

Análisis Técnico

de los tornados de Linares y del litoral de la Provincia de Concepción

ocurridos el 20 de septiembre de 2025

Sección Investigación y
Soporte Tecnológico





Fotografía portada: Captura de video difundido a través de X por @sepulinales (grabado por un tercero), 20 de septiembre de 2025.

Fotografía portada: Captura de video difundido a través de YouTube por ADN Radio (autor original no identificado), 20 de septiembre de 2025.

Autores:

Meteorólogos: Ricardo Abarca, Camilo Barahona, Francisca Rubina.

Geofísica: Katherine Gaete.

Geógrafo: Rodrigo Padilla (Sección Climatología).

Edición:

Gonzalo Silva, Jefe Sección Investigación y Soporte Tecnológico.

Fecha de publicación:

19 de enero de 2026

Agradecimientos:

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a la Unidad de Gestión de Riesgos de la Municipalidad de Linares, por el apoyo logístico durante la visita a terreno y el levantamiento de información de daños. Al Departamento de Gestión del Riesgo de Desastres de la Municipalidad de San Pedro de la Paz, por facilitar antecedentes técnicos y registros de afectación comunal. Al personal del Servicio Meteorológico de la Armada de Chile en Talcahuano y del aeropuerto Carriel Sur, por la entrega de datos observacionales locales e información inicial sobre los eventos en la zona costera. Asimismo, a la comunidad y a los autores de los registros audiovisuales utilizados, cuyos testimonios y material permitieron complementar la caracterización de este fenómeno.

© Dirección Meteorológica de Chile - Dirección General de Aeronáutica Civil
Avenida Portales 3450, Estación Central, Santiago, Chile.

¿Cómo comunicarte con nosotros?



Sitio web: www.meteochile.gob.cl



Teléfono: +56 2 2436 4546 – 4571



X oficial: @metechile_dmc



Instagram: @metechile



Correo: estudios_dmc@metechile.cl



Contenidos

- 01 Introducción
- 02 Taxonomía de fenómenos tornádicos
- 03 Descripción y categorización del tornado de Linares
- 04 Descripción y categorización de los tornados de Hualpén y de San Pedro de la Paz
- 05 Análisis sinóptico
- 06 Análisis mesoescalar
- 07 Herramienta en estudio para el pronóstico de áreas tornádicas
- 08 Discusión diagnóstica: Limitaciones e hipótesis de clasificación dinámica de los eventos
- 09 Conclusiones
- 10 Referencias
- 11 Anexos

1. Introducción

El día 20 de septiembre de 2025, al menos tres tornados impactaron la zona centro-sur de Chile. El evento más significativo, en término de afectaciones materiales, impactó en la comuna de Linares, en la región del Maule, mientras que otros dos impactaron el sector litoral de la provincia de Concepción, región del Biobío. Estos eventos se enmarcan dentro de un régimen de inestabilidad post-frontal que abarcó una extensa área del centro-sur de Chile. Estudios previos han revelado que este tipo de fenómenos suelen ocurrir en la estación fría, bajo condiciones de baja Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE) y una marcada cizalladura vertical del viento, un entorno conocido como "High-Shear, Low-CAPE" (HSLC) (Barrett et al., 2020; Vicencio et al., 2021; Marín et al., 2024).

Si bien el registro histórico de tornados en Chile data de varios siglos, sólo en años recientes se ha intensificado su estudio sistemático, particularmente tras el brote de tornados de mayo de 2019 (Vicencio et al., 2021). En este contexto, los eventos de Linares y el litoral de la provincia de Concepción constituyen un caso de estudio relevante para continuar avanzando en la caracterización de los tornados en el territorio nacional. Durante la jornada del 23 de septiembre, personal de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) se desplegó en terreno para recopilar evidencia, determinar la trayectoria y clasificar la intensidad del fenómeno ocurrido en Linares, utilizando como referencia la Escala Fujita Mejorada (EF), estándar de facto de la institución.

El presente informe técnico tiene como objetivo principal realizar una caracterización integral de los eventos ocurridos las regiones del Maule y del Biobío. En primer lugar, se presenta una descripción taxonómica de la génesis dinámica de fenómenos tornádicos. Luego, se incluye una descripción y categorización, detallando los daños observados. Posteriormente, se realiza un análisis de las condiciones atmosféricas a escala sinóptica y de mesoescala que propiciaron el evento, incluyendo la evaluación de índices de inestabilidad (CAPE-SHEAR y SHERBE/STP). Finalmente se incorpora una sección de discusión diagnóstica, que incluye una hipótesis de clasificación dinámica de los tornados.

2. Taxonomía de fenómenos tornádicos

A la fecha, en la DMC la evaluación de fenómenos tornádicos se ha basado principalmente en su identificación a partir de una distinción operativa-observacional, supeditada a la superficie sobre la cual se desplaza el vórtice, diferenciando entre “tromba marina” y “tornado”. A esta primera aproximación (de utilidad para reportes oficiales, la comunicación pública y la gestión de emergencias) se suma la evaluación de la trayectoria y de los daños asociados, lo que permite asignar una categoría de intensidad (Escala EF). Si bien habitualmente se añade un análisis de las condiciones meteorológicas de escala sinóptica y de mesoescala, dicha evaluación no siempre deriva en una profundización sistemática de la dinámica física ni de los procesos que explican su génesis.

En consecuencia, el abordaje integral de estos fenómenos debería considerar al menos tres dimensiones: en primer lugar, la identificación operativa de lo observado; en segundo término, la evaluación de los daños producidos; y finalmente, el análisis sinóptico-mesoescalar y de los mecanismos de formación del evento.

Respecto a esto último, Agee (2014) propone una taxonomía de tornados basada en mecanismos físicos de formación (Figura 1), estableciendo tres categorías fundamentales: el Tipo 1 (superceldas), el Tipo 2 (sistemas QLCS) y el Tipo 3, que integra a las trombas marinas y terrestres originadas por el estiramiento de vorticidad local. Aunque actualmente no se dispone de herramientas de observación para clasificar cada evento con total especificidad (aspecto que se discutirá en la Sección 8), este esquema es concordante con las definiciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Sociedad Meteorológica Americana (AMS).

Bajo este enfoque, y considerando el carácter retrospectivo del análisis, se utilizará (según corresponda) el término genérico “tornado” para referirse a los eventos registrados en Linares y del litoral de la provincia de Concepción. El desglose detallado de la taxonomía se presenta en el Anexo A.

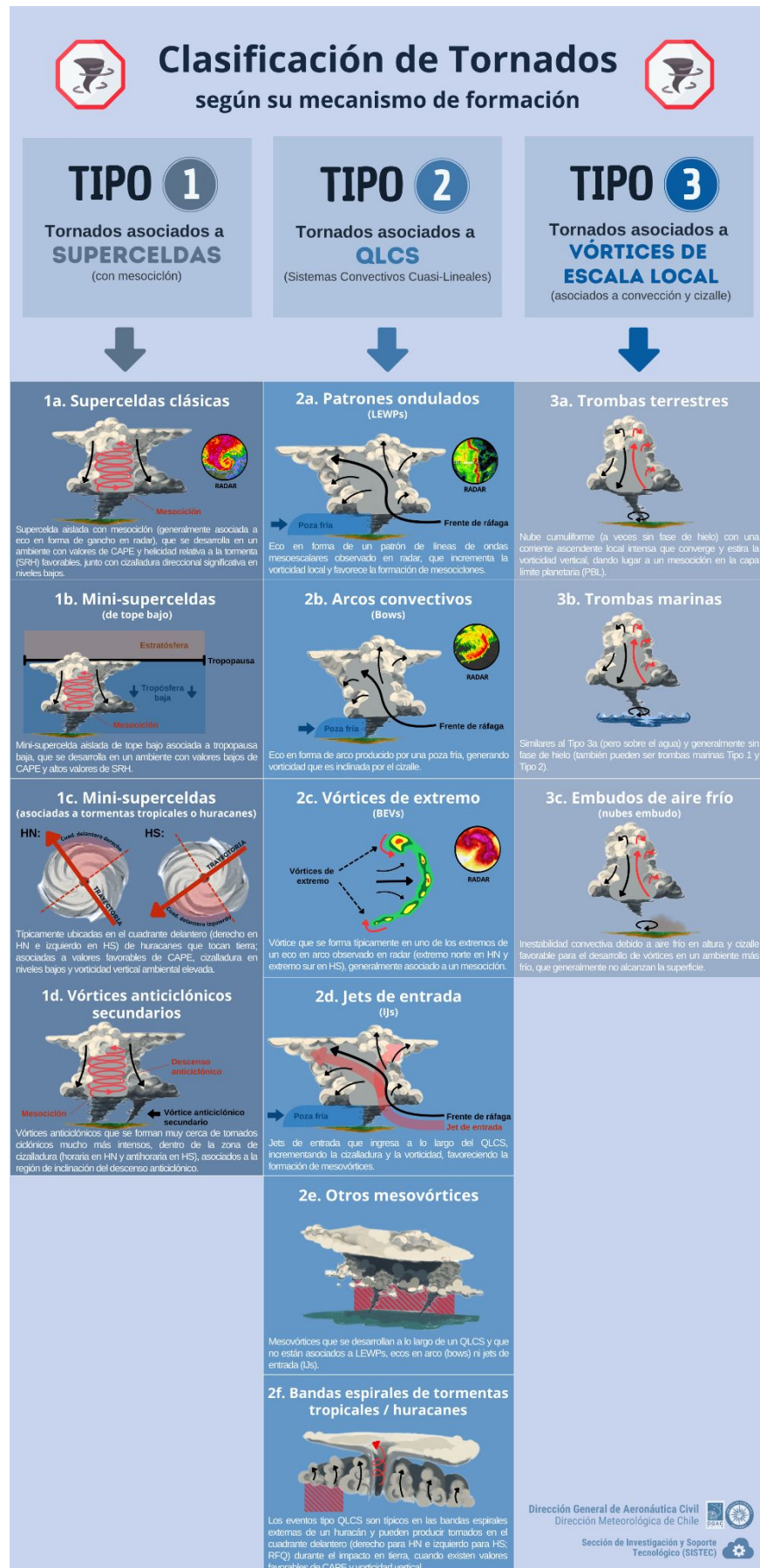


Figura 1. Clasificación de tornados según mecanismos físicos de formación. Elaboración propia a partir de Agee (2014).

3. Descripción y categorización del tornado de Linares

Un equipo de la DMC, apoyado por la Unidad de Gestión de Riesgos de la Municipalidad de Linares, visitó la zona el día 23 de septiembre, recabando información sobre el evento que afectó el sector noreste de la ciudad de Linares.

Los registros iniciales permiten situar su inicio al norte del Mercado Ganadero, siguiendo un trayecto que atravesó los loteos La Araucarias y San Manuel (zonas residenciales de baja densidad), Villa María del Valle (residencial de alta densidad), la zona industrial del Camino Viejo a Panimávida y el Cementerio Parque Campo Sacro, para luego continuar su avance por aproximadamente 650 metros sobre áreas agrícolas (Figura 2).

El tornado recorrió aproximadamente 3 km con una trayectoria relativamente lineal en dirección noroeste-sureste, alcanzando un área de daño de unos 120 metros de ancho máximo.

Los principales daños observados incluyeron desganche de ramas, desprendimiento de techos en viviendas y galpones, junto con componentes de revestimiento y aislamiento térmico, rotura de vidrios de ventanas y perforaciones en el revestimiento exterior producidas por escombros impulsados por el viento. De manera puntual, también se registró la caída de panderetas de hormigón vibrado tipo “bulldog” y de algunos árboles, zonas donde se presume que el tornado alcanzó su máxima intensidad (Figura 2).

Según lo anterior, el evento fue catalogado como un tornado de categoría EF0 según la Escala Fujita Mejorada (EF).

Los registros audiovisuales no permitieron determinar con precisión la velocidad de desplazamiento del tornado debido a las diferencias de sincronización horaria entre los distintos dispositivos. Sin embargo, entregaron registros valiosos en cuanto a la rotación del viento a nivel de superficie y velocidades que alcanzaron algunos escombros (cercano a los 80 km/h), además de situar su paso cerca de las 14:50 hora local (HL).

Finalmente, según el último catastro de afectaciones elaborado en conjunto por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) y la Municipalidad de Linares, se contabilizaron 94 viviendas y/o familias afectadas, de las cuales 91 presentaron daños leves y 3 daños mayores.

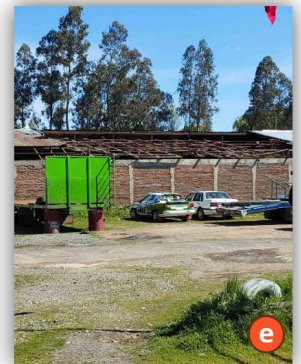
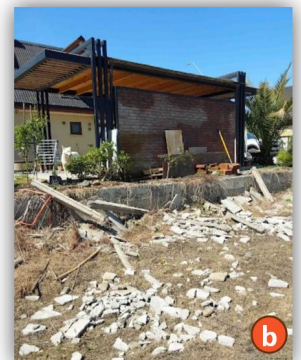
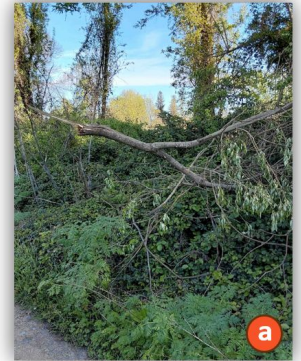
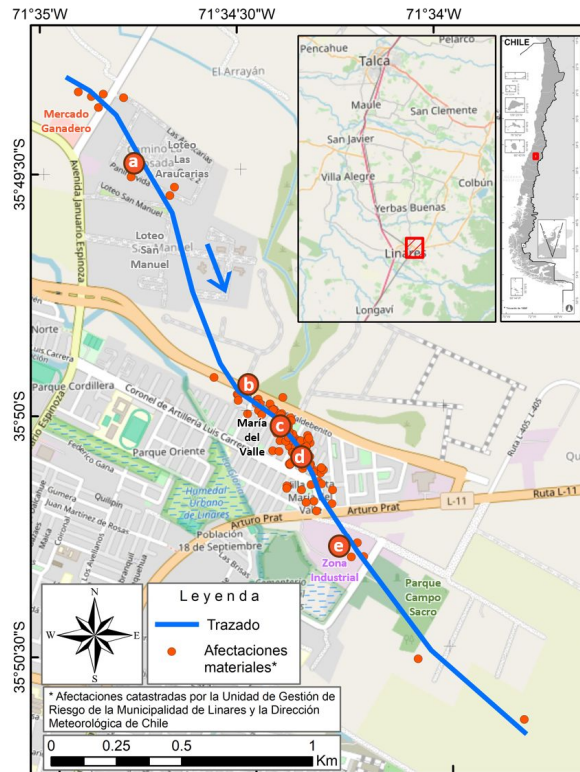


Figura 2. Trazado de tornado día 20 de septiembre de 2025 y reporte gráfico de daños en la ciudad de Linares, región del Maule. La flecha indica sentido general de desplazamiento. Entre los principales daños observados se incluyen: (a) desprendimiento de ramas, (b) caída de panderetas de hormigón vibrado tipo “bulldog”, (c y d) pérdida de techos en viviendas y (e) en galpones.

4. Descripción y categorización de los fenómenos reportados en Hualpén y en San Pedro de la Paz

Respecto a los fenómenos ocurridos en el litoral de la provincia de Concepción, se pudo constatar la ocurrencia de dos eventos asociados a trombas marinas que, al ingresar a tierra, continuaron su desplazamiento como tornados en la comuna de Hualpén y en San Pedro de la Paz. Ambos eventos ocurrieron cercanos a la misma hora (14:10 HL) presentando una trayectoria similar en sentido noroeste-sureste.

Si bien no fue posible realizar una visita a terreno en las zonas afectadas, inicialmente se logró recopilar información gracias a la colaboración del Servicio Meteorológico de la Armada de Talcahuano y de un observador meteorológico del Aeropuerto Carriel Sur, ambos ubicados en la comuna de Talcahuano, dentro del área metropolitana del Gran Concepción. Posteriormente, estos antecedentes fueron complementados con la información técnica levantada por el Departamento de Gestión del Riesgo de la Municipalidad de San Pedro de la Paz (Municipalidad de San Pedro de la Paz, 2025) y el informe técnico elaborado por RedGeo Chile (Palma et al., 2025).

En el caso del evento de San Pedro de la Paz, se dispone de registros fotográficos de la nube embudo y grabaciones de cámaras de seguridad que evidencian la ocurrencia de ráfagas de viento intensas. Su inicio se sitúa sobre la desembocadura del río Biobío, desplazándose en sentido noroeste-sureste en sentido casi paralelo al camino del Puente Industrial hasta algún lugar cercano o posterior a la ruta 160 (Figura 3). El recorrido total se estima en 3 km.

Según el Informe Técnico Departamento de Gestión del Riesgo de la Municipalidad de San Pedro de la Paz, el evento afectó a seis personas y dos viviendas con daños menores producto de voladuras parciales de techo, rotura de vidrios en ventanas y caída de árboles, además de la voladura del techo de instalaciones del Corral Municipal de vehículos y caídas de árboles de mayor tamaño. De los daños evidenciados se puede asignar en categoría EF0.

El evento de Hualpén se localizó en el sector de Caleta Lengua. Los registros disponibles documentan su desplazamiento por el borde costero y su posterior ingreso hacia el humedal del mismo nombre, con una trayectoria estimada de aproximadamente 2 km (Figura 3). No hay registro oficial de daños. Por lo anterior, es asignado en la categoría EFU ("EF-Unknown").

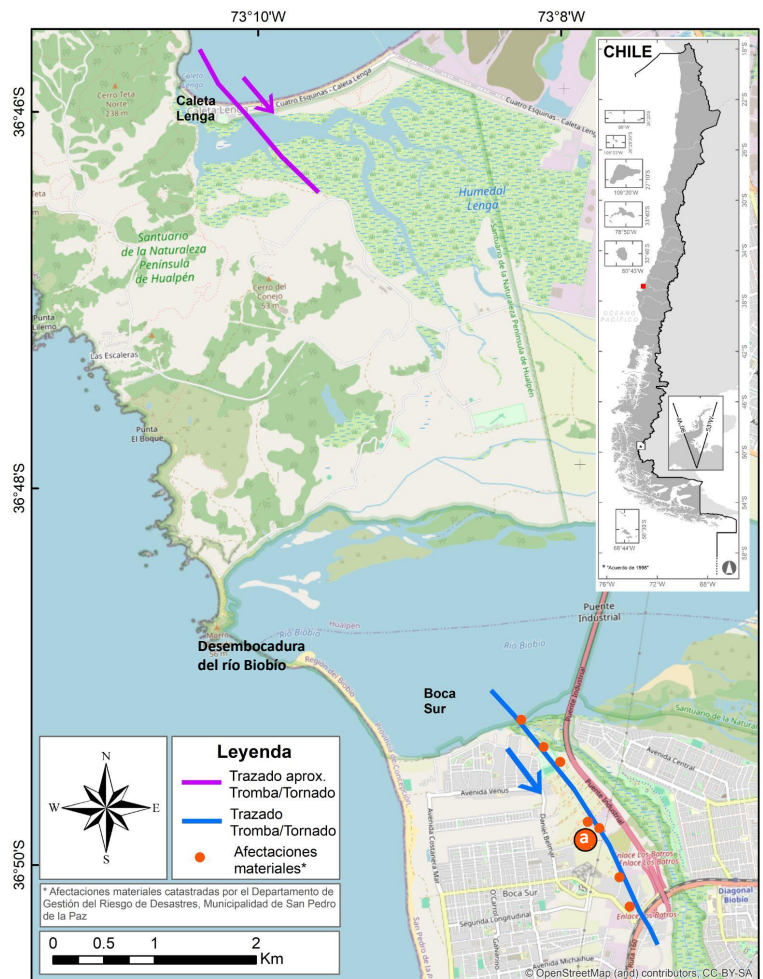


Figura 3. Trazado estimado para eventos de trombas/tornados registrados entre comunas de Hualpén y San Pedro de la Paz el día 20 de septiembre de 2025. Principales daños corresponden a voladuras de techos y caída de árboles. (a) Flechas indican sentido general de desplazamiento. Imágenes gentileza de Departamento de Gestión del Riesgo de la Municipalidad de San Pedro de la Paz.

5. Análisis sinóptico

El día 20 de septiembre, las condiciones meteorológicas estuvieron definidas por un régimen de marcada inestabilidad en el sector post-frontal de un sistema frontal primario. Según la carta sinóptica de las 12 UTC (Figura 4a), tras el paso de la banda frontal principal hacia el norte, se estableció una masa de aire frío que permitió el desarrollo de un frente frío secundario. Este entorno post-frontal, caracterizado por una atmósfera inestable, propició el desarrollo de los fenómenos convectivos severos registrados en las regiones del Maule y del Biobío. La permanencia de esta configuración ciclónica hacia las 00 UTC del día 21 (Figura 4b), favoreció el mantenimiento de la actividad eléctrica intensa durante el resto de la jornada y la madrugada del día 21.

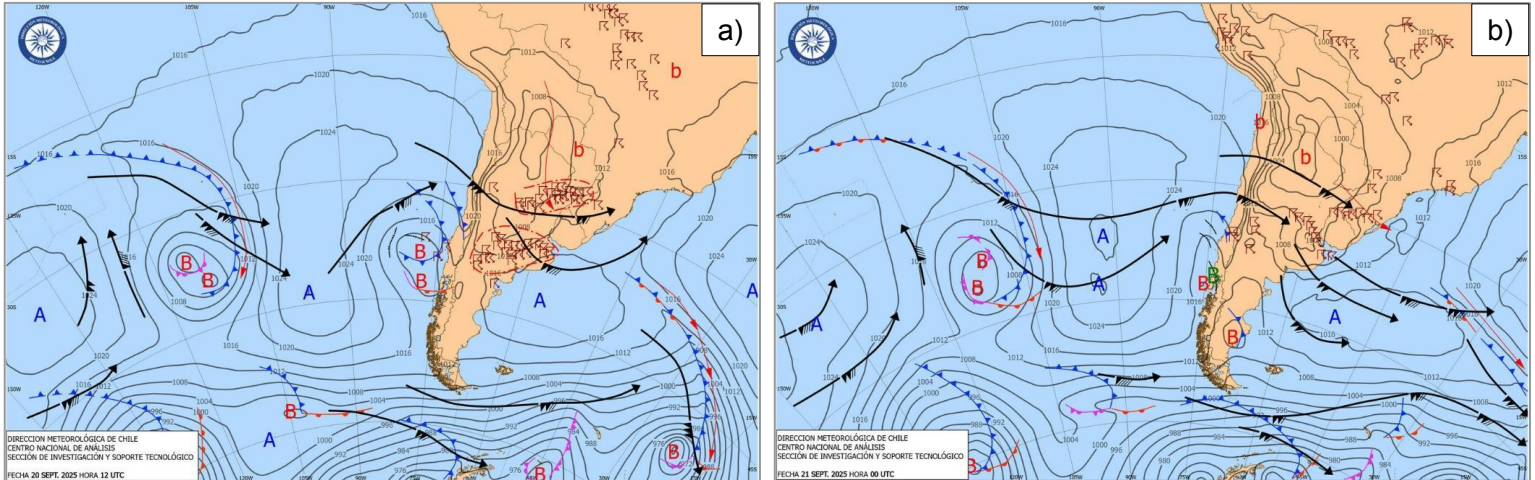


Figura 4. Carta sinóptica del día 20 de septiembre del año 2025 a las 12 UTC (a) y 21 de septiembre a las 00 UTC (b). Las líneas grises corresponden al campo de presión a nivel del mar; las letras “B” a centros de baja presión; las letras “A” a centros de alta presión; y las flechas negras, a las corrientes en chorro. Para consultar la simbología completa, ir a https://archivos.meteochile.gob.cl/portaldmc/cartaSinoptica/docs/presentacion_carta_sinoptica.pdf

A nivel de altura (300 hPa), la Figura 5 evidencia un proceso de segregación atmosférica, manifestado por la presencia de una vaguada con una isohipsa cerrada sobre la zona centro y sur de Chile. Esta configuración generó una circulación ciclónica, asociada a un núcleo de vorticidad potencial aislado de su fuente de origen polar, con valores que alcanzan las 7 UVP. Corriente arriba, se observa otra vaguada en proceso de segregación, lo que supone un nuevo quiebre de onda de Rossby.

Este patrón en los niveles altos de la tropósfera pudo haber contribuido a la inestabilización de la masa de aire post-frontal en superficie y del frente frío secundario sobre Chile, proporcionando el soporte dinámico necesario para el desarrollo de la actividad severa. Esta situación también se corrobora con el trazado de la carta sinóptica emitida por la DMC para las 00 UTC del día 21 de septiembre, en donde se muestra una baja segregada sobre la zona sur del país (Figura 4b, letra “B” en color verde).

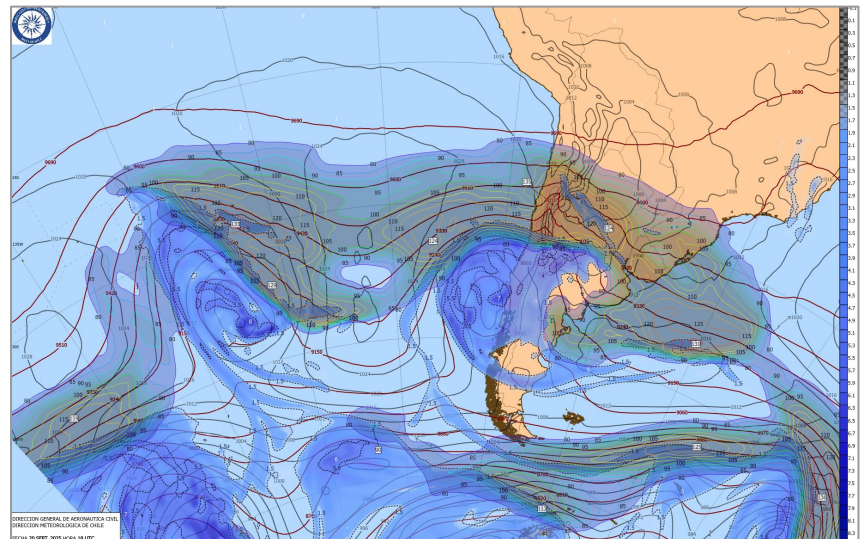


Figura 5. Campo de altura geopotencial (líneas continuas burdeas), viento asociado a la presencia de las corrientes en chorro (líneas continuas de colores), y vorticidad potencial (áreas de color azul), todas al nivel de 300 hPa. Además, se encuentra graficada la presión en superficie (líneas continuas grises). La información corresponde a la salida a las 00 UTC del día 20 de septiembre de 2025 del modelo GFS (0.25° x 0.25°), válida para el mismo día a las 18 UTC.

Analizando los niveles bajos de la tropósfera, la Figura 6 presenta el campo de temperatura potencial del bulbo húmedo, parámetro fundamental para identificar la transición de masas de aire. Se observa el predominio de una masa de aire de origen polar sobre la zona centro-sur de Chile y el Pacífico adyacente, caracterizada por valores bajos del bulbo húmedo (tonos azules). Sobre esta masa post-frontal, el campo de vorticidad relativa exhibe una apariencia granular o “ruidosa”. Esta señal es indicativa de forzantes de mesoescala, sugiriendo la presencia de celdas convectivas organizadas y líneas de inestabilidad. Estos elementos, circundantes a la baja presión principal, proporcionan el mecanismo de ascenso necesario para el desarrollo de nubosidad cumuliforme.

Se destacan dos ejes de transporte de humedad asociados a los frentes primario (rojo) y secundario (naranja), los cuales contribuyen a realzar la inestabilidad atmosférica en niveles bajos.

Las imágenes satelitales ratifican la marcada inestabilidad atmosférica prevaleciente durante el evento. En la Figura 7a, el producto RGB Masas de Aire revela abundante nubosidad cumuliforme sobre el centro y sur de Chile, vinculada a un pronunciado plegamiento de la tropopausa (evidenciado por tonalidades anaranjadas o cafés). Esta señal satelital es consistente con la configuración sinóptica analizada, confirmando el soporte termodinámico proporcionado por la vaguada en altura.

El análisis del producto SPC (Figura 7b) muestra bandas convectivas organizadas con orientación noroeste-sureste y temperaturas del tope (cima de la nube) que en algunos sectores alcanzaron los -50°C , cifra cercana a los -58°C documentados en el brote de tornados del 2019 (Vicencio et al., 2021). Esta estructura nubosa confirma un entorno de inestabilidad severa.

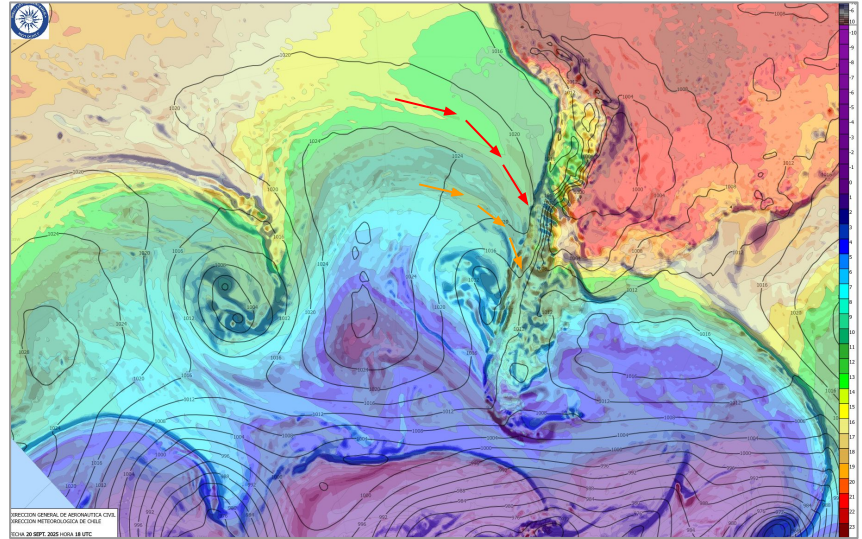


Figura 6. Condiciones en niveles bajos: presión en superficie (líneas negras), temperatura potencial del bulbo húmedo (colores sólidos) y vorticidad relativa (identificada en núcleos discretos de color azul oscuro). Las flechas representan los ejes de transporte de humedad que alimentaron a la banda frontal principal (rojo) y secundaria (naranja), identificados mediante un análisis complementario de Agua Precipitable (PW) y flujo de viento en niveles bajos. La información corresponde al modelo GFS, válida para el día 20 de septiembre del año 2025 a las 18 UTC.

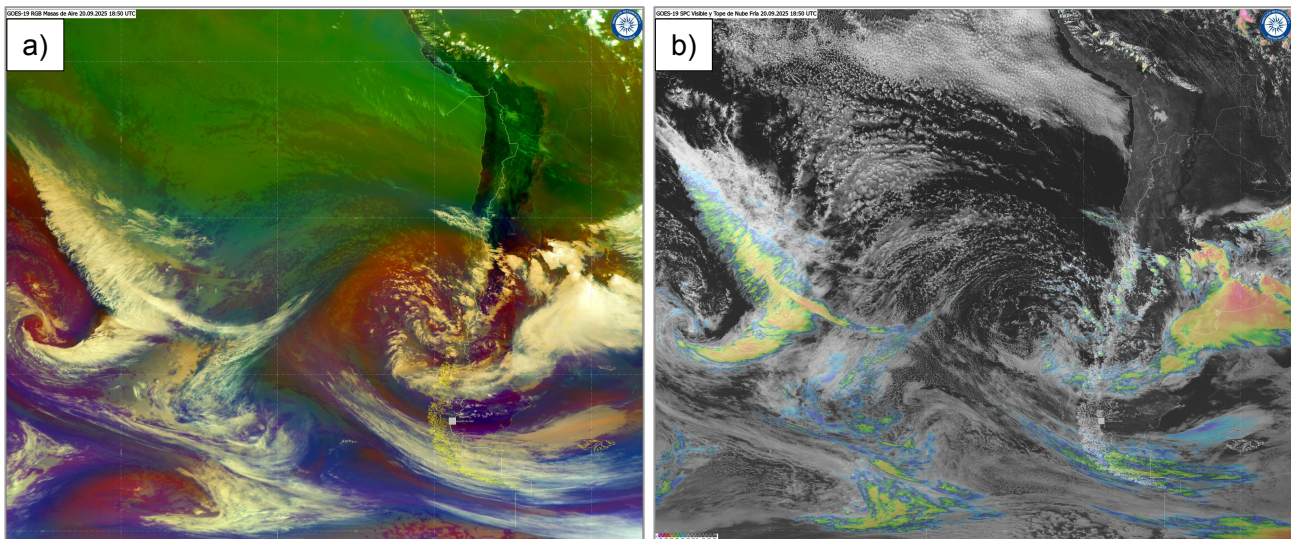


Figura 7. (a) Producto RGB Masas de Aire (18:50 UTC), diseñado para el análisis de la altura de la tropopausa y la identificación de masas de aire. (b) Producto SPC (Superposición) Topes de Nubes Frías (18:50 UTC), utilizado para caracterizar el desarrollo vertical y la severidad convectiva. Detalles técnicos de los productos en:

(a) https://archivos.meteochile.gob.cl/portaldmc/imgsat/pdf/producto_1.pdf

(b) https://archivos.meteochile.gob.cl/portaldmc/imgsat/pdf/producto_9.pdf

6. Análisis mesoescalar

Si bien los índices TT (≈ 57) y K (> 28) indicaron condiciones inestables, su capacidad para diagnosticar tanto tormentas como tornados en Chile es limitada. Esta restricción responde a la carencia de investigaciones con umbrales locales validados, lo que, sumado a la omisión de la dinámica del viento en su formulación, dificulta la identificación precisa de eventos severos en el contexto nacional. Frente a estas limitaciones, estudios recientes (Caballero & Rondanelli, 2025) enfatizan que los entornos tornádicos en el centro-sur del país resultan de una interacción crítica entre la flotabilidad y la cizalladura profunda. Bajo este enfoque, el parámetro VGP, equivalente al índice CAPE-SHEAR (Vicencio et al., 2021), posibilita la identificación de áreas potenciales para el desarrollo de estos fenómenos severos en el territorio nacional.

Índice CAPE-SHEAR

Siguiendo esta línea de análisis, el índice CAPE-SHEAR es utilizado en la DMC como una herramienta complementaria para evaluar el potencial tornádico. Este índice integra la energía potencial convectiva disponible (CAPE) con la cizalladura vertical del viento en niveles bajos (SHEAR), representando de este modo la interacción entre la inestabilidad atmosférica y la dinámica del viento.

Aunque se trata de un índice de carácter genérico y aún en fase de evaluación experimental, permite identificar condiciones ambientales favorables para el desarrollo de nubes tornádicas. No obstante, su presencia no garantiza la formación de tornados, ya que estos fenómenos dependen también de factores de escala local que escapan a la resolución de los modelos numéricos globales, tales como el GFS o el ECMWF.

En la Figura 8 se presenta el campo de CAPE-SHEAR correspondiente al 20 de septiembre a las 18 UTC, el cual mostró efectivamente la presencia de altos valores sobre la zona centro y sur de Chile, superando el umbral de $120 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (líneas rojas), con una franja de mayor magnitud extendida desde el sur de la región del Ñuble hasta el norte de la región de Los Lagos, alcanzando un máximo de $210 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ubicado sobre la región de la Araucanía.

Las comunas de Linares, Hualpén y San Pedro de la Paz quedaron fuera del área de máximos valores de CAPE-SHEAR (marcadores rojos). En contraste, la región de la Araucanía (donde se registró el máximo de este índice) no presentó reportes de tornados. Esta discrepancia refleja la complejidad del pronóstico y el carácter multicausal de estos eventos. Al respecto, una hipótesis adicional sugiere que la baja magnitud de los tornados (categorizados como EF0) dificulta su detección mediante índices de diagnóstico convencionales.

Por ello, resulta fundamental continuar investigando y refinando este índice, con el fin de mejorar su precisión espacial y temporal. Esto permitiría fortalecer la confiabilidad del pronóstico, acotar con mayor exactitud las áreas de mayor probabilidad tornádica y reducir la ocurrencia de falsos positivos.

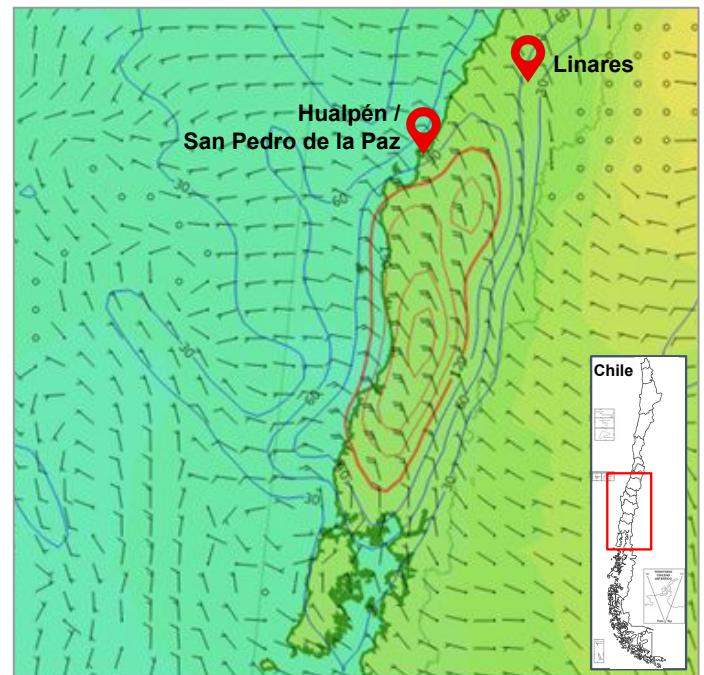


Figura 8. Campo del índice CAPE-SHEAR (líneas azules representan los contornos cada $30 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ y las líneas rojas el umbral de $120 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$), y cizalle entre 1000 y 850 hPa (barbas de viento). La información corresponde a la salida a las 00 UTC del día 20 de septiembre de 2025 del modelo GFS ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$), válida para el mismo día a las 18 UTC. Los marcadores en color rojo indican las zonas donde ocurrieron los tornados de Linares, Hualpén y San Pedro de la Paz.

Perfil vertical atmosférico

Para validar la estructura termodinámica de los entornos descritos, se analizaron los perfiles atmosféricos simulados, utilizando a Linares como referencia (Figura 9). Durante la mañana (12 UTC), las simulaciones mostraron una atmósfera saturada y ausencia de CAPE (Figura 9a). Hacia la tarde (18 UTC), los perfiles evidenciaron una marcada inestabilización por calentamiento en niveles bajos; el CAPE alcanzó los 324 J kg^{-1} en Linares (Figura 9b) y valores de hasta 400 J kg^{-1} en Hualpén / San Pedro de la Paz, coincidiendo con un leve incremento en la intensidad del viento cerca de la superficie (bajo los 925 hPa). La persistencia de una baja altura de la tropopausa observada en ambos horarios (12 y 18 UTC), sugiere que el plegamiento de la tropopausa se habría producido previamente (durante la madrugada), actuando como un forzante dinámico de escala sinóptica anterior al desarrollo de los eventos en superficie.

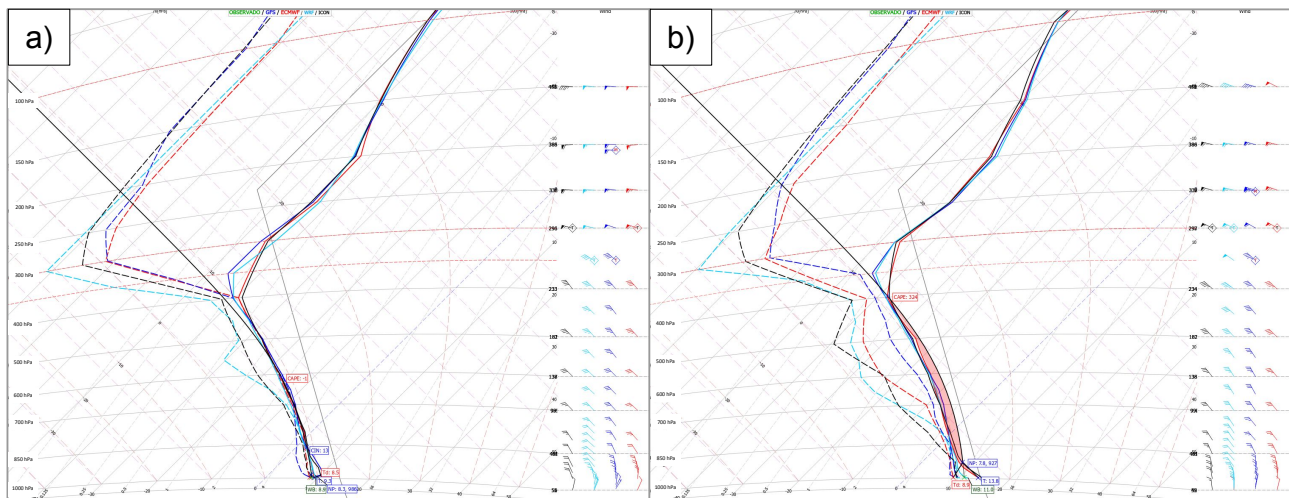


Figura 9. Comparación de radiosondas pronosticados para la ciudad de Linares considerando: el modelo GFS (azul), el modelo ICON (negro), el modelo ECMWF (rojo) y el modelo WRF sur (celestes) para el día 20 de septiembre a las 12 UTC (a) y 18 UTC (b).

Imágenes satelitales

La imagen satelital ratifica la inestabilización atmosférica descrita anteriormente (análisis de los perfiles verticales). En la Figura 10 se muestra la imagen satelital infrarroja correspondiente a las 18:50 UTC, donde se aprecia el extenso desarrollo de nubosidad convectiva distribuida desde la región Metropolitana hasta la región de Los Lagos.

Además, se identifican tormentas eléctricas locales (cruces amarillos), en concordancia con la inestabilidad en el sector post-frontal frío de este evento. La intensidad y organización de estas celdas reflejan una dinámica atmosférica propicia para fenómenos severos, aunque con la particularidad de presentar una menor cantidad de núcleos convectivos eléctricos que en eventos tornádicos previos.

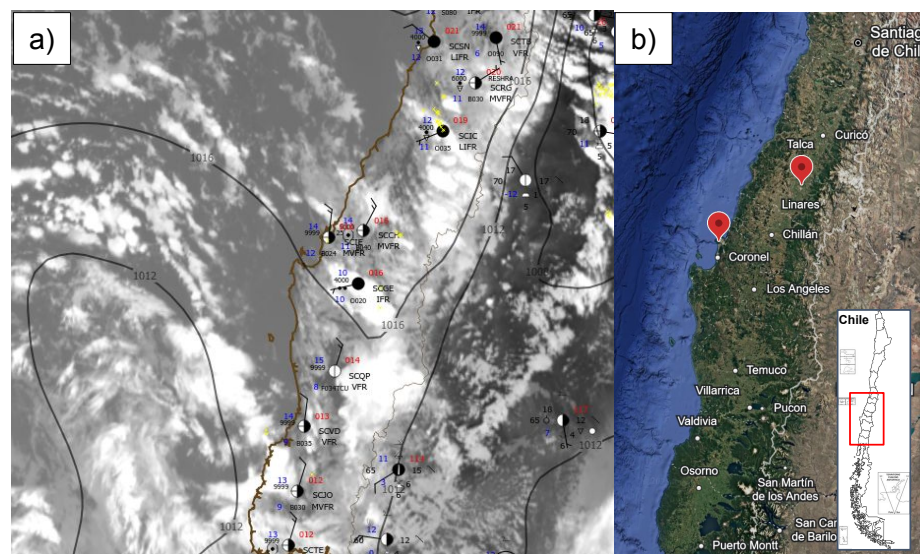


Figura 10. (a) Imagen satelital correspondiente al canal 13 (infrarrojo) del sensor ABI del GOES-19, correspondiente al día 20 de septiembre de 2025 a las 18:50 UTC; sobrepuesta con descargas eléctricas ocurridas durante la última hora (17:50-18:50 UTC, en cruces amarillos), estaciones ploteadas y presión a nivel del mar proveniente del modelo GFS $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. (b) Mapa de Chile. Los marcadores rojos indican las zonas donde se registraron los tornados.

Considerando las condiciones favorables para la convección profunda descritas previamente, se realizó un seguimiento cronológico de las nubes generadoras de los eventos severos. La Figura 11 muestra una secuencia de imágenes (canal 13, GOES-19) cada 30 minutos, que permite analizar la evolución de los sistemas entre las 16:00 y 18:30 UTC.

Dado que los tornados de Hualpén y San Pedro de la Paz se originaron a partir de una misma nube convectiva, su evolución dinámica responde a un único sistema generador y, por tanto, serán analizados de manera conjunta. Esta celda alcanzó su máximo desarrollo entre las 17:00 y 17:30 UTC, presentando una estructura robusta con topes inferiores a los -45°C . Un aspecto morfológico clave es que el vórtice en superficie se posicionó en el flanco trasero del área de topes nubosos fríos, en concordancia con el vector de desplazamiento de la tormenta y con lo descrito por Vicencio et al. (2021).

En contraste, la nube generadora del tornado de Linares, ocurrido alrededor de las 18:00 UTC, presentó dimensiones más reducidas y topes que solo descendieron hasta -30°C . Estas características sugieren que incluso celdas de menor envergadura y menor profundidad térmica pueden generar tornados bajo regímenes post-frontales.

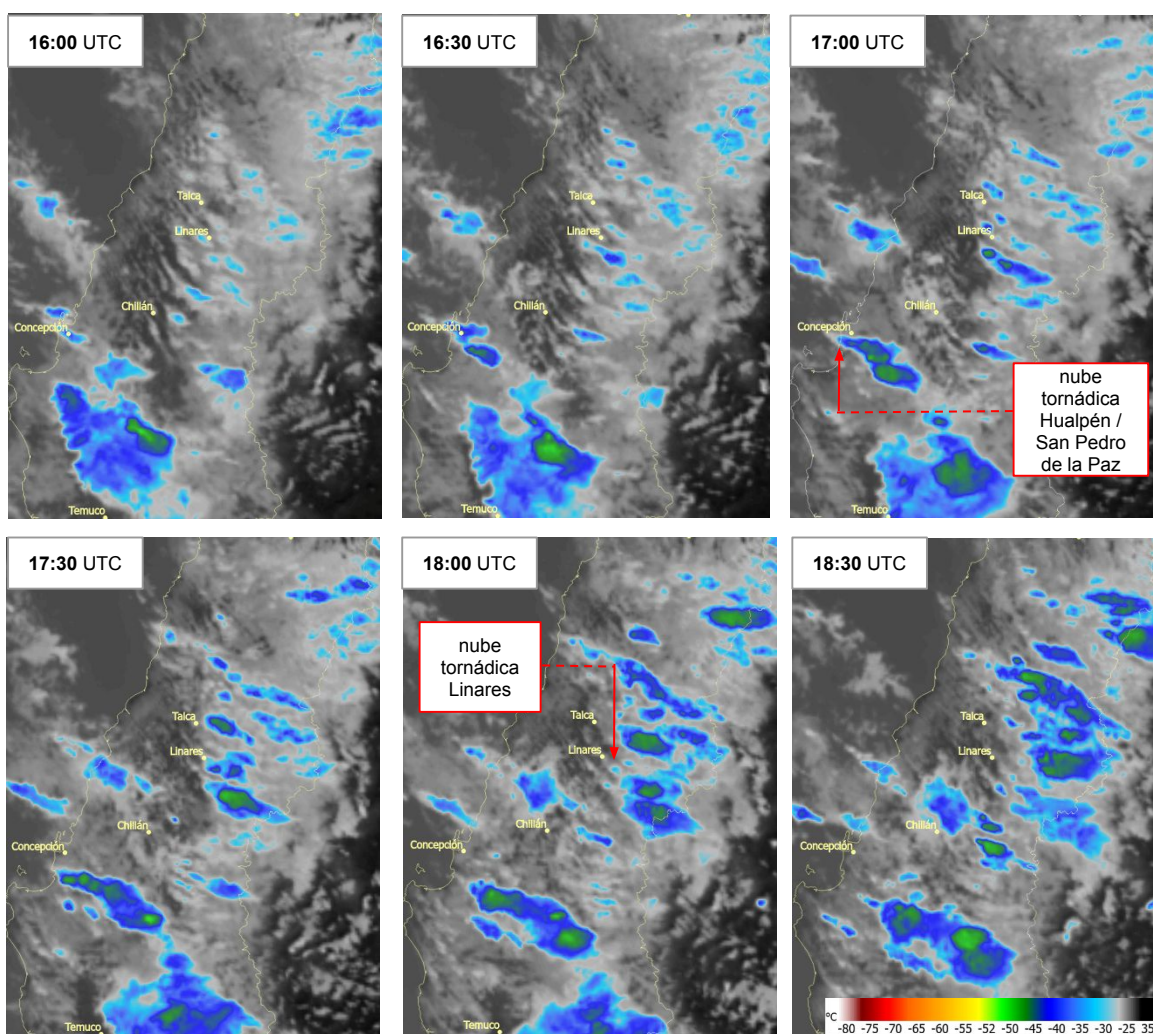


Figura 11. Secuencia de imágenes satelitales (canal 13, GOES-19) cada 30 minutos, con topes nubosos realzados. Los cuadrantes destacan la ubicación de las nubes generadoras en los horarios más próximos a la ocurrencia de los eventos de Hualpén y San Pedro de la Paz (17:10 UTC) y Linares (17:50 UTC).

Un aspecto dinámico relevante es la coexistencia de dos procesos. Primero, el desplazamiento de celdas individuales desde el noroeste hacia el sureste a una velocidad aproximada de 70 km/h, gobernado por el flujo en niveles medios (700-500 hPa). Segundo, la propagación sistemática de conglomerados o líneas de inestabilidad desde el suroeste hacia el noreste, vinculada al avance del sistema de baja presión hacia el continente.

Tal como se mencionó anteriormente, la celda generadora del tornado en Linares destacó por sus dimensiones reducidas. Al examinar la secuencia de alta resolución de la Figura 12, se ratifica esta situación, identificándose un *cumulus congestus* en fase de desarrollo rápido, que destaca por su pequeño tamaño respecto a los sistemas convectivos de los alrededores. La alta resolución espacial (500 m) y temporal (10 min) permite confirmar que, al momento exacto del evento (17:50 UTC), la estructura carecía del yunque característico de un *cumulonimbus* maduro, manteniendo topes nubosos cercanos a los -20°C y una total ausencia de descargas eléctricas.

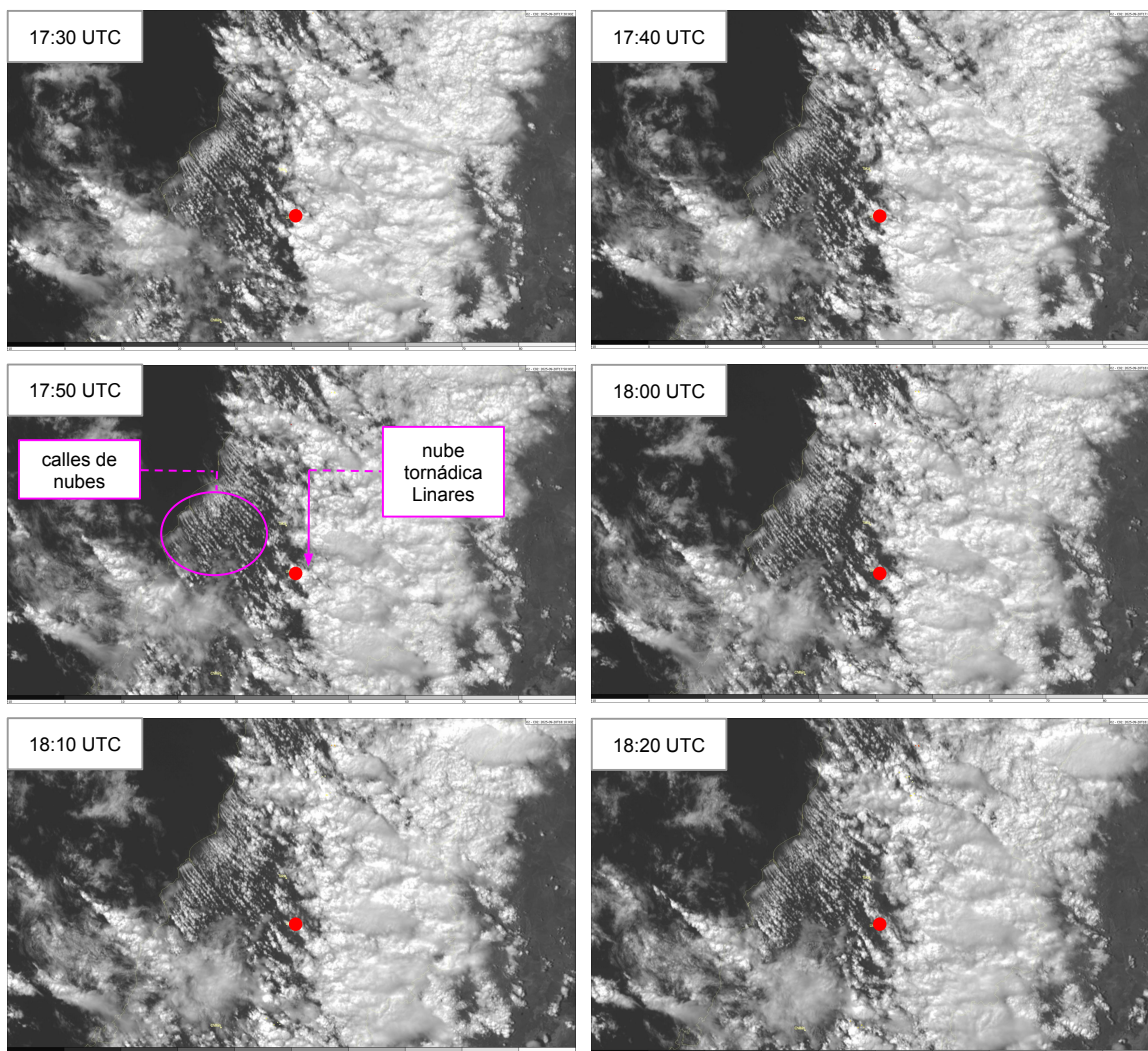


Figura 12. Secuencia de imágenes satelitales correspondiente al canal 2 del sensor ABI (GOES-19), mostrando imágenes visibles de alta resolución (500 m). La secuencia va desde las 17:30 UTC a las 18:20 UTC, cada 10 minutos. La ciudad de Linares está destacada con un punto rojo. El cuadrante destaca la nube tornádica y las calles de nubes.

En contraste con la celda de Linares, hacia el sector cordillerano se observó un desarrollo convectivo significativamente más robusto e intenso, zona donde se concentró la mayor actividad eléctrica de la jornada.

Un elemento revelador de las condiciones dinámicas imperantes es la presencia del fenómeno conocido como “calles de nubes”, claramente visible al oeste de Linares. Estas bandas nubosas paralelas, alineadas con la dirección del flujo rector, son una manifestación visual de rollos convectivos horizontales que se desarrollan dentro de la capa límite atmosférica bajo condiciones de fuerte cizalladura vertical del viento (Chen et al., 2022). La organización y persistencia de estas estructuras podrían confirmar la existencia de un flujo intenso y sostenido de componente noroeste, el cual aportó la vorticidad horizontal necesaria en los niveles bajos. Aunque la estación meteorológica más cercana (“Escuela de Artillería Linares”) registró vientos débiles y calmas previas (Figura 17, Anexo B), la presencia de estas bandas nubosas sugiere que inmediatamente por encima de la superficie se habría desarrollado un flujo intenso y organizado.

7. Herramienta en estudio para el pronóstico de áreas tornádicas

La DMC se encuentra en un proceso de validación de nuevas herramientas para el pronóstico de tornados, empleando el modelo de mesoescala WRF (*Weather Research and Forecasting*), bajo una configuración optimizada por la institución para el territorio nacional. Esta iniciativa busca transitar hacia una vigilancia meteorológica más precisa, adaptada a las particularidades de los eventos severos en Chile.

En este contexto, se evalúa el índice compuesto SHERBE/STP (Marín et al., 2024), diseñado para estimar la probabilidad de ambientes tornádicos mediante la integración de los parámetros SHERBE (Sherburn & Parker, 2014) y STP (Thompson et al., 2003; Coffer et al., 2019). Cabe precisar que esta herramienta se encuentra en una etapa de validación experimental, por lo que su implementación en los protocolos operativos institucionales aún está bajo estudio.

Índice compuesto SHERBE/STP

El índice SHERBE (*Severe Hazards in Environments with Reduced Buoyancy*) fue desarrollado para identificar ambientes favorables a la formación de tornados no supercelulares, especialmente en condiciones de baja inestabilidad (bajo CAPE) y alta cizalladura vertical del viento. Por otra parte, el índice STP (*Significant Tornado Parameter*) es ampliamente utilizado para discriminar entre ambientes tornádicos y no tornádicos, fundamentándose en la interacción entre inestabilidad, cizalladura y otros parámetros convectivos.

De acuerdo con Marín et al. (2024), quienes establecen umbrales específicos para ambos índices ($SHERBE \geq 1$ y $STP \leq -0.3$), la coexistencia de estos valores permite identificar ambientes favorables para tornados en Chile.

En la Figura 13 se presenta el campo pronosticado del índice compuesto SHERBE/STP para el 20 de septiembre a las 13 UTC. Las áreas destacadas en rojo delimitan los entornos con mayor potencial de desarrollo tornádico según los umbrales locales propuestos. Al realizar un análisis comparativo entre este parámetro y el índice CAPE-SHEAR, se observa que el índice SHERBE/STP presenta una mayor discriminación espacial. El índice compuesto concentró sus máximos exclusivamente sobre el sector litoral de la provincia de Concepción. Sin embargo, el modelo solo capturó estas condiciones a las 13 UTC, cuatro horas antes de que se produjera el evento.

Por otro lado, el buen desempeño del modelo en la delimitación espacial del índice sobre Hualpén / San Pedro de la Paz se traduce en una omisión total del evento de Linares, donde la simulación no generó señal sobre la zona afectada. Este comportamiento responde a que el evento de Linares ocurrió en una escala y con una intensidad que no lograron ser capturadas por los umbrales específicos del índice.

Debido a lo expuesto, es necesario continuar en la evaluación de ambos parámetros a fin de definir con precisión sus alcances técnicos, sus restricciones y su aplicabilidad real en la predicción de eventos tornádicos.

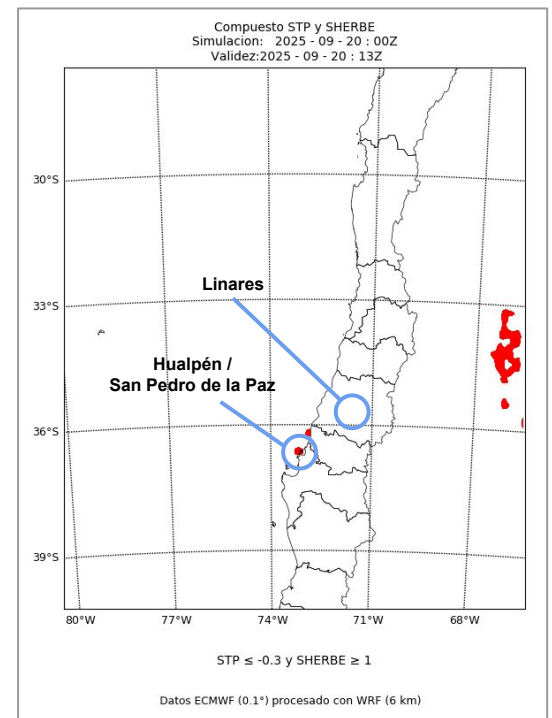


Figura 13. Campo pronosticado del índice Compuesto SHERBE/STP (en color rojo). La información corresponde a la salida a las 00 UTC del día 20 de septiembre de 2025 del modelo WRF (6 km), inicializado con condiciones de borde del modelo ECMWF (0.1° × 0.1°) válida para el mismo día a las 13 UTC.

8. Discusión diagnóstica: Limitaciones e hipótesis de clasificación dinámica de los eventos

La taxonomía de tornados propuesta (Figura 1) se plantea como un marco conceptual interpretativo de la génesis tornádica, y no como un sistema de detección ni un procedimiento formal de análisis retrospectivo. En este sentido, su aplicación depende de la información observacional y ambiental disponible, así como de la resolución espacio-temporal de dicha información.

Para los servicios meteorológicos que cuentan con áreas de investigación, la incorporación de esta taxonomía resulta fundamental para avanzar en la comprensión del “por qué” ocurrió el fenómeno, y no limitarse únicamente al “qué ocurrió” (o al reporte descriptivo de lo ocurrido). Este enfoque es consistente con los marcos conceptuales de investigación propuestos por Schultz et al. (2019), quienes sostienen que la verdadera comprensión física de los procesos atmosféricos surge de la integración sinérgica entre la evidencia observacional, la teoría y el diagnóstico dinámico. Bajo esta idea, el análisis retrospectivo permite aportar un valor científico adicional y fortalece las competencias técnicas en la institución.

En el contexto nacional, la información actualmente disponible (incluidas las observaciones satelitales, mediciones de superficie y de altura, así como productos de modelos numéricos) permite caracterizar adecuadamente el entorno atmosférico y la evolución general de los sistemas convectivos. Sin embargo, esta información no permite analizar directamente los procesos dinámicos que ocurren al interior de las nubes, los cuales son relevantes para distinguir entre los distintos mecanismos de génesis tornádica propuestos en la taxonomía (Figura 1 y Anexo A).

La identificación de estas estructuras internas se beneficia del uso de observaciones de alta resolución; un ejemplo representativo corresponde al radar meteorológico, que permite caracterizar la estructura tridimensional de las nubes convectivas e identificar patrones de rotación interna (Figura 14).

Esta información resulta clave para discriminar entre superceldas, sistemas convectivos cuasi-lineales u otras estructuras convectivas menos profundas. En ausencia de este tipo de observaciones, la estructura interna de la nube solo puede inferirse indirectamente a partir de observaciones ambientales y evidencias en superficie, lo que introduce incertidumbre en la determinación del mecanismo de la génesis tornádica.



Figura 14. Esquema comparativo de las principales herramientas utilizadas en el pronóstico de tornados y limitaciones existentes en Chile.

A pesar de las restricciones observacionales mencionadas, la convergencia de diversas fuentes de información (que integra registros de superficie, análisis de patrones nubosos y el análisis dinámico del entorno) nos permite proponer al menos una hipótesis para la clasificación de los eventos del 20 de septiembre. Este ejercicio busca diferenciar el origen físico del tornado de Linares frente a los fenómenos registrados en el litoral de la Provincia de Concepción, utilizando como marco referencial los procesos de génesis establecidos en la taxonomía de Agee (2014).

Con el fin de sistematizar la información disponible, se elaboró una tabla comparativa (Tabla 1) en la que se sintetizan las principales características ambientales, evidencias en superficie y antecedentes reportados para cada caso. Esta síntesis

Tabla 1. Tabla comparativa de las principales características observacionales, ambientales y de impacto de los eventos tornádicos analizados.

	TORNADO Hualpén / San Pedro de la Paz	TORNADO Linares
Región	Biobío	Maule
Comuna	Hualpén / San Pedro de la Paz	Linares
Zona geográfica	Litoral	Interior Valle Longitudinal
Sector de referencia	Caleta Lengua y Desembocadura / Puente Industrial y Boca Sur	Villa María del Valle
Hora inicio (HL)	~14:10	~14:50
Longitud trayectoria (km)	~2 / ~3	~3
Ancho de daño (m)	No estimada	~120
Categoría EF	EFU / EF0	EF0
Afectación a personas	No informado / 2 viviendas y 1 inmueble no residencial	94 viviendas y aprox. 4 inmuebles no residenciales

CARACTERÍSTICAS OBSERVACIONALES

	Régimen post-frontal HSLC	Régimen post-frontal HSLC
Contexto sinóptico	Régimen post-frontal HSLC	Régimen post-frontal HSLC
Tipo nube	Celda convectiva profunda y organizada	Cúmulo congestus de rápido desarrollo
Tope de nube (°C)	< -45	~ -20
Presencia de yunque	Presente	Ausente
Actividad eléctrica	Presente en fase madura	No observada
Ubicación vórtice	Flanco trasero del área de topes más fríos	Flanco trasero del área de topes más fríos
CAPE* (J kg⁻¹)	~400	~324
CAPE-SHEAR** (m² s⁻²)	~80 x 10 ⁻³	~50 x 10 ⁻³

CARACTERÍSTICAS CONVECTIVAS Y AMBIENTALES

permite contrastar los elementos observados con los mecanismos físicos propuestos en la taxonomía, facilitando la formulación de la hipótesis diagnóstica sobre la clasificación dinámica de los eventos.

Para los eventos de Hualpén y San Pedro de la Paz, la observación de una celda convectiva profunda con presencia de yunque, actividad eléctrica y un vórtice situado en el flanco trasero de los topes nubosos sugiere una organización atmosférica compleja. Estas evidencias permiten clasificar los fenómenos como tornados de Tipo 1 (supercelulares) o Tipo 2 (asociados a QLCS). Bajo este análisis, se descartan las subcategorías vinculadas exclusivamente a entornos de huracanes o tormentas tropicales (especies 1c y 2f), dadas las restricciones climáticas del territorio nacional. En consecuencia, la dinámica de estos vórtices se asociaría de forma más probable con superceldas clásicas, mini-superceldas de tope bajo o mesovórtices generados en líneas convectivas (en particular, líneas de inestabilidad post frontales frías en Chile).

En cuanto al evento de Linares, se observó una nube convectiva de rápido desarrollo, sin presencia de yunque ni actividad eléctrica, aunque con daños concentrados en superficie y valores de CAPE moderados (en el contexto chileno). La falta de estructuras organizadas apunta a un mecanismo de escala local (Tipo 3). Específicamente, el fenómeno se asociaría a un Tipo 3a (tromba terrestre), presentando rasgos de Tipo 3c (embudo de aire frío) en su fase inicial. Esta clasificación es consistente con el estiramiento de vorticidad vertical bajo una celda de microescala.

En todos los casos, la ausencia de observaciones directas de la estructura interna de las tormentas impide confirmar la presencia de mesociclones u otras estructuras dinámicas características de tormentas supercelulares. En consecuencia, las clasificaciones aquí propuestas constituyen hipótesis diagnósticas fundamentadas en la evidencia disponible y permanecen sujetas a revisión.

* Salida de las 00 UTC del día 20 de septiembre de 2025 del modelo WRF (6 km), inicializado con condiciones de borde del modelo ECMWF (0.1° x 0.1°) válida para el mismo día a las 18 UTC.

** Salida de las 00 UTC del día 20 de septiembre de 2025 del modelo GFS (0.25° x 0.25°) válida para el mismo día a las 18 UTC.

9. Conclusiones

Los tornados ocurridos el 20 de septiembre de 2025 en Linares y en el litoral de la provincia de Concepción se desarrollaron bajo un mismo contexto sinóptico, caracterizado por un régimen post-frontal de alta cizalladura y baja a moderada inestabilidad (HSLC). Este tipo de entorno, previamente documentado para el centro-sur de Chile, se confirma como un escenario recurrente y favorable para la ocurrencia de tornados durante la estación fría, reforzando su relevancia dentro de la climatología nacional.

La recopilación de evidencia en terreno, junto con el análisis principalmente de registros audiovisuales permitió clasificar los tornados de Linares y San Pedro de la Paz como eventos de categoría EF0, mientras que el fenómeno observado en Hualpén fue categorizado como EFU, debido a la ausencia de daños verificables. Si bien corresponden a tornados de baja intensidad en términos internacionales, su impacto resulta significativo en el contexto nacional, considerando la vulnerabilidad de la infraestructura y el entorno frente a este tipo de fenómenos.

Desde el punto de vista dinámico, el evento estuvo asociado a una vaguada con isohipsa cerrada en niveles medios y altos sobre la zona centro-sur de Chile, acompañada de un plegamiento de la tropopausa. Esta configuración aportó soporte relevante en altura favoreciendo la inestabilización de la masa de aire post-frontal. En niveles bajos, la interacción entre forzantes de mesoescala y una intensa cizalladura vertical configuró un entorno propicio para la generación y el estiramiento de vorticidad en superficie, condición clave para la génesis tornádica.

El análisis morfológico de las nubes generadoras evidenció diferencias estructurales entre los eventos. Mientras que los sectores de Hualpén y San Pedro de la Paz se asociaron a una celda convectiva relativamente profunda y organizada, el evento de Linares se originó a partir de un *cumulus congestus* de desarrollo limitado, sin actividad eléctrica ni topes nubosos extremadamente fríos. Esta observación demuestra que, bajo regímenes HSLC, un desarrollo convectivo intenso no es un requisito excluyente para la ocurrencia de tornados, lo que representa un desafío adicional para su identificación y pronóstico.

El contraste entre la estructura convectiva y el impacto observado pone de manifiesto las limitaciones de los índices diagnósticos convencionales. Herramientas más específicas, como el CAPE-SHEAR y los índices compuestos tipo SHERBE/STP, presentan mayor capacidad para identificar entornos favorables, aunque aún requieren adaptación y validación para el contexto chileno, considerando la resolución de los modelos numéricos, la calibración de umbrales locales y el rol del relieve característico del país, junto con la cizalladura en niveles bajos.

Si bien Chile dispone de diversas herramientas para el monitoreo y estudio de fenómenos meteorológicos severos (incluyendo imágenes satelitales, radiosondeos, observaciones de superficie y modelos de mesoescala), la capacidad predictiva asociada a tornados continúa siendo limitada, evidenciando la necesidad de fortalecer metodologías de análisis y sistemas de observación.

Se incorporó una taxonomía de tornados basada en mecanismos de génesis como marco conceptual para avanzar hacia una interpretación dinámica de su formación, constituyendo un primer paso hacia la incorporación sistemática de análisis de génesis tornádica en el contexto nacional. Los eventos de Hualpén y San Pedro de la Paz presentaron características compatibles con tornados asociados a sistemas convectivos organizados, por lo que se considera plausible su clasificación como Tipo 1 (asociado a superceldas) o Tipo 2 (asociado a sistemas convectivos lineales, QLCS), mientras que el evento de Linares mostró rasgos consistentes con vórtices de escala local, planteándose su posible clasificación como Tipo 3. Estas asignaciones deben entenderse como hipótesis diagnósticas, dada la imposibilidad de observar directamente la dinámica interna de las tormentas.

En este contexto, resulta fundamental avanzar en la incorporación de herramientas especializadas para el estudio del tiempo severo. Contar con nuevos sistemas de observación permitiría obtener información del interior de las tormentas, identificar estructuras convectivas organizadas y patrones de rotación en tiempo casi real, contribuyendo a una caracterización más robusta de los mecanismos de génesis tornádica y a la emisión de alertas tempranas más oportunas en Chile.

10. Referencias

- Agee, E., & Jones, E. (2009). Proposed conceptual taxonomy for proper identification and classification of tornado events. *Weather and Forecasting*, 24(3), 609–617. <https://doi.org/10.1175/2008WAF2222163.1>
- Agee, E. M. (2014). A revised tornado definition and changes in tornado taxonomy. *Weather and Forecasting*, 29(5), 1256–1258. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-14-00058.1>
- Barrett, B. S., Marín, J. C., & Jacques-Coper, M. (2020). A multiscale analysis of the tornadoes of 30–31 May 2019 in south-central Chile. *Atmospheric Research*, 236, 104811. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104811>
- Caballero-Morán, V., & Rondanelli, R. (2025). Tornado seasonality in central-southern Chile. *Geophysical Research Letters*, 52(1), e2024GL110900. <https://doi.org/10.1029/2024GL110900>
- Chen, J., Wang, H., Li, X., Painemal, D., Sorooshian, A., Thornhill, K. L., Robinson, C., & Shingler, T. (2022). Impact of meteorological factors on the mesoscale morphology of cloud streets during a cold-air outbreak over the western North Atlantic. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79(11), 2863–2879. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-22-0034.1>
- Coffer, B. E., Parker, M. D., Thompson, R. L., Smith, B. T., & Jewell, R. E. (2019). Using near-ground storm-relative helicity in supercell tornado forecasting. *Weather and Forecasting*, 34(5), 1417–1435. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0115.1>
- Glickman, T. S. (Ed.). (2000). *Glossary of meteorology (2nd ed.)*. American Meteorological Society.
- Golden, J. H. (2003). Waterspouts. En J. R. Holton (Ed.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (pp. 2510–2525). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00451-6>
- Marín, J. C., Gutiérrez, F., Gensini, V. A., Barrett, B. S., Pozo, D., Jacques-Coper, M., & Veloso-Aguila, D. (2024). Climatological aspects of notable tornado events in Chile. *Monthly Weather Review*, 152(8), 1803–1819. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-23-0249.1>
- Schultz, D. M., Bosart, L. F., Colle, B. A., Davies, H. C., Dearden, C., Keyser, D., Martius, O., Roebber, P. J., Steenburgh, W. J., Volkert, H., & Winters, A. C. (2019). Extratropical cyclones: A century of research on meteorology's centerpiece. *Meteorological Monographs*, 59, 16.1–16.56. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHIS-D-18-0015.1>
- Sherburn, K. D., & Parker, M. D. (2014). Climatology and ingredients of significant severe convection in high-shear, low-CAPE environments. *Weather and Forecasting*, 29(4), 854–877. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-13-00041.1>
- Thompson, R. L., Edwards, R., Hart, J. A., Elmore, K. L., & Markowski, P. (2003). Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Weather and Forecasting*, 18(6), 1243–1261. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<1243:CPSWSE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<1243:CPSWSE>2.0.CO;2)
- Vicencio, J., Rondanelli, R., Campos, D., Valenzuela, R., Garreaud, R., Reyes, A., Padilla, R., Abarca, R., Barahona, C., Delgado, R., & Nicora, G. (2021). The Chilean tornado outbreak of May 2019: Synoptic, mesoscale, and historical contexts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(3), E611–E634. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0218.1>
- Palma, G., Valladares, L., Brito, D., García, A., & Otárola, D. (2025). Informe técnico: Trombas marinas y tornados del 20 de septiembre de 2025 en Caleta Lengua, San Pedro de la Paz y Linares: evaluación sinóptica y de daños. *Red Geocientífica de Chile*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17400718>
- Municipalidad de San Pedro de la Paz. (2025). *Informe Técnico Evaluación de Riesgos “Tromba Marina”*. San Pedro de la Paz, Chile.
- @sepulinales. (2025, 20 de septiembre). Video que muestra una tromba marina en Linares [Video]. X. <https://chat.google.com/dm/gqnJUgAAAEE/jbwwSEX5UdI/jbwwSEX5UdI?cls=10>
- ADN Radio. (2025, 20 de septiembre). *Registran tromba marina en la región del Biobío* [Video]. YouTube. <https://youtu.be/GTzoWI2-Wd4>

11. Anexos

Anexo A. Taxonomía detallada de los fenómenos y diferencias entre tornados y trombas

La comprensión científica de los fenómenos tornádicos ha experimentado una importante evolución. Históricamente, las definiciones limitaban el término "tornado" únicamente a vórtices dependientes de nubes *cumulonimbus*. Sin embargo, los organismos meteorológicos referentes han actualizado sus modelos conceptuales para reflejar la realidad física de estos vórtices, sin dejar de lado los criterios que facilitan su identificación operativa y observacional. En este sentido, tanto la OMM como la AMS han convergido en la eliminación de la exigencia exclusiva de un *cumulonimbus*, adoptando una definición que permite categorizar a los tornados como vórtices que penden de cualquier tipo de nube cumuliforme. Esta apertura terminológica, anticipada por Glickman (2000), reconoce que la presencia de glaciación o actividad eléctrica no son requisitos determinantes para la validación física y operativa de un tornado.

Esta convergencia de criterios entre la OMM y la AMS establece que los elementos esenciales para identificar un tornado son tres:

1. **Rotación:** Presencia de una columna de aire rotatoria.
2. **Conexión a la base de la nube:** El vórtice debe estar físicamente conectado a la base de una nube cumuliforme (*cumulus congestus* o *cumulonimbus*).
3. **Contacto con la superficie:** Evidenciado, a menudo, por una nube de escombros, polvo o spray de agua en la superficie (tierra o agua).

La comprensión de los fenómenos tornádicos bajo la óptica de Agee (2014) se fundamenta en la definición adoptada por la AMS y la OMM, donde el tornado se conceptualiza como un sistema dinámico y termodinámico integrado. Bajo esta premisa, el vórtice no constituye un elemento aislado, sino una columna de aire forzada por el estiramiento de vorticidad vertical a través de una corriente ascendente local intensa. Físicamente, la flotabilidad convectiva de la nube es la fuente de energía que sustenta la rotación, permitiendo que el fenómeno se mantenga activo bajo un soporte dinámico local constante. Por consiguiente, el contacto efectivo con la superficie y la conexión física con la base de una nube cumuliforme se establecen como los requisitos fundamentales para validar su existencia.

Bajo estos aspectos, la taxonomía de los eventos de tornados se realiza de manera objetiva en función del **mecanismo físico de formación** y del **tipo de nube generadora**. Este enfoque dinámico no sustituye a la identificación operativa-observacional, sino que la complementa, permitiendo una caracterización científica que trasciende la superficie de desplazamiento. Este enfoque permitió a Agee (2014) precisar la propuesta original de Agee & Jones (2009), resultando en la exclusión de los gustnadoes (vórtices de racha) los cuales carecen de una conexión funcional con la dinámica interna de la nube. Bajo esta lógica, y con el fin de evitar confusiones en la comunicación pública, se descartan de la categoría de tornado dos tipos de fenómenos comunes que no cumplen con los requisitos físicos:

- Vórtice de racha (Gustnadoes): Vórtices que se forman a lo largo del frente de racha de una tormenta debido a la inestabilidad de cizalladura, pero que no están vinculados a la dinámica interna de la nube.
- Remolinos de polvo (Dust Devils): Fenómenos de superficie generados por el calentamiento diferencial del suelo, sin presencia de nubosidad asociada.

La taxonomía propuesta por Agee (2014) organiza los fenómenos tornádicos en tres categorías fundamentales según el mecanismo físico de su formación. Para facilitar la comprensión de estos procesos, la Figura 1 presenta un esquema conceptual, intuitivo y didáctico, que permite visualizar la relación entre la nube generadora y el vórtice resultante. Un esquema simplificado del desglose mostrado en la Figura 1 se observa en la Figura 15.

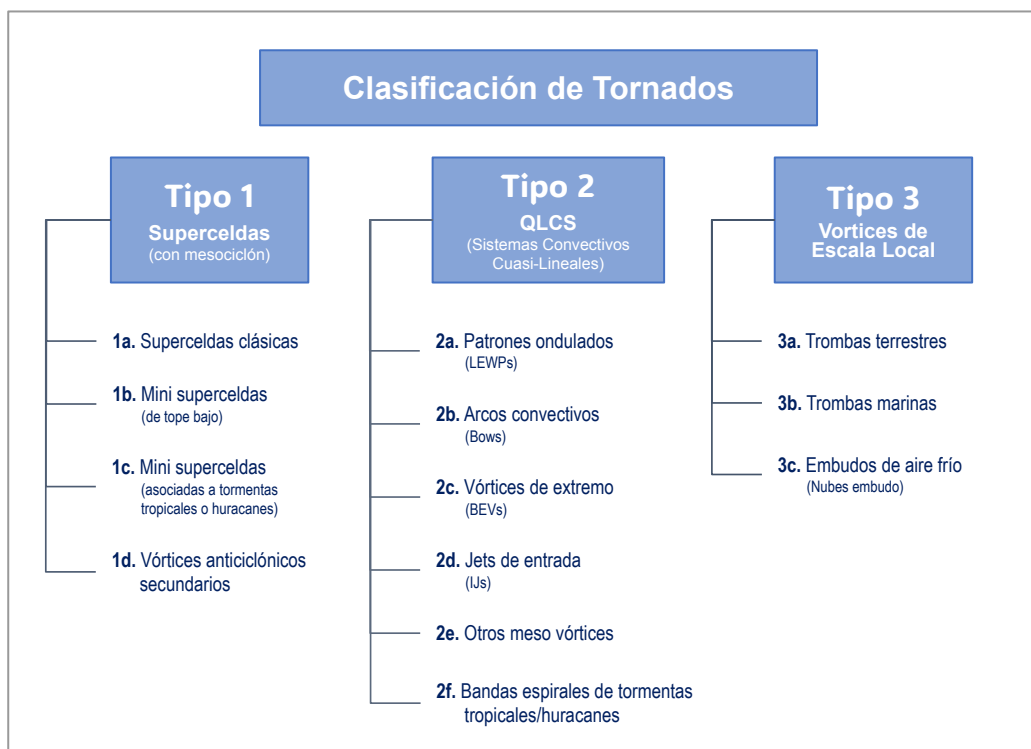


Figura 15. Esquema jerárquico simplificado de la clasificación de tornados según su mecanismo de formación. Adaptado y traducido de Agee (2014).

Tipo 1: Tornados asociados a Superceldas

Esta categoría representa los fenómenos de mayor complejidad dinámica. Se originan a partir de una corriente ascendente rotatoria profunda y persistente denominada mesociclón. La génesis del tornado (Tipo 1a-1d) resulta generalmente de la interacción entre esta rotación en niveles medios, la corriente ascendente local fuerte y la corriente descendente del flanco trasero, la cual ayuda a transportar la vorticidad hacia la superficie.

Tipo 2: Tornados asociados a QLCS

Corresponden a vórtices generados dentro de Sistemas Convectivos Cuasi-Lineales (Quasi-Linear Convective Systems). A diferencia de las superceldas aisladas, estos tornados (Tipo 2a-2f) se forman a lo largo de líneas de inestabilidad, frentes de racha o ecos en arco (*bow echoes*). Su formación está ligada a procesos de mesoescala donde el aire frío de la tormenta (poza de aire frío) interactúa con el cizalle del viento, generando mesovórtices que pueden intensificarse hasta el nivel de superficie.

Tipo 3: Vórtices de escala local

Esta categoría es de especial relevancia para la discusión desarrollada previamente. Los tornados Tipo 3 (especies 3a-3c) consideran fenómenos que no dependen de sistemas organizados de gran escala, basando su génesis en la interacción entre la convección local y el cizalle en niveles bajos. Dicha dinámica posibilita que incluso nubes sin fase de glaciación (como los *cumulus congestus*) puedan generar tornados mediante el estiramiento de vorticidad, un proceso clave para entender los eventos de microescala. Bajo este marco, y tal como se ha mencionado previamente, se reconoce que las trombas marinas y las terrestres comparten una misma raíz física, lo que permite tratarlas bajo el término genérico de “tornado” independientemente de si el contacto ocurre sobre agua o tierra, y como también lo define la OMM y la AMS.

Cabe destacar, que el fenómeno de trombas efectivamente está enmarcado dentro de la categoría de tornados del Tipo 3, y por lo tanto, las trombas marinas sí corresponden a tornados desde un punto de vista genérico. No obstante la unificación conceptual, es imperativo profundizar en la naturaleza dinámica de esta categoría mediante dos interrogantes fundamentales:

¿Qué define a un tornado de Tipo 3? y ¿cuál es el rol de las trombas marinas dentro de esta clasificación?

A diferencia de las categorías precedentes, los tornados de Tipo 3 se caracterizan por la ausencia de mesociclones profundos o de sistemas convectivos organizados de gran escala (QLCS). Su génesis responde a un mecanismo físico distinto: el estiramiento vertical de la vorticidad local preexistente (Figura 16). Este proceso es activado por el desarrollo de nubes cumuliformes que, al poseer corrientes ascendentes intensas pero localizadas, actúan concentrando la rotación ambiental en un punto específico de la superficie. Este modelo físico resulta fundamental, ya que explica la formación de tornados bajo nubes de menor desarrollo vertical, como los *cumulus congestus*. Dicho mecanismo permite que el vórtice se consolide independientemente de la presencia de actividad eléctrica o de que la nube alcance la fase de glaciación (presencia de hielo). Bajo esta categoría de tornados de escala local, se agrupan tres especies principales: las trombas marinas (*waterspouts*), las trombas terrestres (*landspouts*) y las nubes embudo (*funnel clouds*).

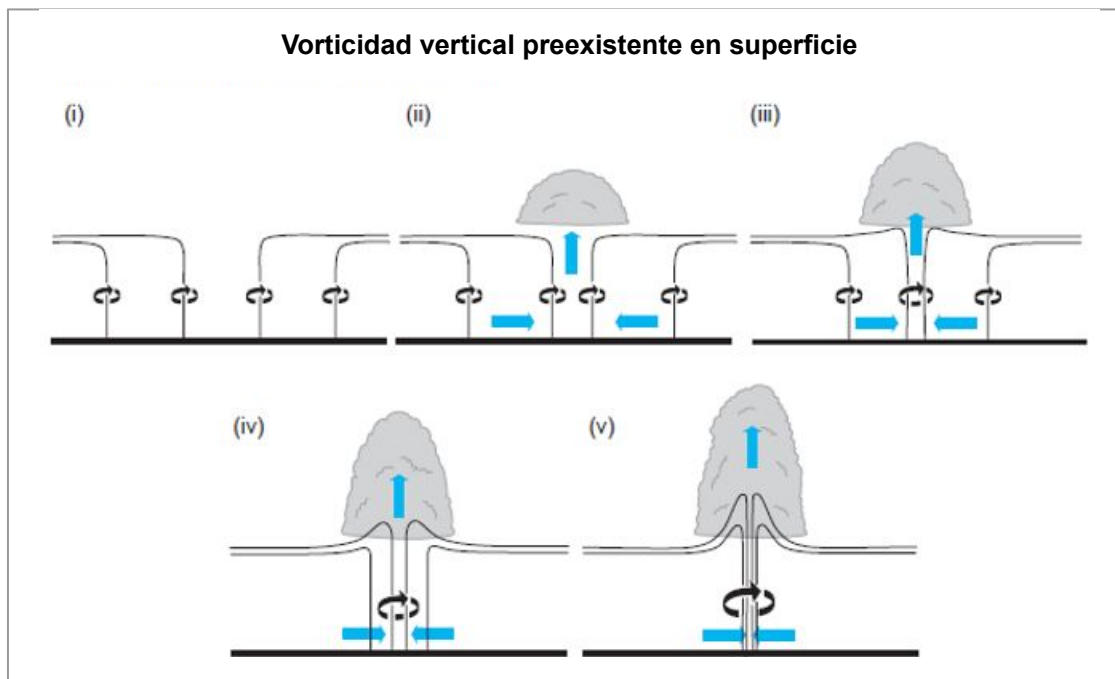


Figura 16. Representación esquemática del mecanismo de estiramiento de la vorticidad vertical preexistente en superficie bajo una corriente ascendente convectiva. La rotación aumenta (desde “i” hasta “v”) a medida que las líneas de vórtice convergen bajo la corriente ascendente (aquí, la separación entre las líneas de vórtice es inversamente proporcional a la magnitud de la vorticidad). Fuente: traducido de Markowski & Richardson (2011).

En este marco, Golden (2003) define a la tromba marina como un intenso vórtice columnar que ocurre sobre un cuerpo de agua y pende de una nube cumuliforme. Esta definición converge con la taxonomía de Agee (2014), quien las clasifica como tornados de Tipo 3. Bajo la misma lógica física, se ratifica que la distinción observacional entre trombas marinas y terrestres es estrictamente superficial y no dinámica, dependiendo exclusivamente del entorno de desplazamiento del vórtice. Mientras que desde un punto de vista termodinámico, las trombas pueden ser marinas (*waterspouts*) o terrestres (*landspouts*).

Un aspecto interesante planteado por Golden (2003) es que la gran mayoría de las trombas marinas corresponden a las denominadas de “buen tiempo”, las cuales requieren altos valores de humedad absoluta para su formación. Estas ocurren comúnmente en sectores tropicales y subtropicales, no se asocian a tiempo severo, ni generan daños significativos, tendiendo a disiparse rápidamente al tocar tierra. No obstante, según este autor, existe un grupo reducido de estos fenómenos que se originan bajo regímenes de convección severa, denominados como “trombas marinas tornádicas”. En estos casos, el vórtice podría responder más bien a los mecanismos de los tornados Tipo 1 y 2 (superceldas o QLCS) pero desarrollados sobre un cuerpo de agua. Dicha situación es poco frecuente, dado que los valores máximos de Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE) suelen localizarse sobre tierra debido al calentamiento diurno más efectivo.

Anexo B. Análisis de registros de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA)

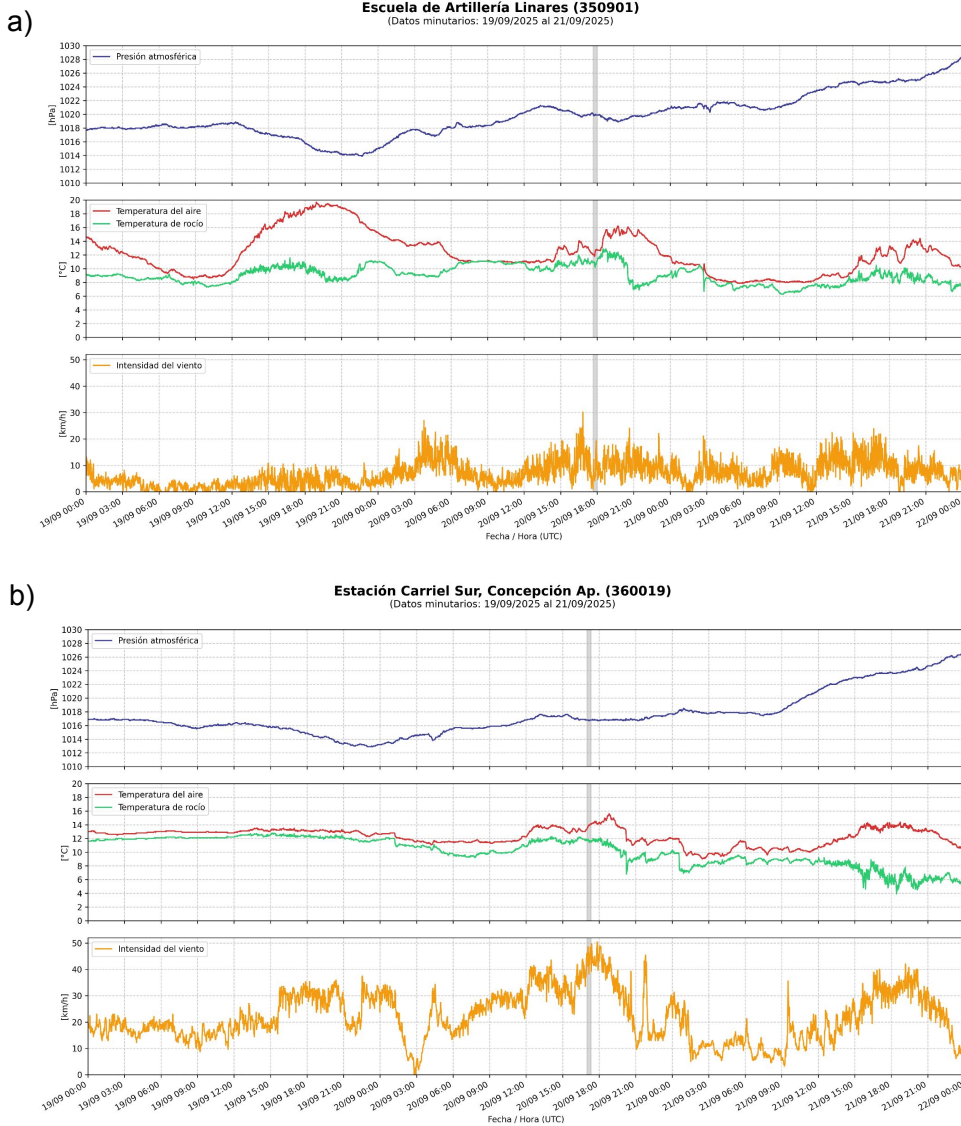


Figura 17. Evolución temporal de parámetros meteorológicos en superficie durante los eventos del 20 de septiembre de 2025. Se presentan datos minutaros de las estaciones (a) Linares y (b) Carriel Sur. El recuadro gris destaca el periodo de paso estimado de los vórtices en las cercanías de los sensores.

Se analizaron los registros minutaros de las estaciones meteorológicas “Escuela de Artillería Linares” y “Carriel Sur, Concepción Ap.” para contextualizar el flujo dinámico local.

En Linares, el meteograma (Figura 17a) registra vientos débiles y calmas predominantes. Al momento del tornado (aproximadamente 17:50 UTC), la intensidad en la estación no superó los 20 km/h, confirmando que el sensor a 1.3 km de la trayectoria, permaneció fuera del radio de influencia del vórtice, lo que es consistente con la naturaleza microescala del fenómeno, desarrollado en un entorno de baja energía cinemática superficial.

A las 17:10 UTC (hora aproximada del paso del tornado), la estación Carriel Sur registró 43 km/h (Figura 17b), ratificando un flujo ambiental mucho más dinámico que el observado en Linares. Esta intensidad, registrada a 8 km de la trayectoria, indica que el tornado estuvo inmerso en una tormenta significativamente más energética, lo cual puede ser consistente con el mayor desarrollo de la nubosidad observada en las imágenes satelitales (Figura 11).

El análisis de la tendencia barométrica a escala temporal sinóptica revela que los tornados impactaron en un periodo de presión más alta respecto al mínimo alcanzado a las 22:00 UTC (19:00 HL) del día 19. Dicho comportamiento barométrico es un indicador clave de que los eventos ocurrieron bajo un régimen post-frontal, caracterizado por aire frío inestable desplazándose tras el sistema frontal primario.