se han centrado en representar las condiciones meteorológicas severas en el océano con el fin de mejorar las maniobras de navegación (Jing et al., 2021; Waskito et al., 2022), impulsar la operación autónoma de vehículos marinos (Maki et al., 2022) y optimizar el movimiento de buques anclados (Sang-Won Lee et al., 2022).

Las situaciones meteorológicas adversas, como las generadas por el desarrollo de ciclones extratropicales, tienen un alto impacto en la navegación de buques de diferente porte y, consecuentemente, en la seguridad náutica. Es así que, el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida en el Mar (SOLAS, 2020) establece en su capítulo V regla 5 la necesidad de los Gobiernos Contratantes de proveer servicios meteorológicos marinos a

fin de asegurar las rutas marítimas y la seguridad de las tripulaciones, mercancías y buques.

El desarrollo de conocimiento en aspectos relacionados con la meteorología marina y su impacto en la seguridad náutica han sido establecidos como prioritarios por parte de la Organización Meteorológica Mundial en conjunto con la Organización Marítima Internacional, ya que permiten la divulgación de información valiosa para los navegantes y la toma de decisiones en la planificación de rutas comerciales marítimas o sus modificaciones ante la ocurrencia de fenómenos severos (WMO, 2022).

1.3 Motivación y objetivos

Estudiar la vida de los ciclones y comprender cómo han cambiado en los últimos años, sin duda mejorará la predictibilidad de los extremos climáticos de latitudes medias inducidos por estos. Contribuir al conocimiento existente es necesario para optimizar la gestión y planificación de actividades náuticas en un entorno meteorológico dinámico y desafiante, permitiendo el mayor conocimiento del factor geográfico con el objetivo de disminuir el impacto en los buques que navegan las aguas de responsabilidad nacional. Con el paso del tiempo, los navegantes se han vuelto usuarios de más productos meteorológicos, por lo que es crucial generar conocimiento que permita aportar a la mejora de estos.

Por estas razones, la presente tesis busca explorar en detalle los patrones de CE en la costa argentina, proponiendo los siguientes objetivos principales:

1. Realizar una climatología de la ocurrencia de ciclones extratropicales a partir de los datos del National Centers for Environmental Prediction (NCEP), describiendo su distribución espacial sobre el Mar Argentino y parte del Océano Atlántico Sudoccidental.
2. Analizar la variabilidad temporal de la ocurrencia de ciclones extratropicales en la región mencionada.
3. Estudiar casos severos de ciclones extratropicales y su impacto en la seguridad náutica.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se desarrolló la introducción al tema, en el Capítulo 2 se describen los datos y las metodologías utilizadas, y el Capítulo 3 está dedicado a los resultados espaciales y temporales de la climatología de

ciclones extratropicales en su totalidad y aquellos clasificados como severos. Finalmente, en el Capítulo 4 se presenta un resumen de las principales conclusiones obtenidas.

2. Datos y metodologías

En esta sección se hace una descripción del área de estudio, los datos utilizados para realizar la investigación y de la metodología empleada para tratarlos.

2.1 Región de estudio

La región analizada (Figura 2.1) es la que corresponde al Mar Argentino, en el océano Atlántico Sudoccidental, entre las latitudes 20°S y 70°S, y longitudes 80°O a 20°O, dentro de Sudamérica.

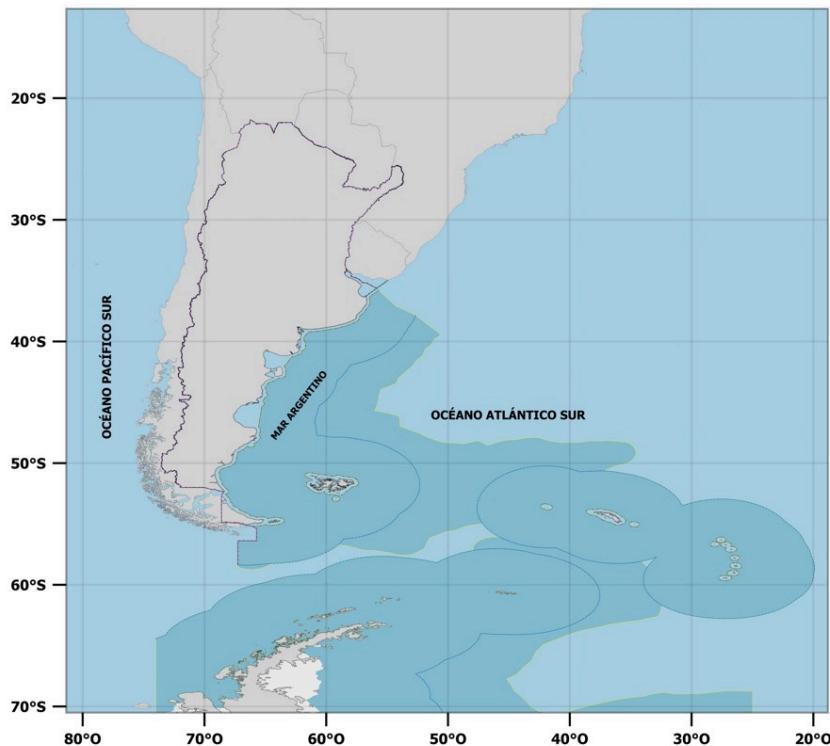


Figura 2.1: Dominio de estudio. El área sombreada indica los límites de la plataforma continental, la línea punteada azul indica el límite exterior de la zona económica exclusiva y la línea punteada amarilla indica el límite exterior de la plataforma continental. Los elementos geográficos representados en este mapa han sido aportados por la Comisión Nacional del Límite Exterior de la Plataforma Continental (COPLA) y el Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

El Mar Argentino es el sector del océano que cubre la porción menos profunda del margen continental argentino. Se extiende, en términos generales, desde la boca del estuario del Río de la Plata en el norte, hasta el banco Burdwood en el sur, y desde la costa argentina hasta el comienzo del talud. Tiene una extensión de alrededor de un millón de kilómetros cuadrados y en sus aguas se desarrolla una de las más importantes pesquerías

del globo, de allí la importancia de su constante estudio meteorológico. Es una denominación histórica y cultural, y no implica una referencia a los espacios marítimos de soberanía o jurisdicción de la República Argentina. En esta tesis se centrará la atención a dicha porción del océano Atlántico, pero por continuidad atmosférica puede extenderse por fuera de este límite teórico. En esta zona, es posible encontrar rutas de diferentes estilos de embarcaciones como las deportivas, de carga general, turísticas, pesqueras, de investigación, entre otras.

2.2 Datos de NCEP/DOE Reanalysis II

El Reanálisis-2 del NCEP (National Center of Environmental Prediction)-DOE (Department of Energy) (Kanamitsu et al., 2002) comienza en 1979 para coincidir con la fecha de inicio de la ingesta meteorológica de los satélites modernos. Su objetivo de creación fue corregir los errores y actualizar las parametrizaciones de los procesos físicos del Reanálisis-1 NCEP/NCAR, tales como la cobertura de nieve, el albedo océánico, la humedad relativa y su relación con la nubosidad, entre otros (Betts et al., 2006).

Las variables de este reanálisis cuentan con una resolución espacial horizontal de 2,5° latitud x 2,5° longitud en puntos de retícula. En la resolución temporal existen diversas opciones para trabajar, desde los promedios mensuales a los datos cuatri-diurnos. En esta tesis se utilizaron los datos de presión a nivel del mar en intervalos de 6 horas, viento zonal y meridional (estos dos últimos a 10 m) sobre el dominio de la Figura 2.1 para el período enero 2003 a diciembre 2022, de modo de tener 20 años completos de datos. Con el viento zonal y meridional se calculó el módulo para todos los tiempos y posiciones, de forma de obtener la intensidad del viento horizontal a 10 metros.

El viento a 10 metros es una variable sensible cuya calidad y resolución puede variar dependiendo del reanálisis utilizado. Aunque la elección de reanálisis depende en gran medida del propósito específico, varios estudios destacan que el reanálisis ERA5 ofrece un rendimiento superior en términos de precisión. Trabajos como los de Ramon et al. (2019) y Gualtieri (2022) han utilizado distintos reanálisis y concluyen que el ERA5 presenta una leve ventaja sobre otros productos en cuanto a calidad. Sin embargo, en esta tesis se ha optado por utilizar el reanálisis NCEP/DOE para el viento, con el fin de asegurar coherencia metodológica entre esta variable y la presión. Esto no solo facilita el

procesamiento y obtención de los datos al usar una única fuente, sino que garantiza la consistencia entre variables.

2.3 Metodologías

2.3.1 Algoritmo de reconocimiento y seguimiento de ciclones extratropicales

El algoritmo implementado para detectar CE en el sector de estudio seleccionado sigue al descrito por Blender et al. (1997) y Trigo et al. (1999), y más recientemente adaptado por Mendes et al. (2007) y Mendes et al. (2010). Al igual que los datos, que han sido elegidos del mismo reanálisis y zona del globo que estos últimos dos artículos, la metodología se plantea de forma similar con el objetivo de tener en esta tesis resultados comparables con los respectivos trabajos. Las modificaciones introducidas fueron implementadas para ajustarse a los propósitos de esta tesis, o bien porque en los artículos usados de referencia no se encontraron especificaciones de ciertos pasos del algoritmo.

Identificación de mínimos de presión: El primer paso consiste en identificar los puntos de retícula donde la presión a nivel del mar es menor o igual al umbral predefinido de 1010 hPa, criterio inicial para considerar como posibles candidatos a ciclones. Esto se ejemplifica en el panel a) de la Figura 2.2, con el punto rojo. Para cada uno de estos mínimos, se extraen las presiones circundantes de una matriz de 24 puntos de retícula alrededor, que representan un área aproximada de 1000 km^2 . El siguiente paso, según los trabajos de referencia, es definir si el gradiente de presión es suficiente para ser considerado CE. Para ello, se calcula el gradiente como una diferencia finita entre la presión del centro y cada uno de los 16 puntos exteriores de la matriz mencionada anteriormente (en color azul en la Figura 2.2, panel b). Si todos los puntos exteriores cumplen un valor mayor o igual a $1,1 \text{ hPa}/500 \text{ km}$ respecto dicho mínimo, que era antes candidato, se clasifica como un CE. En esta instancia se asume que la distancia del centro a los 16 exteriores es de aproximadamente 500 km para simplificar el cálculo.

Dado que no necesariamente el ciclón adopta una forma estrictamente circular, se calcula el gradiente sobre los 16 puntos y no sobre los 24 totales de la matriz, permitiendo un centro de forma irregular desde su detección hasta el fin de la trayectoria. La condición sobre los puntos exteriores permite, al menos, cerrar una isobara y lograr un CE que

cumpla con las condiciones del trabajo de referencia, pero con la libertad de tener un centro que no simula una circunferencia.

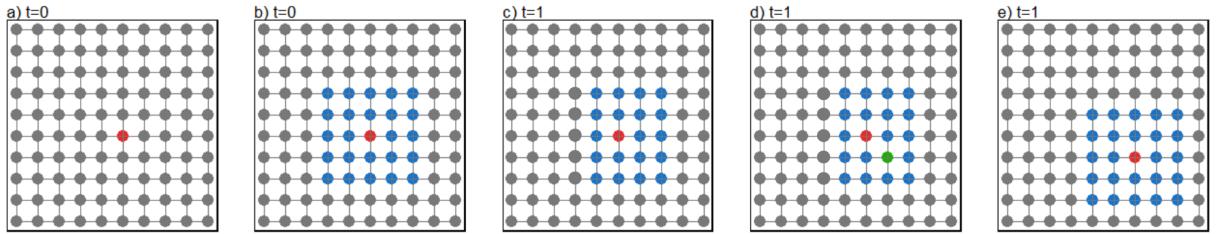


Figura 2.2: Esquema del algoritmo de seguimiento de los ciclones extratropicales.

Trayectoria de los ciclones: Si se cumplen las condiciones anteriores, los CE se almacenan con su latitud, longitud y fecha inicial. El seguimiento temporal o trayectoria de los ciclones se realiza con un enfoque lagrangiano, utilizando la metodología del “vecino más cercano” (por su nombre en inglés, nearest neighbour), al igual que en los trabajos de referencia. Para cada uno de los CE determinados en el paso anterior, iniciando en un tiempo $t=0$ (primera fecha de detección) se repite la posición del centro en un tiempo $t=1$, que representa un paso de 6 horas de acuerdo a la resolución temporal de los datos.

En esta instancia se plantean condiciones de velocidad. Restringir la velocidad de los sistemas, y por lo tanto su movimiento, permite verificar que las trayectorias no se intersectan entre sí ni que se trate de otro tipo de sistemas que no sean ciclones extratropicales. La máxima velocidad que puede tomar el centro del ciclón hacia el oeste es de 33 km/h (198 km/6h, aproximado como un desplazamiento hacia un solo punto de retícula), mientras que en el resto de las direcciones se permite una velocidad máxima de 90 km/h (540 km/6h, aproximado como la distancia a dos puntos de retícula). Estas condiciones se plantean en la Figura 2.2, panel c. Una vez configurada esta nueva matriz de puntos, se extraen las presiones correspondientes a cada latitud y longitud. Posteriormente, se verifica si el mínimo de presión, que debe continuar cumpliendo con el umbral establecido, sigue estando en la misma posición del centro original (con o sin cambio del valor en sí mismo) o si otro de los puntos es ahora el nuevo mínimo (ejemplificado en verde en la Figura 2.2, panel d). En el caso de que esto suceda, nuevamente se verifica si los 16 puntos exteriores de los 24 circundantes continúan

cumpliendo la condición del gradiente (Figura 2.2, panel e). Si esto no se satisface, entonces la trayectoria se detiene.

Este proceso se repite para los siguientes tiempos, construyendo las trayectorias que solo se detienen si el centro supera los 1010 hPa, si el gradiente es menor a 1,1 hPa/500 km, si se llega al tiempo final, o si la trayectoria excede los límites horizontales impuestos en el conjunto de datos utilizado en esta tesis.

La metodología de seguimiento es apropiada para rastrear ciclones en pasos temporales sucesivos, ya que al buscar el mínimo de presión más cercano en el siguiente paso temporal, se sigue la lógica de que los ciclones suelen moverse de manera continua. Es importante destacar que, para evitar la superposición de trayectorias, se mantiene un registro de los puntos (en latitud, longitud y tiempo) que ya han sido asignados a trayectorias anteriores. Si un punto en una nueva trayectoria coincide en las tres variables con un punto previamente registrado, la trayectoria completa se descarta, asegurando así que cada punto en el espacio y tiempo esté asociado a una única trayectoria, y que estas no se multipliquen.

Clasificación y filtrado de trayectorias: Una vez identificadas y seguidas las trayectorias de los ciclones, solo se utilizan aquellas que duraron 24 horas o más. Esto se hace con el fin de evitar el registro de eventos débiles con poco impacto en el tiempo meteorológico en la zona de estudio (Gan and Rao, 1991; Dal-Piva, 2001; Trigo, 2005). Las trayectorias también son filtradas para eliminar aquellas que corresponden exclusivamente a regiones continentales, evitando así clasificar como ciclones del Mar Argentino a sistemas que no cumplen con los criterios oceánicos necesarios. Una vez obtenidas las trayectorias finales, estas se clasifican según la estación del año en que ocurren, manteniendo el criterio meteorológico donde el verano abarca los meses completos de diciembre, enero y febrero (DEF); el otoño incluye marzo, abril y mayo (MAM); el invierno se clasifica con junio, julio y agosto (JJA); y por último, la primavera tiene los restantes meses de septiembre, octubre y noviembre (SON).

2.3.2 Test de Mann Kendall

El test de Mann-Kendall es un método no paramétrico utilizado en el análisis de tendencias en series temporales, el cual fue desarrollado por Mann (1945) y adaptado por Kendall (1975). Es utilizado para establecer cómo se comporta la serie temporal, a partir

de algún patrón comparando con el azar. El test plantea una hipótesis nula donde la serie analizada es al azar, contra una hipótesis alternativa donde la serie tiene una componente determinística, con un nivel de significancia.

El estadístico τ utilizado para evaluar el test está dado por $\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1$ con $p = \sum_{i=1}^{n-1} n_i$ que sigue una distribución $\tau \sim N(0, \sqrt{\frac{4n+10}{9n(n-1)}})$ con una cantidad de datos n mayor a 10. Una vez estandarizado el estadístico, puede ser comparado con los resultados de la tabla teórica normal $N(0, 1)$ para hacer la conclusión sobre el test.

2.3.3 Función de densidad de Kernel

La función de densidad de Kernel es una técnica no paramétrica que se utiliza para estimar la densidad de probabilidad de una variable aleatoria en un conjunto de datos. Es una extensión de un histograma que proporciona una forma suavizada y continua de representar la distribución de datos sin depender de intervalos rígidos, imprescindible para que el usuario pueda analizar mejor la distribución estudiada que cuando se utiliza un histograma tradicional. La estimación de densidad de Kernel utiliza un "kernel" (o núcleo), que es una función matemática que asigna un peso a los puntos cercanos a un dato específico, creando una curva suave. Esta función, que se desplaza por todos los puntos de datos para generar una distribución estimada, es realizada por el paquete *ggplot2* en el entorno de R (Wickham, 2016) a través de la función *geom_density*.

La fórmula general para la estimación de densidad de Kernel (KDE, Kernel Density Estimation) para un conjunto de datos unidimensional es:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$$

Donde $f(x)$ es la estimación de la densidad en el punto x , n es el número de observaciones en los datos, h es el ancho de banda (que controla el grado de suavización), K es la función Kernel (una función que da peso a los puntos en función de su proximidad a x) y x_i son los puntos de datos en el conjunto. Un Kernel común es el Kernel Gaussiano, que asigna mayor peso a los puntos cercanos a x y menos a los lejanos.

Cuando se aplica la densidad de Kernel en dos dimensiones, el proceso es similar, pero en lugar de estimar la densidad en un punto de una dimensión, se estima en una cuadrícula de coordenadas en el plano bidimensional (en el caso de esta tesis, un conjunto

de datos de latitud y longitud en una grilla). La estimación de densidad en 2D tiene la siguiente forma:

$$f(x, y) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}, \frac{y-y_i}{h}\right)$$

Donde $f(x,y)$ es la estimación de la densidad en el punto (x,y) , n es el número de observaciones en los datos, h es el ancho de banda en ambas direcciones, y K es la función Kernel bidimensional.

2.3.4 Fórmula de Haversine

Las distancias (d) entre puntos sucesivos en la trayectoria de los ciclones fueron calculadas utilizando la fórmula de Haversine, que asume una superficie esférica para la Tierra, de radio r , y permite calcular distancias geodésicas a partir de las coordenadas de latitud (ϕ_1, ϕ_2) y longitud (λ_1, λ_2). Dado que la fórmula no tiene en cuenta la esfericidad achataada en los polos de la Tierra, se introduce una ligera aproximación, pero resulta adecuada para la escala de trayectorias analizada.

$$d = 2r \arcsin \sqrt{\sin^2\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right) + \cos(\phi_1)\cos(\phi_2)\sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}$$

2.3.5 Tasa de profundización

Siguiendo a varios autores, la tasa de profundización usada en este trabajo se ha ajustado geoestróficamente a una latitud de referencia, ϕ_{ref} , para tener en cuenta el hecho de que los ciclones en diferentes latitudes con gradientes similares producirían vientos geoestróficos diferentes y, por lo tanto, no deberían considerarse con intensidades idénticas (Trigo et al., 1999). Para este caso, la latitud de referencia elegida fue 45° S, y ϕ_m representa la latitud media del ciclón durante las horas en las que la tasa es calculada:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dp}{dt} \frac{\sin(\phi_{ref})}{\sin(\phi_m)}$$

2.3.6 Análisis de *clusters*

El análisis de conglomerados o *clusters* es una técnica de clasificación que tiene por objetivo agrupar un conjunto de objetos o datos en grupos, de manera que aquellos dentro de cada grupo sean más similares entre sí que con los objetos de los otros *clusters*. En meteorología, este tipo de análisis se utiliza para identificar patrones comunes en

distintas variables (como podrían ser la presión, la temperatura, la precipitación, entre muchas otras).

El uso de técnicas de *clustering* en este trabajo se remite al análisis de las trayectorias ciclónicas, lo cual permite agrupar eventos con movimientos similares y facilitar la identificación de patrones recurrentes en la dinámica atmosférica. Para lograr esto se utilizó el algoritmo K-means sobre las trayectorias obtenidas con los criterios anteriores para la costa argentina, el mar adyacente y el océano Atlántico. Dicho algoritmo es ampliamente utilizado en el análisis de datos meteorológicos debido a su capacidad para encontrar patrones en grandes conjuntos de información. K-means busca dividir un conjunto de datos en k *clusters*, de manera que se minimice la variabilidad dentro de cada grupo y se maximice entre ellos, garantizando que las trayectorias dentro de un mismo *cluster* sean lo más similares posibles. Una ventaja significativa de la metodología es su simplicidad y eficiencia, aunque tiene la desventaja de requerir que se especifique el número k a priori.

El proceso de análisis se llevó a cabo en varias etapas y utilizando la función *kmeans* del paquete *stats*, el cuál es intrínseco de R (R Core Team, 2013), con el objetivo de identificar las trayectorias típicas o representativas de los ciclones en la región de estudio:

Filtrado de trayectorias: Para evitar sesgos en el análisis, se realizó un filtrado de las trayectorias con variación mínima o nula en latitud o longitud (calculando el desvío estándar de toda la trayectoria en su conjunto), ya que estas podrían representar ciclones estacionarios o con movimiento muy reducido, lo que no contribuiría a la identificación de patrones de movimiento.

Resumen de trayectorias: Cada trayectoria fue sintetizada en un punto calculando el promedio de las latitudes y de las longitudes a lo largo de todo el recorrido para cada ciclón. Este paso permite simplificar en puntos promedio, que luego serán utilizados en el análisis de K-means. Un método similar se aplica en el trabajo de Corporal-Lodangco et al. (2014) donde la trayectoria de un ciclón individual se representa mediante la posición promedio de su punto de génesis, intensidad máxima y decaimiento.

Selección del número óptimo de *clusters*: Dado que K-means requiere especificar el número de *clusters* k , se utilizaron dos métodos comunes para seleccionar el número óptimo: el método del codo (“*elbow method*”) y el análisis de la silueta (“*silhouette*”

*analysis"). El primero de ellos evalúa la variabilidad dentro de los grupos para distintos valores de k . A medida que aumenta el número de *clusters*, la variabilidad dentro de cada uno disminuye, pero la tasa de mejora se reduce: el valor óptimo se elige en el punto donde esta mejora deja de ser significativa, formando un “codo” en el gráfico. El análisis de la silueta mide qué tan similares son los objetos dentro de un *cluster* en comparación con los objetos en otro de ellos. El valor de k que maximiza la puntuación se selecciona como el número óptimo de grupos. Diversos trabajos utilizan ambas metodologías propuestas por Kodinariya et al. (2013) para la elección, como por ejemplo el de Di Bernardino et al. (2022), quien hace uso de estas dos técnicas para estudiar patrones sinópticos de viento.*

Aplicación de K-means: Se aplicó la metodología a las posiciones promedio de cada trayectoria. En este análisis, cada trayectoria fue asignada a uno de los k *clusters* definidos por el algoritmo, garantizando que las trayectorias en cada grupo tengan características similares.

Determinación de trayectorias representativas: Una vez definidos los *clusters*, se identificó una trayectoria representativa para cada uno, que es aquella cuya posición promedio está más cercana al centroide del conglomerado, es decir, la que mejor refleja el comportamiento típico de las trayectorias dentro de ese grupo.

Visualización: En el capítulo de Resultados se graficaron tanto las trayectorias representativas de cada conglomerado como el conjunto completo de trayectorias de cada *cluster*.

3. Resultados

3.1 Climatología de ciclones extratropicales en el Mar Argentino y en el océano Atlántico Sudoccidental

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la identificación y el seguimiento de los ciclones extratropicales (CE). Se analizaron diversos aspectos de estos sistemas, como su distribución espacial y temporal, las tasas de profundización, las distancias recorridas, y los tiempos de vida, permitiendo una caracterización climatológica detallada de su comportamiento en las distintas estaciones del año.

Los resultados que se presentan en este capítulo no solo contribuyen a una mejor comprensión de la dinámica de los ciclones extratropicales en la región de estudio, sino que también ofrecen un marco comparativo para futuros estudios climáticos que involucren la actividad ciclónica bajo diferentes escenarios.

3.1.1 Ciclogénesis

La frecuencia de CE puede ser estudiada tanto de forma temporal, como espacial. Comenzando la primera, en la Figura 3.1 se presenta la distribución de la frecuencia absoluta de ciclones extratropicales identificados por año, cubriendo el período comprendido entre 2003 y 2022. A partir de los criterios de identificación y seguimiento descritos en el Capítulo de Datos y metodologías, se detectaron un total de 2921 ciclones a lo largo de los 20 años de estudio, con una media anual de 146 ciclones. El valor máximo de ciclones por año se registró en 2009 con un valor de 172 eventos, seguido de máximos relativos en los años 2011 (163) y 2015 (162), y un mínimo de 122 ciclones en el 2021; lo que sugiere una variabilidad interanual en la cantidad de ciclones.

Para evaluar la posible existencia de un comportamiento determinístico y una tendencia temporal significativa en la serie, se aplicó el test no paramétrico de Mann-Kendall. Sin embargo, el resultado de dicho test no permitió rechazar la hipótesis nula, indicando la ausencia de tendencia con un 95% de confianza. Como se ha mencionado previamente con el trabajo de Marrafon et al. (2021), las tendencias observadas pueden ser altamente variables dependiendo del área de estudio, los datos utilizados y la variable seleccionada para la identificación de ciclones. Un ejemplo ilustrativo de esta variabilidad es el estudio de Kayano et al. (2019), quienes analizaron los

CE utilizando el mismo conjunto de datos de reanálisis que se empleó en este trabajo, pero considerando el período 1979-2017 y focalizándose en las cuencas del océano Pacífico Sur y Atlántico Sur, exclusivamente durante los meses de verano e invierno. En su análisis, observaron tendencias opuestas en la frecuencia de ciclones según la estación del año, reportando resultados contrarios entre la temporada cálida y la fría. En consecuencia, el comportamiento azaroso en los datos no implica necesariamente la ausencia de una tendencia en otras regiones del hemisferio o bajo otras condiciones. Los presentes resultados reflejan las particularidades del dominio geográfico analizado y los criterios específicos utilizados para la identificación y el seguimiento de los sistemas.

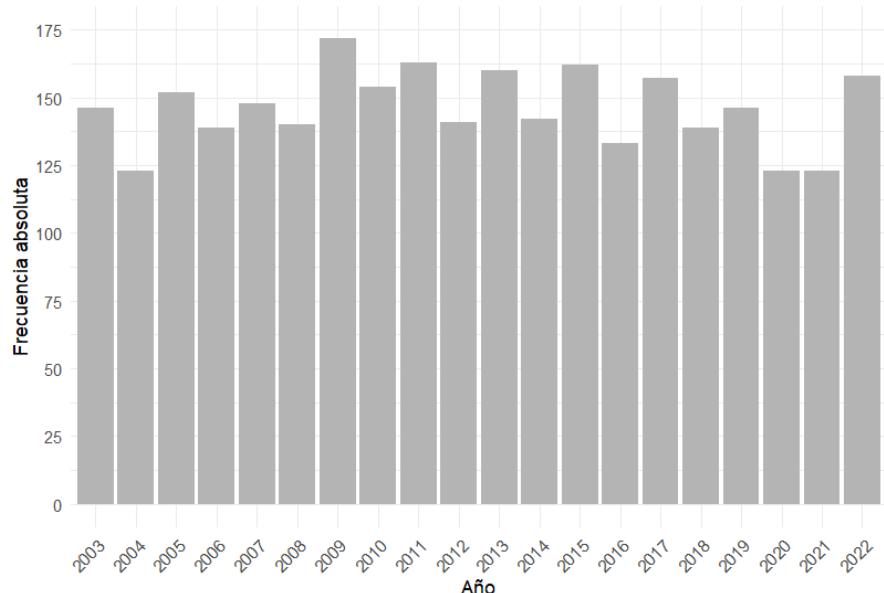


Figura 3.1: Distribución de ciclones extratropicales por año, sin discriminar por estación.

Al agrupar los ciclones extratropicales por estación, como se observa en la Figura 3.2, se aprecia que el máximo se registra en otoño (758 eventos), siguiendo por el verano (751) e invierno (739). No obstante, la diferencia entre las estaciones no es sustancial, distribuyéndose de manera relativamente homogénea. Este comportamiento es consistente con Simmonds y Keay (2000) quienes reportan medias de ciclones prácticamente equivalentes para otoño, invierno y primavera. Mendes et al. (2007) y Gan y Rao (1991) identifican el invierno como la estación con mayor frecuencia absoluta, y Satyamurty et al. (1990) lo identifica en el verano. Sin embargo, en todos estos trabajos, las diferencias entre estaciones no son lo suficientemente marcadas como para destacar una sobre las demás de manera concluyente.

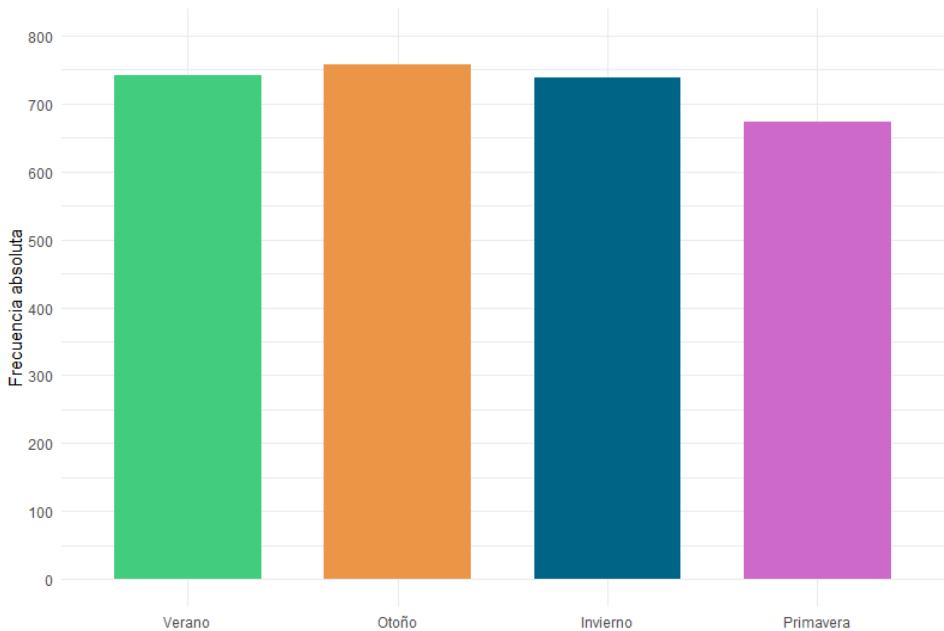


Figura 3.2: Distribución de ciclones extratropicales por estación entre los años 2003 y 2022.

Se realizó además un análisis temporal de la frecuencia de CE, desagregado por las estaciones del año en la Figura 3.3. Este gráfico presenta la frecuencia en términos relativos, es decir, el número de ciclones de cada año está ponderado por el total de ciclones registrados en esa estación específica (en las figuras siguientes que contengan la información en frecuencia relativa se utiliza el mismo criterio). De este modo, los datos se expresan como un porcentaje del total estacional, permitiendo comparar los años dentro de cada estación independientemente del número absoluto de ciclones. Este enfoque asegura que las fluctuaciones interanuales sean evidentes, destacando las variaciones en la actividad ciclónica de cada temporada sin que se vean influenciadas por diferencias en el número total de ciclones entre estaciones.

En verano la media es de 37,5 eventos, en otoño es de 37,9, invierno es de 36,9 y por último en primavera es de 33,7 eventos. En dicha figura puede apreciarse que la frecuencia de CE varía considerablemente de un año a otro dentro de cada estación, lo que sugiere que otros factores meteorológicos y climáticos, además de la estacionalidad, influyen en la formación y desarrollo de estos sistemas. En función de la estación del año, el máximo de eventos se distribuye entre los años 2008 y 2011. En verano, el pico de actividad se presenta en 2010 con un total de 47 casos, mientras que en otoño el máximo corresponde a 2008 con 48 eventos. En invierno, el mayor número de ciclones extratropicales se

observa en 2011, con 53 eventos registrados, y en primavera el máximo ocurre en 2009 con 43 casos.

Estos resultados indican que particularmente el invierno concentra los años con la mayor cantidad de ciclones extratropicales (resultados similares obtuvieron Gan y Rao (1991), donde los máximos anuales están de mayo a julio) y menor cantidad de eventos. Estas anomalías podrían estar relacionadas con eventos climáticos extremos o cambios en las condiciones atmosféricas a gran escala a través de distintas teleconexiones como la Oscilación Antártica (AAO), El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), el Modo Anular del Sur (SAM), el Dipolo del océano Índico (IOD), como menciones entre diferentes autores como Mendes et al. (2010) y Reboita et al., 2015.

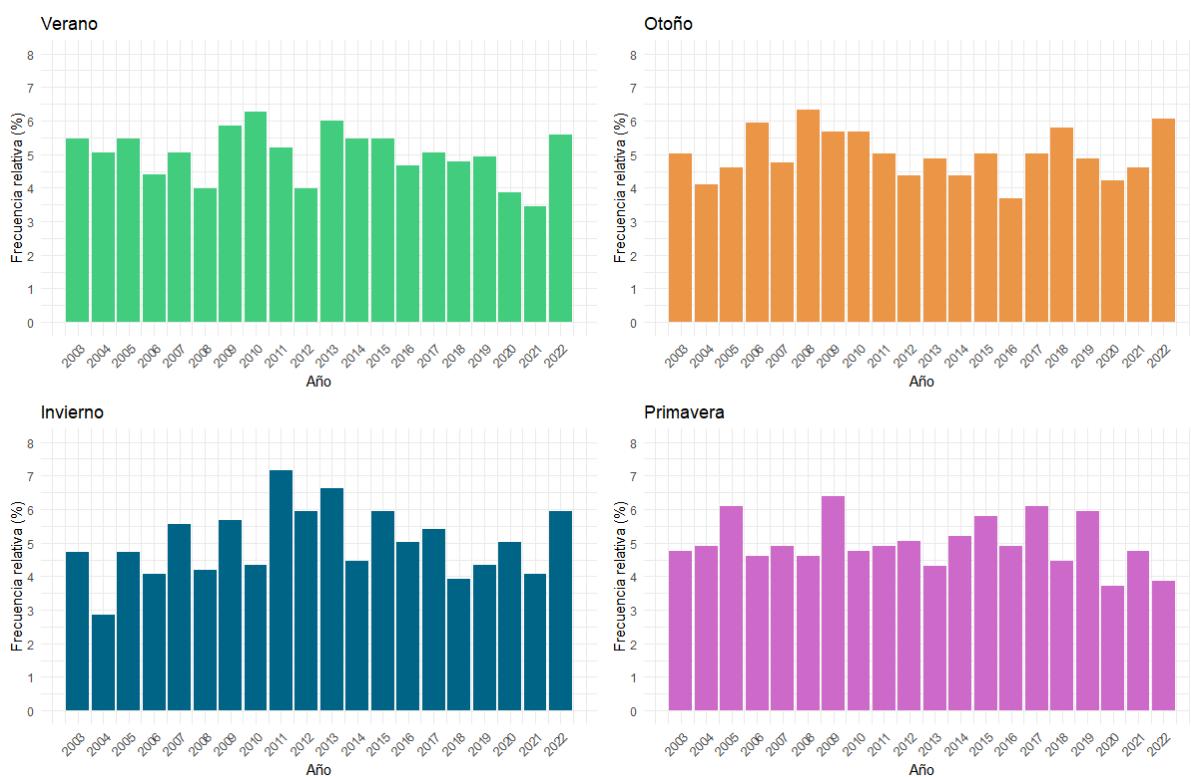


Figura 3.3: Frecuencia relativa (%) de ciclones extratropicales por estación por año.

Para estudiar la ciclogénesis de manera espacial, se partió de las trayectorias de ciclones identificadas en cada estación del año. Para ello, se extrajeron las coordenadas correspondientes al punto de inicio de cada ciclón en cada temporada. Posteriormente, se construyó una malla que abarca todos los puntos de intersección de latitud y longitud dentro de la resolución horizontal del conjunto de datos utilizado, quedando la intersección en el centro de las cajas construidas en la malla. Esto permitió contabilizar

cuántos eventos ocurrieron dentro de cada celda y obtener una distribución espacial de la frecuencia absoluta de ciclogénesis en cada estación del año. La Figura 3.4 ilustra esta distribución, donde la intensidad del color en cada celda representa la cantidad de ciclones que se originaron en dicha área durante el periodo de estudio.

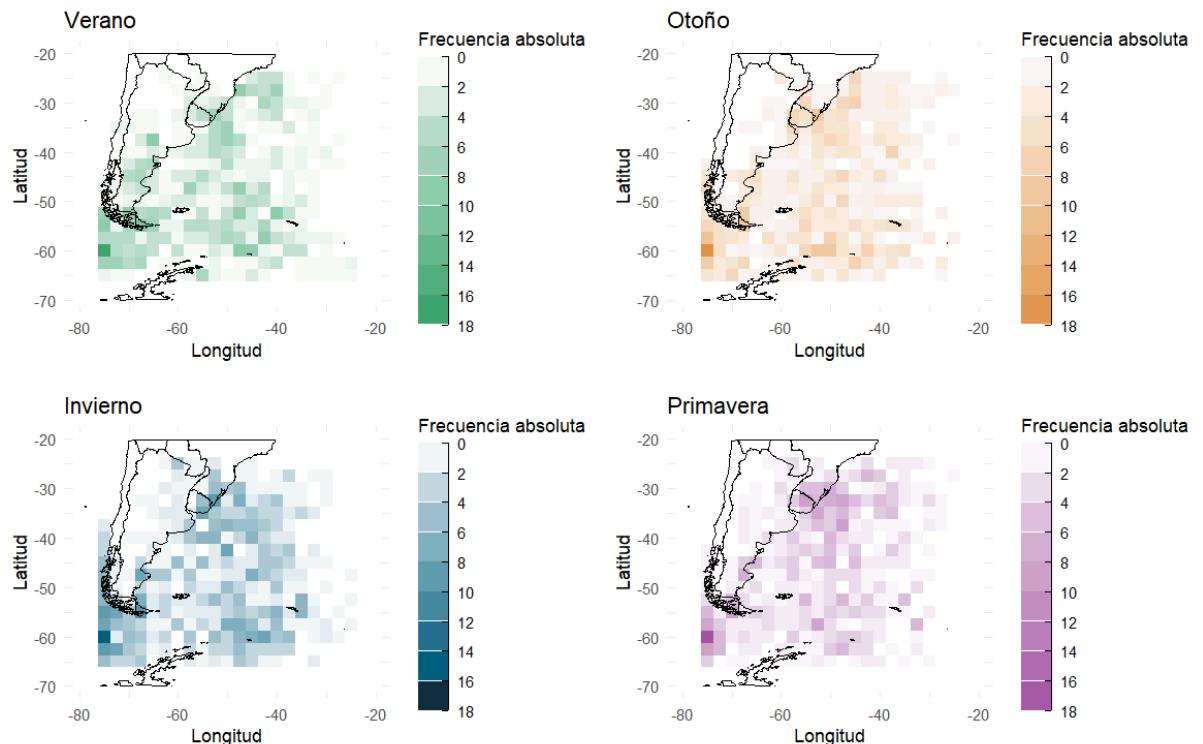


Figura 3.4: Distribución espacial del número de eventos de ciclogénesis detectados para cada estación para el periodo de 20 años.

Con el objetivo de visualizar patrones más detallados y continuos en la distribución espacial de CE, se transformó la figura anterior. Para ello, se empleó la función de densidad de Kernel, una herramienta estadística que proporciona una imagen más fluida de la distribución, facilitando la identificación de regiones con mayor concentración de eventos, no solo para los profesionales del área, sino para navegantes del Mar Argentino y aguas adyacentes, contribuyendo a su seguridad en la navegación.

En la Figura 3.5, utilizando una distribución Gaussiana como tipo de kernel para estimar, se muestra para cada estación la densidad de ciclogénesis. Las referencias en estos gráficos, indican el valor relativo de la densidad estimada en cada nivel. Estos valores no tienen una unidad física directa, sino que son valores que representan cuán densamente están agrupados los puntos de datos en ciertas áreas (cuanto mayor sea el valor, mayor

será la probabilidad de que se origine un ciclón en esa región). En un gráfico de densidad de Kernel, la escala de densidad depende de la dispersión y el número de puntos de datos, y es por eso que las etiquetas suelen ser números muy pequeños (por ejemplo 0,00011 a 0,00022 en dicha figura).

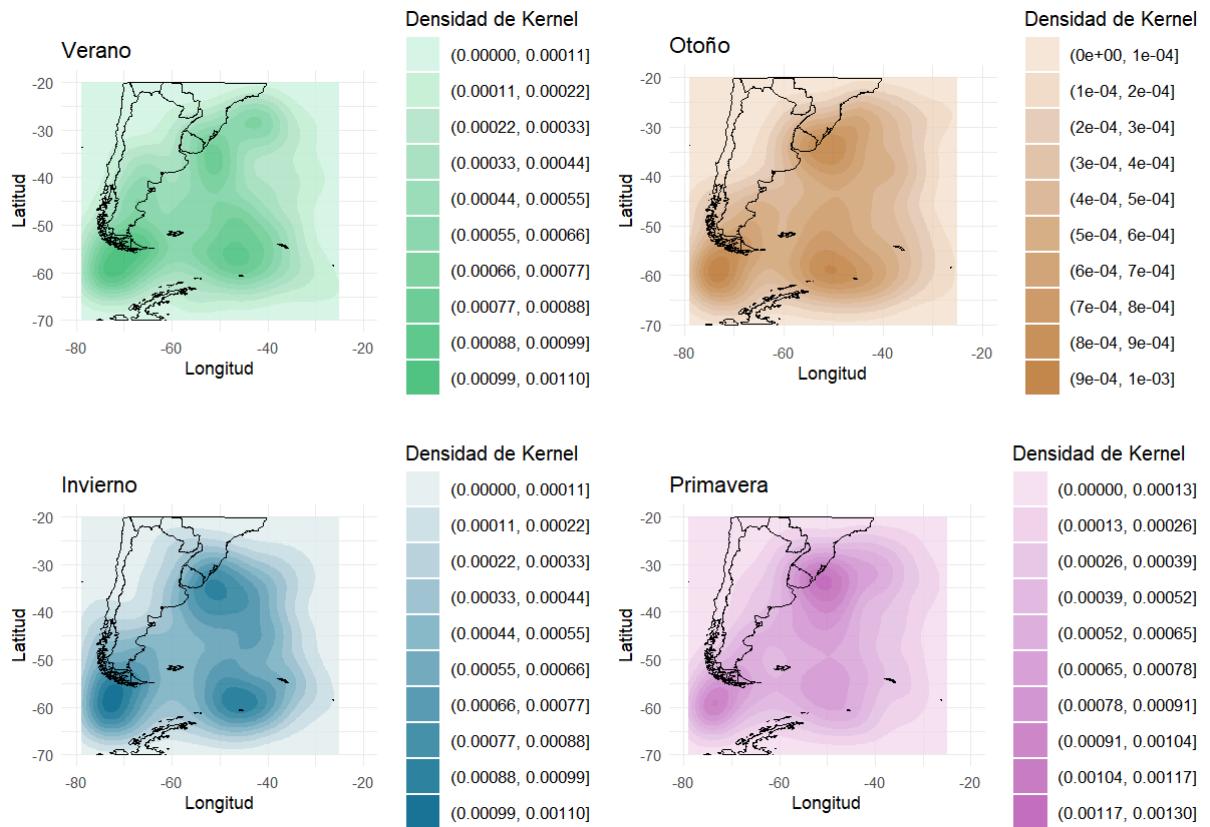


Figura 3.5: Densidad de ciclogénesis, a partir de la interpolación de la Figura 3.4 para cada estación para el periodo de 20 años.

La representación resultante de ambas figuras (3.4 y 3.5) facilita la identificación de núcleos de alta densidad, correspondientes a regiones con mayor inicio de actividad ciclónica. Durante el invierno, se encuentran tres regiones principales de máxima cantidad de ciclogénesis. Esto concuerda bien con estudios previos de Satyamurty et al. (1990), Gan y Rao (1991), Simmonds y Keay (2000), Hoskins y Hodges (2005), Mendes et al. (2007), Gramcianinov et al., (2019), entre otros. El primer área ciclogenética se ubica sobre la región costera de Argentina, Uruguay y el sur de Brasil, alcanzando valores de alrededor de 12 eventos allí iniciados en el total de los inviernos, mientras que la segunda área y tercera área se ubican al sur de la isla Grande de Tierra del Fuego y el pasaje Drake, junto a las primeras islas de la península Antártica.

Para las estaciones restantes, la posición geográfica de las regiones más activas permanece bastante constante, aunque en verano están ligeramente desplazados hacia el sur y más cerca del continente (en invierno los máximos se extienden más sobre el Mar Argentino y el océano Atlántico). Sobre todo en la Figura 3.5, se puede apreciar que la densidad en los núcleos del sur es mayor en invierno y otoño, en comparación a las estaciones cálidas. La primavera exhibe la actividad de ciclogénesis más baja. En particular, la zona sur y antártica, que permanece bastante activa durante todo el año, presenta un mínimo pronunciado en dicha estación. A diferencia de Mendes et al. (2007), no se encuentra que el otoño sea menos activo en términos de ciclogénesis.

El máximo identificado en las proximidades de los 60° S y 77,5° O puede deberse no solo a ciclones que se originan en esa región, sino también a aquellos que han viajado desde el océano Pacífico Sur y que, debido a las limitaciones del dominio utilizado, no han sido completamente considerados en el análisis. Dado que este área se encuentra en el borde del dominio se considera que ampliar la zona de estudio podría ayudar a la detección y caracterización de los sistemas en esta zona.

A pesar de utilizar una metodología y/o datos diferentes, los resultados presentados aquí concuerdan en general con los principales mecanismos asociados con el desarrollo de ciclones frecuentemente sugeridos para esta área, a saber, la inestabilidad baroclínica de los vientos del oeste y el desarrollo de ciclones inducido por la orografía en el lado de sotavento de la cordillera de Los Andes (Gan y Rao, 1991; Gan y Rao, 1994; Sinclair, 1995; Bonatti y Rao, 1987).

3.1.2 Tiempo de vida

En la Figura 3.6, se analiza la distribución de la duración de vida de los ciclones en intervalos de 6 horas, reflejando la resolución temporal de los datos empleados. Se estableció un mínimo de 24 horas para la duración de los sistemas, con el fin de evitar incluir eventos débiles que tienen un impacto limitado en las condiciones meteorológicas de la región de estudio (Gan y Rao, 1991; Dal-Piva, 2001; Trigo, 2005).

Para todas las estaciones, el mayor porcentaje de ciclones corresponde a los que tienen una duración de un día, representando entre el 26% y el 28% de los casos, dependiendo de la época del año. A partir de este punto, la frecuencia de ciclones disminuye a medida que aumenta la duración de los mismos. La distribución con la cola

más extensa corresponde a la primavera, con casos que alcanzan hasta 8 días de duración, seguida del otoño, donde se observan ciclones que persisten hasta 7 días. Algunos de estos sistemas de larga duración se desarrollan en la región circumpolar, aproximadamente a 60° S, donde los ciclones pueden recorrer grandes distancias (Simmonds y Keay, 2000a, 2000b). Esta característica se puede observar más adelante en las Figuras 3.12 y 3.13, que muestran trayectorias representativas de los *clusters* correspondientes al otoño y la primavera, donde se destacan desplazamientos hacia el sur que se prolongan durante un extenso periodo de tiempo.

Por su parte, en el estudio de Mendes et al. (2010), se reportan tiempos de vida superiores, alcanzando hasta 12 días. Esto se atribuye al dominio geográfico considerado, que incluía una porción del océano Pacífico Sur, permitiendo así la identificación de ciclones que nacen en esa región y persisten por más tiempo. Estos sistemas no se contemplan en el presente trabajo debido a las restricciones del área de estudio. Por lo tanto, se concluye que no necesariamente el tiempo de vida sea menor, sino que aquellos ciclones que se forman más al oeste no son incluidos, lo que influye en la media de duración observada. De manera similar, Simmonds y Keay (2000a) reportan una media de duración de ciclones en el hemisferio sur de algo más de 3 días, con máximos que llegan hasta 14 días, resaltando la influencia que tiene el dominio de estudio en la evaluación de la duración de estos sistemas.

A pesar de las diferencias en los dominios geográficos, tanto en este estudio como en trabajos previos se observa que la variación estacional en la duración de los ciclones es relativamente pequeña, como se aprecia en la Figura 3.6.

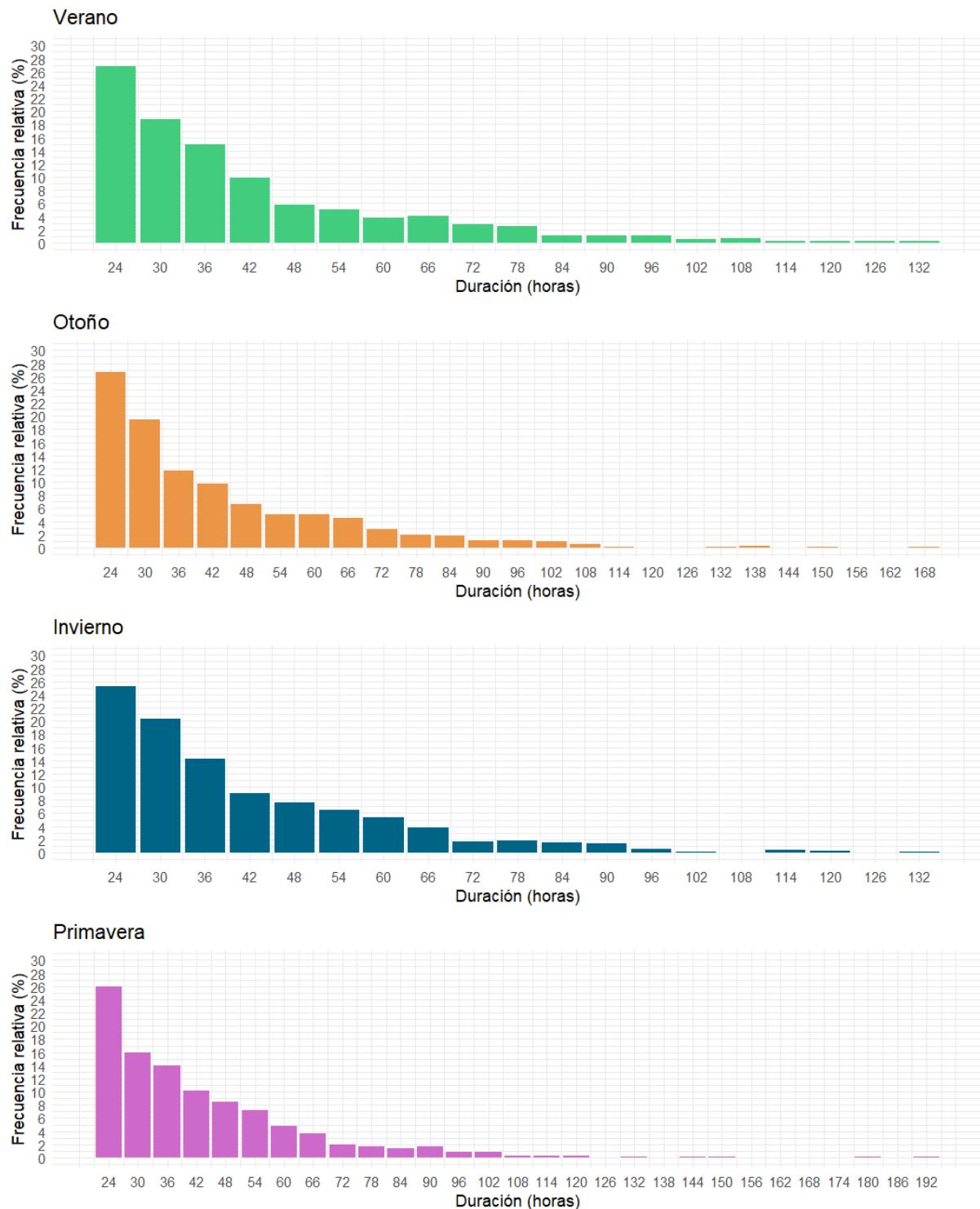


Figura 3.6: Distribución del tiempo de vida de los ciclones extratropicales con un ciclo de vida mínimo de 1 día, por estación, para los años 2003 a 2022.

A diferencia del gráfico previamente descrito, que mostraba la frecuencia relativa de los ciclones para cada intervalo de 6 horas a partir de un mínimo de 24 horas, en un nuevo gráfico de barras apiladas en la Figura 3.7, los tiempos de vida se agrupan en cinco categorías: 1 día, 2 días, 3 días, 4 días, y 5 días o más. La categoría "1 día" incluye aquellos

cyclones cuya duración oscila entre 24 y 36 horas, mientras que en la categoría "2 días" se agrupan los sistemas que persisten entre 42 y 60 horas. Del mismo modo, la categoría "3 días" abarca aquellos que duran entre 66 y 84 horas, y la categoría "4 días" incluye los ciclones con una duración de entre 90 y 108 horas. Finalmente, la categoría de "5 días o más" agrupa a todos aquellos sistemas cuya duración incluye y supera las 114 horas. Este enfoque permite establecer una continuidad temporal aproximada, al agrupar los sistemas en bloques de tiempo que se acercan a un día y medio, dos días y medio, y así sucesivamente, facilitando el análisis comparativo por estación y reflejando de manera más generalizada la persistencia de los ciclones.

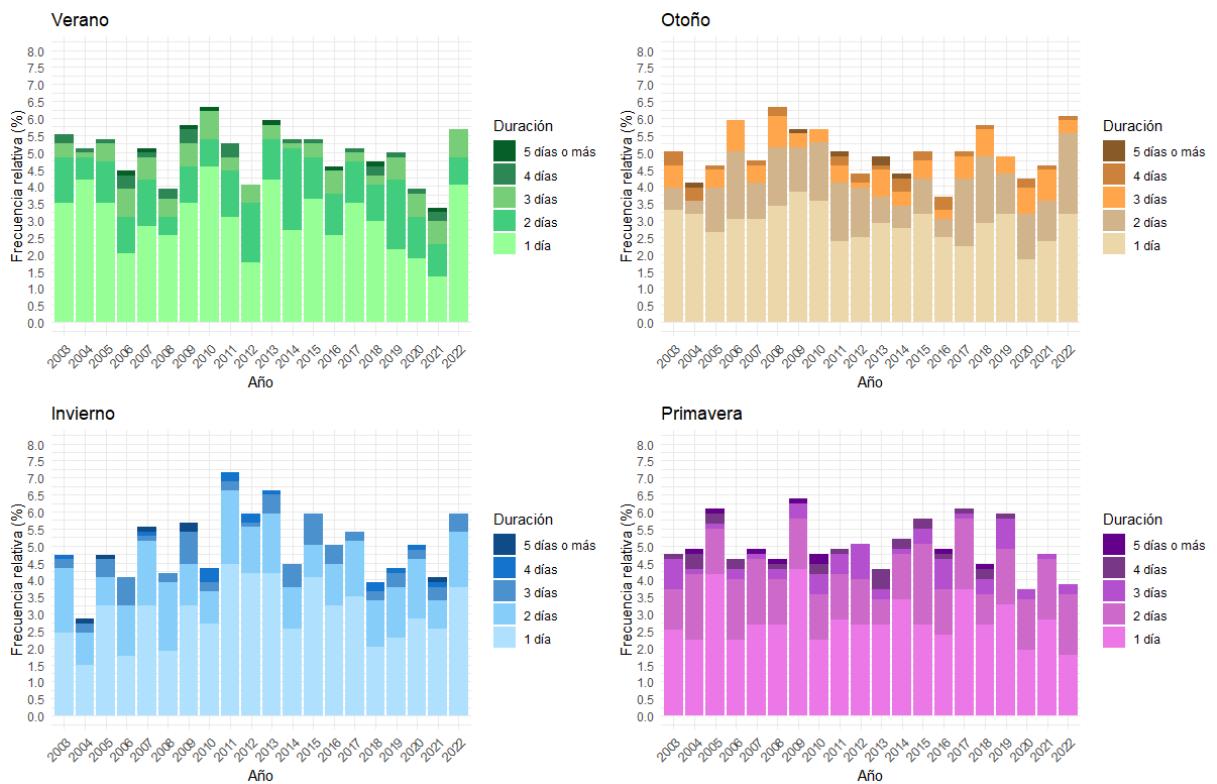


Figura 3.7: Distribución del tiempo de vida de los ciclones extratropicales clasificados por cantidad de días, por estación, para los años 2003 a 2022.

Los resultados de este análisis indican que, tanto en otoño como en invierno, se registraron cinco años con ciclones cuya duración fue de cinco días o más, mientras que en verano se observaron siete años y en primavera ocho años, siendo esta última la estación que presenta los casos más prolongados, coincidente con la cola de distribución más larga observada en la figura anterior. En cuanto a las distribuciones de los ciclones

que duran uno o dos días, estas se muestran bastante uniformes entre las cuatro estaciones del año.

3.1.3 Distancia total recorrida

Para estudiar las distancias recorridas por los CE, se asumió que la distancia total es la suma de los kilómetros recorridos en cada paso de su trayectoria, calculados a través de la fórmula de Haversine. Este criterio fue elegido debido a que los cálculos de distancias son más precisos que si se calculara directamente la distancia entre los puntos inicial y final de cada trayectoria. Este enfoque sería adecuado únicamente para ciclones con desplazamientos limitados, pero perdería precisión en sistemas que recorren grandes distancias a través del globo.

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3.8, agrupados en intervalos de 250 km, desagregados por estación del año. Tanto en verano como en primavera, se observan distribuciones similares, con un máximo en el intervalo de 750 a 1000 km, alcanzando aproximadamente el 15% de los casos. En otoño, estos valores también se mantienen, sin embargo, esta estación presenta una distribución con una cola más larga, destacándose por contener el ciclón con mayor distancia recorrida en el período de estudio, alcanzando los 6505 km. Para el resto de las estaciones, invierno registra un máximo de 5163 km, primavera 4621 km y verano 4530 km, respectivamente. Como podría haberse esperado, la longitud media de la trayectoria más larga se produce en invierno, mientras que la más corta se encuentra en verano (lo mismo sucede por ejemplo en Simmonds y Keay, 2000a). Aunque las figuras muestran una disminución constante de la frecuencia en las distancias de viaje más largas, alrededor de 2 a 3% de los sistemas viajan 3000 km. Incluso, para todas las estaciones, al menos un 45% viaja entre los 500 a 1500 km.

En invierno, la distribución también presenta una cola relativamente más larga, similar al otoño, pero a diferencia de las demás estaciones, el máximo de frecuencia relativa de ciclones ocurre en el intervalo de 1000 a 1250 km, lo que indica que, durante la temporada fría, los ciclones tienden a recorrer mayores distancias.

Para las distribuciones de verano y otoño, los intervalos que abarcan de 0 a 500 km tiene ligeramente mayor frecuencia comparado al invierno y a la primavera. Esto puede

deberse a la aparición de sistemas cuasi estacionarios sobre el continente relativamente cálido.

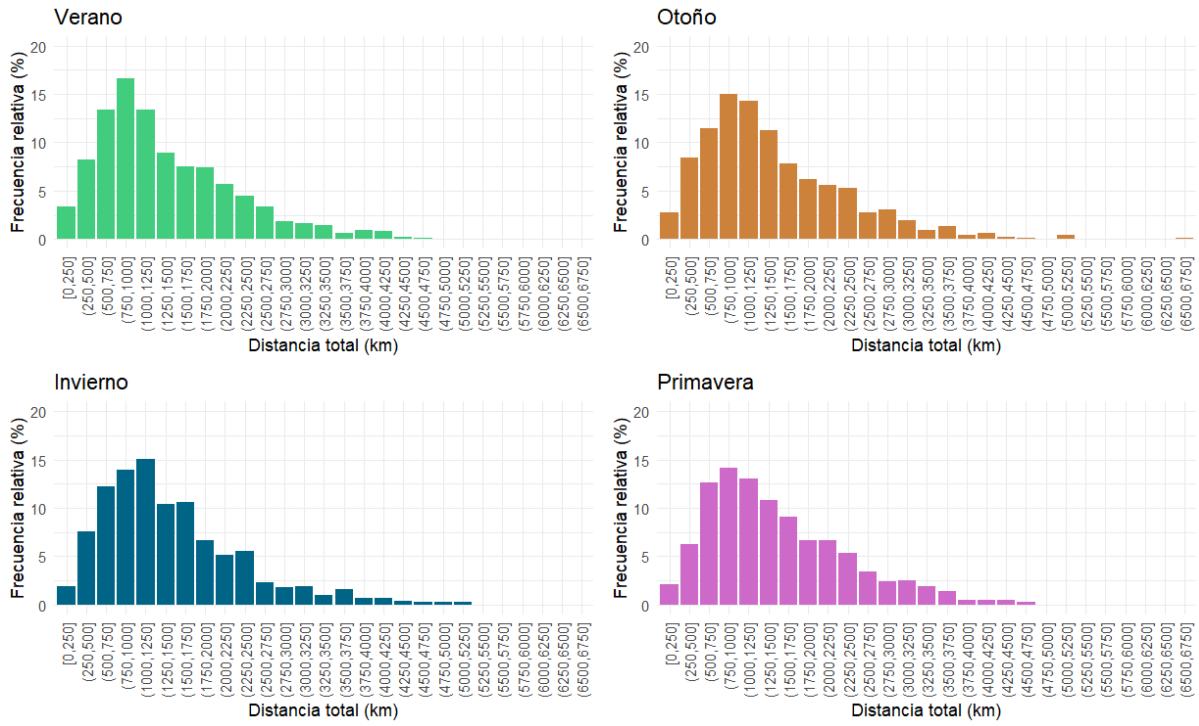


Figura 3.8: Distribución de la distancia total recorrida de los ciclones extratropicales por estación para los años 2003 a 2022.

3.1.4 Intensidad y profundización

Una forma de cuantificar la intensificación de los ciclones es a través de la profundización, es decir, con la caída de la presión en el tiempo. Esto es natural, dado que está directamente relacionada con la generación de mínimos de vorticidad local.

Cabe señalar, que si la primera detección de un ciclón también corresponde a la posición del mínimo de presión de todo su ciclo de vida, entonces la tasa de profundización será positiva, ya que la variable solo va a incrementarse o mantenerse constante para los pasos de tiempo. Como el interés recae en encontrar aquellos ciclones que se han profundizado a lo largo del tiempo (para posteriormente enfocarse en aquellos más intensos), solo se van a representar las tasas negativas en las sucesivas figuras. Además, las tasas están calculadas en hectopascales sobre 6 horas, con el objetivo de ser comparables con la bibliografía y consistentes con la resolución temporal de los datos.

En la Figura 3.9, se muestra la tasa de profundización media para los CE por estación. Ésta se calculó promediando el cambio de presión desde el inicio de la

trayectoria hasta el punto donde la presión de cada ciclón fue la mínima. Se puede apreciar que las distribuciones son similares para las cuatro etapas del año y que todas tienen su máximo en el primer y segundo intervalo (de derecha a izquierda), aunque los casos más extremos de sistemas de desarrollo rápido tienden a ocurrir en invierno.

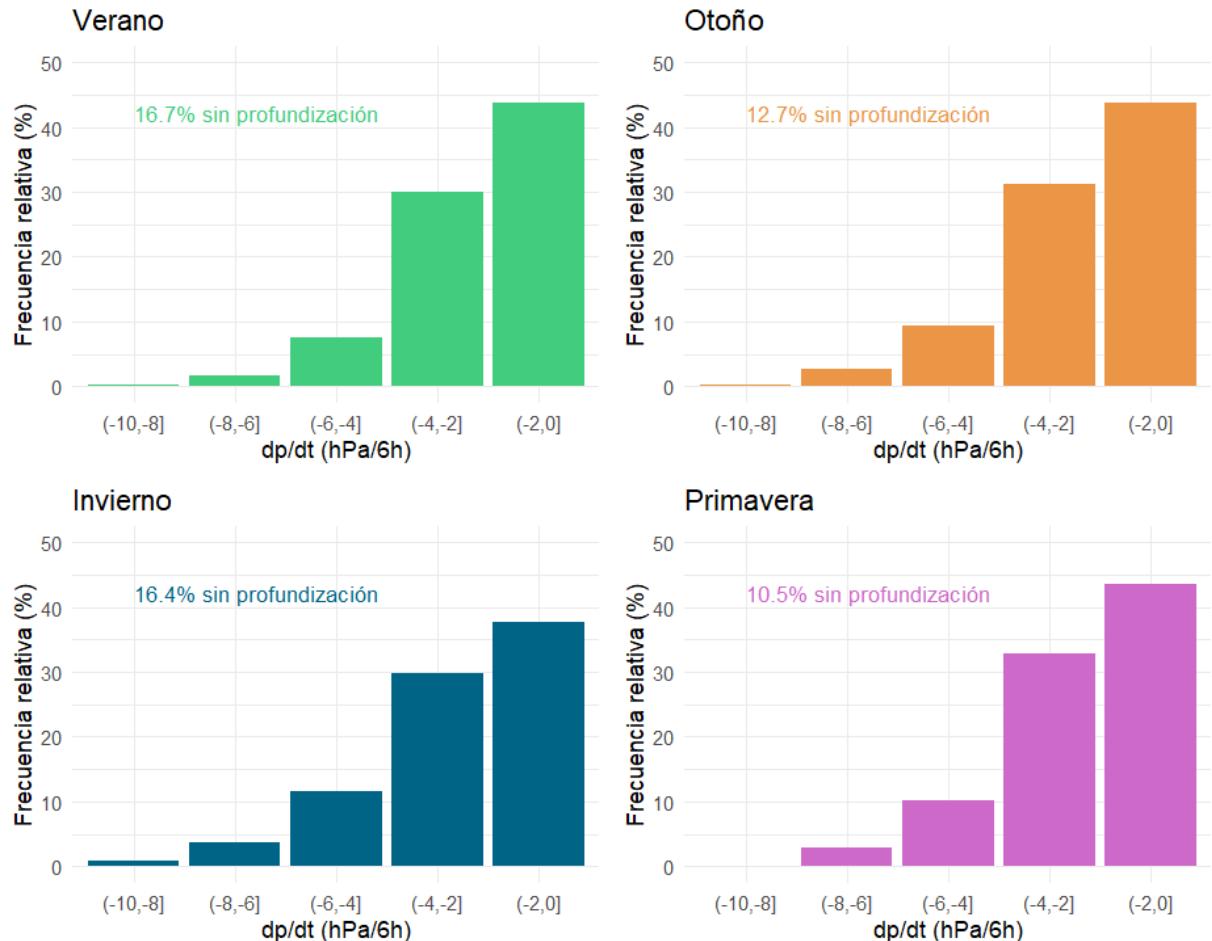


Figura 3.9: Distribución de la tasa media de profundización, ajustada geostróficamente a 45°S, por estación para los años 2003 a 2022. El porcentaje de ciclones sin profundización representa a aquellos que fueron detectados en su mínimo de presión y por lo tanto su tasa de cambio fue positiva.

Para analizar la profundización más importante de los ciclones en un paso de tiempo, es más efectivo considerar la tasa de profundización máxima durante la fase de intensificación, en lugar de las estadísticas medias como se mostró anteriormente. En pos de esto, para cada ciclón que se profundizó (es decir, eliminando aquellos que representan el porcentaje de la figura 3.9) se calculó el cambio de presión para cada paso de tiempo desde, nuevamente, el inicio de la trayectoria y el mínimo alcanzado. Luego, se seleccionó

el máximo cambio para cada uno de ellos y se elaboró la Figura 3.10, la cual ahora muestra distribuciones con una cola más extendida. Los máximos relativos se desplazan hacia valores mayores en módulo (lo mismo ocurre en Gulev et al. (2001) para el hemisferio norte) y sobre todo, este gráfico permite visualizar mejor aquellos casos más intensos que potencialmente pudieron haber sido severos. En este caso, en el otoño está el caso de mayor profundidad, con una caída de -17,47 hPa en 6 horas.

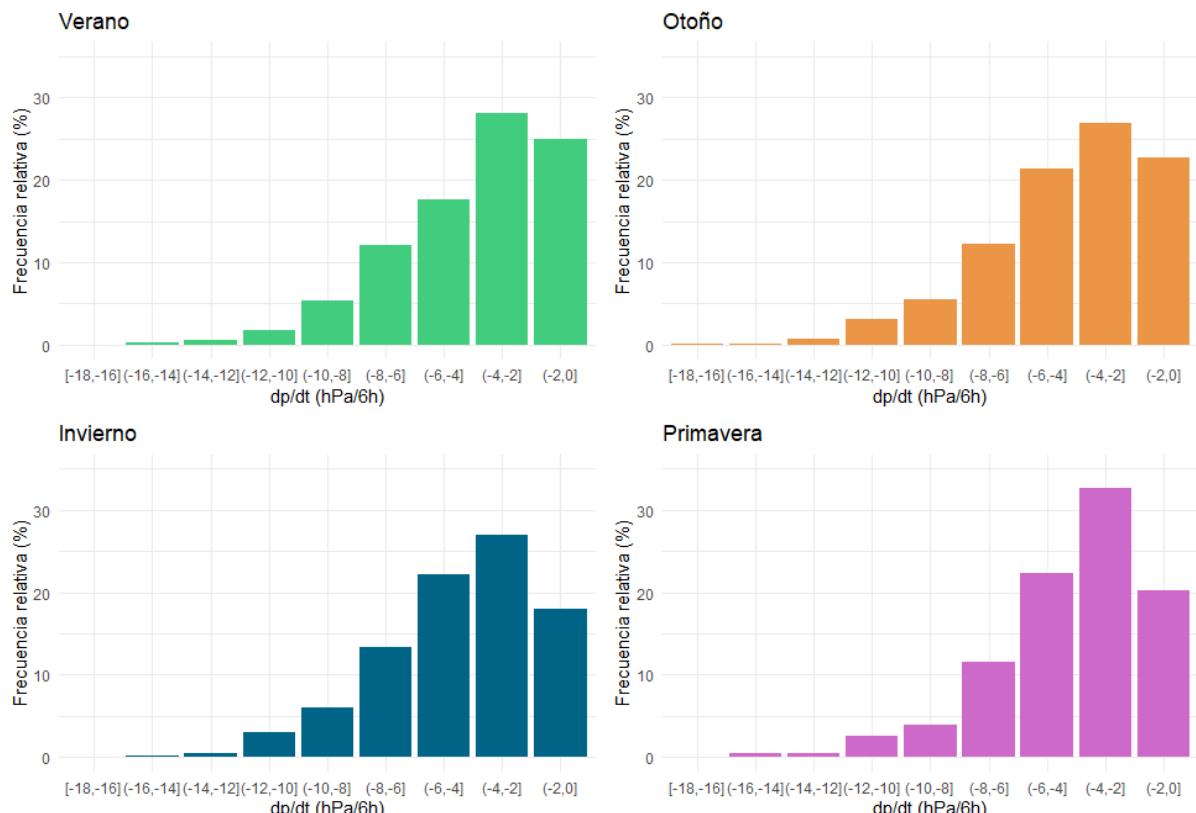


Figura 3.10: Distribución de la tasa máxima de profundización, ajustada geostróficamente a 45° S, por estación para los años 2003 a 2022.

En rasgos generales, las distribuciones en forma y valores alcanzados son similares a las encontradas en Mendes et al. (2010). En particular, hallaron la distribución de cola más larga en primavera, lo que hace a las estaciones de transición transformarse en un foco de atención. Particularmente, en el invierno, el segundo y tercer intervalo (nuevamente de derecha a izquierda) concentran la mayor frecuencia relativa, comparado al resto de las estaciones donde esto sucede en el primer y segundo intervalo. Esto indicaría que, aunque el otoño alcance el valor más alto de máxima profundización, el invierno tendría una media de profundización mayor que la del resto. Esto fue

efectivamente confirmado, calculando la media de todos los valores de tasa máxima de profundización para todas las estaciones, obteniendo un valor máximo de -4,38 hPa/6h en invierno.

3.1.5 Trayectorias preferenciales (*storm tracks*)

Con el fin de caracterizar las trayectorias típicas de los sistemas, se llevó a cabo un análisis de *clusters* utilizando el método K-means, para cada estación del año. Para determinar el número óptimo de *clusters*, se emplearon dos enfoques complementarios: el método del codo y el análisis de silueta, cuyos resultados se presentan en la Figura 3.11.

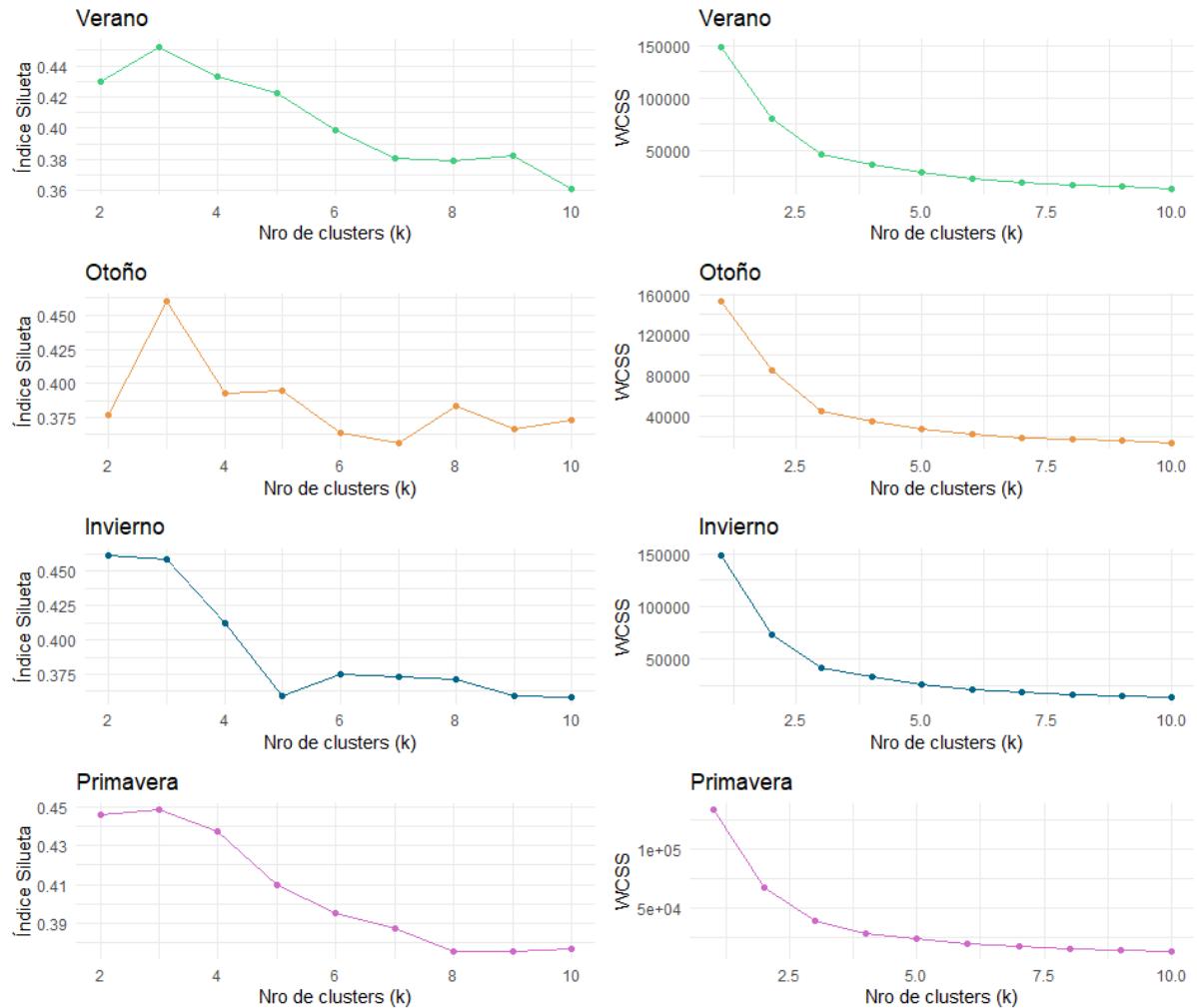


Figura 3.11: Resultados de los análisis de silueta (silhouette analysis) y método del codo (elbow method) para la identificación del número correcto de clusters, por estación.

En el caso del análisis de silueta, se busca el número de *clusters* (*k*) que maximice el índice de silueta promedio, sin otorgar relevancia al valor absoluto del índice en sí. Por

otro lado, en el método del codo, el número óptimo de *clusters* se identifica en el punto de inflexión del gráfico, nuevamente sin enfocarse en el valor específico del WCSS (*Within Cluster Sum of Squares*). Estas aproximaciones, si bien distintas en sus fundamentos, ofrecen una visión complementaria sobre la elección de k .

Los resultados obtenidos muestran variaciones en función de la estación del año. Para el verano y el otoño, ambos métodos coinciden en que el número óptimo de *clusters* es $k = 3$. Sin embargo, en invierno y primavera, la elección no es tan clara. En el caso del invierno y la primavera, aunque el gráfico del codo sugiere que $k = 3$ es el número óptimo, el análisis de silueta muestra valores máximos repartidos entre $k = 2$ y $k = 3$.

Para el análisis de los resultados estacionales, se graficaron los *clusters* obtenidos para el área de estudio. Las Figuras 3.12, 3.13 y 3.14 muestran las agrupaciones correspondientes a $k=3$, $k=2$ y $k=4$, respectivamente. Cada *cluster* está representado por un color distintivo, donde la trayectoria representativa de cada conglomerado se destaca con una línea de mayor grosor (determinada según lo descrito en el capítulo de Metodologías). Las trayectorias restantes que pertenecen a cada *cluster* se presentan con el mismo color, pero con menor opacidad, con el fin de visualizar de manera general el área de influencia de cada conglomerado dentro del dominio. Aunque la densidad de tantas trayectorias graficadas puede generar confusión visual, este enfoque permite apreciar la distribución espacial y las áreas comunes que comparten los sistemas dentro de cada *cluster*.

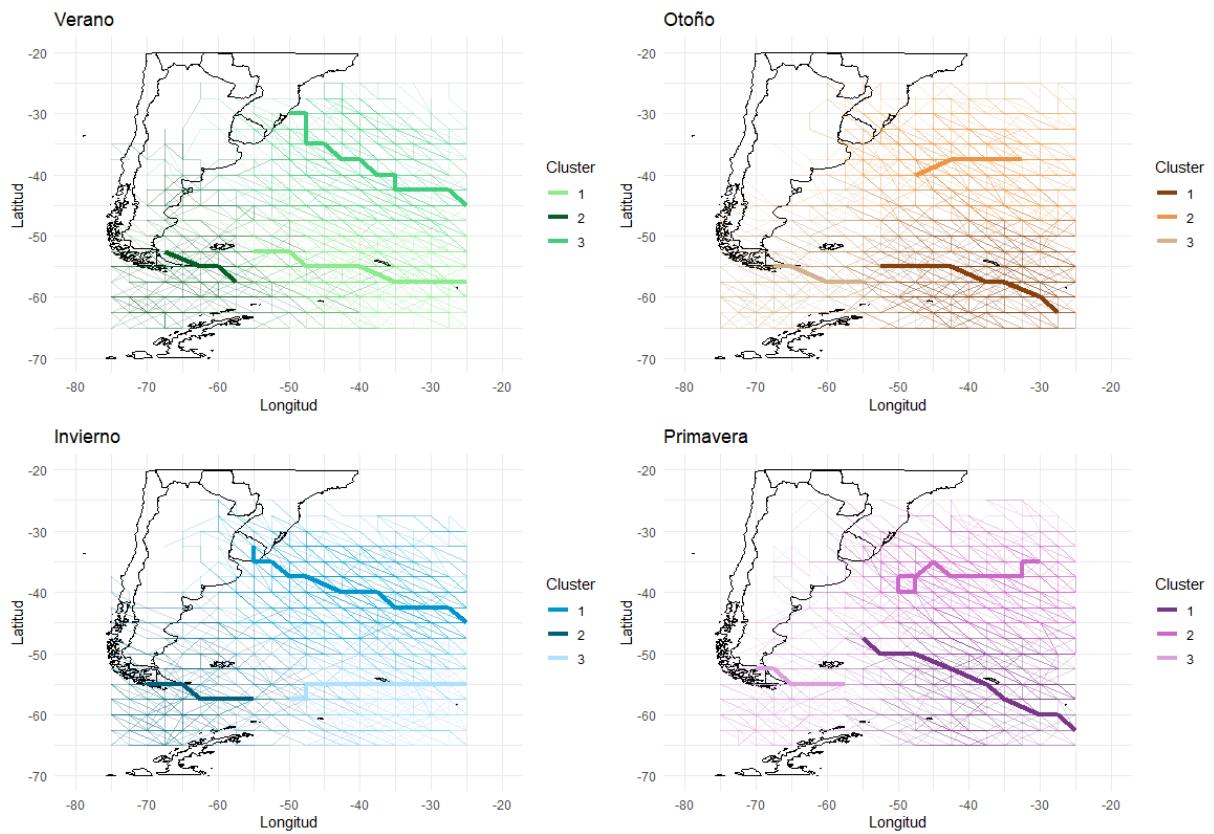


Figura 3.12: Clusters de trayectorias por estación luego de aplicar K-means con $k=3$.

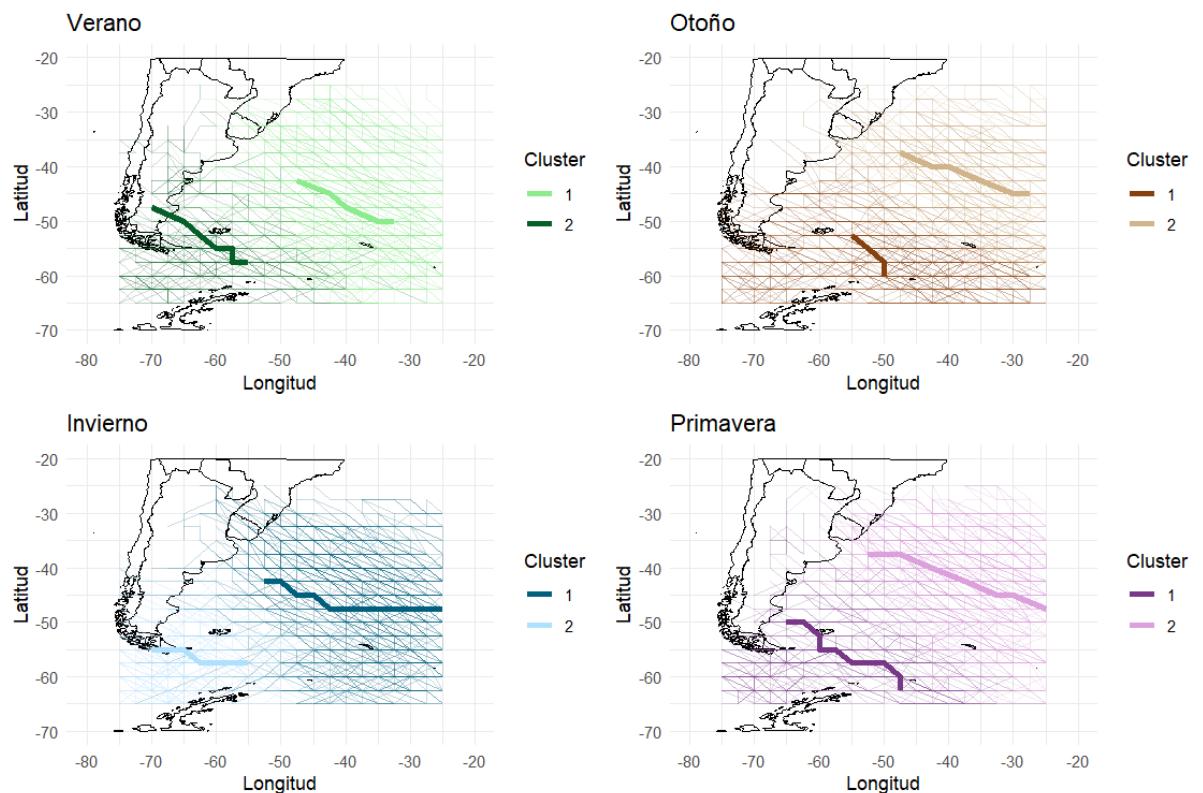


Figura 3.13: Clusters de trayectorias por estación luego de aplicar K-means con $k=2$.

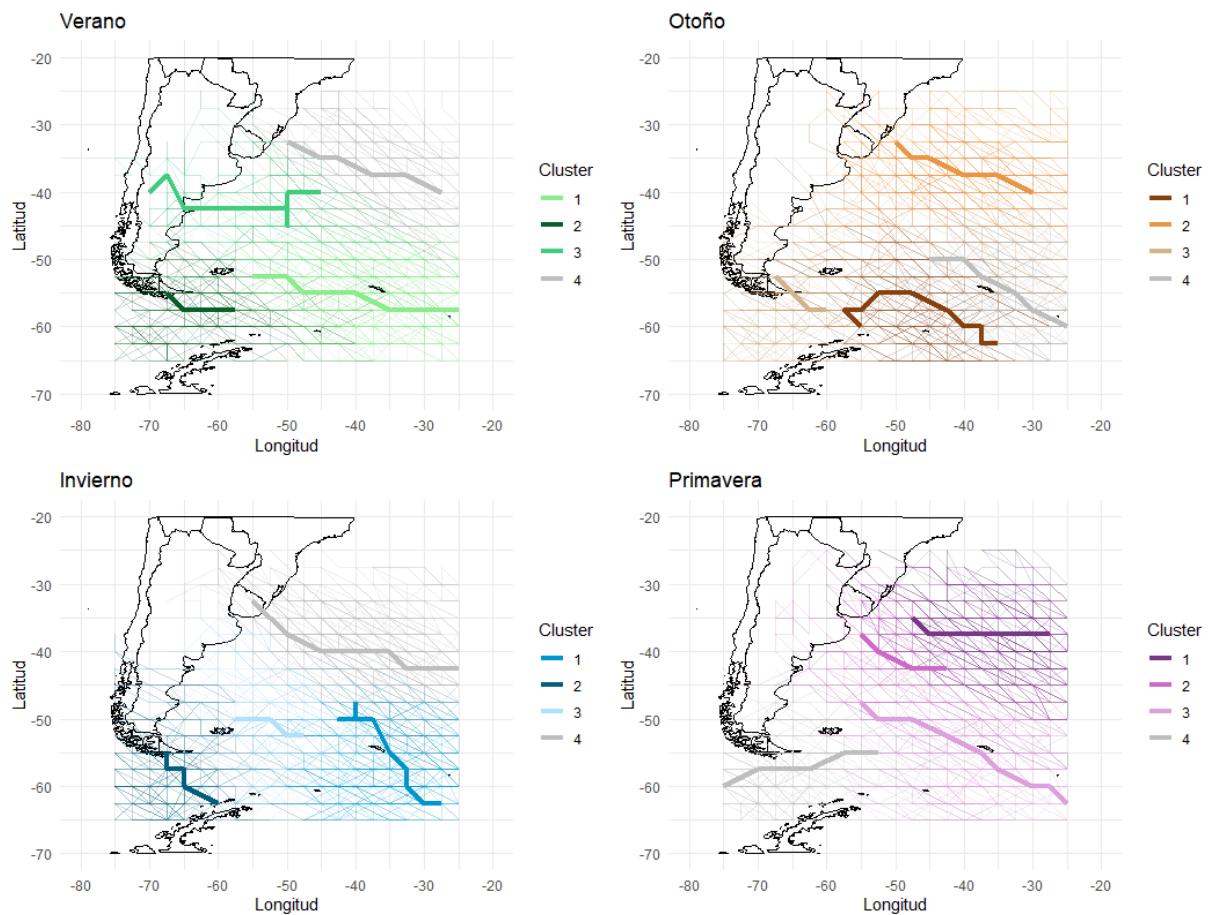


Figura 3.14: Clusters de trayectorias por estación luego de aplicar *K-means* con $k=4$.

A partir de los resultados obtenidos en la Figura 3.11, se considera que un valor de $k=3$ es el más adecuado para representar las trayectorias ciclónicas en todas las estaciones, ya que parece reflejar de manera más coherente los hallazgos de estudios previos. Por este motivo, en la Figura 3.12 se presenta el resultado de la aplicación del método *K-means* a las trayectorias ciclónicas utilizando tres conglomerados.

Los tres *clusters* identificados parecen dividirse en dos grandes regiones con trayectorias bien definidas: una que abarca la costa norte de Argentina, Uruguay y el sur de Brasil; y otra que se localiza en la región cercana a la península Antártica y el pasaje Drake. Esta última región muestra una subdivisión en dos trayectorias: una que se origina en el continente, en la región de la isla Grande de Tierra del Fuego (cuyo punto de origen varía al norte o al sur según la estación del año), y otra que se inicia sobre los límites del Mar Argentino y continúa su desplazamiento principalmente zonal alrededor de los 55°S sobre el océano Atlántico. El único caso en el que se observa un ligero cambio en este patrón es durante la primavera, donde la trayectoria representativa del centroide se

origina más al interior del Mar Argentino, al norte de las islas Malvinas, y su desplazamiento es meridional hacia el sur.

Es importante recordar que, si bien la metodología utilizada es adecuada, la selección de trayectorias representativas mediante la posición media más cercana al centroide del *cluster* puede llevar a la elección de algunas trayectorias que no reflejan completamente el movimiento característico de los ciclones en esa región. Un ejemplo de esto es el segundo *cluster* en otoño, donde la trayectoria seleccionada es una de las más cortas, lo que de todas formas no impide que se aprecie la zona correspondiente a este *cluster*, situada en la región costera compartida con los países limítrofes previamente mencionados. En el caso de la primavera, para el mismo *cluster*, la trayectoria seleccionada muestra un movimiento aparentemente circular, lo cual se debe a la persistencia del sistema en la zona oceánica. El movimiento real probablemente no sea en una circunferencia, sino que se ve así por la resolución de los datos utilizados.

Otra característica notable es que las trayectorias en las estaciones de transición, como primavera y otoño, tienden a ser visiblemente más oceánicas en comparación con las de invierno y verano. Finalmente, en los dos *clusters* correspondientes a la región cercana a la península Antártica, se observa una pequeña variación estacional en el comportamiento de los ciclones, con un desplazamiento del área total de influencia hacia el norte desde el otoño hasta la primavera.

Las dos regiones mencionadas previamente coinciden con zonas de ciclogénesis, tal como se discutió al inicio de este capítulo. Estas áreas son de particular relevancia debido a la frecuencia con la que se desarrollan sistemas en las mismas. En el estudio de Mendes et al. (2010) se identificó un *cluster* marcado sobre el océano Pacífico sur-central, el cual no es apreciable en este trabajo debido a las restricciones impuestas por el dominio de estudio. Esto resalta la importancia de considerar el alcance espacial del área de análisis para una adecuada comparación entre diferentes trabajos.

Previamente, se mostró que para el invierno y la primavera, el número óptimo de *clusters* también podría darse con $k=2$. Por ello, se desarrolló la Figura 3.13. En esta figura, continúan observándose las dos regiones principales mencionadas anteriormente, aunque con una tendencia a promediar la posición entre ambas, ya que ahora los centroides deben abarcar una mayor cantidad de casos al haber menos conglomerados. En el caso del invierno, se mantiene la trayectoria representativa del sur, asociada al paso por Tierra del

Fuego. Sin embargo, el *cluster* que previamente correspondía a la costa compartida con Uruguay y Brasil ahora queda desplazado hacia una latitud mayor. Esto sugiere que, al reducir el valor de k , los conglomerados 1 y 2 de la Figura 3.12 se agrupan, lo que provoca que el centroide se desplace hacia el sur.

Este comportamiento refuerza la conclusión de que es preferible utilizar $k=3$, ya que permite representar de manera más precisa las dos bandas de movimiento, particularmente en lo que respecta al límite geográfico entre ambas. Para la primavera, ocurre algo similar, aunque las posiciones de las trayectorias no experimentan alteraciones tan marcadas, más allá de algunas variaciones en su forma.

Finalmente, se realizó una prueba utilizando $k=4$ (Figura 3.14) con el objetivo de evaluar los resultados obtenidos al aumentar el número de conglomerados. Aunque persisten las dos áreas preferenciales de movimiento, el incremento en el número de *clusters* comienza a distribuir las trayectorias de manera que no añaden diferencias significativas a lo previamente observado. Esto es particularmente evidente en el sector antártico durante el invierno y el otoño, así como en el sector norte durante la primavera.

A partir de este conjunto de resultados, se concluye que el valor óptimo para el análisis en este estudio, utilizando la metodología K-means, es $k=3$. Este valor permite capturar adecuadamente los patrones de desplazamiento sin sobrecargar la interpretación con divisiones que no contribuyen información adicional relevante.

3.2 Viento y severidad en los ciclones extratropicales

Para cuantificar la severidad de los ciclones en el área de estudio, se optó por utilizar la intensidad del viento horizontal a 10 metros. Esta variable es crucial para caracterizar el estado del mar, que ocupa la mayor parte del dominio analizado, dado su impacto directo en el oleaje y por lo tanto en la seguridad náutica (Heij y Krapp, 2015). Fluctuaciones significativas en la velocidad del viento pueden provocar desvíos o retrasos en las rutas marítimas, lo que a su vez repercute en los costos y en la seguridad de las embarcaciones, aumentando potencialmente el riesgo de accidentes náuticos y ambientales (Bye y Aalberg, 2018). Otras variables, como la visibilidad, también son relevantes; sin embargo, no se consideran determinantes en este análisis, dado que los ciclones extratropicales no son su principal causa de reducción. El viento a 10 metros es utilizado ampliamente en el estudio de ciclones alrededor del mundo, como por ejemplo en los trabajos Nissen et al. (2010) y Hirata (2021).

Para esta fase del análisis, se seleccionó el valor de viento máximo (V_{\max} , en adelante) asociado a cada ciclón en cada tiempo de su trayectoria (por ejemplo si un evento vive 6 pasos de tiempo o 36 horas, entonces habrá 6 V_{\max} asociados a él). Esto se logra ubicando los centros de los CE encontrados previamente en el conjunto de datos de viento, no solo en su inicio, sino en cada tiempo de su trayectoria. Posteriormente, se reconstruye una caja de 24 puntos alrededor del centro (similar a como se describe en la sección de Datos y Metodologías para los campos de presión, pero aplicada a los campos de viento). De estos, se seleccionaron los 16 puntos externos al centro para identificar el V_{\max} (Figura 3.15, panel izquierdo). Adicionalmente se construyeron cuatro cuadrantes arbitrarios con el fin de no solo identificar el valor absoluto de los máximos de viento, sino de ver en qué sector se encuentran (Figura 3.15, panel derecho).

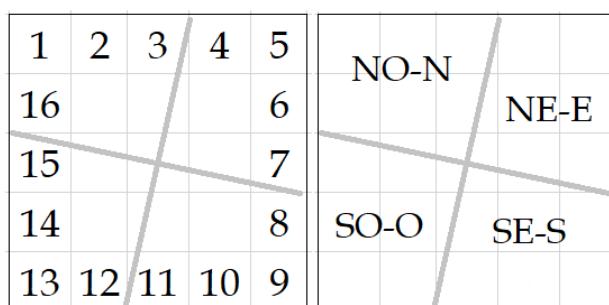


Figura 3.15: Esquema de clasificación para la variable V_{max} en cuadrantes. En el panel izquierdo están los 16 puntos exteriores al centro con la división de cuadrantes, y en el panel derecho se muestra con qué nombre se clasificaron.

Una vez obtenido el viento de los 16 puntos, se selecciona el máximo y se almacena como V_{max} . La Tabla 3.1 resume, por estación, los valores estadísticos de V_{max} registrados. Se puede ver que los valores más elevados están repartidos entre el otoño (el cual se lleva el máximo absoluto) y el invierno (con el mínimo, la media y la mediana más alta).

Tabla 3.1: Resumen estadístico para la variable V_{max} (kt) para todas las estaciones del año, de 2003 a 2022.

	Min	2 ^{do} cuartil	Mediana	Media	3 ^{er} cuartil	Max
Verano	9,9	28,7	34,2	34,8	40,4	66,4
Otoño	9,5	31,3	36,7	37,5	43,1	77,3
Invierno	12,4	30,9	37,3	37,9	44,5	71,5
Primavera	12,2	30,1	36,3	36,3	42,1	68,2

Al clasificar en la Figura 3.16 todos los V_{max} por el cuadrante en el que se encontraban, se observó que los del sector norte (NE-E, NO-N) son dominantes, seguidos del cuadrante SE-S.

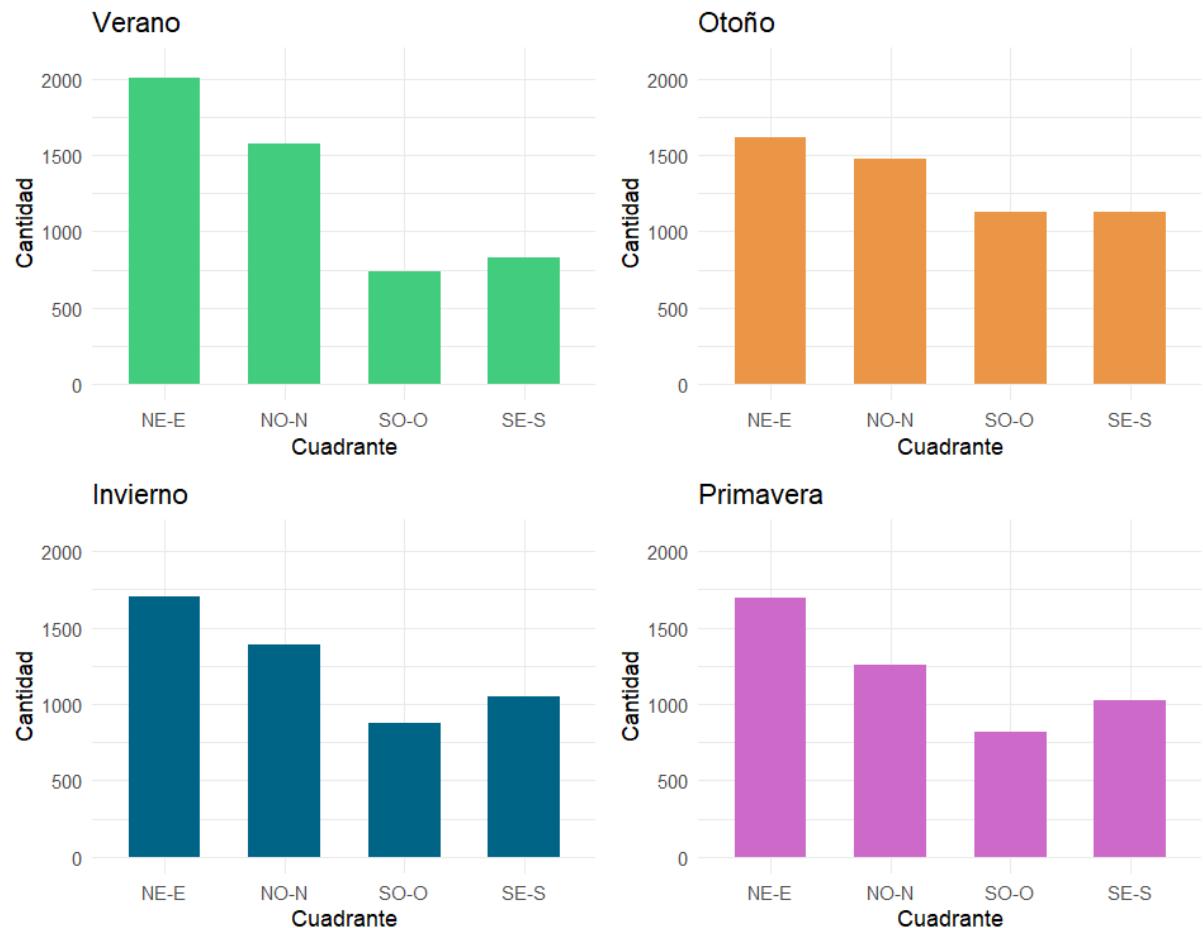


Figura 3.16: Distribución de la posición del V_{max} en los cuadrantes preestablecidos. La variable cantidad representa todas las posiciones durante el tiempo de vida de los ciclones que han tenido su máximo en dicho cuadrante.

Así como se hizo el análisis de profundización (dp/dt), se procedió a examinar el cambio temporal del V_{max} , a fin de analizar su aceleración. Esto incluyó los incrementos en V_{max} en cada paso temporal de todas las trayectorias, los cuales se clasificaron en intervalos y se representaron en la Figura 3.17. Las distribuciones estacionales exhiben patrones similares, aunque con colas más largas en otoño, con un cambio máximo de 27,87 kt en 6 horas, y en invierno, con 29,17 kt en 6 horas.

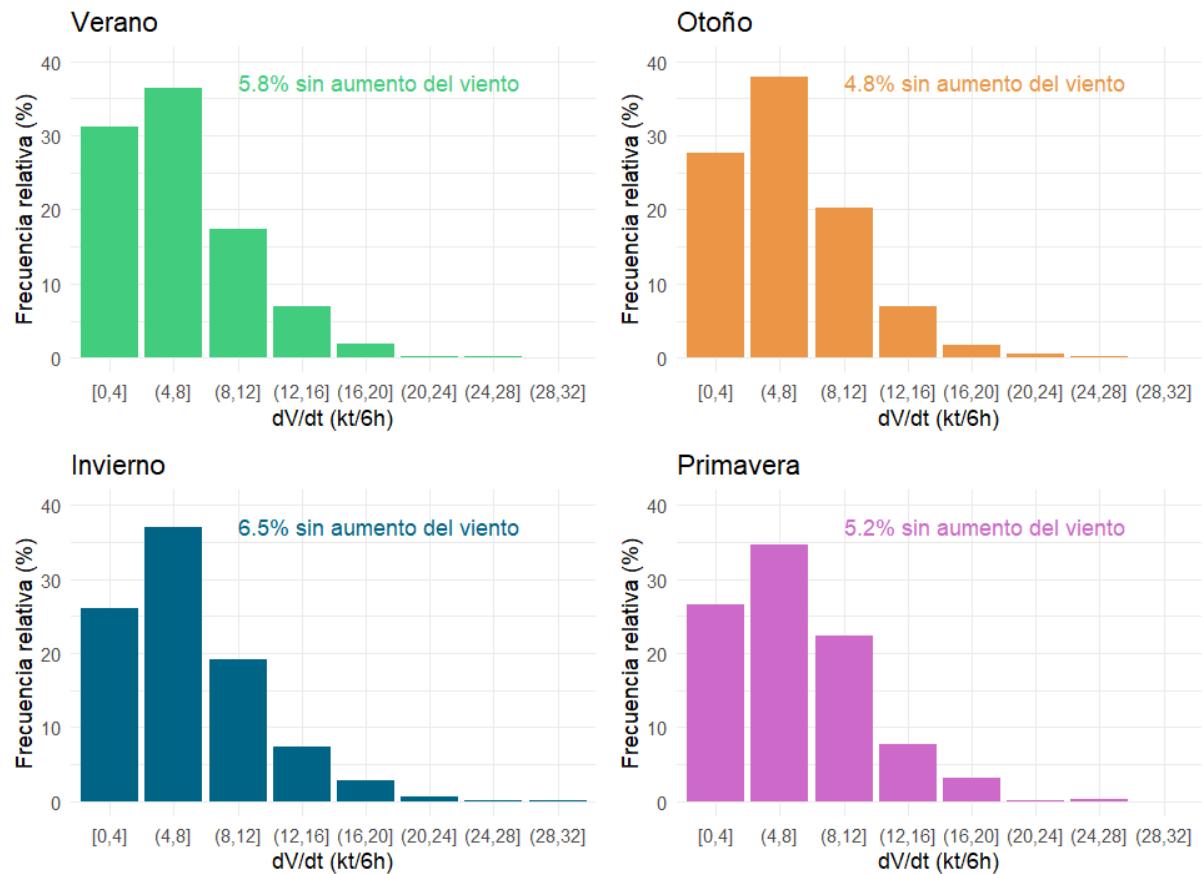


Figura 3.17: Distribución de la tasa de aceleración de V_{max} por estación para los años 2003 a 2022. El porcentaje de ciclones sin aumento del viento representa a aquellos que durante su trayectoria la variable sólo disminuyó.

Este cálculo adicional se realizó también para relacionar directamente la variación de la intensidad del viento con el cambio de presión. Para ello, se identificó en cada ciclón el momento de máxima profundización (mínimo dp/dt) y el momento de máxima aceleración (máximo dV/dt). Como muestra la Figura 3.18, en todas las estaciones el valor máximo de dV/dt ocurre 6 horas después del máximo dp/dt . Este resultado es consistente, dado que el apretamiento isobárico precede a la intensificación del viento en el sistema. De todas formas, existen casos donde dicho máximo de viento se da muchas horas antes o después.

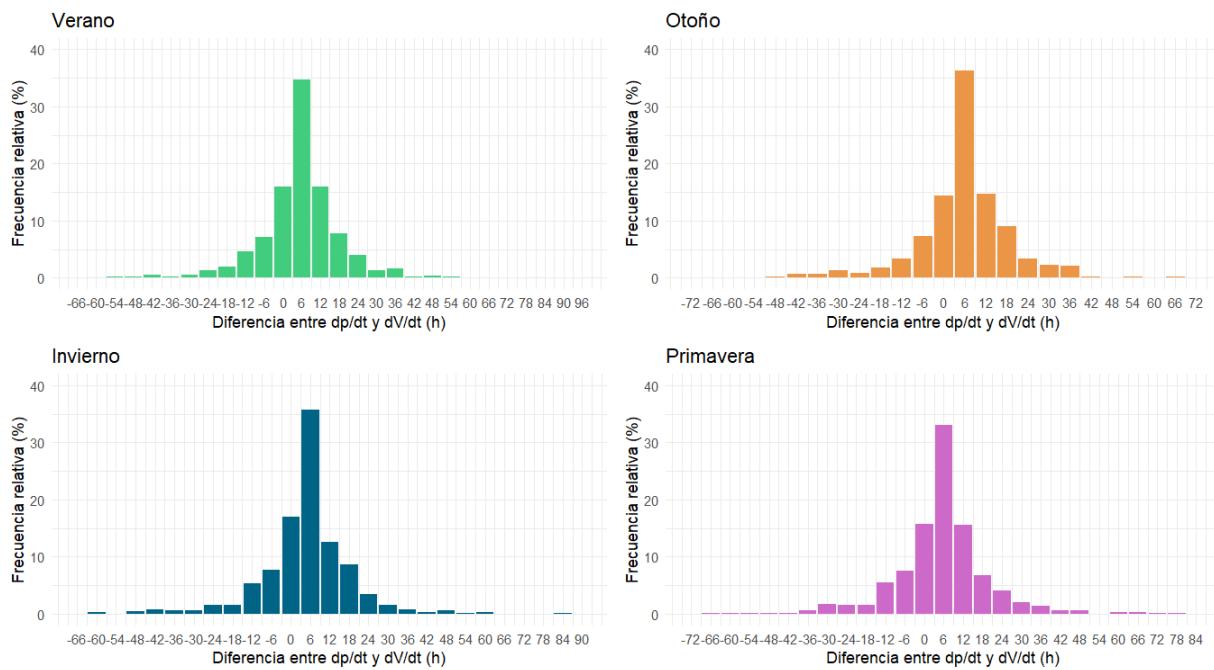


Figura 3.18: Distribución de la diferencia en horas entre la máxima profundización y la máxima aceleración del V_{max} por estación para los años 2003 a 2022.

Después de examinar los valores máximos de V_{max} en su conjunto, se definió un criterio de severidad para los ciclones en el área de estudio. Dado que la intensidad del viento está estrechamente ligada a la altura de las olas en mar abierto, se utilizó la escala Beaufort (Tabla 3.2) como referencia para establecer dicho criterio. La escala Beaufort, desarrollada en primera instancia en 1805 por el almirante británico Francis Beaufort, es un sistema de clasificación empírica que mide la intensidad del viento según sus efectos visibles, originalmente diseñado para evaluar el impacto del viento en el mar y en las velas de las embarcaciones. En la actualidad, esta escala se usa ampliamente en meteorología para clasificar la velocidad del viento en función de sus efectos tanto en el mar como en tierra. El Servicio de Hidrografía Naval cuenta con un Atlas de olas (Publicación H-5182, 2019), a partir del cual se obtuvo la referencia para la Tabla 3.2, ampliamente utilizado por los buques en la zona de responsabilidad nacional.

Tras un análisis detallado, se determinó que a partir de una intensidad del viento de 35 nudos (abreviado de ahora en más como kt , por su nombre en inglés *knot*) se representa un nivel de severidad significativo asociado a una altura de ola promedio de 6 a 7,5 m. Este umbral no solo impacta la navegabilidad de pequeñas embarcaciones, sino que

también supone riesgos operativos para buques de mayor tamaño y está comprendido dentro de la clasificación de fuerza 8 de la escala Beaufort.

Tabla 3.2: Escala Beaufort para el viento y la altura de las olas.

Escala de Beaufort	Descripción	Velocidad del viento (kt)	Altura de ola probable (m)
Fuerza 0	El mar parece un espejo	< 1	0
Fuerza 1	Se forman rizos que semejan escamas de peces, pero sin espuma	1 a 3	0,1
Fuerza 2	Ondulaciones cortas pero más pronunciadas, las crestas se vuelven vidriosas pero no rompen aún	4 a 6	0,2 a 0,3
Fuerza 3	Olas pequeñas cuyas crestas comienzan a romper, espuma de aspecto vidrioso	7 a 10	0,4 a 1
Fuerza 4	Las olas se hacen más largas, corderitos francamente numerosos	11 a 16	1 a 2
Fuerza 5	Olas moderadas claramente más alargadas, gran abundancia de corderitos	17 a 21	2 a 3
Fuerza 6	Comienzan a formarse olas grandes, las crestas de espuma blanca se extienden por todas partes	22 a 27	3 a 4
Fuerza 7	La mar engruesa, la espuma que proviene de los rompientes de las crestas empieza a ser arrastrada en la dirección del viento, formando espuma densa.	28 a 33	4 a 6
Fuerza 8	Olas de altura media y más alargadas del borde superior de las crestas comienza a desprenderse espuma en forma de torbellinos en la dirección del viento	34 a 40	6 a 7,5
Fuerza 9	Olas gruesas, la espuma es arrastrada en nubes espesas que reducen la visibilidad	41 a 47	7,5 a 10
Fuerza 10	Olas muy gruesas, con grandes	48 a 55	10 a 12,5

	crestas empenachadas, la espuma se aglomera en grandes bancos y arrastra en la dirección del viento en forma espesa, la visibilidad se reduce		
Fuerza 11	Olas excepcionalmente grandes (los buques de pequeño y mediano tonelaje pueden perderse de vista), el mar está completamente cubierto por bancos de espuma blanca extendida en la dirección del viento, las crestas se vuelven espumosas y se reduce aún más la visibilidad	56 a 63	12,5 a 16
Fuerza 12	El aire está lleno de espuma, el mar está completamente blanco debido a los bancos de espuma, la visibilidad es muy reducida	> 64	> 16

Una vez establecido este umbral, se realizó un primer análisis para determinar el porcentaje de todos los valores de V_{max} , clasificados previamente por estación, que superan los 35 nudos. En la Tabla 3.3 se presentan estos valores, los cuales resultan coherentes con lo observado en la Tabla 3.1, donde 35 nudos se encontraba en torno al valor medio de los datos. Este hallazgo sugiere que los ciclones extratropicales representan una influencia significativa en la seguridad náutica, con una tendencia a afectar diversos tipos de embarcaciones bajo el criterio seleccionado.

Tabla 3.3: Porcentaje de todos los tiempos de vida de todos los ciclones extratropicales donde se supera el umbral de 35 kt.

	Porcentaje de tiempos con V_{max} igual o mayor a 35 kt
Verano	46,8%
Otoño	58,2%
Invierno	60,2%
Primavera	55,4%

Cabe aclarar que se repitió la Figura 3.16 solo para los casos donde en algún momento de la vida del ciclón se alcanzaba el umbral, y la clasificación de los cuadrantes fue muy similar (mismos máximos de distribución).

Finalmente, se calculó para todos los ciclones el porcentaje de tiempo en que presentaron vientos que superan o igualan el umbral de severidad. Por ejemplo, si un ciclón fue registrado durante 30 horas (5 intervalos de tiempo) y en 24 de esas horas (4 intervalos) tuvo un V_{max} de 35 nudos o más, se clasificó con un 80% de su vida dentro de la categoría de severidad. Este cálculo se aplicó a todos los casos en cada estación, y los resultados se presentan en la Figura 3.19. La clasificación se dividió en cuatro categorías: un 0% si en ningún momento alcanzó el umbral; mayor a 0% y hasta 50% si el ciclón cumplió con el umbral en hasta la mitad de su duración; mayor al 50% y menor al 100%; y, finalmente, aquellos ciclones que durante toda su vida presentaron vientos iguales o mayores a 35 nudos.

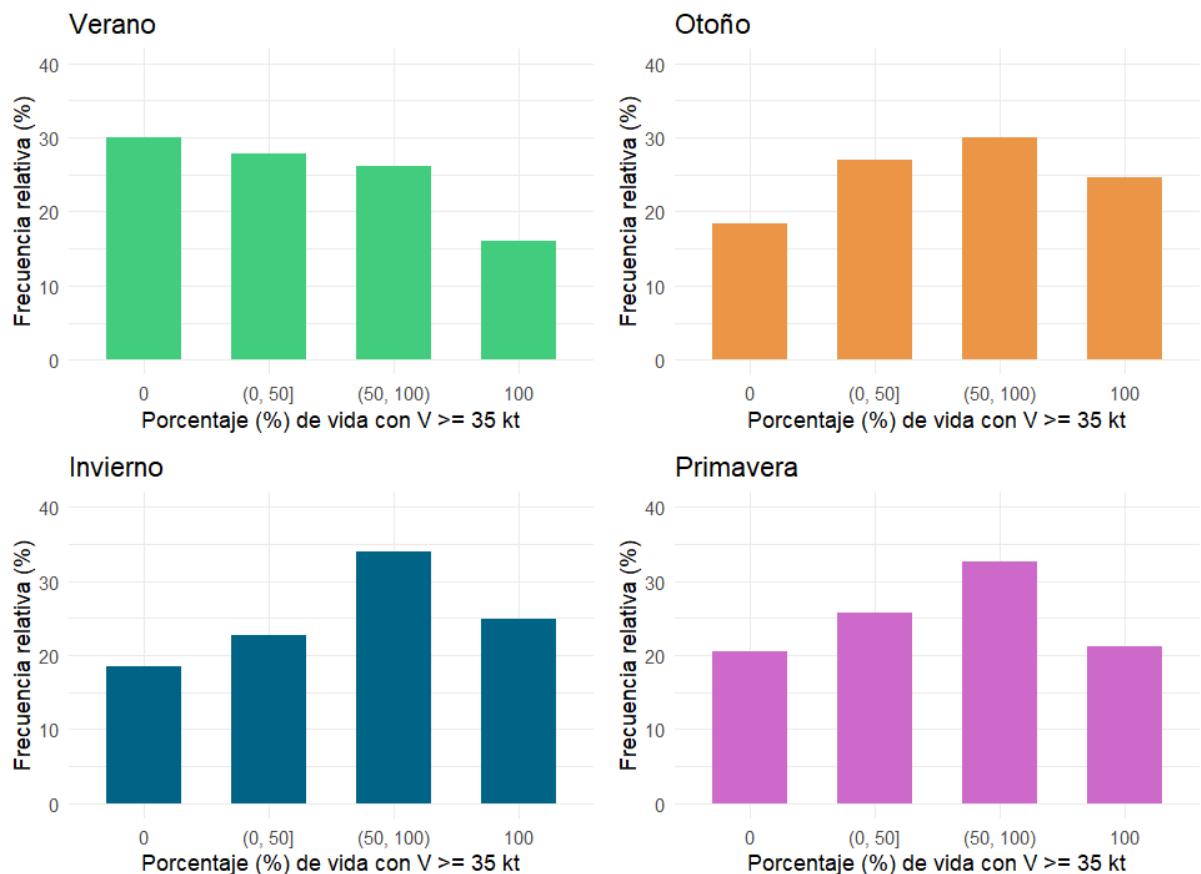


Figura 3.19: Distribución del porcentaje de vida con V_{max} igual o mayor a 35 nudos de los ciclones extratropicales, por estación.

Cabe destacar que el invierno muestra la mayor frecuencia relativa en los intervalos (50, 100) y 100%, lo que sugiere que esta es la estación con mayor probabilidad de desarrollar eventos severos que impactan la seguridad náutica.

Una vez identificados los ciclones que pasaron el 100% de su vida con vientos máximos superiores a 35 nudos, se procedió a graficar sus trayectorias en la Figura 3.20. En este gráfico, se representan las trayectorias individuales y se incluye una capa de densidad que muestra la concentración de las mismas, empleando la misma metodología utilizada en la Figura 3.5. De manera preliminar, se observa que los máximos de densidad se concentran sobre el océano Atlántico, mientras que el área de influencia de estas trayectorias varía ligeramente entre estaciones. Laurila et al. (2021) realiza un análisis similar en el norte europeo, donde clasificaron a los CE según las ráfagas de viento asociadas, encontrando también que los más intensos tienden a originarse y ocurrir sobre áreas marinas.

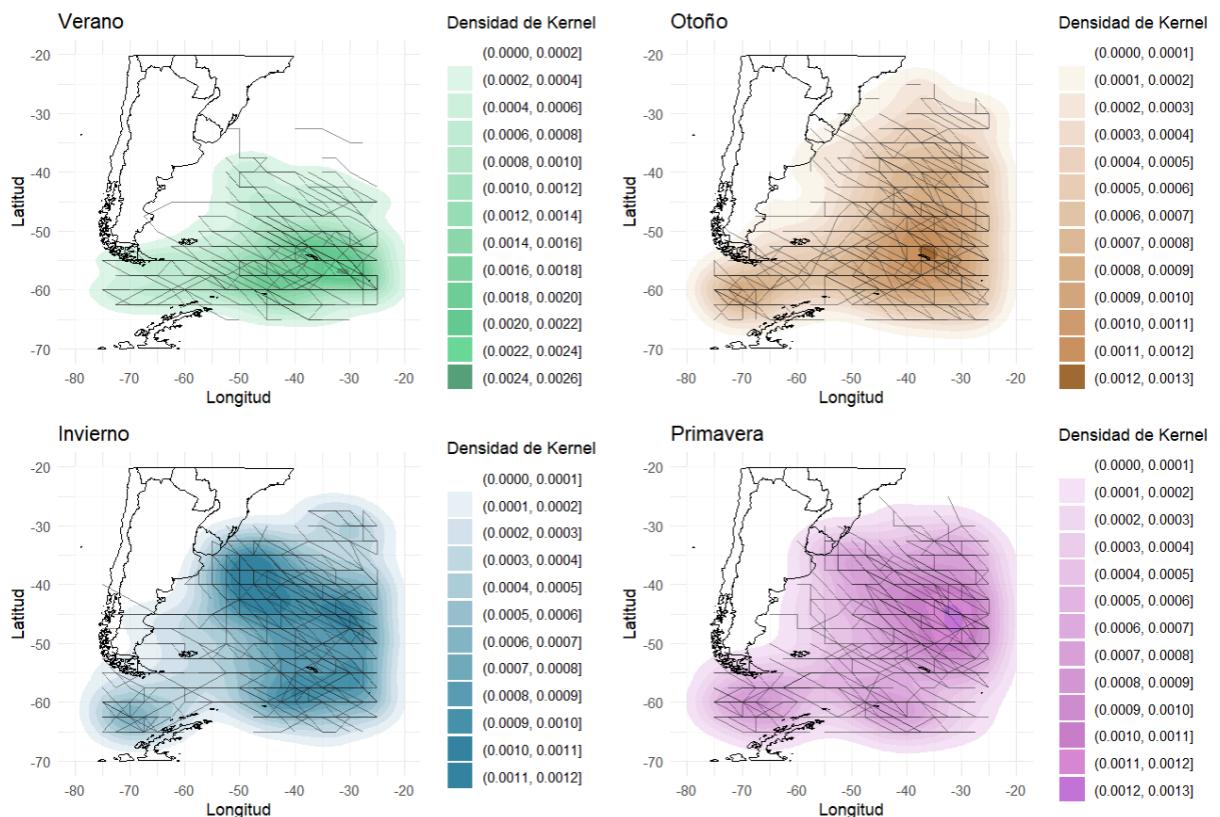


Figura 3.20: Densidad de ciclones con todo su tiempo de vida con V_{max} igual o mayor a 35 nudos, por estación. En negro se grafican las trayectorias de cada uno de ellos.

Durante el verano, las trayectorias más australes alcanzan un máximo de densidad en torno a los 55° S y 30° W. En otoño, aunque el máximo se sitúa en una posición similar, se observa una distribución más amplia que abarca tanto zonas más septentrionales como áreas cercanas a la península Antártica. En primavera, el patrón es similar, con el máximo de ocurrencia más desplazado hacia el norte. Por último, el invierno presenta un patrón distintivo respecto a las otras estaciones, con trayectorias más cercanas al continente y una densidad máxima desplazada hacia la costa, indicando una mayor proximidad de estos eventos severos al continente en esta estación.

3.2.1 Caso de estudio en el Mar Argentino

La misión de la Junta de Seguridad en el Transporte (JST) es contribuir a la seguridad mediante la determinación de las causas de accidentes e incidentes de transporte y la recomendación de acciones eficaces, dirigidas a evitar la ocurrencia en el futuro. Es por eso que se empleó uno de los informes de la JST (Junta de Seguridad en el Transporte ISO B/P Repunte, 2022) para trabajar con un caso donde efectivamente se demostrase la peligrosidad de los ciclones extratropicales para las embarcaciones en el Mar Argentino.

Este informe, presentado al público en mayo del 2022, refleja las conclusiones de la JST, con relación a las circunstancias y condiciones en que se produjo el suceso, y detalla los hechos y circunstancias experimentadas el 17 de junio de 2017 por el buque pesquero Repunte durante su navegación de regreso desde la zona de pesca hacia Puerto Madryn.

3.2.1.1 Buque pesquero Repunte

En el año 1968 fue incorporado a la Marina Mercante Argentina con la Matrícula N° 01120 (N° de Registro OMI: 6603024), bajo el nombre “Repunte”, con la clasificación de buque pesquero y tipo de navegación marítima de altura. En 2006, con el objeto de adaptar el buque para la pesca de langostino, se le realizaron diferentes modificaciones estructurales. En el mes de enero de 2017, la tripulación detectó durante una navegación, una vía de agua de mar en un compartimiento que se usaba como depósito. Como consecuencia de este hecho el Repunte fue reparado a flote en el puerto de Mar del Plata, soldando un parche para recuperar la estanqueidad perdida; y el 7 de enero de 2017 volvió a retomar las actividades de pesca.

Entre los meses de enero y abril de 2017 realizó cinco viajes, y durante este período, se habría detectado una nueva entrada de agua, por la cual se le habrían realizado reparaciones en el casco.

3.2.1.2 Situación sinóptica

El día 16 de junio de 2017 se comenzó a desarrollar un sistema de baja presión (Figura 21, sobre el eje de 1005 hPa sobre el centro de Argentina) que afectaría la costa de la provincia de Río Negro. Este sistema principal fue efectivamente clasificado como ciclón extratropical dentro de los eventos de invierno de la climatología previamente desarrollada, con inicio el 16/06/2017 06 UTC y fin el 17/06/2017 18 UTC. Su centro alcanzó una presión mínima de 996,3 hPa y llegó a estar rodeado de vientos de 37 nudos, ambos valores provistos por las variables del reanálisis.

Este sistema en conjunción con uno de alta presión al sur de la Patagonia favoreció un fuerte gradiente bárico, promoviendo un flujo de aire intensificado en el litoral Atlántico de la provincia de Chubut. Este fenómeno propició que persistieran lluvias y vientos fuertes con ráfagas durante el 17 de junio, día del naufragio. Se han estimado vientos con valores que superaron los 45 nudos y un incremento en la altura significativa de las olas (información suministrada por el Servicio de Hidrografía Naval) pasando de 2,6 m (16/06/2017 00 UTC) a 5,0 m (17/06/2017 15 UTC) con dirección del sector ESE-SE.

El ciclón se desplazó lentamente hacia el este durante el 17 de junio hasta horas de la noche, cuando el fenómeno de vientos más intensos asociadas al ciclón se alejó de la región del suceso.

3.2.1.3 Evolución temporal de los hechos y campos de las variables intervinientes

El 13 de junio de 2017 el buque Repunte zarpó desde Puerto Madryn para realizar un viaje a la pesca de langostino. Estuvo operando en un área aproximadamente a 75 millas náuticas al Este de Bahía Camarones, provincia de Chubut.

El 16 de junio a las 06 UTC (03 HOA) fue detectado por primera vez por el algoritmo el ciclón involucrado en el accidente, como puede apreciarse en la Figura 3.21, aún con vientos débiles y sin un centro bien delimitado. Acorde a la información producida por el Sistema Meteorológico Nacional, ese mismo día a las 10:30 HOA se emitió el primer aviso de alerta meteorológica por vientos intensos para la zona costera de

la provincia de Chubut, y además pronosticaba lluvias abundantes y vientos fuertes para el día siguiente, consecuencia de la futura evolución del ciclón detectado.

Aún durante el 16 de junio, el ciclón tiene su máxima profundización entre las 12 UTC y 18 UTC (09 y 15 HOA, respectivamente), pasando de tener una presión en el centro de 1001,5 a 999,5 hPa. Los campos de este último tiempo se encuentran en la Figura 3.22, donde se observa un centro mucho más definido sobre el continente pero no aún un aumento significativo del viento.

El 16 de junio a las 20:00 UTC (17:00 HOA) la tripulación finalizó el último lance y comenzó su regreso a Puerto Madryn. A las 21:30 UTC (18:30 HOA) la tripulación terminó de estibar la última captura y, en conocimiento de la alerta meteorológica, comenzó a asegurar todos sus elementos a bordo, guardó sus redes de pesca y cerró sus puertas exteriores.

Con un valor máximo de viento alrededor del ciclón de casi 26 nudos (Figura 3.27) y un gradiente isobárico aumentado en la región chubutense (Figura 3.23), el sistema comenzó a impactar en la madrugada del 17 de junio. El primer pescador subió al puente para sugerirle al oficial que redujera la velocidad, porque en su camarote percibía que el agua golpeaba con fuerza; y hacia la hora de la mañana advirtió la presencia de agua de mar en el pasillo de camarotes.

Aproximadamente a las 12:00 UTC (09:00 HOA, correspondiente al horario de las Figuras 3.24), el Repunte comenzó a inclinarse de forma significativa, incrementando el embarque y permanencia de agua de mar. Para ese momento, el viento alrededor del ciclón alcanzaba los 33 nudos y se incrementaba con el tiempo, llegando a 38 nudos unas horas después.

A partir de esta situación, la tripulación no pudo recuperar el control del buque. A las 12:20 UTC (09:20 HOA) el capitán del Repunte emitió una llamada de socorro, recibida por el buque pesquero María Liliana que se hallaba a unas 20 millas náuticas de la posición del buque en emergencia. A las 12:35 UTC (09:35 HOA) el capitán informó que abandonaban el buque. Cuando el María Liliana arribó a la posición del suceso y no divisó al Repunte en la superficie. El análisis de las últimas posiciones emitidas sugiere que el buque en los momentos previos al abandono realizó un amplio cambio de rumbo y disminuyó considerablemente su velocidad, pasando durante ese lapso a aumentar su superficie de exposición al viento.

Campo de Presión a nivel del mar (hPa) y Viento a 10m (kt) - 16 Junio 2017 06UTC

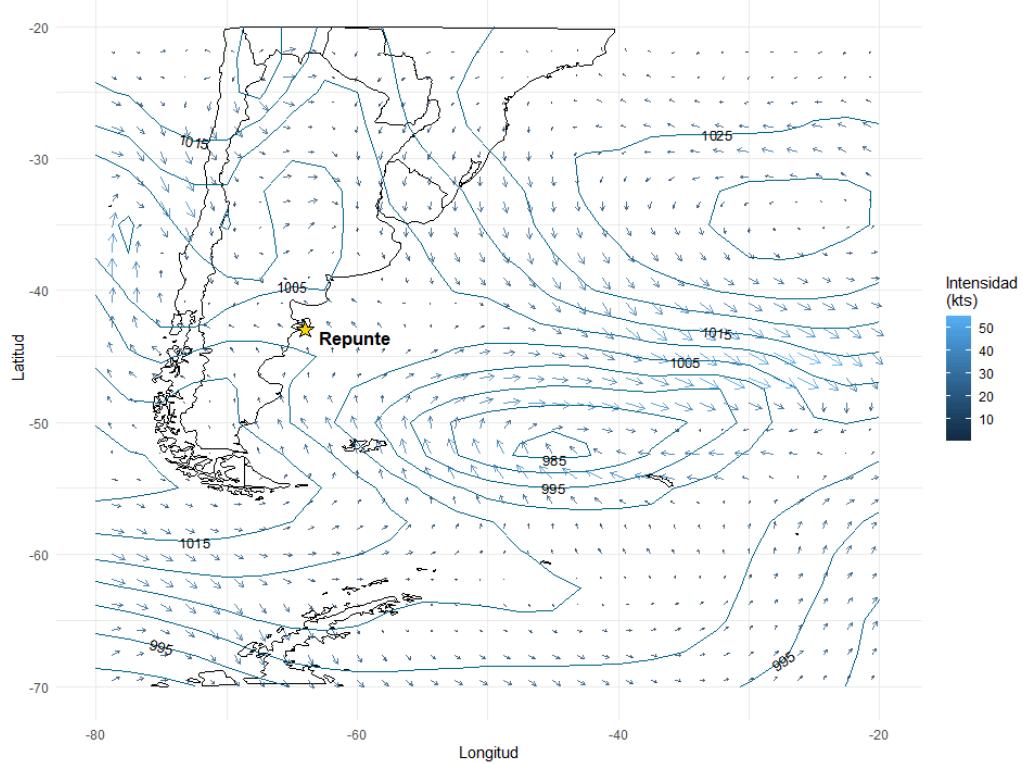


Figura 3.21: Campo de presión a nivel del mar (hPa) para el 16 de junio de 2017 a las 06 UTC (03 HOA). Con la estrella amarilla se indica la posición del hundimiento.

Campo de Presión a nivel del mar (hPa) y Viento a 10m (kt) - 16 Junio 2017 18UTC

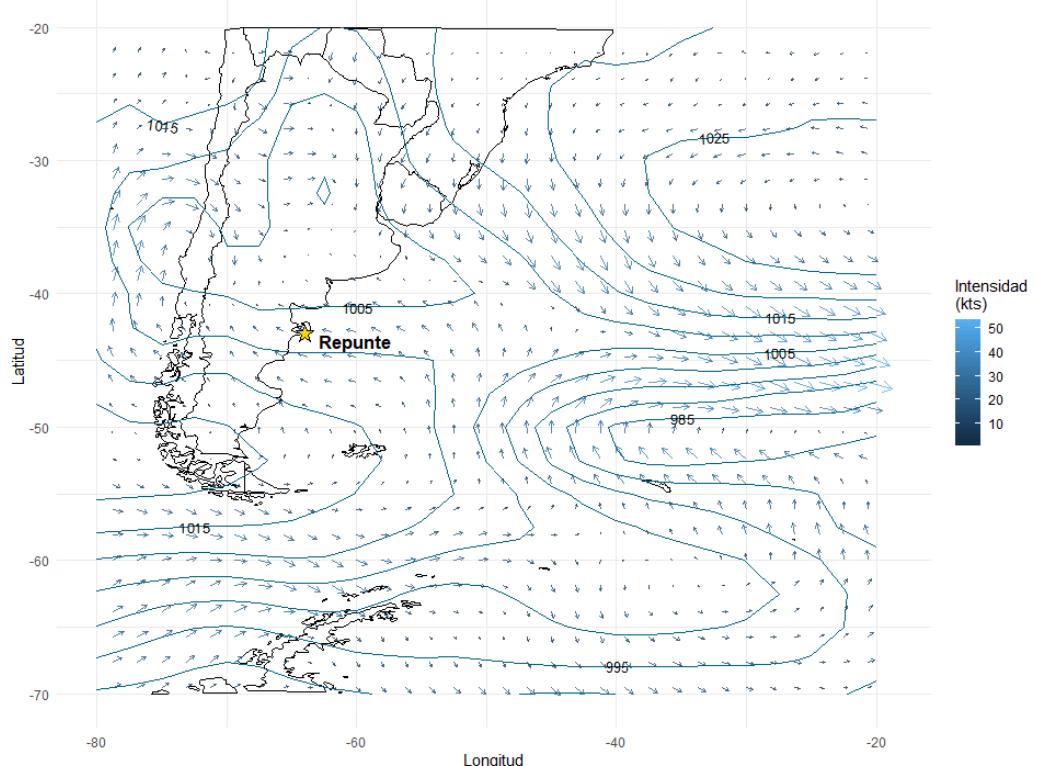


Figura 3.22: Idem Figura 3.21 para el 16 de junio de 2017 a las 18 UTC (15 HOA).

Campo de Presión a nivel del mar (hPa) y Viento a 10m (kt) - 17 Junio 2017 06UTC

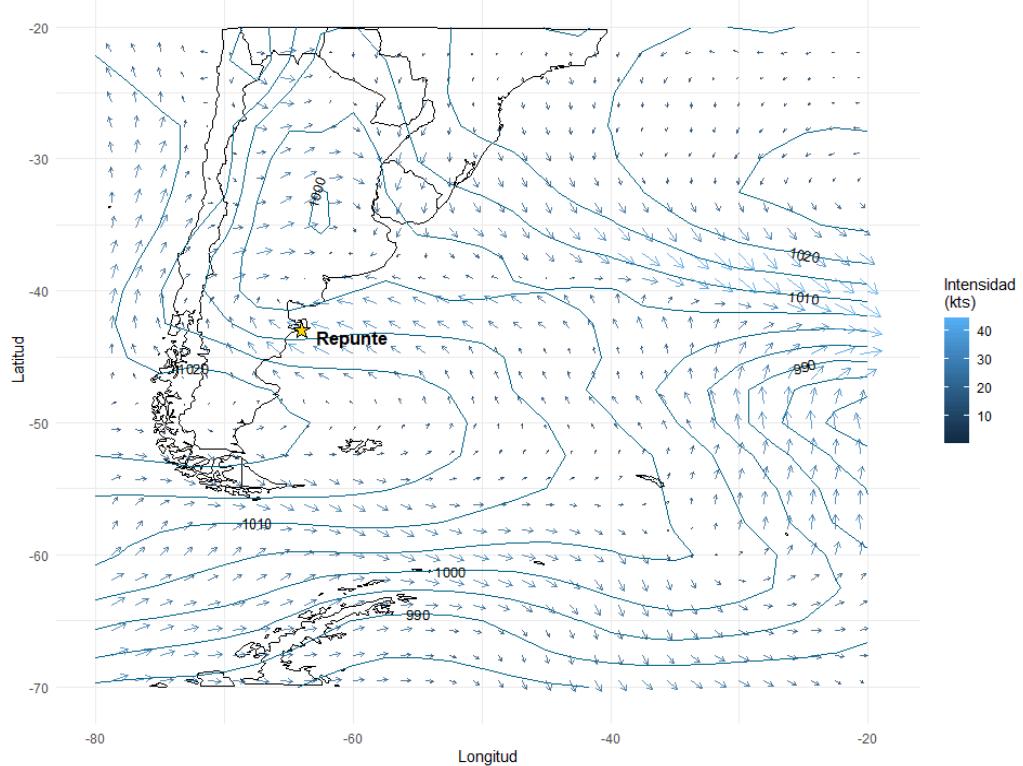


Figura 3.23: Idem Figura 3.21 para el 17 de junio de 2017 a las 06 UTC (03 HOA).

Campo de Presión a nivel del mar (hPa) y Viento a 10m (kt) - 17 Junio 2017 12UTC

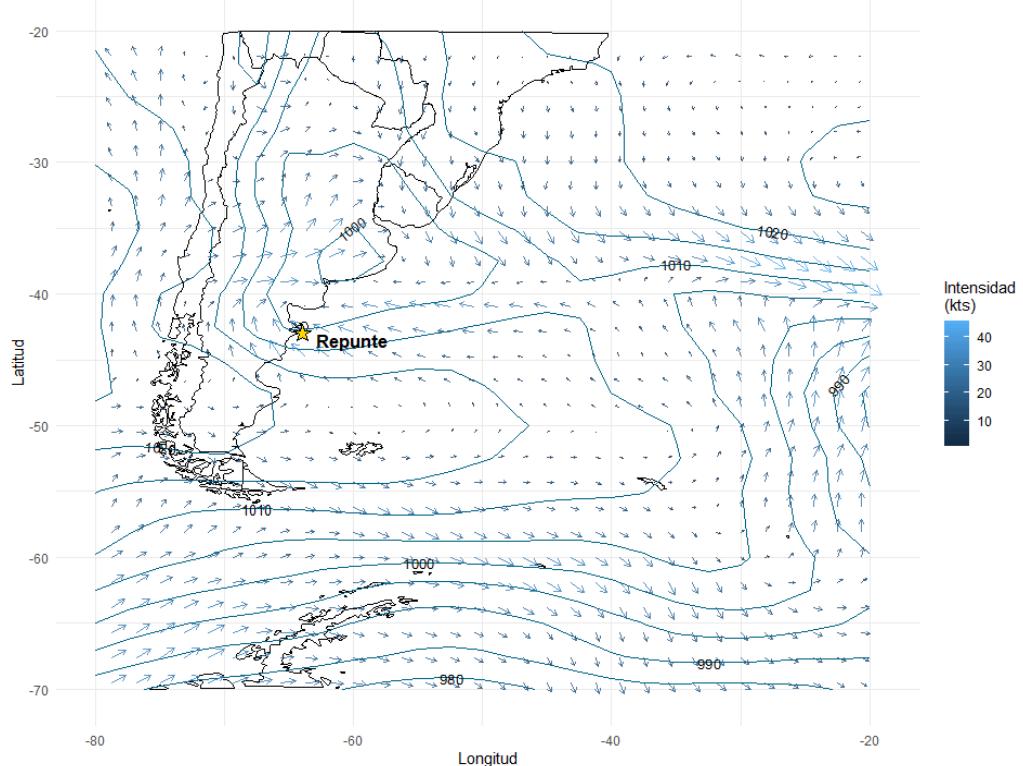


Figura 3.24: Idem Figura 3.21 para el 17 de junio de 2017 a las 12 UTC (09 HOA).

3.2.1.4 Consecuencias del evento

De la tripulación del pesquero solo 2 personas sobrevivieron y 10 perdieron la vida. Si bien a los 30 días del suceso se consideraban 7 personas como desaparecidas, la investigación en función de la información recabada indica que la situación de dichos tripulantes resulta totalmente incompatible con la supervivencia en el mar y por tal motivo, a esos 7 tripulantes se los considera también en el total de víctimas fatales. El hundimiento del pesquero fue considerado como pérdida total, sin daños a terceros.

4. Conclusiones

4.1 Ciclones extratropicales en el Mar Argentino y en el océano Atlántico Sudoccidental

En este estudio, se analizaron diversos aspectos climatológicos de los ciclones extratropicales en la costa y el Mar Argentino, así como en el océano Atlántico Sudoccidental. Este análisis proporcionó información valiosa sobre los tiempos de vida, profundización y trayectorias de estos fenómenos, lo que contribuye al entendimiento de los sistemas que afectan la región marítima del país y a sus usuarios, además de ser útil para futuras investigaciones sobre la región.

Con el objetivo de continuar y completar la climatología realizada en Sudamérica por Mendes et al. (2010), se tomó el periodo comprendido entre 2003 y 2022, utilizando datos de reanálisis del NCEP (National Center for Environmental Prediction) y el DOE (Department of Energy). A partir de este conjunto de datos y las metodologías empleadas, se identificaron un total de 2921 ciclones extratropicales en el dominio de estudio, con una media anual de 146 eventos.

El análisis temporal no reveló un comportamiento determinístico y por lo tanto tampoco una tendencia en la frecuencia anual de ciclones que indique un aumento o disminución en su número a lo largo del período estudiado. Al clasificar los sistemas según la estación del año, se observó que el máximo de ocurrencias se registró en otoño, con 758 casos, mientras que el mínimo se presentó en primavera, con 673 casos. Además, se detectó una notable variabilidad interanual, lo cual podría estar influenciado, según la bibliografía, por teleconexiones como la Oscilación Antártica y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. El invierno de 2011 destacó como el año con mayor cantidad de eventos, con 53 ciclones.

Desde una perspectiva espacial, y en concordancia con estudios previos, se identificaron tres áreas preferenciales de ciclogénesis que se mantienen relativamente constantes a lo largo del año: una en la región costera del norte de Argentina, Uruguay y el sur de Brasil, y las otras dos al sur de Tierra del Fuego y el Pasaje de Drake, cerca de la Península Antártica. Durante el verano, estas áreas parecen desplazarse ligeramente hacia el sur, acercándose al continente, mientras que en primavera la actividad ciclogenética alcanza su mínimo, y en otoño e invierno se registran los valores más altos dentro de estas áreas preferenciales.

En cuanto a los tiempos de vida de los ciclones, se estableció un mínimo de 24 horas, observándose que la primavera es la estación con los ciclones de mayor duración (hasta 8 días), seguida del otoño (hasta 7 días). No obstante, más allá de estos casos extremos, la variación estacional en los tiempos de vida es relativamente baja.

El análisis de las distancias recorridas, calculadas mediante el criterio de Haversine, reveló que en otoño, verano y primavera la mayoría de los ciclones recorren entre 750 y 1000 km, mientras que en invierno este máximo se sitúa entre 1000 y 1250 km. El otoño registró una distancia máxima de 6505 km, mientras que el valor mínimo se observó en verano, con 4530 km. Aproximadamente el 45% de los ciclones en cada estación recorren entre 500 y 1500 km, y entre el 2% y 3% alcanzan distancias cercanas a los 3000 km. Además, en verano y otoño se registró una mayor frecuencia de ciclones con recorridos menores a 500 km, posiblemente relacionados con bajas quasi-estacionarias sobre el continente cálido.

En cuanto a la profundización (definida como la caída de presión a lo largo del tiempo), se determinó que la mayoría de los eventos se encuentran en el primer intervalo de -2 hPa/6h. No obstante, en otoño, verano y especialmente en invierno, se observaron ciclones con profundizaciones más intensas, llegando hasta -10 hPa/6h. El análisis de la profundización máxima, más adecuado para evaluar el grado de intensificación de los ciclones, mostró lógicamente una distribución de cola más larga, con un valor máximo de -17,47 hPa en 6 horas en el otoño. La media de todos los valores de tasa máxima tuvo el mayor valor en invierno, con -4,38 hPa en 6 horas.

Finalmente, el análisis de las trayectorias preferenciales de los ciclones, conocidas como *storm tracks*, permitió concluir que la aplicación del método de K-means con k=3 (determinada a partir del análisis de codo y silueta) es la más adecuada para representar las rutas predominantes. Los *clusters* identificados muestran dos grandes áreas de influencia, que coinciden con las zonas de ciclogénesis previamente descritas: una en la costa norte de Argentina, Uruguay y el sur de Brasil, y otra en la región de la isla Grande de Tierra del Fuego, el pasaje Drake y la península Antártica. Las trayectorias representativas de los centroides de los *clusters* correspondientes a primavera y otoño se caracterizan por ser más oceánicas en comparación con las estaciones de invierno y verano.

4.2 Viento y severidad en los ciclones extratropicales

Finalizado el análisis climatológico estacional de todos los ciclones, se empleó la intensidad del viento a 10 metros como métrica para cuantificar la severidad de estos sistemas en el Mar Argentino y el océano Atlántico Sudoccidental, dado el efecto que esta variable ejerce sobre la altura de las olas. Para ello, se desarrolló un esquema que permitió obtener el valor máximo de viento alrededor del ciclón (V_{\max}) en cada intervalo de tiempo de sus trayectorias.

El análisis estadístico de V_{\max} mostró que el valor absoluto más alto se observa en otoño, mientras que el invierno presenta tanto el valor mínimo como la media más elevada. Al clasificar estos máximos por el cuadrante de ubicación, se encontró que, en todas las estaciones, la mayor ocurrencia de vientos intensos se da en los cuadrantes norte (NE-E, NO-N) y sureste.

De forma similar al estudio del proceso de profundización de presión, se analizó la variación temporal de V_{\max} . Los resultados indican que, en todas las estaciones, el valor máximo de cambio se encuentra entre 4 y 8 kt en 6 horas, alcanzando un máximo de 29 kt/6 h en invierno. Para explorar la relación entre la variación de presión y la variación de viento, se identificó, para cada ciclón, el momento de máxima profundización de la presión y el de máxima aceleración del viento. Se observó que, para todas las estaciones, el mayor cambio en la velocidad del viento ocurre seis horas después del mayor cambio de presión. Este resultado es coherente con la intensificación del gradiente isobárico, que precede a la intensificación del viento.

Se empleó la escala Beaufort para establecer un criterio de severidad en los ciclones extratropicales del área de estudio, considerando que el viento igual o superior a 35 nudos representa un umbral de riesgo para embarcaciones de distinto porte. Este valor se sitúa aproximadamente en la media estadística de todos los valores de V_{\max} observados, lo cual sugiere un impacto relevante de los ciclones en la seguridad náutica.

Para cada ciclón, se calculó el porcentaje de tiempo en el que V_{\max} iguala o supera el umbral de severidad. Los resultados muestran que la frecuencia de ciclones que pasan la totalidad de su vida bajo este criterio es mayor en invierno, estación que se destaca como la de mayor impacto potencial en la seguridad. Estos casos se analizaron también espacialmente mediante la representación gráfica de sus trayectorias. Los resultados muestran que, en general, los ciclones se posicionan predominantemente sobre el océano,

con una mayor dispersión y proximidad al continente en invierno. En contraste, el verano es la estación en la que los ciclones tienden a concentrarse más hacia al sur de la región de estudio.

En el caso estudiado se concluye que el buque pesquero Repunte fue particularmente vulnerable ante el desarrollo de un ciclón extratropical entre el 16 y 17 de junio de 2017, cuando el sistema alcanzó un V_{\max} de 38 nudos al intensificarse junto a un sistema de alta presión. Esta combinación de factores resultó en un accidente trágico que ocasionó la pérdida total del buque y el fallecimiento de diez tripulantes. Este análisis sugiere que es fundamental evitar que embarcaciones como estas se aproximen a las zonas de mayor peligro a medida que evolucionan las condiciones meteorológicas que favorecen el desarrollo de ciclones extratropicales. Adicionalmente, la vulnerabilidad de los buques en estas áreas depende en gran medida del comportamiento de cada embarcación en condiciones de oleaje extremo.

Bibliografía

- Betts A. K., Zhao M., Dirmeyer P. A., & Beljaars, A. C. M., 2006: Comparison of ERA40 and NCEP/DOE near-surface data sets with other ISLSCP-II data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D22). doi:10.1029/2006JD007174
- Blender, R., Fraedrich, K., Lunkeit, F., 1997: Identification of cyclone track regimes in North Atlantic. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 123, no 539, p. 727-741.
- Bonatti, J. P., & Rao, V. B. (1987). Moist baroclinic instability in the development of North Pacific and South American intermediate-scale disturbances. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, vol. 44, no 18, p. 2657-2667.
- Bye, R. y Aalberg, A., 2018: Maritime navigation accidents and risk indicators: An exploratory statistical analysis using AIS data and accident reports. *Reliability Engineering & System Safety*, 176, 174-186. doi:10.1016/j.ress.2018.03.033
- Crespo, N. M. (2019). A potential vorticity perspective on cyclones over South America. Tesis de Doctorado en Meteorología, IAG/USP, DOI:10.11606.
- Corporal-Lodangco, I. L., Richman, M. B., Leslie, L. M., & Lamb, P. J., 2014: Cluster analysis of North Atlantic tropical cyclones. *Procedia Computer Science*, vol. 36, p. 293-300.
- Dal Piva, E., 2001: Estudo de caso sobre o papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície em processos de ciclogênese de costa leste ocorrido na costa da América do Sul. Master Thesis (in Portuguese), INPE-8498-DTI/781, 162pp.
- Di Bernardino, A., Iannarelli, A. M., Casadio, S., Pisacane, G., Mevi, G., & Cacciani, M., 2022: Classification of synoptic and local-scale wind patterns using k-means clustering in a Tyrrhenian coastal area (Italy). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(2), 30.
- Gan, M. A., & Rao, V. B. (1994). The influence of the Andes Cordillera on transient disturbances. *Monthly Weather Review*, 1994, vol. 122, no 6, p. 1141-1157.
- Gan, M.A., y Rao, V.B., 1991: Surface Cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*. 119, 1293–1302.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119%3C1293:SCOSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119%3C1293:SCOSA%3E2.0.CO;2)

Gaultier, G., 2022: Analysing the uncertainties of reanalysis data used for wind resource assessment: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, p. 112741.

Gulev, S. K., Zolina, O., & Grigoriev, S., 2001: Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Climate Dynamics*, vol. 17, p. 795-809.

Gramcianinov, C. B., Hodges, K. I., & Camargo, R. D., 2019: The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones. *Climate Dynamics*, 53, 4115-4140.

Heij, C. y Knapp, S., 2015: Effects of wind strength and wave height on ship incident risk: Regional trends and seasonality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 37, 29-39. doi:10.1016/j.trd.2015.04.016

Hirata, H., 2021: Climatological features of strong winds caused by extratropical cyclones around Japan. *Journal of Climate*, vol. 34, no 11, p. 4481-4494.

Hoskins, B. J. y Hodges, K. I., 2005: A New Perspective on Southern Hemisphere Storm Tracks. *Journal of Climate*. 18(20), 4108–4129. DOI 10.1175/JCLI3570.1
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108524>.

Jing, Q., Sasa, K., Chen, C., Yin, Y., Yasukawa, H. y Terada D., 2021: Analysis of ship maneuvering difficulties under severe weather based on onboard measurements and realistic simulation of ocean environment. *Ocean Engineering*, Volume 221, 108524.

Junta de Seguridad en el Transporte, 2022: Informe final de Seguridad Operacional B/P Repunte. EX-2020-41686037- - APN-JST#MTR, Argentina.

Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K., Hnilo J. J., Fiorino M., y Potter G. L., 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1631-1643.

Kayano, M. T., Rosa, M. B., Rao, V. B., Andreoli, R. V., & de Souza, R. A. F., 2019: Relations of the low-level extratropical cyclones in the southeast Pacific and South Atlantic to the Atlantic multidecadal oscillation. *Journal of Climate*, vol. 32, p. 4167-4178.

Kendall, M. G., 1975: *Rank Correlation Methods*. Oxford University Press, New York.

Kodinariya, T. M., & Makwana, P. R., 2013: Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. *International Journal*, 1(6), 90-95.

Laurila, T. K., Gregow, H., Cornér, J., & Sinclair, V. A., 2021: Characteristics of extratropical cyclones and precursors to windstorms in northern Europe. *Weather and Climate Dynamics*, 2(4), 1111-1130.

Lee, S. W., Sasa, K., Chen, C., Waskito, K. T., y Cho, I. S., (2022): Novel safety evaluation technique for ships in offshore anchorage under rough seas conditions for optimal ship routing. *Ocean Engineering*, 253, 111323. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111323>

Mann, H. B., 1945: Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 1945, p. 245-259.

Maki, A., Maruyama, Y., Dostal, L., Sakai, M., Sawada, R., Sasa, K., y Umeda, N., 2022: Practical method for evaluating wind influence on autonomous ship operations. *Journal of Marine Science and Technology*, 27(4), 1302-1313. <https://doi.org/10.1007/s00773-022-00901-w>

Marrafon, V. H., Reboita, M. S., da Rocha, R. P., & Crespo, N. M., 2021: Extratropical Cyclones in the Southern Hemisphere: comparison among different Reanalyses. *Revista Brasileira de Climatología*, 28(1), 48-73.

Mateichuk, V., Zinchenko, S., & Tovstokoryi, O., 2023: Automatic Control of the vessel in a storm. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*, (26–27), 120-132. <https://doi.org/10.5194/wcd-2-1111-2021>.

Mendes, D., Souza, E. P., Marengo, J. A., & Mendes, M. C., 2010: Climatology of extratropical cyclones over the South American–southern oceans sector. *Theoretical and applied climatology*. 100, 239-250. DOI 10.1007/s00704-009-0161-6

Mendes, D., Souza, E. P., Trigo, I. F., y Miranda, P. M., 2007: On precursors of South American cyclogenesis. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2007, vol. 59, no 1, p. 114-121. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00215.x>

Nissen, K. M., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G., Renggli, D., Ulbrich, S., & Ulbrich, U., 2010: Cyclones causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 10, no 7, p. 1379-1391.

Palastanga, V., Nuré, E., Collini, E. y Penalba, O., 2017: Observaciones meteorológicas superficiales de buques en navegación en el Atlántico Sudoccidental: control de calidad estadístico. *Meteorológica*, 42(2), 3-22.

Pezza, A. B., & Ambrizzi, T., 2003: Variability of Southern Hemisphere cyclone and anticyclone behavior: Further analysis. *Journal of Climate*, vol. 10, no 7, p. 1075-1083.

Possia, N., Vidal, L. y Campetella, C., 2011: Un temporal de viento en el Río de la Plata. *Meteorológica*. 36, 95-110.

Pousa, J., D'Onofrio, E., Fiore, M. y Kruse, E., 2013: Environmental impacts and simultaneity of positive and negative storm surges on the coast of the Province of Buenos Aires, Argentina. *Environmental Earth Science*. 68, 2325–2335. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1911-9>

R Core Team, 2013: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>

Ramon, J., Lledó, L., Torralba, V., Soret, A., & Doblas-Reyes, F. J., 2019: What global reanalysis best represents near-surface winds?. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 145, no 724, p. 3236-3251.

Reboita, M. S., Da Rocha, R. P., Ambrizzi, T., & Gouveia, C. D., 2015: Trend and teleconnection patterns in the climatology of extratropical cyclones over the Southern Hemisphere. *Climate Dynamics*, vol. 45, p. 1929-1944.

Reboita, M., Gan, M., da Rocha R. y Custódio, I., 2017: Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32, 171-186. <https://doi.org/10.1590/0102-77863220010>

Satyamurty, P., Ferreira, C.D.C., y Gan, M.A., 1990: Cyclonic vortices over South America. *Tellus*, 42(1), 194-201. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.1990.00016.x>

Simmonds, I., & Keay, K., 2000b: Variability of Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior, 1958–97. *Journal of Climate*, 13(3), 550-561.

Simmonds, I., & K. Keay, 2000a: Mean southern hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP-NCAR reanalysis. *Journal of Climate*, 13 (5), 873–885. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013%3C0873:MSHECB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013%3C0873:MSHECB%3E2.0.CO;2)

Sinclair, M. R., 1995: A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, 1995, vol. 123, no 6, p. 1601-1619.

SOLAS, I., 2020: Consolidated Text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and Its Protocol of 1988, Articles, Annexes and Certificates, Incorporating All Amendments in Effect from 1 January 2020. International Maritime Organization, London.

Stephenson, D. B., Diaz, H. F., & Murnane, R. J., 2008: Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events. *Climate extremes and society*, 340, 11-23.

Taljaard, J.J., 1967: Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the IGY. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 6, 973–987.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1967\)006%3C0973:DDAMOC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1967)006%3C0973:DDAMOC%3E2.0.CO;2)

Trigo, I. F. 2005: Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Climate Dynamics*, 2006, vol. 26, no 2, p. 127-143.

Trigo, I. F., Davies, T. D., Bigg, G. R., 1999: Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. *Journal of climate*, vol. 12, no 6, p. 1685-1696.

Vessey, A. F., Hodges, K. I., Shaffrey, L. C., & Day, J. J., 2020: An inter-comparison of Arctic synoptic scale storms between four global reanalysis datasets. *Climate Dynamics*, 54, 2777-2795.

Walker, E., Mitchell, D. M., & Seviour, W. J. M., 2020: The numerous approaches to tracking extratropical cyclones and the challenges they present. *Weather*, 75(11), 336-341.
<https://doi.org/10.1002/wea.3861>

Wang, X. L., Swail, V. R., & Zwiers, F. W., 2006: Climatology and changes of extratropical cyclone activity: Comparison of ERA-40 with NCEP–NCAR reanalysis for 1958–2001. *Journal of Climate*, 19(13), 3145-3166.

Waskito, K.T., Sasa, K., Chen C., Kitagawa, Y., y Lee, S.W., 2022: Comparative study of realistic ship motion simulation for optimal ship routing of a bulk carrier in rough seas. *Ocean Engineering*, Volume 260, 111731. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111731>.

Wickham, H, 2016: *ggplot2* Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag, New York

World Meteorological Organization, 2022: Maritime Forecasting, Meteorology and WMO: History and Evolution. MMO Series No. 4, Geneva.