

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

Tu Nombre

29 de enero 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. Ciclones extratropicales en el Hemisferio Sur	9
2.1.1. Definición, estructura y terminología básica	9
2.1.2. Storm tracks del Hemisferio Sur y su variabilidad	9
2.2. Ciclogénesis en Sudamérica y Atlántico Sur	9
2.2.1. Rol de los Andes y la ciclogénesis a sotavento	9
2.2.2. Hotspots y regionalización (RG1–RG3)	10
2.2.3. Ambientes de génesis y trayectorias típicas	10
2.3. Identificación y tracking objetivo de ciclones	10
2.3.1. Criterios de detección: presión vs vorticidad (850 hPa)	10
2.3.2. Métricas del ciclón: intensidad, tamaño, velocidad y duración . .	11
2.3.3. Sensibilidad a reanálisis y consistencia entre bases	11
2.4. Ciclo de vida y fases del ciclón	11
2.4.1. Ciclo de vida y evolución temporal de propiedades	11
2.4.2. Definición operativa de fases: incipiente, intensificación, madurez y decaimiento	11
2.4.3. No linealidad y transiciones de fase	12
2.5. Viento y precipitación asociados a ciclones y sus extremos	12
2.5.1. Organización espacial de viento y precipitación en ciclones . . .	12
2.5.2. Extremos en superficie y desplazamiento respecto al centro . . .	12
2.5.3. Justificación del análisis por región y fase	13
2.6. Enfoques multivariados para patrones espacio-temporales	13
2.6.1. EOF/PCA: concepto y utilidad en meteorología	13
2.6.2. EOF por fase y por región: interpretación física	13
2.6.3. Distribuciones de extremos (KDE/histogramas) como complemento	13
3. Metodología	15
3.1. Diseño general del estudio	15

3.2.	Datos	15
3.2.1.	Base de datos de ciclones y fases del ciclo de vida	15
3.2.2.	Reanálisis ERA5 y variables meteorológicas	16
3.3.	Extracción de campos centrados en el ciclón	16
3.3.1.	Selección del subconjunto con evolución estrictamente lineal	16
3.4.	Construcción de campos representativos por fase y extracción de máximos	16
3.5.	Técnicas estadísticas aplicadas	17
3.5.1.	Histogramas de máximos	17
3.5.2.	Estimación de densidad de kernel (KDE) para la localización de máximos	17
3.5.3.	EOF univariado	17
3.5.4.	EOF combinado (multivariado) precipitación–viento	18
3.6.	Análisis complementario: subconjunto de ciclones intensos	18

Capítulo 1

Introducción

En el contexto del cambio climático antropogénico, la comunidad científica internacional ha puesto un énfasis renovado en comprender la dinámica de los eventos meteorológicos extremos. Según el Sexto Informe de Evaluación del IPCC presentado por Masson-Delmotte and Zhai (2022), existe evidencia inequívoca de que la frecuencia e intensidad de las precipitaciones extremas están aumentando en regiones específicas del globo, destacándose el Sudeste de América del Sur (SES) como una de las zonas más vulnerables. Esta tendencia cualitativa ha sido recientemente cuantificada para el dominio oceánico: estudios climatológicos actualizados indican un incremento positivo en la frecuencia de ciclogénesis durante el verano austral, con una tasa de aumento de aproximadamente 1.7 eventos por década en el sector sur del Atlántico (Padilha Reinke et al., 2026). Estos sistemas de baja presión no solo actúan como el principal mecanismo de variabilidad atmosférica en latitudes medias, sino que están dinámicamente acoplados a desastres hidrometeorológicos, siendo responsables directos de vientos destructivos, marejadas y tormentas intensas que afectan severamente la infraestructura costera de Argentina, Uruguay y el sur de Brasil (Reboita et al., 2018; Sinclair and Catto, 2023). Impactos asociados, como las marejadas ciclónicas y las olas extremas, son también una consecuencia directa de la intensidad y trayectoria de estos sistemas, habiéndose documentado tendencias recientes vinculadas a cambios en la intensidad y velocidad de los ciclones (Gramscianinov et al., 2023).

Para comprender la génesis de estos eventos, es imperativo situarlos en el contexto de la circulación general del Hemisferio Sur. A diferencia de su contraparte boreal, este hemisferio presenta una configuración dominada por la “oceanidad”. La existencia de un cinturón oceánico casi continuo alrededor de la Antártida permite que los vientos del oeste (*westerlies*) fluyan con una persistencia e intensidad notables a lo largo de todo el ciclo anual (Simmonds and Keay, 2000a). Dentro de este flujo zonal, los ciclones se organizan en un corredor de tormentas o *storm track* bien definido, caracterizado como una estructura en espiral asimétrica que nace en las latitudes medias y se curva progresivamente hacia el sureste (Hoskins and Hodges, 2005). Esta trayectoria transporta los sistemas hacia las altas latitudes, convergiendo finalmente en la costa de la Antártida,

una región de alta disipación y decaimiento descrita frecuentemente en la literatura como el “cementerio de ciclones” (Simmonds and Murray, 1999).

Dentro de este dominio circumpolar, 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. Por conservación de la vorticidad potencial, este proceso favorece la formación de centros de baja presión al este de la cordillera, fenómeno conocido como *lee cyclogenesis* (Gan and Rao, 1991; Inatsu and Hoskins, 2004).

Este forzante topográfico, sumado a la fuerte baroclinicidad costera, consolida tres focos principales de acción o “hotspots” que presentan características dinámicas heterogéneas: la región subtropical frente al sureste de Brasil (RG1), la zona de transición sobre el Río de la Plata y Uruguay (RG2), y la región patagónica en el sur de Argentina (RG3) (Reboita et al., 2010; de Jesus et al., 2021).

Revisiones climatológicas recientes confirman que, aunque el Atlántico Sur presenta una media de aproximadamente 200 sistemas anuales, la distribución de sus impactos varía drásticamente entre estas regiones, lo que justifica un análisis diferenciado por latitud de génesis (Reboita et al., 2026). Estos focos han sido validados mediante ensambles multi-modelo recientes, que muestran que los modelos regionales (RegCM4) mejoran significativamente la representación de la ciclogénesis en RG1 y RG2, mientras que en RG3 la influencia de los modelos globales es más determinante (de Jesus et al., 2021).

En línea con esta regionalización, climatologías previas basadas en tracking objetivo ya identificaban una región costera recurrente asociada a Argentina–Uruguay–sur de Brasil y tiempos de vida típicos del orden de 3 días (Mendes et al., 2010). Aunque los detalles dependen del reanálisis y del algoritmo, estos resultados respaldan el tratamiento por regiones de ciclogénesis y la necesidad de analizar explícitamente la evolución intra-ciclo (fases) para vincular dinámica e impactos en superficie.

La variabilidad de la actividad ciclónica en estos focos es controlada por la estructura de la corriente en chorro en altura y su acoplamiento con capas bajas. Vera et al. (2002) demostraron que las perturbaciones de escala sinóptica se propagan a través de guías de onda polar y subtropical. Sin embargo, para la generación de eventos extremos, es crucial la interacción vertical. Estudios recientes destacan que los ciclones intensos en la costa este (RG1 y RG2) están frecuentemente asociados a una configuración de vaguada profunda y a la entrada ecuatorial del jet de niveles altos, lo que maximiza la divergencia superior (Padilha Reinke et al., 2026). Estudios con downscaling dinámico han demostrado que estas configuraciones, junto con los vientos intensos en capas bajas (1000 hPa), son mejor representadas por modelos regionales que por modelos globales,

subrayando la importancia de la resolución espacial para capturar los acoplamientos verticales en la costa este de Sudamérica (de Jesus et al., 2021). 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 durante la fase de intensificación, creando un ambiente termodinámico propicio para el desarrollo explosivo (Reboita et al., 2026; Machado et al., 2020). En invierno, además, la propagación de perturbaciones baroclínicas que cruzan los Andes puede reorganizar la estructura de bajos niveles: se ha documentado que la intensificación es máxima del orden de 1000 km al este de la cordillera, donde el transporte de humedad desde latitudes tropicales en el flanco oriental del ciclón favorece la ocurrencia de precipitación sobre el sudeste de Sudamérica y actúa como fuente diabática que contribuye a reforzar el sistema (Vera et al., 2002). Este marco físico respalda que los máximos de precipitación asociados a ciclones no necesariamente se localizan con el mínimo de presión, y refuerza la necesidad de caracterizar la huella espacial completa de viento y precipitación.

Un desafío central y a menudo subestimado en la caracterización de estos sistemas es la asimetría espacial de sus impactos en superficie. Este comportamiento asimétrico ha sido documentado de forma robusta para latitudes medias del Hemisferio Sur, no solo para viento y lluvia, sino también para el estado del mar. Sinclair and Catto (2023), mediante composites ciclón-centrados y análisis de campos de viento y precipitación, demostraron que los máximos de viento superficial se organizan sistemáticamente en el cuadrante cálido del sistema. Esta distribución asimétrica ha sido corroborada en análisis multi-modelo para el Atlántico Sur, donde los vientos más intensos en 1000 hPa asociados a ciclogénesis intensa se localizan consistentemente en los sectores noreste de los sistemas (de Jesus et al., 2021). Estudios recientes que vinculan ciclones con olas extremas refuerzan esta idea, mostrando que la ocurrencia de estas no depende solo de la intensidad del ciclón (vorticidad o viento máximo), sino también de su velocidad de desplazamiento, ya que ciclones más lentos permiten una interacción prolongada del viento con la superficie oceánica, modulando así la huella espacial del impacto (Gramscianinov et al., 2023). Estos hallazgos enfatizan que la estructura espacial y la evolución dinámica del ciclón, y no únicamente su profundidad central, controlan la localización e intensidad de los impactos extremos.

La literatura tradicional ha tendido a utilizar la presión mínima central como el principal *proxy* de intensidad. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que existe un desacoplamiento espacial sistemático en el Atlántico Sur: los eventos extremos de viento superficial (10 m) tienden a concentrarse al norte de los centros de mínima presión, mientras que los extremos de presión se ubican más al sur (Padilha Reinke et al., 2026). Este hallazgo tiene implicaciones críticas para la evaluación del riesgo, sugiriendo

que analizar la intensidad del ciclón únicamente siguiendo su centro geométrico subestima sistemáticamente el riesgo en las zonas periféricas del sistema frontal. Por lo tanto, se hace necesario transitar de un enfoque puntual a una caracterización de la estructura espacial completa de los campos de viento y precipitación.

La complejidad de estos sistemas ha impulsado una evolución en los métodos de clasificación. Históricamente, se utilizó el diagrama de fases de Hart (2003), basado en la estructura térmica y la simetría del sistema. Aunque es un estándar global, este método presenta limitaciones en el Atlántico Sur, donde predominan transiciones rápidas y sistemas híbridos que no encajan en las categorías clásicas (Reboita et al., 2022). En respuesta, se han desarrollado enfoques adaptados a la región. Couto de Souza et al. (2024) propusieron el *CycloPhaser*, un método automatizado que utiliza la tasa de cambio de la vorticidad relativa en 850 hPa para identificar fases dinámicas objetivas (incipiente, intensificación, madurez y decaimiento). Más recientemente, marcos integrales como *SyCLOPS* han comenzado a integrar parámetros de asimetría térmica para distinguir rigurosamente entre ciclones extratropicales puros y sistemas subtropicales, permitiendo una depuración más precisa de las bases de datos climáticas (Han and Ulrich, 2025).

Paralelamente a la detección, la caracterización de impactos ha avanzado mediante técnicas estadísticas. En el Hemisferio Norte, Graf et al. (2017) aplicaron Análisis de Componentes Principales (PCA) a precursores dinámicos, demostrando que la ciclogénesis ocurre en un continuo físico más que en categorías discretas.

Más recientemente, Eisenstein et al. (2023) aplicaron EOF/PCA a campos atmosféricos asociados a ciclones extratropicales, mostrando que los modos dominantes representan configuraciones físicas recurrentes del sistema (vinculadas a la orientación del jet, la baroclinicidad y la distribución de humedad), y que la variabilidad de los impactos extremos puede explicarse por combinaciones lineales de pocos modos principales. Este principio de reducir la complejidad también se aplica al estudio de impactos específicos; por ejemplo, Gramcianinov et al. (2023) demostraron que los cambios en la ocurrencia de olas extremas en el Atlántico pueden interpretarse a través del balance entre la intensidad del ciclón y su velocidad de desplazamiento, dos parámetros clave de su estructura dinámica. Estos resultados sugieren que la complejidad aparente de los ciclones puede reducirse a un espacio de baja dimensión, siempre que el análisis preserve la coherencia espacial del sistema.

De manera complementaria, estudios previos en Sudamérica, como el de Bitencourt et al. (2010), establecieron relaciones estadísticas preliminares entre la profundidad del ciclón y el viento costero. Sin embargo, estos trabajos estuvieron limitados por la resolución de los datos y solían abordar los mecanismos dinámicos y los impactos por separado. Aún falta en la literatura un arcabouço comparativo robusto que describa cómo

se estructura la organización espacial conjunta de los extremos de viento y precipitación integrando la fase del ciclo de vida y la región de génesis.

En este contexto, Liang et al. (2018) demostraron que el uso de EOF multivariado (MEOF) permite identificar patrones acoplados entre circulación atmosférica y precipitación, revelando modos coherentes que no emergen en análisis univariados. Sus resultados indican que la precipitación extrema asociada a ciclones no responde únicamente a la intensidad dinámica, sino a configuraciones espaciales específicas del campo de viento y humedad, reforzando la necesidad de enfoques integrados y multivariados.

La reciente disponibilidad del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020), con su sistema de asimilación 4D-Var y alta resolución espacial (~ 31 km) y temporal (horaria), permite por primera vez resolver la estructura fina de estas tormentas y superar los sesgos de intensidad presentes en generaciones anteriores de reanálisis. Validaciones específicas para el Atlántico Sur indican que ERA5 mejora la representación de los vientos superficiales en un 20 % respecto a ERA-Interim (Gramscianinov et al., 2020). Asimismo, el uso de la vorticidad relativa en 850 hPa se ha consolidado como el método más robusto para el seguimiento en el Hemisferio Sur, ya que permite capturar las fases incipientes e intensas que los algoritmos basados exclusivamente en presión suelen omitir o detectar tardíamente (Padilha Reinke et al., 2024). Este enfoque ha sido aplicado exitosamente en proyecciones climáticas multi-modelo para el Atlántico Sur, demostrando su capacidad para identificar tanto sistemas débiles como ciclones intensos embebidos en el flujo de los oestes (de Jesus et al., 2021). La potencia de esta combinación metodológica (ERA5 + tracking por vorticidad) ha sido demostrada recientemente en estudios que logran asociar de manera robusta ciclones individuales con sus impactos en el océano, como la generación de olas extremas (Gramscianinov et al., 2023).

Aprovechando estas capacidades, este estudio busca llenar el vacío existente realizando una caracterización integral, determinando cómo evoluciona la huella espacial de los impactos a través de las fases de vida del ciclón.

1.1. Objetivos del Proyecto de Investigación

1.1.1. Objetivo General

Caracterizar cuantitativamente la estructura espacio-temporal de los campos de viento y precipitación en ciclones extratropicales del Atlántico Sur mediante análisis multivariado avanzado (EOF y PCA), integrando perspectivas dinámicas y estadísticas para establecer un prototipo climático que represente el comportamiento típico de estos sistemas en función de su región de génesis y fase de desarrollo.

1.1.2. Objetivos Específicos

1. Aplicar la descomposición en Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) para identificar los patrones espaciales dominantes en los campos de viento (10 m, 100 m) y precipitación, y cuantificar la contribución de cada modo en las diferentes fases ciclónicas (incipiente, intensificación, madurez, decaimiento) y regiones de génesis (RG1, RG2, RG3).
2. Implementar el análisis de funciones de densidad de probabilidad (PDF) mediante estimación por núcleos (KDE) para caracterizar la distribución estadística de valores máximos en su estructura espacial y temporal.
3. Realizar un PCA multivariado integrando viento y precipitación y Temperatura Superficial del Mar (TSM).
4. Desarrollar un prototipo estadístico (composite) del ciclón extratropical que integre los patrones EOF dominantes y las distribuciones PDF de extremos para cada región de ciclogénesis.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Ciclones extratropicales en el Hemisferio Sur

2.1.1. Definición, estructura y terminología básica

Los ciclones extratropicales son sistemas de baja presión asociados a inestabilidad baroclínica, resultado de la interacción entre gradientes horizontales de temperatura, advecciones y la circulación en altura. Su estructura típica incluye frentes, un patrón asimétrico de ascensos y descensos, y una marcada dependencia del entorno sinóptico, lo que condiciona la distribución espacial de viento y precipitación en latitudes medias (Sinclair, 1997; Simmonds and Keay, 2000a). En el Atlántico Sur, además de los ciclones extratropicales, pueden presentarse ciclones subtropicales con características híbridas (p. ej., combinación de forzamiento baroclínico y rasgos de núcleo cálido), lo que obliga a precisar la terminología y el criterio de clasificación cuando se construyen climatologías regionales (Evans and Braun, 2012).

2.1.2. Storm tracks del Hemisferio Sur y su variabilidad

Los ciclones se organizan en corredores preferenciales de tránsito (*storm tracks*) modulados por la circulación media del oeste, la distribución océano–continente y la configuración de los jets. En el Hemisferio Sur, la mayor oceanidad favorece la persistencia del flujo zonal y condiciona la ubicación y forma del *storm track*, con variabilidad interanual y decadal en su intensidad y posición (Hoskins and Hodges, 2005; Inatsu and Hoskins, 2004; Simmonds and Keay, 2000b). Esta organización es relevante para interpretar patrones espaciales recurrentes de impactos, ya que conecta la dinámica de gran escala con la frecuencia y rutas de los ciclones que afectan Sudamérica y el Atlántico Sur.

2.2. Ciclogénesis en Sudamérica y Atlántico Sur

2.2.1. Rol de los Andes y la ciclogénesis a sotavento

La Cordillera de los Andes actúa como una barrera orográfica que reorganiza el flujo incidente y favorece la ciclogénesis a sotavento mediante mecanismos de ajuste dinámico y generación de vorticidad. Este forzamiento, junto con la baroclinicidad regional, promueve zonas recurrentes de formación y posterior intensificación en el sector sudamericano (Gan and Rao, 1991; Crespo et al., 2021). En consecuencia, la orografía no solo modula dónde se generan los ciclones, sino también cómo se organizan los gradientes y los flujos que controlan viento y precipitación asociados.

2.2.2. Hotspots y regionalización (RG1–RG3)

La actividad ciclónica en el Atlántico Sur y áreas adyacentes presenta máximos regionales asociados a condiciones sinópticas y termodinámicas distintas. En un marco aplicado, la separación en regiones de ciclogénesis (p. ej., RG1, RG2 y RG3) permite tratar la climatología de impactos como poblaciones diferenciadas, reduciendo la mezcla de configuraciones atmosféricas heterogéneas (Reboita et al., 2010; Mendes et al., 2010; Dalanhese et al., 2023). Esta regionalización es particularmente importante en el Atlántico Sur, donde pueden coexistir sistemas extratropicales y subtropicales; por ello, la delimitación regional y la definición del tipo de ciclón contribuyen a construir muestras más comparables (Evans and Braun, 2012).

2.2.3. Ambientes de génesis y trayectorias típicas

Las propiedades del ambiente de génesis (baroclinicidad, jets, humedad disponible) condicionan la evolución del ciclón y la distribución de impactos. Estudios regionales han caracterizado entornos típicos de formación y rutas preferenciales en el Atlántico Sur, proporcionando base física para contrastes entre regiones de génesis (Gramscianinov et al., 2019; Vera et al., 2002). Estas diferencias ambientales motivan que el análisis de viento y precipitación se condicione por región, evitando interpretar como “variabilidad interna” lo que en realidad responde a forzamientos sinópticos distintos.

2.3. Identificación y tracking objetivo de ciclones

2.3.1. Criterios de detección: presión vs vorticidad (850 hPa)

Los métodos objetivos de detección difieren según el campo usado para definir el centro del ciclón. Los enfoques basados en presión mínima (SLP) capturan la señal sinóptica clásica, mientras que los basados en vorticidad relativa en niveles bajos (p. ej., 850 hPa) tienden a mejorar la identificación de fases incipientes y estructuras compactas, particularmente relevantes en el Hemisferio Sur (Sinclair, 1997; Hodges et al., 2011). En términos aplicados, el campo de detección condiciona la muestra final (conteos, duración, intensidad aparente) y, por tanto, influye en cualquier estadística de extremos asociada.

2.3.2. Métricas del ciclón: intensidad, tamaño, velocidad y duración

La caracterización del ciclón requiere métricas que describan su intensidad (p. ej., circulación o profundidad), su tamaño (radio efectivo/escala), su velocidad de traslación y su duración. La evolución de estas métricas a lo largo del ciclo de vida permite separar cambios estructurales de cambios meramente geométricos del centro del sistema (Simmonds, 2000; Sinclair, 1997). Estas métricas también permiten conectar el ciclo de vida con la evolución espacial de los máximos de viento y precipitación, que no siempre se ubican en el centro dinámico.

2.3.3. Sensibilidad a reanálisis y consistencia entre bases

La estadística de ciclones depende del reanálisis y del algoritmo de tracking, por diferencias en resolución, asimilación y representación de gradientes. Comparaciones entre reanálisis muestran variaciones en conteos, intensidad y trayectorias, por lo que es necesario explicitar el producto usado y su compatibilidad con el objetivo del estudio (Hodges et al., 2011; Dalanhese et al., 2023). En consecuencia, la interpretación de climatologías condicionadas por fase y región debe considerar que parte de la dispersión estadística puede provenir del propio sistema de datos y del método de detección.

2.4. Ciclo de vida y fases del ciclón

2.4.1. Ciclo de vida y evolución temporal de propiedades

El ciclón evoluciona mediante etapas en las que cambian su intensidad, su tamaño y la organización espacial de sus campos asociados. Resultados previos muestran que el tamaño y otras propiedades no son constantes durante la vida del sistema, lo que respalda enfoques que condicionan el análisis por fase (Simmonds, 2000). Por ello, la “misma” intensidad central puede corresponder a estructuras y huellas de impacto distintas según el estado de vida del ciclón.

2.4.2. Definición operativa de fases: incipiente, intensificación, madurez y decaimiento

Una división operativa del ciclo de vida en cuatro fases facilita relacionar la dinámica del ciclón con la evolución de impactos en superficie. En enfoques automatizados, las fases pueden definirse a partir de tasas de cambio y umbrales de variables dinámicas (p. ej., vorticidad), permitiendo segmentación consistente en grandes climatologías (Couto de Souza et al., 2024). Este tipo de segmentación es especialmente útil cuando el objetivo es comparar patrones espaciales de máximos de variables de superficie bajo estados dinámicos equivalentes.

2.4.3. No linealidad y transiciones de fase

La progresión entre fases no necesariamente es estrictamente lineal; algunos ciclones pueden transitar entre etapas o reintensificarse, por lo que conviene considerar la fase como un estado dinámico identificado objetivamente, más que como una secuencia fija. Esta perspectiva es clave para interpretar distribuciones de extremos condicionadas por fase (Couto de Souza et al., 2024). En términos de impactos, esta no linealidad implica que los máximos de viento y precipitación pueden reorganizarse espacialmente de forma no monótona a lo largo del tiempo de vida.

2.5. Viento y precipitación asociados a ciclones y sus extremos

2.5.1. Organización espacial de viento y precipitación en ciclones

Los campos de viento y precipitación alrededor de un ciclón son asimétricos y dependen de la estructura frontal, el acoplamiento con el jet y el transporte de humedad. En el Atlántico Sur, la configuración sinóptica y la disponibilidad de humedad modulan la extensión y el posicionamiento de las bandas de precipitación, así como los máximos de viento en superficie (Gramscianinov et al., 2019; Reboita et al., 2018). Esta asimetría justifica el análisis espacial (y no solo “central”) de variables de superficie cuando se busca describir climatología e impactos extremos.

2.5.2. Extremos en superficie y desplazamiento respecto al centro

Los máximos de viento y precipitación no necesariamente coinciden con el centro del ciclón, y su localización puede variar con la fase y el ambiente. Esta separación entre el centro dinámico y los máximos de impacto justifica analizar la huella espacial completa de las variables, en lugar de evaluar la intensidad únicamente con una métrica central (Sinclair and Catto, 2023; Padilha Reinke et al., 2026). Bajo esta lógica, los estadísticos de máximos y su distancia al centro del ciclón permiten describir patrones robustos de impacto que no se capturan con indicadores centralizados.

2.5.3. Justificación del análisis por región y fase

Dado que las regiones de ciclogénesis presentan configuraciones atmosféricas distintas, la comparación de extremos requiere condicionar el análisis por región para evitar mezclar poblaciones con dinámicas diferentes. Del mismo modo, el condicionamiento por fase permite capturar cambios sistemáticos en la estructura espacial de viento y precipitación a lo largo de la vida del ciclón, coherente con el objetivo de caracterizar climatología e impactos extremos (Dalanhese et al., 2023; Couto de Souza et al., 2024). En el Atlántico Sur, además, la existencia de ciclones subtropicales refuerza la necesidad de una definición clara del tipo de ciclón y de criterios consistentes de muestreo cuando se interpretan impactos en superficie (Evans and Braun, 2012).

2.6. Enfoques multivariados para patrones espacio-temporales

2.6.1. EOF/PCA: concepto y utilidad en meteorología

El análisis EOF/PCA permite representar un campo espacio-temporal mediante un conjunto reducido de patrones ortogonales y sus series temporales asociadas (componentes principales), maximizando la varianza explicada y reduciendo dimensionalidad. En meteorología, esta familia de métodos se usa para (i) identificar modos dominantes de variabilidad sinóptica y (ii) construir espacios reducidos para clasificación objetiva o comparación entre conjuntos de datos. (Cornér et al., 2025) (Liang et al., 2018)

2.6.2. EOF por fase y por región: interpretación física

Aplicar EOF/PCA por fase y por región permite extraer patrones dominantes condicionados a estados dinámicos comparables y a ambientes de génesis más homogéneos, evitando que la mezcla de fases o regiones diluya señales estructurales. En particular, extensiones multivariadas (p. ej., MEOF) permiten incorporar más de una variable para describir covariabilidad acoplada y resumir estructuras consistentes con mecanismos físicos dominantes (Liang et al., 2018).

2.6.3. Distribuciones de extremos (KDE/histogramas) como complemento

Además de resumir patrones mediante EOF/PCA, es útil caracterizar la distribución de máximos (y su localización relativa al centro) con histogramas o KDE, lo que entrega una descripción probabilística de magnitudes extremas y su dispersión. En estudios de ciclones, el KDE se ha aplicado tanto para densidades (p. ej., densidad de trayectorias/fases) como para distribuciones conjuntas entre intensidad y distancia al centro, o para delimitar regímenes en espacios de parámetros. (Couto de Souza et al., 2024) (Priestley and Catto, 2022) (Han and Ullrich, 2025)

Capítulo 3

Metodología

3.1. Diseño general del estudio

El objetivo metodológico de esta tesis es caracterizar, en un marco centrado en el ciclón, la distribución espacial y la magnitud de los máximos de precipitación y viento asociados a ciclones extratropicales del Atlántico Sur con ciclogénesis en Sudamérica, condicionando el análisis por fase del ciclo de vida y por región de ciclogénesis. Para ello, se emplea una base de datos preexistente de trayectorias de ciclones y una clasificación objetiva de fases, y se extraen campos horarios de ERA5 alrededor del centro de cada sistema para construir productos estadísticos basados en máximos.

3.2. Datos

3.2.1. Base de datos de ciclones y fases del ciclo de vida

La identificación y el *tracking* de los ciclones no se realiza en esta tesis. En su lugar, se utiliza directamente una base de datos previamente desarrollada por otros autores, construida a partir de ERA5 (1979–2020) mediante detección y seguimiento de centros ciclónicos usando vorticidad relativa en 850 hPa y criterios objetivos (p. ej., duración mínima, umbrales de intensidad y coherencia del desplazamiento del centro) (Gramscianinov et al., 2020).

De forma adicional, se utiliza una versión enriquecida de esta base, en la cual cada ciclón cuenta con una clasificación de su evolución en cuatro fases (incipiente, intensificación, madurez y decaimiento) asignada en resolución horaria (Couto de Souza et al., 2024). Esta clasificación reconoce que, en general, pueden existir transiciones no lineales entre fases; sin embargo, para el análisis principal de esta tesis se trabaja con un subconjunto específico descrito en la Sección 3.3.1.

La base de datos también incluye la región de ciclogénesis asociada a cada ciclón (según la localización de su génesis), lo que permite estratificar los resultados por regiones de formación en Sudamérica.

3.2.2. Reanálisis ERA5 y variables meteorológicas

Se emplea el reanálisis ERA5 como fuente de los campos meteorológicos analizados (Hersbach et al., 2020). El periodo de trabajo es 1979–2020, consistente con la ventana temporal de la base de datos de ciclones. Las variables consideradas en esta tesis son precipitación y viento a 10 m y a 100 m de altura, en resolución horaria.

Los datos de ERA5 fueron descargados mediante el servicio del *Copernicus Climate Data Store* usando el API, a través de *scripts* desarrollados para automatizar la extracción de las variables y periodos requeridos, asegurando consistencia temporal con los instantes horarios de cada trayectoria.

3.3. Extracción de campos centrados en el ciclón

Para cada ciclón y para cada hora de su vida, se utiliza la localización del centro proporcionada por la base de datos y se extrae un entorno espacial alrededor del centro del sistema. El entorno se define con un radio de 10° alrededor del centro y, operativamente, se implementa como un recorte cuadrado de $20^\circ \times 20^\circ$ centrado en el ciclón. Este procedimiento genera campos en un marco de referencia relativo al centro, lo que permite combinar realizaciones de distintos ciclones dentro de un mismo sistema de coordenadas centradas.

La extracción y el posterior análisis se realizan separadamente por región de ciclogénesis, de manera que cada resultado queda condicionado simultáneamente por (i) región de génesis y (ii) fase del ciclo de vida.

3.3.1. Selección del subconjunto con evolución estrictamente lineal

Para asegurar comparabilidad entre fases, el análisis principal se restringe a ciclones cuya evolución atraviesa estrictamente y en orden las cuatro fases: incipiente \rightarrow intensificación \rightarrow madurez \rightarrow decaimiento. De este modo, se evita mezclar trayectorias con transiciones no monotónicas entre fases dentro de un mismo conjunto estadístico.

3.4. Construcción de campos representativos por fase y extracción de máximos

Para cada ciclón, cada fase presenta una duración (en número de horas) que puede variar entre sistemas. Para reducir la variabilidad horaria interna de la fase y obtener un campo representativo, se seleccionan los dos o tres tiempos centrales de la

fase (dependiendo de si la duración es par o impar), se promedian dichos tiempos y se genera un campo promedio por ciclón–fase.

A partir de ese campo promedio se extrae el máximo de la variable y su ubicación (en coordenadas relativas al centro del ciclón dentro del recorte de $20^\circ \times 20^\circ$). Este procedimiento produce, para cada combinación región–fase–variable, (i) un conjunto de m campos (uno por ciclón) y (ii) un conjunto de m máximos con su magnitud y localización.

Los campos por ciclón–fase se almacenan en archivos NetCDF independientes por combinación de región, fase y variable (p. ej., `RG1F1_wind10.nc`), donde la dimensión tipo “temporal” corresponde al índice de casos (m ciclones) y no a una serie cronológica continua.

3.5. Técnicas estadísticas aplicadas

3.5.1. Histogramas de máximos

Con los m valores máximos extraídos por combinación región–fase–variable, se construyen histogramas para describir la distribución de frecuencias de las magnitudes máximas. Este análisis se utiliza para comparar cómo cambian los rangos de valores más frecuentes entre fases del ciclo de vida y entre regiones de ciclogénesis.

3.5.2. Estimación de densidad de kernel (KDE) para la localización de máximos

Para caracterizar la distribución espacial de la ocurrencia de máximos, cada campo por ciclón–fase se transforma en un mapa binario centrado en el ciclón, donde todos los puntos toman valor 0 excepto la ubicación del máximo (valor 1). A partir del conjunto de m mapas binarios se aplica una estimación de densidad de kernel (KDE), obteniendo un campo que representa la probabilidad relativa de encontrar el máximo en cada posición del dominio centrado, para cada fase y región de ciclogénesis.

3.5.3. EOF univariado

Se aplica análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF) a los conjuntos de m campos centrados (por región y por fase), de manera separada para cada variable (viento a 10 m, viento a 100 m y precipitación). Este análisis permite identificar patrones espaciales dominantes de variabilidad en el marco centrado al ciclón y comparar dichos patrones entre fases y regiones.

3.5.4. EOF combinado (multivariado) precipitación–viento

Para evaluar la covariabilidad espacial entre precipitación y viento, se realiza un EOF combinado entre ambas variables utilizando, para cada región y fase, los conjuntos de campos centrados construidos previamente. El objetivo es obtener modos acoplados que permitan interpretar, en una misma descomposición, la relación espacial entre anomalías/patrones de precipitación y de viento dentro del entorno del ciclón, y cómo dicha relación varía a lo largo del ciclo de vida.

3.6. Análisis complementario: subconjunto de ciclones intensos

Con el fin de evaluar si los patrones identificados cambian para sistemas más vigorosos, se define un subconjunto de ciclones intensos basado en la dinámica del propio sistema. Para cada ciclón se extrae el mínimo de vorticidad relativa a 850 hPa a lo largo de todo su ciclo de vida; en el Hemisferio Sur, valores más negativos indican mayor intensidad. Con este criterio, se selecciona el 10 % de ciclones con mínimos de vorticidad más negativos.

Sobre este subconjunto se repite el flujo metodológico completo descrito en las Secciones 3.3–3.5: construcción de campos representativos por fase usando tiempos centrales, extracción de máximos y ubicación, histogramas, KDE y EOF (univariado y combinado). La comparación entre el subconjunto intenso y el conjunto total permite evaluar si la intensidad dinámica (vorticidad más negativa) se asocia con cambios sistemáticos en la magnitud de los máximos y/o en su distribución espacial relativa al centro del ciclón, por fase y por región de ciclogénesis.

Bibliografía

- 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.
- 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., da Silva Dias, P. L., Gramscianinov, C. B., da Silva, M. B. L., 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(10):3436–3456.
- 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.
- 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. (1991). Surface cyclogenesis over south america. *Monthly Weather Review*, 119(5):1293–1302.
- Graf, M. A., Wernli, H., and Sprenger, M. (2017). Objective classification of extratropical cyclogenesis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143:1047–1061.

- 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.
- Gramscianinov, C. B., Gowan, E. J., Campos, R., and da Rocha, R. P. (2023). Impact of extratropical cyclone intensity and speed on the extreme wave trends in the atlantic ocean. *Climate Dynamics*, 60:1–19.
- 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.
- 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., and et al. (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049.
- Hodges, K. I., Lee, R. W., and Bengtsson, L. (2011). A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses era-interim, nasa merra, ncep cfsr, and jra-25. *Journal of Climate*, 24(18):4888–4906.
- 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):4882–4895.
- 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.
- Machado, J. P., Justino, F., and Souza, C. D. (2020). Influence of el niño-southern oscillation on baroclinic instability and storm tracks in the southern hemisphere. *International Journal of Climatology*, 40(14):6098–6114.
- Masson-Delmotte, V. and Zhai, P. (2022). Tendencias regionales de los fenómenos extremos en el informe del ipcc de 2021. *Boletín de la OMM*, 71(1):52–60. Artículo de divulgación institucional basado en el IPCC AR6.

- Mendes, D., Souza, E. P., Marengo, J. A., and Mendes, M. C. (2010). Climatology of extratropical cyclones over the south american–southern oceans sector. *Theoretical and Applied Climatology*, 100:239–250.
- 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 highresmp models. *Geophysical Research Letters*, 49(5):e2021GL096708.
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., Ambrizzi, T., and Sugahara, S. (2010). South atlantic ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (regcm3). *Climate Dynamics*, 35(7-8):1331–1347.
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., de Souza, M. R., and Llopart, M. (2018). Extratropical cyclones over the southwestern south atlantic ocean: Hadgem2-es and regcm4 projections. *International Journal of Climatology*, 38(6):2866–2879.
- 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.
- Simmonds, I. (2000). Size changes over the life of sea level cyclones in the ncep reanalysis. *Monthly Weather Review*, 128(12):4118–4125.
- Simmonds, I. and Keay, K. (2000a). Mean southern hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year ncep–ncar reanalysis. *Journal of Climate*, 13(5):873–885.
- Simmonds, I. and Keay, K. (2000b). Variability of southern hemisphere extratropical cyclone behavior, 1958–97. *Journal of Climate*, 13(3):550–561.

- Simmonds, I. and Murray, R. J. (1999). Southern extratropical cyclone behavior in ecmwf analyses during the frost special observing periods. *Weather and Forecasting*, 14(6):878–891.
- 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.