

EFFECTO DEL TRANSPORTE HORIZONTAL DE HUMEDAD SOBRE AMBIENTES POTENCIALMENTE TORNÁDICOS EN CHILE CENTRO-SUR

Javier Campos^{1,2}, Martín Jacques-Coper^{1,2,3}, Julio C. Marín^{4,5}, Bradford S. Barrett⁹, Lucía Scaff¹, Raúl Valenzuela^{2,6}, Diana Pozo^{4,5}, Felipe Gutiérrez⁴, Daniel Veloso-Águila⁷, Vittorio A. Gensini⁸

jcampos2020@udec.cl. Autor/a correspondiente.

¹Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción, Chile.

²Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Concepción, Chile.

³Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental COPAS Coastal, Universidad de Concepción, Chile.

⁴Departamento de Meteorología, Universidad de Valparaíso, Chile.

⁵Centro de Estudios Atmosféricos y Cambio Climático (CEACC) U. de Valparaíso, Chile.

⁶Instituto de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins, Chile.

⁷Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

⁸Department of Earth, Atmosphere, and Environment, Northern Illinois University, DeKalb, Illinois.

⁹Independent Scholar, Raleigh (USA)

Palabras claves: tornados, parámetros convectivos, clasificación

1) INTRODUCCIÓN

Los tornados en Chile son un fenómeno meteorológico poco frecuente, aunque no inexistente. Debido a su baja recurrencia, gran parte de la población chilena no los considera dentro de las amenazas meteorológicas que afectan al país. Sin embargo, en los días 30 y 31 de mayo de 2019, se produjo un enjambre de tornados que afectó la zona centro-sur de Chile, entre 35°S y 37°S aproximadamente. En particular, dos destructivos tornados impactaron las ciudades de Los Ángeles y Concepción, marcando un hito en la literatura científica dedicada a Chile y propiciando nuevas investigaciones sobre este fenómeno, por una parte con foco en los eventos de 2019 (Barrett et al., 2020; Marín et al., 2021; Vicencio et al., 2021) y, por otra, en el estudio de aspectos climatológicos de tornados en Chile (Marín et al., 2024; Caballero-Morán y Rondanelli, 2025). Además, gracias a los esfuerzos de Bastías-Curivil et al. (2024) se tiene una base de datos de tornados y trombas marinas que cuenta con más de 80 registros desde 1554 a 2023 en su versión más reciente, los cuales fueron obtenidos a partir de revisiones de textos históricos, prensa y redes sociales.

2) OBJETIVOS Y METODOLOGÍAS GENERALES

El objetivo de esta investigación es abordar el análisis de los ambientes potencialmente tornádicos, con foco en el efecto que podría tener el transporte horizontal de humedad, caracterizado por el Vapor de Agua Integrado Verticalmente (IVT). El IVT es una variable que potencialmente incide tanto en la inestabilidad de la columna como en la estructura vertical del viento cercano a la superficie (dos principales factores que inducen tornados), y, en el centro-sur de Chile, las mayores anomalías de IVT están asociados a Ríos Atmosféricos (RAs) que impactan el continente. Los RAs tienen una mayor frecuencia en Chile centro-sur durante JJA (Viale et al., 2018), y muchas veces están asociados a eventos extremos de precipitación (Valenzuela y Garreaud, 2019).

Por una parte, se describen las condiciones sinópticas **asociadas a eventos de tornados** registrados en el listado de Bastías-Curivil et al. (2024). Por medio de un método de clasificación jerárquico –aplicado a los campos de anomalías de IVT, geopotencial en 500hPa y presión a nivel medio del mar (MSLP), en el instante más cercano a la hora del tornado–, se

clasifican los 40 eventos de tornados en 3 grupos principales. Para cada uno de los 3 grupos, se obtuvo la serie temporal promedio de los parámetros convectivos extraídos para cada evento en el punto de grilla más cercano. Los parámetros son: Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE), el cizalle vertical del viento horizontal entre 0-1km (BS01km), la Helicidad Relativa a la Tormenta en los primeros 500m (SRH500m) y el Parámetro de Tornado Significativo (STP).

Por otra parte, se estudian fechas en las que los RAs tocan tierra en distintas bandas latitudinales del área de estudio (32-36°S, 36-40°S y 40-44°S). A diferencia del párrafo anterior, estas fechas **no están asociadas necesariamente a eventos de tornados**.

Finalmente, se realizan compuestos espaciales de IVT y parámetros convectivos en función de la banda latitudinal a la que llega cada RA y de su inclinación en el momento de tocar tierra, empleando la metodología de Valenzuela y Garreaud (2019).

3) RESULTADOS PRELIMINARES Y FIGURAS

La *Figura 1* muestra los resultados obtenidos para uno de los tres principales grupos obtenidos en el método de clasificación. En 1a muestra el promedio espacial de las anomalías de IVT y MSLP georeferenciadas alrededor de los tornados (triángulo rojo invertido). Este compuesto presenta una anomalía ciclónica de presión con centro al sur-oeste del tornado, y un máximo del IVT justo al norte. En 1b se observa como el transporte de humedad se maximiza alrededor de la hora t_0 , y en su estructura vertical se evidencian dos núcleos, alrededor de 900hPa y 700hPa. En 1c se observan parámetros convectivos y el IVT (y sus componentes zonal y meridional) que se maximizan en magnitud cerca de t_0 . La señal del STP muestra un mínimo muy localizado alrededor de la hora t_0 y los demás parámetros aumentan de forma gradual hasta alcanzar su máximo cerca de la hora de los tornados.

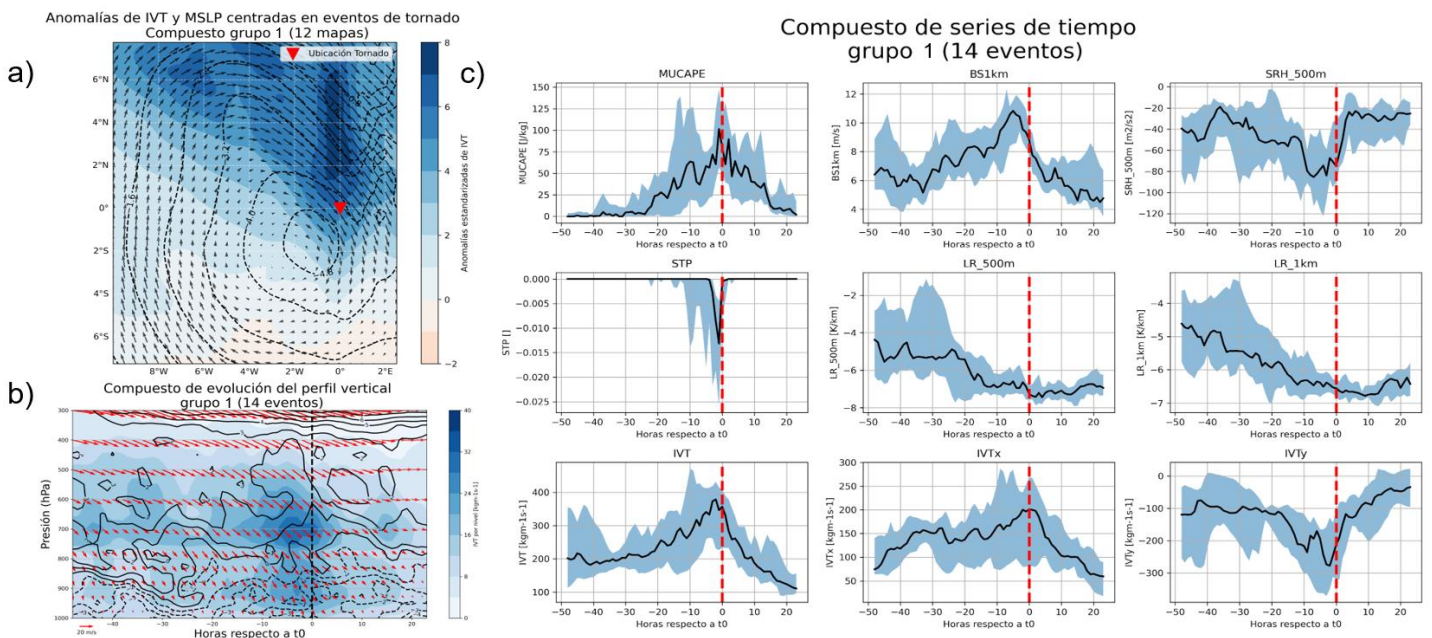


Figura 1: Señales correspondientes a uno de los grupos obtenidos por el método de clasificación jerárquica. En el panel a) se muestra el compuesto espacial de las anomalías del IVT (colores) y presión a nivel del mar (contornos) en el instante más cercano a la ocurrencia del tornado, t_0 . No se muestra la línea de costa debido a georeferenciación alrededor de los tornados. El panel b) muestra la evolución temporal del perfil de transporte de humedad y la inestabilidad cuantificada como $\frac{d\theta_e}{dz}$ en horas previas y posteriores a t_0 . La subfigura c) muestra la evolución temporal de la mediana (línea negra) y rango intercuartil (sombreado) de los parámetros convectivos.

La *Figura 2* muestra el análisis de compuestos para días asociados a la llegada de RAs al continente. Se tienen resultados tanto para eventos inclinados y zonales, discriminando en función del ángulo con el que tocan tierra, pero acá se muestran solo los mapas para eventos **inclinados** de RAs. En 2a se promedian los eventos que llegan entre 32-36°S, mostrando una señal de STP negativa (favorable para el potencial tornádico) al sur del punto de llegada de los RAs. En 2b (36-40°S) la señal de STP muestra dos mínimos, uno dentro de la región de llegada de los RAs, y el otro más al sur pero aledaño a la costa. En 2c (40-44°S) la señal promedio de STP también muestra dos mínimos, pero ambos dentro de la región de llegada de los RAs, uno cerca de la costa, y el otro en sectores cordilleranos.

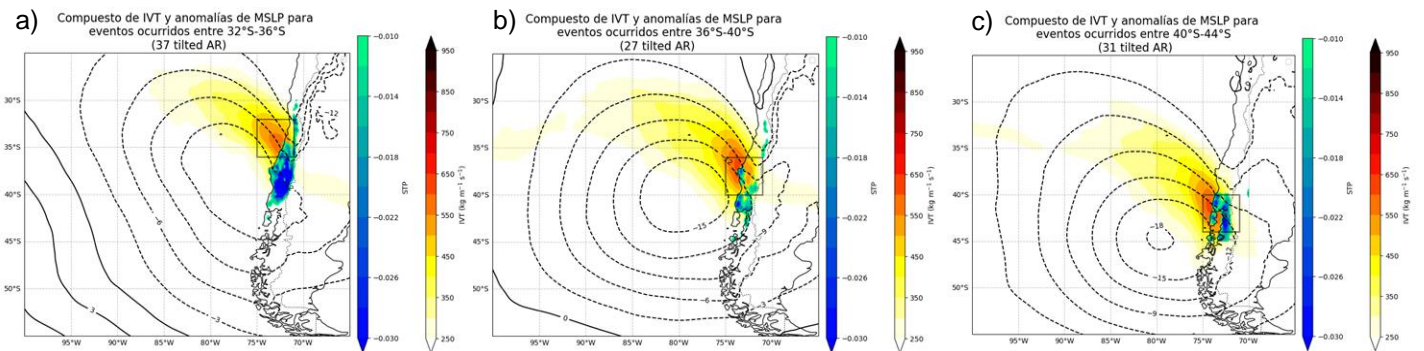


Figura 2: Compuestos de IVT (colores anaranjados), anomalías estandarizadas de MSLP (contornos) y STP (escala verde-azul) durante RAs inclinados ocurridos en las distintas bandas latitudinales. En los paneles a), b) y c) se muestran los compuestos de las regiones 32-36°S, 36-40°S y 40-44°S, respectivamente. Las cajas muestran la banda latitudinal asociada a cada región.

AGRADECIMIENTOS

- Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)2 (ANID/FONDAP/1523A0002).
- NLHPC (ECM-02)
- “Multi-scale study of environments favorable for severe thunderstorms and tornadoes in Chile” (FONDECYT 1211898)

REFERENCIAS

- Bastías-Curivil, C., Rondanelli, R., Vicencio, J., Matus, F., Caballero-Morán, V., Muñoz, F., et al. (2024):** Tornadoes and Waterspouts in Chile / Tornados y Trombas en Chile. figshare. Dataset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25119566.v4>
- Barrett, B. S., Marin, J. C., y Jacques-Coper, M. (2020):** A multiscale analysis of the tornadoes of 30–31 May 2019 in south-central Chile. *Atmospheric Research*, 236, 104811.
- Caballero-Morán, V., y Rondanelli, R. (2025):** Tornado seasonality in central-southern Chile. *Geophysical Research Letters*, 52(1), e2024GL110900.
- Marín, J. C., Barrett, B. S., y Pozo, D. (2021):** The tornadoes of 30–31 May 2019 in south-central Chile: Sensitivity to topography and SST. *Atmospheric Research*, 249, 105301.
- Marín, J. C., Gutiérrez, F., Gensini, V. A., Barrett, B. S., Pozo, D., Jacques-Coper, M., y Veloso-Aguila, D. (2024):** Climatological aspects of notable tornado events in Chile. *Monthly Weather Review*, 152(8), 1803-1819.
- Valenzuela, R. A., & Garreaud, R. D. (2019):** Extreme daily rainfall in central-southern Chile and its relationship with low-level horizontal water vapor fluxes. *Journal of Hydrometeorology*, 20(9), 1829-1850.
- Viale, M., Valenzuela, R., Garreaud, R. D., & Ralph, F. M. (2018):** Impacts of atmospheric rivers on precipitation in southern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 19(10), 1671-1687.
- Vicencio, J., Rondanelli, R., Campos, D., Valenzuela, R., Garreaud, R., Reyes, A., y 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.