

Caracterización de la precipitación y el viento en la climatología asociada a ciclones

Tu Nombre

9 de febrero de 2026

Índice general

1. Introducción	3
1.1. Objetivos del Proyecto de Investigación	7
1.1.1. Objetivo General	7
1.1.2. Objetivos Específicos	7
2. Marco Teórico	9
2.1. Dinámica de ciclones extratropicales	9
2.1.1. Dinámica en el Atlántico Sur	9
2.1.2. Vorticidad relativa	9
2.2. Evolución estructural y ciclo de vida	10
2.2.1. Asimetría y Fractura Frontal	10
2.2.2. Fases del ciclo de vida	10
2.3. Regiones de ciclogénesis	11
2.3.1. Región Sur-Sudeste de Brasil (SBR)	11
2.3.2. La Plata y Uruguay (LPB)	11
2.3.3. Patagonia y Argentina (ARG)	12
2.4. Estructuras espaciales	12
2.4.1. Eventos compuestos	12
2.4.2. Descomposición modal y acoplamiento (EOF/MEOF)	13
2.4.3. Estimación de Densidad (KDE)	13
3. Metodología	15
3.1. Diseño general	15
3.2. Datos del Reanálisis ERA5	15
3.2.1. Variables meteorológicas	16
3.3. Base de datos de ciclones	16
3.3.1. Trayectorias	16
3.3.2. Fases del ciclo de vida	17
3.4. Estratificación por regiones de ciclogénesis	17
3.5. Definición de las poblaciones de estudio	18
3.5.1. Grupo Control: Climatología de referencia	18
3.5.2. Subconjunto de ciclones intensos	19
3.5.3. Validación de la selección	19

3.5.4. Estrategia de análisis comparativo	20
3.6. Procesamiento	20
3.7. Técnicas estadísticas de caracterización	20
3.7.1. Máximos y análisis de histogramas	20
3.7.2. Estimación de densidad de kernel (KDE)	21
3.7.3. Funciones ortogonales empíricas (EOF) univariado	21
3.7.4. EOF combinado (multivariado) precipitación–viento	22

Capítulo 1

Introducción

Desde una perspectiva dinámica global, autores fundamentales como Hoskins and Hodges (2002) y Sinclair (1994) establecen que los ciclones extratropicales constituyen el mecanismo dominante para el transporte meridional de energía y momento en las latitudes medias, actuando como los “motores” que equilibran el gradiente térmico planetario. En el contexto específico del Atlántico Sur, Reboita et al. (2010b) identifican a esta cuenca como una de las regiones de ciclogénesis más activas y complejas, donde la interacción del flujo del oeste con la orografía de los Andes y la disponibilidad de humedad configuran un escenario único para el desarrollo de sistemas intensos. No obstante, la naturaleza de estas perturbaciones en la región es heterogénea; investigaciones de Evans and Braun (2012) y Gozzo and da Rocha (2013) han demostrado que el Atlántico Sur favorece frecuentemente el desarrollo de ciclones con estructuras híbridas o transiciones de tipo Shapiro-Keyser, desafiando las conceptualizaciones clásicas de la ciclogénesis noruega. Esta diversidad estructural tiene implicancias directas en cómo medimos su severidad: como argumentan recientemente Cornér et al. (2025) para el Atlántico Norte, la intensidad de un ciclón no puede capturarse con una única métrica, ya que la relación entre la profundidad de la presión y los vientos destructivos no es lineal. De hecho, Eisenstein et al. (2023) destacan que los mayores impactos en superficie suelen estar asociados a estructuras de mesoescala específicas —como los *sting jets* o los cinturones de transporte frío— cuya localización espacial varía drásticamente durante el ciclo de vida del sistema. Así, más allá de su rol climático, estos sistemas representan, según Gramscianinov et al. (2022), la mayor amenaza geofísica para la zona costera regional, imponiendo un riesgo que depende críticamente de la coherencia interna entre sus campos de viento y precipitación.

A pesar de la relevancia crítica de estos fenómenos, la literatura sobre el Atlántico Sur ha priorizado históricamente el análisis de la climatología de trayectorias y la frecuencia de ciclogénesis. Si bien referentes consolidados como Gramscianinov et al. (2020) e investigaciones recientes de Padilha Reinke et al. (2026) han caracterizado con robustez la distribución espacio-temporal de estos sistemas, persiste un vacío en la comprensión de su estructura interna. Esta perspectiva estructural se vuelve imperativa, dado que estudios de Gozzo and da Rocha (2013) y Reboita et al. (2022) han revelado

que los ciclones en la región frecuentemente exhiben evoluciones atípicas que no pueden ser capturadas por métricas simples de intensidad central. Esta heterogeneidad dinámica se traduce en una distribución de impactos altamente asimétrica; investigaciones de Bitencourt et al. (2010) y Cardoso et al. (2022) evidencian que los máximos de viento en superficie no se distribuyen uniformemente alrededor del vórtice, sino que dependen críticamente de la latitud de génesis y la madurez del sistema. Más aún, Eisenstein et al. (2023) advierten que los vientos más destructivos suelen estar asociados a estructuras de mesoescala muy localizadas (como *jets* frontales), cuya posición varía durante el ciclo de vida. Esta complejidad exacerba la no-linealidad identificada por Sinclair and Catto (2023), quienes demuestran que un ciclón profundo (alta vorticidad) no garantiza necesariamente precipitaciones extremas. Así, el interés principal radica en la co-ocurrencia temporal y local de extremos dinámicos e hidrológicos —los *eventos compuestos* de viento y precipitación—, los cuales muestran una fuerte asociación con ciclones extratropicales (Chen and Di Luca, 2025).

Sin embargo, la evolución conjunta de estas variables a través de las fases de vida del ciclón permanece escasamente documentada. Esta carencia es crítica, ya que como enfatizan recientemente Han and Ullrich (2025), se requieren marcos de clasificación que vinculen explícitamente la evolución física del sistema con sus “contribuciones de impacto en viento y precipitación”, un desafío que metodologías objetivas como la de Souza et al. (2024) permiten ahora abordar sistemáticamente en Sudamérica.

Dentro de este dominio, el continente sudamericano introduce una perturbación orográfica fundamental. La Cordillera de los Andes interactúa mecánicamente con el flujo incidente de los oestes, forzando la compresión de la columna de vorticidad a barlovento y su estiramiento vertical a sotavento, un mecanismo físico descrito por Gan and Rao (1994) que favorece la formación sistemática de centros de baja presión al este de la cordillera, proceso conocido como ciclogénesis de sotavento. Este forzante topográfico, modulado por la fuerte baroclinicidad costera y los marcados gradientes de temperatura superficial del mar, consolida tres focos principales de actividad ciclogénica (RG1,2,3) en la costa este de Sudamérica (Reboita et al., 2026). Adoptando la regionalización propuesta por Gramscianinov et al. (2019), este estudio se centra en tres regiones clave: la región Sur-Sudeste de Brasil (*South Brazil*, SBR), la cuenca de descarga del Río de la Plata (*La Plata Basin*, LPB, por sus siglas en inglés), y la costa sureste de Argentina (*Argentina*, ARG). Estas regiones poseen una correspondencia espacial directa con los sectores de ciclogénesis clásicamente definidos por Reboita et al. (2010a) y revisados por Reboita et al. (2026): (1) la región SBR (análoga a RG1), favorecida por el efecto de sotavento de los Andes y el chorro de bajos niveles (SALLJ), donde Reboita et al. (2022) documentan frecuentes sistemas híbridos y transiciones tropicales; (2) la región LPB (correspondiente a RG2), caracterizada por ciclogénesis explosivas e influenciada por el

transporte de humedad del SALLJ; y (3) la región ARG (equivalente a RG3), dominada por la baroclinia del frente polar. Esta estratificación geográfica es crítica para el diseño experimental, ya que estos focos responden a regímenes dinámicos distintos. Evidencia de ello son las proyecciones de de Jesus et al. (2021), quienes demuestran que estas regiones presentan sensibilidades opuestas ante el forzamiento climático: mientras que la región austral (ARG) experimentará un aumento en la frecuencia de ciclones debido al desplazamiento de los oestes hacia el polo, se proyecta una disminución en los focos subtropicales (SBR y LPB), confirmando que son sistemas gobernados por mecanismos independientes.

La variabilidad de la actividad ciclónica en estos focos está modulada por la estructura de la corriente en chorro y su acoplamiento con las capas bajas. Vera et al. (2002) demostraron que las perturbaciones de escala sinóptica se propagan a lo largo de guías de onda asociadas al jet polar y subtropical; sin embargo, al atravesar los Andes, estas perturbaciones experimentan cambios significativos en su estructura vertical. Dicho desacople y posterior realineamiento entre niveles altos y bajos favorece configuraciones con divergencia en niveles superiores, condición clave para la intensificación ciclónica y el desarrollo de precipitación intensa en la costa este de Sudamérica. Simultáneamente, el transporte meridional de humedad desde los trópicos, mediado por el Chorro de Bajos Niveles de Sudamérica (SALLJ), juega un rol determinante en la alimentación de la precipitación extrema. Como señalan Reboita et al. (2022), la advección de aire cálido y húmedo en el flanco oriental del ciclón no solo inestabiliza la atmósfera, sino que actúa como una fuente diabática que, al liberar calor latente, refuerza la intensidad del sistema. Sin embargo, este acoplamiento termodinámico introduce una complejidad crítica: Sinclair and Catto (2023) advierten que la relación entre la profundidad dinámica del sistema (vorticidad) y su respuesta hidrológica (precipitación) no es lineal, ya que un ciclón puede ser dinámicamente intenso pero generar poca lluvia si carece de este suministro de humedad. Este hecho físico subraya que los máximos de impacto no necesariamente coinciden con el mínimo de presión, reforzando la necesidad de caracterizar la huella espacial de viento y precipitación.

Un desafío central en la caracterización dinámica de estos sistemas es la asimetría espacial de su intensidad en superficie. La literatura tradicional ha tendido a utilizar la presión mínima central como el principal *proxy* para clasificar la fuerza de los ciclones; sin embargo, investigaciones recientes demuestran un desacoplamiento sistemático entre la profundidad del vórtice y la magnitud de sus extremos asociados. Estudios de Bitencourt et al. (2010) y Cardoso et al. (2022) evidencian que los máximos de viento no se distribuyen uniformemente alrededor del centro, sino que se concentran en sectores específicos (como el cuadrante noreste en la región subtropical) dependiendo de la latitud y la madurez del sistema. Esta desconexión sugiere que la métrica de

presión es insuficiente para capturar la severidad dinámica del evento, especialmente cuando se consideran los *eventos compuestos*. Como muestran Chen and Di Luca (2025), la caracterización física de estos eventos emerge de la co-ocurrencia temporal y local de extremos de viento y precipitación, una superposición que no es capturada al analizar cada variable de forma individual. Adicionalmente, factores cinemáticos como la velocidad de propagación modulan la duración y acumulación de estos extremos, tal como discuten Gramscianinov et al. (2022) al analizar la interacción del viento con la superficie oceánica. En consecuencia, basar la evaluación únicamente en la trayectoria del centro geométrico limita la comprensión de la estructura del fenómeno. Se hace imperativo transitar hacia una caracterización de la huella espacial completa, permitiendo así cuantificar con precisión la distribución de los máximos tanto en el régimen climatológico medio como en el 10 % de los sistemas más extremos.

Esta complejidad estructural no es estática; evoluciona drásticamente a lo largo del ciclo de vida del sistema. Históricamente, la clasificación de estos eventos se basó en el diagrama de espacio de fase de Hart (2003), el cual discrimina sistemas según su asimetría térmica y su núcleo (frío/caliente). Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones operativas en el Atlántico Sur, donde Reboita et al. (2022) han documentado frecuentes transiciones rápidas y sistemas híbridos que desafían las categorías binarias clásicas. Para superar estas barreras, esta investigación integra la reciente climatología evolutiva desarrollada por de Souza et al. (2024), quienes mediante el algoritmo *CycloPhaser* han logrado segmentar objetivamente la historia de los ciclones regionales en cuatro fases dinámicas discretas: incipiente, intensificación, madurez y decaimiento. El uso de esta base de datos clasificada permite, por primera vez, investigar cómo se transforma la distribución espacial de las variables durante su ciclo de vida del sistema, una estrategia alineada con otras nuevas propuestas globales como *SyCLOPS* de Han and Ullrich (2025) en el Atlántico Norte, que enfatizan la urgencia de vincular la evolución física del sistema con sus contribuciones específicas de impacto.

Para caracterizar esta complejidad multidimensional, se requieren técnicas estadísticas que trasciendan el análisis univariado clásico. En este sentido, Eisenstein et al. (2023) han demostrado que la variabilidad de los impactos extremos en ciclones puede reducirse a un número limitado de modos recurrentes utilizando técnicas de descomposición ortogonal. Siguiendo este principio, esta tesis implementa la metodología de Funciones Ortogonales Empíricas Multivariadas (MEOF), fundamentada matemáticamente por Liang et al. (2018). A diferencia de los EOF tradicionales, esta técnica permite extraer modos de variabilidad acoplados entre campos físicamente distintos, revelando la coherencia espacial oculta donde la circulación del viento y los núcleos de precipitación covarían sistemáticamente. La aplicación de este marco estadístico sobre las fases dinámicas previamente clasificadas permitirá construir "prototipos de

impacto", sintetizando la estructura típica del ciclón para cada región de génesis y estadio evolutivo, superando así la visión estática de los promedios climatológicos.

La viabilidad de esta caracterización estructural reside en la reciente disponibilidad del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020), cuya alta resolución espacial (~ 31 km) y temporal (horaria) permite resolver los gradientes de presión y los flujos de humedad que generaciones anteriores de datos suavizaban. Validaciones específicas para el Atlántico Sur realizadas por Gramscianinov et al. (2020) confirman que ERA5 ofrece una representación superior de la intensidad de los vientos superficiales y la estructura de los ciclones en comparación con productos previos como CFSR.

Para capitalizar esta precisión, este estudio utiliza la base de datos de trayectorias de de Souza et al. (2024), la cual se fundamenta en el criterio de la vorticidad relativa en 850 hPa. Esta elección metodológica posee un consenso transversal en la literatura: establecida clásicamente por Sinclair (1994) y consolidada por Padilha Reinke et al. (2024) como el estándar más robusto para el Hemisferio Sur, este criterio es incluso utilizado en estudios recientes del Hemisferio Norte (Chen and Di Luca, 2025). A diferencia de los algoritmos basados exclusivamente en la presión mínima, el tracking por vorticidad permite el análisis del ciclo de vida de los eventos, capturando incluso aquellos sistemas rápidos que los algoritmos isobáricos tienden a omitir. Esta combinación de datos de alta fidelidad con una detección dinámica sensible constituye la base técnica necesaria para alimentar el análisis multivariado (MEOF) propuesto, permitiendo cuantificar finalmente la evolución de la huella espacial de los eventos compuestos en la región.

1.1. Objetivos del Proyecto de Investigación

1.1.1. Objetivo General

Caracterizar la estructura interna y la covariabilidad espacial de los campos de viento y precipitación en los ciclones extratropicales del Atlántico Sur a lo largo de su ciclo de vida, integrando la clasificación por fases evolutivas con análisis multivariado para establecer prototipos climáticos de impacto diferenciados por región de génesis.

1.1.2. Objetivos Específicos

1. **Consolidar una base de datos lagrangiana** que asocie los campos de superficie de alta resolución (ERA5) con las trayectorias y fases dinámicas (incipiente, intensificación, madurez, decaimiento) identificadas para las tres regiones de ciclogénesis (SBR, LPB, ARG).

2. **Determinar la asimetría espacial de los extremos** mediante la estimación de densidad por núcleos (KDE), cuantificando la probabilidad de ocurrencia de máximos de viento y precipitación respecto al centro del ciclón para identificar el desacoplamiento físico entre la presión mínima y la severidad en superficie.
3. **Identificar los modos de variabilidad acoplada** aplicando Funciones Ortogonales Empíricas Multivariadas (MEOF) a los campos conjuntos de viento y precipitación, para revelar las estructuras coherentes de mesoescala que gobiernan los eventos compuestos en cada fase evolutiva.
4. **Construir modelos conceptuales (prototipos)** para cada región de génesis, sintetizando los patrones dominantes obtenidos (MEOF) y las distribuciones de probabilidad de extremos (KDE) en una representación compuesta que describa la evolución típica del impacto desde la génesis hasta la lisis.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Dinámica de ciclones extratropicales

2.1.1. Dinámica en el Atlántico Sur

Si bien la teoría clásica define a los ciclones extratropicales como vórtices de núcleo frío impulsados por inestabilidad baroclínica (Hoskins and Hodges, 2002), la caracterización de los sistemas en el Atlántico Sur requiere matices adicionales. En su tesis doctoral, Couto de Souza (2024) realiza una revisión exhaustiva de la física de estos sistemas, concluyendo que la definición adiabática estándar es insuficiente para la región. Si bien la inestabilidad baroclínica proporciona el entorno favorable para la génesis, la evolución y la intensidad del sistema pueden ser fuertemente moduladas por procesos diabáticos asociados a la liberación de calor latente, especialmente en eventos de transición o con características híbridas. Este comportamiento es ilustrado por los experimentos de sensibilidad numérica presentados por Reboita et al. (2022), donde la supresión de los flujos de calor latente altera de manera sustancial la estructura térmica y la intensidad del vórtice.

2.1.2. Vorticidad relativa

Dada esta complejidad térmica y la rapidez de los sistemas en el Hemisferio Sur, la presión al nivel del mar (MSLP) resulta a menudo una métrica inadecuada para la detección temprana. Siguiendo la recomendación metodológica de Sinclair (1997), este estudio utiliza la vorticidad relativa en 850 hPa (ζ_{850}) como variable de seguimiento.

Físicamente, la componente vertical de la vorticidad relativa se define como:

$$\zeta = \mathbf{k} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.1)$$

Donde u y v son las componentes zonal y meridional del viento, respectivamente. Según Hoskins and Hodges (2005), el uso de ζ permite filtrar el flujo de gran escala y capturar la rotación inducida por estos forzantes de mesoescala antes de que se manifiesten en el campo de presión, permitiendo una identificación más precisa de las fases incipientes,

ademas la literatura reciente, como en Gramscianinov et al. (2019) utiliza ζ_{850} para identificar con precisión las regiones de ciclogénesis. Asimismo, Padilha Reinke et al. (2024) validan que los algoritmos basados en este nivel isobárico son más eficientes para capturar la posición del ciclón durante su etapa de mayor intensidad. Recientemente, el uso de ζ_{850} se ha extendido más allá del simple seguimiento (tracking) hacia la caracterización estructural. de Souza et al. (2024) demuestran que la evolución temporal de esta variable es el predictor más confiable para segmentar objetivamente el ciclo de vida en fases dinámicas (incipiente, intensificación, madurez y decaimiento). En un contexto global el análisis de clústeres de Cornér et al. (2025) ratifican a la vorticidad relativa en 850 hPa como una de las métricas irreductibles necesarias para describir la intensidad y la estructura de los ciclones extratropicales en el hemisferio norte.

2.2. Evolución estructural y ciclo de vida

2.2.1. Asimetría y Fractura Frontal

La distribución espacial de los impactos en superficie (viento y precipitación) está condicionada por el modelo conceptual que describe la evolución del ciclón. Frente al modelo Noruego clásico, que presenta una oclusión simétrica, los ciclones oceánicos intensos del Atlántico Sur suelen seguir el modelo de Fractura Frontal propuesto por Shapiro and Keyser (1990). En este paradigma, el frente frío se fractura y se separa del centro, permitiendo el aislamiento de una masa de aire cálido en el núcleo (*warm seclusion*). Esta configuración favorece asimetrías intensas en las variables de superficie, donde los máximos de viento y precipitación se desacoplan del centro de la baja presión, un rasgo recurrente documentado en la climatología regional por Reboita et al. (2010b).

2.2.2. Fases del ciclo de vida

Para caracterizar la evolución temporal de estos impactos, este estudio adopta la segmentación del ciclo de vida en cuatro etapas dinámicas discretas. Esta clasificación sigue la metodología objetiva del paquete computacional *CycloPhaser* (de Souza et al., 2025), aplicado por de Souza et al. (2024), el cual utiliza la tasa de cambio de la vorticidad relativa para definir los siguientes regímenes estructurales:

1. **Incipiente:** Corresponde a la aparición inicial del núcleo de vorticidad organizada. En el contexto regional, esta fase está frecuentemente asociada a la interacción entre una vaguada en altura y forzantes de superficie, como la orografía de los Andes o gradientes térmicos costeros.

2. **Intensificación:** Período caracterizado por el rápido crecimiento de la vorticidad ciclónica (y consecuente caída de presión central). Según el análisis energético de Couto de Souza (2024), esta etapa es impulsada por una fuerte retroalimentación entre la inestabilidad dinámica y los flujos de calor latente y sensible desde el océano.
3. **Madurez:** Etapa donde el sistema alcanza su intensidad máxima (pico de vorticidad) y su mayor extensión horizontal. Es en esta fase donde los ciclones intensos del Atlántico Sur manifiestan típicamente la estructura de *warm seclusion* o seclusión cálida, aislando el núcleo térmico del flujo ambiental.
4. **Decaimiento:** Fase final marcada por el debilitamiento progresivo del vórtice. Este proceso ocurre debido a la fricción superficial y al cese de la conversión de energía baroclínica una vez que el sistema se ha ocluido completamente o ha entrado en una zona barotrópica.

2.3. Regiones de ciclogénesis

La interacción entre el flujo de los oestes, la topografía de los Andes y la Temperatura Superficial del Mar (TSM) define tres regiones de génesis con características físicas diferenciadas (Gramscianinov et al., 2019):

2.3.1. Región Sur-Sudeste de Brasil (SBR)

Ubicada entre las latitudes 20°S y 30°S (RG1), esta región se encuentra bajo la influencia directa de la Corriente del Brasil y los flujos de humedad tropical. Según Reboita et al. (2022), los ciclones aquí presentan frecuentemente una señal energética "híbrida": aunque se inician por inestabilidad baroclínica, su intensificación está fuertemente modulada por procesos diabáticos y la inestabilidad de la capa límite marina, lo que favorece el desarrollo de convección en el sector cálido (Marrafon et al., 2022). El análisis energético de Couto de Souza (2024) revela que, a diferencia de las regiones australes, los ciclones en SBR presentan una conversión de energía "mixta", donde los procesos diabáticos (liberación de calor latente) juegan un rol tan importante como la baroclinicidad.

2.3.2. La Plata y Uruguay (LPB)

La región comprendida entre 30°S y 40°S constituye uno de los principales *hotspots* de ciclogénesis en el Atlántico Sudoccidental. Su mecanismo dominante es la ciclogénesis de sotavento: como establecen Gan and Rao (1994), el flujo de los

oestes experimenta una compresión y posterior estiramiento vertical de la columna de vorticidad al atravesar los Andes. Por conservación de la vorticidad potencial, este estiramiento en el flanco oriental induce una caída de presión en superficie que favorece la iniciación de la rotación ciclónica. En este contexto, Reboita et al. (2010b) muestran que esta región se caracteriza por una alta frecuencia de sistemas ciclónicos y una fuerte interacción con el transporte de humedad desde latitudes tropicales, mientras que el aporte de aire cálido y húmedo asociado al Chorro de Capas Bajas (SALLJ) resulta determinante para la intensidad de la precipitación (Crespo et al., 2021).

2.3.3. Patagonia y Argentina (ARG)

El sector austral ($> 40^\circ\text{S}$, o su similar RG3) responde a un régimen dinámico clásico dominado por la baroclinicidad de gran escala. A diferencia de los focos subtropicales, Hoskins and Hodges (2005) describen esta zona como gobernada por la inestabilidad baroclínica, donde la génesis depende del chorro polar y del paso de ondas de Rossby. Aquí, Simmonds and Keay (2000) indican que los sistemas ciclónicos dependen menos de forzantes locales de superficie y más de la dinámica de la alta troposfera. Como resultado, estos sistemas tienden a presentar una evolución más rápida y directamente acoplada al flujo de niveles altos, en contraste con las regiones subtropicales del sudeste de Brasil (Vera et al., 2002).

2.4. Estructuras espaciales

La complejidad inherente a los ciclones extratropicales del Atlántico Sur requiere superar el análisis univariado tradicional. En esta sección se fundamenta la adopción del paradigma de *evento compuesto* se describen las herramientas estadísticas avanzadas (MEOF y KDE) necesarias para capturar su estructura asimétrica y la distribución de sus máximos.

2.4.1. Eventos compuestos

Históricamente, la intensidad de los ciclones se ha caracterizado mediante métricas puntuales, como la presión mínima central o la vorticidad máxima. Sin embargo, la literatura reciente ha adoptado el enfoque de *compound events* (eventos compuestos), definidos formalmente por Zscheischler et al. (2018) como situaciones donde la combinación de múltiples forzantes climáticos (p. ej., viento y precipitación extremos) genera magnitudes conjuntas mayores que la suma de sus componentes individuales.

En el contexto de la dinámica extratropical, Chen and Di Luca (2025) establecen que la interacción entre el campo de viento y la precipitación no es lineal ni espacialmen-

te homogénea. La ocurrencia conjunta de estos extremos responde a mecanismos físicos acoplados: la intensificación dinámica suele estar modulada por procesos diabáticos (liberación de calor latente), lo que sugiere una dependencia estadística entre ambas variables que varía según la fase de vida del sistema. Por tanto, para caracterizar integralmente la dinámica del sistema, se requiere un enfoque multivariado que cuantifique esta covariabilidad física.

2.4.2. Descomposición modal y acoplamiento (EOF/MEOF)

Para aislar patrones coherentes dentro de este acoplamiento físico, el análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) y su extensión multivariada (MEOF) se han establecido como el estándar metodológico. Según Hannachi et al. (2007), esta técnica permite descomponer la variabilidad de un campo turbulento en modos ortogonales de varianza máxima, separando la señal física robusta del ruido de mesoescala.

Específicamente para eventos compuestos, Liang et al. (2018) demostraron la eficacia del MEOF al aplicarlo sobre un vector de estado normalizado \mathbf{Z} , que combina variables con unidades dispares:

$$\mathbf{Z}(t) = \left[\frac{X'_{prep}(t)}{\sigma_{prep}}, \frac{X'_{viento}(t)}{\sigma_{viento}} \right] \quad (2.2)$$

Esta normalización permite identificar si los máximos de precipitación y viento covarían espacialmente o si presentan desfases estructurales sistemáticos. Asimismo, enfoques recientes de clasificación objetiva, como el PCA disperso utilizado por Cornér et al. (2025), validan el uso de espacios de fase reducidos para distinguir entre regímenes dinámicos sin depender exclusivamente de umbrales arbitrarios de presión.

2.4.3. Estimación de Densidad (KDE)

Una vez establecido el acoplamiento entre variables, es crítico resolver su distribución espacial. Los ciclones extratropicales son sistemas altamente asimétricos, donde los máximos raramente coinciden con el centro geométrico de la baja presión:

- **Precipitación:** Controlada por el *Warm Conveyor Belt* (WCB), tiende a concentrarse en el sector sureste (en el Hemisferio Sur) durante la etapa de desarrollo (Blanchard et al., 2021).
- **Viento:** Los máximos suelen asociarse al chorro en el sector cálido o al flujo post-frontal, expandiéndose radialmente a medida que el sistema madura.

Debido a este desacoplamiento, el uso de promedios simples o grillas fijas tiende a suavizar excesivamente las estructuras de mesoescala. Para resolver esto, Priestley and

Catto (2022) y Han and Ullrich (2025) proponen el uso de la Estimación de Densidad de Kernel (KDE). Matemáticamente, para una muestra de n localizaciones de máximos en coordenadas relativas (X_i), la densidad estimada $\hat{f}(x)$ se define como:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (2.3)$$

Esta técnica transforma nubes de puntos discretos en una superficie de probabilidad continua, permitiendo visualizar la "huella" física del ciclón. Su aplicación es especialmente relevante cuando se segmenta el análisis por etapas evolutivas (incipiente, intensificación, madurez, decaimiento), tal como sugieren de Souza et al. (2024) con su algoritmo *CycloPhaser*, ya que revela cómo la distribución espacial de los campos extremos se expande y contrae a lo largo del ciclo de vida del sistema.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Diseño general

El objetivo metodológico central de esta tesis consiste en caracterizar la distribución espacial y la magnitud de los máximos de precipitación y viento asociados a los ciclones extratropicales del Atlántico Sur, adoptando un marco de referencia lagrangiano centrado en el sistema. El análisis se condiciona sistemáticamente por dos factores determinantes: la fase del ciclo de vida del ciclón y su región de ciclogénesis en Sudamérica. La estrategia experimental se estructura en una secuencia lógica: se parte de una base de datos preexistente de trayectorias y una clasificación objetiva de fases evolutivas; sobre esta base, se extraen campos horarios del reanálisis alrededor del centro de cada sistema para construir composites representativos y, finalmente, se aplican técnicas estadísticas para cuantificar los extremos de las variables de impacto.

3.2. Datos del Reanálisis ERA5

Para la caracterización de los campos atmosféricos se utilizó el reanálisis de quinta generación del ECMWF, ERA5, descrito por Hersbach et al. (2020). Se analizó el período comprendido entre 1979 y 2020, accediendo específicamente a las variables de precipitación y viento a través del conjunto de datos “*ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*” (Hersbach et al., 2023). La elección de ERA5 responde a su alta resolución espacial (~ 31 km) y temporal (horaria). Esta capacidad para resolver escalas finas es crítica en este estudio, ya que, tal como han demostrado Priestley and Catto (2022) y Dalanhese et al. (2023), la mayor resolución reduce la subestimación de la intensidad de los sistemas observada en generaciones previas de reanálisis, permitiendo una representación más realista de los gradientes de viento y los núcleos de precipitación asociados a los ciclones.

3.2.1. Variables meteorológicas

La caracterización de los patrones espaciales se realizó a partir de campos horarios extraídos de ERA5, seleccionando las variables que describen la intensidad hidrometeorológica y dinámica del sistema:

- Precipitación total acumulada.
- Magnitud del viento en superficie (10 y 100 m).

La decisión de analizar conjuntamente los campos de viento y precipitación responde a la necesidad de capturar la estructura de los eventos compuestos (*compound events*). Investigaciones recientes en latitudes medias, como la de Chen and Di Luca (2025), muestran que la co-ocurrencia temporal y local de máximos de viento y precipitación, cuya organización espacial resulta del forzante sinóptico asociado a los ciclones extratropicales. Esta interacción define el evento más allá de sus componentes individuales y motiva la aplicación de técnicas multivariadas para desacoplar sus modos de variabilidad y analizar la coherencia espacial emergente.

3.3. Base de datos de ciclones

El insumo principal de esta investigación es una base de datos climatológica integrada que combina la detección lagrangiana de los sistemas con una caracterización objetiva de su evolución dinámica. Específicamente, se utilizó la base de datos de ciclones del Atlántico Sur generada y procesada por de Souza et al. (2024), la cual se construye sobre el catálogo de trayectorias originalmente desarrollado por Gramcianinov et al. (2019).

3.3.1. Trayectorias

El componente de seguimiento (*tracking*) se basa en la climatología de Gramcianinov et al. (2019), desarrollada a partir del reanálisis ERA5 utilizando el algoritmo TRACK para la identificación de los sistemas usando el campo de vorticidad relativa en 850 hPa (ζ_{850}); los detalles técnicos sobre la configuración específica del algoritmo y el filtrado espectral utilizado para aislar la escala sinóptica se encuentran descritos en profundidad en Gramcianinov et al. (2019) y Hoskins and Hodges (2005).

La elección de trabajar con trayectorias derivadas de la vorticidad, en lugar de la presión al nivel del mar (MSLP), se fundamenta en la recomendación metodológica de Sinclair (1994). Este autor estableció que la vorticidad evita el sesgo sistemático hacia ciclones lentos y profundos, permitiendo capturar adecuadamente los sistemas móviles

típicos de las latitudes medias. Además, la base de datos utilizada incorpora las ventajas del reanálisis ERA5 en regiones de orografía compleja: según Gramscianinov et al. (2020), su alta resolución permite una detección más temprana y precisa de centros ciclónicos al sotavento de los Andes. Cabe destacar que el catálogo original de Gramscianinov et al. (2019) ya incluye filtros de relevancia sinóptica, conservando únicamente aquellos sistemas con una duración mínima de 24 horas y un desplazamiento superior a los 1000 km.

3.3.2. Fases del ciclo de vida

Para los fines de esta tesis, no se utilizaron las trayectorias crudas, sino la versión enriquecida por de Souza et al. (2024). Estos autores procesaron el catálogo original aplicando el algoritmo *CycloPhaser* (de Souza et al., 2025) para segmentar objetivamente la historia de cada ciclón. Como resultado, la base de datos final utilizada en este estudio proporciona, para cada paso de tiempo, la posición del sistema y su fase evolutiva correspondiente, definida según la tasa de cambio de la vorticidad central:

1. **Incipiente (Ic):** Etapa inicial de organización del vórtice.
2. **Intensificación (It):** Período de rápido aumento (negativo) de la vorticidad ciclónica.
3. **Madurez (M):** Etapa de máxima intensidad y estabilización relativa.
4. **Decaimiento (D):** Fase de debilitamiento progresivo (ciclólisis).

3.4. Estratificación por regiones de ciclogénesis

La base de datos incluye la localización de la génesis de cada sistema, permitiendo estratificar el análisis geográficamente. Para la definición de los dominios, este estudio adopta estrictamente la taxonomía espacial propuesta por Gramscianinov et al. (2019), la cual identifica tres regiones en Sudamérica basadas en la densidad de ciclogénesis:

- SBR (Sur-Sudeste de Brasil): $52^{\circ} - 38^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ} - 20^{\circ}\text{S}$
- LPB (La Plata/Uruguay): $69^{\circ} - 52^{\circ}\text{W}$, $38^{\circ} - 23^{\circ}\text{S}$
- ARG (Patagonia/Argentina): $70^{\circ} - 50^{\circ}\text{W}$, $55^{\circ} - 39^{\circ}\text{S}$

Esta segmentación de áreas es consistente (aunque no exactamente los mismos límites) con los regímenes dinámicos descritos (RG1,2,3 detallados en la introducción) en la síntesis climática reciente de Reboita et al. (2026). Según esta revisión, cada sector

presenta mecanismos de forzamiento únicos. La región SBR se distingue por un régimen frecuentemente influenciado por procesos diabáticos y transiciones híbridas. Como detallan Marrafon et al. (2022) y Reboita et al. (2022), es aquí donde la interacción con los gradientes de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y el transporte de humedad favorece el desarrollo de sistemas con núcleos cálidos. Por su parte, la región LPB actúa como una zona de transición crítica. Estudios de Crespo et al. (2021) demuestran que la ciclogénesis en este sector está fuertemente forzada por anomalías de vorticidad potencial en niveles altos, lo que, sumado a la baroclinicidad costera, favorece una alta densidad de eventos explosivos (Andrade et al., 2024). Finalmente, ARG representa un entorno dominado por la dinámica baroclínica asociada al frente polar y al forzante orográfico de los Andes, donde la evolución de los sistemas está fuertemente controlada por la circulación de niveles altos (Vera et al., 2002; Inatsu and Hoskins, 2004).

3.5. Definición de las poblaciones de estudio

Para caracterizar los ciclones extratropicales y evaluar el efecto de su intensidad en los impactos asociados, se definieron dos poblaciones de estudio a partir de la base de datos de trayectorias: una climatología de referencia (Grupo Control) y un subconjunto de eventos extremos (Subconjunto Intenso). La identificación de ambas poblaciones se realizó aplicando filtros secuenciales de calidad estructural e intensidad dinámica sobre las tres regiones de ciclogénesis de interés (ARG, SBR y BLP).

3.5.1. Grupo Control: Climatología de referencia

El objetivo de este grupo es establecer el comportamiento medio de los ciclones que presentan un desarrollo típico en la región. Para conformarlo, se aplicó un filtro de coherencia evolutiva a la totalidad de ciclones detectados. Se seleccionaron únicamente aquellos sistemas que cumplen con los siguientes criterios estrictos:

1. **Ciclo de vida completo:** Presencia secuencial de las cuatro fases fundamentales definidas por el algoritmo de seguimiento: I_c , I_t , M y D .
2. **Ausencia de fases complejas:** Se excluyeron sistemas que presenten fases secundarias o de re-intensificación (e.g., *intensification 2*, *mature 2*) o fases residuales (*residual*), garantizando una muestra homogénea de sistemas de desarrollo baroclínico.

Para cada ciclón de este grupo, se identificó el momento de su máxima intensidad (mínimo de vorticidad, ζ_{850}^{min}) con el fin de alinear temporalmente los análisis posteriores.

Este conjunto filtrado reduce significativamente el ruido introducido por sistemas efímeros o de evolución errática (ver Tabla 3.1).

3.5.2. Subconjunto de ciclones intensos

A partir del Grupo Control (sistemas con estructura completa), se extrajo un subconjunto para aislar los eventos de mayor severidad dinámica. Dado que en el Hemisferio Sur la circulación ciclónica se asocia a valores negativos de vorticidad, se utilizó el mínimo de vorticidad a 850 hPa (ζ_{850}^{min}) como métrica de intensidad. El criterio de selección fue estadístico: se retuvieron aquellos ciclones cuyo ζ_{850}^{min} se ubicó en el primer decil (10 % inferior) de la distribución de vorticidades del Grupo Control. De esta forma, se aíslan los vórtices más profundos de la climatología. La Tabla 3.1 detalla el tamaño muestral final para ambas poblaciones en cada región.

Tabla 3.1: Número de ciclones seleccionados por región. La columna “Detectados” refiere a la base cruda; “Grupo Control” aplica el filtro de 4 fases; “Intensos” corresponde al percentil 10 de vorticidad del Grupo Control.

Región	Total	Grupo Control	Subconjunto Intenso
ARG	4015	1980	198
SBR	1486	641	64
BLP	1288	669	67

3.5.3. Validación de la selección

Un aspecto crítico de esta estratificación es verificar que los ciclones intensos seleccionados mantienen una evolución física coherente. El análisis de la fase en la que ocurre el mínimo de vorticidad (Tabla 3.2) confirma que el subconjunto intenso presenta una dinámica similar al Grupo Control, donde el pico de intensidad ocurre en la fase de madurez en un $\sim 72\%$ de los casos, mientras que, en los ciclones intensos esta proporción aumenta al $\sim 83\%$. Asimismo, se observa una reducción drástica de casos que alcanzan su máximo durante la fase de decaimiento en el grupo intenso ($\sim 5\%$ frente a $\sim 15\%$), lo que indica que estos sistemas extremos alcanzan su plenitud estructural antes de comenzar su disipación.

3.5.4. Estrategia de análisis comparativo

Sobre este subconjunto de ciclones intensos se aplicará íntegramente el flujo metodológico que se detalla en las secciones subsiguientes: construcción de campos promedio por fase, extracción de máximos, análisis de histogramas, KDE de localización y análisis EOF. La comparación sistemática entre los resultados del conjunto total y los

Tabla 3.2: Distribución porcentual de la fase en la que se registra la máxima intensidad (ζ_{850}^{min}), promediada entre las tres regiones.

Fase del ciclo de vida	Grupo Control (%)	Subconjunto Intenso (%)
Incipiente	~ 0.1	0.0
Intensificación	13.2	11.7
Madurez	71.8	83.4
Decaimiento	14.9	4.9

del subconjunto intenso permitirá evaluar si una mayor intensidad dinámica del vórtice se asocia con cambios significativos en: (i) la magnitud de los máximos de viento y precipitación, (ii) la distribución espacial relativa de estos máximos, y (iii) los patrones estructurales dominantes. Estudios compositivos recientes como Andrade et al. (2024) sugieren que los ciclones más intensos pueden presentar estructuras frontales y patrones de impacto distintivos.

3.6. Procesamiento

Para analizar la estructura de los ciclones independientemente de su ubicación geográfica absoluta, se adopta un marco de referencia relativo o lagrangiano. Para cada instante t de la vida de un ciclón, se define un dominio móvil de $20^\circ \times 20^\circ$ centrado en las coordenadas de su núcleo, proporcionadas por la base de datos de trayectorias. Dentro de este dominio, se extraen los campos de las variables de impacto. Este enfoque de composición centrada en el ciclón es fundamental para aislar la señal de mesoescala de los sistemas extratropicales y ha sido ampliamente utilizado para caracterizar sus entornos en el Atlántico Sur (Crespo et al., 2021; Priestley and Catto, 2022). El análisis se realiza de forma separada para cada combinación de región de ciclogénesis y fase del ciclo de vida, permitiendo estratificar los resultados de manera simultánea por estos dos factores. Para evitar la variabilidad de alta frecuencia inherente a los datos horarios y obtener un campo representativo de la estructura media del ciclón en cada fase, se aplica un promediado temporal. Específicamente, para cada ciclón y para cada fase por la que atraviesa, se seleccionan los dos o tres tiempos centrales de dicha fase (dependiendo de si su duración en horas es par o impar) y se promedian sus campos espaciales. Este procedimiento genera un campo promedio por ciclón–fase, sobre el cual se realizarán los análisis subsiguientes.

3.7. Técnicas estadísticas de caracterización

3.7.1. Máximos y análisis de histogramas

A partir del campo promedio por ciclón–fase, se identifica la magnitud y la ubicación (en coordenadas relativas al centro) del valor máximo de la variable dentro del dominio de $20^\circ \times 20^\circ$. Este procedimiento genera, para cada combinación región–fase–variable, un conjunto de m valores máximos (uno por ciclón). Con estos valores se construyen histogramas de frecuencias para describir la distribución de las magnitudes máximas. Este análisis permite comparar cuantitativamente cómo cambian los rangos de valores más probables o extremos entre las diferentes fases del ciclo de vida y entre las distintas regiones de ciclogénesis.

3.7.2. Estimación de densidad de kernel (KDE)

Para caracterizar la distribución espacial preferencial de la ocurrencia de máximos, se transforma cada campo promedio por ciclón–fase en un mapa binario. En este mapa, todos los píxeles tienen valor 0, excepto el píxel correspondiente a la ubicación del máximo, que tiene valor 1. A partir del conjunto de m mapas binarios para una combinación región–fase–variable dada, se aplica una estimación de densidad de kernel (KDE). El resultado es un campo continuo de densidad de probabilidad relativa que indica, para cada posición dentro del dominio centrado, la probabilidad de encontrar el máximo de la variable. Esta técnica es particularmente útil para visualizar asimetrías sistemáticas en la distribución espacial de los impactos, permitiendo evaluar, por ejemplo, si los vientos máximos tienden a ubicarse en un cuadrante específico respecto al centro, y cómo esto varía con la fase del ciclo de vida (Gramscianinov et al., 2022).

3.7.3. Funciones ortogonales empíricas (EOF) univariado

Para identificar los patrones espaciales dominantes de variabilidad en la estructura de los ciclones dentro del marco centrado, se aplica un análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF). Este análisis se realiza de manera separada para cada variable (V10, V100, precipitación), región de ciclogénesis y fase del ciclo de vida, utilizando el conjunto de m campos promedio (compositos) por ciclón–fase. Previo al análisis, a cada campo composito se le resta la media espacial del conjunto y se aplica una ponderación por la raíz cuadrada del coseno de la latitud para tener en cuenta la convergencia de los meridianos. La EOF descompone la varianza total del conjunto en modos espaciales ortogonales (las EOFs) y sus correspondientes series temporales (componentes principales). Este método, adaptado al dominio lagrangiano, permite

aislar y comparar las estructuras espaciales más recurrentes o típicas asociadas a los ciclones en cada contexto (región/fase), siguiendo la lógica de análisis de patrones aplicada en estudios sinópticos (Vera et al., 2002).

3.7.4. EOF combinado (multivariado) precipitación–viento

Para evaluar la covariabilidad espacial entre los campos de precipitación y viento, se realiza un análisis EOF combinado (MEOF). Dado que estas variables poseen unidades físicas y rangos de varianza dispares (mm/h vs. m/s), es un requisito metodológico fundamental estandarizar las series antes de su integración para evitar que la variable con mayor magnitud numérica domine los modos resultantes (Wilks, 2019). El procedimiento consiste en: (i) calcular las anomalías de cada campo respecto a su media; (ii) normalizar dichas anomalías dividiéndolas por la desviación estándar espacialmente promediada de cada variable, asegurando un peso equiparable en la matriz de covarianza combinada; y (iii) concatenar espacialmente los campos normalizados para formar un vector de estado ampliado, siguiendo el esquema de análisis de patrones acoplados descrito por Bretherton et al. (1992). El análisis EOF aplicado a esta matriz combinada permite obtener modos acoplados que expliquen la varianza conjunta, siguiendo la base matemática de descomposición multivariada validada por Liang et al. (2018). La aplicación de esta técnica es instrumental para responder a interrogantes físicas recientes planteadas por Sinclair and Catto (2023), permitiendo revelar si los núcleos de precipitación intensa se co-ubican sistemáticamente con los gradientes de viento más fuertes y cómo esta coherencia estructural evoluciona a lo largo del ciclo de vida.

Bibliografía

- Andrade, H. N., Nunes, A. B., Teixeira, M. S., de Quadro, M. F. L., de Avila, V. D., de Oliveira, F. S. C., and Alves, R. d. C. M. (2024). Composite analysis of explosive cyclones in the southern atlantic ocean. *International Journal of Climatology*, pages 1–17.
- Bitencourt, D. P., Manoel, G., Acevedo, O. C., Fuentes, M. V., Muza, M. N., Rodrigues, M. L., and Quadro, M. F. L. (2010). Relating winds along the Southern Brazilian coast to extratropical cyclones. *Meteorological Applications*, 18(2):223–229.
- Blanchard, N., Pantillon, F., Chaboureaud, J.-P., and Delanoë, J. (2021). Observations and simulation of intense convection embedded in a warm conveyor belt—how ambient vertical wind shear determines the dominant heating profile. *Weather and Climate Dynamics*, 2(1):89–110.
- Bretherton, C. S., Smith, C., and Wallace, J. M. (1992). An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *Journal of Climate*, 5(6):541–560.
- Cardoso, A. A., da Rocha, R. P., and Crespo, N. M. (2022). Synoptic climatology of subtropical cyclone impacts on near-surface winds over the south atlantic basin. *Earth and Space Science*, 9(12):e2022EA002482.
- Chen, T.-C. and Di Luca, A. (2025). Characteristics of precipitation and wind extremes induced by extratropical cyclones in northeastern North America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130:e2024JD042079.
- Cornér, J., Bouvier, C., Doiteau, B., Pantillon, F., and Sinclair, V. A. (2025). Classification of north atlantic and european extratropical cyclones using multiple measures of intensity. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25:207–229.
- Couto de Souza, D. (2024). *Cyclones in the Southwestern Atlantic: Life Cycle and Energetics*. Tesis doctoral, Universidade de São Paulo.
- Crespo, N. M., da Rocha, R. P., Sprenger, M., and Wernli, H. (2021). A potential vorticity perspective on cyclogenesis over centre-eastern south america. *International Journal of Climatology*, 41(1):663–678.
- Dalanhese, L., Stuivenolt-Allen, J., LaPlante, M., Wang, S.-Y., Costa, T. L., da Silva, H. D. F., and Belem, A. L. (2023). A new climatology of south american extratropical

- cyclogenesis with an intercomparison among era5, jra55 and the brazilian navy. *International Journal of Climatology*, 43(15):7050–7066.
- de Jesus, E. M., da Rocha, R. P., Crespo, N. M., Reboita, M. S., and Gozzo, L. F. (2021). Multi-model climate projections of the main cyclogenesis hot-spots and associated winds over the eastern coast of south america. *Climate Dynamics*, 56:537–557.
- de Souza, D., Silva Dias, P., Gramscianinov, C., Laviola da Silva, M., and De Camargo, R. (2024). New perspectives on south atlantic storm track through an automatic method for detecting extratropical cyclones’ lifecycle. *International Journal of Climatology*, 44:n/a–n/a.
- de Souza, D. C., da Silva Dias, P. L., Gramscianinov, C. B., and de Camargo, R. (2025). Cyclophaser: A python package for detecting extratropical cyclone life cycles. *Journal of Open Source Software*, 10(108):7363.
- Eisenstein, L., Sinclair, V. A., and Gregow, H. (2023). Objective identification of sting jets in era5 and their climatology in the north atlantic. *Weather and Climate Dynamics*, 4(4):1011–1032.
- Evans, J. L. and Braun, A. (2012). A climatology of subtropical cyclones in the south atlantic. *Journal of Climate*, 25(20):7328–7340.
- Gan, M. A. and Rao, V. B. (1994). The influence of the andes cordillera on transient disturbances. *Monthly Weather Review*, 122(6):1141–1157.
- Gozzo, L. F. and da Rocha, R. P. (2013). Air-sea interaction processes influencing the development of a shapiro-keyser type cyclone over the subtropical south atlantic ocean. *Pure and Applied Geophysics*, 170:917–934.
- Gramscianinov, C., De Camargo, R., Campos, R., Guedes Soares, C., and Silva Dias, P. (2022). Impact of extratropical cyclone intensity and speed on the extreme wave trends in the atlantic ocean. *Climate Dynamics*, 60.
- Gramscianinov, C. B., Campos, R., de Camargo, R., and da Rocha, R. (2019). The properties and genesis environments of south atlantic cyclones. *Climate Dynamics*, 53:4115–4136.
- Gramscianinov, C. B., Campos, R., de Camargo, R., Hodges, K., Guedes Soares, C., and da Silva Dias, P. (2020). Analysis of atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of era5 and cfsr/cfsv2 databases. *Ocean Engineering*, 216:108111.

- Han, Y. and Ullrich, P. A. (2025). The system for classification of low-pressure systems (syclops): An all-in-one objective framework for large-scale data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130:e2024JD041287.
- Hannachi, A., Jolliffe, I. T., and Stephenson, D. B. (2007). Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International Journal of Climatology*, 27(9):1119–1152.
- Hart, R. E. (2003). A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly Weather Review*, 131(4):585–616.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., and Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Consultado de la Climate Data Store (CDS) de Copernicus.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., and et al. (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049.
- Hoskins, B. and Hodges, K. (2002). New perspectives on the northern hemisphere winter storm tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(6):1041–1061.
- Hoskins, B. J. and Hodges, K. I. (2005). A new perspective on southern hemisphere storm tracks. *Journal of Climate*, 18(20):4108–4129.
- Inatsu, M. and Hoskins, B. J. (2004). The zonal asymmetry of the southern hemisphere winter storm track. *Journal of Climate*, 17(24):4882–4892.
- Liang, Y.-C., Mazloff, M. R., Rosso, I., Fang, S.-W., and Yu, J.-Y. (2018). A multivariate empirical orthogonal function method to construct nitrate maps in the southern ocean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35(7):1505–1519.
- Marrafon, V. H., Reboita, M. S., da Rocha, R. P., and de Jesus, E. M. (2022). Classificação dos tipos de ciclones sobre o oceano atlântico sul em projeções com o regcm4 e mcgs. *Revista Brasileira de Climatologia*, 30.
- Padilha Reinke, C. K., Machado, J. P., Brum, A. L., de Azevedo, J. L. L., Mata, M. M., and Saraiva, J. M. B. (2026). Characterization and variability of extratropical cyclones in the southwest atlantic ocean. *Advances in Meteorology*, 2026:9965323.
- Padilha Reinke, C. K., Machado, J. P., Mata, M. M., de Azevedo, J. L. L., Saraiva, J. M. B., and Rodrigues, R. (2024). Objective algorithm for detection and tracking of extratropical cyclones in the southern hemisphere. *Atmosphere*, 15(2):230.

- Priestley, M. D. and Catto, J. L. (2022). Improved representation of extratropical cyclone structure in highresmip models. *Geophysical Research Letters*, 49(5):e2021GL096708.
- Reboita, M. S., Da Rocha, R. P., and Ambrizzi, T. (2010a). Cyclones and frontolysis over south america... *Climate Dynamics*, 35:33–47.
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., Ambrizzi, T., and Sugahara, S. (2010b). South atlantic ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (regcm3). *Climate Dynamics*, 35(7-8):1331–1347.
- Reboita, M. S., Drumond, A., Ferreira, G., Zilli, M. T., Crespo, N. M., Rodrigues, R. R., da Rocha, R. P., and Ambrizzi, T. (2026). Meteorology and climate of South America and Surrounding Oceans. In *Meteorology and Climate of South America and Surrounding Oceans*, pages 284–340. Cambridge University Press.
- Reboita, M. S., Gozzo, L. F., Crespo, N. M., Custodio, M. d. S., Lucyrio, V., de Jesus, E. M., and da Rocha, R. P. (2022). From a shapiro-keyser extratropical cyclone to the subtropical cyclone raoni: An unusual winter synoptic situation over the south atlantic ocean. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(748):3170–3193.
- Shapiro, M. A. and Keyser, D. (1990). Fronts, jet streams and the tropopause. In Newton, C. and Holopainen, E., editors, *Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume*, pages 167–191. American Meteorological Society.
- Simmonds, I. and Keay, K. (2000). Variability of southern hemisphere extratropical cyclone behavior, 1958–97. *Journal of Climate*, 13(3):550–561.
- Sinclair, M. R. (1994). An objective cyclone climatology for the southern hemisphere. *Monthly Weather Review*, 122(10):2239–2256.
- Sinclair, M. R. (1997). Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. *Weather and Forecasting*, 12(3):595–612.
- Sinclair, V. A. and Catto, J. L. (2023). The relationship between extra-tropical cyclone intensity and precipitation in idealised current and future climates. *Weather and Climate Dynamics*, 4(3):567–589.
- Vera, C. S., Vigliarolo, P. K., and Berbery, E. H. (2002). Cold season synoptic-scale waves over subtropical south america. *Monthly Weather Review*, 130(3):684–699.
- Wilks, D. S. (2019). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Elsevier, Amsterdam, 4 edition.
- Zscheischler, J., Westra, S., van den Hurk, B. J. J. M., et al. (2018). Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 8(6):469–477.