

Informe Especial

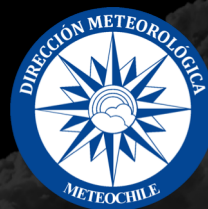
Tornados en la Región del Biobío



Intensidad y trayectoria de tornados
Mediciones en superficie y altura
Otros posibles tornados sin confirmar
Condiciones meteorológicas asociadas
Conclusiones preliminares

Publicado el Martes 25 de Junio de 2019
Santiago, Chile

Preparado por la Oficina de Servicios Climatológicos
Sección Climatología
Subdepartamento de Climatología y Met. Aplicada



VERSIÓN WEB

Busca la versión imprimible de este documento

Dirección Meteorológica de Chile
Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada
Sección Climatología



Este informe tiene por objetivo realizar un análisis preliminar tanto de las condiciones meteorológicas asociadas a las tormentas, como de los tornados que afectaron a la Región del Biobío durante los días 30 y 31 de Mayo del presente año. Mucha de la información presente en este documento es de carácter preliminar y puede sufrir modificaciones posteriores.

Participación en el desarrollo del informe:

José Vicencio Veloso, Meteorólogo
Alejandra Reyes Kohler, Meteorólogo
Solangela Sánchez, Meteorólogo
Rodrigo Padilla, Geógrafo
Juan Crespo, Meteorólogo
Diego Campos, Meteorólogo

Edición:

Claudia Cruz, Meteorólogo, Jefa de la Oficina de Servicios Climatológicos

Gaston Torres, Meteorólogo, Jefe de la Sección de Climatología

Agradecimientos especiales:

Al equipo que visitó en terreno la zona afectada, los meteorólogos *Camilo Barahona* y *Ricardo Abarca*, de la Sección de Investigación y Soporte Tecnológico de la Dirección Meteorológica de Chile.

A los integrantes de la Oficina de Aplicaciones Satelitales, por su apoyo en la entrega de imágenes del satélite GOES-16.

Al Sr. *Iver Iglesias*, Observador Meteorológico, Jefe Oficina ARO, Aeropuerto Carriel Sur, Dirección General de Aeronáutica Civil, por sus valiosas observaciones en la zona afectada y estimar una de las primeras trayectorias del tornado.

Al Cabo primero *Patrick Urra* y Cabo primero *Jorge Soto*, del Regimiento 17 Destacamento de Montaña, quienes realizaron la primera estimación de la trayectoria del tornado de Los Ángeles.

Al Teniente *Carlos Gaete*, del Servicio Meteorológico de La Armada.

A los integrantes del grupo de Meteorología y Clima *METCLIM*, por sus invaluable datos, comentarios e información acerca de los tornados que afectaron la Región del Biobío.

Fotografías del tornado a través de videos de RRSS/ TVU Noticias/Radio Biobío

1

Resumen



1. Resumen

Durante las jornadas del 30 y 31 de mayo de 2019, se registraron al menos dos violentos tornados en la Región del Biobío, afectando a la ciudad de Los Ángeles y Talcahuano/Concepción, produciendo daños materiales, heridos y el lamentable fallecimiento de una persona.

Las primeras estimaciones de daños realizadas por los organismos oficiales, además de la visita en terreno de meteorólogos de nuestra institución a la zona, dan cuenta que la afectación a edificaciones, árboles y vehículos, así como la trayectoria, concuerdan con el paso de un único tornado de intensidad máxima **EF-2 para el caso de Los Ángeles** y un solo tornado **EF-1 para el caso de Concepción**.

Con respecto al tornado de Los Ángeles, no se tienen mediciones in-situ del viento máximo registrado, pero los daños y la evidencia obtenida en el lugar sugieren que fue un tornado más intenso que el de Concepción. La estimación del viento máximo, según la escala mejorada de Fujita, indica que la magnitud osciló entre 178 y 217 Km/h. La trayectoria fue de un zig-zag de 5 Km, bordeando el sector nororiente de la ciudad.

Respecto al tornado de Concepción, se pudo corroborar que nació sobre mar, por lo que es correcto afirmar que se trató inicialmente de una tromba marina. Una vez sobre tierra, la nomenclatura correcta corresponde a tornado, el cual cruzó a lo largo de un eje relativamente lineal desde Talcahuano hasta Concepción, recorriendo aproximadamente unos 17 Km durante 15 minutos, alcanzando velocidades máximas estimadas, según la escala de Fujita mejorada, entre 138 y 177 Km/h.

Las tormentas que desarrollaron tornados se generaron bajo un patrón sinóptico de inestabilidad post-frontal, junto a condiciones de baja inestabilidad atmosférica (baja buoyancia) y con grandes niveles de cizalle vertical en los primeros kilómetros de la

tropósfera, según las estimaciones de datos meteorológicos de aeronaves y de satélites, así como modelos numéricos de predicción y reanálisis.

Es probable que otros tornados se hayan generado durante ambos días en zonas rurales o pequeños poblados, como es el caso de Chanco, Región del Maule; Coihueco, Yungay y San Carlos, Región del Biobío, y en Collipulli, Región de La Araucanía. Sin embargo, a la fecha, la evidencia no permite corroborar con certeza la ocurrencia de este tipo de fenómenos, por lo cual no son considerados en el análisis.

Este evento meteorológico extremo, del cual el registro histórico en nuestro país es escaso, deja en evidencia lo poco que conocemos los meteorólogos e investigadores de ciencias atmosféricas en Chile sobre las grandes tormentas y los tornados, incluido aspectos como su origen, generación y predicción en el muy corto plazo. En este informe, se plantean algunas analogías con fenómenos de similares características ocurridos en Australia y California; así como un patrón atmosférico preliminar y un enfoque en dos de los principales aspectos del desarrollo de tormentas tornadogénicas: la inestabilidad y el cizalle vertical.

Este trabajo utilizó la información disponible a la fecha de emisión, por lo que es de carácter preliminar y puede sufrir modificaciones posteriores. Esperamos que ayude a dilucidar algunas dudas respecto a los tornados que afectaron la Región del Biobío, particularmente intensidad y trayectoria. Por último, queremos que se convierta en una motivación para avanzar en mejorar la red de observaciones en superficie y altura, para apoyar no solo a los futuros avances en pronósticos de estos eventos, si no que también a los investigadores en las temáticas de tornados y tormentas chilenas.

2

Datos, mediciones y definiciones

GFS 

EMAs

GOES-16

AIREP



AMDAR

WRF-DMC

REANÁLISIS
NCEP-NCAR

NASA



2. Datos, mediciones y definiciones

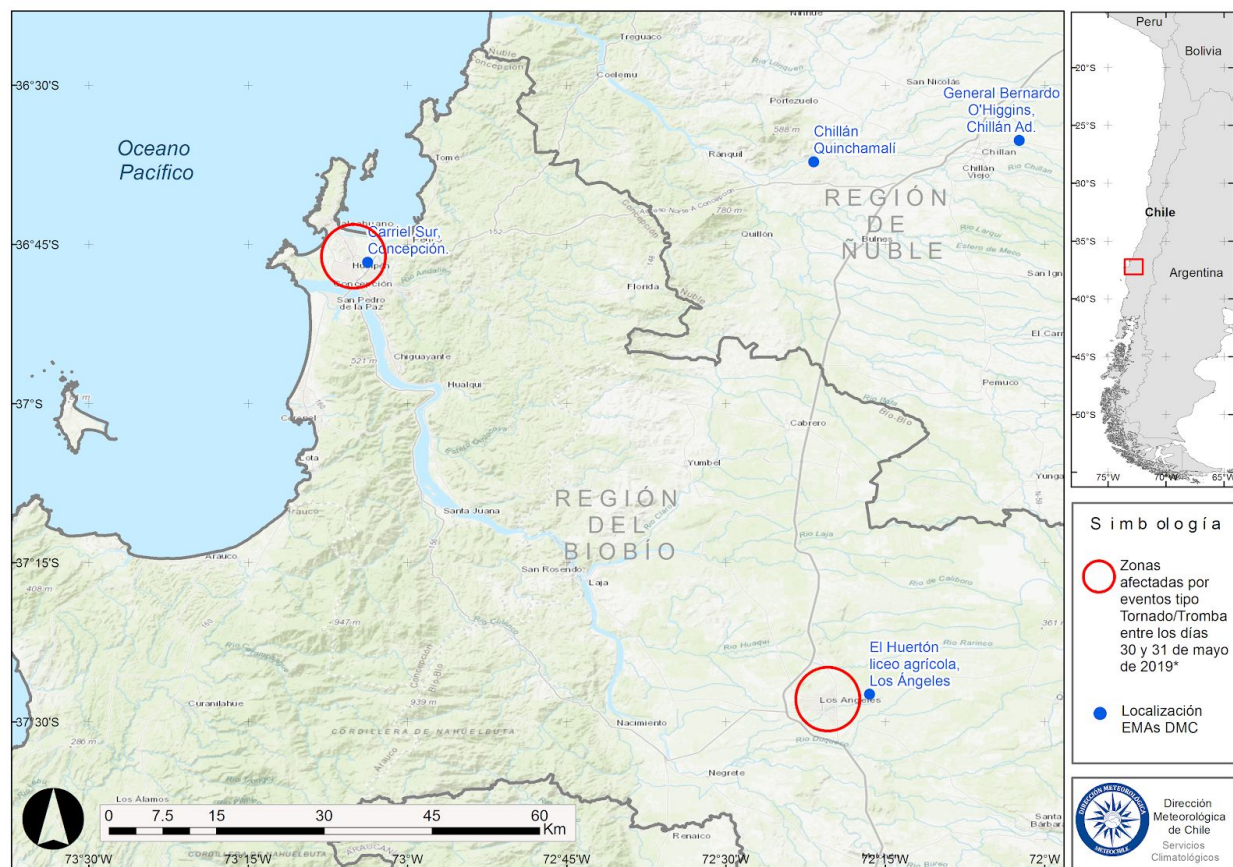


Figura 1. Área de estudio. Zonas afectadas por eventos tipo tornado/trombas en la Región del Biobío. *Zonas con registros fehacientes.

Para el desarrollo de este informe, se utilizaron datos y mediciones de variables meteorológicas de estaciones en superficie de la DMC¹, próximas a las zonas afectadas (ver figura 1). En primera instancia, se utilizaron los datos de El Huertón, Liceo Agrícola y Ad. María Dolores en Los Ángeles. En Concepción/Talcahuano se usaron datos provenientes de la estación Ad. Carriel Sur. Se ocuparon, además, registros preliminares de estaciones de La Armada de Chile (tabla 1), así como de INPESCA² en Talcahuano.

Consideramos las observaciones realizadas por sensores de aviones comerciales, correspondiente al sistema AMDAR³, que registra temperatura, dirección y velocidad de viento. También se consideró los reportes emitidos por aeronaves comerciales, conocidos como AIREP⁴, para la variable de viento y que son generados por los pilotos cuando consideran que se registran situaciones meteorológicas que pueden afectar la navegación aérea.

Parte importante del análisis incluyó imágenes del satélite GOES-16 en sus múltiples canales,

¹ Estaciones en Línea de la DMC. Sitio web: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/menuTematicoEmas>

² INPESCA: Instituto Pesquero. Sitio web de estación meteorológica: <http://www.inpesca.cl/meteo/>

³ AMDAR: Aircraft Meteorological Data Relay.

⁴ AIREP: Aircraft Report. Corresponde al reporte de fenómenos meteorológicos adversos emitido por aeronaves comerciales.

que poseen diferentes resoluciones espaciales (entre 1 y 4 Km dependiendo del producto) y de resolución temporal entre 10 y 20 minutos.

Nombre de Estación	Propietario	Lat, Lon (°)	Altitud (m)
El Huertón Liceo Agrícola, Los Angeles	DMC	-37.46 -72.28	173
Aeródromo Carriel Sur, Concepción	DMC	-36.78 -73.06	17
Aeródromo María Dolores	DMC	-37.40 -72.20	120
Puerto de Talcahuano	Armada	-36.71 -73.11	3
Lirquén	Armada	-36.71 -72.98	4
Lota	Armada	-37.10 -73.16	4
Constitución	Armada	-35.32 -72.41	8

Tabla 1. Localización de principales estaciones meteorológicas utilizadas

Se consideró la información proveniente del modelo WRF⁵, que diariamente simula las condiciones meteorológicas en la zona central del país con una resolución temporal de 1 hora y espacial de 16 Km, correspondiente al dominio 2. Este modelo se utiliza operativamente en la Dirección Meteorológica de Chile. Para ambas jornadas de análisis, se consideró la simulación inicializada a las 12 UTC del día respectivo. Además, se consideró la utilización del pronóstico del modelo GFS (que también es utilizado en la DMC), en caso de no disponer datos del WRF.

Por último, se utilizaron datos provenientes del reanálisis NCEP-NCAR para variables como geopotencial, temperatura del aire y velocidad

vertical, así como también información de temperatura superficial del mar⁶ de NASA.

Visita en terreno

Los meteorólogos Camilo Barahona y Ricardo Abarca, pertenecientes a la Sección de Investigación y Soporte Tecnológico, realizaron una visita a las zonas afectadas por los tornados entre los días miércoles 05 y viernes 07 de junio, obteniendo información valiosa de los daños causados, la trayectoria y datos de estaciones en superficie; así como información de testigos presenciales. Toda esta información permitió realizar una primera aproximación de la intensidad de acuerdo a la escala EF⁷ (Escala Mejorada de Fujita), utilizada internacionalmente para estos propósitos.

Escala Mejorada de Fujita (EF)

Debido a que las mediciones de la intensidad de viento es prácticamente imposible en tornados, en el año 1971, los meteorólogos estadounidenses Tetsuya Fujita y Allen Pearson crearon una clasificación para estimar los vientos máximos según los daños en edificios, terrenos, árboles y vehículos; conocida como Escala de Fujita-Pearson.

En el año 2004, el Servicio Meteorológico de Estados Unidos, reestructuró la escala de 1971, manteniendo la clasificación de daños en 6 niveles entre tornados EF-0 y EF-5, pero mejorando la descripción de los daños a través del sistema de “grados de destrucción”. La tabla 2 presenta un resumen y fotografía asociada a cada una de las categorías.

Debido a que esta es la escala utilizada por la mayoría de los estudios internacionales, en la Dirección Meteorológica de Chile se procedió a clasificar los tornados de la Región del Biobío a través de la escala mejorada de Fujita (EF).

⁵ WRF: Weather Research and Forecasting. Corresponde al modelo meteorológico de pronóstico implementado por la Dirección Meteorológica de Chile

⁶ State of The Ocean. Sitio web: <https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/soto/>

⁷ Para más información respecto a la Escala Mejorada de Fujita, visitar: <https://www.spc.noaa.gov/efscale/>

¿Tornado o tromba?

No hay una definición exacta que diferencie completamente a las trombas de los tornados. En muchos aspectos, trombas y tornados son prácticamente el mismo fenómeno, con la gran diferencia que las trombas se forman sobre mar. Es decir, su embudo toca la superficie del océano, así como también un lago o mar interior⁸.

Para evitar confusiones con el nombre, generalmente se utiliza el término tornado como el principal: Si un tornado nace sobre mar, es correcto llamar al fenómeno como tromba marina, pero no deja de ser un tornado. Si nace sobre tierra, el concepto correcto es tornado.

¿Qué ocurre si un tornado nace sobre mar, como tromba marina, y luego ingresa a tierra? Lo correcto en este caso es indicar que el fenómeno es un tornado, independiente de que su inicio haya sido como tromba. Esta clasificación no es del todo completa y en otras latitudes se utilizan otras nomenclaturas. Pero esta definición preliminar nos ayuda a tener un poco más de claridad en cómo clasificar estos fenómenos y evitar mayores confusiones.

Categoría	Máxima velocidad del viento estimada	Daño	Ejemplo
EF5	Más de 322 km/h	Masivo	
EF4	267-322 km/h	Devastador	
EF3	218-266 km/h	Severo	
EF2	178-217 km/h	Considerable	
EF1	138-177 km/h	Moderado	
EF0	105-137 km/h	Ligero	

Tabla 2. Descripción básica de la escala mejorada de Fujita, daños generales y máximos de viento. Fuente: [MeteochileBlog](http://meteochileblog.com)

⁸ La enciclopedia Britannica posee una buena definición y discusión del concepto “tromba marina”, o waterspout en inglés, mostrando las diferencias conocidas con los tornados. [Link](#).


3

Análisis del tornado del 30/05 en Los Ángeles

Escala mejorada de Fujita

EF-2

 **217** Km/h

 **7-8** min





3. Análisis del tornado del 30/05 en Los Ángeles

Resumen y datos principales

- **Horario y tiempo de afectación:** El tornado se inicia aproximadamente a las 17:57 HL⁹ (21:57 UTC¹⁰) del 30/05/2019. Duración probable de unos 7-8 minutos sobre el área urbana, recorriendo aproximadamente 5 Km.
- **Características:** Un solo tornado, de rotación ciclónica (a favor de las manecillas del reloj), saltatorio (skipping tornado) y movimiento en zig-zag, mayormente norte a sur.
- **Vientos e intensidad máxima:** Sin mediciones en superficie.

Tornado

EF-2

Escala mejorada de Fujita.
Vientos máximos entre 178 y 217 Km/h.

Vehículos de carga volcados, autos levantados y trasladados varios metros, destrucción parcial de viviendas y grandes árboles tumbados por completo.



⁹ HL: Hora Local en Chile Continental (UTC-4)

¹⁰ UTC: Tiempo Universal Coordinado

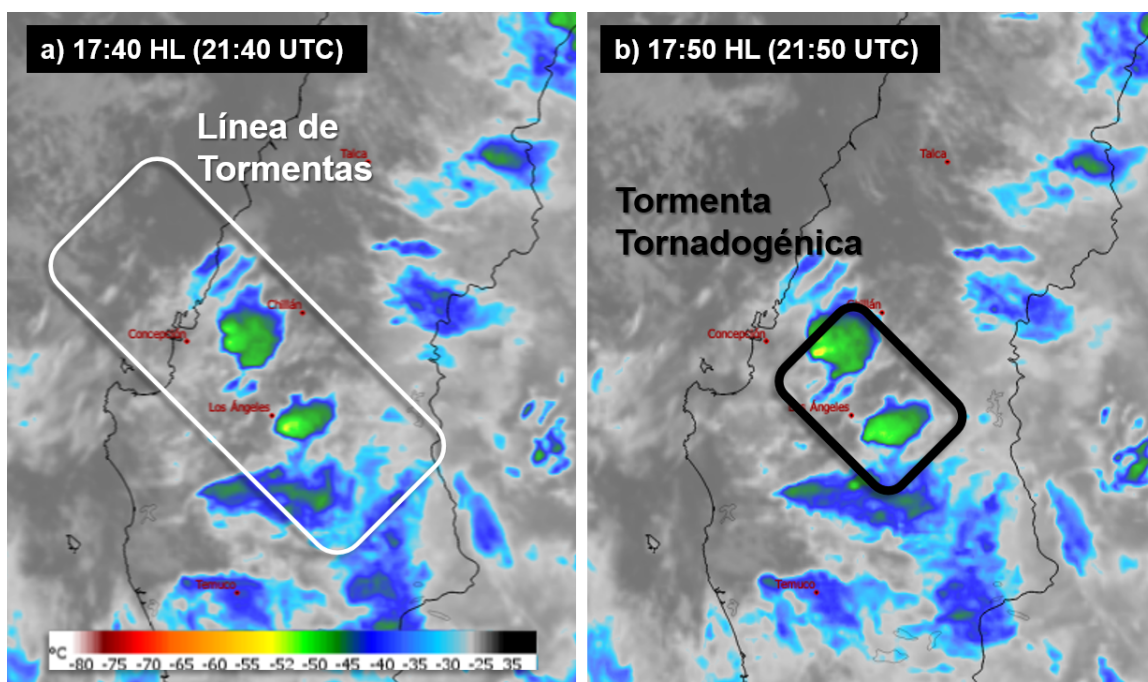


Figura 2. Imágenes de satélite en el espectro infrarrojo a las 17:40 HL (a) y 17:50 HL (b) del día 30 de mayo de 2019. Agradecimientos a Oficina de Aplicaciones Satelitales, DMC.

3.1. Factores asociados a la formación de tornados

Dentro de la gama de factores que están relacionados y/o inducen la formación de tornados, al menos dos resaltan como los más relevantes. El primero es la presencia de movimientos verticales importantes e inestabilidad. La atmósfera es particularmente estable en nuestro país y la presencia de una vaguada en altura tiende a modificar este factor, especialmente combinado con la inestabilidad post sistema frontal. Una forma de estimar qué tan inestable y potencialmente activa está la troposfera, es la obtención del CAPE¹¹.

El segundo factor de relevancia corresponde al **cizalle o cortante vertical**¹² entre la superficie y diferentes niveles. La mayor parte de los estudios realizados en Estados Unidos¹³ sugieren que el cizalle entre 0 y 6 Km de altura,

particularmente cuando oscila entre valores de 46 a 70 Km/h, favorece el desarrollo de tormentas tornadogénicas. Otros análisis sugieren que para tornados de temporadas frías en California y Australia¹⁴, un mejor proxy del potencial tornadogénico corresponde al cizalle entre 0 y 1 Km de altura, con valores mayores a 39,6 Km/h (11 m/s).

3.1.1. Inestabilidad

Una de las principales características de las tormentas que desarrollan tornados es la presencia de nubes de gran desarrollo vertical. Una forma de estimar qué tan profundas son las nubes corresponde a las imágenes de satélite en el canal infrarrojo, en donde se puede estimar la temperatura del tope de la nubosidad.

Tal como se aprecia en la figura 2a, previo al registro del tornado, se observa una marcada línea de tormentas ubicada transversalmente desde la costa de la Región del Ñuble (latitud

¹¹ CAPE: Convective available potential energy. En español: Energía convectiva potencial disponible

¹² También conocido como "Bulk Shear"

¹³ De acuerdo al [Storm Prediction Center](#) de NOAA, Estados Unidos.

¹⁴ The Cool-Season Tornadoes of California and Southern Australia. Autores: *Hanstum et al.*, 2002

de Chillán), cruzando desde el noroeste al sureste, hasta los alrededores de Los Ángeles. Esta línea de tormentas parece de gran importancia, puesto que los topos nubosos alcanzan temperaturas de -50°C en los cumulonimbus más desarrollados. Podemos determinar de manera aproximada que el tope de la nubosidad alcanzó unos $9,0 \text{ Km}^{15}$ de altitud.

La línea de tormentas se desplaza hacia el suroeste y, a las 17:50 HL (Fig. 2 b), se aprecian dos tormentas que pudieron dar origen al tornado de Los Ángeles (punto marcado en la figura): una al noroeste de la ciudad y una al sureste. La tormenta más intensa está ubicada aproximadamente sobre Yumbel/Cabrero, alcanzando topos nubosos muy fríos de hasta casi -55°C (casi $9,5 \text{ Km}$ de altura). Hay otra tormenta importante al suroeste, de menor tamaño, pero que también podría ser la tornadogénica, con el tornado en su sector noroeste.

Estas tormentas se desarrollaron sobre el continente durante un periodo de tiempo relativamente corto (2 a 3 horas). No solo la secuencia de imágenes de satélite son prueba de ello, sino que también cómo fue la evolución del CAPE estimado por WRF a lo largo de las horas: A eso de las 15:00 HL (19:00 UTC) no hay signos de inestabilidad sobre Los Ángeles. Sin embargo, se produjo un aumento rápido del CAPE a las 16:00 HL (20:00 UTC) hasta un máximo de 200 J/Kg . Con el desarrollo de las tormentas sobre la zona, el CAPE baja a 120 J/Kg a las 17:00 HL (21:00 UTC) y a 80 J/Kg a las 18:00 HL (22:00 UTC), en la hora del tornado. Luego de este análisis, se concluye que la zona presentó condiciones propicias para movimientos verticales durante un periodo corto de tiempo, aunque no son valores particularmente llamativos (otras tormentas sobre Chile centro-sur han presentado valores similares de CAPE o incluso mayores), particularmente a la hora en que

¹⁵ Basado en los datos de radiosondeo observado en Puerto Montt y simulado (WRF) sobre Los Ángeles a la hora del tornado.

sucede la gran tormenta y el tornado al interior de la Región del Biobío.

3.1.2. Vientos en altura y cizalle

Para estimar el perfil vertical del viento, combinamos datos de aviones despegando desde Carriel Sur, entre 1 a 2 hora antes del tornado de Los Ángeles, así como también el perfil estimado por WRF a la hora del evento. Si bien el dato del avión despegando de Concepción no está sobre Los Ángeles, nos da una idea de la magnitud del cizalle a lo largo de la línea de tormentas (y es lo mejor que tenemos en la zona como dato observado).

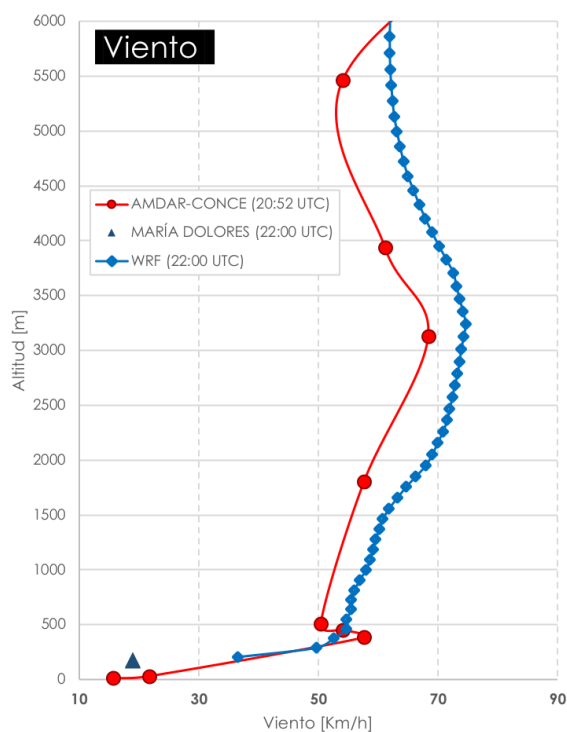


Figura 3. Perfil vertical del viento (Km/h) en la zona interior de Biobío, según WRF (22:00 UTC) y MARÍA DOLORES AD. (22:00 UTC). Se incluyen mediciones de un vuelo comercial AMDAR (20:52 UTC) sobre Concepción en dirección a Santiago.

Una hora antes del tornado, el perfil de vientos resulta particular, con un máximo a 3 Km de altitud (de casi $70,0 \text{ Km/h}$), pero también con un máximo local y abrupto a 400 m del suelo, tal como se ve en la figura 3, en la curva roja. A la hora del tornado, el perfil vertical de WRF vuelve a coincidir con las mediciones AMDAR con un máximo a 3 Km de altitud y velocidades

de hasta 74 Km/h. Mientras que, en superficie se registran magnitudes de 19 Km/h y dirección del viento Nor-Noreste, al subir en la

vertical la componente cambia hacia el Nor-Noroeste.

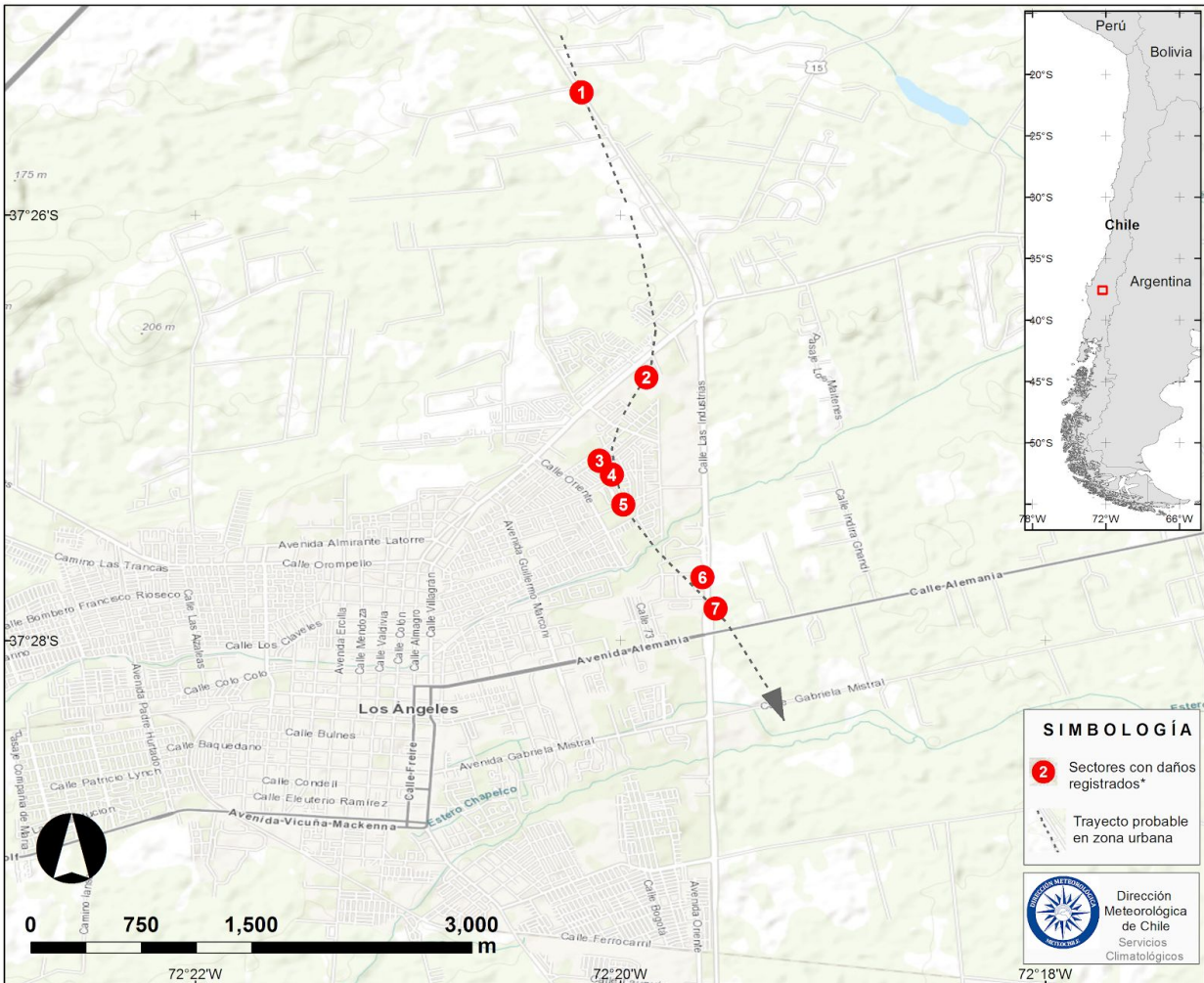


Figura 4. Localización preliminar de sectores con registros de daños causados por el tornado de Los ángeles. *Recopilación realizada en terreno por los meteorólogos Camilo Barahona y Ricardo Abarca con la cooperación del coronel Iván Aguilera, y el cabo primero Jorge Soto y cabo primero Patrick Urrea.

Los mismos máximos de viento en altura, antes del tornado en la zona interior de la región del Biobío, coinciden con los máximos del cizalle vertical. Es particularmente notorio el viento que se aprecia entre superficie y 400 m, así como también entre la superficie y 3.000 m, cuyos valores pre-tormenta fueron de 73 y 83 Km/h, respectivamente (más detalles sobre el perfil vertical del cizalle se encuentra en la sección de discusión, pág. 25).

En el caso del momento de la tornadogénesis, la estimación del modelo WRF sugiere que la cortante más importante se encuentra entre los 3 y 4 Km de altura, alcanzando magnitudes de

65,8 Km/h. Entre 0-1 Km, si bien la magnitud del cizalle es menor, no deja de ser importante, alcanzando valores de 48,7 Km/h.

Podemos concluir que tanto en el sector costero como interior del Biobío, se apreciaron valores de cizalle considerados como relevantes para el desarrollo de tormentas tornadogénicas, según las estimaciones conocidas de la literatura internacional, pero también considerando los reportes AIREP de los aviones en la zona, indicativo de una situación poco usual.

3.2. Trayectoria del tornado, estimación de la intensidad en la Escala Mejorada de Fujita y registros meteorológicos

La información obtenida por el equipo de meteorólogos en la zona, permite concluir que un único tornado afectó a la ciudad de Los Ángeles en el sector nororiente de la ciudad (inmediaciones de Calle Las Industrias), tal como se puede ver en la figura 4.

El área de afectación de la ciudad correspondió a un zigzag de unos 5 km de longitud, durante unos 7 a 8 minutos entre las 17:57 y 18:04 HL. El tornado ingresó hacia la ciudad, lo que coincide con relato de personas que indicaron que el sistema se movió hacia el sur. En general predomina un movimiento Norte-Sur, con una velocidad de desplazamiento que probablemente oscila entre 30 y 40 Km/h.

No hubo registros de estaciones meteorológicas oficiales acerca del fenómeno. La estación de El Huertón, Liceo Agrícola, está localizada aproximadamente 4-5 Km del área afectada y presentó un leve aumento en la intensidad del viento a las 18:00 y 18:27 HL (22:00 y 22:27 UTC), pero no entrega información suficiente para realizar conclusiones sobre el tornado en sí. Lo mismo sucede con la estación del Aeródromo María Dolores.

De acuerdo a la información recopilada, sumado a las imágenes disponibles en redes sociales y la información descrita por testigos, se pudo identificar varios aspectos que grafican la violencia del tornado de Los Ángeles:

i) Destrucción parcial de edificaciones y casas, incluyendo voladura de techos y galpones.

ii) Se registró la destrucción casi completa de una edificación (Pág. 5), que si bien su estructura parece más débil que las construcciones normales, indica un grado de intensidad de viento bastante importante.

iii) Algunos reportes de medios¹⁶ indican que un automóvil, con su conductor en el interior, fue desplazado varios metros en el aire.

iv) Árboles tipo Araucarias fueron completamente tumbadas por la fuerza del viento, así como también autos y camiones tumbados y volcados (Fig. 5).

El equipo en terreno identificó, de manera preliminar, que **el tornado de Los Ángeles alcanzó una intensidad EF-2 en la escala mejorada de Fujita**. Esto implica que los vientos máximos pudieron haber alcanzado velocidades de hasta 218 Km/h. Buena parte de la trayectoria potencial del tornado parece presentarse en las afueras de la ciudad, donde la afectación a las viviendas es menor debido a la menor densidad poblacional y podría ser que solo una pequeña parte de su trayectoria estuviera en zona urbana.

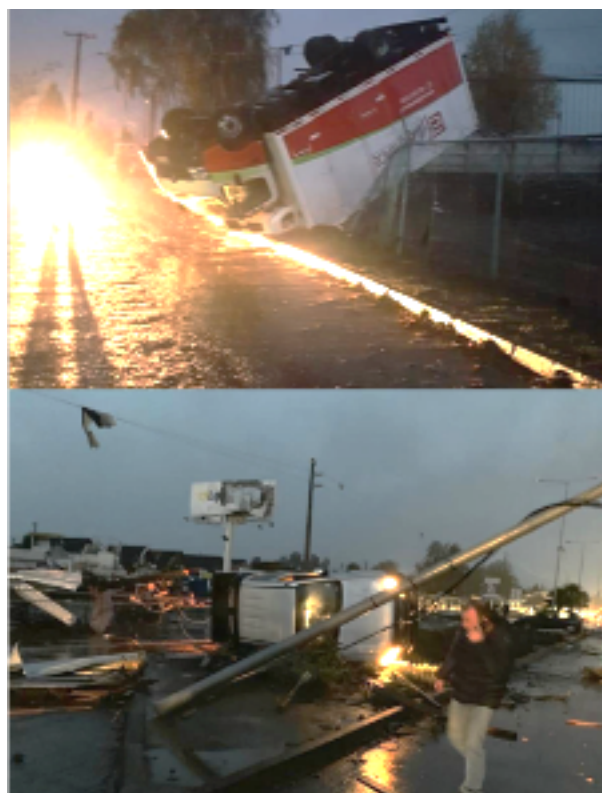


Figura 5. Fotografías de Redes Sociales de la afectación del tornado sobre vehículos y alumbrado público en Los Ángeles (30/05/2019). Fuente: Radio Biobío.

¹⁶ Reporte de [Radio Biobío](#)

4

Análisis del tornado del 31/05 en Talcahuano y Concepción

Escala mejorada de Fujita

EF-1

 **177** Km/h

 **15-20** min





4. Análisis del tornado del 31/05 en Talcahuano/Concepción

Resumen y datos principales

- **Horario y tiempo de afectación:** Aproximadamente entre las 14:00 y 14:15 HL (18:00 y 18:15 UTC), del 31/05/2019.
- **Características:** Un tornado, de rotación ciclónica (a favor de las manecillas del reloj), saltatorio (skipping tornado) y multivórtice. Recorrido cercano a 17,7 Km.
- **Vientos máximos observados:** En INPESCA, hasta 101,5 Km/h. En Carriel Sur, 91,5 Km/h a 400 m del tornado.

Tornado

EF-1

Escala mejorada de Fujita.
Vientos máximos entre 138 y 177 Km/h.

Daños a viviendas con voladura de techos, árboles tumbados y desplazamiento de vehículos.



TVU Noticias/Radio Biobío

a)	AFTNDATA 2019-05-31 13:36:41 MEA128 GG SCEMYFYX 311334 SCELYMYX UACH60 SCEL 311334 ARS LAN010 1320 SCIE 400FT WS IN APCH RWY 02 WIND 42KT=
b)	AFTNDATA 2019-05-31 18:36:35 MEA186 GG SCEMYFYX 311836 SCELYMYX UACH60 SCEL 311836 ARS JAC231 1830 SCIE BTN 1100/1500FT WS IN APCH RWY 02 WIND 49KT=

Tabla 3. Informe original de los reportes de fenómenos meteorológicos adversos (AIREP) reportados por aeronaves. En (a), emitido a las 09:20 HL y en (b) a las 14:30 HL del día 31 de mayo de 2019.

4.1. Factores asociados a la formación de tornados

4.1.1. Inestabilidad

El análisis de las imágenes de satélite es de gran relevancia para identificar el movimiento de las tormentas.

A eso de las 12:10 HL (Fig. 6a) la presencia de nubes convectivas desarrollándose costas afuera de la Región del Biobío es evidente y aunque se aprecian en desarrollo, no son particularmente intensas, moviéndose hacia el este en dirección al continente.

A las 13:45 HL (17:45 UTC), un vuelo comercial midió un perfil de temperatura sobre Concepción con tasas de caída de temperatura entre 6 y 7 °C, indicando condiciones neutras a ligeramente inestables entre superficie y 2 Km, tal como se ve en la figura 7a.

A la hora exacta del tornado sobre Concepción (Fig. 6b), el satélite GOES-16 capturó como la línea de convección se desarrolló violentamente, en dirección norte-sur, justo cuando se acercó a la línea costera y en menos de una hora. Particularmente, un importante núcleo convectivo se presenta ingresando al continente sobre la Bahía de Concepción, con gran desarrollo vertical y dejando a la ciudad en el borde norte de la tormenta en sí a las 14:10 HL (18:10 UTC), desarrollando el tornado justo en esta área. La figura 6c, muestra la temperatura del tope de nubosidad a la hora de inicio del tornado. Sobre Concepción, se aprecia la nube que dio origen al tornado, siendo uno de los topes nubosos más fríos de la línea de tormentas y que alcanza

aproximadamente -50 °C. Esto implica que la profundidad de la nube llega hasta aproximadamente 9,5 Km de altitud.

El CAPE pronosticado por WRF y su evolución durante las horas previas muestran un incremento hasta un máximo de 200 J/Kg a las 11:00 HL (15:00 UTC), disminuyendo a valores prácticamente nulos para la hora exacta del tornado. En cuanto al perfil vertical de temperatura y punto de rocío (Fig. 7a), WRF estimó una condición ligeramente inestable, con nubosidad (saturación completa) de la columna hasta más o menos 2.000 m. No estamos completamente seguros de que el modelo haya recreado la línea de tormentas del todo, por lo que se requieren mayores análisis.

4.1.2. Vientos en altura y cizalle

La primera información importante respecto a vientos se obtuvo de un avión comercial a las 09:20 HL (13:20 UTC) a través del sistema AIREP, el cual informó la presencia de vientos de gran intensidad en aproximación a la pista 02 de Carriel Sur Ad., a 120 m de altura y alcanzando hasta 77,8 km/h, tal como se ve en la tabla 3a.

Esta información concuerda con los datos AMDAR obtenidos de un vuelo comercial alrededor de las 09:45 HL (13:45 UTC) despegando desde Concepción en dirección a Santiago. Tal como se ve en la figura 7a, existe un máximo local del viento en la vertical a alrededor de 800 m. Este máximo ronda los 93,5 Km/h y luego, el viento comienza a descender en intensidad. En cuanto a la dirección, entre 17 y 800 m de altura predomina la dirección nor-noreste (NNE),

mientras que por sobre 1 Km, predominan direcciones del norte (N) y nor-noroeste (NNO).

A la hora del tornado (14:00 HL) se poseen estimaciones del modelo WRF para el viento, que reproduce un perfil vertical de incremento

de la intensidad del viento hasta 1 Km de altura y alcanzando 90,8 Km/h. El cizalle vertical se incrementa con la altura y supera los 50 Km/h a partir de 1 Km, con un máximo de 72 Km/h entre 0 y 5 Km.

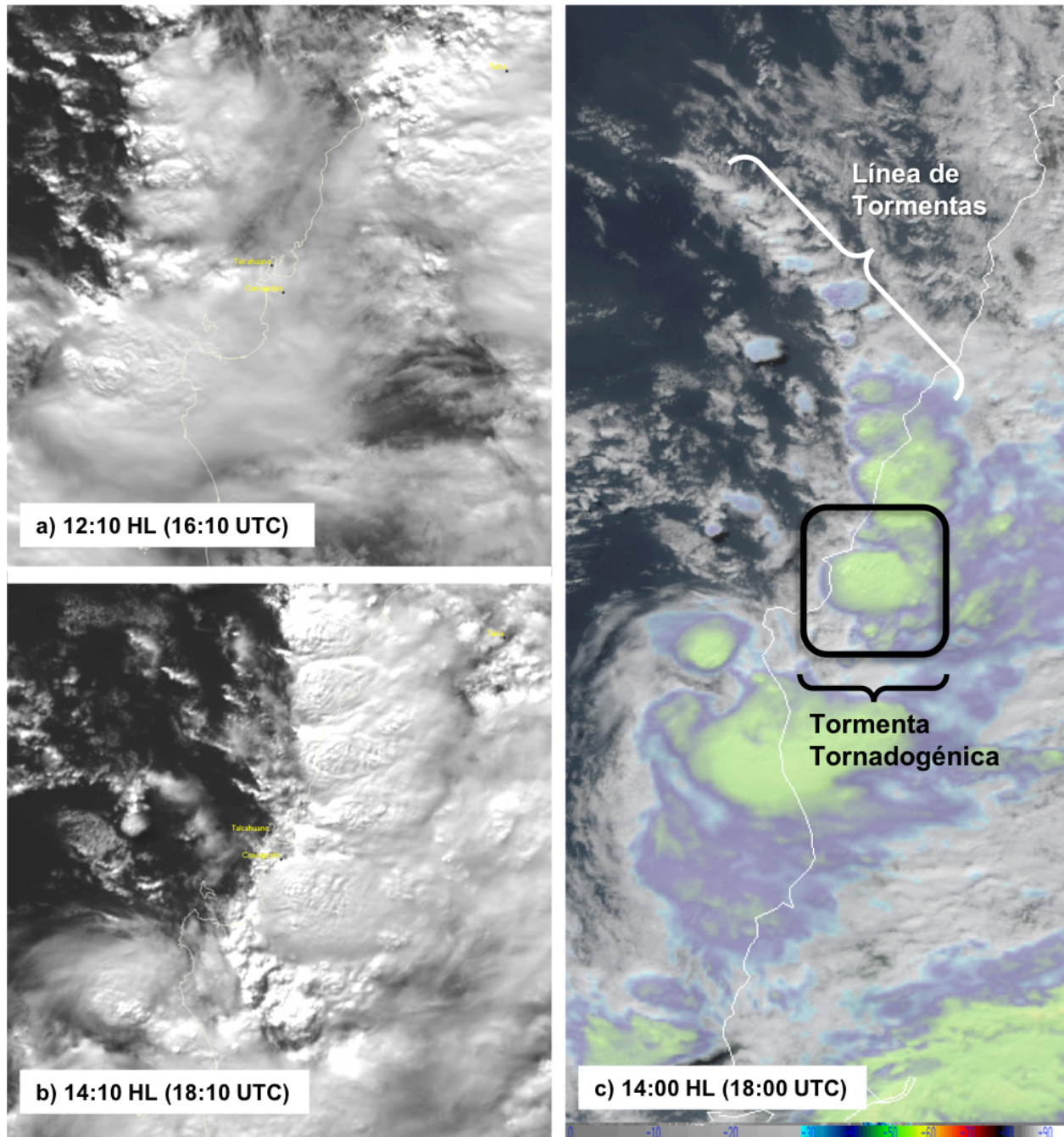


Figura 6. Imágenes de satélite del canal visible del Goes-16, a las 12:20 HL (a) y 14:10 HL (b), del día 31 de mayo de 2019. Agradecimientos a Oficina de Aplicaciones Satelitales. En la figura (c) a las 14:10 HL, el producto geocolor e infrarrojo banda 13 proveniente de CIIRA.

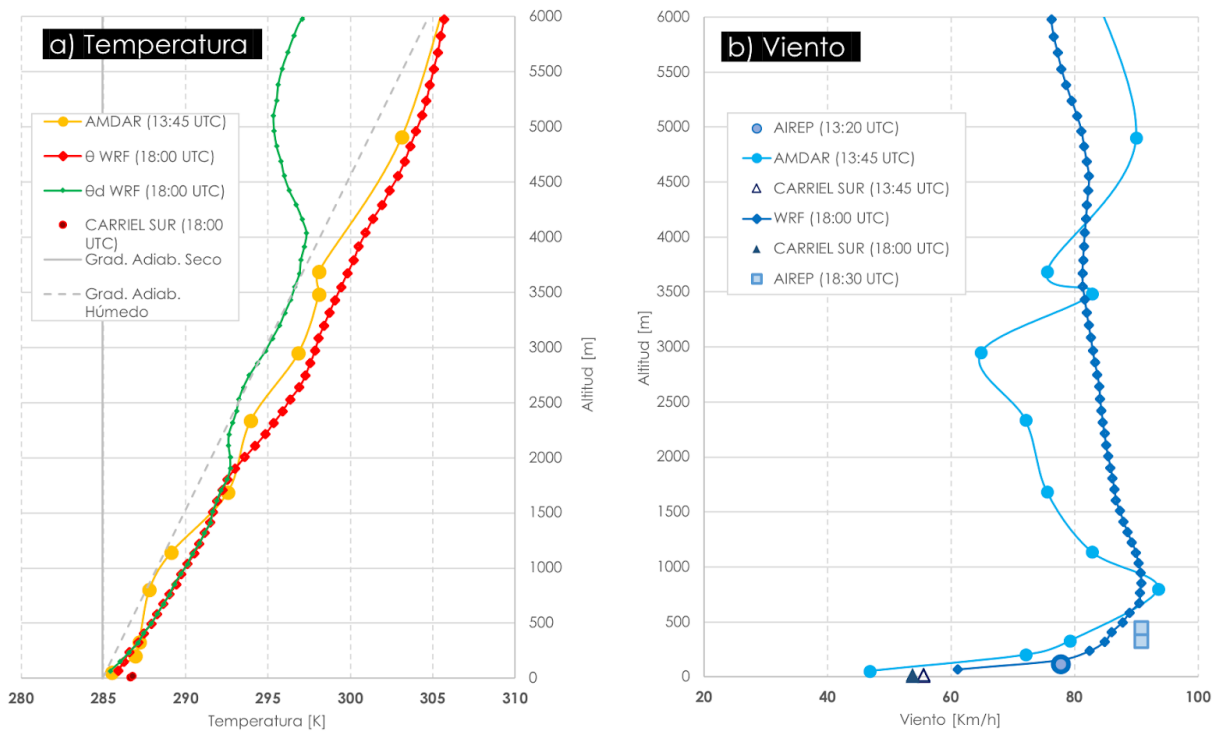


Figura 7. Estimaciones en la vertical sobre la Bahía de Concepción, para temperatura potencial y punto de rocío (a) y viento (b). En ambos casos, se utilizaron datos AMDAR (13:45 UTC), datos de superficie en CARRIEL SUR AD. (14:45 y 18:00 UTC), modelo WRF (18:00 UTC) e información AIREP (13:20 y 18:30 UTC) del 31 de mayo de 2019.

La fiabilidad del modelo puede ser parcialmente comprobada de dos maneras: el dato de superficie y los reportes de altura. Con respecto a superficie, el dato de Carriel Sur, en la figura 7b, muestra vientos correlativos en intensidad con el estimado por WRF. En niveles más altos, en tanto, se posee un reporte AIREP de un vuelo comercial a las 14:30 HL (18:30 UTC) y que estimaba vientos de hasta 90,7 Km/h entre 330 y 450 m de altura (tabla 3b), lo que coincide parcialmente con lo pronosticado por el modelo (Fig. 5a) aunque no estamos comparando exactamente las mismas horas.

Esto significa que la zona presentó antes y durante el tornado, un cizalle vertical bastante importante y especialmente a partir de 700 m de altura, alcanzando velocidades superiores a 50 Km/h. A 1 km de altura, el cizalle alcanza 54 Km/h, superior al umbral estimado como tornadogénico para tormentas de estación fría en California y Australia. Subiendo en la vertical, el cizalle tiende a seguir aumentando, alcanzando un máximo local de 71 Km/h a 4,6 Km de altitud.

4.2. Trayectoria del tornado, estimación de la intensidad en Escala mejorada de Fujita y registros meteorológicos

Según información recopilada en la zona, el tornado se posiciona sobre el sector de Caleta El Soldado (punto 1 en figura 8), poco antes de las 14:00 HL (18:00 UTC). El daño en casas del poblado de pescadores concuerda con la presencia de un tornado y no a vientos arrachados intensos. Es probable entonces que inicialmente se tratara de una tromba marina, debido a que el embudo se desarrolló sobre el mar, asociado a la tormenta de gran intensidad (Fig. 6c). Esta información también es corroborada por un piloto de avión, que sobrevolando los alrededores de Carriel Sur, identificó un embudo naciendo desde la base de la nube hasta la superficie del mar.

Luego de su ingreso a tierra, el tornado avanza rápidamente a través de Talcahuano, tal como se observa en la figura 8, donde se marcan algunos puntos de datos recopilados por el

Observador Meteorológico de Carriel Sur, el Sr. Iver Iglesias.

La estación meteorológica más cercana, correspondiente a la del Puerto de Talcahuano, registró una racha máxima de 50,7 Km/h (27,4 Kt) entre las 14:00 y 14:10 HL (18:00 y 18:10 UTC) y una caída de la presión de cerca de 1 hPa en un minuto. La distancia aproximada entre el primer punto de daño y la estación de La Armada es aproximadamente 1 Km.

Siguiendo la trayectoria de la figura 8, los siguientes puntos de daños (3 a 9) se aprecian al suroeste de la estación de INPESCA, que registró vientos de hasta 101,5 km/h antes de

quedar inhabilitada por un golpe de escombros debido al tornado, por lo que se convierte en una importante muestra de la intensidad de los vientos y la dificultad de tener mediciones de estos fenómenos. La posibilidad que un tornado pueda ser registrado mediante variables meteorológicas es prácticamente nula en un país con escaso registro de estos fenómenos, en donde además se posee una red de estaciones automáticas relativamente nueva y considerando que estos fenómenos poseen escalas espaciales y temporales relativamente pequeñas (duran tan solo unos minutos, sus diámetros son de 1 Km o menos, etc). Sin embargo, tanto la estación de INPESCA

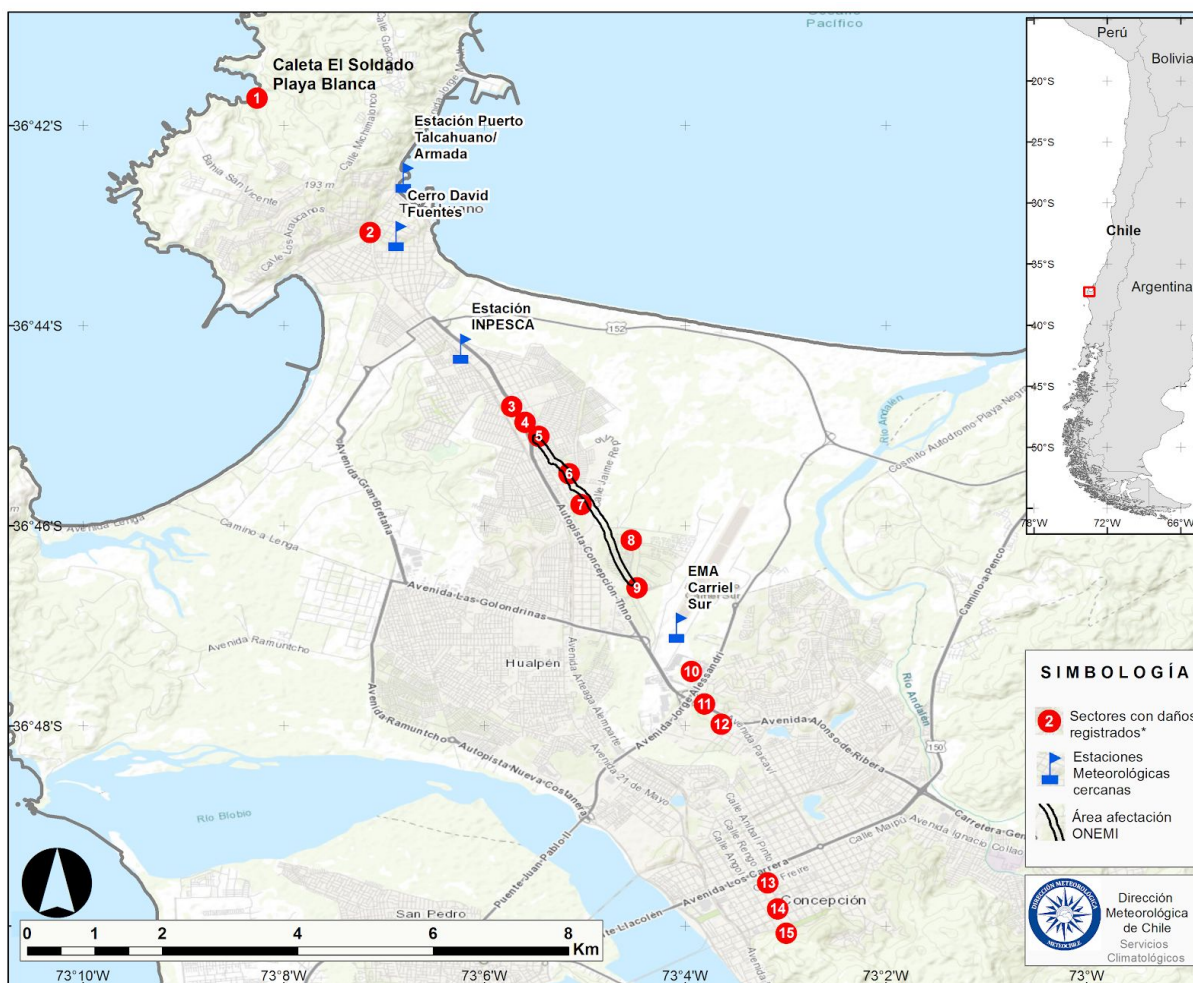


Figura 8. Localización preliminar de sectores con registros de daños causados por el tornado en Concepción. *Recopilación realizada por Iver Iglesias¹⁷ en base a registros en redes sociales y presencial (entre puntos 2 y 15). Registro de Caleta El Soldado (punto 1) realizado por Camilo Barahona y Ricardo Abarca en terreno. El área marcada en negro es la zona catastrada por ONEMI.

¹⁷ Observador Meteorológico, Jefe Oficina Oficina ARO, Aeropuerto Carriel Sur, Dirección General de Aeronáutica Civil

Concepción

Aeropuerto Carriel Sur

Periodo del tornado 

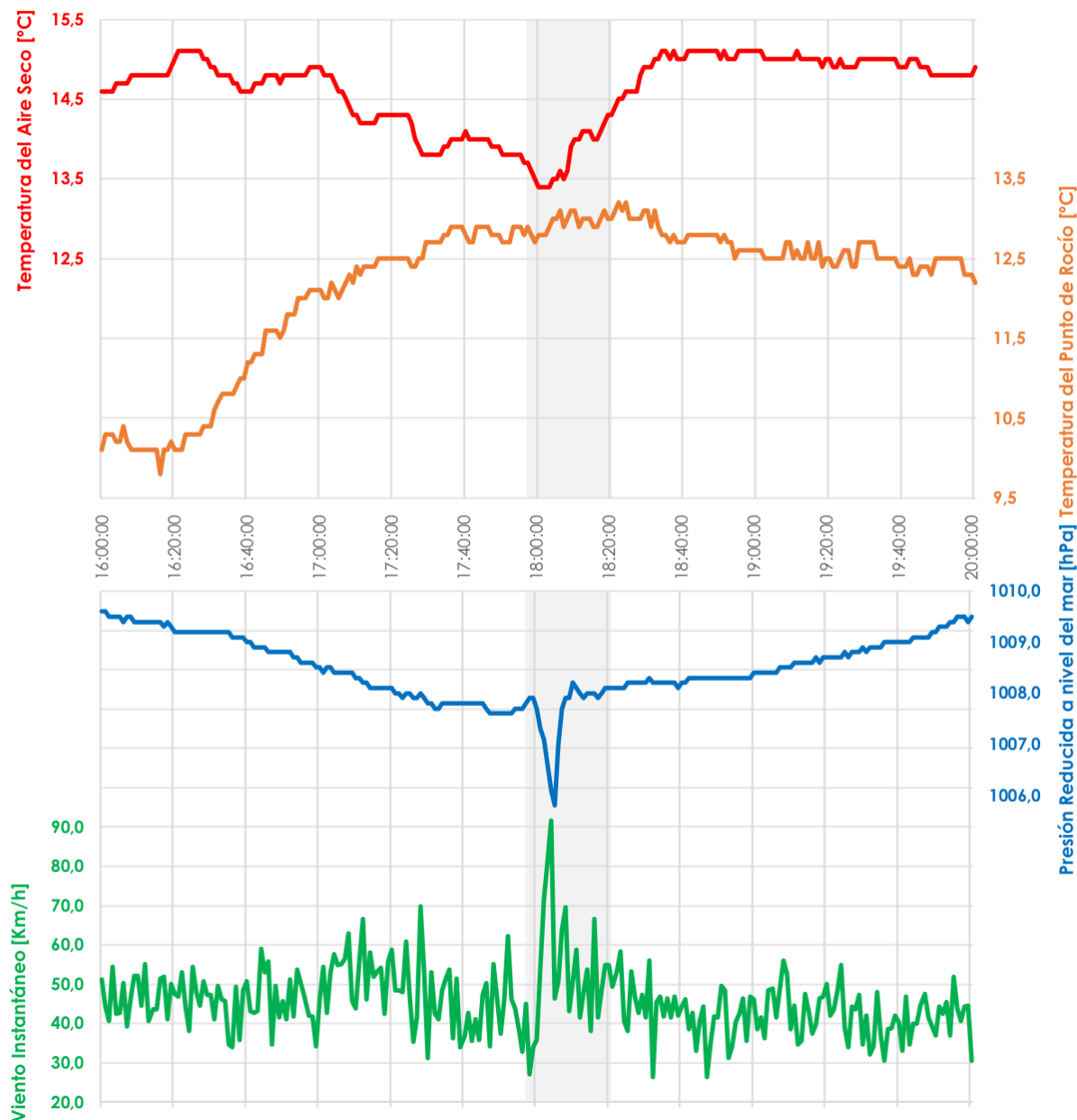


Figura 9. Registros minutales de la estación meteorológica automática del Aeropuerto Carriel Sur, Concepción entre las 12:00 y 15:59 HL (16:00 y 19:59 UTC) del 31/05/2019. En el panel superior, la temperatura del aire seco [°C] y temperatura del punto de rocío [°C]. En el panel inferior, la presión reducida a nivel del mar [hPa] y viento instantáneo [Km/h]. En el fondo gris, se presenta el periodo de tiempo en que afectó el tornado.

como la del Aeródromo Carriel Sur, en los límites de la ciudad de Talcahuano y Concepción, registraron información a distancias muy cortas del centro del embudo del tornado, lo que las convierte en mediciones únicas en nuestro país y de gran importancia

para el estudio del fenómeno ocurrido en la zona.

A medida que el tornado avanzó hacia el sureste, a las 14:04 HL (18:04 UTC) se registró un viento instantáneo máximo de 91,5 Km/h

(49,4 Kt) en el Aeropuerto. Este viento se mantuvo estable entre las 14:04 y 14:06 HL (18:04:30 y 18:06:30 UTC). De acuerdo a estimaciones del personal del lugar y considerando la trayectoria, el tornado pasó a una distancia de 400 m de la estación meteorológica automática.

Tal como se observa en la figura 9, la presión reducida a nivel medio del mar (curva azul) presentó una caída abrupta de casi 2 hPa en un par de minutos. Este tipo de cambios son muy inusuales para una variable como esta, lo que corrobora que el embudo del tornado pasó bastante cerca del instrumento.

El siguiente registro de viento instantáneo intenso, se midió en Lirquén (Armada) y alcanzó 90,2 Km/h (48,7 Kt) a las 14:14 HL (18:14 UTC). Este viento intenso no parece estar relacionado, preliminarmente, al paso del tornado sobre este punto, si no más bien a una condición asociada a la tormenta en sí y coincidente con el registro de viento máximo del Puerto de Talcahuano en este periodo de tiempo.

La figura 10, muestra de manera esquemática la configuración de los vientos alrededor del centro del tornado, en donde el radio de vientos cercanos a 90 km/h bordea de manera “circular” el centro del embudo a 400 m de distancia. Es probable que esta representación esquemática subestime el hecho de que la circulación alrededor de estos sistemas no siempre es homogénea, pero sirve como una primera aproximación para entender que claramente en el centro o cercanías del tornado, los vientos debieron haber sido mucho más intensos.

Es importante mencionar que la intensidad del tornado puede aumentar y disminuir a lo largo de la trayectoria, así como desvanecer el embudo y volver a formarse minutos más tarde. No es necesariamente un continuo de destrucción y afectación, si no que puede presentar saltos en espacio y tiempo, lo que se conoce con el nombre de “skipping tornado” en inglés, o tornado saltatorio en español.

La evidencia recopilada en la zona del campo relativamente lineal del camino de daños, presentado en la figura 8, confirma que se trató de un solo evento tipo tornado, nacido como tromba marina en las afueras de Caleta El Soldado. El recorrido total se estima en 17,7 Km entre Caleta El Soldado y el último registro en Concepción (Cerro Caracol, punto 15 en figura 8).

A diferencia de lo sucedido en Los Ángeles, en donde al final del periodo de afectación del tornado se produjo un leve descenso de temperatura y precipitaciones intensas, en Concepción, la tormenta, el granizo y lluvia intensa, así como el descenso de la temperatura, se produjo antes del desarrollo del tornado.

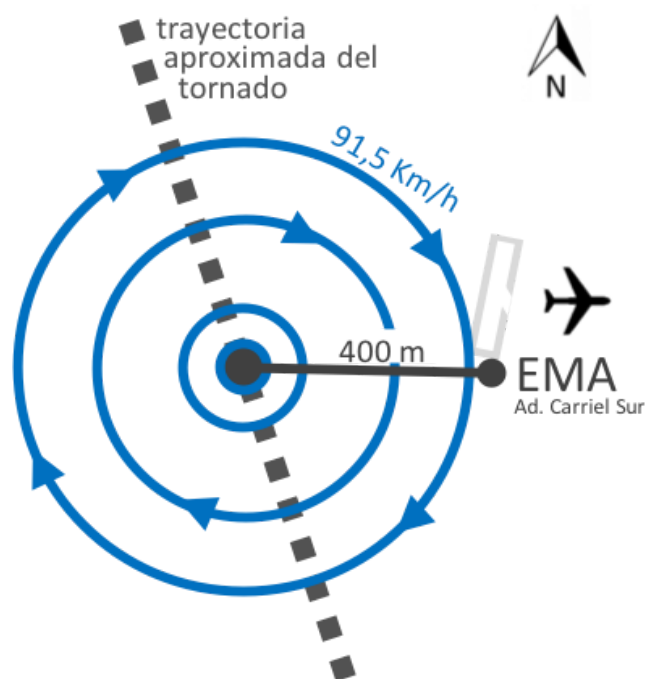


Figura 10. Esquema que representa la trayectoria del tornado (línea negra discontinua) en las cercanías del aeródromo Carriel Sur. El centro negro representa la posición aproximada del tornado cuando se encontraba al este de la estación EMA. Las circunferencias azules representan la circulación ciclónica alrededor del centro del tornado.

De acuerdo a la información recopilada por los meteorólogos en terreno junto a personal de La Armada, ONEMI y personal del Aeródromo

Carriel Sur, sumado a las imágenes disponibles en redes sociales y la información descrita por testigos, se pudo identificar que:

i) El tornado generó voladura de techumbres, caída de postes y botó árboles de tamaño mediano.

ii) Se reporta un automóvil eléctrico desplazado varios metros, terminando en una pileta¹⁸. No se ha establecido que el automóvil haya sido desplazado en el aire, sino más bien a ras de suelo.

iii) Contenedor desplazado y volcado varios metros¹⁹.

iv) El daño causado por el tornado oscila en un diámetro entre 40 y 150 m, aproximadamente. Además, el tornado presenta la característica de saltatorio (en inglés, *skipping* tornado²⁰) y multivórtice; lo que implica que el embudo y la rotación de los vientos tocaba tierra de manera intermitente a lo largo de la trayectoria, lo que explica que los daños no sean continuos.

De acuerdo a esta información, es altamente probable que el tornado haya alcanzado **intensidad EF-1 en la escala de Fujita mejorada**. Esto significa que el tornado alcanzó velocidades de viento máximo de hasta 178 Km/h.

4.3 Información SIGMET

Un aviso sobre fenómenos meteorológicos adversos en ruta, SIGMET A5, de validez para el día 30 de mayo de 2019, entre las 16:30 y las 20:30 HL (20:30 y 00:30 UTC), para la región de información de vuelo correspondiente a Santiago, pronosticó tormentas aisladas dentro del área comprendida en el cuadrante ubicado entre los 34° 11' Sur con 70° 31' Oeste, los

35°49' con 70°33' Oeste, 35°55' Sur con 71°16' Oeste y los 35°58' Sur con 71° 28' Oeste, con tope en el nivel de vuelo de 33.000 pies (9.900 m) moviéndose al Sureste con una intensidad de 10 Km/h, sin cambios.

El día 31 de mayo, en torno a la hora del evento, se emitió un mensaje SIGMET, válido entre las 13:50 y las 17:50 HL (17:50 y 21:50 UTC), para la región de información de vuelo Santiago, que pronosticó tormentas aisladas al sur de la línea descrita por las siguientes coordenadas: 33°58' Sur con 70°00' Oeste, 33°58' Sur con 74°00' Oeste y los 38° 30' Sur con 77°19' Oeste, en el nivel de vuelo de 30.000 pies (9.000 m), moviéndose al sureste con una intensidad de 10 Km/h, sin cambios.

a)	WSCH31 SCEL 302037 SCEZ SIGMET A6 VALID 302030/310030 SCEL- SCEZ SANTIAGO FIR ISOL TS FCST WI S3411 W07031 - S3549 W07033 - S3550 W07116 - S3558 W07128 TOP FL330 MOV SE 05KT NC=
b)	WSCH31 SCEL 311742 SCEZ SIGMET B6 VALID 311750/312150 SCEL- SCEZ SANTIAGO FIR ISOL TS FCST S OF LINE S3358 W07000 - S3358 W07400 - S3830 W07719 FL300 MOV SE 05KT NC=

Tabla 3. Informe de fenómenos meteorológicos significativos (SIGMET). En (a) emitido para el 30 de mayo de 2019 y en (b) para el 31 de Mayo de 2019.

¹⁸ Publimetro | 31/05/2019 15:44 Hrs. | "Impactante registro: automóvil termina en medio de una pileta tras ser arrastrado por tromba marina en Concepción y Talcahuano". [Link](#)

¹⁹ Tele13.cl | 02/06/2019 21:57 Hrs. | "Nuevos videos revelan magnitud del tornado en el Biobío". [Link](#)

²⁰ De acuerdo a los análisis realizados por Camilo Barahona y Ricardo Abarca en terreno.

5

Otros registros de posibles tornados

Chanco

San Carlos-Quilelto

Coihueco

San Miguel de Itata

Yungay

Collipulli



5. Otros registros de posibles tornados

Durante las jornadas del 30 y 31 de mayo, las tormentas desatadas en horario vespertino pudieron estar asociadas a otros potenciales tornados (además de los registrados en Talcahuano y Los Ángeles), aunque por ahora no se ha podido corroborar completamente esta información. A continuación, presentamos una breve descripción de lo sucedido en cada uno de los casos.

5.1. Jueves 30 de mayo de 2019

La información proveniente de ONEMI²¹ indica que en la comuna de Collipulli, provincia de Malleco en la Región de La Araucanía, se registró un tornado que afectó el sector de San Andrés, produciendo daños mayores a una vivienda y otras 4 con daños de menor consideración. Se registraron 4 damnificados y 13 afectados por el evento en la zona (Fig. 11).

Ese mismo día, el 30 de mayo, medios de comunicación^{22 23} indican que un tornado afectó a la ciudad de Yungay, ubicada a 50 Km al Noreste de Los Ángeles en la Región del Ñuble, afectando 42 casas y produciendo voladura de techos. Muy cerca, en el sector de San Miguel de Itata, también hubo registros de daños producto de vientos intensos.

Otro potencial tornado produjo daños en la comuna de San Carlos, también en la Región del Ñuble. Según indica el medio de comunicación Radio Biobío²⁴: *“El hecho se produjo a eso de las 18:00 horas en la zona de Quilelto, que está ubicada unos 12 kilómetros al oriente de San Carlos, en la región de Ñuble”*.

²¹ Comunicación personal, ONEMI Santiago

²² Radio Biobío | 30/05/2019 20:50 Hrs. | “Onemi confirma que “fenómenos similares a tornados” afectaron a Yungay, Coihueco y San Carlos”. [Link](#)

²³ La Discusión | 31/05/2019 14:44 Hrs. | “Fueron tres tornados: experto aclara fenómenos registrados ayer en Ñuble”. [Link](#)

²⁴ Radio Biobío | 30/05/2019 19:53 Hrs. | “Tromba terrestre arranca los techos de dos viviendas en sector rural de San Carlos”. [Link](#)

En la misma noticia, se indica que un fenómeno similar se produjo en la localidad de Coihueco, ubicada a 21 Km al sureste de San Carlos.

5.2. Viernes 31 de mayo de 2019

De acuerdo a informaciones recopiladas por el medio de comunicación Radio Cooperativa, existe la posibilidad de que un tornado haya afectado al sector de Chanco, correspondiente a la Provincia de Cauquenes en la Región del Maule. Dentro de los daños registrados se indica que entre 50 y 60 árboles fueron derribados en la ruta del sector Pochemas de Chanco, sin afectación a viviendas²⁵. Algunos reportes indican que el fenómeno también se inició como tromba marina, para luego ingresar a tierra. Este potencial tornado es parte de la misma línea de tormentas que minutos antes generó el tornado sobre Talcahuano/Concepción.

5.3. Conclusiones

De manera preliminar, no podemos concluir que estos 5 fenómenos sean atribuibles a tornados. Esto es debido a la falta de evidencia observacional del fenómeno en sí (fotografías o videos de embudos o del momento del viento intenso).

Hay que considerar también que las grandes tormentas, como las que se desarrollaron en ambas jornadas, traen consigo fenómenos de vientos intensos muy localizados conocidos como *downburst* o *rare downard flank*, entre otros. Estos vientos pueden alcanzar magnitudes suficientes para derribar árboles y generar algún grado de destrucción en viviendas, similares a las categoría EF-1 de un tornado.

²⁵ Cooperativa | 31/05/2019 17:22 Hrs. | “Tromba marina derribó árboles y bloqueó rutas en Chanco”. [Link](#).

Informe Especial: Tornados en la Región del Biobío

Solo un análisis en terreno o fotográfico de los daños, así como entrevistas a los afectados, podría dilucidar la naturaleza de los fenómenos que afectaron a al menos 6 localidades más entre la zona del sur del Maule y el norte de La Araucanía (Fig. 11).

Por ahora, la Dirección Meteorológica de Chile confirma que hubo 2 tornados en ambas jornadas, mientras estos 6 restantes caen en la clasificación de “tornados sin confirmar”.

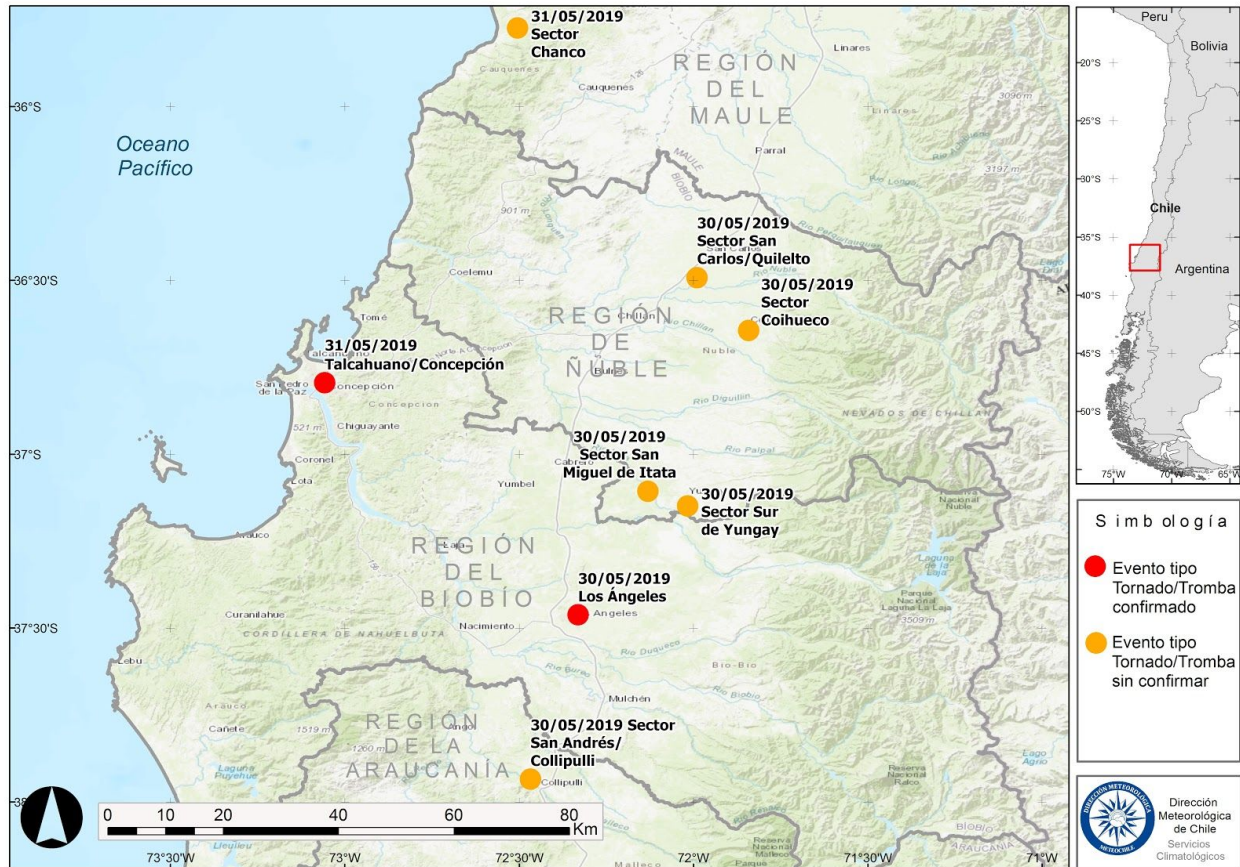


Figura 11. Mapa con la posición de los registros confirmados (punto rojo) y no confirmados (punto naranja).

6

Análisis y Discusión



6. Análisis y Discusión

6.1. Sinóptica e inestabilidad

La situación sinóptica asociada a las tormentas y tornados del 30 y 31 de mayo, indica que el sector Central del País se encontraba en presencia de inestabilidad postfrontal, con fuerte advección de aire frío en superficie desde el suroeste a lo largo del Pacífico Sur.

Una forma de apreciar la condición atmosférica predominante en ambas jornadas es utilizando el reanálisis NCEP-NCAR. A través de un corte latitudinal a la altura de Concepción, desde el Océano Pacífico hasta Argentina, es posible visualizar las anomalías térmicas y de geopotencial sobre la zona de análisis (Fig. 12a).

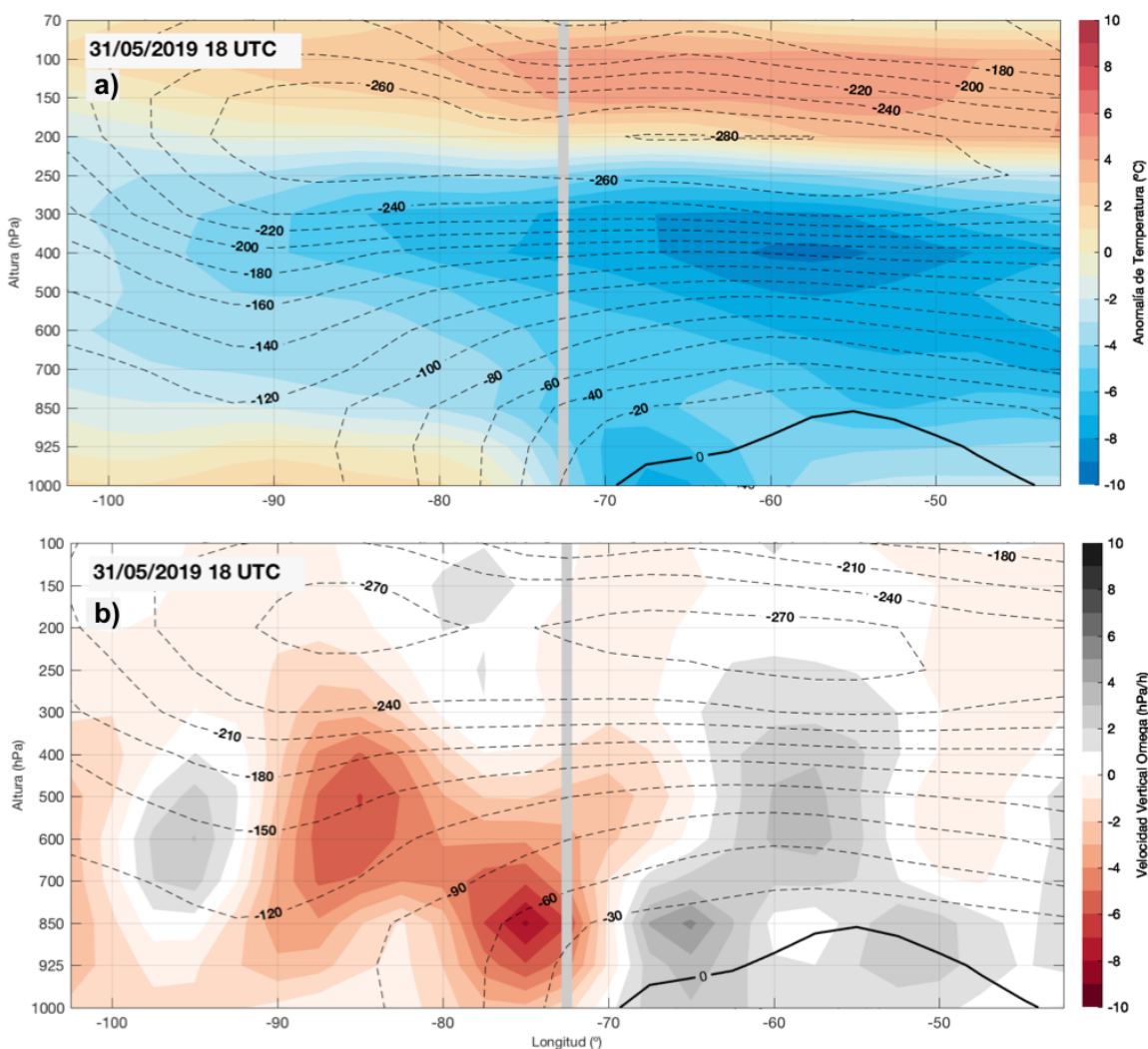


Figura 12. Corte Longitudinal-Vertical de anomalías (respecto al periodo climatológico 1981-2010) del promedio de 24 horas (31/05 a 00 UTC a 31/05 a 18 UTC) y del promedio de latitud entre 35 y 37°S para: (a) temperatura del aire y (b) la velocidad vertical omega (áreas coloreadas). En ambos casos, se muestra la anomalía del geopotencial en la curva negra. La línea gris vertical representa la posición en longitud de Concepción. Datos provenientes del reanálisis NCEP-NCAR.

Mientras el eje de anomalías de geopotencial se encontraba al oeste de Concepción en niveles altos, indicando una situación post-frontal, aire frío todavía permanecía en los niveles medios y altos sobre la costa chilena. Sin embargo, al oeste de la ciudad y cerca de la superficie oceánica, se aprecian anomalías cálidas de temperatura de hasta +3 °C sobre la media, a pesar de estar bajo una configuración sinóptica de post-vaguada/pre-dorsal, en donde generalmente predominan advecciones frías, particularmente en las capas más bajas de la troposfera.

Estas anomalías; cálido abajo y frío arriba, son el ingrediente principal de la inestabilidad atmosférica y en la producción de movimientos verticales. La velocidad vertical omega es negativa en gran parte de la troposfera entre 90°W y la costa de Biobío, con un máximo alrededor de 850 hPa en el promedio diario justo costas afuera de Concepción, tal como se ve en los colores rojos de la figura 12b, por lo que la condición sinóptica alrededor de la zona estuvo propicia para el desarrollo de movimientos ascendentes importantes, especialmente cerca de la superficie.

Sobre esta zona, las áreas de inestabilidad se aprecian potentes (a juzgar por el desarrollo nuboso) en las imágenes de satélite el día 30 de mayo (Fig. 13), avanzando desde el Oeste al continente. Los máximos valores de CAPE según GFS se observan costas afuera del país, alcanzando entre 600 y 700 J/Kg entre las 8 y 11 HL (12 y 15 UTC). Poco antes del desarrollo de las tormentas que dio vida al tornado de Los Ángeles, se aprecia el incremento del CAPE entre la costa y los valles (15-18 UTC), con CAPE entre 300 y 400 J/Kg sobre la Región del Biobío. Este es probablemente el impulso inicial para el desarrollo de las tormentas de esa tarde.

Una vez llegada la hora de formación del tornado, el CAPE sufre una disminución importante a valores inferiores a 50 J/Kg (22 UTC), indicativo de que muy probablemente las tormentas consumieron la inestabilidad de la zona. Tal como fue mencionado en la sección

anterior, el modelo WRF presencié una disminución similar del CAPE a la hora del tornado.

6.2. Aguas más cálidas de lo normal

Estamos interesados en conocer el origen de las tormentas de gran intensidad que afectaron la zona del Biobío. Parte importante comprende la gran escala, con la presencia de una vaguada en altura y temperaturas frías en niveles altos, lo que inestabiliza la atmósfera y propicia los movimientos ascendentes. Esta condición fue la predominante durante ambas jornadas de desarrollo de los tornados, pero no es necesariamente diferente a otros eventos de sistema frontal de la época otoñal.

Respecto a lo que sucede en la superficie del mar, hay dos áreas de anomalías cálidas de TSM que nos llaman la atención. Por un lado, en la escala semanal, costas afuera de la zona sur de Chile (Fig. 14a) centrado entre 40°S y 96°W, se aprecian valores mayormente positivos (respecto de la media climatológica) previo al desarrollo de las tormentas de fines de mayo. Este incremento de TSM se ha apreciado en diferentes momentos de los últimos años, siendo conocida informalmente como “poza cálida”, aunque en términos estrictos difiere por completo de la poza cálida del Pacífico Ecuatorial Occidental. El incremento de TSM puede influir en aumentar la inestabilidad termodinámica y propiciando desarrollo de movimientos ascendentes cuando se produce una situación post-frontal, donde el flujo de aire proviene desde la región polar en dirección al norte. Las preguntas que surgen están relacionadas al hecho de que si este incremento de tormentas realmente se generó más allá de lo usual bajo la condición post-frontal de fines de mayo; y por otro lado, si esto no podría producir el efecto contrario: desatar la inestabilidad costas afuera del país y no en plena costa o en el interior.

Si bien en el compuesto semanal la costa de Biobío aparece con anomalías frías importantes, en la escala diaria se aprecian regiones más cálidas de lo normal, tal como se

ve en la figura 14 b y c en los recuadros amarillos. La gran tormenta que dió origen al tornado de Concepción se desarrolló justo en esta zona, poco antes de llegar a la línea costera. Estos incrementos de TSM son relativamente pequeños respecto a la media climatológica, de alrededor de +0,5 a +1,0 °C. Estos incrementos podrían influir en elevar parcialmente la inestabilidad a nivel local, sumado al natural incremento del ascenso al acercarnos al continente. De todas formas, no podemos concluir completa causalidad en

estos aspectos que deberían ser analizados más en profundidad. Además de la inestabilidad termodinámica, juegan un rol importante el ascenso de gran escala (que como se aprecia en la figura 12b se presenta de gran magnitud costas afuera del Biobío) y el efecto orográfico, que tiende a producir dos fenómenos: por un lado, un ascenso forzado por topografía; y por otro, un incremento del cizalle. Ambos factores podrían ser aún más relevantes que el efecto de las anomalías de TSM.

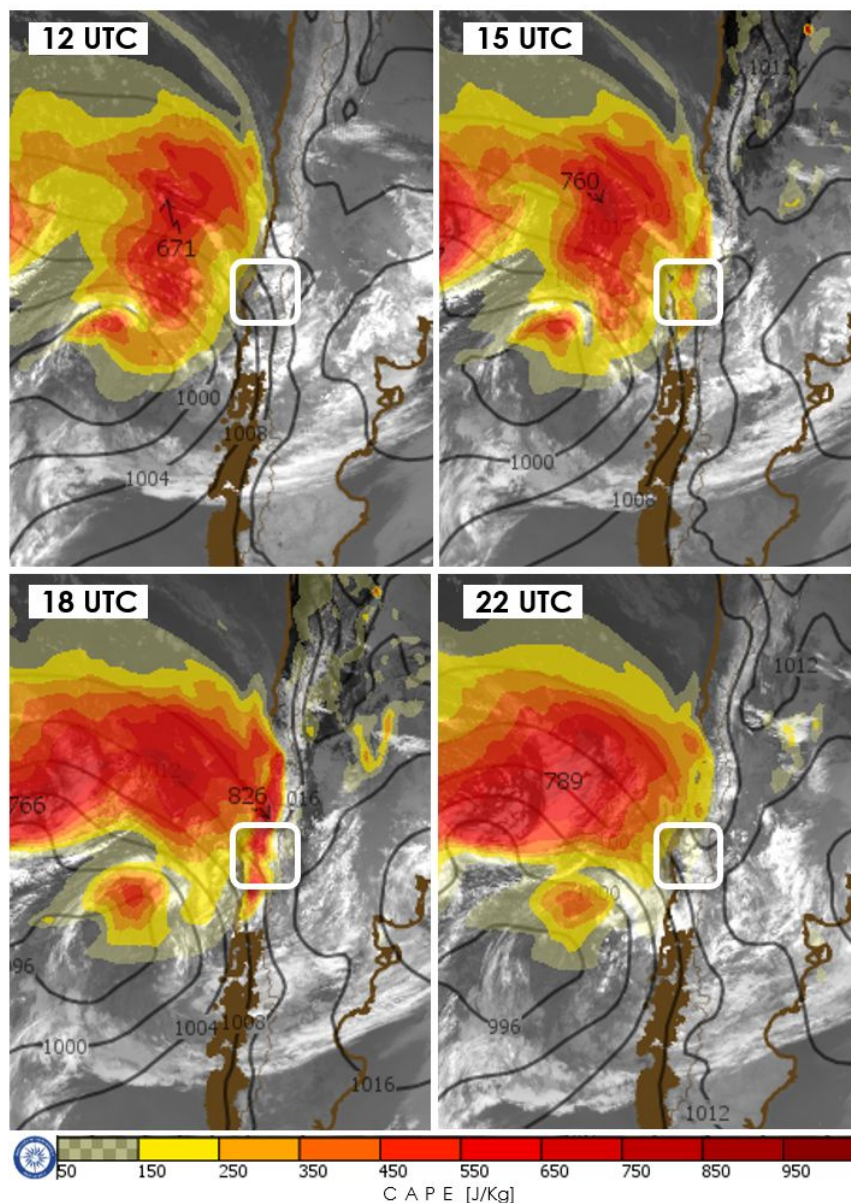


Figura 13. Presión a nivel del Mar (hPa, líneas continuas negras), CAPE (J/Kg, colores amarillos y rojos) e imagen de satélite en canal infrarrojo (colores grises y blancos) para el 30 de mayo de 2019 a las 12, 15, 18 y 22 UTC. El área demarcada en blanco representa la zona del Biobío. Valor numérico en negro corresponde al máximo CAPE. Fuente: GFS/GOES-16/DMC.

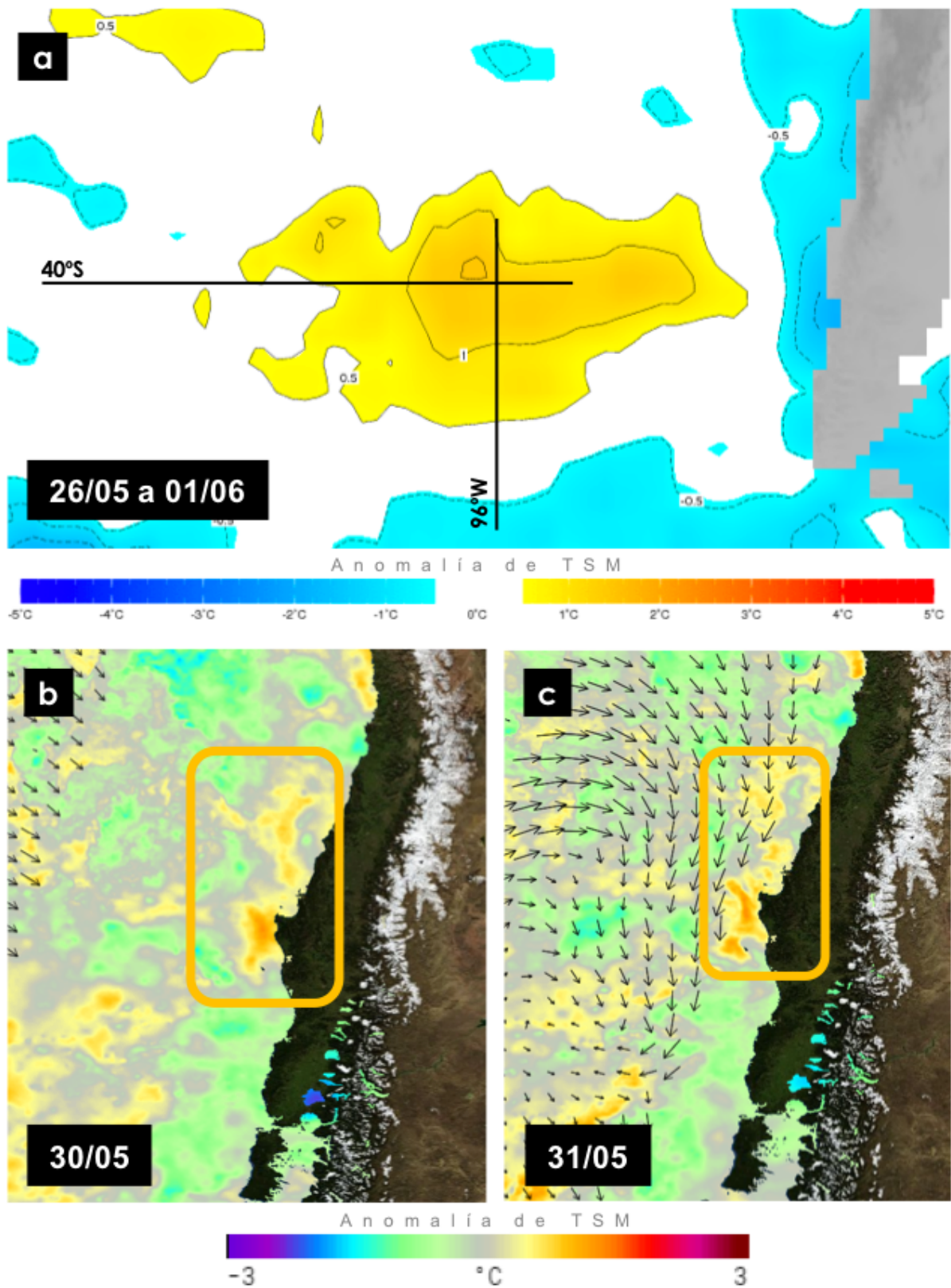


Figura 14. En (a), anomalía semanal de la TSM entre el 26/05 y el 01/06 de 2019, según datos de NOAA NCEP EMC CMB GLOBAL Reyn_SmithOlv2. En (b) y (c) anomalías diaria de TSM para el 30/05 y el 31/05, en colores, y viento en superficie estimado por satélite, en flechas. Fuente: State of The Ocean/ NASA.

Las grandes cantidades de inestabilidad costas afuera de Chile, independientemente del origen sinóptico o de factores más locales, produjo que por al menos dos días gran parte del país estuviese con amenaza de actividad convectiva.

De todas formas, ciertos trabajos realizados en Estados Unidos, así como el mencionado anteriormente para el caso de tornados en estaciones frías como la nuestra, indican que la presencia de CAPE es necesaria para generar tornados, pero no es el mejor proxy para determinar su desarrollo. No son pocos los tornados que tienden a formarse incluso con CAPE²⁶ bastante bajo, lo que nos da la idea general de que si se requiere CAPE pero no necesariamente en grandes cantidades.

6.3. Sobre el cizalle vertical

6.3.1. Perfiles verticales

Como fue mencionado en el reporte, el cizalle vertical parece de gran magnitud en el caso de Concepción y Talcahuano, superando umbrales identificados por autores de estudios extranjeros como importantes para el desarrollo de tornados en estación fría: mayor a 39,6 Km/h (11 m/s) entre 0 y 1 Km. En el caso de estudios realizados en la planicie estadounidense, un mejor indicador corresponde al cizalle entre 0 y 6 km, donde el umbral de mínima de cortante corresponde a 46 Km/h (12,9 m/s).

Sin embargo, debemos considerar que es probable que sus resultados no son del todo aplicables a nuestro país, por lo que se deben tomar con precaución. En esta discusión, los mantendremos en mente por ser una de las pocas referencias. Por ejemplo, uno de los factores que se debe considerar es la interacción del flujo con la orografía, lo que puede favorecer la liberación de inestabilidad potencial.

La falta de información en altura no permite inferir demasiado sobre la atmósfera previa o en el momento del desarrollo de los tornados, aunque los datos AMDAR y WRF son nuestra mejor aproximación.

Previo al desarrollo de los tornados, los datos de altura nos muestran algunas particularidades interesantes. En primer lugar, el cizalle presenta dos máximos de importancia bajo los 7 Km de altitud. En el caso del tornado de Los Ángeles, la medición realizada por un vuelo comercial saliendo de Concepción hacia el norte, indica un prominente máximo bajo los 500 m de altitud, alcanzando 73 Km/h (20,3 m/s), tal como se ve la figura 15 en la curva roja segmentada. Un segundo máximo se registra entre 0 y 3 Km, con magnitudes de hasta 83 Km/h (23,1 m/s).

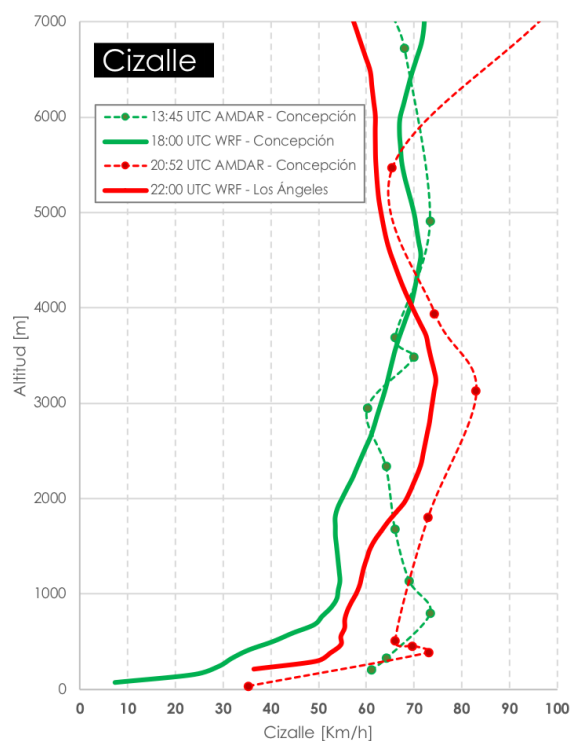


Figura 15. Cizalle vertical previo al desarrollo del tornado (datos AMDAR, línea segmentada) y durante el tornado (estimado por WRF, línea continua) para Los Ángeles (30/05; línea roja) y Concepción (31/05; línea verde). Calculado entre superficie y niveles, en Km/h.

Para el caso de Talcahuano/Concepción, se aprecia un máximo a 800 m de altitud y alcanza 73,4 Km/h (20,4 m/s). En niveles más altos, el cizalle registra un segundo máximo a casi 5 Km

²⁶ Tornadoes with Cold Core 500-mb Lows: Jonathan M. Davies, 2006

de altura, con una magnitud de 73,3 Km/h (20,4 m/s). Estos valores indican que la atmósfera previa al desarrollo de los tornados presentó valores de cizalle sobre los 60 Km/h (16,7 m/s) prácticamente en toda la columna bajo los 7 Km, tal como se ve en la figura 15 en líneas segmentadas.

Para el momento del desarrollo del tornado, en donde solo tenemos los pronósticos de WRF, se aprecian valores de cizalle de 40 Km/h entre 0 y 1 Km para el caso de Los Ángeles. En el caso de Concepción, el cizalle fue mayor y alcanzó cerca de 50 Km/h, tal como se ve en la figura 15. El cizalle creció en magnitud hacia niveles más altos, hasta un máximo local entre 0 y 3,5 Km para Los Ángeles y entre 0 y 4,5 Km para el caso de Concepción con magnitudes superiores a 70 Km/h.

De la figura 15 también se desprende una conclusión importante. Mientras en niveles altos WRF y AMDAR poseen magnitudes de cizalle muy similares (ver el máximo de las curvas segmentadas y continuas) a pesar de estar comparando horas diferentes, cerca de la superficie las diferencias son muchos más notorias y WRF parece subestimar de manera considerable los valores de viento y, por tanto, del cizalle, con diferencias entre 20 y 30 Km/h. Esto podría estar dado por el hecho de que justamente no estamos comparando horas exactas, pero también, a algunos problemas del modelo con representar los primeros kilómetros de la atmósfera, donde usualmente se deben aplicar parametrizaciones (de capa límite, por ejemplo).

Otra conclusión de relevancia es que los máximos cercanos a la superficie, medidos por los vuelos comerciales, se repiten tanto para el caso del tornado de Los Ángeles como el de Concepción. Este máximo es bastante abrupto y se encuentra bajo el kilómetro de altura, previo al desarrollo de las tormentas tornadogénicas.

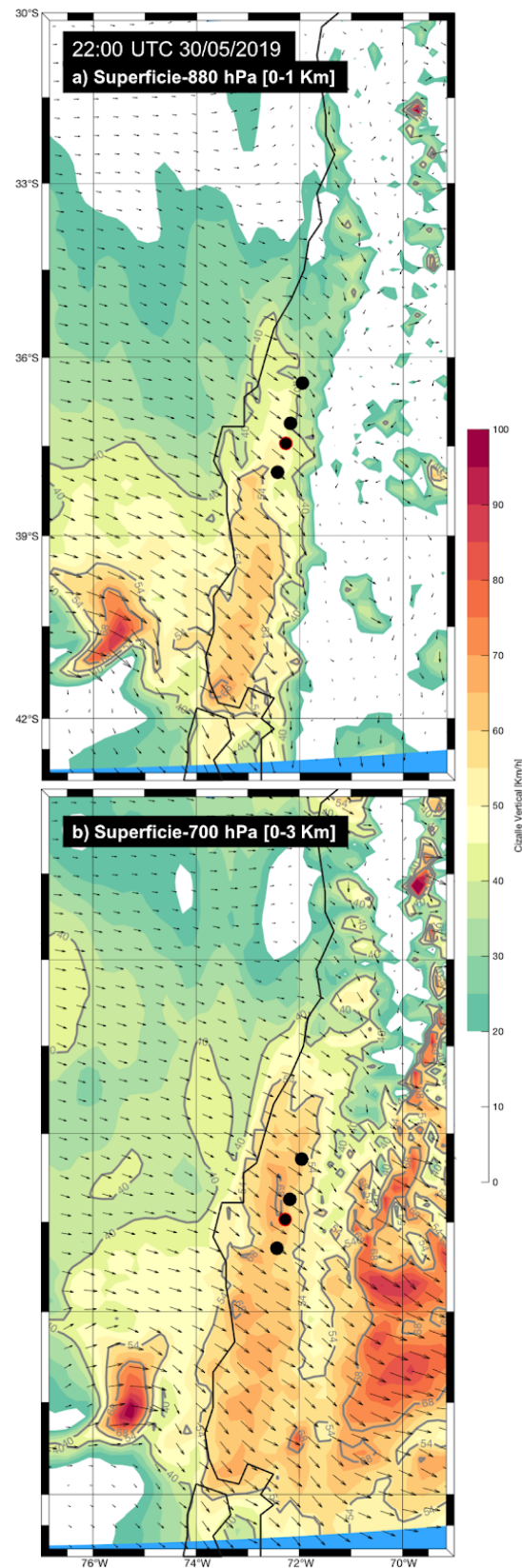


Figura 16. Campo espacial del cizalle vertical estimada por WRF entre superficie y 880 hPa (aprox. 0-1 Km, panel a) y entre superficie y 700 hPa (aprox. 0-3 Km, panel b), para las 22:00 UTC del 30/05. Los puntos negros representan zonas con evidencia de tornados confirmados/sin confirmar.

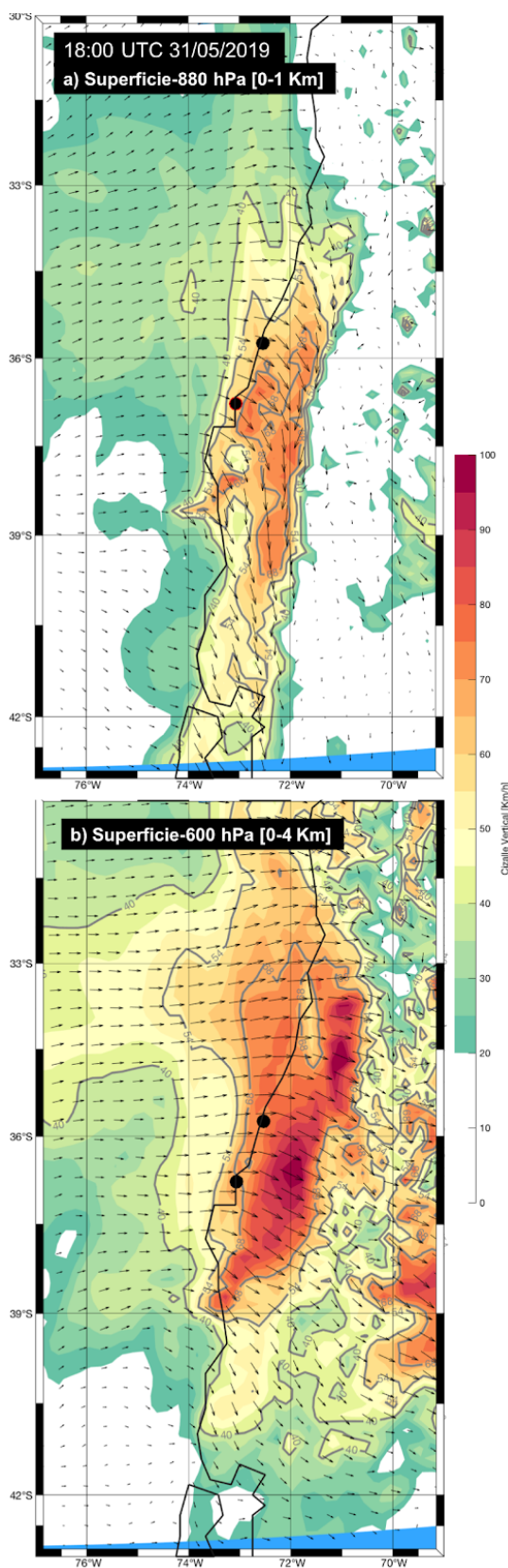


Figura 17. Campo espacial del cizalle vertical estimada por WRF entre superficie y 880 hPa (aprox. 0-1 Km, panel a) y entre superficie y 700 hPa (aprox. 0-3 Km, panel b), para las 18:00 UTC del 31/05. Los puntos negros representan zonas con evidencia de tornados confirmados/sin confirmar.

No tenemos referencias climatológicas sobre si este cizalle es normal durante el paso de sistemas frontales o situaciones post-frontales, pero los datos parecen indicar que estamos ante la presencia de una magnitud de gran relevancia, lo que incluso generó reportes especiales de las aeronaves para el caso particular de Concepción (reportes AIREP, ver Fig. 7b). Además, los estudios referidos de tornados de estación fría en otras latitudes indican que magnitudes del cizalle superiores a 40 ó 54 Km/h (11 ó 15 m/s) parecen propiciar el desarrollo de estos fenómenos, especialmente si la cortante es entre 0 y 1 Km de altitud.

6.3.2. Distribución espacial

Ya hemos analizado los perfiles verticales del cizalle sobre nuestros puntos de interés. Ahora, realizaremos un análisis de los campos espaciales, con el objetivo de determinar algunas particularidades de la cortante sobre las áreas de tornados. Se utilizó WRF para dos niveles particulares: entre superficie y 880 hPa, que corresponde aproximadamente entre 0 y 1 Km, y también entre superficie y 700 hPa (0 a 3 Km) para el caso de Los Ángeles y entre superficie y 600 hPa (0 a 4 Km); puesto que los análisis previos demostraron la existencia de otro máximo del cizalle, más o menos entre 3 y 4 Km.

Para el primer tramo, el más cercano a la superficie, el modelo estimó magnitudes superiores a 40 Km/h del cizalle, prácticamente desde el sur del Maule hasta la Región de Los Lagos, tal como se ve en la figura 16a en los colores amarillos. Particularmente sobre Los Ángeles, la magnitud oscila entre 40 y 54 Km/h, situación que también se presenta en Collipulli, Yungay y San Carlos (puntos de color negro en la figura 16).

Más al sur, el cizalle es aún mayor, superando los 54 Km/h desde 38 a 42°S.

Para el nivel entre 0 y 3 Km (Fig. 16b), se aprecian magnitudes sobre 54 Km/h entre el sur del Maule y hasta la costa interior de Los

Lagos. Los máximos valores se aprecian justo desde el interior del Ñuble (36°S), hasta la zona de Puerto Montt (42°S).

Podemos concluir preliminarmente, considerando los datos del modelo WRF, que tanto el tornado de Los Ángeles, como los otros potenciales tornados sin confirmar del 30 de mayo, se desarrollaron en tormentas que estaban inmersas en un ambiente de gran cizalle en los niveles más bajos de la troposfera, especialmente entre 0 y 3 Km.

Aunque hubo otros puntos con tormentas alrededor de las 22:00 UTC, las imágenes de satélite denotan que la mayor parte se desarrollaron entre la Región del Ñuble y el Biobío. Es probable que otras zonas con gran cizalladura, como toda la Región de Los Ríos o Los Lagos, no hayan presentado tormentas convectivas de intensidad como para formar tornados visibles para la población, pero esto debería ser analizado en mayor profundidad.

En el caso de las tormentas que provenían desde el océano para el 31 de mayo asociado a una vaguada de onda corta (o nube tipo coma), estas también se encontraron con condiciones ambientales de gran cizalle en los niveles más bajo de la atmósfera. Tal como se ve en la figura 17a y b, con valores sobre los 54 Km/h que se se aprecian desde varios kilómetros mar afuera hacia los valles desde 33 a 39°S. Estos valores se incrementan hasta máximos de 70 Km/h en el caso de la cortante de 0-1 Km, justo al interior de Concepción; y hasta 90 Km/h tierra adentro para el caso del cizalle 0-4 Km, tal como se ve en los colores más oscuro de la figura 17b.

El potencial efecto de la topografía sobre el cizalle debe ser minuciosamente estudiado, pero es probable que permita incrementar la magnitud del vector, tal como se ve en casi todos los paneles de la figura 16 y 17, en donde el cizalle tierra adentro es bastante mayor que el presente sobre el océano. El terreno no solo tiene una mayor rugosidad, disminuyendo la magnitud del viento cerca de la superficie, sino que también genera cambios

en la dirección del viento. Tal como fue observado gracias a los vuelos AMDAR sobre Concepción, el viento cerca de la superficie era primordialmente del Norte o Nor-Noreste; mientras que en los niveles altos (aproximadamente entre 800 y 700 hPa), además de un incremento en la magnitud y con una dirección de componente desde el Noroeste.

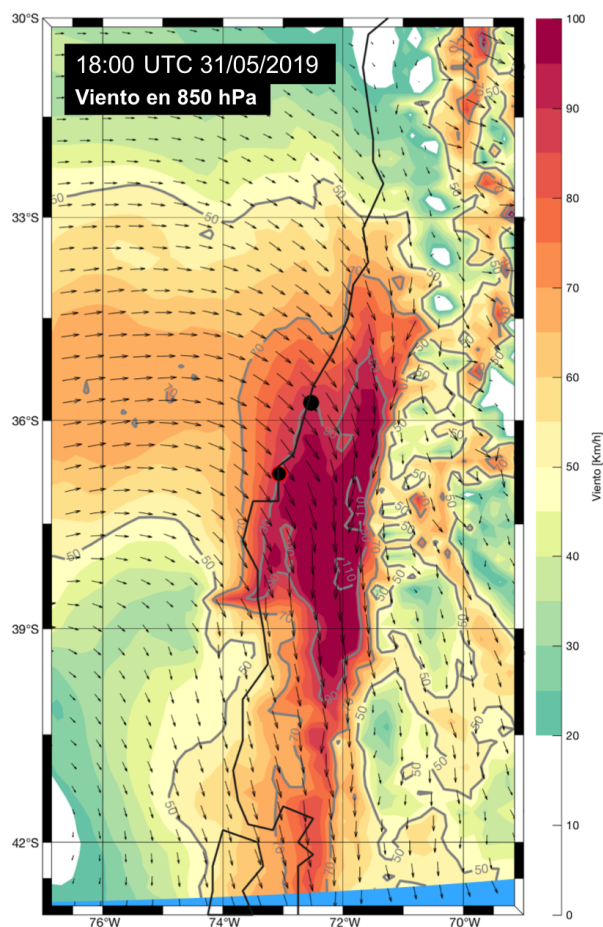


Figura 18. Campo espacial del viento en 850 hPa estimado por WRF en 850 hPa, para las 18:00 UTC del 31/05. Los puntos negros representan zonas con evidencia de tornados confirmados/sin confirmar.

Un factor que parece relevante es la gran intensidad del viento en niveles bajos de la troposfera, particularmente en los alrededores del nivel de 850 hPa simulado por WRF. Como se ve en la figura 18, se aprecia un máximo de vientos o jet curvado desde el océano hacia el sur sobre la zona de Biobío hasta Los Lagos. La magnitud bordea los 100 Km/h en gran parte del área en cuestión, con máximos superiores a

110 Km/h. Este máximo está separado del máximo de vientos en altura (corriente en chorro) que se encuentra a una latitud más baja (al norte de 30°S).

Surgen muchas interrogantes respecto a si esta intensidad de cizalle es normal bajo condiciones post-frontales, o si existe un umbral más o menos definido para identificar el potencial tornadogénico de una tormenta que se desarrolle en estos sectores. También sale a relucir otras preguntas relacionadas a cuantos tornados realmente se produjeron y cuántos no fueron identificados, así como también cuantas tormentas se formaron y no generaron ningún tipo de tornado a lo largo de sus horas de vida, a pesar de estar inmersas en un ambiente de gran cizalladura.

Debemos recordar que incluso con todos los ingredientes conocidos (como inestabilidad y cizalle, entre otros), los tornados no siempre se presentan. En Estados Unidos, investigadores han determinado que cerca de un 80% de las rotaciones cercanas a superficie favorables a desarrollar un tornado, no logran concretarse²⁷, dejando en evidencia que aún hay varios procesos de pequeña escala que no se conocen o entienden del todo, tanto en la planicie estadounidense como en los tornados de temporada fría de California y Australia.

²⁷ What we know and don't know about tornado formation: *Markowski y Richardson, 2014*

7

Conclusiones



7. Conclusiones

7.1. Sobre las características sinópticas y locales asociadas a las tormentas tornadogénicas de mayo de 2019

La falta de mediciones en superficie y altura es una limitante importante para determinar las características de las tormentas y tornados que se desarrollaron en la Región del Biobío. Sin embargo, utilizando mediciones realizadas por datos AMDAR, así como también pronósticos del modelo WRF y datos de reanálisis NCEP-NCAR, podemos concluir que:

i) Una prominente vaguada se posicionó sobre el Pacífico Sur durante los días en que hubo registros de tormentas tornadogénicas, con un jet en niveles altos desplazado hasta la latitud Antofagasta (23°N). En superficie, el desarrollo de las tormentas se generó en una situación post-frontal, es decir, el frente frío principal ya había pasado hacia Argentina, tal

como se ve esquemáticamente en la figura 16. La baja presión principal estaba posicionada costas afuera de Puerto Montt (42 °S).

ii) Niveles de CAPE > 400 J/Kg fueron observados costas afuera de la zona central, con máximos puntuales cercanos a 800 J/Kg. Se estima que la magnitud de la inestabilidad pudo haber sido aumentada debido a la presencia de TSM más cálida de lo normal sobre el Pacífico Sur, aunque esta hipótesis debe ser corroborada por estudios más detallados.

iii) Líneas de tormenta se desarrollaron tanto continente adentro en el caso de Los Ángeles, como por una vaguada de onda corta y una nube tipo coma en Concepción, proveniente de esta zona de alta inestabilidad ubicada al oeste de Biobío.

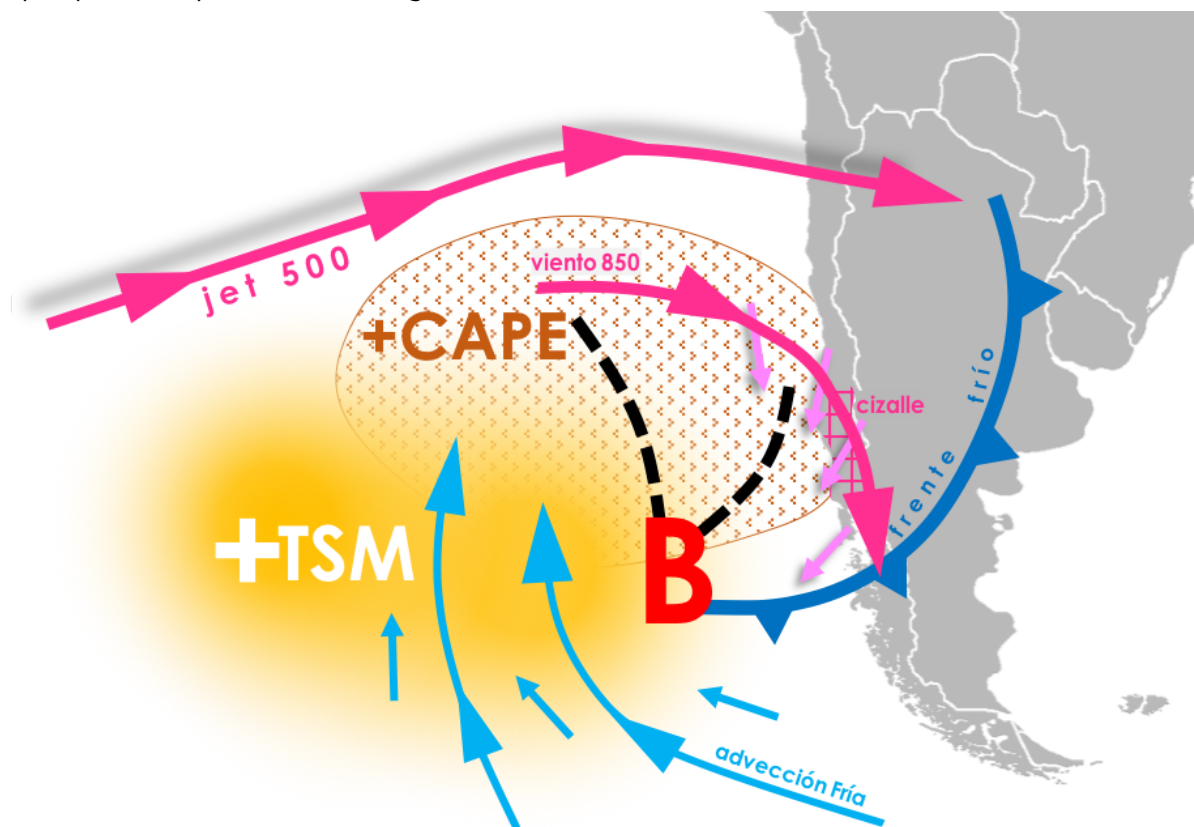


Figura 16. Patrón sinóptico esquemático asociado a los tornados del 30 y 31/05 de 2019. Las flechas rosadas pequeñas representan el viento en superficie. La línea negra segmentada representa extensiones de vaguadas en superficie.

iii) Antes y durante el desarrollo de los tornados, el CAPE oscila entre 0 y 200 J/Kg sobre las zonas en cuestión.

iv) Antes del desarrollo de los tornados, tanto Los Ángeles como Concepción registraron un cizalle vertical (0-1 Km) con magnitudes entre 65 y 75 Km/h (18,1 y 20,8 m/s) según datos AMDAR. Para los momentos en que se desarrollaron los tornados, las magnitudes estimadas por el modelo WRF oscilan entre 50 y 60 Km/h (13,9 y 16,7 m/s).

v) Un segundo máximo del cizalle vertical se observa tanto antes como durante el desarrollo de los tornados. Para Los Ángeles este máximo está entre 0-3 Km y en Concepción entre 0-4 Km. Las magnitudes oscilan entre 71 y 83 Km/h (19,8 y 23,1 m/s).

De esta forma, podemos concluir que la atmósfera circundante a las tormentas tornadogénicas del 30 y 31 de mayo presentaron condiciones de baja buoyancia, pero de gran cizalle. La magnitud de estas cortantes, si bien deben ser comparadas con otros eventos, parecen de gran intensidad y coinciden con lo que han encontrado otros estudios de tornados en zonas similares a nuestro país. Es por que esto que una potencial hipótesis sobre el origen de los tornados tiene que ver con que, independiente del origen de la tormenta, si esta se encuentra en un medio ambiente de gran cizalle entre 0 y 1 Km de altitud, podría alcanzar un potencial tornadogénico suficiente para el desarrollo de estos fenómenos.

Es importante recordar que los tornados son fenómenos infrecuentes en nuestro país. Para poder identificar umbrales de cizalle, CAPE u otro indicador, es necesario realizar estudios que consideren a los otros eventos de tornado sucedidos en el sur de Chile y cruzarlo con información meteorológica disponible. De esta forma, se podrá a llegar a concluir patrones meteorológicos más robustos y más completos de los casos de tormentas tornadogénicas, aunque es probable que el número de eventos se vuelva una limitante a nivel estadístico.

7.2. Sobre los tornados del 30 y 31 de mayo de 2019

La información oficial confirma que al menos dos tornados se registraron entre el 30 y 31 de Mayo: Un tornado en Los Ángeles y otro en Talcahuano/Concepción. Algunos reportes de ONEMI, así como también de redes sociales y medios de comunicación, indican que otros cinco fenómenos asociado a daños materiales en casas y árboles, podrían haber sido tornados, afectando a diferentes localidades entre la Región del Maule y la Región de La Araucanía. Sin embargo, no podemos confirmar por ahora que se trataran de tornados y no algún otro fenómeno asociado a tormentas severas.

Tal como fue mencionado en el desarrollo de este informe, se determinó que la intensidad del tornado de Los Ángeles fue de EF-2, con vientos máximos estimados entre 178 y 217 Km/h. El tornado recorrió una trayectoria zig-zag norte-sur en el sector Nororiente de la ciudad y aproximadamente por 5 Km, con una duración estimada entre 7 y 8 minutos.

En el caso del tornado de Concepción, alcanzó la categoría EF-1 y recorrió cerca de 17,7 Km en 15 minutos aproximadamente. Nacido sobre mar, correspondió inicialmente a una tromba marina, pero al avanzar sobre tierra la nomenclatura oficial y correcta corresponde a tornado. Datos en superficie, medidos a menos de 1 Km del tornado, registraron vientos instantáneos entre 92 y 102 Km/h. La velocidad de viento máxima estimada, según la escala mejorada de Fujita, osciló entre 137 y 177 Km/h.

En ambos casos, se trató de tornados de características saltatorias (*skipping* tornado) y multivórtice, lo que explica la forma del patrón de daños en edificaciones, árboles y vehículos a lo largo de las trayectorias.

7.3. Sobre las mediciones meteorológicas

La importancia de entender con exactitud cuáles fueron las causas y orígenes de los

tornados registrados el 30 y 31 de mayo de 2019 en la Región del Biobío radica en que, si bien, son fenómenos poco frecuentes en nuestro país, pueden producir grandes daños y se vuelven una amenaza importante para la población. Por lo mismo, la falta de datos meteorológicos, que fue parcialmente compensada pero no totalmente reemplazada por información de modelos meteorológicos y de aviones comerciales, debe ser tomada a consideración tanto para el análisis de pronósticos tipo “now-casting” como para la investigación climatológica, por lo que se propone:

- Implementar el lanzamiento de radiosondas en la Región del Biobío, específicamente desde el Aeródromo Carriel Sur, de tal forma de poseer mayor detalle de las condiciones atmosféricas, dinámicas y termodinámicas de la zona. Se deben incluir otros puntos costeros y de valles a la red de mediciones en altura, de tal forma de cubrir de mejor forma el área más habitada del país (La Serena a Puerto Montt).
- Aumentar la red de estaciones automáticas, puesto que actualmente la región del Bío Bío cuenta con solo 2 estaciones de este tipo, lo que disminuye las posibilidades de registrar y comprender estos fenómenos. Se considera esencial volver la estación de María Dolores, en Los Ángeles, una estación automática en línea e incorporar otros puntos de la costa e interior de la Región a la red.
- Generar un sistema de visualización, calibración y automatización de los datos AMDAR, para sacar máximo provecho de esta importante red de información proveniente de los aviones comerciales y considerando el incremento constante del número de vuelos sobre nuestro país. Es primordial ajustar la información según recomendaciones internacionales y generar validación automática y constante de esta información con radio-sondas (en donde se posean) de tal forma de verificar y encontrar posibles sesgos en la medición.