



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Análisis de las condiciones meteorológicas de
mesoescala en la incidencia de tornados en
México**

Tesis que presenta

José Francisco León Cruz

Para obtener el grado de

Maestro en Geociencias Aplicadas

Director de la Tesis:

Dr. Noel Carbajal

San Luis Potosí, S.L.P., a 10 del mes de julio de 2015



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "**Análisis de las condiciones meteorológicas de mesoescala en la incidencia de tornados en México**" presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **José Francisco León Cruz** y aprobada el **cuatro de agosto del dos mil quince** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Noel Carbajal Pérez
Director de la tesis

Dr. Luis Felipe Pineda Martínez
Miembro del Comité Tutorial

Dr. José Tuxpan Vargas
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en las instalaciones de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Noel Carbajal.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-298737) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 008 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 4 días del mes de agosto del año 2015, se reunió a las 13:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. Luis Felipe Pineda Martínez
Dr. José Tuxpan Vargas
Dr. José Noel Carbajal Pérez

Presidente
Secretario
Sinodal

UAZ
IPICYT
IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó el C.

José Francisco León Cruz

sobre la Tesis intitulada:

Análisis de las condiciones meteorológicas de mesoescala en la incidencia de tornados en México

que se desarrolló bajo la dirección de

Dr. José Noel Carbajal Pérez

El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 14:15 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 4 días del mes de agosto de 2015.

Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado

Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico



*Dedicado a mi
familia*

Agradecimientos

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., por todo el apoyo y atención prestada durante mi estancia de dos años.

A la División de Geociencias Aplicadas, por arroparme y guiarme durante mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada.

Al Comité de Becas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., por los apoyos económicos brindados para mi asistencia a congresos y seminarios.

Al Dr. Noel Carbajal, por su paciencia, sus conocimientos, su motivación a ser cada día mejor, pero sobre todo por su amistad.

Al cuerpo académico de la División de Geociencias Aplicadas, por brindarme sus conocimientos de las diversas áreas que trabajan.

A mis compañeros y colegas del IPICYT, con los que tuve la oportunidad de compartir aventuras, momentos de alegría y también de frustración, de ocio y trabajo, y que me ayudaron de una u otra forma para la conclusión de mi investigación.

A mis amigos potosinos, que abrieron sus brazos a un foráneo más en la ciudad.

A mi familia y a mi novia, por brindarme su apoyo incondicional durante estos dos años.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos institucionales	iii
Acta de examen	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Contenido	vii
Lista de figuras	ix
Anexos	xiii
Resumen	xiv
Abstract	xv
Introducción	1
Planteamiento del problema	1
Objetivos	3
Justificación	3
Estructura de la tesis	4
Referencias	5
Capítulo I: Panorama general en el estudio de tornados	7
1.1 Definición de tornado	7
1.2 Características generales	7
1.3 Clasificación de tornados	8
1.4 Climatología	10
1.5 Uso de las simulaciones numéricas en el estudio de tornados	13
1.6 Referencias	15
Capítulo II: Estadística actualizada de los tornados en México	17
2.1 Introducción	17
2.2 Metodología	18
2.3 Resultados	19
2.3.1 Eventos por estado	19
2.3.2 Distribución espacial	20
2.3.3 Tornados por año	22
2.3.4 Clasificación por mes de ocurrencia	24
2.3.5 Clasificación por hora de ocurrencia	25
2.3.6 Recuento total de daños	25
2.4 Conclusiones	27
2.5 Referencias	29
Capítulo III: Simulación numérica de la meteorología de tornados en México	30
3.1 Introducción	30

3.2 Metodología	31
3.3 Estudios de caso	34
3.3.1 Caso de Leona Vicario, Benito Juárez, Quintana Roo	35
3.3.2 Caso del Zócalo Capitalino, Delegación Cuauhtémoc, Distrito Federal	42
3.3.3 Caso de la Delegación de Huescalapa, Zapotiltic, Jalisco	49
3.3.4 Caso de la Sindicatura de Costa Rica y Villa Juárez, Navolato, Sinaloa	55
3.3.5 Caso del Lago de Yuriria, Yuriria, Guanajuato	62
3.3.6 Caso de la Cabecera Municipal de Ojinaga, Chihuahua	69
3.3.7 Caso de la Cabecera Municipal de Tangancícuaro, Michoacán	77
3.3.8 Caso de la Región del Santuario, Otatitlán, Veracruz	85
3.3.9 Caso de la Cabecera Municipal de San Cristóbal de las Casas, Chiapas	93
3.3.10 Caso de Huimiyucan, Almoloya, Hidalgo	101
3.4 Conclusiones	108
3.5 Referencias	109
Capítulo IV: Análisis e interpretación de resultados	115
4.1 Condiciones sinópticas	115
4.2 Meteorología de mesoescala	116
4.3 Clasificación de tornados	118
4.3.1 Tornado supercelda	118
4.3.2 Tornado no supercelda (tornado orográfico)	120
4.4. Conclusiones	122
Conclusión final	123
Anexos	124
Tornado de Ciudad Acuña, Coahuila: el evento más mortífero en la historia de México	124

Lista de figuras

Capítulo I

1.1 Presencia de tornados a nivel mundial	8
1.2 Clasificación de tornados según Agee y Jones (2009). Tipo I, II, III de izquierda a derecha	10
1.3 Componentes para la formación de tornados en los Estados Unidos de América	11
1.4 Días por año con condiciones favorables para la formación de tornados	12
	20

Capítulo II

2.1 Número de reportes por estado	
2.2 Distribución espacial de reportes de tornados en México	21
2.3 Densidad de reportes de tornados en México	22
2.4 Número de reportes por año	23
2.5 Número de reportes por mes	24
2.6 Número de reportes por hora	25
2.7 Tipos de daños ocasionados. Huimiyucan (2014), Ojinaga (2013), Tangancícuaro (2013) y San Cristóbal de las Casas (2014)	26

Capítulo III

3.1 Diagrama de flujo del modelo WRF	32
3.2 Distribución espacial de los casos analizados	34
3.3 Mapa de ubicación del tornado de Benito Juárez, Quintana Roo	35
3.4 Fotografías del evento	36
3.5 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 09:00 y 21:00 horas	37
3.6 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo	38
3.7 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo	39
3.8 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante	40
3.9 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3	41
3.10 Mapa de ubicación del tornado de la Ciudad de México	42
3.11 Fotografías del evento	43
3.12 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 09:00 y 21:00 horas	44
3.13 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del	45

viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo	
3.14 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo	46
3.15 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante	47
3.16 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3	48
3.17 Mapa de ubicación del tornado de Zapotiltic, Jalisco	49
3.18 Fotografías del evento	50
3.19 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 09:00 y 21:00 horas	51
3.20 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo	52
3.21 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo	53
3.22 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante	53
3.23 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3	54
3.24 Mapa de ubicación del tornado de Navolato, Sinaloa	55
3.25 Fotografías del evento	56
3.26 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 09:00 y 21:00 horas	57
3.27 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo	58
3.28 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo	59
3.29 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante	60
3.30 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3	61
3.31 Mapa de ubicación del tornado de Yuriria, Guanajuato	62
3.32 Fotografías del evento	63
3.33 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas	64
3.34 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo	65
3.35 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo	66
3.36 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante	66
3.37 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3	68

3.38 Mapa de ubicación del tornado de Ojinaga, Chihuahua	69
3.39 Fotografías del evento	70
3.40 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas	71
3.41 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo	72
3.42 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo	73
3.43 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante	74
3.44 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3	75
3.45 Mapa de ubicación del tornado de Tangancícuaro, Michoacán	77
3.46 Fotografías del evento	78
3.47 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas	79
3.48 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo	80
3.49 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo	81
3.50 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante	82
3.51 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3	83
3.52 Mapa de ubicación del tornado de Otatitlán, Veracruz	85
3.53 Fotografías del evento	86
3.54 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas	87
3.55 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo	89
3.56 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo	89
3.57 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante	90
3.58 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3	91
3.59 Mapa de ubicación del tornado de San Cristóbal de las Casas, Chiapas	93
3.60 Fotografías del evento	94
3.61 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas	95
3.62 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo	96
3.63 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores	97

de viento (b) a nivel del suelo	
3.64 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante	98
3.65 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3	99
3.66 Mapa de ubicación del tornado de Almoloya, Hidalgo	101
3.67 Fotografías del evento	102
3.68 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas	103
3.69 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo	104
3.70 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo	105
3.71 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante	106
3.72 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3	107

Capítulo IV

4.1 Diagrama de formación de tornado supercelda	119
4.2 Proceso de formación del tornado de Zapotiltic, Jalisco	121

Anexos

1.1 Mapa de ubicación del tornado de Ciudad Acuña, Coahuila	124
1.2 Fotografías del evento	125
1.3 Tipos de daños ocasionados por el tornado	126
1.4 Imagen interpretada del satélite GOES para las 06:00 horas	127
1.5 Imagen satelital (a) e imagen de radar (b) para las 5:50 horas	128
1.6 Imagen de radar en 3-D para las 6:08 horas	128
1.7 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en la vertical (c) y vorticidad potencial (d) en superficie	129
1.8 Distribución de energía potencial de convección (CAPE) y vectores de viento en superficie con orografía	131
1.9 Corte verical de terreno con humedad relativa a latitud (a) y longitud (b) constante	132
2.0 Corte vertical de terreno con distribución de vectores de viento y vorticidad potencial a latitud (a y c) y longitud (b y d) constante	133

Anexos

1. Tornado de Ciudad Acuña, Coahuila: el evento más mortífero en la historia de México	122
--	-----

Resumen

Análisis de las condiciones meteorológicas de mesoescala en la incidencia de tornados en México

PALABRAS CLAVE: Meteorología, tornados, estadística, México.

Se presentan los resultados de una investigación sobre las condiciones meteorológicas de mesoescala imperantes en diez distintos casos de tornados sobre el territorio mexicano. Por medio de una estadística actualizada, se reportan los eventos de tornado ocurridos en México durante los últimos 16 años. La investigación se dividió en tres pasos; primeramente la búsqueda y recopilación de eventos de tornado en el país. Los datos recopilados sirvieron de base para la elaboración de una cartografía y gráficos de distribución espacial y temporal. Un total 54 eventos de tornados fueron recopilados, mismos que se anexaron a los 138 existentes. El siguiente paso fue simular las condiciones meteorológicas numéricamente de 10 eventos diferentes de tornados en el país aplicando el Weather Research and Forecasting Model (Modelo WRF). Posteriormente, los resultados arrojados por el modelo se analizaron y se efectuó la interpretación de la meteorología de mesoescala existente en los casos mencionados anteriormente. El tercer paso consistió en la comparación de las variables analizadas mediante gráficos superficiales y cortes verticales. Este proceso fue complementado con información meteorológica de niveles sinópticos que fueron proveídos por imágenes satelitales interpretadas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Las variaciones de temperatura, humedad, vorticidad potencial y velocidad del viento en la vertical se ven influenciados fuertemente por la orografía. Esta investigación permitió obtener una primera idea sobre las condiciones meteorológicas bajo las cuales ocurren los tornados en México. Los resultados obtenidos revelan esencialmente dos formas de ocurrencia; los derivados de superceldas como en los Estados Unidos de América y los que ocurren en zonas topográficamente complejas con vientos convergentes y divergentes, catabáticos y anabáticos y que requieren una investigación más profunda.

Abstract

Analysis of mesoscale meteorological conditions in the incidence of tornadoes in Mexico

KEY WORDS: Meteorology, tornadoes, statistics, Mexico.

Results of a research work about mesoscale meteorological conditions prevailing in ten different cases of tornadoes over Mexican territory is presented. An updated statistic over tornado events, occurred in Mexico during the last 16 years, was also carried out. This research was divided into three steps: the first step was the compilation of tornado events in Mexico. The collected data provided the basis for developing a cartography of spatial and temporal distributions of tornadoes. A total of 54 tornado events were collected which were added to the existing 138 from a previous classification. The next step was the numerical simulation of the weather conditions of ten different tornado events in different parts of the country using the Weather Research and Forecasting Model (WRF Model). The results obtained from the model were analyzed and an interpretation of the resulting mesoscale meteorology was performed. The variables analyzed by surface and vertical cross section were compared. This process was complemented by synoptic information provided by interpreted satellite images from the National Weather Service of Mexico (SMN-Mexico). Vertical variations of temperature, relative humidity potential vorticity and wind speed are strongly influenced by topography. This research allowed obtaining a first idea of the weather conditions under which tornadoes occur in Mexico. The results reveal essentially two ways of occurrence of tornadoes: supercell tornadoes as it often happens in the United States of America, and those occurring in topographically complex areas with convergent and divergent wind fields, anabatic and katabatic winds which requires further research.

Introducción

Planteamiento del problema

El número de desastres a nivel mundial está en constante aumento. Los daños causados cada año suman millones de dólares, además de las pérdidas humanas. El aumento de la población mundial, las desigualdades sociales y económicas, el establecimiento de poblaciones en zonas de riesgo y el aumento de fenómenos naturales, son algunas de las principales causas de tal problemática.

Adhikari y Yoshitani (**2009**) señalan que a partir de la década de los 60's el número de desastres emprende un crecimiento. Cuando en 1950 se registraron cerca de 50 eventos, en 2006 el número alcanzó los 500, aunque sólo los sucesos que tuvieron un origen natural fueron contemplados en dicha estadística. Guha-Sapir et. al. (**2014**) mencionan que dentro de este tipo de desastres se distinguen los geofísicos; como erupciones volcánicas y terremotos, los meteorológicos; como las tormentas y tornados, los hidrológicos; como las inundaciones, los climatológicos; como las sequías o temperaturas extremas y los biológicos; como las epidemias.

Aglomerando los desastres hidrológicos, meteorológicos y climáticos en una sola categoría se tienen los hidrometeorológicos. Estos representaron el 90.3% del total de los desastres a nivel mundial en el 2013, y el 91.2% en el periodo de 2003-2012. Habrían provocado 89.3 millones de muertes tan sólo en 2013 y 207.19 millones en el periodo de 2003-2012. También simbolizaron en promedio pérdidas por 109.57 mil millones de dólares sólo en 2013, siendo el promedio 107.26 mil millones por año en el periodo de 2003-2012 (**Guha-Sapir et. al., 2014**). Los tornados como fenómeno natural, entrarían en esta clasificación.

México no está tan distante de la caracterización de los desastres a nivel mundial. Según el reporte del “Impacto Socioeconómico de los Desastres en México durante 2013”, que elabora el Centro Nacional de Prevención de Desastres (**CENAPRED, 2014**), 9 de cada 10 eventos en el país fueron de origen

hidrometeorológico. Los ciclones tropicales representaron el 60%, lluvias e inundaciones el 12%, bajas temperaturas el 21%, temperaturas extremas el 3% y otros fenómenos el 4%, entre de los cuales se incluirían los tornados, significando daños por aproximadamente 56 mil millones de pesos.

Si bien es cierto que no todos los desastres por fenómenos hidrometeorológicos son tornados, estos sí representan un porcentaje, aunque sea mínimo, de desastres en México. Con la gran diferencia de que no existe hasta el momento, una cantidad importante de estudios en el contexto mexicano que se centren en ellos. Contrastando con el elevado número de investigaciones sobre ciclones tropicales, inundaciones y sequías, por ejemplo. He aquí el punto de partida de esta investigación, donde se parte de la primicia que de tener un mejor entendimiento del fenómeno natural, detonará en el desarrollo de métodos y sistemas para la prevención de daños.

En este sentido, fue apenas en el año 2001 cuando se comienza a hablar de tornados en el país con el libro “Descubriendo los tornados en México. El caso del tornado de Tzintzuntzan” (**Macías, 2001**). Años posteriores vendrían una serie de investigaciones donde se retoma la ocurrencia de dichos fenómenos en la zona central de México, y donde **Avendaño (2006)**, nombra por primera vez el “Corredor de las Víboras” como una analogía al “Tornado Alley” de los Estados Unidos de América (E.U.A.). Quedando definida así, una zona con mayor concentración de reportes de tornados en el país.

Años posteriores y desde el paradigma de la antropología social se analiza la cosmovisión de comunidades rurales ante estos fenómenos naturales (**Avendaño, 2012**). Un año después se examina la percepción social del riesgo de una comunidad en Jalisco ante la ocurrencia de víboras de agua (**León, 2013**), y en ese mismo año se publica la primera “Climatología de Tornados en México” (**Macías y Avendaño, 2013**). Es a partir de este momento cuando se obtiene un primer panorama de la distribución de los tornados en el país, misma que se retoma y extiende en el capítulo II de la presente investigación.

A pesar de esto, y hasta la realización de la presente tesis, no existe estudio alguno donde empleando algún modelo numérico como herramienta, se simulen y

analicen las condiciones meteorológicas bajo las cuales han ocurrido tornados en el país. Situación que ha provocado que la poca literatura existente del tema, se haya centrado sólo en consideraciones sociales, históricas, geográficas y políticas, dejando de lado aspectos tan importantes como la meteorología sinóptica y de mesoescala. Es aquí donde la presente investigación se enmarca como la primera en analizar tales consideraciones, centrándose en el uso de modelos numéricos, donde además de las interacciones atmosféricas a nivel regional, se analizó la dinámica de variables en alta resolución, buscando tener una primera aproximación al entendimiento de los peculiares tornados mexicanos.

Objetivos

Los objetivos planteados para el desarrollo la presente disertación académica son:

- Analizar las condiciones meteorológicas de mesoescala en la incidencia de 10 eventos de tornado en México por medio del modelo WRF.
- Describir las similitudes y diferencias de las distintas variables examinadas a partir del modelo WRF.
- Definir una estadística actualizada de tornados en México, agrupando los datos de fuentes existentes y los recopilados para la propia investigación.

Justificación

La importancia del tema radica en la necesidad urgente entender la meteorología bajo la que se han observado tornados en México. Adoptar los estándares internacionales, o en este caso específico, los utilizados en E.U.A., proporcionan una visión reducida del tema. La latitud más baja, la orografía compleja del país, las distintas interacciones océano-continente, los diferentes valores de temperatura y presión sobre los que se han observado tornados, entre algunas otras características; hace complicada la completa aceptación de los modelos de formación de tornados propuestos por la literatura.

Además de esto, la simulación numérica brinda un excelente panorama para la experimentación. Donde se puede observar, además de la meteorología sinóptica que se puede analizar a través de cartas meteorológicas interpretadas o imágenes satelitales, situaciones específicas a una resolución mayor, lugar en el cual los tornados se llevan a cabo al ser fenómenos puntuales y de mínima duración.

Asimismo, el tener un conocimiento general de las condiciones meteorológicas en las cuales se han observado tornados en México, dará una serie de indicios que pueden ser utilizados en situaciones de manejo de emergencias y prevención de desastres. Es decir, el conocimiento del comportamiento y la variabilidad de los componentes que se observan por medio del modelo, pueden fungir como indicadores de ocurrencia de zonas con posibilidad de desarrollo de tornados para periodos específicos de tiempo. Incluso, y esto va más allá de la presente tesis, el de crear un sistema de monitoreo de tormentas con potencial de desarrollo de tornados en tiempo real.

Por último pero no menos importante, la presente investigación aportará por primera vez, información sobre la meteorología de mesoescala bajo la cual se han observado tornados en suelo mexicano. Siendo la primera en su tipo en desarrollarse y con miras a la obtención de un mayor entendimiento de este fenómeno natural.

Estructura de la tesis

La presente disertación académica consta de 4 capítulos. En el capítulo I se describe el panorama general en el estudio de tornados a nivel mundial. Se toma especial énfasis en la literatura estadounidense como base. Se muestra una definición del fenómeno, una descripción de sus principales características, se explica con detalle una clasificación taxonómica y se analiza su climatología. Posteriormente, se examinan algunos trabajos previos donde la modelación numérica es utilizada en el estudio de tornados.

El capítulo II ofrece una estadística actualizada de tornados en México. Partiendo de los antecedentes, donde se retoman los trabajos pioneros en el área.

Posteriormente se explica la metodología empleada para el recaudamiento y procesamiento de información. Finalmente se establecen los resultados por medio de gráficos y mapas, junto con una reflexión sobre la distribución espacial y temporal, así como los posibles daños causados.

El capítulo III desempeña la sección medular de la investigación. Inicialmente se hace una breve introducción a la modelación numérica, seguido de la explicación sobre metodología emplea. Después se describe la zona de estudio, y se detalla el porqué de la distribución de los puntos analizados. Se hace una breve reflexión de las condiciones geográficas del país y su posible participación dentro de los factores que desencadenan tornados.

Más adelante se explican cada uno de los 10 eventos seleccionados para su análisis. Aquí se recopilan datos generales del tornado, mapas con cortes topográficos y tipos de daños causados por cada uno de los eventos. Junto con la descripción general, también se exponen los datos utilizados en cada una de las modelaciones y los resultados de las mismas. Para su mayor comprensión, los gráficos se separan por variables, donde además de exponer los valores obtenidos, se profundiza en el tema dando la explicación sobre la representación que tendrían.

El capítulo IV está dedicado a la interpretación de los resultados. Se reflexiona acerca de las similitudes y diferencias encontradas en las variables, de la meteorología observada en las modelaciones y sobre todo los patrones localizados. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo, seguido de una descripción del tornado más mortífero que ha sufrido el país, esto último como un anexo interesante para la investigación.

Referencias

- Adhikari, Y. y Yoshitani, J. (2009). Global trends in water-related disasters: An insight for policymakers. International Centre for Water Hazard and Risk Management (ICHARM) and UNESCO. United Nations World Water Assessment Programme Third World Water Development

- Avendaño, A. (2006). El conocimiento y reconocimiento de la existencia de los tornados en México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F
- Avendaño, A. (2012). Etnometeorología de los tornados en México. El caso de la ranchería Xaltitla, municipio de Atltzayanca, Tlaxcala. Tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (2014). Impacto socioeconómico de los desastres en México durante 2013. Secretaría de Gobernación. México, D.F.
- Guha-Sapir, D., Hoyois, P. y Below, R. (2014). Annual disaster statistical review 2013. The numbers and trends. Centre of research on the epidemiology of Disasters (CRED) and Institute of Health and Society (IRSS). Université Catholique of Louvain. Brussels, Belgium.
- León, J. (2013). Percepción del riesgo y expresiones de vulnerabilidad ante tornados. El caso de Huescalapa, municipio de Zapotiltic, Jalisco. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad de Colima. Colima, México.
- Macías, J. (2001). Descubriendo los tornados en México. El caso de Tzintzuntzan. Antropologías, CIESAS. México, D.F.
- Macías, J. y Avendaño, A. (2013). Climatología de los tornados en México. Investigaciones Geográficas, Boletín núm. 83. Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 75-88.

Capítulo I

Panorama general en el estudio de tornados

1.1 Definición de tornado

Según Glickman (**2000**) un tornado se define como “una columna de aire que gira violentamente, en contacto con el suelo, ya sea colgante de una nube cumuliforme o debajo de ella, y a menudo (pero no siempre) visible como una nube embudo”. Tal característica está dada por el déficit de presión, que es lo bastante bajo para condensar el vapor de agua y crear partículas de nubes. Cuando la presión no es lo suficientemente baja o el aire es demasiado seco, el tornado se puede ver como una columna de polvo o escombros, o no ser visualizado en absoluto (**Bluestein, 2013**).

1.2 Características generales

El tiempo de vida de un tornado varía de entre unos cuantos segundos a cerca de una hora en casos extremos, siendo 10 minutos el tiempo promedio. El diámetro del vórtice tiene una media de 200 m, y puede variar entre 10 m y 1.5-2 km (**Bluestein, 2013**). Su velocidad de desplazamiento oscila entre los 80-120 km/h (**Erickson, 1991**). Un tornado puede producir vientos mayores a los 500 km/h, aunque el rango promedio varía desde un poco más de 70 km/h (**Bluestein, 2013**).

La dirección de giro puede ser ciclónica o anticiclónica, no importa el hemisferio donde se presente, dado que al ser un fenómeno pequeño y de corta duración, no es afectado en grandes proporciones por la fuerza de Coriolis. Se han observado fenómenos en todos los continentes, exceptuando la Antártida (fig. 1.1).



Figura 1.1 Presencia de tornados a nivel mundial⁸.

1.3 Clasificación de tornados

Además de la clasificación por intensidad, dada por la Escala Fujita Mejorada y que va de un EF0-EF5, los tornados han recibido una considerable cantidad de propuestas taxonómicas para su identificación y clasificación. La más utilizada, es la que separa a los tornados como supercelda y no supercelda (gustnado, landspout y waterspout) (**NSSL, 2014**). Una clasificación similar hacen Doswell y Burgess (**1993**) donde además de tomar como base la construcción de superceldas y no superceldas explican la formación de otro tipo de vórtices asociados.

Una de las más recientes, y la que se retoma en esta sección, es la propuesta por Agee y Jones (**2009**), donde distinguen a los tornados por tres tipos; por superceldas, por sistemas conectivos cuasi-lineales y por vórtices convectivos y de corte, cada uno a su vez contienen diferentes especies (fig. 1.2).

Los tornados tipo I o supercelda pueden alcanzar categorías de EF0 a EF5 en la escala Fujita Mejorada. Son fácilmente observables e identificables por medio de radares de efecto Doppler y están asociados principalmente a mesociclones aunque pueden desarrollarse en un entorno de huracán. Generalmente se ligan a celdas

⁸ Fuente: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Globdisttornado.jpg>

convectivas en el cuadrante delantero derecho del mesociclón. Este tipo de fenómenos tiene tres especies; supercelda discreta con mesociclón, mini supercelda discreta en la tropopausa baja y tormentas tropicales o huracanes (**Agee y Jones, 2009**).

Su mecanismo de formación tiene el componente principal en la tormenta supercelda, que posee una corriente ascendente local que se extiende verticalmente a través de un campo de viento horizontal rico en vorticidad horizontal, lo que resulta en el desarrollo de un mesociclón bien definido. La otra clave para el desarrollo de estos tornados es una corriente descendente en el flanco trasero, que produce vorticidad vertical en la capa límite planetaria. La interacción entre ambas corrientes; ascendente y descendente, produce una inclinación en la vorticidad horizontal y un estiramiento en la vertical, creando así el ambiente perfecto para la tornadogénesis (**Agee y Jones, 2009**).

Los tornados tipo II o Sistemas Convectivos Cuasi-lineales, QLCS por sus siglas en inglés, son sistemas convectivos de mesoescala que han tomado patrones de una línea de turbonada o ecos en forma de arco. El proceso de embolsamiento de aire frío en este tipo de eventos produce la inclinación de la vorticidad horizontal. Se asocian a las bandas espirales del cuadrante delantero derecho de un huracán al tocar tierra. Pueden ser tan intensos como un tornado del tipo I, no obstante, la mayoría de ellos alcanzan una categoría no mayor a EF4. Poseen 6 especies; los LEWPs, Bows, BEVs, RIJs, Bandas espirales de huracanes o tormentas tropicales y otros mesovórtices (**Agee y Jones, 2009**).

Los tornados tipo III o no supercelda, tienen en contraste con los dos anteriores que la formación del vórtice sólo está controlada por las corrientes ascendentes y descendentes locales, por lo que resultan tornados considerablemente débiles, alcanzando categoría EF3 en casos extremos. Dentro de estos entran los landspouts, waterspouts y gustnados. Son generalmente observados en zonas polvosas a lo largo de las fronteras de los frentes de ráfaga de una tormenta y están asociados particularmente a nubes cumulus congestus (**Agee y Jones, 2009**). Las observaciones de radar no muestran ningún indicio de tiempo sospechoso en este tipo de eventos y además, son los que más se han observado en suelo mexicano.

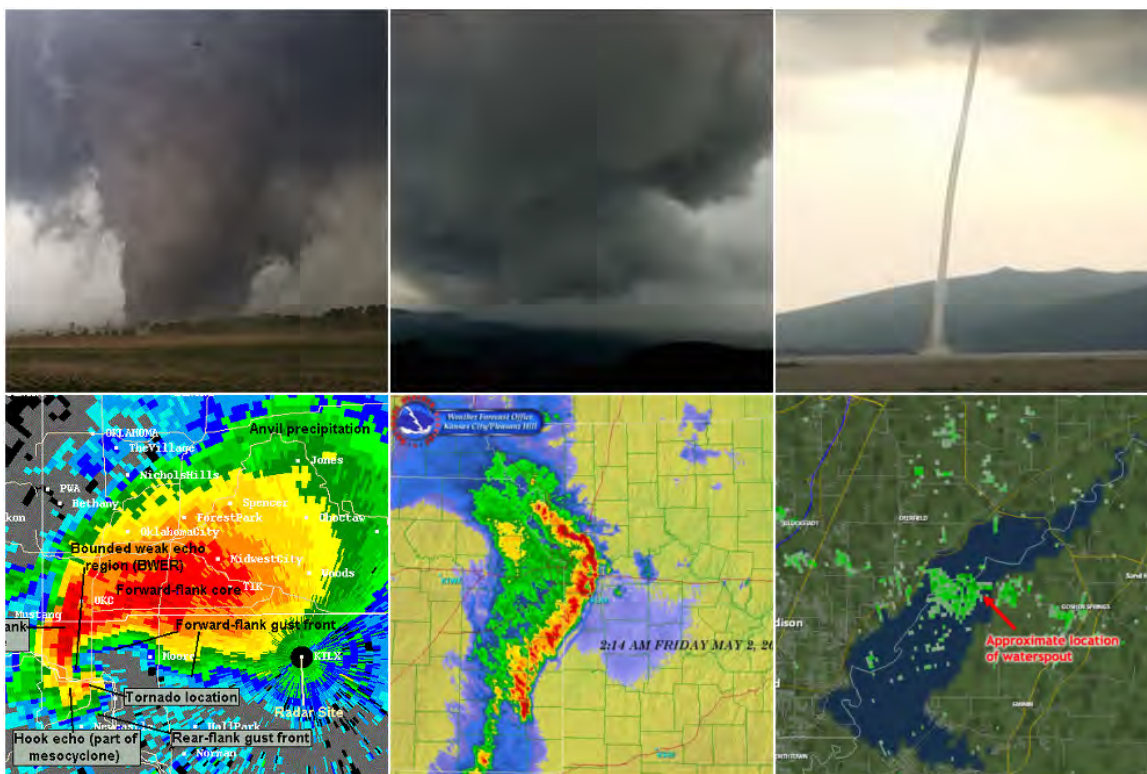


Figura 1.2 Clasificación de tornados según **Agee y Jones (2009)**. Tipo I, II y III de izquierda a derecha. Elaboración propia con múltiples fuentes⁹.

1.4 Climatología

Como bien se mencionó los tornados pueden ocurrir prácticamente en todo el mundo, sin embargo son más comunes en las grandes planicies de los E.U.A., justo en la zona este y durante la primavera (**Bluestein, 2013**), en lo que es conocido como el Tornado Alley. Países como China, Japón, Gran Bretaña, España, Francia, Holanda, Rumania, Italia, Alemania, Rusia, Australia, Nueva Zelanda, Argentina,

⁹ Fuentes:

http://www.srh.noaa.gov/images/jan/Weather_Events/2012/0819/radar.jpg

<http://zonafranca.mx/wp-content/uploads/2013/07/tornado-lag-yuriria.jpg>

<https://loiolaxxi.files.wordpress.com/2013/05/tornado.jpg>

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/30/Tornadic_classic_supercell_radar.gif

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/09/Bow_Echo_Kansas_City.jpg

<http://imagizer-cv.imageshack.us/scaled/medium/526/hobsonvillemicroburst.png>

Brasil, Bangladesh, Sudáfrica, Canadá (**Bluestein, 2013**) y ahora México, cuentan con casos bien documentados de estos fenómenos.

Según el NSSL (**2014**) se estima que 1200 tornados impactan a los E.U.A. cada año. El segundo lugar lo ocupa Canadá con un estimado de treinta eventos por año, periodo que contempla de 1980 a 2009 (**Environment Canada, 2014**). Para el caso europeo se estiman; Gran Bretaña 20 eventos por año, Francia dos por año, entre Austria, República Checa y Hungría poco más de dos cada año, Italia cerca de nueve eventos y en Alemania diez eventos aproximadamente (**Goliger y Milford 1998**). En Sudamérica el país que tiene el mayor registro es Argentina, con aproximadamente diez eventos por año. Por África resalta Sudáfrica, con un promedio de tres eventos por año (**Goliger y Milford 1998**).

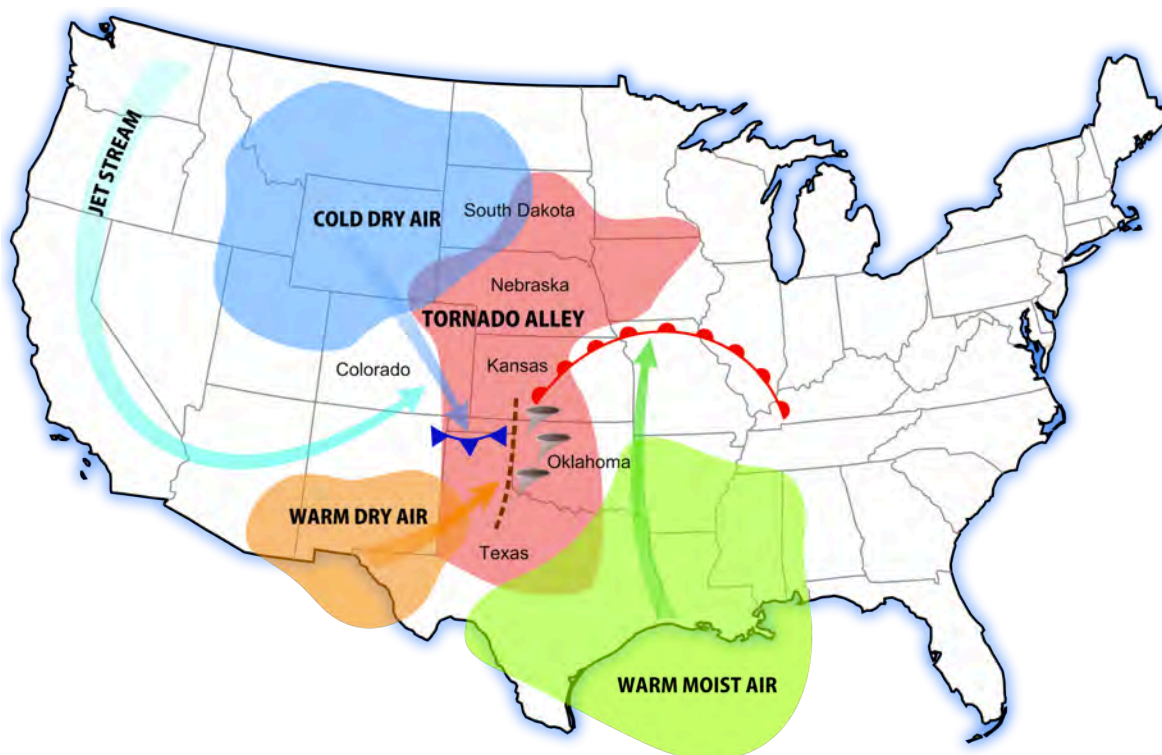


Figura 1.3 Componentes para formación de tornados en los Estados Unidos de América¹⁰.

En E.U.A., los parámetros para el desarrollo de estos fenómenos son bien

¹⁰ Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/43/Tornado_Alley_Diagram.svg/2000px-Tornado_Alley_Diagram.svg.png

conocidos. La confluencia de aire frío y seco continental con aire húmedo y caliente del Golfo de México, junto con una corriente en chorro del norte y una zona relativamente plana y de bajas altitudes, son los factores que permiten franjas de convección, el desarrollo de superceldas y posteriormente la aparición de tornados (fig. 1.3).

No obstante ésta no es la única zona de convergencia en la Tierra. Existen otros lugares en los que se pueden observar condiciones similares, mismos que Brooks, Lee y Craven (2003) explican mediante el uso de covariables meteorológicas. Donde además de mostrar las zonas propensas, obtienen los días por año con condiciones favorables para el desarrollo de tornados (fig. 1.4). Se puede observar entonces, que México no figura dentro de sus investigaciones, por lo que surge la pregunta de si algún parámetro omitido sus análisis es el desencadenante de condiciones para la formación de estos fenómenos en el país.

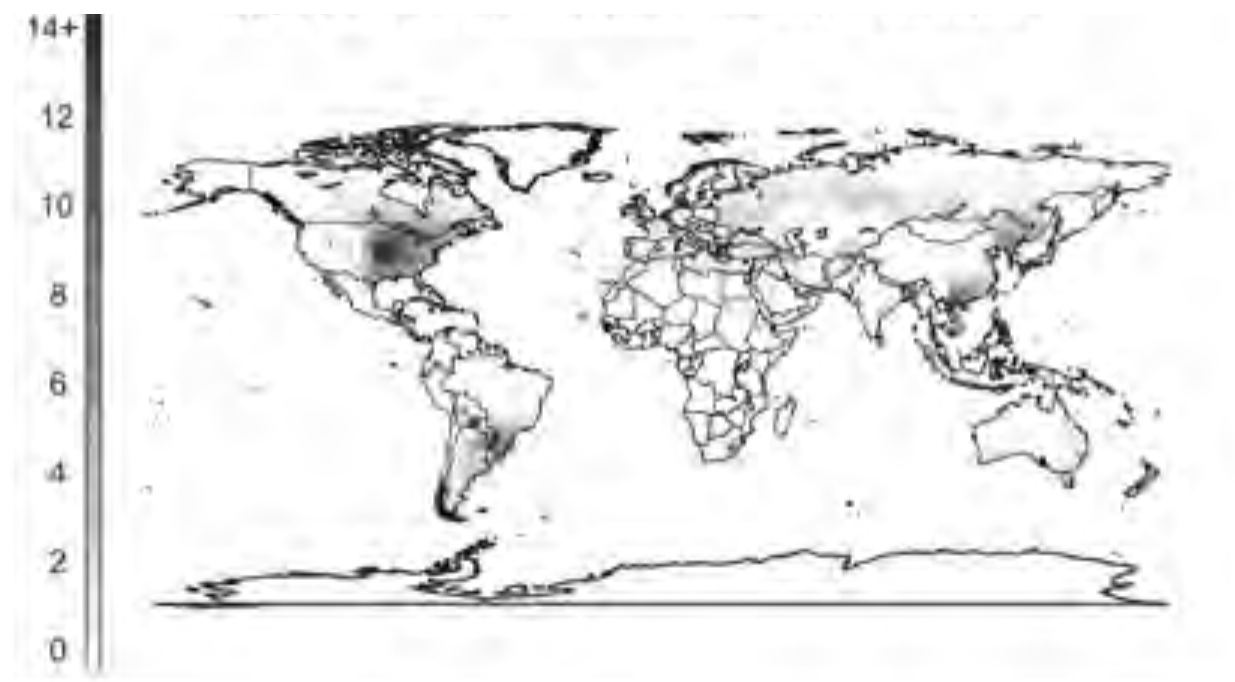


Figura 1.4 Días por año con condiciones favorables para la formación de tornados¹¹.

¹¹ Fuente: Brooks, Lee, y Craven (2003).

1.5 Uso de las simulaciones numéricas en el estudio de tornados

El uso de modelos numéricos para la simulación de eventos meteorológicos está ampliamente extendido entre la comunidad científica. Permite experimentar y analizar resultados desde distintos escenarios y con tiempos controlados. Además, admite cambios y modificaciones de muchos de sus componentes, lo que los convierte en una herramienta bastante útil al estudiar la atmósfera. Si bien es cierto no dejan de ser cálculos y no mediciones reales, se ha demostrado que en la mayoría de los casos se acoplan bastante bien a las mediciones in situ.

Para el caso del estudio de tornados existen una cantidad aceptable de trabajos donde se utilizan los modelos numéricos. Algunos englobándolos dentro de creación de tormentas severas y otros enfocándose en el evento mismo. En E.U.A. se han elaborado más en función de prevención de tormentas con componentes para el desarrollo de tornados. Gran parte de los fenómenos que se han estudiado por estos métodos son del tipo I, que como ya se mencionó son el ejemplo de tornados más peligrosos.

No obstante, en otras partes del mundo donde la orografía y las condiciones son diferentes a las de E.U.A., también se han realizado estudios interesantes. Lo atrayente en este sentido es que por sus dimensiones y características encajarían en los tornados del tipo II o III, situación que se asemeja bastante al caso mexicano. Además, en muchos de estos casos se ha utilizado al modelo WRF como herramienta, al ser uno de los modelos con mayor soporte por parte de la comunidad científica mundial.

La mayoría de los casos existentes en la literatura parte de un estudio sinóptico. Aquí se engloban parámetros como movimientos de masas de aire frío y cálido, sistemas ciclónicos, frentes de ráfaga, entre otros (**Litta et. al., 2011a; Matsangouras et. al., 2011; Litta et. al., 2011b y Matsangouras et. al., 2012**). La presencia de masas de aire frío en conjunto con sistemas de baja presión son dominantes a nivel sinóptico (**Matsangouras, 2011**), además de un sistema de circulación ciclónico en la tropósfera baja.

Litta et. al. (2011b) mencionan también la presencia de granizo mayor a los 3 cm de diámetro y una acumulación de más de 40 mm de lluvia en las zonas cercanas al fenómeno. Con respecto a las temperaturas observadas durante el proceso de formación, se indica gradiente positivo de más de 3°C seguido de un descenso inmediato de hasta 9°C, posteriormente se ve un incremento de unos 4°C y la estabilización de la temperatura.

Para el caso de las simulaciones, Litta (2011a) señala que parámetros meteorológicos tales como humedad relativa, presión a nivel del mar, lluvia, temperatura, velocidad del viento en la vertical, velocidad del viento en superficie y convergencia de humedad son necesarios para caracterizar al fenómeno. Además de estimar valores de CAPE, LI y TTI para medir la inestabilidad y por ende determinar la posibilidad de formación de tormentas.

Con relación a los factores detonantes de tornados en regiones fuera de E.U.A., Matsangouras (2012) expone dos casos en Grecia. Donde por medio de la manipulación de la variable de terreno, en el dominio menor y con alta resolución, encuentra a la orografía como factor importante para la tornadogénesis. Cabe mencionar que en uno de los dos casos que el expone encuentra dicha característica. Situación que deja abierta la posibilidad a próximos análisis.

Es interesante observar entonces, que todos convergen en la idea de utilizar el modelo WRF para la simulación de tormentas severas con tornados, da un acercamiento bastante bueno a la realidad. Dado que se han trabajado en distintos lugares del planeta y los resultados obtenidos empatan bastante bien con la realidad observada (Litta et. al., 2011a; Matsangouras et. al., 2011; Litta et. al., 2011b y Matsangouras et. al., 2012). Esto da como resultado una mayor certidumbre al emplear dicho modelo para las simulaciones en México. Dejando en claro por supuesto, que esto es un acercamiento a la realidad y una primera aproximación a un problema tan complejo como lo es la formación de tornados.

1.6 Referencias

- Agee, E. y Jones, E. (2009). Proposed conceptual taxonomy for proper identification and classification of tornado events. Indiana, Estados Unidos de América: American Meteorological Society.
- Bluestein, H. (2013). Severe convective storms and tornadoes. Observations and dynamics. Chichester, U.K. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, Springer-Praxis Books in environmental sciences.
- Brooks, H., Lee, J. y Craven, J. (2003). The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. Estados Unidos de América: ELSEVIER.
- Doswell, C. y Burgess, D. (1993). Tornadoes and tornadic storms. A review of conceptual models. En C. Church et al., Eds., The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards (pp. 161-172). Estados Unidos de América: American Geophysical Union.
- Environment Canada (2014). Tornado – Nature's dangerous wonder. En Spring and summer weather hazards. Consultado el 25 de marzo de 2014. Disponible en <http://ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=6C5D4990-1#tornadoes>
- Erickson, J. (1991). Las tormentas: de antiguas creencias a la meteorología moderna. Madrid, España. Serie Mc Graw-Hill, Interamericana de España, S.A.
- Glickman, T. (2000). Glossary of meteorology, 2d. ed. Estados Unidos de América. American Meteorological Society.
- Goliger, A. y Milford, R. (1998). A review of worldwide occurrence of tornadoes. Estados Unidos de América: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. ELSEVIER.
- Litta, A., Mohanty, U., Bhan, S. y Mohapatra, M. (2011b). Simulation of tornadoes over India using WRF-NMM Model. En S. Attri et. al., Eds., Challenges and Opportunities in Agrometeorology (pp. 173-186). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Litta, A., Mohanty, U., Kiran, S. Mohapatra, M, Tyagi, A. y Sahu, S. (2011a). Simulation of tornado over Orissa (India) on march 31, 2009, using WRF-NMM model. Natural Hazards. Springer Science.
- Matsangouras, I. Nastos P. y Pytharoulis, I. (2011). Synoptic-mesoscale analysis and numerical modeling of a tornado evento on 12 february 2010 in northern Greece. Athens, Greece: Advences in science and research.
- Matsangouras, I., Pytharoulis, I. y Nastos, P. (2012). Numerical investigation of the role of topography in tornado events in Greece. Athens, Greece: Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics. Springer Atmospheric Sciences.
- National Severe Storms Laboratory (2014). Tornado types. En Severe weather 101. Consultado el 25 de marzo de 2014. Disponible en <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/tornadoes/types/>.

Capítulo II

Estadística actualizada de los tornados en México

2.1 Introducción

El registro de tornados en México es un acción que le compete a autoridades del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), CENAPRED y Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Sin embargo, existe poca información que ellos mismos recopilen y ponga a disposición del público. Por ello, el Centro de Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS) ha tomado como parte de sus actividades el registro de fenómenos de tornado en el país y lo ha concentrado en una base de datos de uso exclusivo.

Dicha base funciona como el sustento de la “Climatología de tornados en México” publicada por Macías y Avendaño (2013), donde para el periodo del 2000 al 2012 registraron un total de 126 fenómenos, un promedio de 9.7 por año. En 29 de las 32 entidades federativas del país reportaron tornados; sólo San Luis Potosí, Morelos y Querétaro están faltos de ello.

Fraccionando al país, la zona centro cuenta con el mayor porcentaje de ocurrencia con un 50%, la zona norte el 27%, la sureste 16%, y el faltante 7% se distribuye en el resto de México (Macías y Avendaño, 2013). La distribución anual de fenómenos muestra una clara tendencia de incremento, donde el año 2012 registró 22 fenómenos y se alza como el año con mayor registro. El segundo lugar lo ocupa el 2011 y 2007 con 14 registros cada uno y el tercer lugar el año 2004 con 12. El resto de los años las cantidades oscilan entre los nueve y dos eventos registrados (Macías y Avendaño, 2013).

Con respecto a los meses de mayor incidencia se alcanzan; mayo, junio, julio y agosto con 26, 21, 20, y 14 eventos respectivamente. Los estados con mayor número de registro son el Estado de México, Veracruz, Tlaxcala, Chiapas,

Tamaulipas y Chihuahua con 14, 12, 11, 11, 9 y 9 respectivamente. El resto de los estados varía entre los seis y un eventos registrados. Para la hora de ocurrencia, el 69% acontecen en horas de la tarde, el 16% en la noche y el 15% por la mañana. Teniendo un total de 409 lesionados y 11 decesos (**Macías y Avendaño, 2013**).

León (**2013**) añade 12 registros más para el periodo de 2007 a 2012. Estos se distribuyen en los estados de Nayarit con seis registros, Jalisco con dos y Michoacán con cuatro más. Un registro para el 2007, uno más para el 2009, cuatro para el año 2010, dos en el 2011 y cuatro para el 2012. Con relación a la hora de ocurrencia se suman 9 en horario vespertino y 3 para el nocturno. En número de víctimas se contabilizaron dos y un par de lesionados. Si bien es cierto, tales números no modifican en demasía las tendencias ya mostradas, se suman a los registros existentes con un monto total de 138 eventos. Hasta el momento de realización de la presente investigación estos funcionaron como los registros disponibles.

2.2 Metodología

Dentro de los colaboradores de la base de datos mencionada, se encuentra el autor de la presente tesis. Mismo que a partir de 2012 optó por seguir un registro propio, utilizando como base el reporte de Macías y Avendaño (**2013**). A dicha estructura de base, se le hicieron un par de modificaciones propias para optimizar el espacio y tiempo empleado en la introducción de cada uno de los registros. Los resultados de tal recopilación fungen como una estadística actualizada de tornados en México.

Para el registro de cada evento se estableció una serie de pasos. El primero consistió en la búsqueda de noticias en medios físicos, como periódicos de edición diaria, y electrónicos, como las páginas de los diarios nacionales y locales en México. De igual forma el uso de redes sociales como Twitter y Facebook. Posteriormente se efectuó una depuración de estas noticias con base a criterios de exclusión, donde se tomaron como principales puntos evidencias que dieran certeza de que el fenómeno descrito por los medios fuera el de un tornado, y no algún otro fenómeno meteorológico.

El tercer paso consistió en el resguardo de toda la información en una aplicación de acceso libre, Pocket¹². Esto para tener certeza de no extraviar el material, ya que muchas de las noticias por medios electrónicos son eliminadas después de un tiempo. Siguiendo con el proceso, la información fue migrada a otra aplicación de acceso libre para su recolección y clasificación, Evernote¹³.

Finalmente la información clasificada y seleccionada, fue vertida en una base de datos en el programa de Excel. Esto para la realización de gráficos, tablas y herramientas necesarias para la creación de mapas y demás material ilustrativo. Cabe señalar que 6 de los 10 tornados analizados por medio de una simulación numérica, fueron a raíz de los registros que aquí se exponen.

2.3 Resultados

El número total de eventos con los que se realizaron gráficos, tendencias, mapas y demás productos, se ejecutó con base en la asociación de las fuentes ya mencionadas y el trabajo propio de la investigación. La fecha de corte fue el 21 de junio de 2015. Los eventos posteriores a esta fecha siguieron siendo recopilados y clasificados, por lo que los gráficos siguen actualizándose constantemente.

2.3.1 Eventos por estado

Se contabilizaron un total de 192 registros en 16 años, un promedio de 12 por año. Estos se distribuyen en 29 de las 32 entidades federativas. Estado de México, Veracruz, Chiapas, Tamaulipas y Chihuahua son los 5 estados con mayor presencia. Sólo Morelos, San Luis Potosí y Querétaro no exponen registros (fig. 2.1). Lo anterior no indica que no hayan ocurrido tornados, sino que hasta el momento no se han reportado.

¹² Fuente: <https://getpocket.com/>

¹³ Fuente: <https://evernote.com/intl/es-latam/>

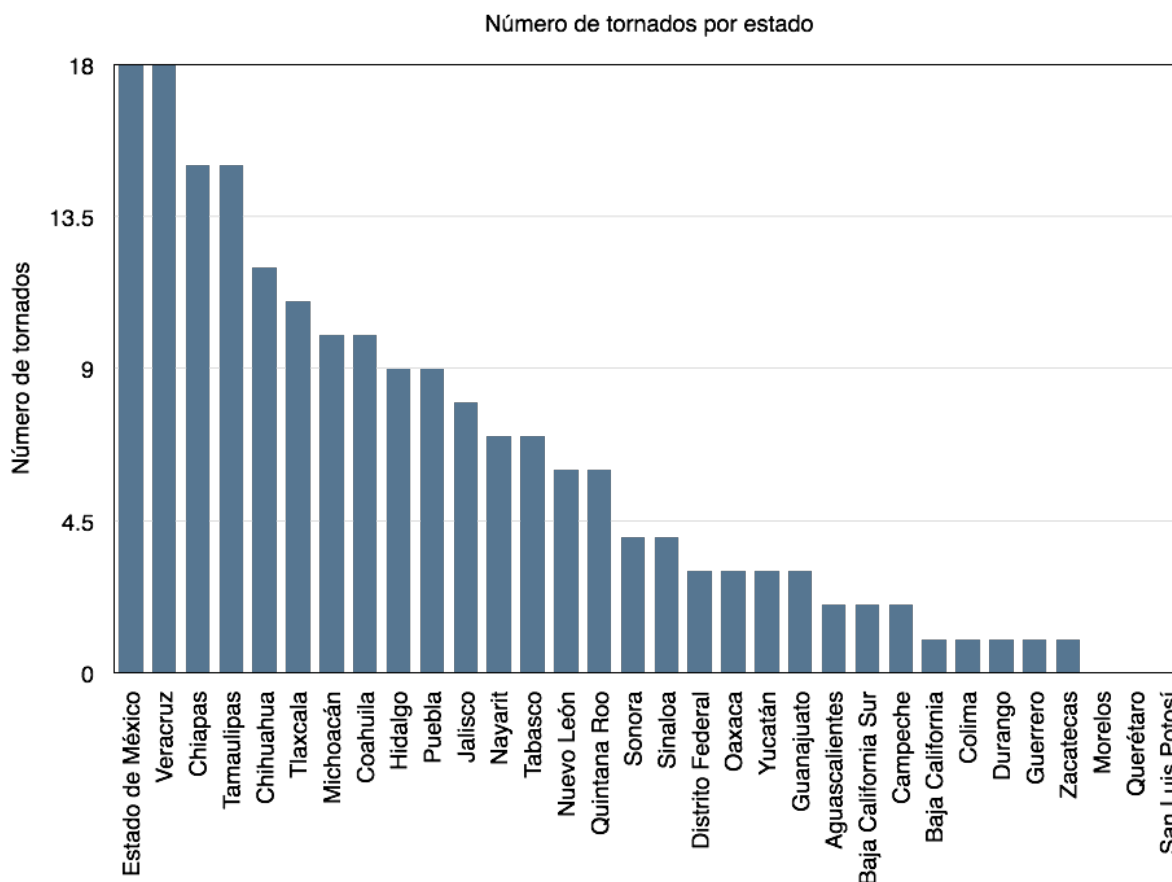


Figura 2.1 Número de reportes por estado. Elaboración propia.

2.3.2 Distribución espacial

Se observa en el mapa (fig. 2.2) que gran parte de los fenómenos se concentran en la zona centro de la república. Otro porcentaje considerable en una franja que recorre el estado de Veracruz. La zona sureste está dominada por el municipio de San Cristóbal de las Casas, Chiapas y por la escala del mapa y al ser varios fenómenos en la misma ciudad, sólo se puede identificar un solo punto. Como característica interesante, se observa como la mayoría de los registros sigue un trazo paralelo al Eje Neovolcánico Transmexicano (ENT), donde los niveles de altura van del orden de 2000 msnm con una orografía bastante compleja. También se observan algunos eventos en zonas planas, tanto del norte del país como la Península de Yucatán.

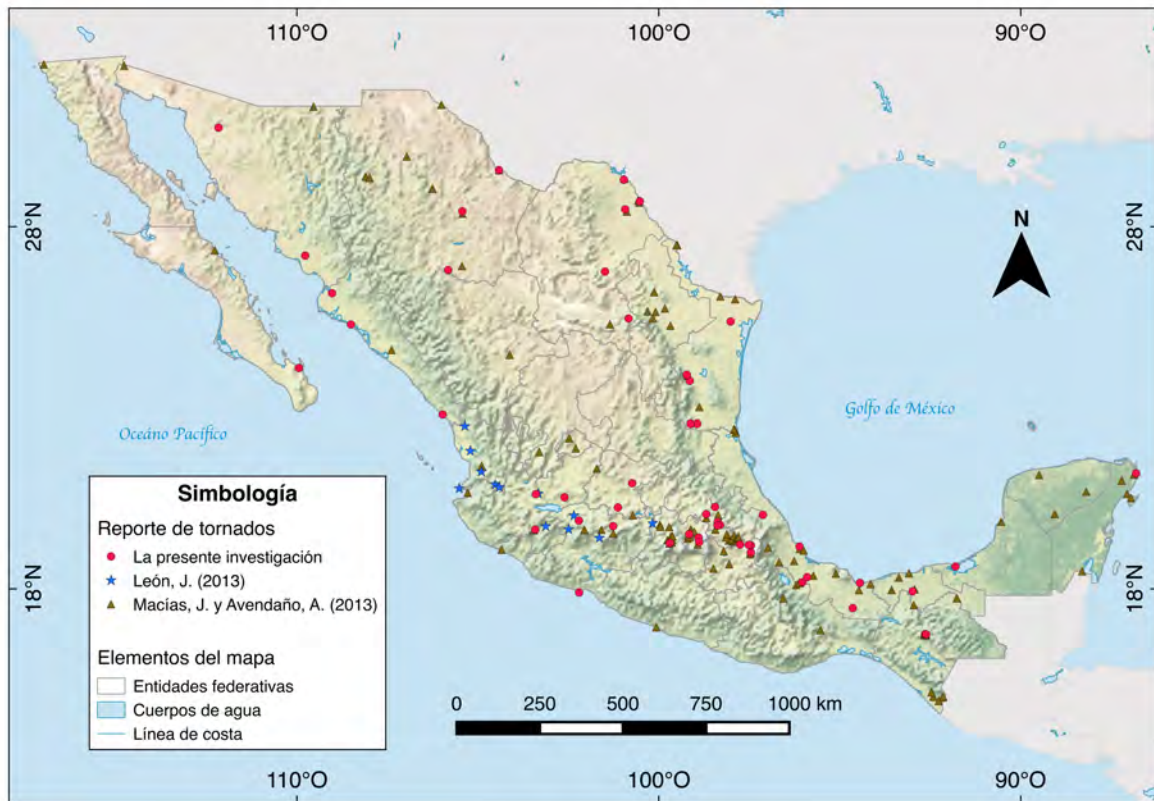


Figura 2.2 Distribución espacial de reportes de tornados en México. Elaboración propia.

Por medio del software Quatum GIS, se realizó un tratado de información y un mapa de densidad de puntos (fig. 2.3) con el objetivo de generar una visión aproximada de las zonas con mayor reporte de tornados. Se observa entonces, una zona de aglutinación que parte desde la zona sur de Chiapas, pasando por San Cristóbal de las Casas, bajando hacia las zonas planas de Tabasco. Siguiendo por el estado de Veracruz y girando al oeste, cruzando por los estados de Puebla, Tlaxcala, Estado de México y Distrito Federal, donde se muestra su mayor concentración. Sigue su camino recorriendo el cinturón montañoso hasta la zona de Guanajuato y el norte de Michoacán, pasando por el centro de Jalisco y conectándose al Océano Pacífico con el sur de Nayarit. Además aparecen zonas aisladas en el norte de Coahuila, el centro-sur de Chihuahua y el centro de Nuevo León, de igual forma en la Península de Yucatán, específicamente en el norte de Quintana Roo.

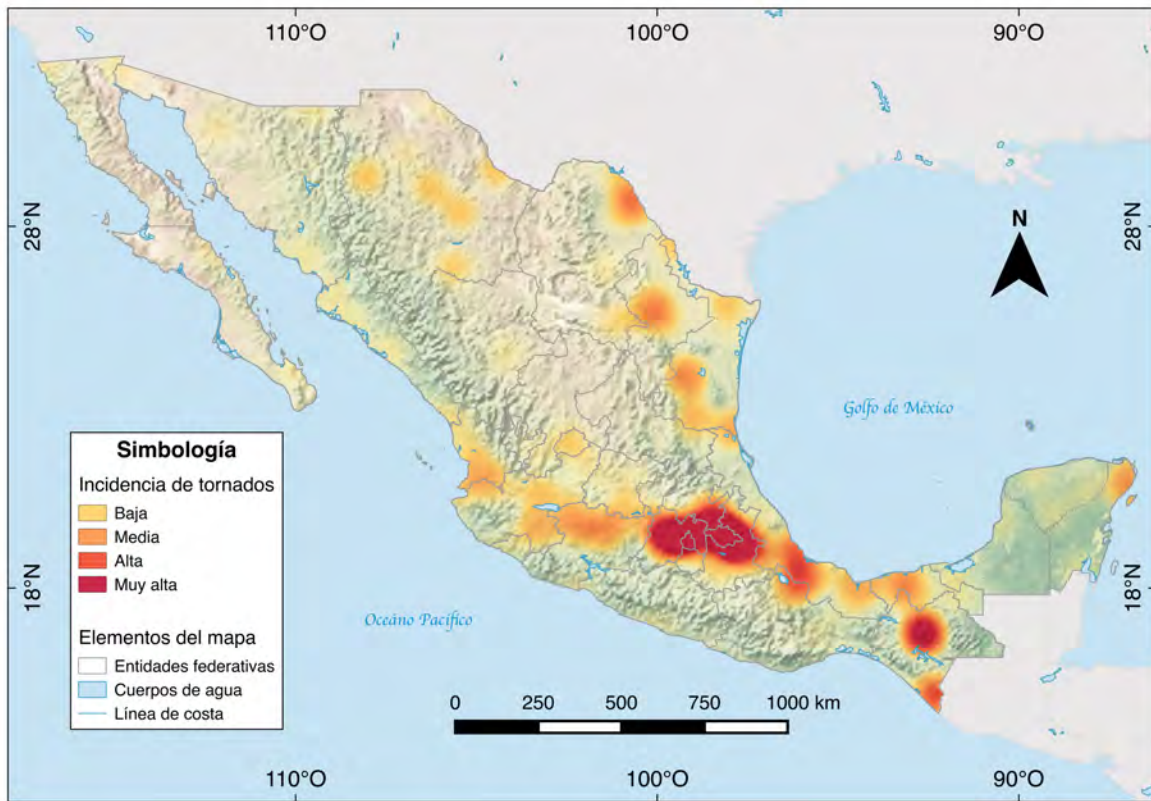


Figura 2.3 Densidad de reportes de tornados en México. Elaboración propia.

2.3.3 Tornados por año

De los 192 eventos registrados, el 2014 es el año con mayor número con un total de 28. Le sigue el 2012 con 26 y el tercer lugar lo ocupa el 2015 con 21. El resto de los años los valores oscilan entre los dos y 16 registros. El 2015, con 21 eventos registrados se perfila para ser un año importante en este rubro (fig. 2.4). Un dato interesante es que en el año 2013 hay una caída abrupta de registros. Esto se cree, se debe a una falta de búsqueda de información en los medios por las partes involucradas en el registro de tornados. No obstante, en general se muestra una clara tendencial lineal de aumento; y se podría interpretar como una mayor recurrencia de estos fenómenos o un mayor acceso a la información y por ende un mejor registro.

Aquí se abre una nueva pregunta ¿Qué impacto tendría el cambio climático en el aumento o disminución de tornados en México? A primera vista parece que

traería consigo un aumento considerable de fenómenos. Ahora bien, si tomamos como referencia que en el año 2000 era muy complicado que alguna persona usara su teléfono celular para tomar fotografías y diera el reporte de ocurrencia de un fenómeno así, el aumento se debería a un mayor acceso a recursos tecnológicos y a la información. En conclusión, se necesitan más años de datos para tener mayor certidumbre si efectivamente hay un aumento de eventos o sólo se debe a que el registro de tornados en el país está comenzando.

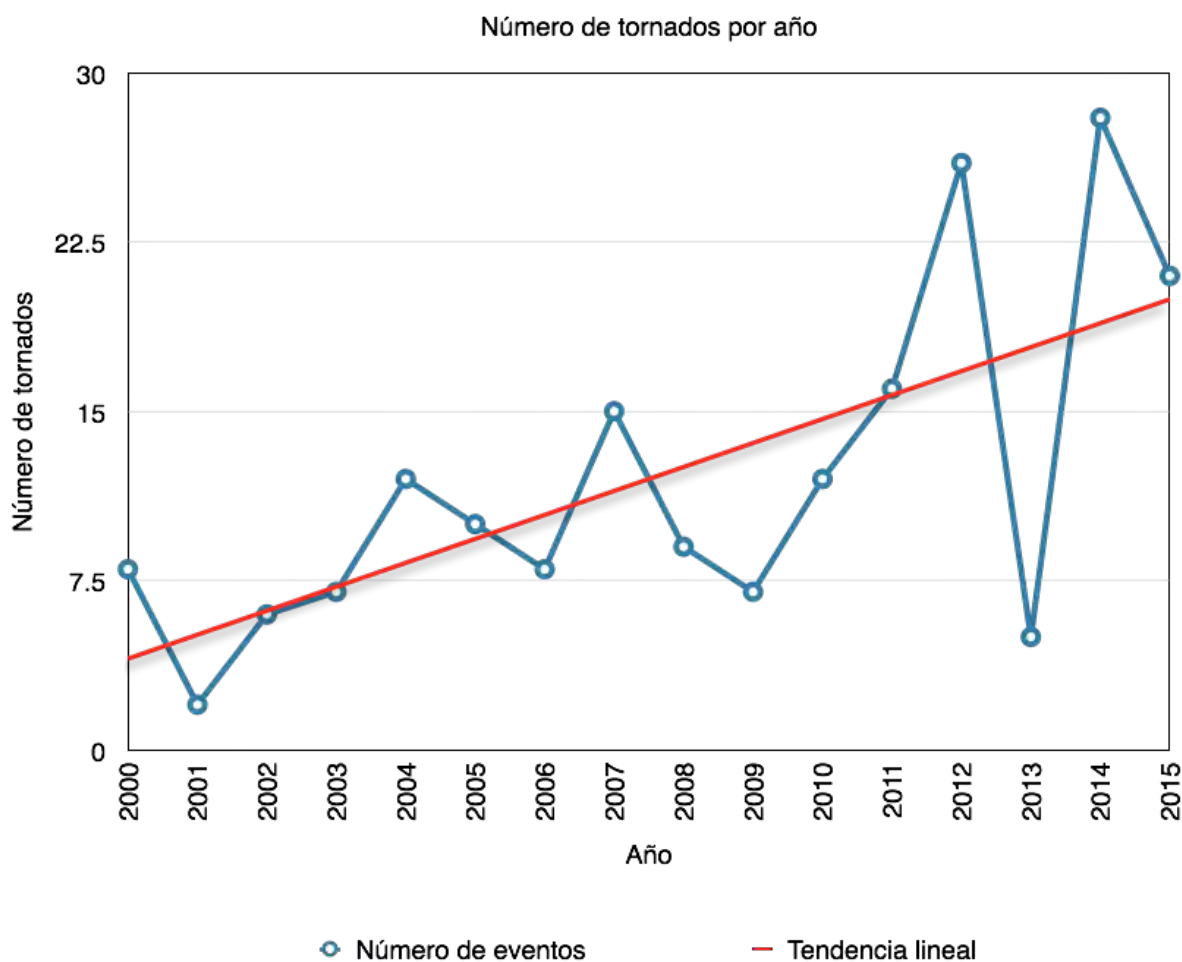


Figura 2.4 Número de reportes por año. Elaboración propia.

2.3.4 Clasificación por mes de ocurrencia

La distribución por mes señala una clara tendencia. Los meses de mayo, junio y julio se alzan con la mayor concentración de eventos (>25 eventos), teniendo su

máximo en julio (fig. 2.5). Tales meses coinciden con el temporal de Ciclones Tropicales en el país. Esto indica una preferencia temporal desfasada con respecto a E.U.A., donde el temporal tiene su comienzo en abril. Se observa también, que los meses que abarcan entre noviembre y febrero, fechas donde la entrada de frentes fríos es muy marcada en México, hay una disminución en el número de tornados.

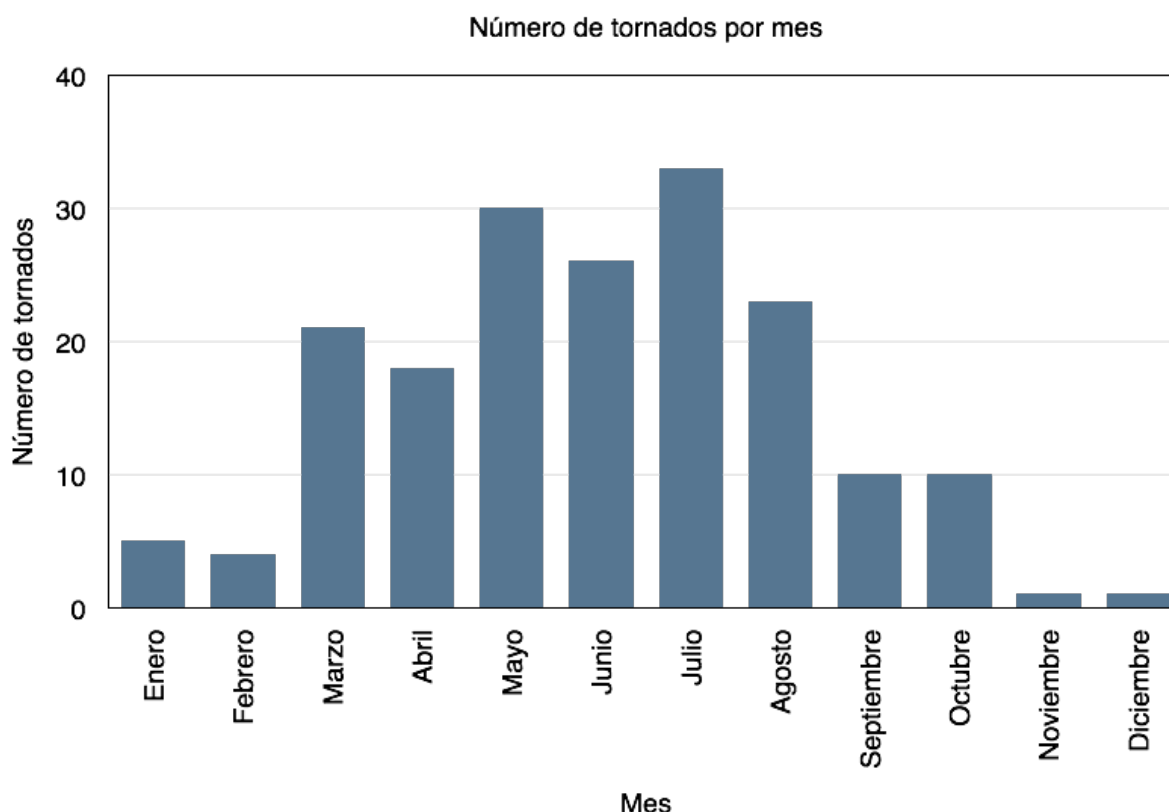


Figura 2.5 Número de reportes por mes. Elaboración propia.

2.3.5 Clasificación por hora de ocurrencia

En cuanto al registro por hora de ocurrencia se observa una predisposición a horarios vespertinos. El 72% de los tornados registrados han ocurrido por la tarde, mientras el restante 28% se reparte en porciones muy similares entre la mañana y la noche (fig. 2.6). Dicha tendencia es la que normalmente se esperaría, ya que es en los horarios vespertinos cuando la atmósfera se encuentra más inestable, lo que

propicia un mayor flujo de fluidos en la tropósfera y condiciones de turbulencia y vorticidad, esenciales en la formación de tormentas y tornados.

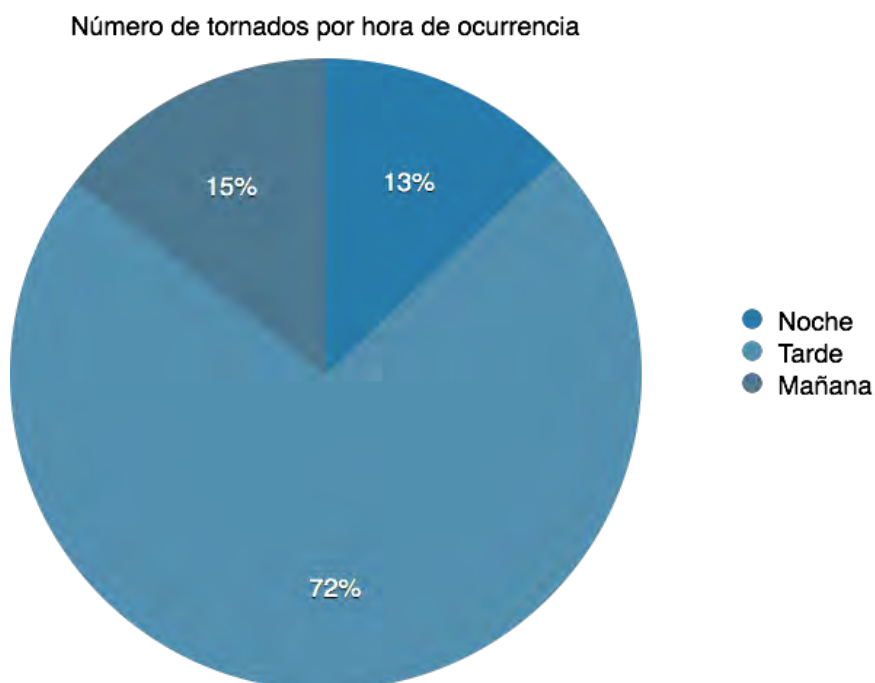


Figura 2.6 Número de reportes por hora. Elaboración propia.

2.3.6 Recuento total de daños

La cuantificación de daños después de un desastre es una actividad bastante compleja. Suelen proporcionarse cifras con montos de los daños directos, dejando de lado toda una estela de efectos transversales. Para el caso de tornados en teoría sería un proceso más sencillo, dada la característica de ser un fenómeno puntual. No obstante, pocas veces se toma en serio la labor de evaluación de daños, otras ocasiones al presentarse sólo daños menores pasan a ser inadvertidos o en situaciones más comunes, simplemente no existe una evaluación por las autoridades involucradas. A pesar de ello, en esta sección se establece una aproximación a los posibles daños. Claramente es un valor inexacto, pero funciona como un panorama general de la situación.



Figura 2.7 Tipos de daños ocasionados. Huimiyucan (2014), Ojinaga (2013), Tangancicuaro (2013) y San Cristóbal de las Casas (2014). Elaboración propia con múltiples fuentes¹⁴.

Entonces, para 192 tornados se estiman un total de 729 lesionados y 28 pérdidas humanas. Cabe señalar que la mitad de los decesos y una gran cantidad de heridos se concentran en sólo 1 evento, el de Ciudad Acuña, Coahuila en mayo de este año (ver anexo 1). Omitiendo lo anterior se promedia 4 (3.79) lesionados por evento y que cada 14 tornados tendrían como consecuencia 1 deceso. El total

¹⁴ Fuentes:

<http://www.provincia.com.mx/wp-content/uploads/2014/03/21.gif>,

http://fotos.eluniversal.com.mx/web_img/fotogaleria/Tornado_San_Cristobal-3.jpg

<http://www.elindependientedehidalgo.com.mx/wp-content/uploads/2014/08/20-contra.jpg>

<http://i.oem.com.mx/e61ec7d1-ecd8-4fbd-b200-787553085487.jpg>

de tornados dañinos, es decir que afectaron infraestructura pública o privada es de 130, que representa el 67.70%. El resto, 62 eventos (32.30%) habría ocurrido en zonas deshabitadas sin ocasionar daño alguno. Las afectaciones se concentran en casas habitación, infraestructura pública, locales comerciales, edificios de gobierno, cultivos, etc.

El recuento total de viviendas dañadas (que es lo que normalmente se reporta en los medios informativos) es de 6,696. Por lo que cada evento promediaría un total de 35 (34.87) viviendas afectadas. Dichos daños van desde daños parciales; como pérdida de techumbres, derribo de bardas, daños a la mampostería, entre otros. Además tenemos casos de pérdidas totales de la vivienda, donde generalmente son construidas con materiales débiles o sin reforzamiento alguno (fig. 2.7).

En cuanto a las cantidades en pesos mexicanos de daños no existe alguna cercana. Macías y Avendaño (2013) señalan que en sólo 3 eventos se contabilizó una pérdida de 1,679 millones de pesos. Para los casos estudiados en la presente investigación también se encontraron montos que van hasta los 20 millones de pesos por registro. El caso particular de Ciudad Acuña se mencionan pérdidas por 250 millones de pesos. No obstante, el conteo de daños en pesos es algo que se tiene en menos del 10% del total de los eventos registrados, lo cual indica valores subestimados, no solo en cuestiones monetarias, sino también, en daños materiales y pérdidas humanas. Una pista importante en este sentido es darle seguimiento a cuantos FONDEN se habrían otorgado por el impacto de tornados en México. Y aún así se tendrían valores sesgados, ya que en muchas ocasiones los daños son tan puntuales y en zonas tan reducidas que hace imposible la aplicación de un fondo como el ya mencionado.

2.4 Conclusiones

Hasta el momento no existe algún organismo especializado o dependencia gubernamental que se encargue del registro de tornados en México. Los datos que se tienen vienen de organizaciones educativas o de investigación, por lo que los

datos no están oficializados. Los resultados que aquí se exponen son una composición de las diversas fuentes que abordan el tema. Además de las propias investigaciones hechas para el trabajo de tesis.

Se contabilizaron un total de 192 reportes de tornados en un periodo de 16 años. Con una tendencia positiva y el máximo de registros en el 2014. Se observa también la preferencia entre los meses de mayo – julio, coincidente con el temporal de lluvias. Las horas de ocurrencia se inclinan hacia horarios vespertinos donde la inestabilidad atmosférica es mayor.

Sobre la distribución espacial, los estados del centro de México contienen los valores más altos. Zonas de altiplanicie con bordes orográficos complejos es lo que preferentemente se observa en la región. Asimismo se establecen zonas de baja, media, alta y muy alta incidencia, lo que se plantea como una zonificación de la amenaza con base en datos estadísticos de ocurrencia. La región paralela al E.N.T. se instaure con la región con mayor número de fenómenos. Regiones como las planicies de la Península de Yucatán, la frontera de Chihuahua y Tamaulipas, así como los altos de Chiapas, indican zonas externas a la cinturón central donde los índices de ocurrencia también son altos.

Con relación a los daños se observan cantidades poco despreciables, ni en capital y mucho menos en lesionados y muertes causadas. Un porcentaje cercano al 70% de los tornados en el país son dañinos, por lo que su nivel de impacto es bastante grande. Los daños generalmente se dan en zonas rurales o poco pobladas, sin embargo, las ocasiones donde ocurrieron en zonas densamente pobladas los resultados fueron devastadores. Lo anterior demuestra el potencial de daño que tienen tales fenómenos en México.

En general y debido a la poca información disponible se cree que las cifras mostradas están subestimadas. Hace falta que las instituciones encargadas de la seguridad de los ciudadanos pongan especial atención a este tipo de fenómenos. Se necesita un organismo especializado en el estudio y registro de tornados en el país. En resumen, hace falta mucho trabajo en este rubro, todo para poder tener mayor certeza del comportamiento temporal y espacial de los tornados en el país.

2.5 Referencias

- León, J. (2013). Percepción del riesgo y expresiones de vulnerabilidad ante tornados. El caso de Huescalapa, municipio de Zapotiltic, Jalisco. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad de Colima. Colima, México.
- Macías, J. y Avendaño, A. (2013). Climatología de los tornados en México. Investigaciones Geográficas, Boletín núm. 83. Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 75-88.

Capítulo III

Simulación numérica de la meteorología de tornados en México

3.1 Introducción

El uso de las simulaciones numéricas como herramienta de análisis se encuentra ampliamente extendida en las geociencias. Sirviendo como base de la experimentación, las ciencias atmosféricas han recurrido a ella desde hace varios años. El entendimiento de la física y dinámica de la atmósfera en conjunto con herramientas de este tipo, han traído consigo notables avances la comprensión de distintos fenómenos naturales. Tal es el caso de los tornados, ya analizados en el capítulo II. Dentro de estos modelos numéricos, se encuentra el Weather Research and Forecasting Model, mejor conocido como WRF.

En este capítulo se analizan las salidas de dicho modelo, en su versión 3.6.1 (la más reciente) con ayuda del software de graficado del NCAR Command Language (NCL). Donde además de visualizar los gráficos en planta y por cortes verticales, se identifican las similitudes y diferencias entre distintos casos de tornados en México. Para esto se seleccionaron 10 eventos diferentes a lo largo de la república mexicana. Las condiciones específicas y características propias de cada uno de los casos llevan al máximo las cualidades que el modelo ofrece, además de inspeccionar los diferentes escenarios en los que se han observado tornados.

Con esto se tiene el primer estudio en su tipo en México. Además, sirve para acrecentar la literatura relacionada con tornados en el país, ahora no sólo reportando y analizando cualitativamente los fenómenos, sino, tratando de hacer una primera aproximación a la problemática que representa el entendimiento de su meteorología.

3.2 Metodología

El modelo WRF es un modelo numérico de mesoescala no hidrostático de próxima generación que cubre las necesidades tanto de investigación atmosférica como de predicción operativa. Cuenta con dos núcleos dinámicos, un sistema de asimilación de datos y una arquitectura de software facilitando la computación paralela y extensibilidad del sistema. El modelo cubre un amplio espectro de aplicación, desde unas cuantas decenas metros hasta varios miles de kilómetros (**WRF, S/A**).

El modelo cuenta con la colaboración de distintas instituciones entre las que destacan: National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), representados por la National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y Forecast Systems Laboratory (FSL), la Air Force Weather Agency (AFWA), la Naval Research Laboratory, the University of Oklahoma, y la Federal Aviation Administration (FAA) (**WRF, 2015**).

Permite simulaciones bajo condiciones reales e ideales, según los datos que le sean proporcionados. Tiene una gran comunidad de cerca de 25,000 usuarios en más de 130 países (**WRF, S/A**). Es un modelo de acceso libre y que corre bajo cualquier entorno computacional de base UNIX. Los requerimientos para su instalación no son tan demandantes, lo que proporciona un panorama excelente para la investigación científica. En México, instituciones como la Universidad de Guadalajara (U de G), la Universidad Autónoma de México (UNAM), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), entre algunas otras instituciones de investigación y de gobierno utilizan este modelo¹⁵.

Además, múltiples módulos pueden ser agregados para diferentes tipos de investigaciones. Tales como un sistema de asimilación de datos (WRFDA), un módulo químico (WRF-Chem), usualmente utilizado para el cálculo de contaminantes, y un sistema de modelado hidrológico (WRF-Hydro) (**WRF, 2014**).

¹⁵ Algunos ejemplos de la aplicación del modelo WRF puede encontrarse en los siguientes enlaces: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=16&Itemid=19 (SMN), <http://www.atmosfera.unam.mx/jzavala/wrf/Archivos/AcercaPronostico.htm> (UNAM), y <http://www.udg.mx/wrf> (U de G).

Esto le provee de una mayor flexibilidad y le permite postularse como una gran herramienta para la investigación atmosférica.

La aplicación del modelo se desglosa en cuatro pasos esenciales (fig. 3.1). Primeramente la obtención de la información meteorológica. Usualmente conseguida desde la CISL Research Data Archive, donde información de diversas partes del mundo es procesada y publicada en un formato que el modelo pueda emplear. Posteriormente el pre procesamiento de los datos. Para ello se utiliza el WRF Preprocessing System (WPS), aunque también puede utilizarse el WRF Domain Wizard, una interfaz gráfica que facilita esta etapa. En este paso se define el o los dominios de estudio, los datos meteorológicos, de terreno, la física dentro del modelo, etc.

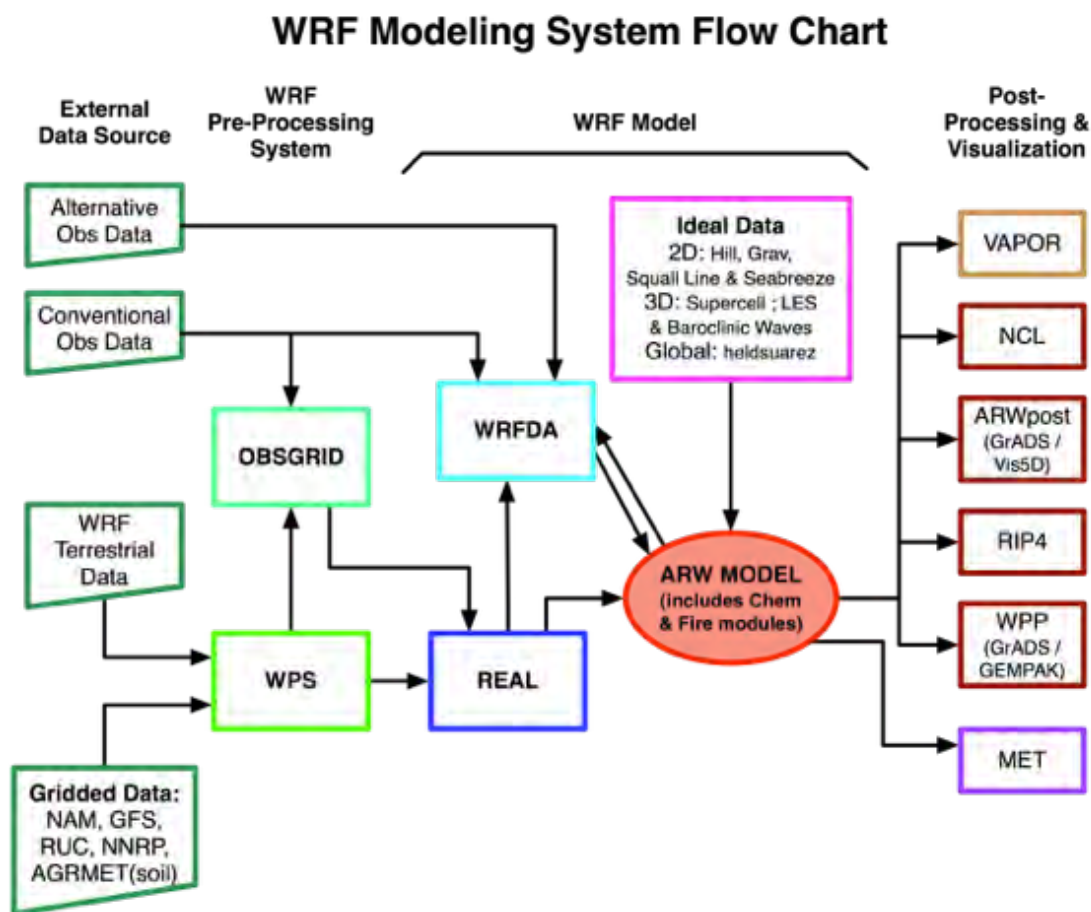


Figura 3.1 Diagrama de flujo del modelo WRF.

Fuente: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf-flowchart-arw_v3.png

El siguiente paso consiste en la aplicación del modelo como tal. Este proceso varía dependiendo para qué fue compilado el modelo, ya que como se mencionó anteriormente puede simular casos reales o ideales. Así, comienza el cálculo para todos los dominios definidos en la sección de pre procesamiento. Dichos cálculos se hacen para cada punto de la malla y tiempo señalado. El último paso consiste en el graficado de los resultados. Las salidas del modelo pueden ser graficadas directamente por programas como el NCAR Command Language (NCL) o MatLab. También puede hacerse un post procesamiento, necesario para graficar en software como el Grid Analysis and Display System (GrADS).

Para los casos que aquí se presentan fue utilizada la base de datos de NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999 con número de referencia ds083.2¹⁶. En el pre procesamiento de los datos la herramienta WRF Domain Wizard¹⁷ versión 2.84. Se creó un dominio madre con dos anidamientos para cada uno de los casos modelados. Las dimensiones de malla fueron de 60 x 60 puntos con una resolución espacial de 9 km en el dominio madre (D1), 46 x 46 con 3 km en el primer anidamiento (D2) y 34 x 34 con 1 km en el segundo anidamiento (D3). En la vertical se definieron 27 niveles con un tamaño de malla de 29 puntos. En todos los casos el centroide del dominio contenía las coordenadas del punto de ocurrencia del tornado.

Se corrió el modelo bajo condiciones reales un tiempo de 36 horas, centrando la ocurrencia del fenómeno a las 18 horas de la modelación. Se obtuvieron salidas del modelo cada 30 minutos (D1), 60 minutos (D2) y 10 minutos (D3). La parametrización utilizada en las simulaciones fue: WSM 3-class simple ice scheme microphysics, rrtm longwave radiation scheme, Dudhia shortwave radiation scheme, YSU boundary layer scheme y Kain-Fritsch (new Eta) cumulus parameterization scheme. Las salidas del modelo fueron graficadas por medio del NCL¹⁸ versión 6.2.1.

¹⁶ Fuente: http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#metadata/grib.html?_do=y

¹⁷ Fuente: <http://esrl.noaa.gov/gsd/wrfportal/DomainWizard.html>

¹⁸ Fuente: <https://www.ncl.ucar.edu/>

3.3 Estudios de caso

Para esta investigación se retomaron 10 casos de tornados distribuidos en los estados de: Quintana Roo, Jalisco, Sinaloa, Guanajuato, Chihuahua, Michoacán, Veracruz, Chiapas, Hidalgo y el Distrito Federal (fig. 3.2). El evento más antiguo corresponde a mayo de 2009, y el más reciente en agosto de 2014. En los meses de ocurrencia figuran uno en marzo, uno mayo, uno en junio, tres en julio, tres en agosto y uno en septiembre. El 90% de los eventos seleccionados ocurrieron en horario vespertino, entre las 14:00 y 19:00 horas, y sólo uno a las 02:00 horas.

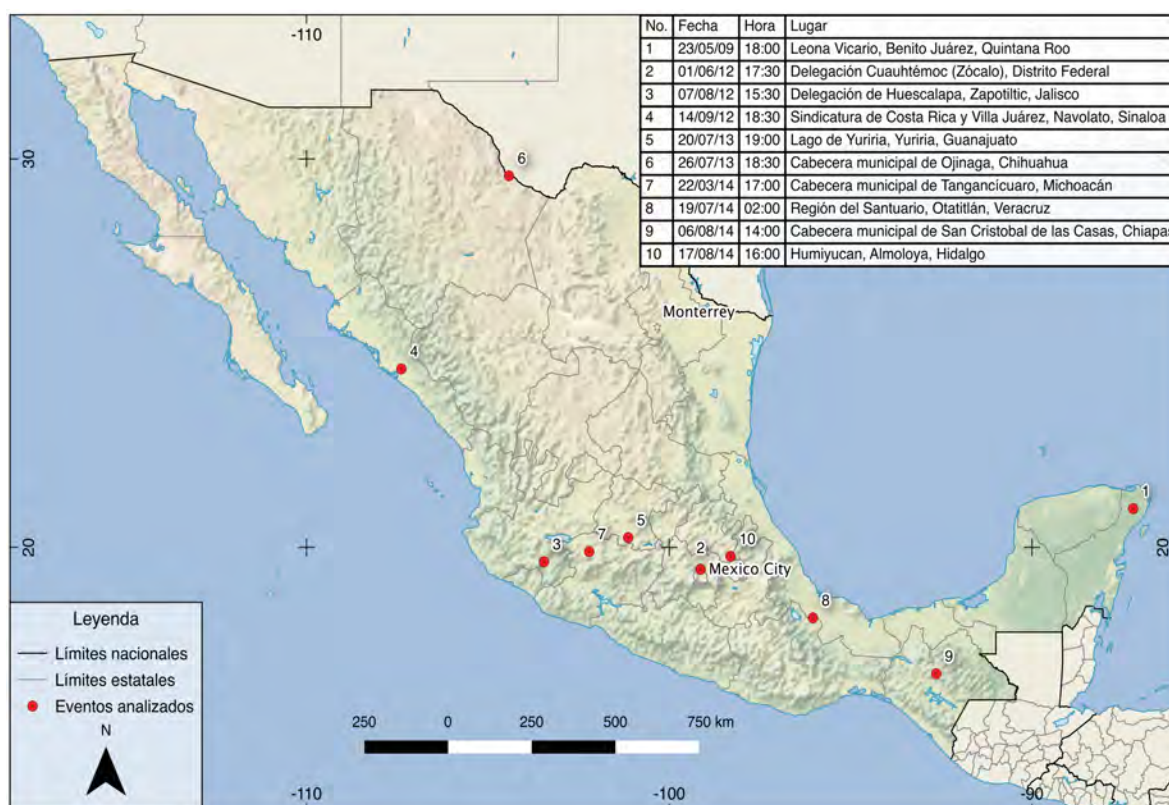


Figura 3.2 Distribución espacial de los casos analizados. Elaboración propia.

Dos eventos se ocasionaron sobre el nivel del mar o unos cuantos metros por encima de este, el resto con variaciones de altitudes entre los 1000 y 3000 msnm. Seis de los casos ocurrieron bajo condiciones topográficamente complejas. Ocho de los diez eventos causaron algún daño a la población, desde

desprendimiento de techumbres y daños a los cultivos hasta la declaratoria de emergencia o desastre. Ninguno de los eventos ocasionó algún deceso, pero sí algunos heridos. Los casos son ordenados por orden cronológico, del más antiguo al más reciente.

3.3.1 Caso de Leona Vicario, Benito Juárez, Quintana Roo

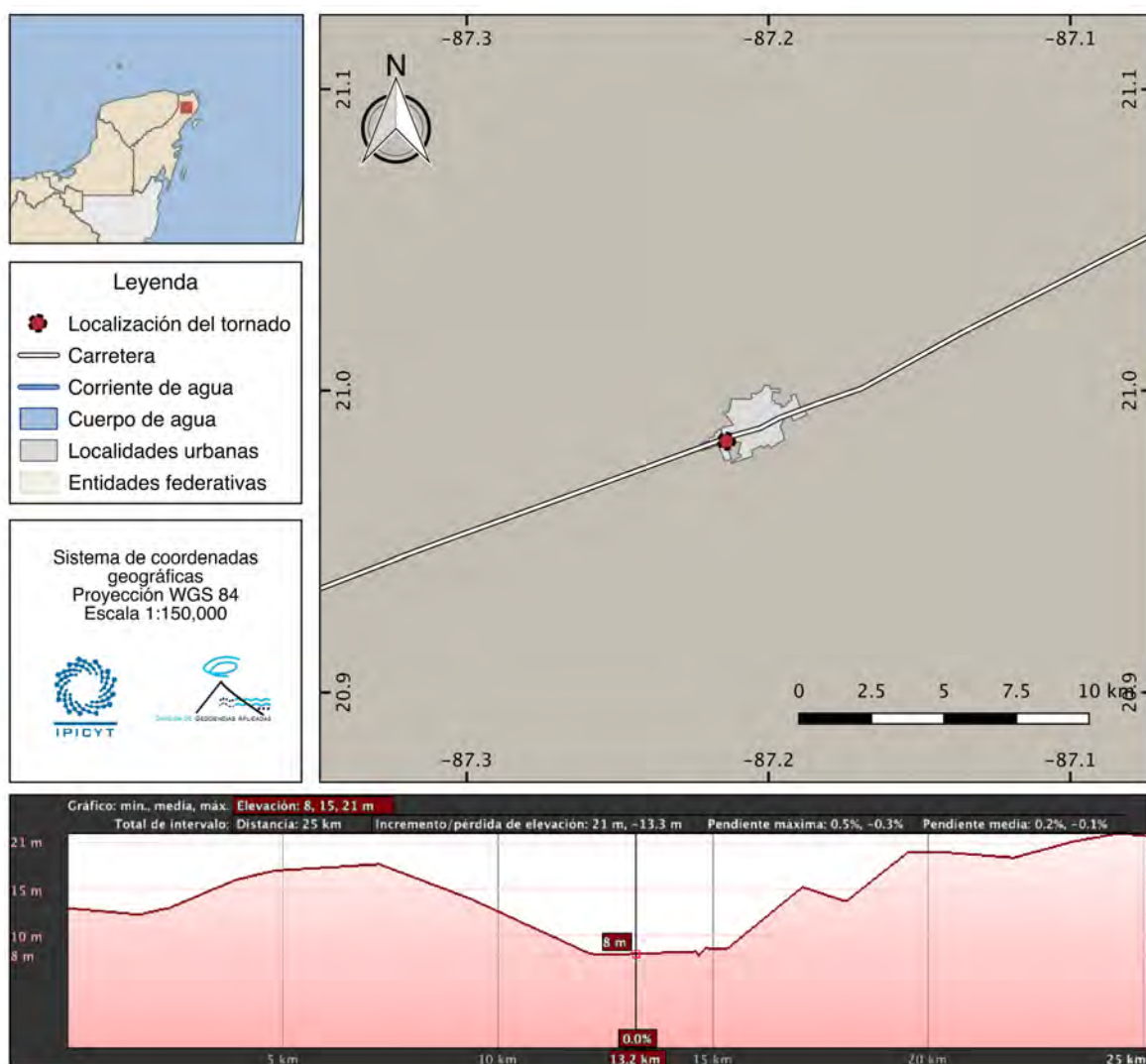


Figura 3.3 Mapa de ubicación del tornado de Benito Juárez, Quintana Roo.

Características generales

Ocurrido en el municipio de Benito Juárez (Cancún), Quintana Roo, en la comunidad de Leona Vicario. Los reportes señalan que se formó cerca de las 18:00 horas del 23 de mayo de 2009. El tornado inició a unos 300 metros al sur del jardín principal, donde al leve viento inicial lo prosiguió la formación del vórtice mientras avanzaba por el paralelo de la carretera federal Cancún-Mérida y al lado derecho de las torres de la Comisión Federal de Electricidad (**Cancún Foros, 2009**).

Sobre los daños se reportaron el desprendimiento de árboles de zapote, el daño a tres viveros ubicados a lo largo de 2 kilómetros, además de otros perjuicios en los ranchos “El Zorrillo”, “El Retiro”, “Los Columpios” y “Jardín Lol Be”. No hubo pérdidas humanas ni lesionados. Los testigos mencionan un vórtice de aproximadamente 20 metros de ancho, con un radio de destrucción de hasta 100 metros (**Avendaño, 2009**).



Figura 3.4 Fotografías del evento.

Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=I3ZhZ2rDZps>

Condiciones sinópticas

Para las 09:00 horas del día 23 de mayo de 2009 la imagen satelital mostraba la presencia de la Onda Tropical (O.T.) No.1 moviéndose en dirección este-oeste en la zona de Centroamérica. Una vaguada que se extendía en la mayor parte del oriente del territorio nacional y una zona de inestabilidad en los estados del sureste

y Centroamérica. Los nublados eran prominentes por zonas de baja presión en gran parte del territorio mexicano (**SMN, 2009a**).

A las 15:00 horas, la Discusión Meteorológica hecha por el SMN (**2009b**) mencionaba como fenómeno significativo lluvias en el sur y sureste del país derivados de la O.T. No.1. Además, se indicaba una zona de inestabilidad en el sur-sureste de México originado por una zona de convergencia en interacción con altos valores de humedad, favoreciendo nublados con lluvias, tormentas eléctricas y vientos de moderados a fuertes.

Ya para las 21:00 horas del mismo 23 de mayo de 2009, pasada la formación del tornado, la imagen mostraba un avance de la O.T. No. 1. La vaguada se extendida hasta la Península de Yucatán y era cruzada por un viento máximo en dirección noroeste-sureste en un ángulo de baja inclinación (**SMN, 2009c**).

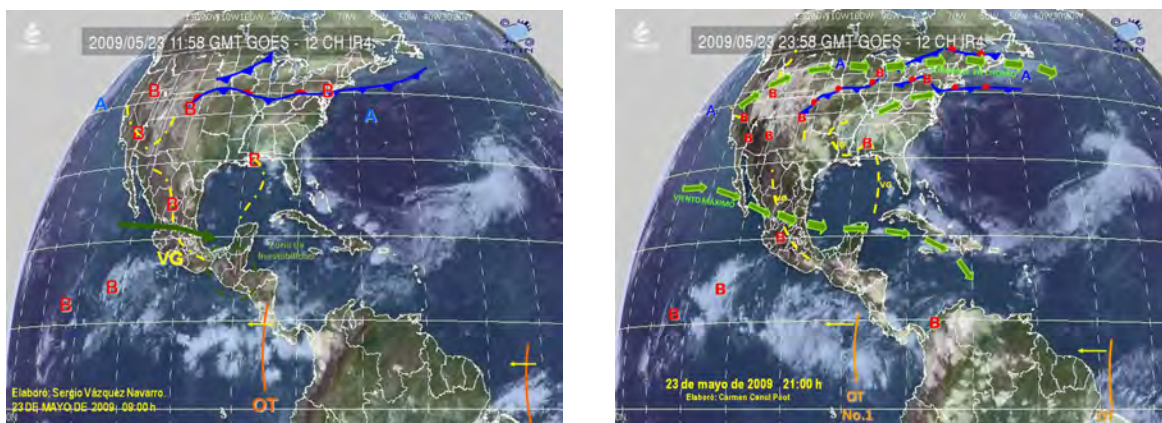


Figura 3.5 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 09:00 y 21:00 horas.

Simulación numérica

Los datos arrojados por el modelo señalan una temperatura entre los 31°C y 32°C en superficie a la hora del evento. Un gradiente de hasta 5°C en las zonas cercanas y una entrada aire caliente del suroeste de la Península de Yucatán (fig. 3.6a). La entrada de humedad del noreste, por la zona de Cancún es notoria. El fenómeno se localizó en una zona del frente de la línea seca formada alrededor de costa mexicana. El gradiente de humedad relativa va desde el 30% al 80% (fig. 3.6b).

Para la velocidad del viento en Z, el modelo arrojó que dentro de la zona predominaban corrientes descendentes. Los límites de éstas son bordeadas por

zonas de corrientes ascendentes (fig. 3.6c). Se observan también zonas de convergencia cercanas. La vorticidad potencial proyecta zonas de contraste paralelas a la zona del tornado. Esta se extiende unos cuantos kilómetros con el borde de la costa, dejando la zona central de la península con valores nulos de vorticidad potencial (fig. 3.6d).

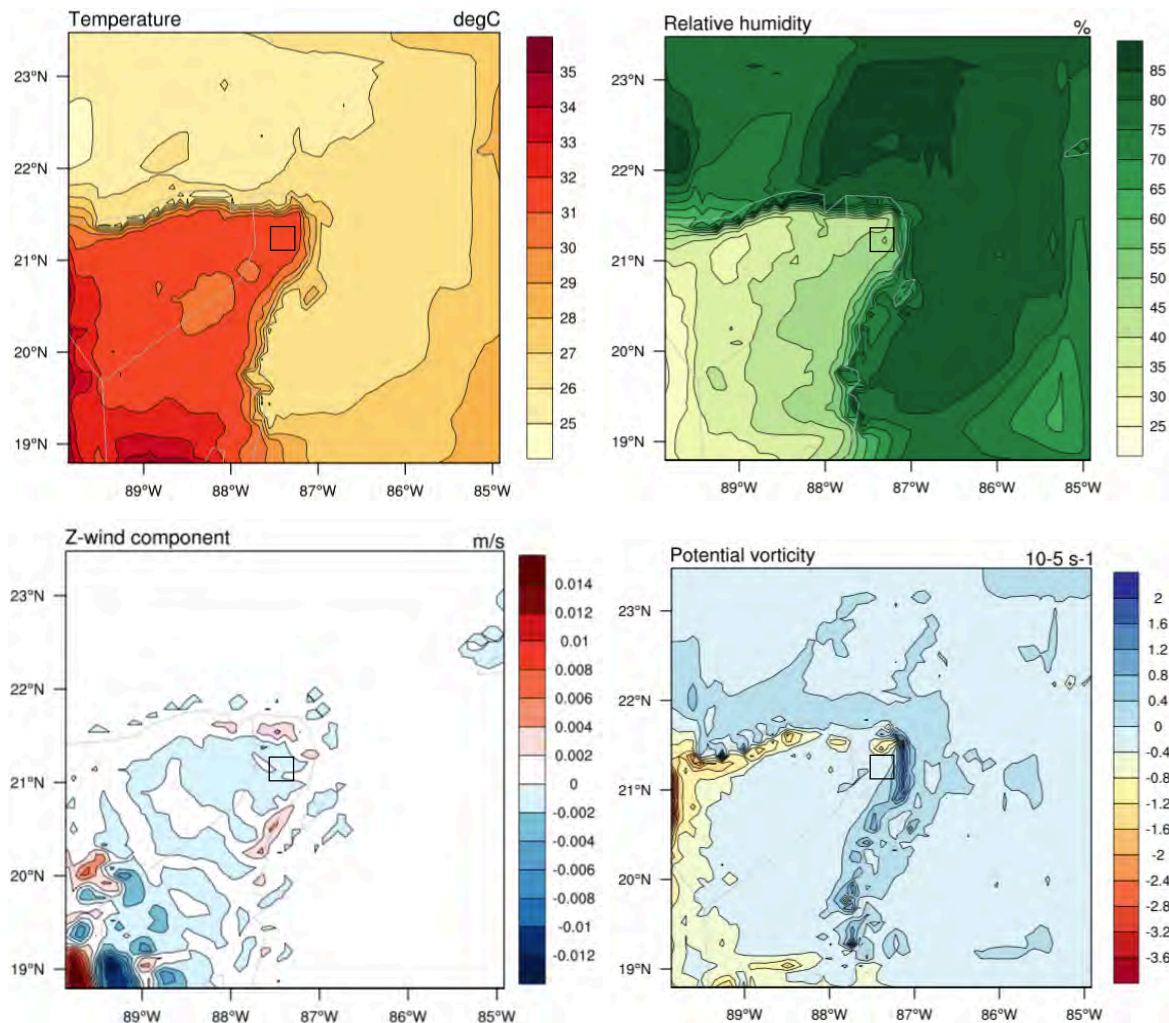


Figura 3.6 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo.

La presión sobre el nivel del mar muestra una zona de baja presión cercana a la localización del tornado. Las variaciones de presión no van más allá de los 2 hPa (fig. 3.7a). La zona en general está dominada por bajas presiones lo que provocaría junto con la presencia de humedad, nublados importantes para la región.

El evento ocurrió a aproximadamente 8 msnm. Los vectores de viento en la horizontal muestran una zona de convergencia importante justo en la zona del tornado. Vientos que descienden de las zonas altas del suroeste de la península y que convergen con los procedentes de la costa norte (fig. 3.6b).

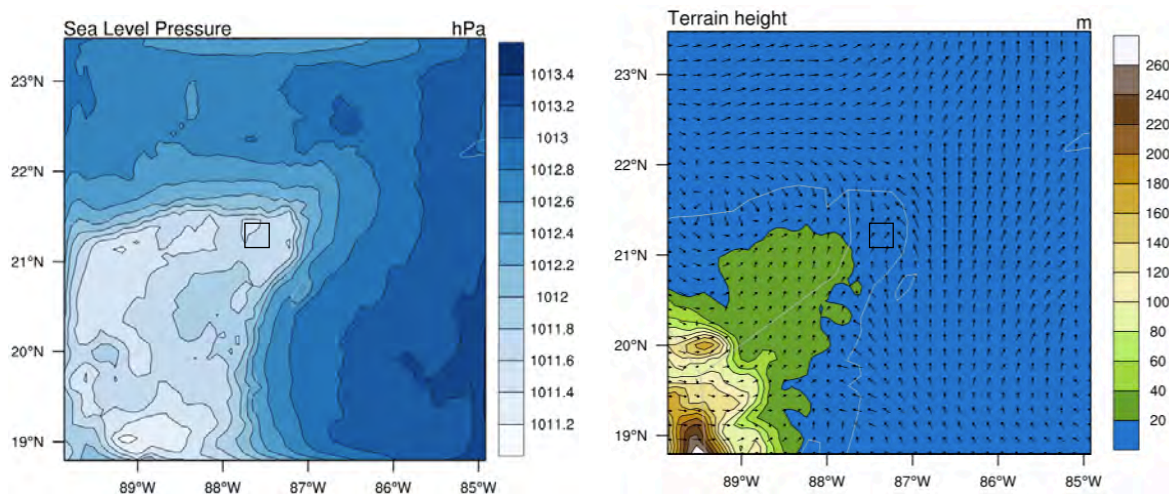


Figura 3.7 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo.

Los cortes verticales de terreno con humedad relativa a longitud constante (fig. 3.8a) muestran una región vertical de contraste de humedad entre valores altos (90%) y bajos (20%) hasta los 3 km en la vertical. Esta línea se extiende perpendicularmente al punto de ubicación del tornado. Hacia el lado este del dominio, que correspondería al Mar Caribe se observan valores de humedad altos sobre la superficie, lo que indicaría un movimiento este-oeste y la convergencia a la altura de la comunidad de Leona Vicario.

El corte transversal (fig. 3.8b) muestra una distribución más uniforme de la humedad relativa. Esta tiene un leve cambio de poco más del 40% justo sobre la región de ocurrencia del tornado. Tal situación favorece el ascenso de una porción de aire más húmedo hasta poco más de los 3 km de altura. La situación indicaría la formación de nubes de desarrollo vertical con potencial de tormentas fuertes en la zona. La temperatura se comporta de forma similar con un cambio drástico sobre la

zona de Leona Vicario, provocando gradientes térmicos a los costados de la zona estudiada.

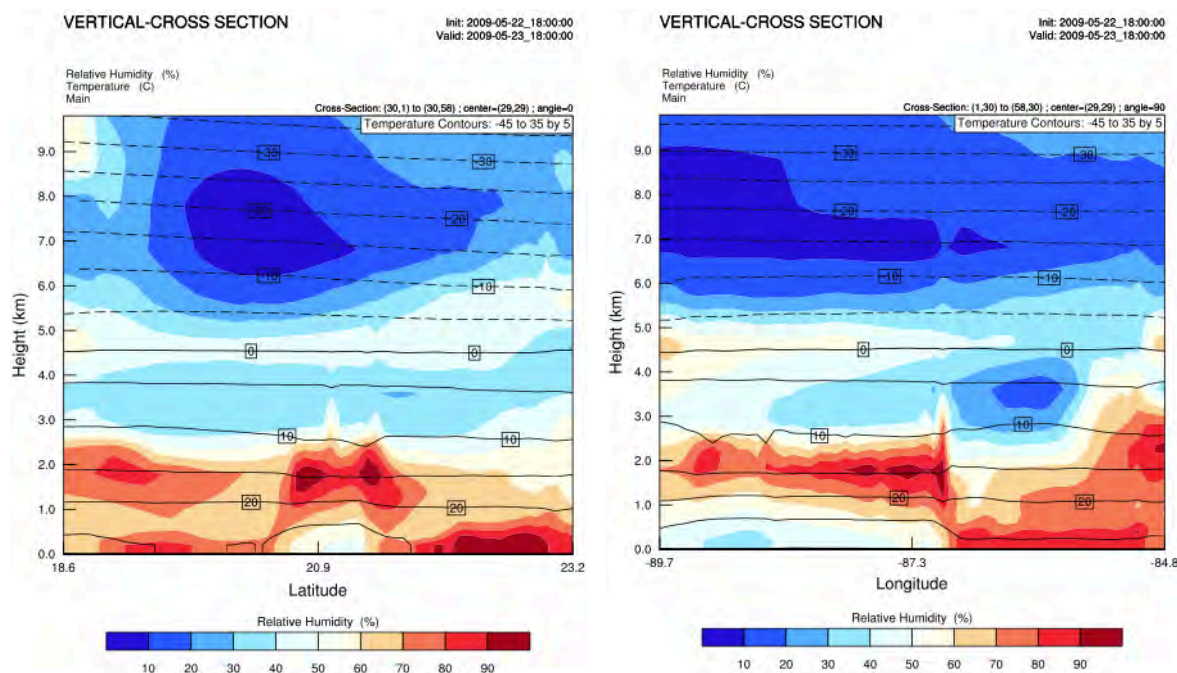


Figura 3.8 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante.

En los cortes verticales de terreno en alta resolución (D3) se observa la existencia de una zona de contraste de vorticidad potencial en ambas direcciones de corte. Dichos máximos de vorticidad se alinean verticalmente en el corte a longitud constante (fig. 3.9a) y horizontalmente a latitud constante (fig. 3.9b). Los valores de vapor de agua en porción de mezcla se elevan en la zona de convergencia de vorticidad, lo que indicaría zonas de inestabilidad. Características como las mencionadas son favorables de condiciones de tormenta.

El corte con velocidad del viento en Z junto con los vectores muestran zonas de convergencia muy cercanas a la localización del evento (fig. 3.9c), lo que provoca el ascenso del viento a velocidades considerables, 3.2 m/s (fig. 3.9d). El resto de la zona muestra corrientes descendentes. La altura de las corrientes ascendentes es de 3-4 km. La inestabilidad presente y observada a través de varios parámetros se ve reflejada perfectamente en estos cortes, simulando zonas de convección.

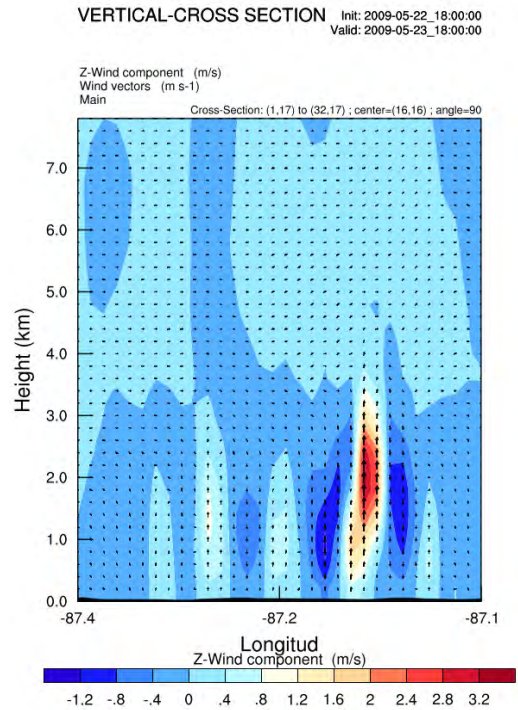
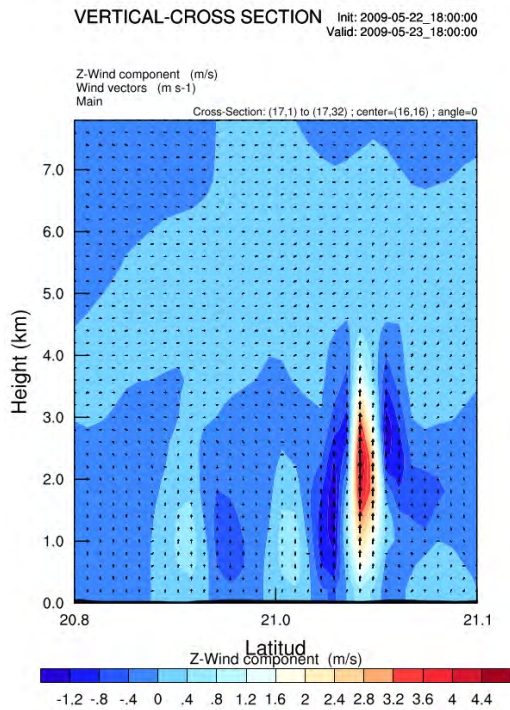
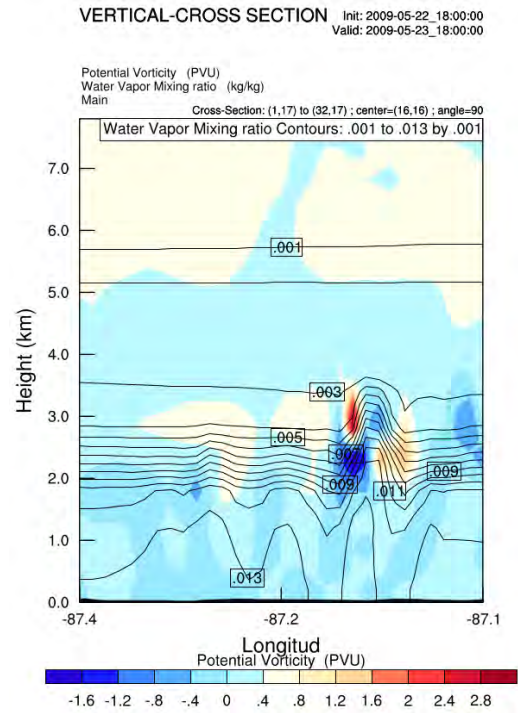
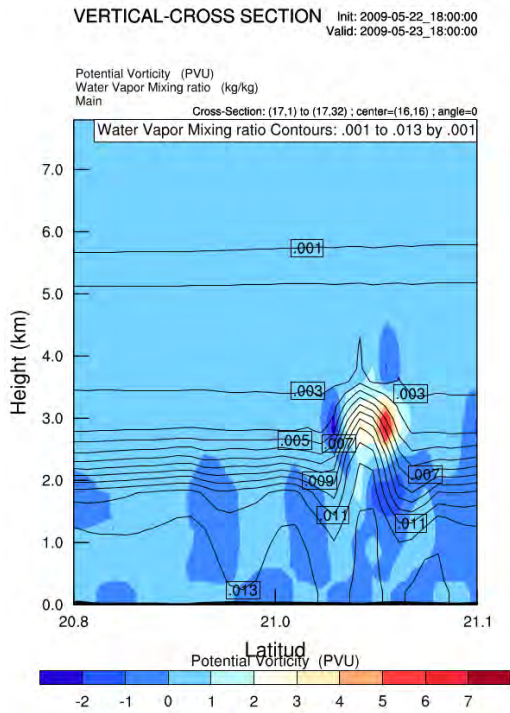


Figura 3.9 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3.

3.3.2 Caso del Zócalo Capitalino, Delegación Cuauhtémoc, Distrito Federal

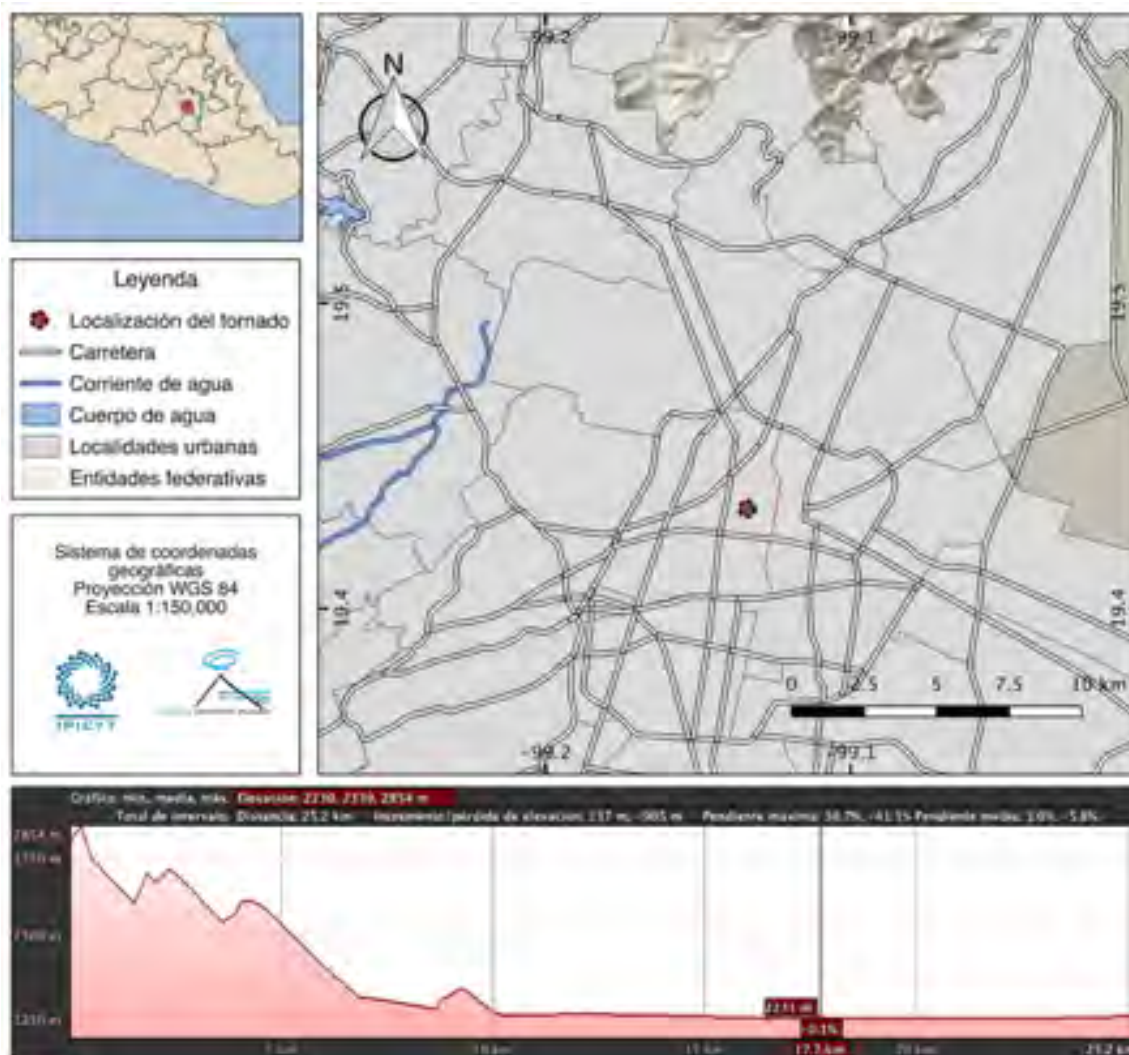


Figura 3.10 Mapa de ubicación del tornado de la Ciudad de México.

Características generales

Acontecido el 1 de junio del 2012 cerca de las 17:30 horas en la capital del país. Iniciándose al norte del Distrito Federal y con una trayectoria de norte-sureste. Se calculó un recorrido de al menos 8.1 km y una duración aproximada de 20 minutos (**Macías, Campos y Avendaño, S/A**). El trazo de daños inició cerca del cruce de las avenidas Montevideo e IPN y terminó en el encuentro de las avenidas Calzada de la Viga y Fray Servando Teresa de Mier. Las estimaciones de la velocidad de viento van desde los 96 hasta los 189 km/h (**Macías, Campos y Avendaño, S/A**).

Los daños presentados por el siniestro fueron cerca de 102 árboles caídos, el desprendimiento del techo de lámina de una gasolinera, daños a automóviles por la caída de objetos, diversas averías en cableado telefónico y eléctrico y la destrucción del campamento de la CNTE ubicado en el Zócalo Capitalino. Se reportaron 27 personas lesionadas y ningún deceso (**Sin Embargo, 2012**). Según las estimaciones el fenómeno alcanzó una categoría EF2 en la Escala Fujita Mejorada (**Macías, Campos y Avendaño, S/A**).

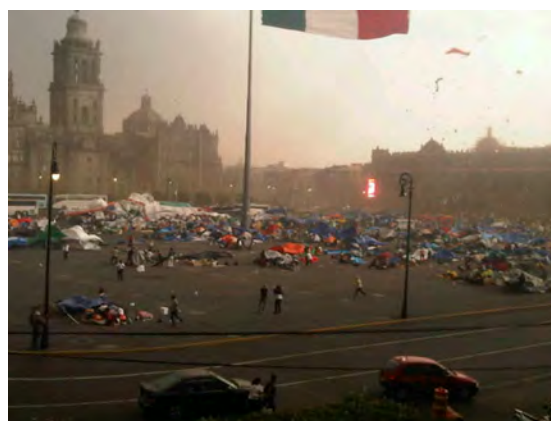


Figura 3.11 Fotografías del evento.

Fuente: <http://www.elmundodeorizaba.com/multimedia/fotogalerias?func=detail&id=8534>

Condiciones sinópticas

Para las 09:00 horas del 1 de junio de 2012, la imagen satelital interpretada por el SMN (**2012a**) señalaba un canal de baja presión profunda desde la zona norte hasta el centro de la república mexicana, lo que favorecería nublados con lluvias fuertes. La zona de vientos máximos se movía desde el noroeste hasta el centro de México. El pronóstico marcaba vientos mayores a 40 km/h. Para la ciudad de México se pronosticaba cielo medio nublado a nublado con un 80% de probabilidad de lluvia acompañada de tormenta eléctrica. Viento del sur y sureste de 35 a 50 km/h en niveles medios de la atmósfera y de 25 a 40 km/h con rachas en la superficie.

A las 15:00 horas, la discusión meteorológica señalaba la entrada de humedad del Pacífico hacia el centro del país que favorecía la convección vespertina. Se observaban indicadores de tiempo severo desde el norte hasta el

centro del país, el índice de CAPE era de 1500 a 2500 J/kg esperándose así tormentas y actividad eléctrica (**SMN, 2012b**).

Para el pronóstico meteorológico general emitido a 21:00 horas del mismo 1 de junio, ya pasada la formación del tornado en el D.F., continuaban las condiciones de baja presión a niveles medios de la atmósfera desde el norte hasta el centro del país, extendiéndose ahora hacia el occidente. Una vaguada cruzaba gran parte del país con dirección noroeste-sureste. Los vientos máximos se desplazaron hacia el norte siguiendo la misma dirección descrita a las 09:00 horas. Se observaba también el avance del sistema frontal al norte del Golfo de México (**SMN, 2012c**).

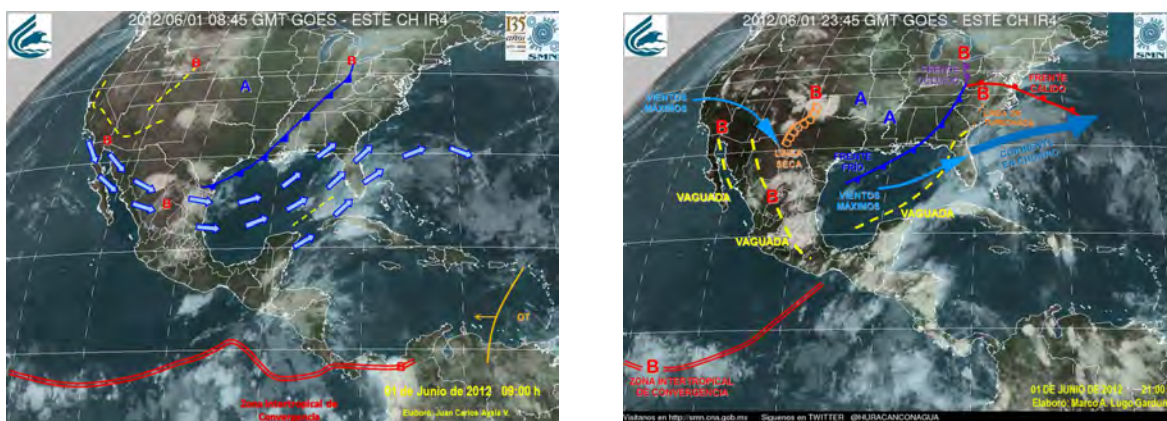


Figura 3.12 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 09:00 y 21:00 horas.

Simulación numérica

La salidas del modelo marcan para una temperatura de 26°C a la hora del desarrollo del tornado. En las zonas cercanas se observa un gradiente desde los 12°C hasta los 26°C. La entrada de calor es del occidente del país mostrando zonas contrastantes de temperatura (fig. 3.13a). La temperaturas frías corresponden a las zonas montañosas que bordean al Valle de México. La humedad relativa (fig. 3.13b) señala bajos porcentajes, aproximadamente del 30%, al momento de presentarse el evento. Sin embargo, la entrada de humedad proveniente del occidente del país muestra una clara línea seca que se extiende de este a oeste, contrastando valores de humedad relativa entre 85% y 25%.

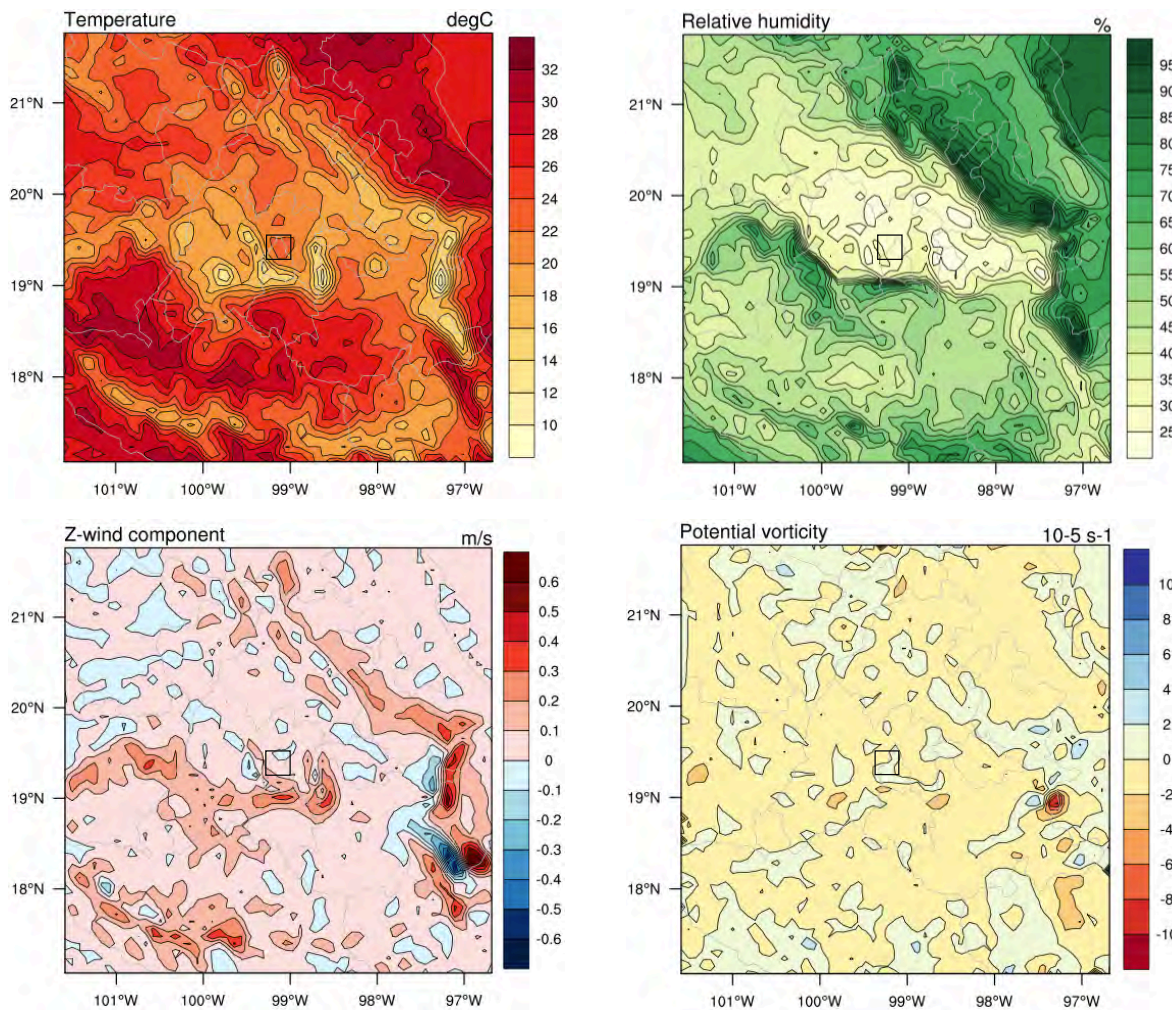


Figura 3.13 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo.

Sobre la velocidad del viento en Z (fig. 3.13c), la zona se encuentra entre valores nulos y positivos, de 0.1 m/s. Los vientos dominantes son ascendentes, se observan algunas zonas de corrientes ascendentes y descendentes, lo que indicaría convección. Los valores oscilan entre los 0.4 y -0.2 m/s. Para la vorticidad potencial (fig. 3.13d), el dominio en general muestra valores nulos, es decir viento sin tendencia a rotar. Dentro de la zona de estudio, domina la vorticidad positiva, y cercanos a el, se observan zonas de contraste de vorticidad. Estos dos últimos parámetros en particular no muestran evidencias importantes de tiempo severo.

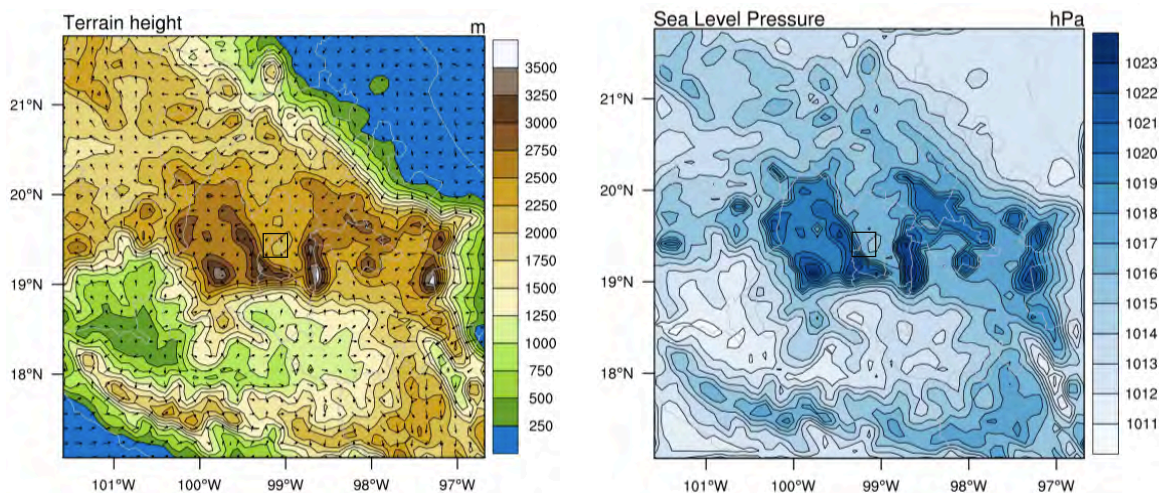


Figura 3.14 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo.

Con respecto a la topografía del lugar y su influencia en la dirección del viento sobre la superficie (fig. 3.14a), las salidas del modelo indican que las corrientes provenientes del norte suben por las zonas montañosas a los costados del Valle de México creando una zona de divergencia en la zona de estudio, un tanto más al sur estas corrientes coinciden con otras provenientes del estado de Morelos, creando zonas de convergencia y por ende propensas para la formación de nubes de desarrollo vertical. La presión a nivel del mar (fig. 3.14b), muestra una clara franja de baja presión justo en el centro de dos altas presiones, con valores que oscilan entre los 1012 y 1023 hPa.

Los cortes verticales de terreno en D1 a longitud (fig. 3.15a) y latitud (fig. 3.15b) constante, muestran la entrada de una masa de aire seco, que se extiende hasta los 10 km de altura, y que posiblemente sea derivado del frente frío que en esos momentos afectaba a los estados del norte de México. Zonas con aire húmedo bordean al Valle de México y cerca de los 5 km en la vertical y justo en el centro del dominio y zona de estudio, se ve al convergencia de estas dos masas de aire con características distintas de humedad con valores oscilatorios entre 20% y 70%. La temperatura media es de 20°C en la zona del evento. La topografía nos señala la ocurrencia justo en una zona del valle bordeado por dos zonas montañosas, en aproximadamente 2000 msnm.

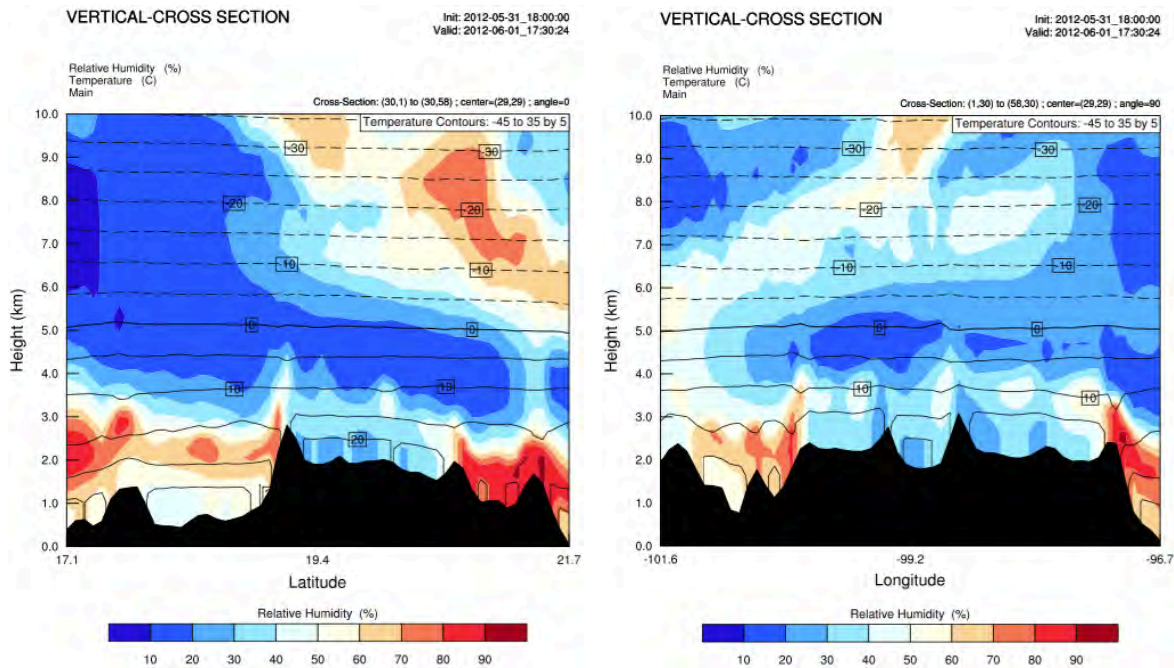


Figura 3.15 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante.

El corte vertical de terreno en el dominio a mayor resolución (D3) indica para la vorticidad potencial y vapor de agua en porción de mezcla; valores entre los 0.0056 y 0.0016 kg/kg en ambos cortes y 1.5 hasta -1.5 PVU en el corte a latitud constante (fig. 3.16b), y 1 a -2 PVU a longitud constante (fig. 3.16a). Se muestra también una zona de contraste de vorticidad potencial entre los 3 y 4 km de altura y valores de vapor de agua en porción de mezcla en aumento justo en la zona tornado (fig. 3.16b). Esto indicaría la tendencia a rotación del viento extendida en la vertical.

Para el caso de la velocidad del viento en la vertical, se observa una zona de convergencia y la corriente ascendente derivada de esta que se eleva aproximadamente un kilómetro por encima de la superficie de terreno (fig. 3.16d). Se observan también dos zonas con corrientes descendentes de hasta de 0.4 m/s un tanto desviadas de la zona en análisis (fig. 3.16c). Los gráficos muestran zonas convectivas que empatan con zonas de rotación del viento, lo que favorecería la formación del vórtice del que se desprendió el tornado.

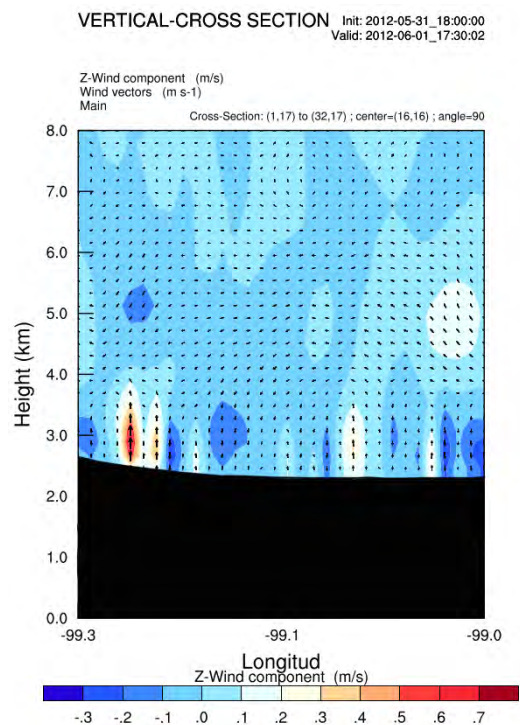
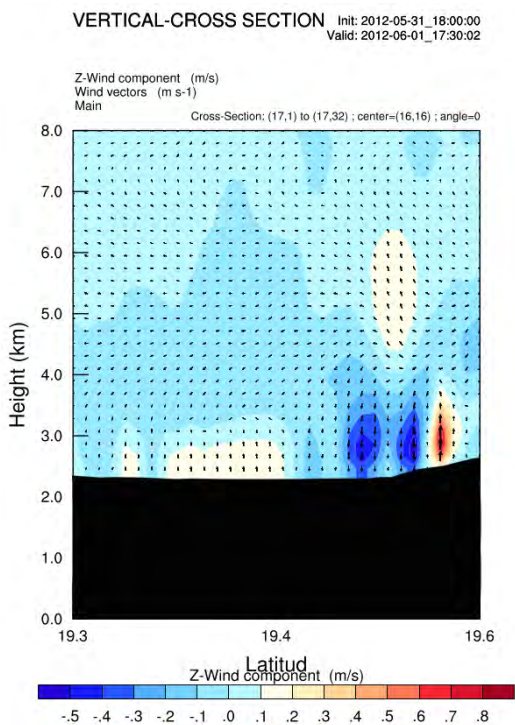
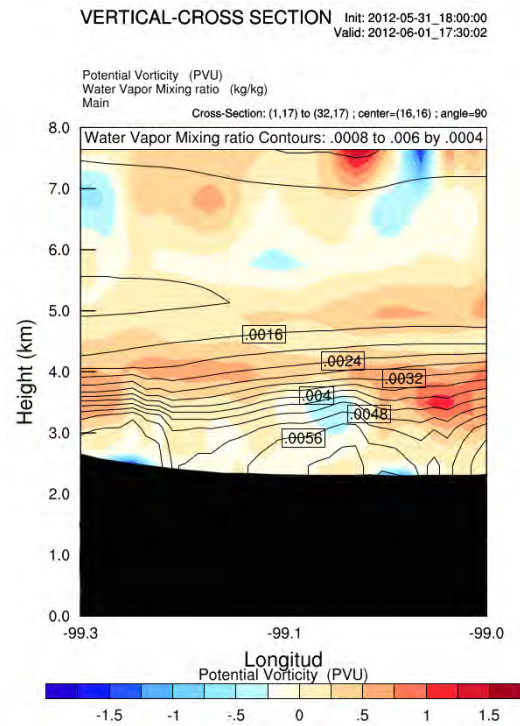
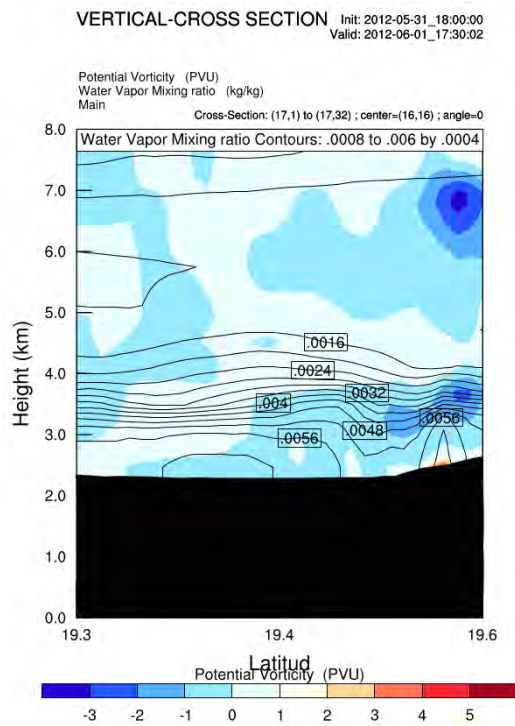


Figura 3.16 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3.

3.3.3 Caso de la Delegación de Huescalapa, Zapotiltic, Jalisco

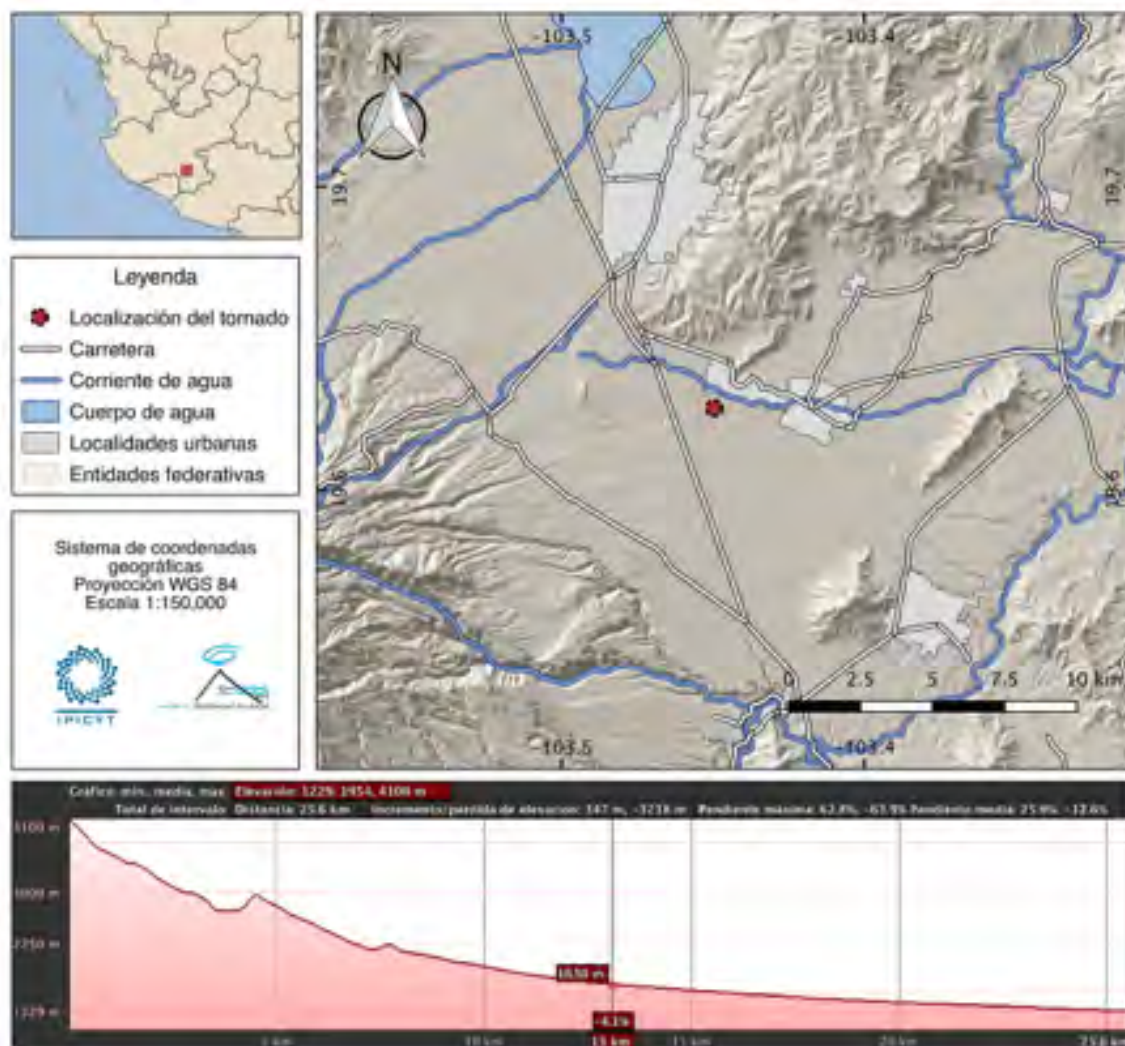


Figura 3.17 Mapa de ubicación del tornado de Zapotiltic, Jalisco.

Características generales

Sucedido el 7 de agosto del 2012 en la Delegación de Huescalapa, Zapotiltic, Jalisco cerca de las 15:30 horas. El tornado se originó al sur de la zona urbana con un acercamiento máximo de 300 m a ésta, siguiendo su trayecto hacia el suroeste y concluyendo a las orillas de la carretera Colima-Guadalajara. Tuvo un recorrido aproximado de 2.4 kilómetros y una duración de 15 minutos (León, 2012). No se reportaron daños materiales ni pérdidas humanas.

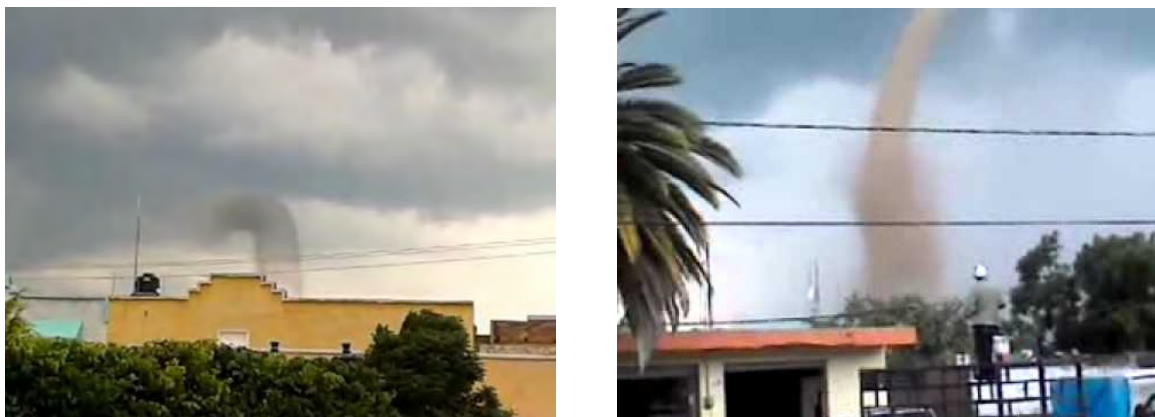


Figura 3.18 Fotografías del evento.

Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=EGCEr-Hrdzg>

Condiciones sinópticas

Para las 09:00 horas del 7 agosto de 2012 la Tormenta Tropical (T.T.) Ernesto se localizaba muy cerca de las costas de las Península de Yucatán. La Depresión Tropical (D.T.) 7-E se localizaba a poco menos de 1000 km de las costas de Manzanillo, en el occidente del país, y mostraba condiciones para intensificarse en las próximas 48 horas. Dichas condiciones provocarían nublados provenientes de los desprendimientos nubosos en el sur y centro del país. Esto acompañado de una zona de inestabilidad que se extendía hasta el occidente de México (**SMN, 2012d**).

En la discusión meteorológica de las 15:00 horas (poco antes de la ocurrencia del tornado), se mencionaba una vaguada extendida a lo largo de la Sierra Madre Occidental hasta el centro del país que mantenía condiciones de chubascos y tormentas eléctricas a lo largo de su eje. La D.T. 7-E se había intensificado a la T.T. Glima (**SMN, 2012e**).

Para las 21:00 horas del mismo 7 de agosto, el SMN (**2012f**) mencionaba el continuo cruce de Ernesto por la Península de Yucatán. Además, una línea de convergencia que se extendía desde el noroeste hasta el centro de México, originando nublados y lluvias en el noroeste, occidente y norte del país. Por su parte la T.T. Glima se seguía alejando de las costas mexicanas, sin afectar al territorio.

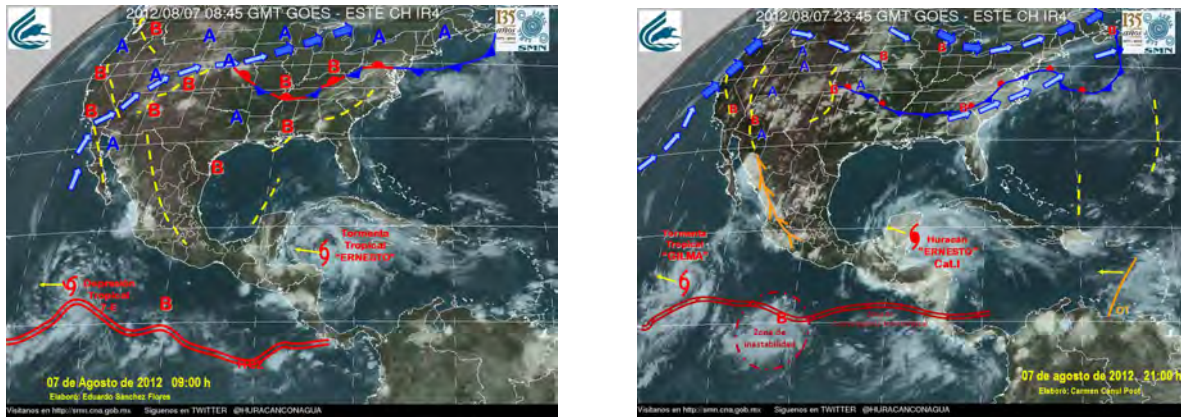


Figura 3.19 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 09:00 y 21:00 horas.

Simulación numérica

El modelo arrojó una temperatura media de 22°C con gradientes de hasta 6°C en zonas cercanas a la región de estudio (fig. 3.20a). Las zonas frías están dominadas por regiones de mayor altitud, el valle entre estas funciona concentrando el aire caliente que entra del Pacífico. La humedad relativa en la zona (fig. 3.20b) se encuentra entre el 80% y 88%. Una línea con altos valores de humedad se extiende en dirección noroeste-sureste, contrastando muy cerca de la localización del tornado con una masa de aire más seco con valores aproximados al 60%.

En la velocidad del viento en Z (fig. 3.20c) se observa claramente como la región de estudio se ubica entre una zona de corrientes ascendentes y descendentes. Esto indicaría una zona de convergencia de masas de aire, posiblemente guiadas por la topografía del lugar, donde interacciones de valle-montaña y montaña-valle son importantes. La velocidad del viento se encuentra entre los 0.4 y 0.25 m/s, la primera en corrientes ascendentes y la segunda en las descendentes. La distribución de corrientes indica fuertes zonas de convección, favoreciendo la formación de nubes de desarrollo vertical.

Por su parte, la vorticidad potencial (fig. 3.20d) se mantiene con valores nulos en la mayor parte del dominio. Sólo unas cuantas franjas de vorticidad potencial contrastan con la homogeneidad en este parámetro. Los valores cercanos al territorio que se analiza van hasta los -2 PVU, lo que indicaría una posible rotación del viento en la superficie, necesaria en la formación del tornado.

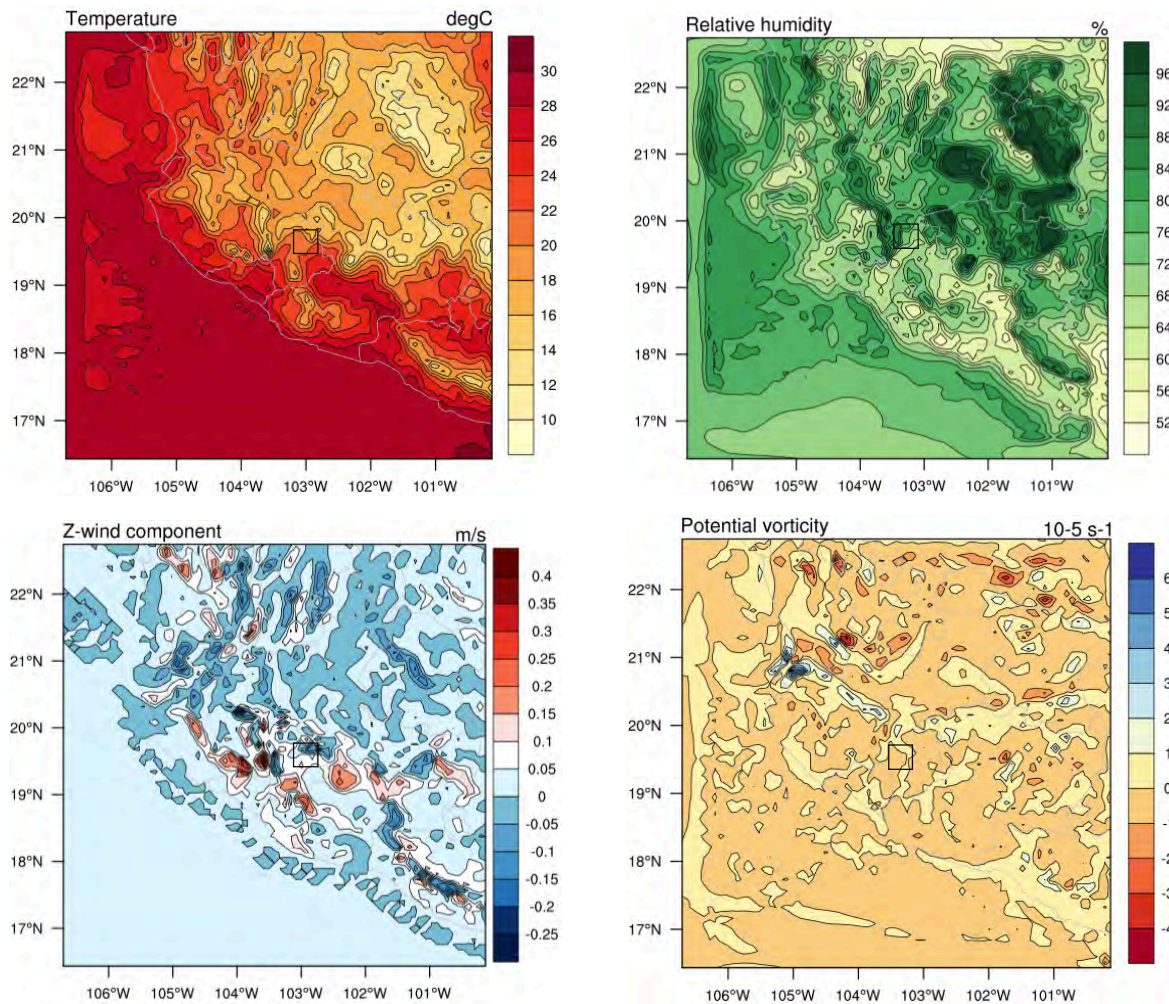


Figura 3.20 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo.

Para la distribución de vectores de viento en superficie y la topografía (fig. 3.21a) se identifica que el flujo de viento está influenciado por las zonas del valle, creando zonas de convergencia justo en el centro del dominio. Tales corrientes provienen del centro y norte de la región analizada y otras más de la costa. También se observa que el fenómeno se desarrolló cerca de los 1800 msnm. La presión sobre nivel del mar (fig. 3.21b) muestra un avance de una zona de baja presión con valores de 1012 hPa que contrastan con otras de 1021 hPa. Esto provocaría zonas de nubosidad extendidas en la región occidente del país.

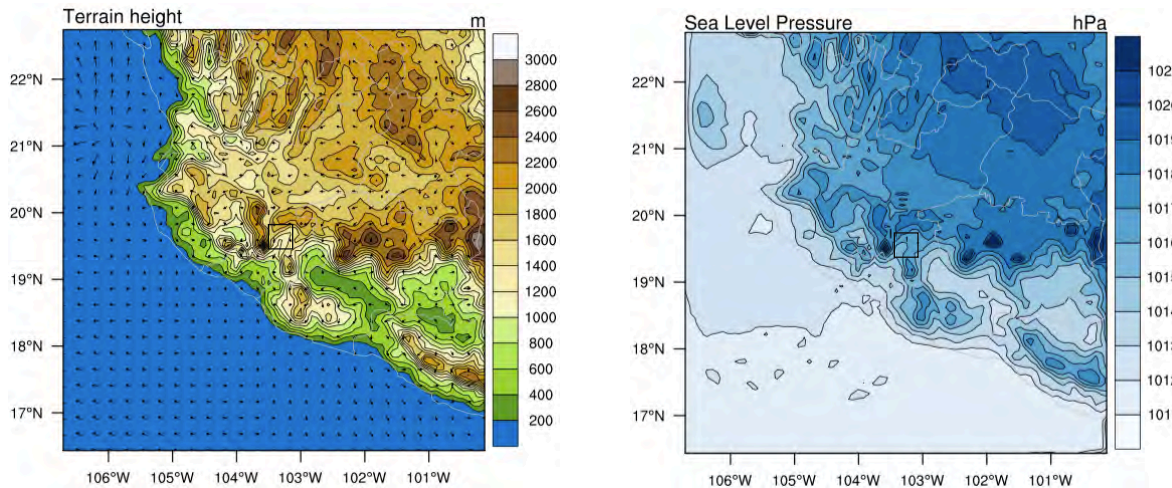


Figura 3.21 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo.

Los cortes verticales indican un avance de una masa de aire húmedo del Pacífico con valores de hasta 90%. En la zona superior, cerca de los 7 km entra en contacto con una masa de aire seco (20%) y temperatura de -20°C . En la zona del evento, este contraste está por encima de los 5 km desde la superficie (fig. 3.22b). Misma diferencia se ve en el corte a transversal con una cuña de aire seco que se introduce entre zonas de aire más húmedo (80%), llegando muy cerca de los 2.5 km sobre la superficie dicha interacción (fig. 3.22a).

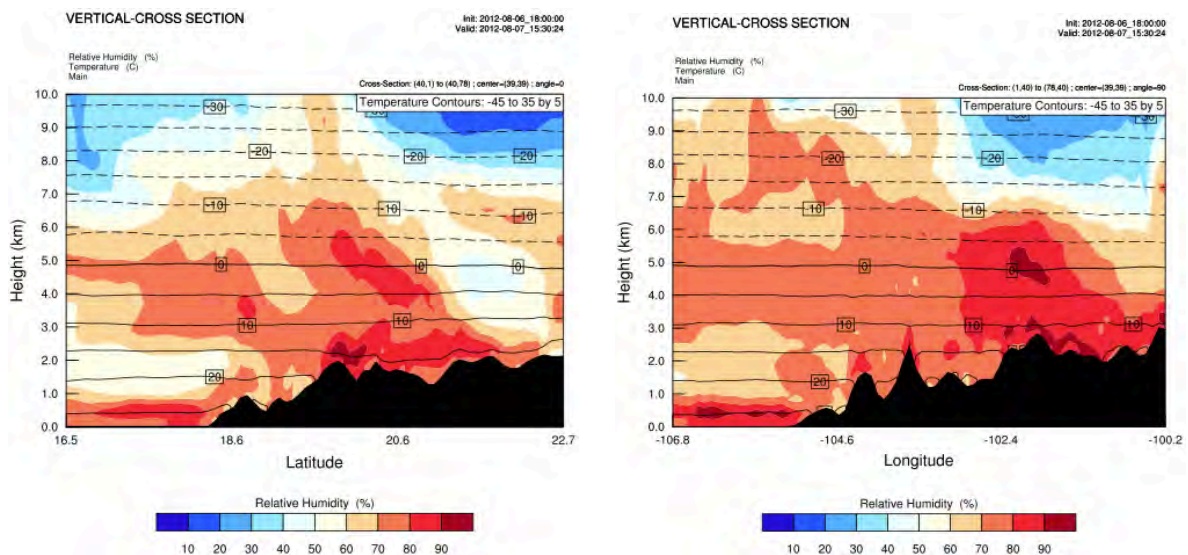


Figura 3.22 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante.

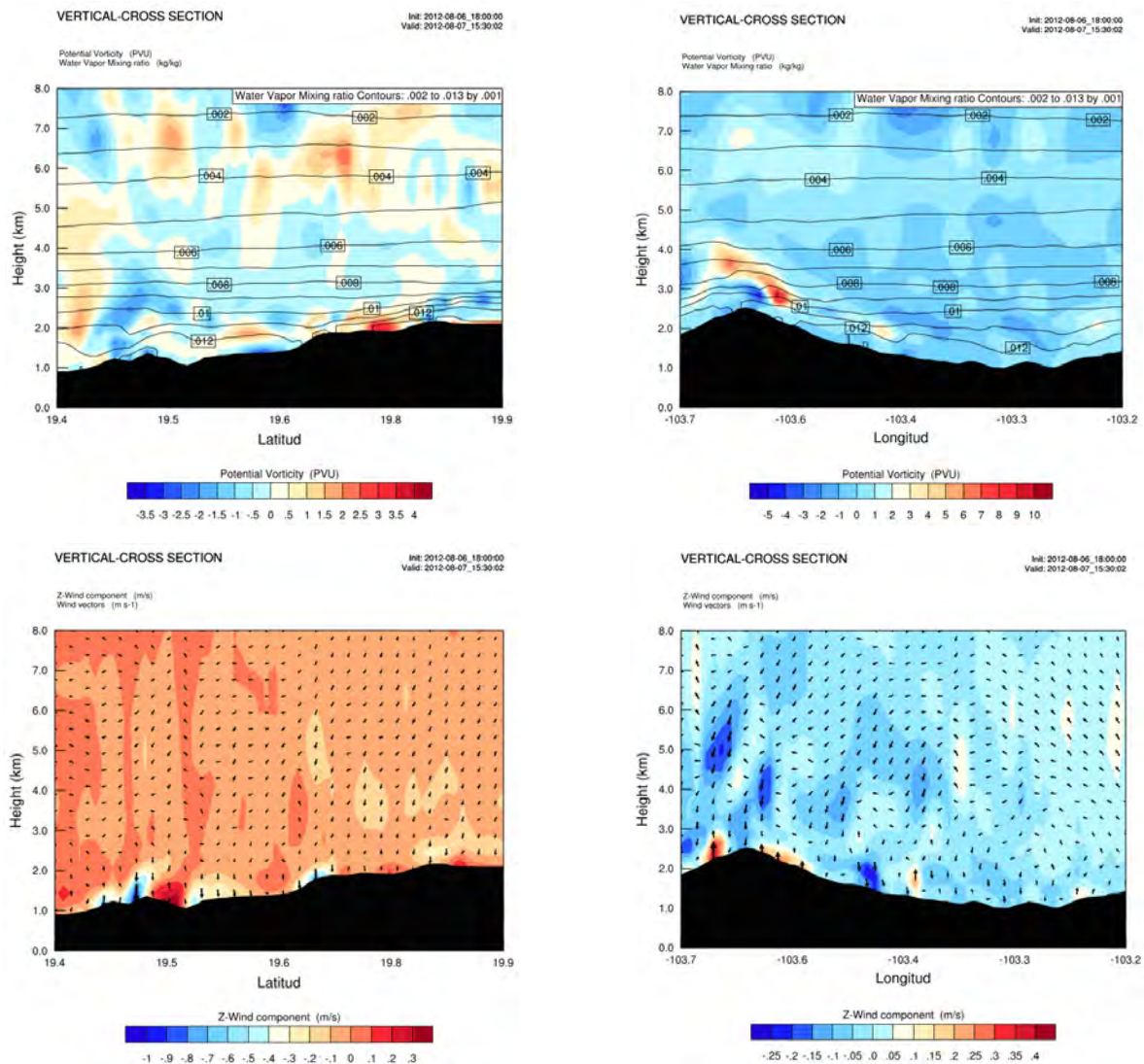


Figura 3.23 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3.

Para el dominio en alta resolución (D3) se distinguen zonas de contraste de vorticidad potencial que varían en función de la altura (fig. 3.23a). Zonas con valores altos se separan unos cuantos kilómetros por las zonas de montaña (fig. 3.23b). La distribución de vorticidad potencial en la vertical indicaría zonas donde el aire está rotando en las tres dimensiones. Por su parte, el vapor de agua en porción de mezcla se mantiene en valores de 0.012 kg/kg en ambos casos y no muestra variaciones considerables en zonas cercanas a la región de estudio.

La velocidad del viento en la vertical junto con los vectores indican zonas de convergencia, provocando corrientes ascendentes justo en la zona del fenómeno

(fig. 3.23b). Dichas corrientes descienden paralelamente a la región de montaña. En el corte transversal (fig. 3.23a) se observa la misma situación, con la diferencia que ahora cae unas centenas de metros desviadas del punto de ocurrencia del tornado. Dos zonas de corrientes descendientes que convergen provocando así el asenso de aire en entre ellas es visible.

3.3.4 Caso de la Sindicatura de Costa Rica y Villa Juárez, Navolato, Sinaloa

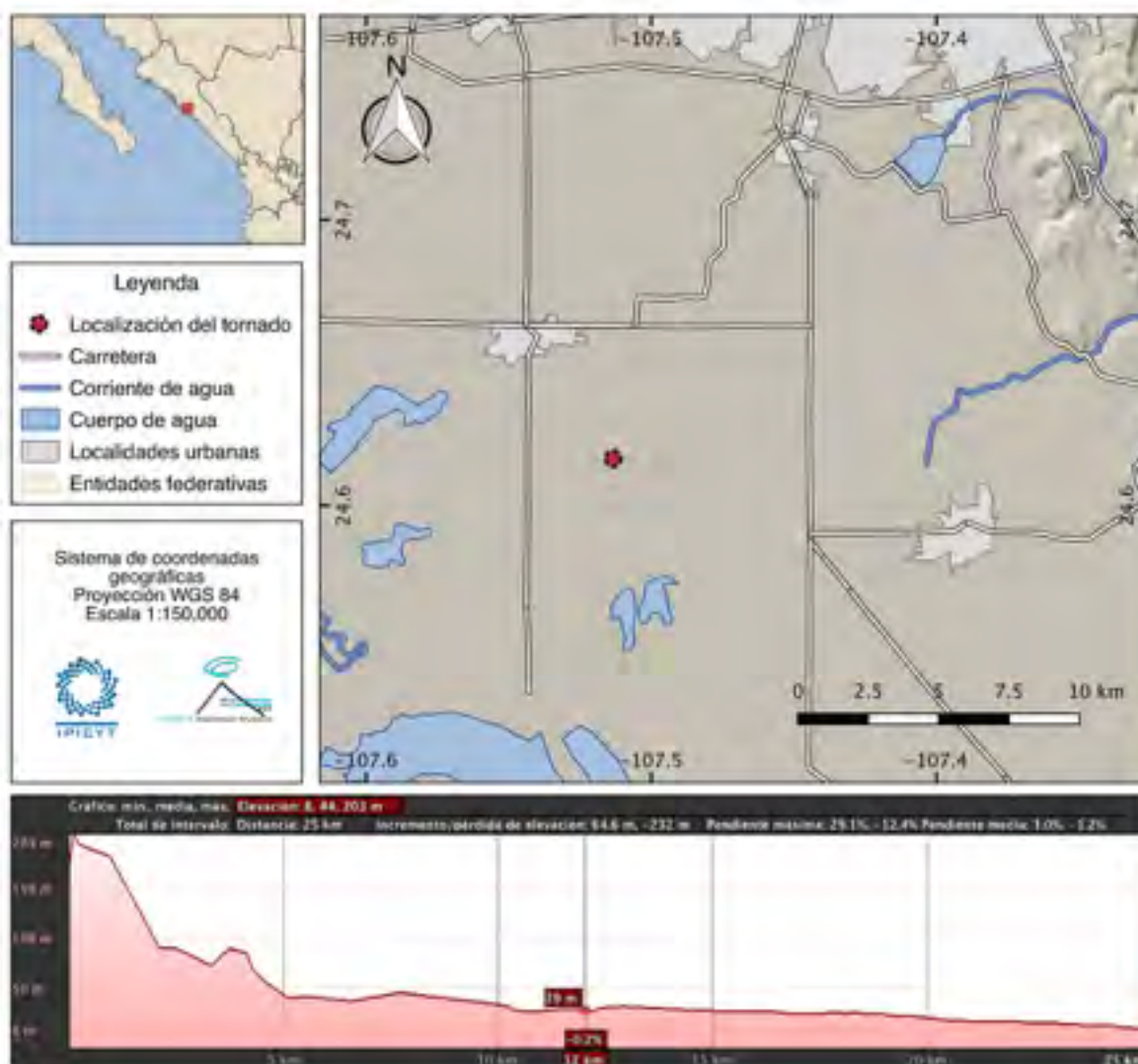


Figura 3.24 Mapa de ubicación del tornado de Navolato, Sinaloa.

Características generales

Fenómeno acontecido el 14 de septiembre del año 2012 cerca de las 18:30 horas. El tornado se dio entre las Sindicaturas de Costa Rica y Villa Juárez, en el municipio Navolato con límites con Culiacán, Sinaloa. El lugar exacto se señala entre los campos El Milagro y Los Melones. Se desconoce el punto de inicio del evento, pero se menciona que provenía desde el este de los campos mencionados con una dirección preferencial de este-oeste (**El Debate, 2012**).

Con respecto a los daños, árboles arrancados de raíz y averías a la infraestructura de las empresas son indicados. Además de los daños a las bodegas, se registró el desprendimiento del techo de lámina de un gallinero, mismo que fue encontrado a 300 m de su origen (**Noroeste, 2012**). Otros reportes señalan que animales de granja como vacas y chivos fueron levantados del suelo por la fuerza del viento (**Por Todos Los Medios, 2012**). Se reportaron un total de cuatro lesionados, mismos que fueron trasladados a un hospital en Culiacán (**Noroeste, 2012**).

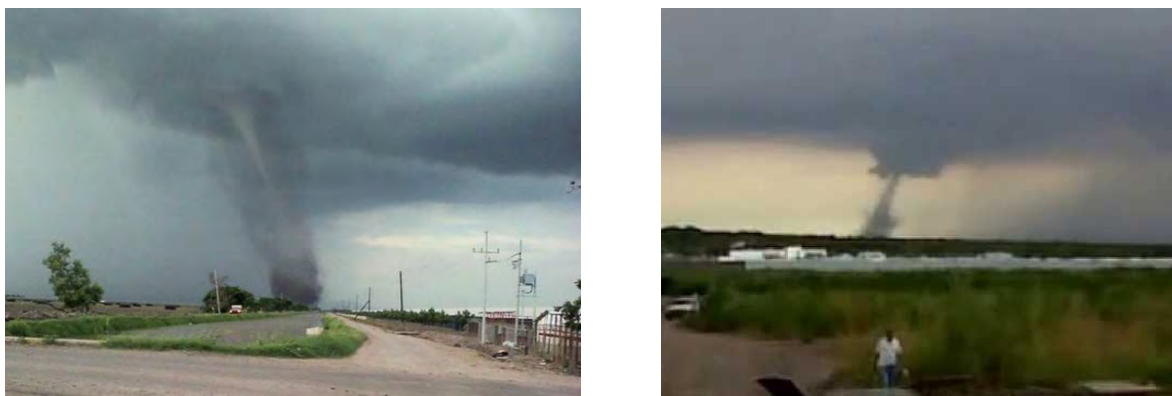


Figura 3.25 Fotografías del evento.

Fuente: <http://193.47.76.62/eldebate/noticias/?IdArt=12480907&IdCat=12302>

Condiciones sinópticas

Para las 09:00 horas del 14 de septiembre, la imagen interpretada del SMN (**2012g**) marcaba la presencia de la T.T. Kristy en el Pacífico, localizándose al suroeste de Baja California Sur, misma que originaba nublados con lluvias fuertes a muy fuertes en B.C.S., Sinaloa, Nayarit, Jalisco y Colima. Además, el Frente Frío (F.F.) No. 2 se

localizaba al noreste del país. Un canal de baja presión se extendía desde el noroeste hasta el centro de la república y favorecía nublados con lluvias fuertes a lo largo de la Sierra Madre Occidental.

Para las 15:00 horas el SMN (2012h) mantenía el reporte de potencial de lluvias fuertes a muy fuertes en la zona sobre la que tres horas y treinta minutos después tuvo lugar el tornado. La T.T. Kristy seguía su circulación y provocaba una amplia zona de inestabilidad. El F.F. No. 2 avanzaba hacia el sureste en la zona norte de México. Una línea de vaguada extendida a lo largo de la Sierra Madre Occidental hasta la Mesa Central favorecía la presencia de nublados, chubascos y tormentas a lo largo de su eje. Se observaban umbrales de tiempo severo en el norte, noroeste, occidente, sur y sureste del país con un índice de CAPE de 3000 a 4500 J/kg.

A las 21:00 horas, pasada la formación del fenómeno, la línea de vaguada se había extendido hasta el occidente del país, cerca de las costas michoacanas. La T.T. Kristy seguía su camino en dirección sureste-noroeste, localizándose a 580 km de B.C.S. El F.F. no. 2 tomaba características de estacionario sobre el noreste del territorio nacional. El canal de baja presión se extendía desde el noroeste hasta el oriente de la Mesa Central (SMN, 2012i).

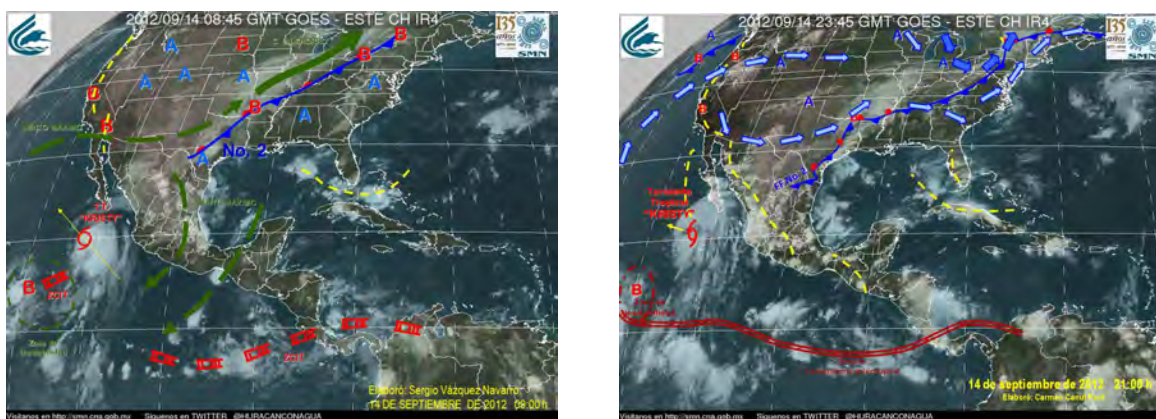


Figura 3.26 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 09:00 y 21:00 horas.

Simulación numérica

Las salidas del modelo señalan una temperatura media de 28°C en superficie a la hora del tornado (fig. 3.27a) y la entrada de calor del noroeste. En general las

condiciones de temperatura se muestran estables, sin gradientes térmicos cercanos. La humedad relativa (fig. 3.27b) mantiene valores aproximados al 60%. Una masa de aire húmedo del Pacífico entra por la zona centro de Sinaloa con valores de hasta 80%. Tal condición proyectaría nublados prominentes e incluso lluvia en zonas cercanas a la región de estudio.

Para la velocidad del viento en Z (fig. 3.27c) corrientes ascendentes de poco más de 0.05 m/s dominan la región. Zonas de convergencia y divergencia se observan en todo el borde oriental del estado de Sinaloa. La vorticidad potencial (fig. 3.27d) se mantiene mayormente con valores nulos. Algunas zonas de contraste de PVU se alinean a las zonas montañosas del estado de Sinaloa.

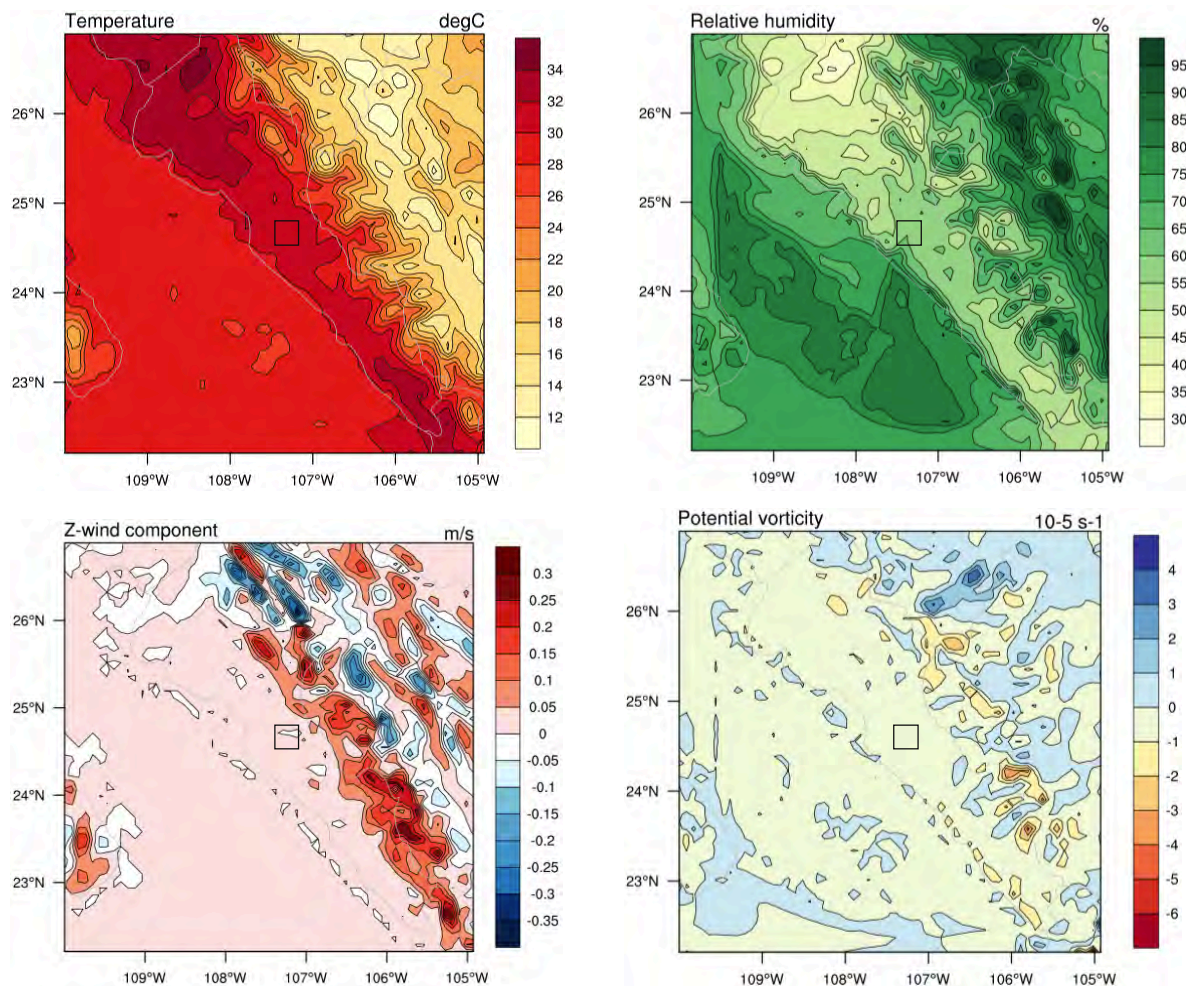


Figura 3.27 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo.

Para el caso de la topografía y los vectores de viento en superficie (fig. 3.28a), se observa la dirección de las corrientes oeste-este. Algunas zonas de convergencia se observan justo en la base de las montañas. El tornado se originó unos cuantos metros sobre el nivel del mar. La presión sobre el nivel del mar (fig. 3.28b) muestra un sistema de baja presión con unos 1011 hPa. Dicha situación favorecería nublados y condiciones de tormenta en la región. Si a esto se le suma la entrada de humedad y la convergencia en las zonas montañosas, se podría entonces hablar de la formación nubes de desarrollo vertical.

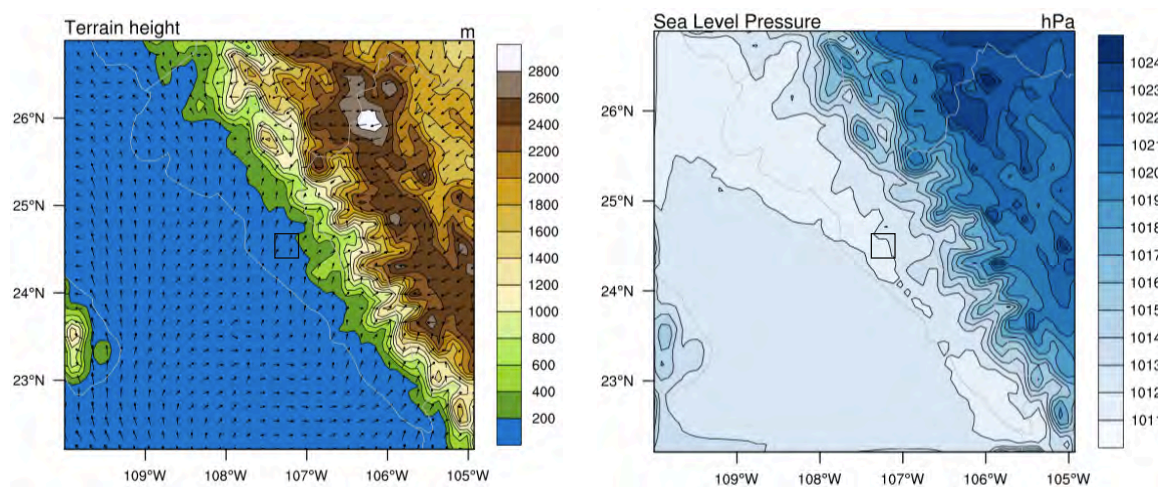


Figura 3.28 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo.

Los cortes verticales de terreno en D1 indican la entrada de humedad del Pacífico, que se extiende cerca de los 10 km en la vertical. Una temperatura promedio de 25°C cerca de la zona del tornado y un contraste de aire más seco (40%), entre dos zonas con altos valores de humedad (fig. 3.29a). En el corte a latitud constante (fig. 3.29b), una interacción similar se observa con valores de humedad relativa entre el 50% y 80%. La temperatura se mantiene en general con cambios constantes, disminuyendo su valor conforme la altura aumenta. La condiciones representadas en la salidas del modelo sugieren zonas de convección e inestabilidad bastante fuertes en las zonas cercanas al tornado. La línea seca que se extendía bordeando el Pacífico podría ser la causante de dichas condiciones.

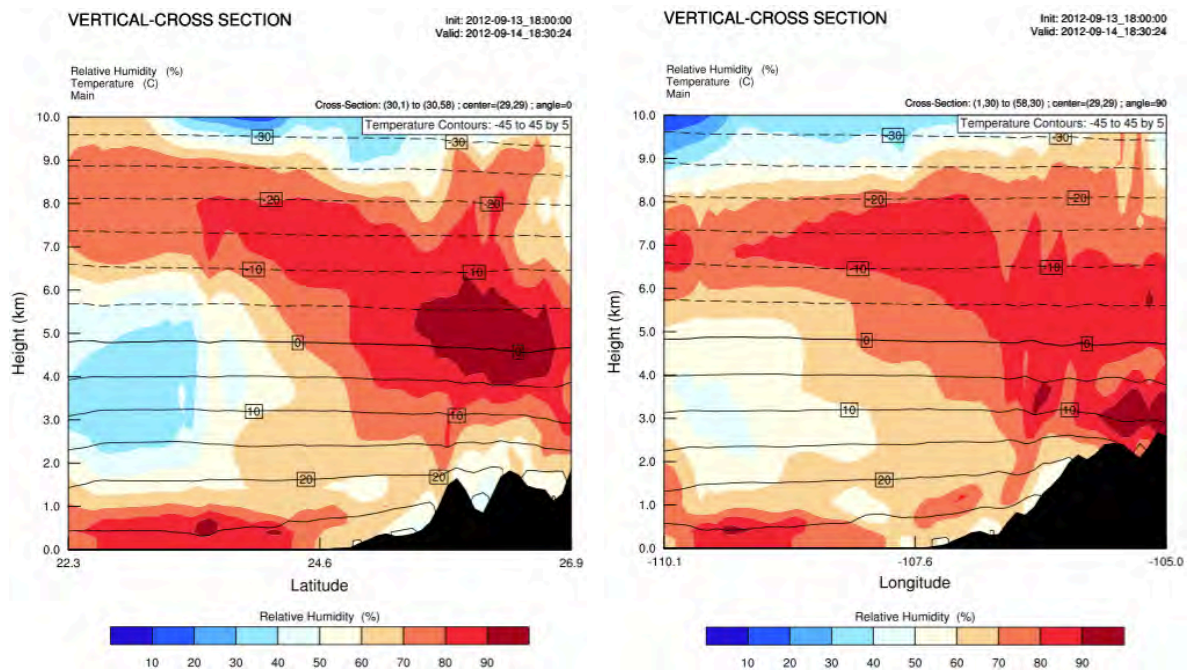


Figura 3.29 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante.

El corte de terreno en alta resolución (D3) muestra la zona donde se produjo el evento como totalmente plana. Una altura promedio de unas cuantas decenas de metros sobre el nivel del mar y con pocas variaciones orográficas (3.30b). La vorticidad potencial demuestra zonas de contraste bastante fuertes, entre los 1.6 y -1.2 PVU en los primeros 2 km en la vertical, y un tanto más marcadas en el corte a longitud constante (fig. 3.30a). Para el caso de el vapor de agua en porción de mezcla se observa un pico de valores en la zona de ocurrencia (fig. 3.30b) del tornado, con variaciones entre los 0.017 y 0.01 kg/kg.

Para el caso de la velocidad del viento en Z, se observan como regiones de corrientes descendentes dominan la zona. Se pueden observar además franjas de convergencia que se alzan hasta 1 km de altura provocando corrientes ascendentes, alejadas unos cuantos kilómetros de la ubicación del tornado (fig. 3.30d). En el corte a longitud constante el mismo caso, no obstante aparece una zona bastante amplia de corrientes descendentes que se eleva hasta los 5 km de altura (fig. 3.30c). Otras tres zonas de corrientes ascendentes se distinguen. Esto indicaría zonas de inestabilidad considerables.

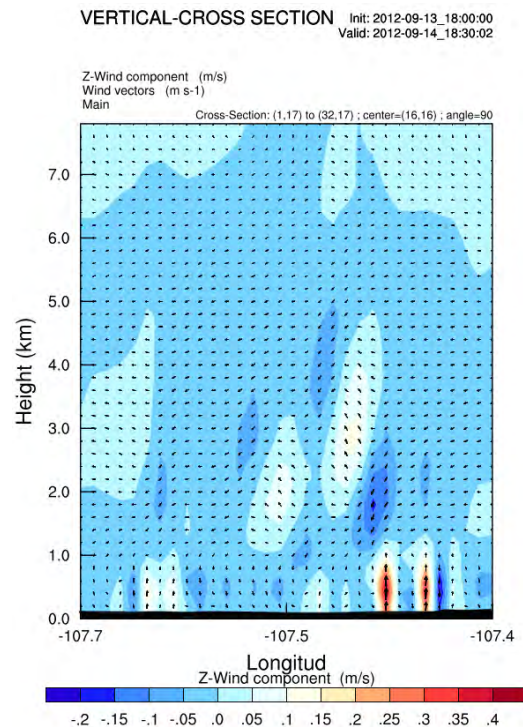
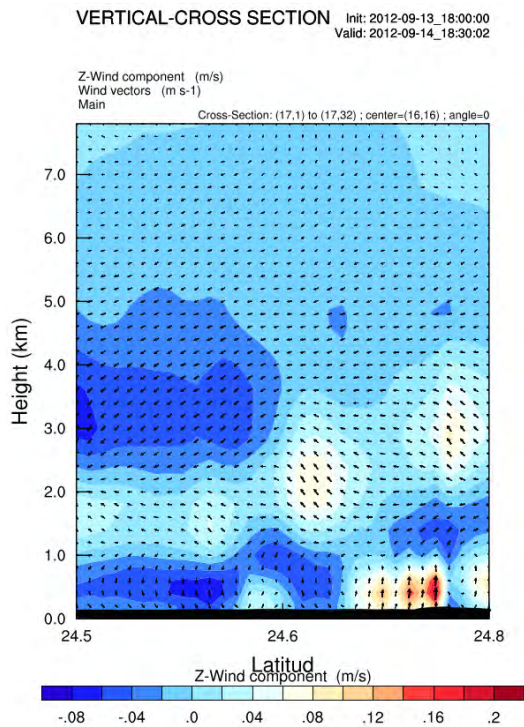
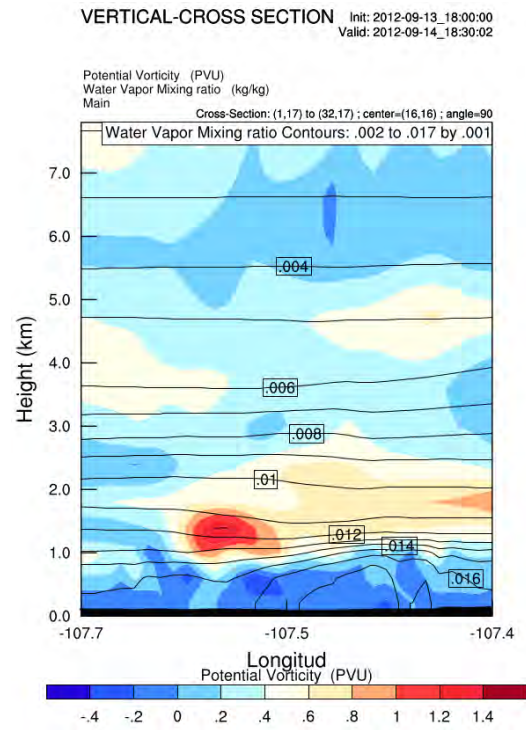
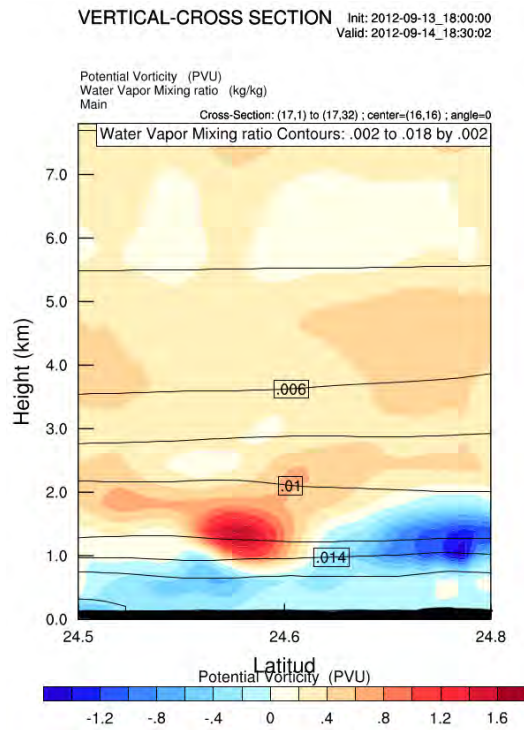


Figura 3.30 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3.

3.3.5 Caso del Lago de Yuriria, Yuriria, Guanajuato

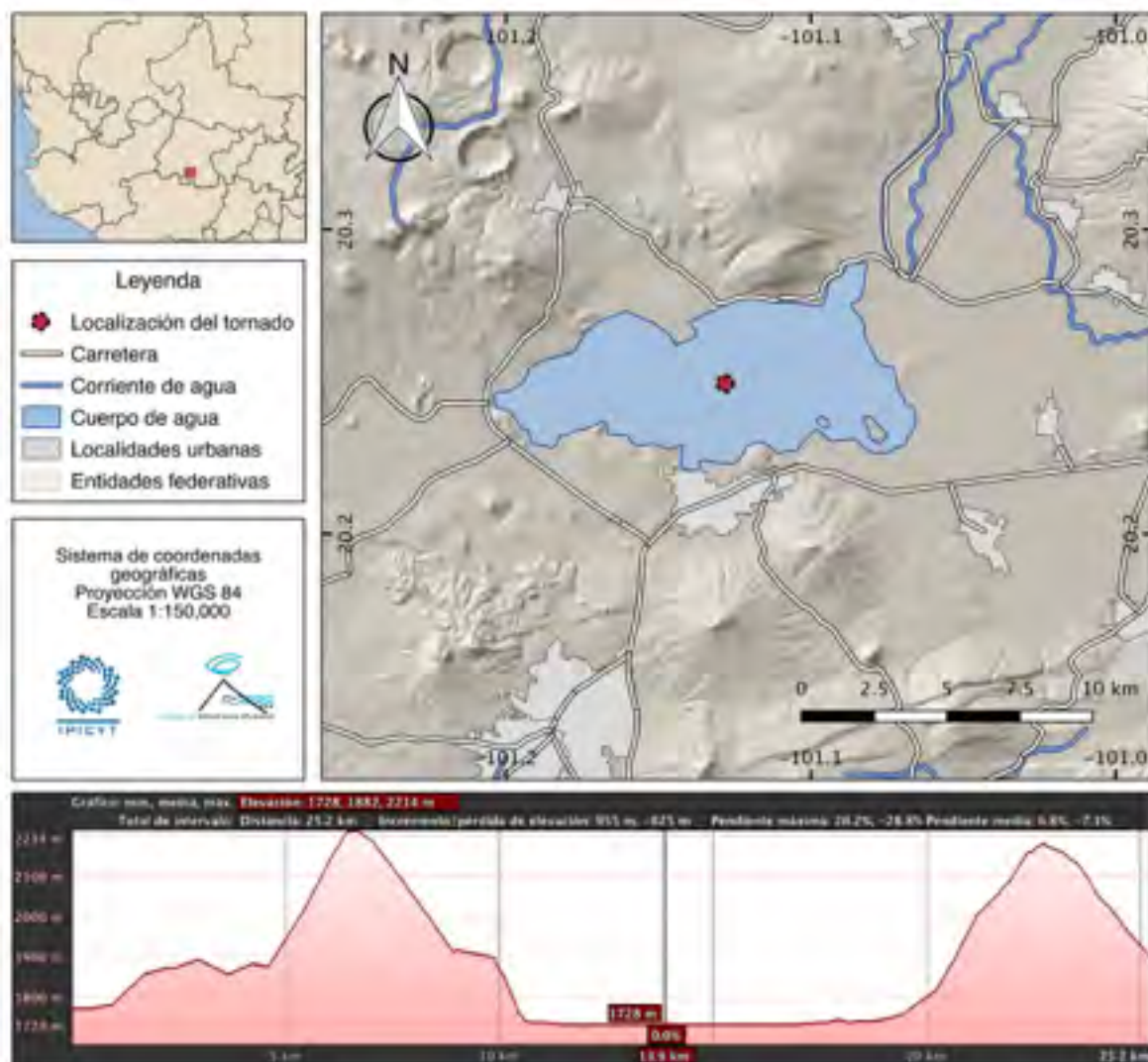


Figura 3.31 Mapa de ubicación del tornado de Yuriria, Guanajuato.

Características generales

Evento suscitado el 20 de julio del 2013 a las 19:00 horas sobre la Laguna de Yuriria, en Yuriria, Guanajuato. El evento ocurrió muy cerca de la comunidad de La Angostura, y fue observado desde todos los puntos que bordean a la laguna, incluso se menciona que fue visto desde el Valle de Santiago. Tuvo una duración aproximada de 35 minutos y se desconoce el recorrido. No ocasionó daños ni personas heridas (El Sol de León, 2013 y Televisa Regional, 2013).



Figura 3.32 Fotografías del evento.

Fuente: <http://organillero.net/tornado-sobre-la-laguna-de-yuriria/tromba-yuriria/>

Condiciones sinópticas

A las 07:00 horas del 20 de julio de 2013, el SMN (2013a) señalaba un canal de baja presión en el noroeste y Pacífico norte, mismo que favorecería nublados densos con lluvias fuertes en la zona. Un canal de baja presión se extendía desde el norte, hasta el occidente y centro, con mismas características de nublados y lluvias fuertes. Además, la O.T. No. 8 se movía en dirección este-oeste en el sureste mexicano. Para la zona de estudio, se pronosticaba lluvias fuertes, potencial de granizo y vientos del oeste de 20 a 35 km/h.

Para la emisión del boletín de las 12:00 horas se señalaba la entrada de humedad del Océano Pacífico y el Golfo de México hacia el interior del país, favoreciendo el incremento de nublados con potencial de tormentas sobre el occidente y centro de México. La O.T. No. 8 seguía su camino en la misma dirección (SMN, 2013b).

Para las 19:00 horas, aproximadamente a la hora de inicio del evento, el SMN mencionaba que la O.T. No. 8 ya se localizaba sobre las costas de Oaxaca. El canal de baja presión seguía extendiéndose hacia el sur provocando nublados densos. La entrada de humedad del Pacífico y Golfo de México seguía aportando componentes para el desarrollo de tormentas en el centro y occidente del país (SMN, 2013c).

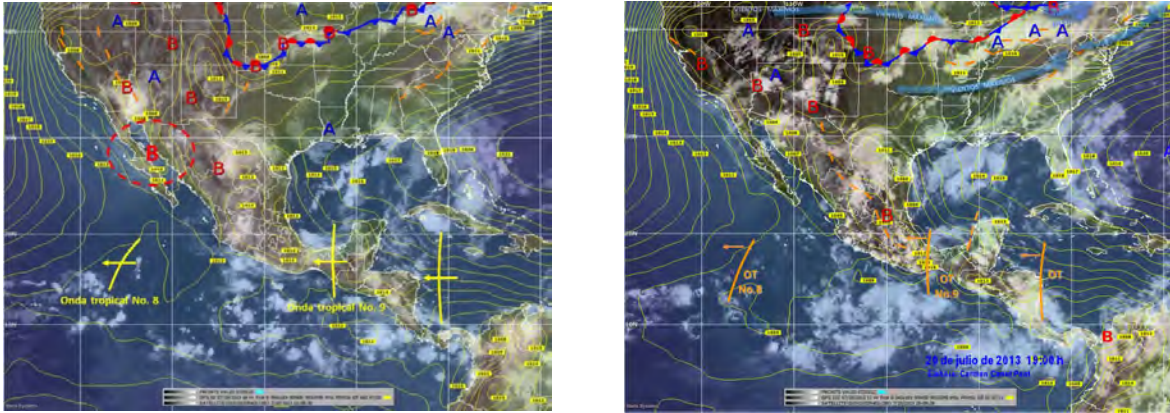


Figura 3.33 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas.

Simulación numérica

Los resultados del modelo arrojaron un temperatura media de 22°C al momento de presentarse el evento (fig. 3.34a). La franja central de temperatura se mantiene sin variaciones considerables a nivel del suelo, con valores entre los 12°C en zonas montañosas y 26°C en el valle. Se observa una ligera entrada de calor por la región este del dominio. Para el caso de humedad relativa (fig. 3.34b), se percibe un poco más del 64%, con variaciones leves a los costados de máximo 20%. La región de estudio se encuentra sobre una línea de contraste de valores altos y medios de humedad, que coinciden las bajas temperaturas y zonas elevadas, por lo que podría inducirse son zonas montañosas con bastante vegetación.

La componente vertical del viento (fig. 3.34c) muestra un dominio caracterizado por corrientes descendentes. En la zona del fenómeno se observa una región con corrientes descendentes mayores a los 0.12 m/s. A los costados del dominio y sobre las montañas se observan zonas de divergencia que provocaría corrientes que descienden con bastante velocidad y se dirigen hacia el norte, donde fue registrado el evento. Por otro lado, la vorticidad potencial (3.34d) se muestra con valores nulos en la mayor parte de dominio, aunque resalta una zona con valores positivos (de 1 PVU) justo en la región de Yuriria, lo que indicaría una tendencia a rotar del viento. Las condiciones sugieren potencial de lluvias y leves zonas de inestabilidad en la zona del tornado, y bastante más marcadas conforme se avanza la zona sur del dominio, donde zonas montañosas son las dominantes.

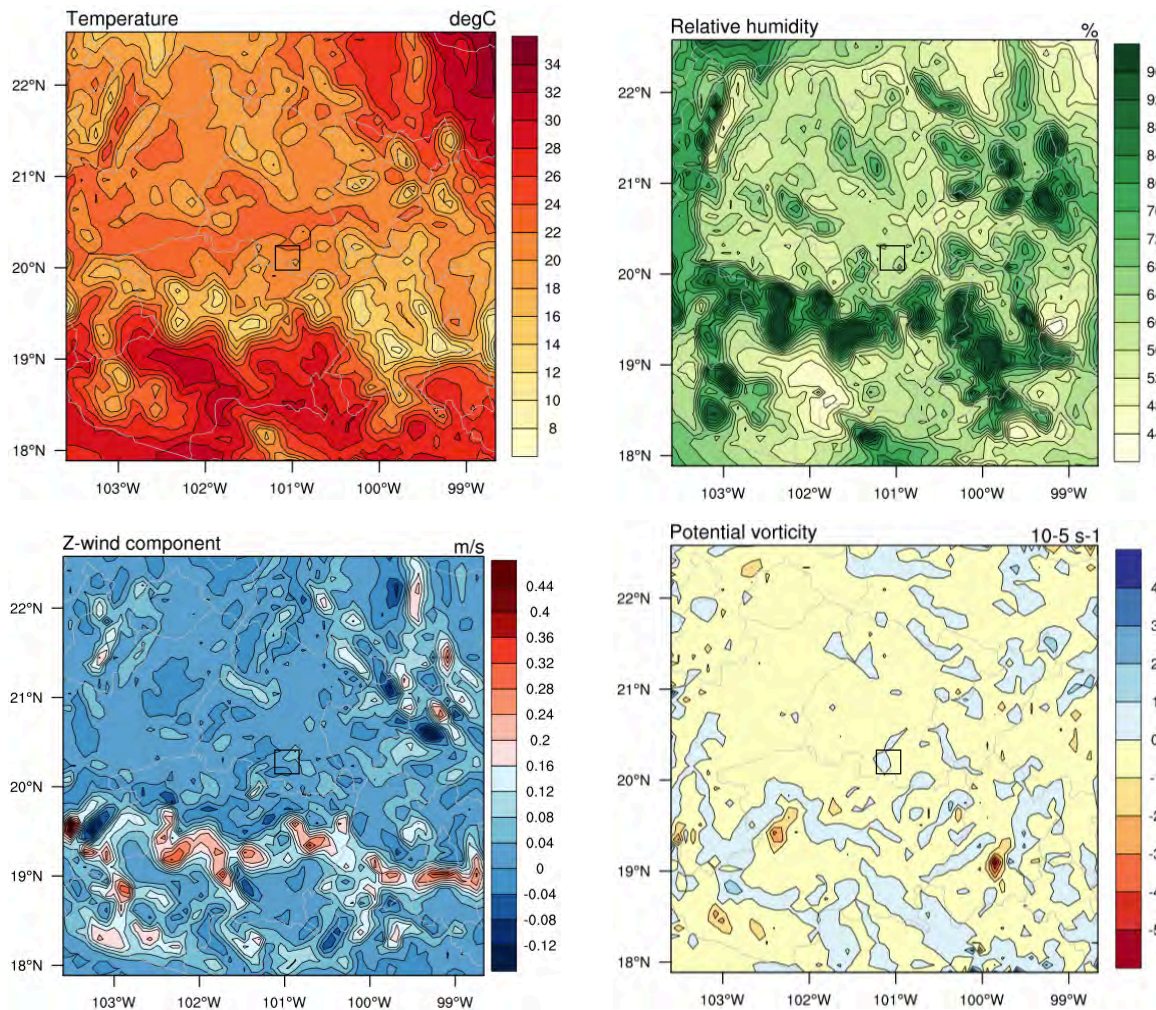


Figura 3.34 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo.

La presión a nivel del mar (fig. 3.35a) muestra en la zona de estudio valores entre 1015 y 1017 hPa. Valores intermedios de presión dominan en su mayoría, y una ligera extensión de la baja presión se aproxima desde el oeste. Los vectores de viento (fig. 3.35a) indican como las corrientes son dirigidas desde el valle en la zona sur del dominio, pasando entre dos zonas de mayor altitud y provocando la divergencia de la misma justo en la región de Yuriria. Además se puede distinguir que es cerca de los 2000 msnm la altura sobre la que se da el tornado.

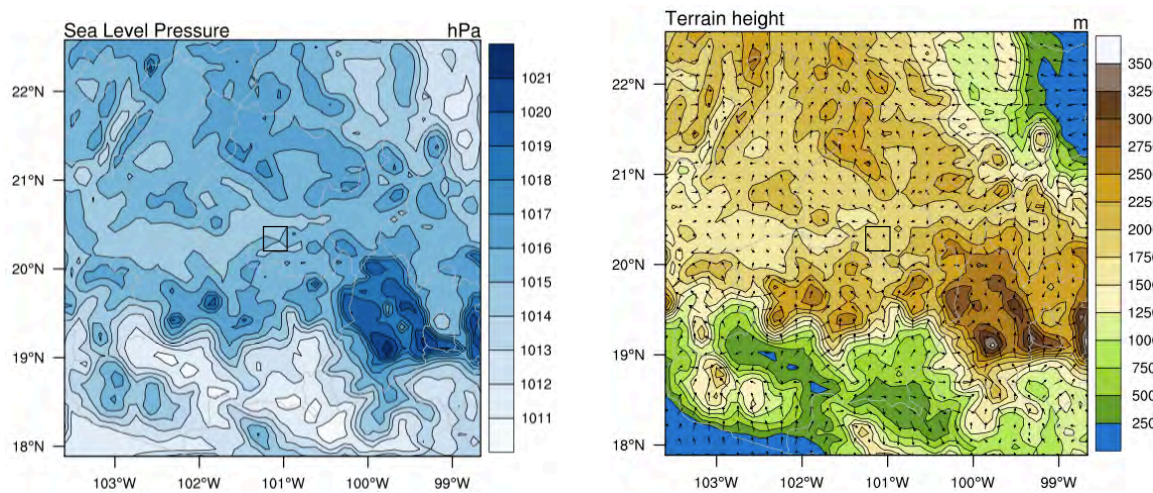


Figura 3.35 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo.

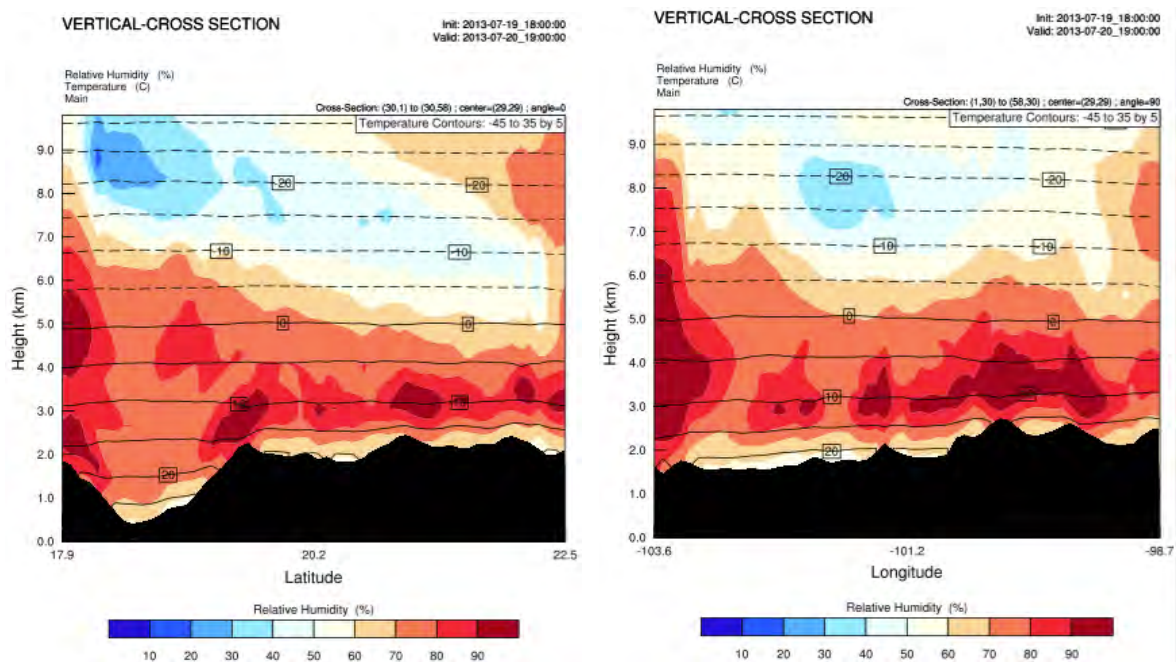


Figura 3.36 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante.

El corte vertical de terreno en D1 reproduce la entrada de humedad (80% y 90%) y un claro contacto con una masa de aire seco a partir de los 5 km y que se extiende paralelamente a la orografía. En la zona del tornado los valores son cerca del 80% lo que indica muy posiblemente lluvia (fig. 3.36b). El gradiente de temperatura no es tan marcado, sin embargo una característica interesante (y que

se ha venido repitiendo en diversos casos) es la presencia de una zona de contacto entre masas de aire con características de humedad desiguales, lo que es conocido como línea seca. Además, se observa como esta masa de aire más seco se va introduciendo en forma de cuña, característica importante en la introducción de sistemas frontales (fig. 3.36a).

El corte de terreno en el D3 para la vorticidad potencial indica zonas de contraste de vorticidad, intercaladas una con otra y con valores entre los 2 y -2.4 PVU (fig. 3.37b). La tendencia a rotar del viento presente sobre la Laguna de Yuriria, en este caso sería un indicador de inestabilidad atmosférica en los niveles bajos y hasta los 5 km de altura. Por su parte, los valores de vapor de agua en porción de mezcla, muestra un pico importante de hasta 0.012 kg/kg (fig. 3.37b) en la zona del tornado. Para el corte a longitud constante (fig. 3.37a) los contrastes no son tan marcados puntualmente, sin embargo se comporta como dos grandes secciones con características de rotación diferentes.

La velocidad del viento en la vertical junto con los vectores indican claras zonas de convergencia y divergencia en línea, provocando regiones de corrientes ascendentes y descendentes en la zona de la laguna. Dichas corrientes se alzan hasta los 3 km aproximadamente y son indicadores de celdas convectivas y manifestación de tiempo severo (fig. 3.37d). Las velocidades del viento en Z llegan a ser de hasta 0.5 m/s, y superando la barrera de los 3 km de altura estos valores de velocidad del viento se vuelven nulos. Otro de los cortes, a longitud constante, muestra al dominio con una tendencia a corrientes descendentes, y una clara zona de contraste (fig. 3.37c) muy cercana al borde de la zona montañosa. Lo anterior indicaría una mayor concentración de corrientes de aire, ya que alcanza velocidades de hasta 1.4 m/s en la vertical.

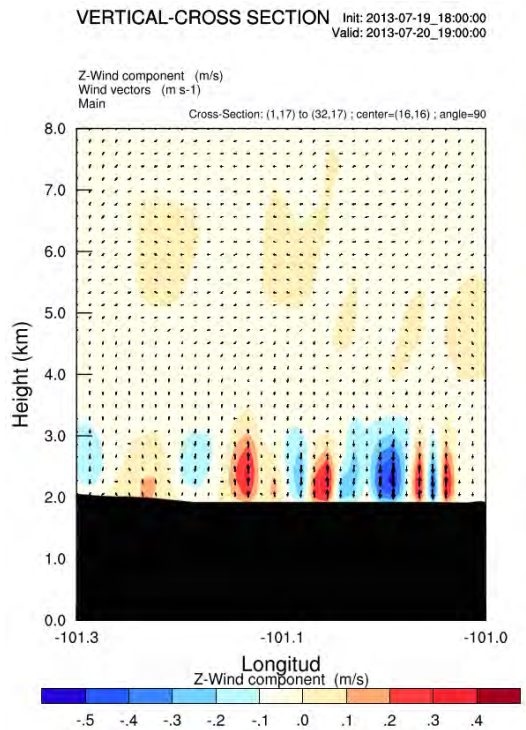
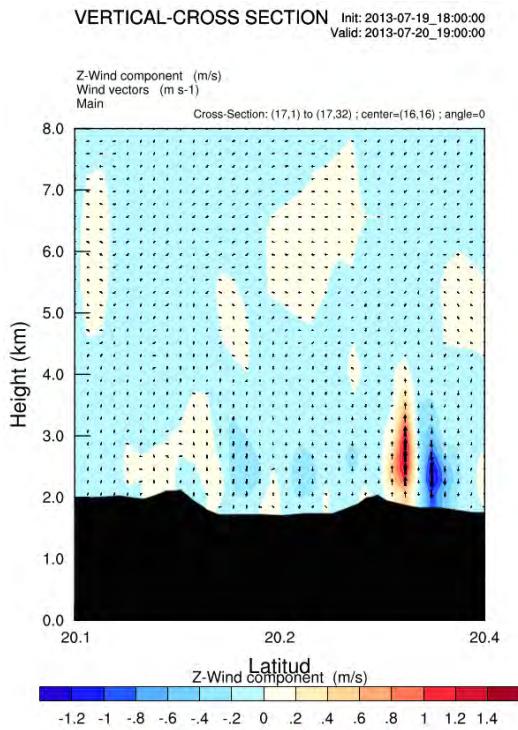
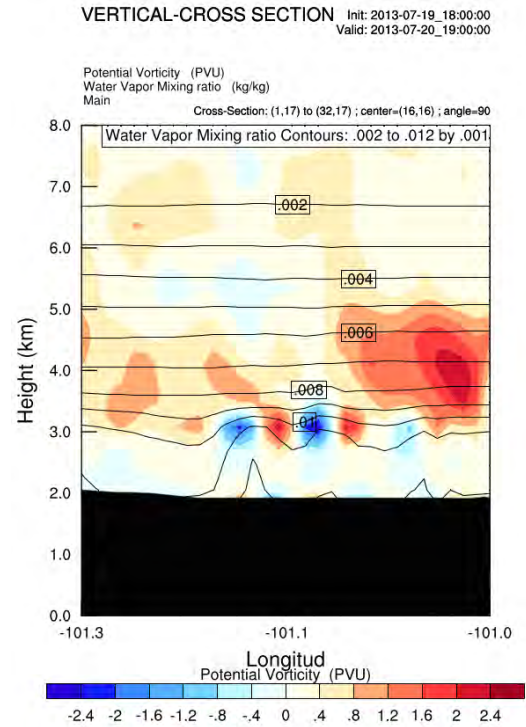
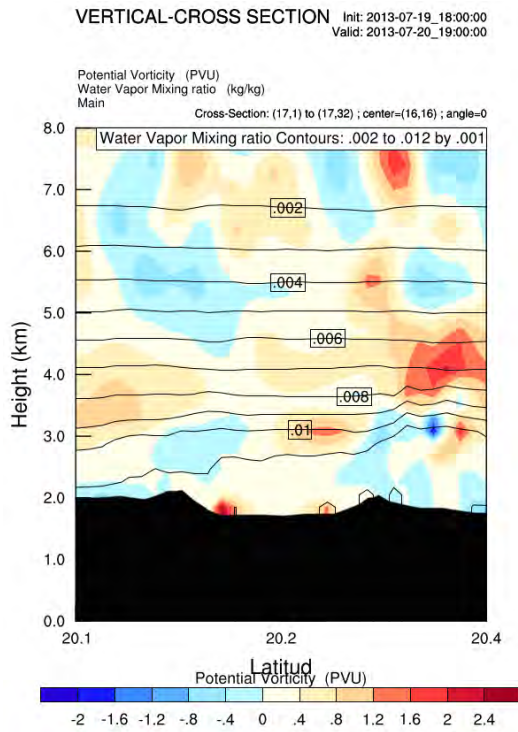


Figura 3.37 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3.

3.3.6 Caso de la Cabecera Municipal de Ojinaga, Chihuahua

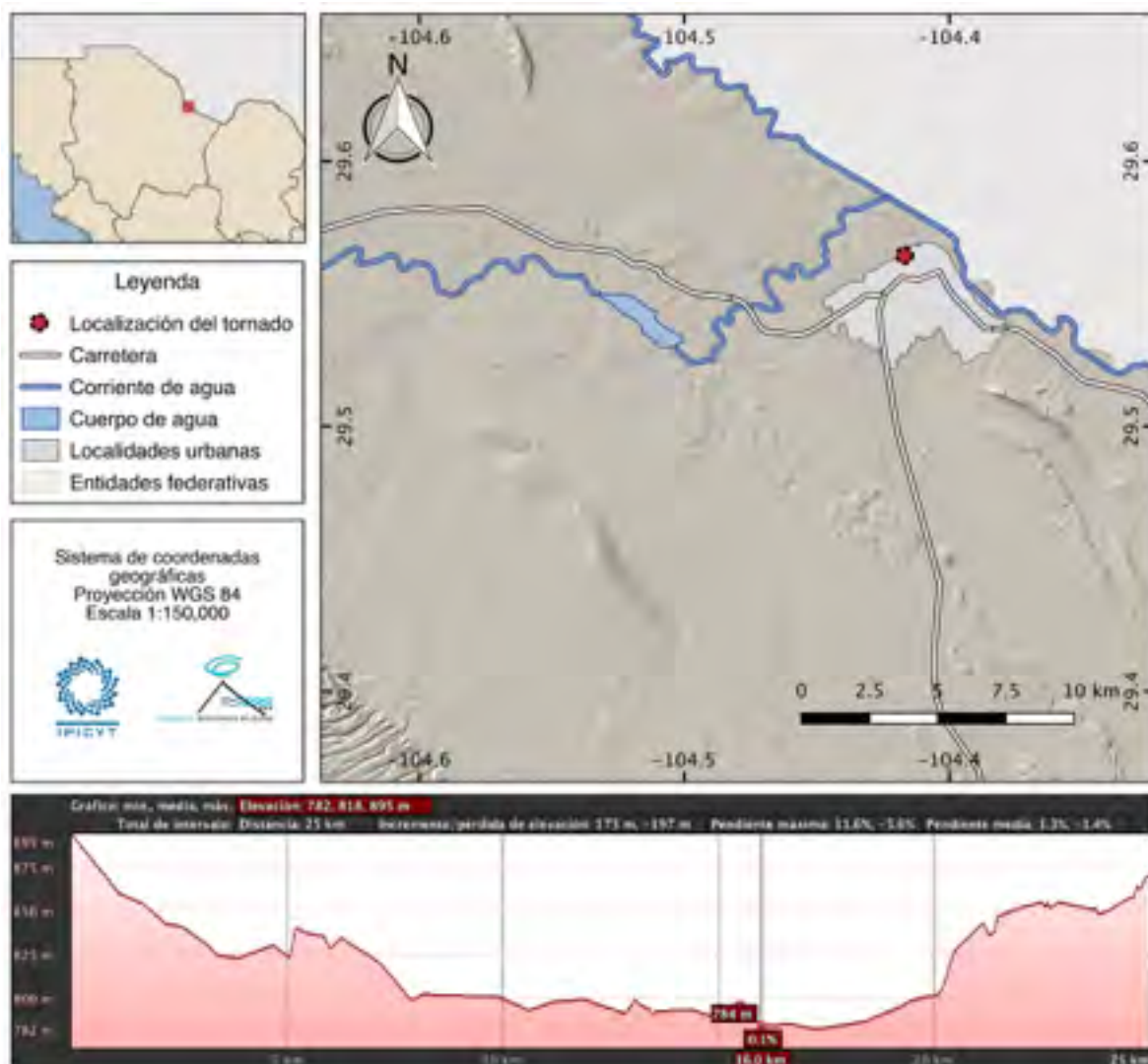


Figura 3.38 Mapa de ubicación del tornado de Ojinaga, Chihuahua.

Características generales

Fenómeno originado el día 26 de julio de 2013 a las 18:30 horas en la cabecera municipal de Ojinaga, Chihuahua. Afectó principalmente el norte de la mancha urbana, las colonias de Emiliano Zapata, Aeropuerto, Río Bravo y Las Lomas. Tuvo una duración aproximada de 15 minutos y rachas de viento calculadas en 150 km/h (DOF, 2013).

La dirección de desplazamiento fue este-oeste, aunque no se tiene total

certeza de la ruta trazada por el meteoro. Fueron alrededor de 110 viviendas dañadas (la mayoría por desprendimiento de techos) y cerca de 1600 personas afectadas, además de 400 hectáreas de zona agrícola dañadas. El nivel de daño fue tal que las autoridades federales declararon zona de desastre el 29 de julio del mismo año, activando así mecanismos de ajuste y apoyo para las personas afectadas (**DOF, 2013**).



Figura 3.39 Fotografías del evento.

Fuente: <http://chihuahuanoticias.com/?p=30116>

Condiciones sinópticas

Para las 07:00 horas del 23 de julio el SMN (**2013d**) señalaba un canal de baja presión que se extendía desde el norte al centro de México, lo que mantendría nublados con lluvias moderadas a fuertes. Además, el ingreso de humedad de ambos océanos favorecería condiciones de tormenta en el noroeste, noreste, occidente y la Península de Yucatán. Vientos máximos al norte de la zona estudiada y la presencia de una vaguada, eran también algunas de las características que se observaban en la interpretación de la imagen satelital.

En la discusión meteorológica de las 12:00 horas se indicaba el canal de baja presión iniciando en Chihuahua y extendiéndose por toda la Sierra Madre Occidental, asociándose con la entrada de aire marítimo tropical del Golfo de México y Océano Pacífico. Además, un sistema anticiclónico en los niveles altos de la atmósfera (300-200 hPa) se ubicaba al norte del país, lo que permitiría campos divergentes y originaba inestabilidad en niveles superiores, lo que reforzaba las lluvias en la región noroeste de México (**SMN, 2013e**).

A las 19:00 horas del mismo 26 de julio, justo media hora después del fenómeno, el canal de baja presión se mantenía. Además se observaba el avance del sistema frontal al sur de E.U.A., y colindaba con los estados de Chihuahua y Coahuila. Dichas condiciones favorecían la nubosidad con lluvias ligeras en la zona fronteriza e intervalos de chubascos con tormentas muy fuertes específicamente en Chihuahua (**SMN, 2013f**).

Para este caso en particular, el contraste entre el sistema frontal con sus características de aire frío y seco, y masas de aire un tanto más calientes y con humedad provenientes de ambos océanos y asociados al canal de baja presión, fue un importante detonador de condiciones de inestabilidad en la zona fronteriza de Ojinaga, y creó un escenario perfecto para la tornadogénesis. Misma interacción es normalmente observada en los casos de tornado del valle central de E.U.A.

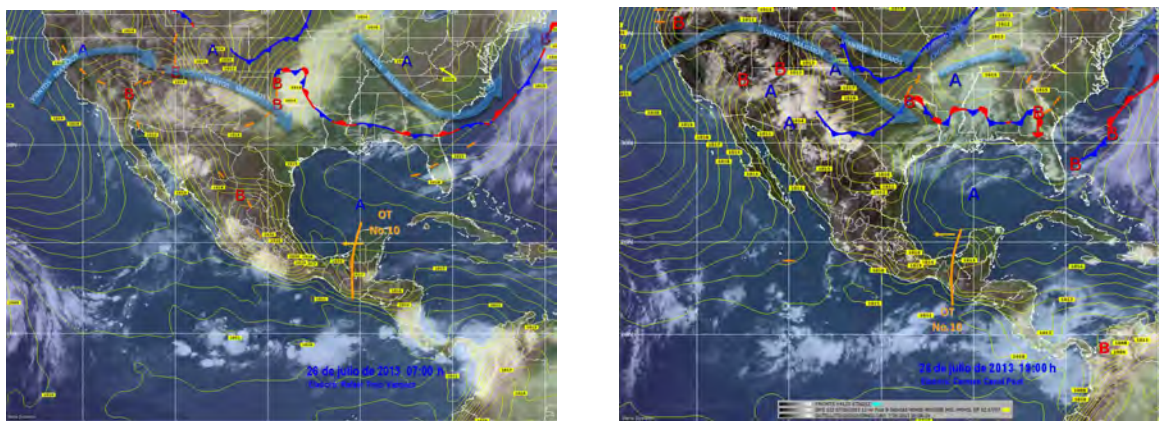


Figura 3.40 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas.

Simulación numérica

El modelo arrojó una temperatura media de 30°C en superficie al instante del evento (fig. 3.41a). Una región extendida a lo largo del valle se observa con temperaturas mayores. A los costados, un descenso de hasta 7°C induce a un gradiente térmico dentro de la zona de estudio. La humedad relativa (fig. 3.41b) indica una zona de entrada de humedad al noroeste del dominio, contrastando con zonas más secas (de entre 25% y 30%) y creando una zona de convergencia de humedad que se extiende en dirección noreste-suroeste. En la región de estudio, el valor medio de humedad es de 40% en superficie.

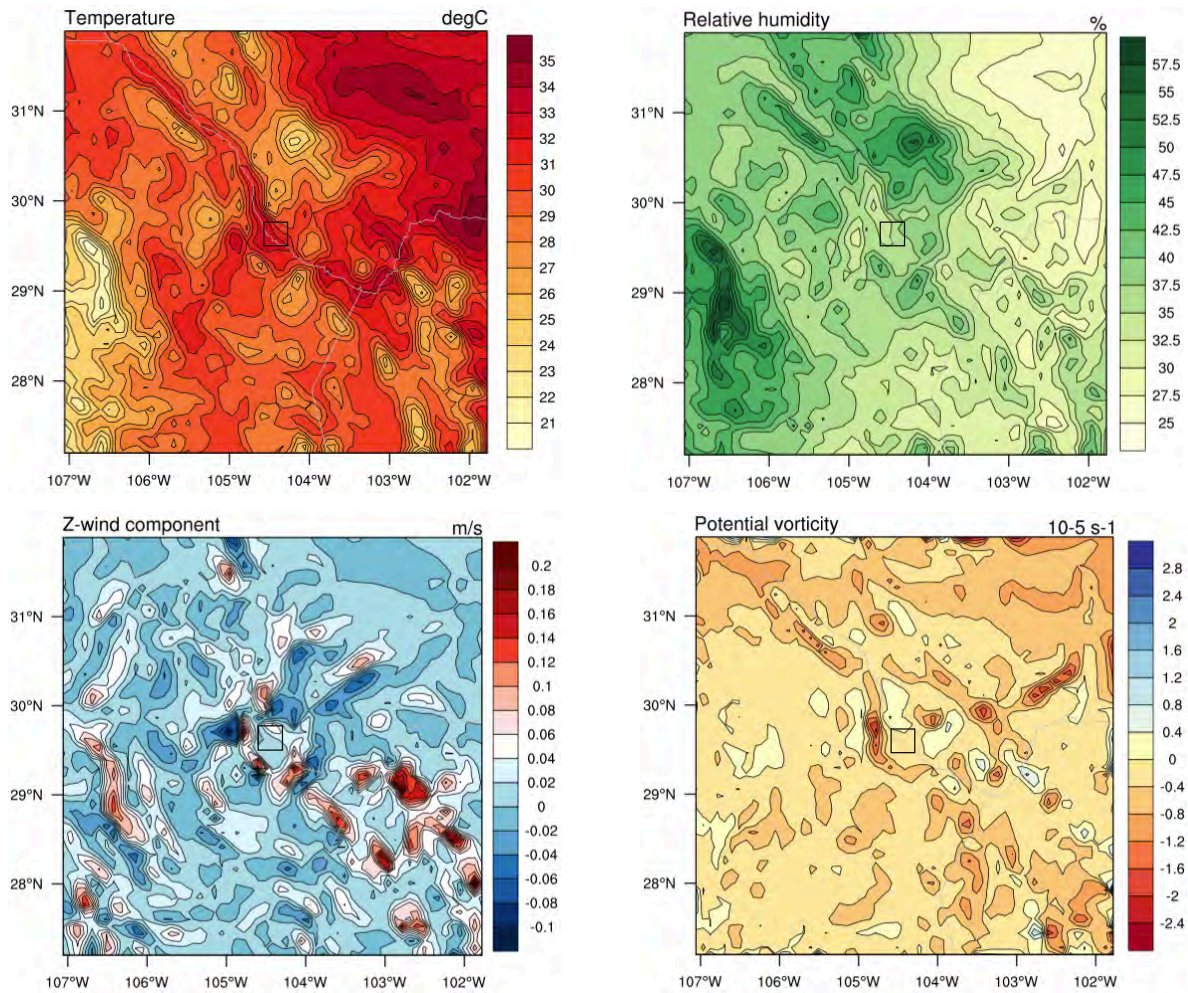


Figura 3.41 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo.

La velocidad del viento en la vertical (Z) (fig. 3.41c), indica regiones de corrientes ascendentes y descendentes bordeando la zona de estudio. Esto indicaría zonas de convección, favorecido por zonas de convergencia y divergencia en superficie, lo que indica inestabilidad y formación de tormentas. Las regiones de corrientes descendentes vienen desde la zona sur de los E.U.A. y justo en la región de Ojinaga se observa un choque entre estas y otras corrientes provenientes de la región centro de Chihuahua, lo que provocaría zonas diversas de corrientes ascendentes. Por otro lado, la vorticidad potencial (fig. 3.41d) muestra valores nulos en gran parte del dominio. Un extremo de estos valores se alza muy cerca de la zona de estudio, al oeste de Ojinaga con un promedio de -2 PVU. Otra zona muy

parecida se ubica al este de la región, lo que la ubica en zonas con vientos de tendencia a rotar.

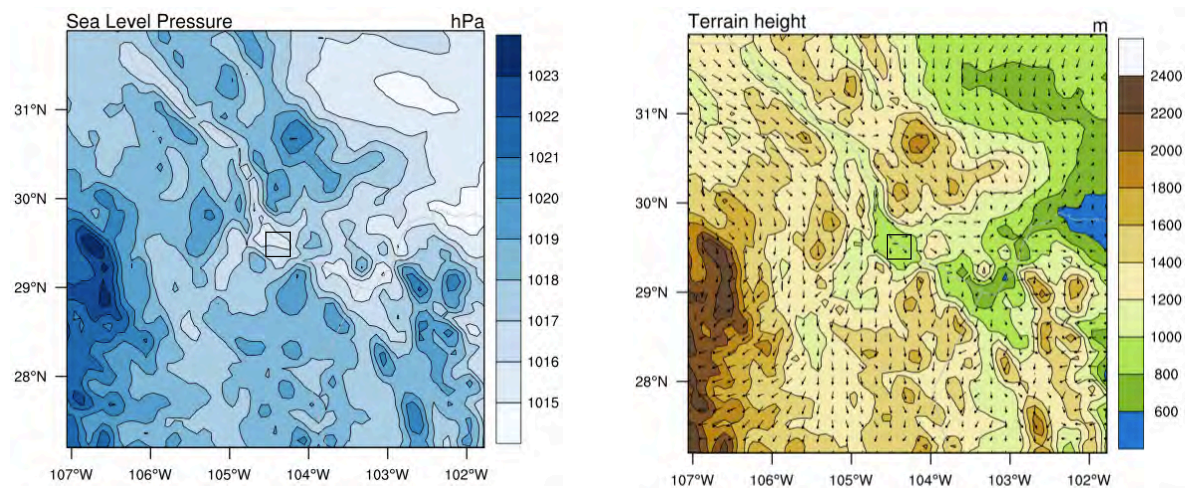


Figura 3.42 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo.

Para la presión a nivel del mar (fig. 3.42a) se percibe un claro centro de baja presión de 1015 hPa en la zona del tornado. Una línea de baja presión se ubica en dirección noreste-sur, y se pierde en la zona baja del dominio. Altas presiones de 1023 hPa al oeste y norte del dominio también son visibles. Con ayuda de la topografía se conoce que el tornado se desarrolló a una altura entre los 800 y 1000 msnm en una zona de valle, bordeado de zonas montañosas entre los 1600 y 1800 msnm. Los vectores de viento indican zonas de abanico de divergencia donde los vientos predominantes son del norte extendiéndose hacia el sur. Las montañas entre el valle funcionan como canalizadores del viento, creando las zonas de divergencia en superficie.

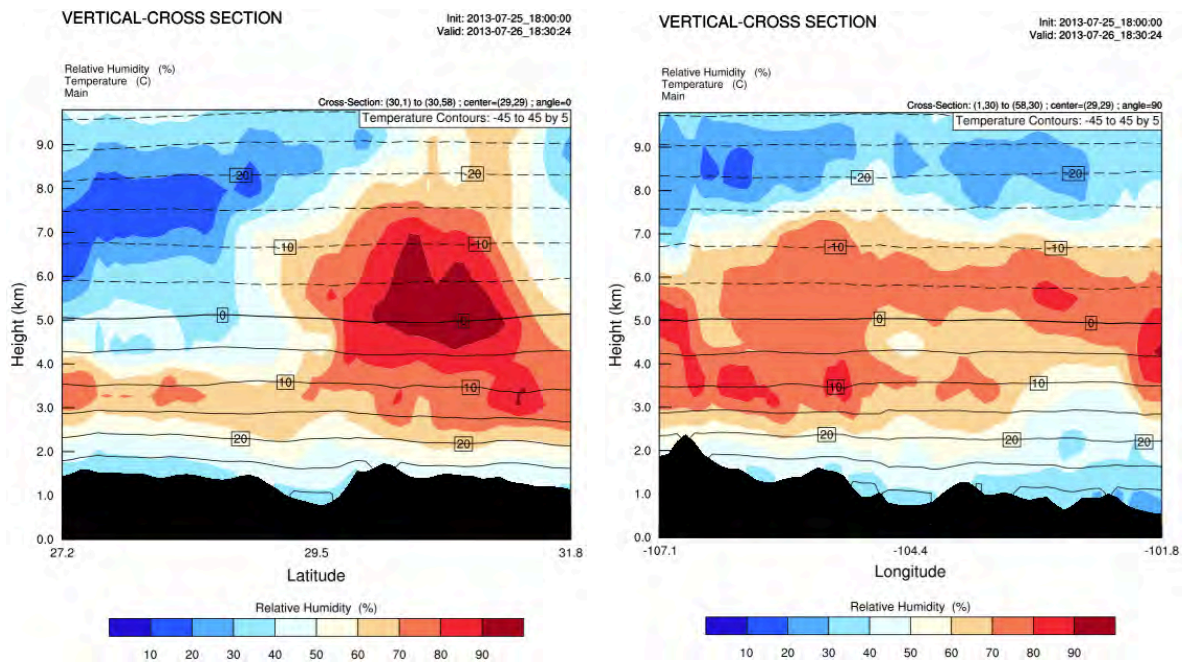


Figura 3.43 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante.

Para el corte de terreno a longitud constante (fig. 3.43a) se denota un claro contacto de masas de aire con diferentes características de humedad. Por un lado, una masa con valores entre los 80% y 90% contrastando con otra entre el 20% y 30%. El gradiente de humedad se da desde los 2 y hasta los 9 km en la vertical. El contacto entre estas masas se da justo sobre la zona del tornado. La temperatura por su parte se mantiene bastante regular, con oscilaciones entre los 30°C y 15°C en los primeros dos km por encima de la superficie.

El corte a latitud constante (fig. 3.43b) muestra una distribución uniforme de humedad. Una serie de franjas con valores altos en los primeros 7.5 km en la vertical y a partir de ahí una masa con características contrastantes se extiende en la misma dirección. Existe la posibilidad de que la masa de aire frío y seco, en esta dirección de corte en particular, apenas comenzara su intrusión por la región derecha del corte topográfico. Esto sería en forma de cuña, como comúnmente los sistemas frontales interactúan con masas cálidas.

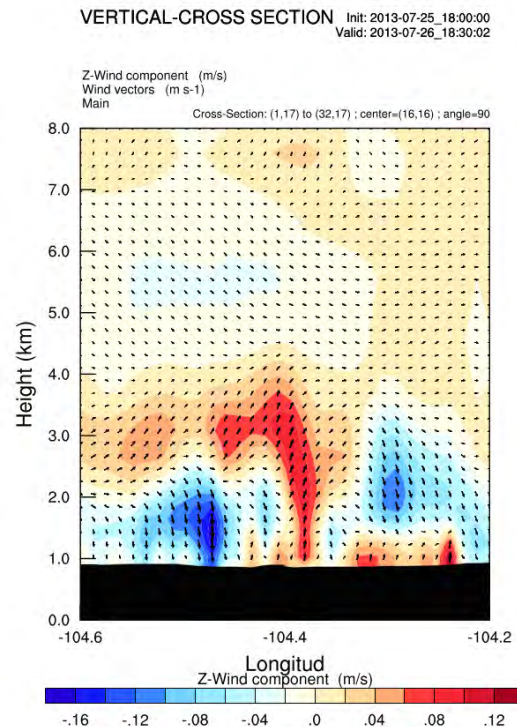
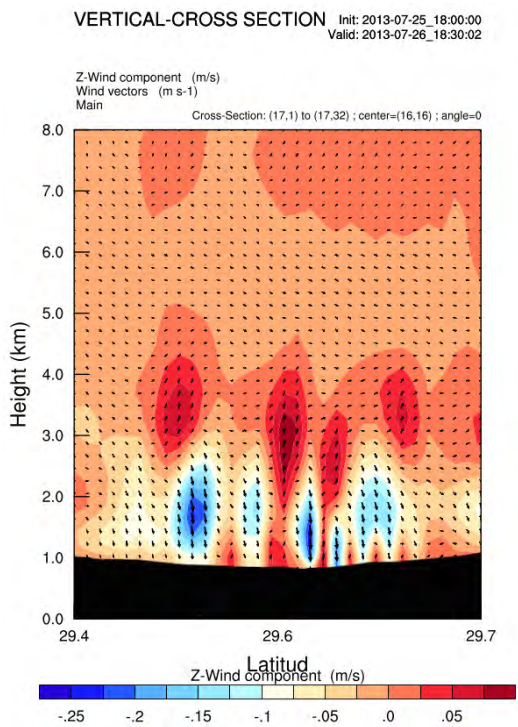
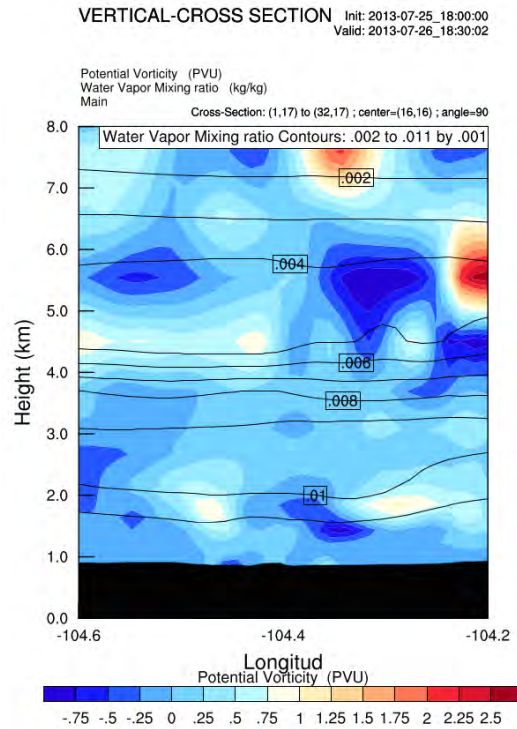
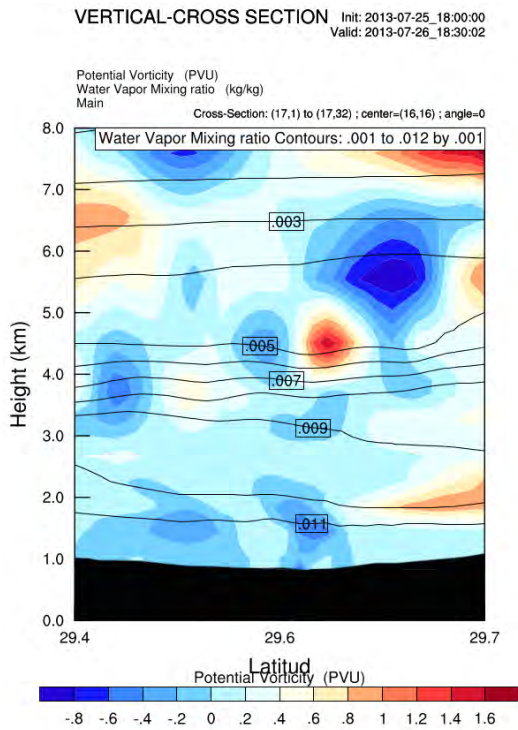


Figura 3.44 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3.

Para los cortes en alta resolución (D3), el modelo arroja valores 1.6 y -0.8 PVU (fig. 3.44a) que contrastan cerca de los 4 km de altura. Además, otra región de vorticidad potencial se puede observar en la parte superior de la atmósfera, aproximadamente a los 8km. A nivel del suelo, valores negativos van dominando (fig. 3.44b) con unos leves contrastes que indicarían el potencial de rotación del viento. Por otro lado, el vapor de agua en porción de mezcla se mantiene regular sin mostrar picos de caída o aumento cerca de la zona del tornado. Se alcanzan valores de 0.011 kg/kg (fig. 3.44a) y 0.01 kg/kg (fig. 3.44b) y una característica peculiar es una banda de aproximadamente 1 km donde este valor se mantiene relativamente constante.

Los cortes con vectores de viento y la velocidad del viento en la vertical son reveladores en este caso. En la zona del tornado se observan claras zonas de corrientes ascendentes con valores entre 0.05 m/s y descendentes de hasta 0.25 m/s. La región en general está dominada por la convergencia de corrientes y la formación de celdas convectivas que alcanzan cerca de 5 km de altura (fig. 3.44c). Para el siguiente corte (fig. 3.44d), el modelo reprodujo bastante bien una zona de ascenso de aire, desde la superficie y hasta los 4 km en la vertical. Esto no quiere decir que la banda reflejada en la gráfica sea el tornado mismo, pero sí la dinámica bajo la cual se dio. Las velocidades alcanzadas se calcularon en 0.11 m/s e indican una zona bastante interesante que coincide perfectamente con la ubicación del tornado.

La distribución de valores observados por las gráficas muestran claramente como este tornado en particular tuvo como factores principales en su formación el choque de masas de aire seco y frío con otra húmeda y caliente. La formación de celdas convectivas en superficie y la creación de celdas de tormenta con rotación. Las características que se tuvieron aquel día tuvieron como resultado la formación de un tornado supercelda, posiblemente mayor a EF2 en la Escala Fujita Mejorada, y que coincide perfectamente con el tipo de tornados que se dan en la región central de los E.U.A.

3.3.7 Caso de la Cabecera Municipal de Tangancícuaro, Michoacán

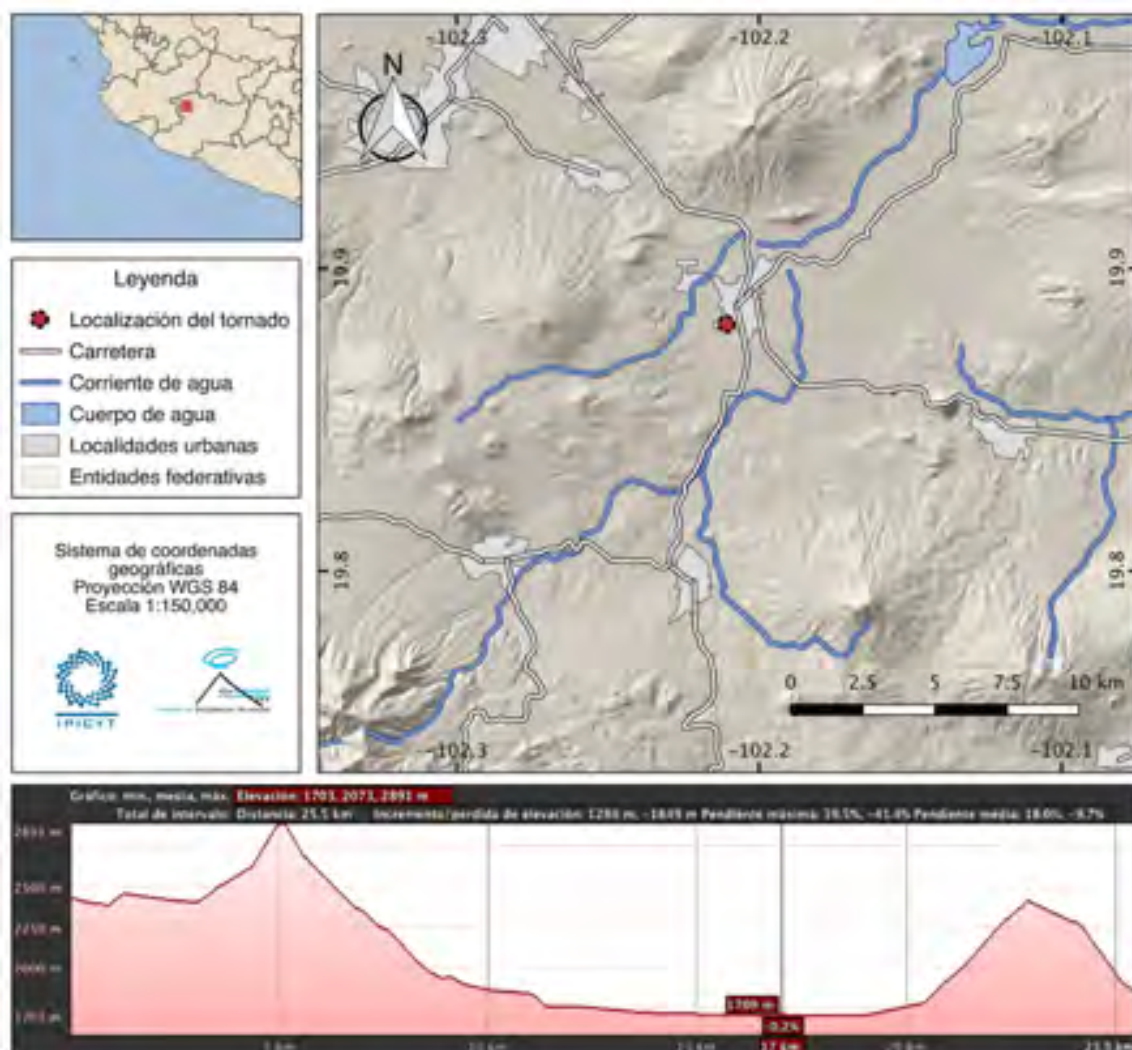


Figura 3.45 Mapa de ubicación del tornado de Tangancícuaro, Michoacán.

Características generales

Tornado ocurrido el 22 de marzo de 2014 cerca de las 17:00 horas en la Cabecera Municipal de Tangancícuaro, Michoacán. El recorrido del fenómeno se distribuye por las colonias de La Caña, Los Fresnos y Cupatziro, en la zona sur de la ciudad (**La Voz de Michoacán, 2014**). Tuvo una duración de poco más de 20 minutos según los testigos y una clasificación baja en la escala de Fujita según los meteorólogos de la zona (**El Cambio de Michoacán, 2014**).

Los daños se situaron en las colonias ya mencionadas. Se habla de un total

de 250 viviendas perjudicadas, una escuela secundaria y un jardín de niños. Además de averías en el cableado de energía eléctrica y postes telefónicos, árboles arrancados de raíz y vehículos dañados por proyectiles. Más de 10 hectáreas afectadas y daños a invernaderos. No se reportaron personas lesionadas, pero sí algunas con crisis nerviosa. Ningún deceso derivado del tornado fue reportado (**El Cambio de Michoacán, 2014**).



Figura 3.46 Fotografías del evento.

Fuente: <http://michoacantrespuntocero.com/tornado-azota-en-tangancicuaro-michoacan-videos/>

Meteorología sinóptica

Siendo las 07:00 horas del 22 de marzo el SMN (**2014a**) pronosticaba la entrada de humedad del Pacífico que favorecía el potencial de lluvias ligeras y actividad eléctrica en la zona occidente, centro y sur del país, además de chubascos moderados en Michoacán y Chiapas. Asimismo viento del oeste y suroeste en la zona del Pacífico Central de 20 a 35 km/h con rachas. Igualmente una vaguada se extendía desde el sur de Chihuahua hasta Michoacán y cruzaba muy cerca de la zona estudiada.

En su discusión meteorológica de las 12:00 horas, el SMN (**2014b**) mencionaba como fenómeno significativo la entrada de humedad del Océano Pacífico. Para la zona norte del país el Sistema Frontal (S.F.) No. 45 se extendía desde Chihuahua hasta Nuevo León, favoreciendo nublados con potencial de lluvias ligeras en esa zona del país. Una zona de viento máximo se alzaba en la zona norte de México al igual que una corriente en chorro.

Para las 19:00 horas del centro de México, aproximadamente una hora

después del tornado en Tangancícuaro, el Frente Frío No. 45 avanzaba sobre el territorio mexicano provocando lluvia, viento y descenso de temperatura en los estados del norte y noreste del país. Paralelamente, una canal de baja presión en el sureste del país y la entrada de aire húmedo del Pacífico y Mar Caribe provocaban lluvias aisladas en los estados del sureste, sur, occidente, oriente y centro del país. La vaguada había modificado su dirección en noroeste-sureste cruzando la región centro y ubicándose al norte de la zona de estudio. Dichas condiciones favorecían nublados prominentes en la zona norte del estado de Michoacán, entre otros (SMN, 2014c).

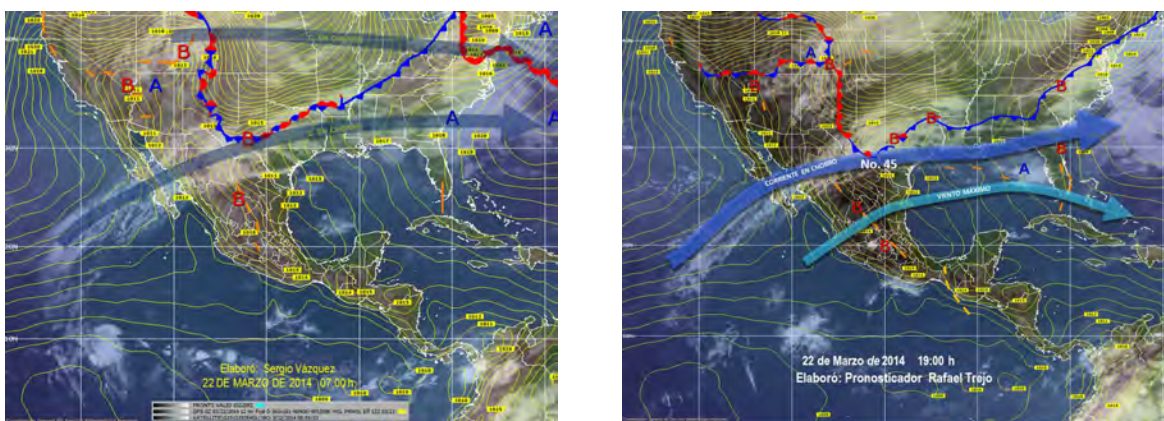


Figura 3.47 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas.

Simulación numérica

Las simulaciones hechas en el modelo WRF señalan una temperatura media de 20°C en superficie (fig. 3.48a). En general se hallan temperaturas templadas al centro del dominio extendiéndose casi paralelamente a la costa y siguiendo la orografía. Una leve entrada de calor se observa al sur de la región de estudio y un gradiente térmico de 8°C. La humedad relativa (fig. 3.48b) indica una masa extendida sobre la región estudiada, con valores entre el 44% y 68%. Unas ligeras franjas de valores inferiores dentro de una zona con valores medios muestran algunos indicadores de contraste de humedad.

La velocidad del viento en Z (fig. 3.48c) muestra zonas de corrientes ascendentes alineadas en las regiones orográficamente complejas. Los valores de velocidad del viento oscilan entre 0.04 m/s y 0.32 m/s. La región estudiada se

encuentra justo sobre una zona donde el contraste de corrientes que ascienden (mayormente) y descienden es claro. Toda una línea con comportamientos similares se extiende en dirección este-oeste. Por otro lado, la vorticidad potencial (fig. 3.48d) si muestra una clara zona de contraste entre valores positivos y negativos, entre 2 y -2 PVU, lo que indicaría zonas importantes de aire con tenencia a rotar en superficie, característica importante para creación de condiciones de inestabilidad.

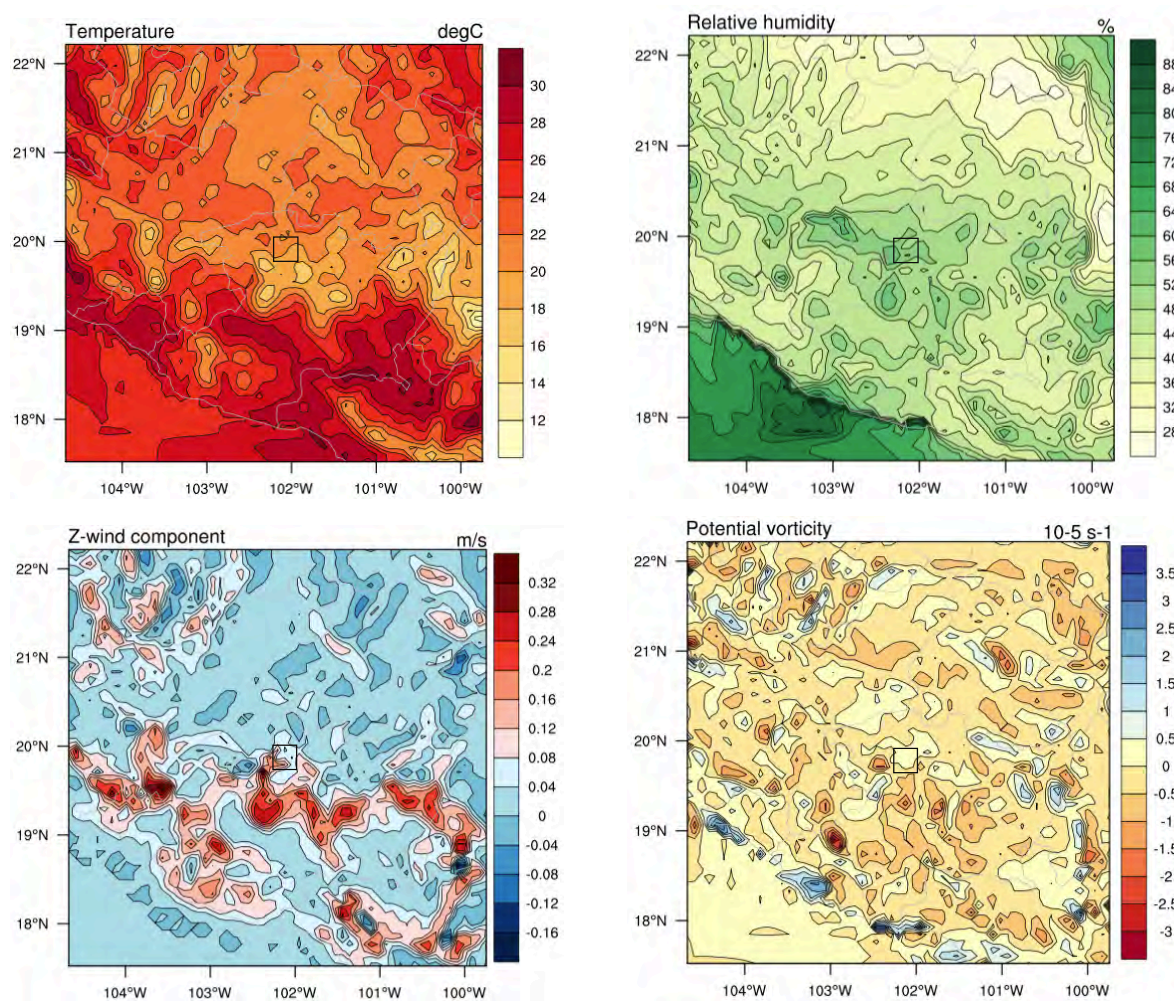


Figura 3.48 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo.

La presión a nivel del mar (fig. 3.49a) no muestra variaciones claras. Se obtuvieron valores de 1018 hPa de presión y zonas cercanas de hasta 1022 hPa. Para el caso de los vectores de viento en superficie y la topografía del modelo (fig.

3.49b), se observa que el tornado se registro entre los 1750 y 2000 msnm. La compleja orografía de la región compuesta por valles y montañas intercalados provoca una serie de comportamientos complejos del viento en superficie. La región estudiada se encuentra justo en un abanico de divergencia, el valle funcionaría para canalizar el mismo y las corrientes provocadas por ello tenderían a subir por las zonas montañosas cercanas. Al sur de la región analizada, una zona de convergencia es evidente, viento proveniente del Océano Pacífico se encuentra con una masa de aire que desciende de la zona montaña. Tales condiciones beneficiarían la formación de celdas convectivas y nubes de tormenta.

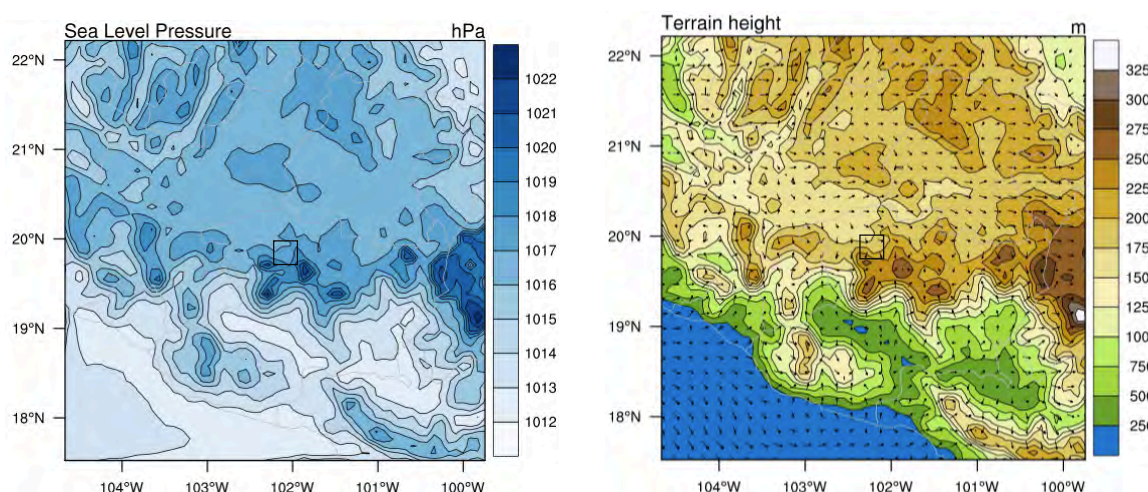


Figura 3.49 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo.

Para los cortes verticales de terreno en D1, la presencia de humedad es tan marcada como los casos antes expuestos. Sin embargo, el modelo reprodujo bastante bien la entrada de aire más húmedo del Pacífico (fig. 3.50a), donde la masa de aire alcanza una altura de 4 km aproximadamente. Los valores de humedad más altos son del 70% y se ubican justo sobre Tangancícuaro. Una masa de aire seco se alza por encima de los 4 km y se muestra uniforme en las partes altas del dominio. El siguiente corte (fig. 3.50b) muestra un patrón similar, con una entrada de aire húmedo de entre 50% y 60%. Nuevamente los valores más altos se ubican muy cerca de la región de estudio. Se puede ver también como la orografía compleja

de la zona guía en parte los valores más elevados, por lo que el aporte de humedad de dichas zonas juega un papel importante para tal variable.

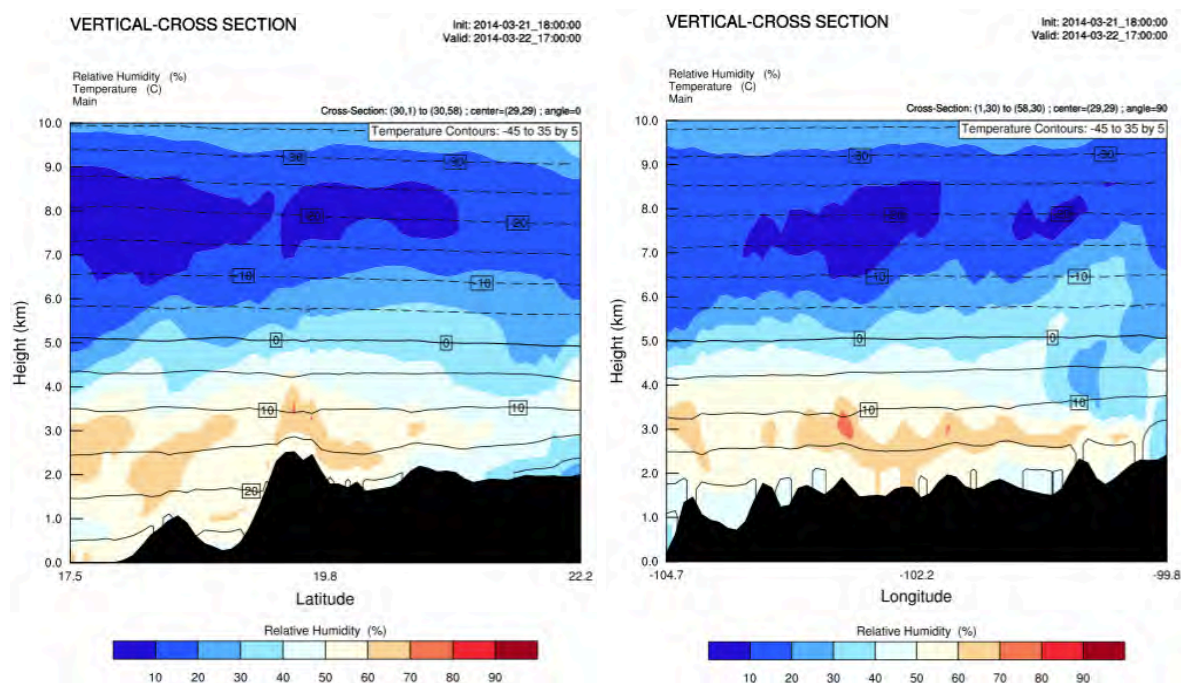


Figura 3.50 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante.

Los cortes en alta resolución (D3), recrearon para el caso de la vorticidad potencial (fig. 3.51a) zonas de convergencia con valores entre 5 y -5 PVU conglomeradas en una de las laderas de la montaña. Dicha vorticidad se mantiene hasta cerca de los 4 km y a nivel de suelo, lo que favorecería la rotación de viento en superficie y condiciones inestables en la atmósfera baja. Para el segundo caso (fig. 3.51b), claros contrastes de vorticidad se observan la región que orográficamente sobresale, con valores positivos al centro y negativos a los costados. El vapor de agua en porción de mezcla se mantiene relativamente bajo, con valores de 0.009 kg/kg. Se forman islas de isolíneas de valores más altos justo sobre la formación del vórtice.

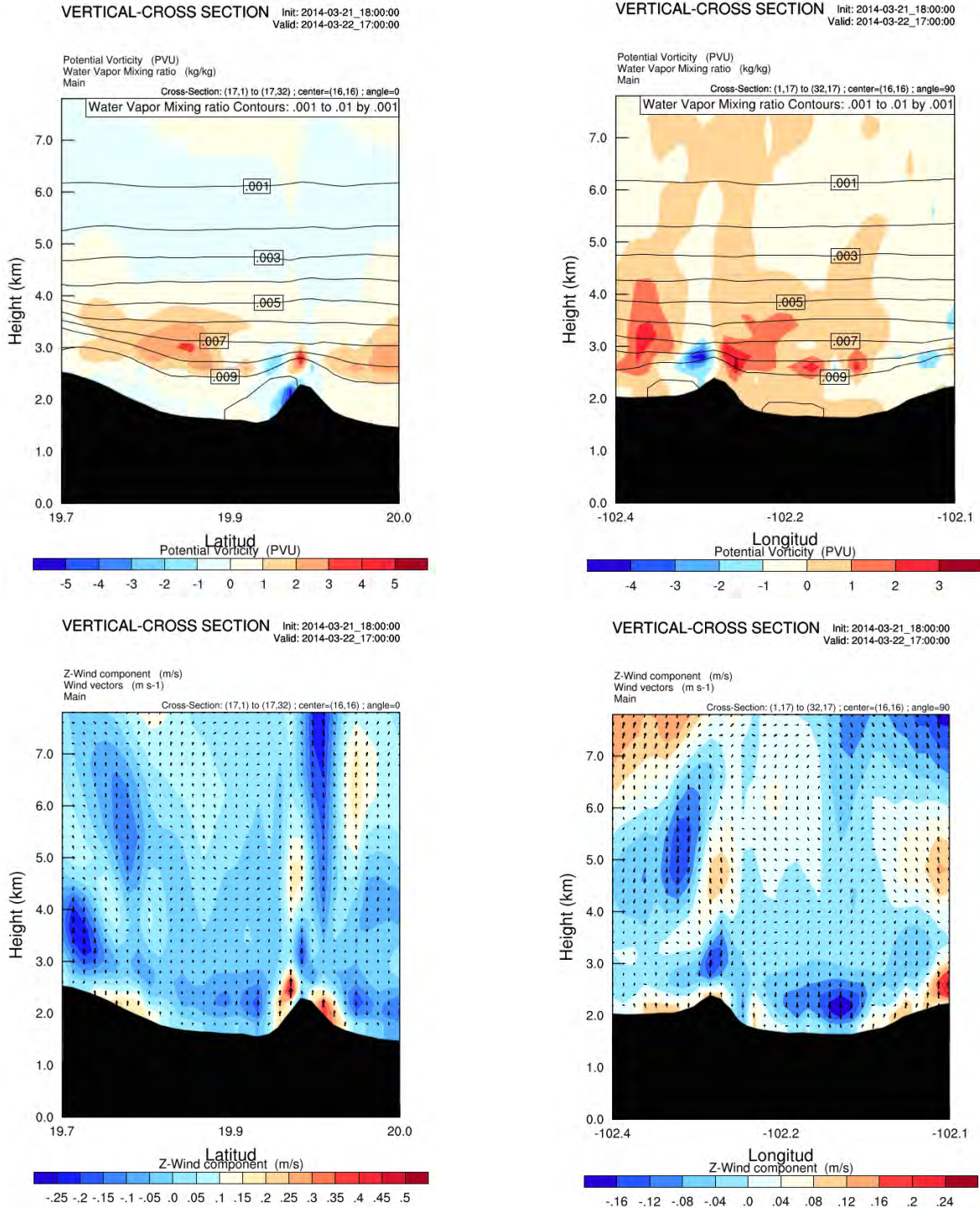


Figura 3.51 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3.

Los cortes con vectores de viento y la velocidad del viento en la vertical, muestran para el corte a longitud constante (fig. 3.51c) como el campo de viento

diverge, desplazándose hacia los costados, subiendo por las montañas cercanas y creando zonas de corrientes ascendentes en las laderas de las mismas. La región donde se ubica el tornado muestra valores de 0.15 m/s de corrientes de aire que bajan desde cerca de los 3 km sobre la superficie. El segundo corte (fig. 3.51d) es aún más claro en este sentido. Una región de corrientes descendentes se ubica por encima del espacio estudiado. Se extiende cerca de 2 km en la horizontal y muestra velocidades entre 0.12 y 0.16 m/s. Al igual que en el caso anterior, dichas corrientes al llegar a la superficie, divergen y tienden a subir por las laderas de las montañas.

En este caso en particular, la formaciones montañosas funcionan como una guía para la creación de zonas de aire descendente en las zonas de valle. Se observa también la formación de celdas convectivas, es decir, corrientes de aire que suben y bajan cíclicamente, y que son indicadores precisos de la formación de tormentas, favorecedoras del tiempo severo. Este caso en particular refleja bastante bien el papel fundamental las corrientes montaña-valle y valle-montaña que de las que se ha hablado ya previamente en algunos casos analizados.

La condiciones de humedad que ingresan por la costa del Pacífico, su contacto con masas de aire templado, dada la orografía y altitud del lugar, así como las corrientes de viento canalizadas por las zonas de valle en Tangancícuaro, favorecieron la formación de corrientes ascendentes y descendentes locales bastante fuertes, lo que debió ser el detonador principal de la ocurrencia de este tornado en este municipio de Michoacán.

3.3.8 Caso de la Región del Santuario, Otatitlán, Veracruz



Figura 3.52 Mapa de ubicación del tornado de Otatitlán, Veracruz.

Características generales

Acontecido el 19 de julio de 2014 cerca de las 02:00 horas en Otatitlán, Veracruz, en una zona conocida como El Santuario. Tuvo una duración de un poco más de media hora y la lluvia posterior que se prolongó hasta las 04:00 horas. Además de Otatitlán, se vieron daños en Tlacojalpan, igualmente ubicada a las orillas de la cuenca del Papaloapan (**El Piñero de la Cuenca, 2014**). Las rachas de vientos se calcularon en más de 130 km/h y el evento fue descrito como un mini tornado o

torbellino por las personas afectadas (**El Tuxtepecano, 2014**).

Con respecto a los daños se informó que fueron cerca de 300 viviendas afectadas, la mayoría de ellas por el desprendimiento de sus techos, además de algunas caídas de bardas por los fuertes vientos. También se reportaron cientos de hectáreas de siembra de plátano perdidas. En total se manejaron 5 heridos por impactos con láminas, además de una persona fallecida por la caída de una barda (**Mundo Veracruzano, 2014**).



Figura 3.53 Fotografías del evento.

Fuente: <http://chihuahuanoticias.com/?p=30116>

Condiciones sinópticas

Este estudio de caso es bastante peculiar por haber acontecido en la madrugada. Por lo cual, se tomó como base el último reporte emitido por el SMN el 18 de julio de 2014 a las 19:00 horas. En tal se mencionaba que el avance la O.T. No. 14 que asociada con una zona inestable en el centro del país ocasionaría lluvias intensas acompañadas de tormentas eléctricas, granizo y fuertes vientos en gran parte del centro, occidente y sur de México. Además un jet de bajo nivel, con corrientes de hasta 60 km/h se extendían sobre la Península de Yucatán, Golfo de Tehuantepec y Golfo de México. Para la zona de estudio se pronosticaban fuertes vientos en dirección este-sureste, tormentas eléctricas y lluvias muy fuertes (**SMN, 2014d**).

El siguiente boletín emitido por las autoridades del SMN fue el 19 de julio de 2013 a las 07:00 horas, poco más de 4 horas después del evento. En este se señalaba un canal de baja presión en el sureste de México, que fortalecido por la presencia de humedad del Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec, provocaría

lluvias muy fuertes para la zona y algunas de estas asociadas a tormentas eléctricas. Además, una corriente de vientos fuertes de hasta 50 km/h sobre la Península de Yucatán, Golfo de Tehuantepec y a lo largo del Golfo de México (SMN, 2014e). Este caso tiene algunas particularidades; por un lado la presencia de jets de bajo nivel (que en ninguno de los casos antes analizados se había observado) y por otro, la inexistencia de alguna vaguada o canal de baja presión cercana a la zona (recurrente en los casos pasados).

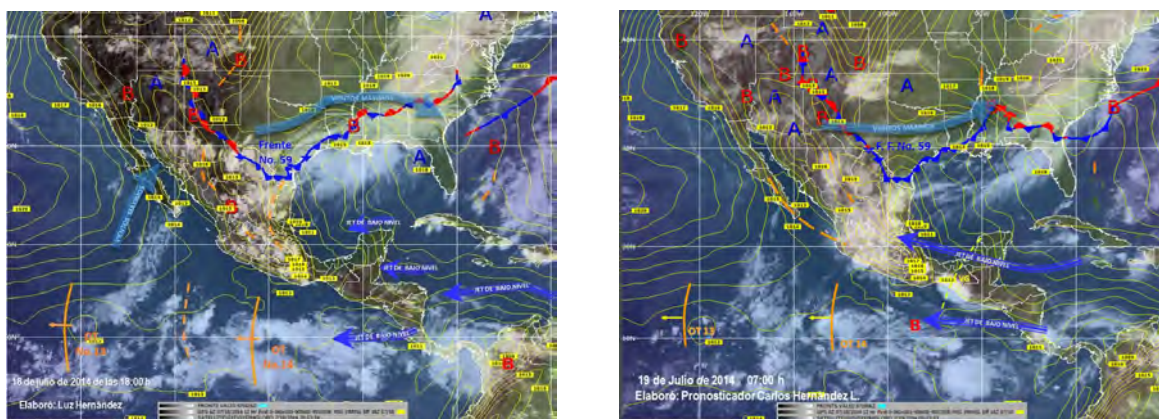


Figura 3.54 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas.

Simulación numérica

Para este evento el modelo WRF marca una temperatura media de 32°C a la hora del tornado (fig. 3.55a). Además, se observa una amplia región de valores altos de temperatura justo en la región de estudio, esta zona indicaría una entrada de calor fuerte desde el Golfo de México. Tiene su concentración justo en la zona del evento y una distribución este-oeste. Para la humedad relativa (fig. 3.55b), el valor promedio es de 64%. La entrada de humedad del Golfo se observa a los costados, teniendo una región un poco más seca que se alinea en dirección noreste-suroeste del dominio. Al oeste de Otatitlán, en los límites con Oaxaca se observa la existencia de una línea seca, donde el contraste entre valores altos y bajos de humedad oscila cerca del 28%.

La velocidad del viento en la vertical (fig. 3.55c) indica que la región en general se encontraba con valores nulos en superficie. Cerca de la zona estudiada, al suroeste de ella, corrientes descendentes son visibles con valores de hasta 0.45

m/s. Toda una línea de corrientes del mismo tipo se alinea en dirección noroeste-sureste. Ésta se organiza conforme cadenas montañosas cercanas. Aunque es interesante ver que en este caso de estudio, una línea de corrientes ascendentes se ubica desde el Golfo hasta llegar a la región de Veracruz. La vorticidad potencial (fig. 3.55d) muestra zonas muy viables para la rotación del viento (de hasta 14 PVU), el valor más alto encontrado hasta ahora. Además, el contraste de vorticidad es bastante fuerte, de hasta 10 unidades de PVU. Este valor es excelente indicador de inestabilidad, ya que en zonas planas como a las que se alude en este caso, no existe orografía cercana que pueda influir en ella.

El siguiente parámetro, la presión a nivel de mar (fig. 3.56a) muestra en general una amplia zona de baja presión sobre la que se ubica el fenómeno analizado. Una pequeña región de presión más baja se extiende desde el Golfo, que coincide con una humedad media y temperatura alta, lo que podría indicar zonas de nublados prominentes y nubes de desarrollo vertical. Por otro lado, los vectores de viento y el modelo de terreno (fig. 3.56b) revela una zona de convergencia bastante fuerte en la región de Otatitlán. Viento proveniente del Golfo, de las montañas y valles cercanos converge en esta zona y lo probable es que existieran corrientes ascendentes locales muy fuertes. El tornado se dio prácticamente al nivel del mar.

La particularidad de este evento se ve en como condiciones de humedad, calor y nubosidad fueron particularmente fuertes. Esto demostraría un contexto un tanto diferente a los estudiados previamente. Al parecer, los jets de bajo nivel (expuestos en la meteorología sinóptica) en conjunto con la entrada de humedad del Golfo y condiciones de inestabilidad que imperaban en el territorio nacional, fueron los principales componentes para la formación de una fuerte tormenta y el seguido tornado.

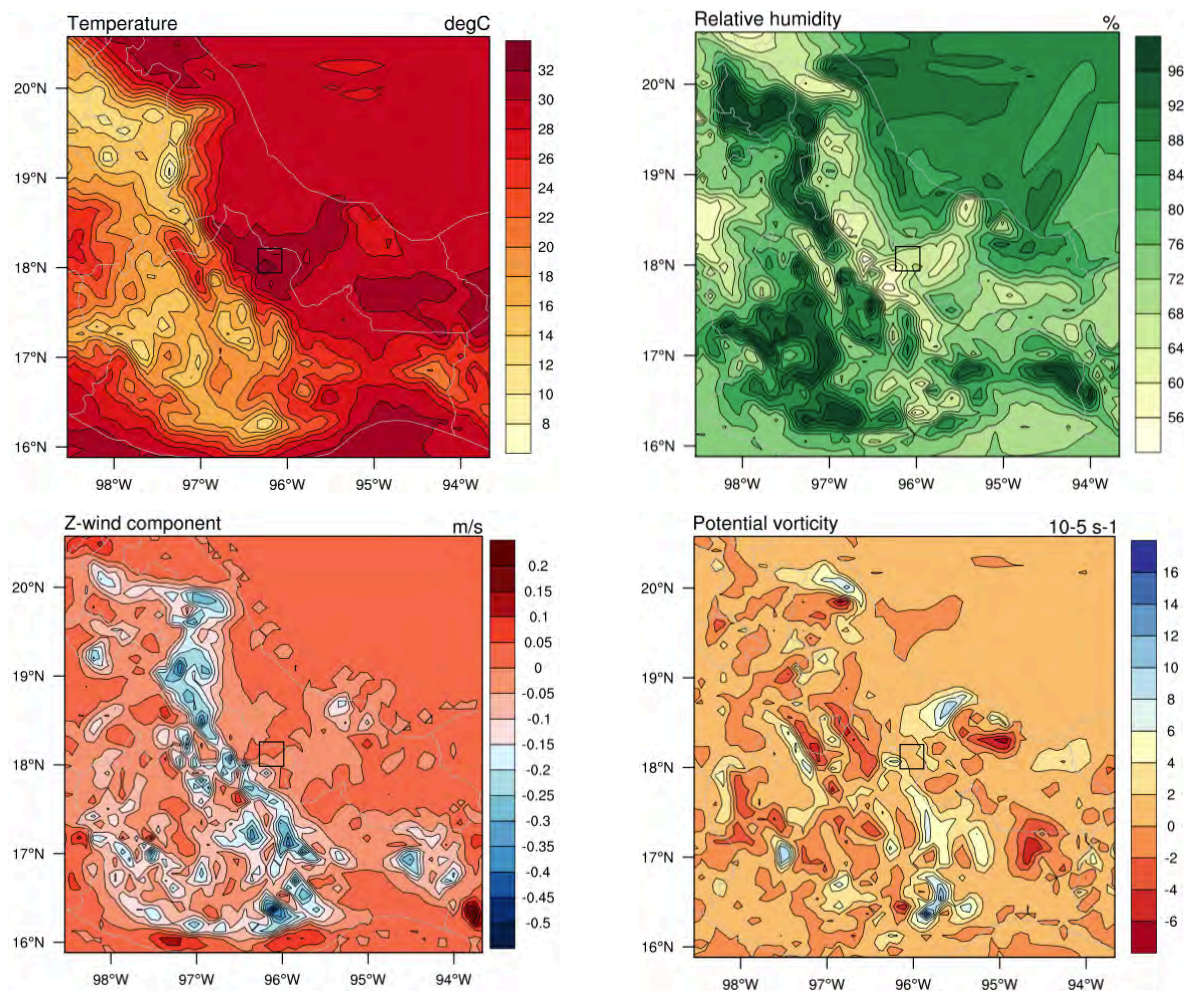


Figura 3.55 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo.

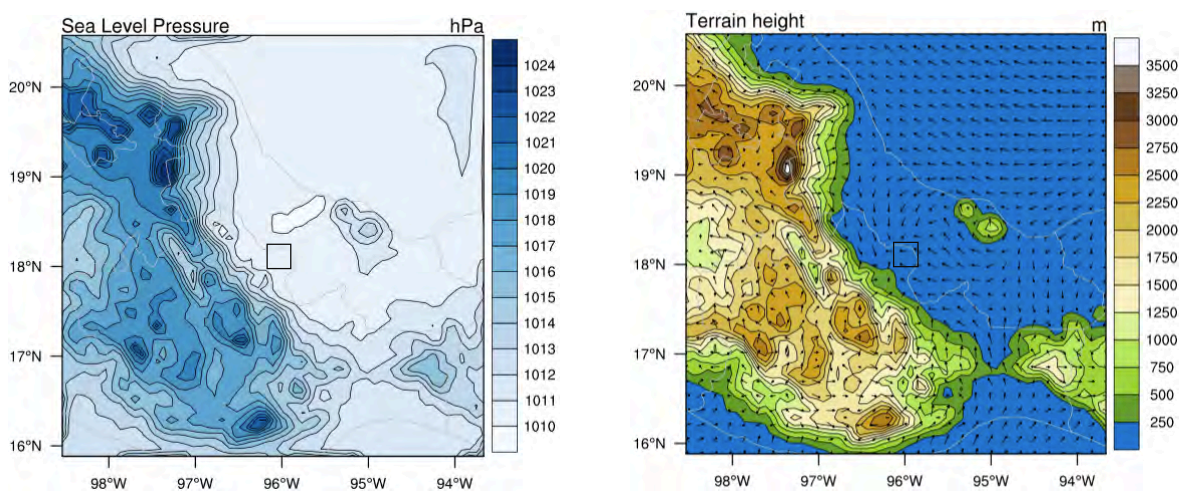


Figura 3.56 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo.

El corte de terreno en D1 muestra una distribución de humedad relativa similar a las expuestas anteriormente (fig. 3.57a). Una extensión de masas de aire húmedo de poco más de 4 km de altura que se introduce desde la costa del Golfo de México y tiene un contacto con una masa un tanto más seca (20%), dejando justo por debajo de esta a la región de Otatitlán, Veracruz. De nuevo la orografía parece favorecer la humedad por encima de sus zonas altas, lo que beneficiaría la condensación en niveles superiores y la precipitación. Para el corte a latitud constante (fig. 3.57b) el modelo arrojó un resultado bastante peculiar. Una gran masa de aire húmedo se extiende muy por encima de los 10 km de altura paralelamente con la orografía existente. El desarrollo vertical que tiene y su esparcimiento por encima de la región de Otatitlán, hace pensar que las condiciones de tormenta eran bastante fuertes.

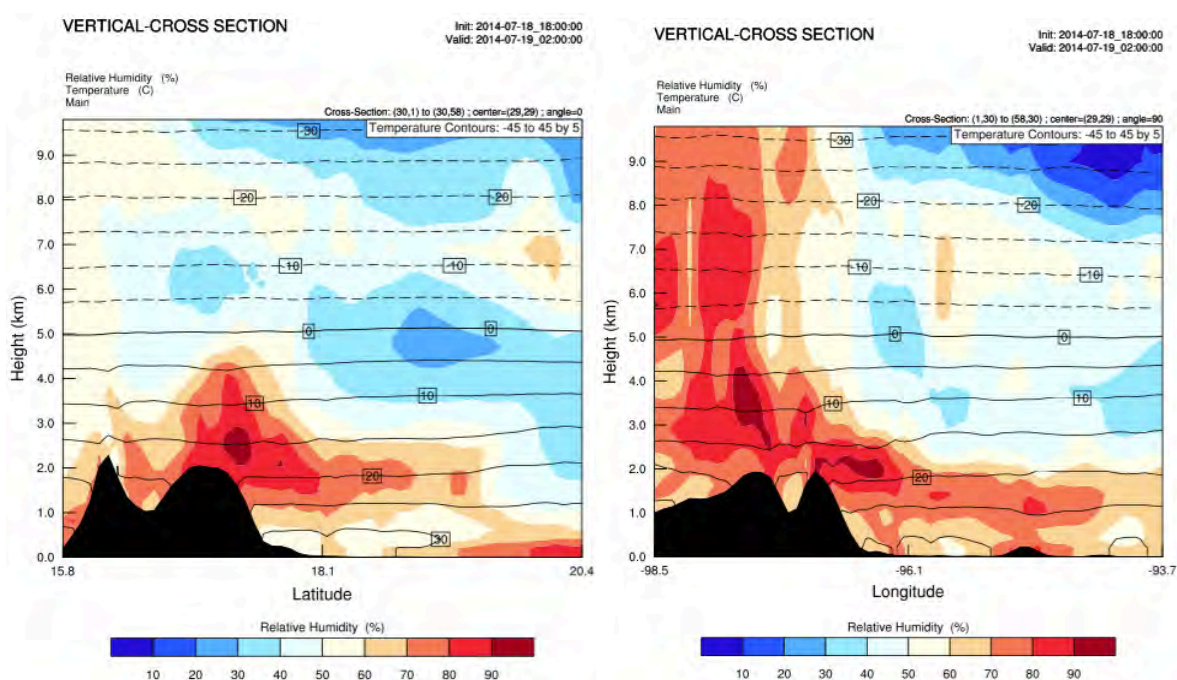


Figura 3.57 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante.

Los cortes en alta resolución (D3) revelaron una pequeña zona de vorticidad potencial a nivel del suelo y hasta los 300 msnm aproximadamente (fig. 3.58a). Dicha tendencia rotatoria del viento se encuentra un tanto inclinada justo en la zona

de ocurrencia del tornado. El vapor de agua en porción de mezcla tiene un valor 0.018 kg/kg en la zona del fenómeno, ligeramente alto.

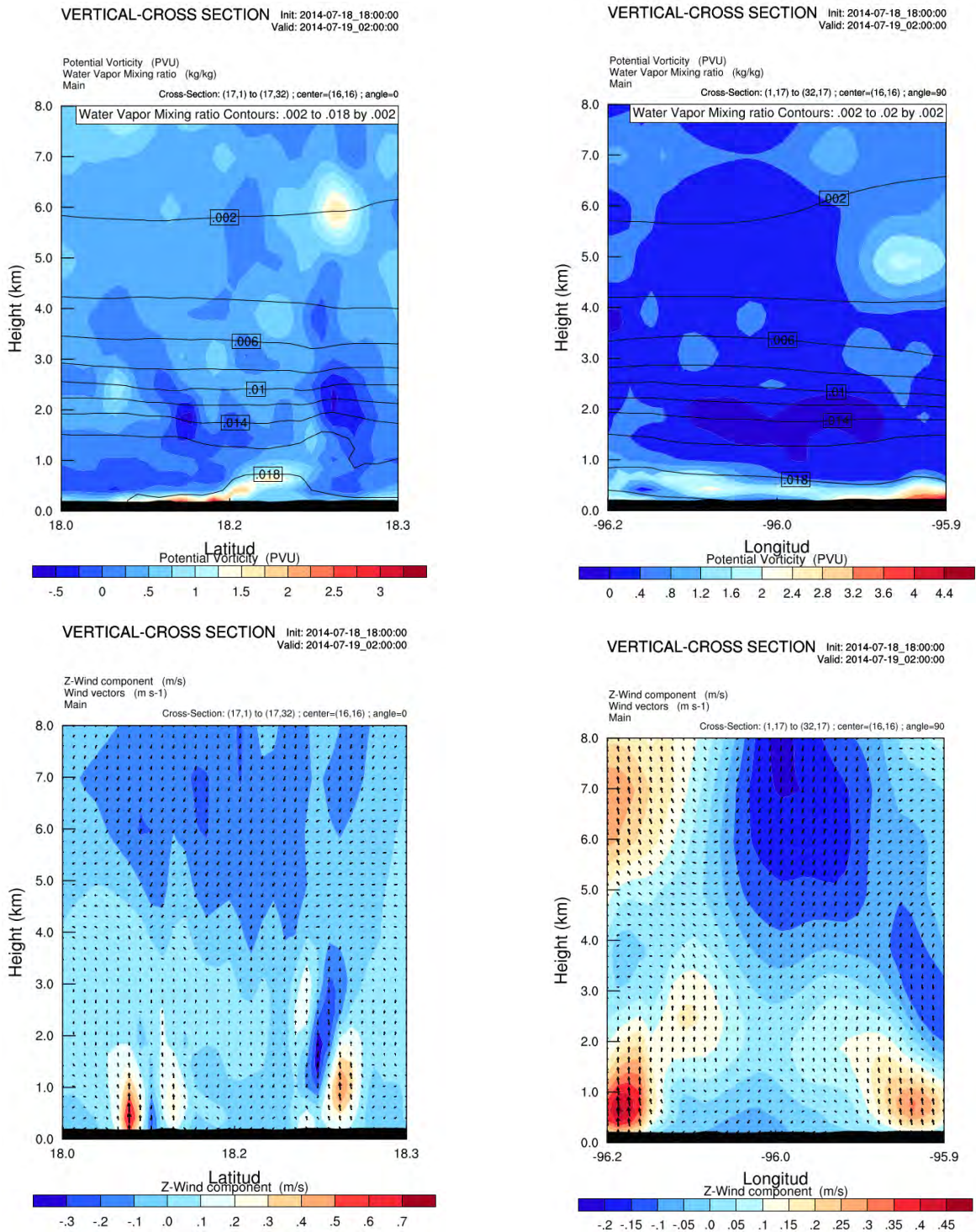


Figura 3.58 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3.

Para el corte transversal (fig. 3.58b), la vorticidad potencial se mantiene a nivel del suelo con valores que oscilan entre los 0.4 y 4.4 PVU, en ambos sentidos de giro. El dominio en general tiene valores nulos, lo que indicaría bajas probabilidades de rotación del aire en niveles superiores. Esto es esperable, ya que en horas de la madrugada la inestabilidad en la atmósfera y la formación de remolinos es poco probable.

Al analizar los vectores de viento y la velocidad del viento en Z, se encuentra un panorama bastante interesante. Corrientes ascendentes a los costados de zona del tornado y una gran sección de unos cuantos kilómetros con corrientes que descienden desde los 8km (y posiblemente más arriba) (fig. 3.58c). La velocidad del viento va desde los 0.7 m/s hasta los 0.3 m/s en ascenso y descenso. Para el siguiente corte (fig. 3.58d) el mismo caso es observado, pero con valores aún más altos. Las velocidades de las corrientes bajan hasta los 0.45 m/s, pero los contrastes son más marcados.

Por estas dos gráficas se puede inferir que la zona estaba dominada por una corriente que descendía desde altos niveles de la atmósfera baja, al chocar con el suelo giraba a los costados y procedía a elevarse, formando una celda convectiva. La zona de Otatitlán se ubica justo por debajo de esta zona de aire que desciende. Este caso estudiado, a diferencia de los que ya se han revisado, supone una extensión de corrientes descendentes bastante más amplia a las demás, que va hasta un par de kilómetros de extensión. Esto no quiere decir que el vórtice del fenómeno hubiera sido de tal magnitud, pero el sistema bajo el que se dio sí pudo ser bastante grande. O incluso, puede tratarse de un evento acompañado de microráfagas descendentes. Al no tener fotografías del fenómeno se hace un tanto complicado el soporte de dicha afirmación, sin embargo parece que el modelo da una buena aproximación a la realidad.

3.3.9 Caso de la Cabecera Municipal de San Cristóbal de las Casas, Chiapas

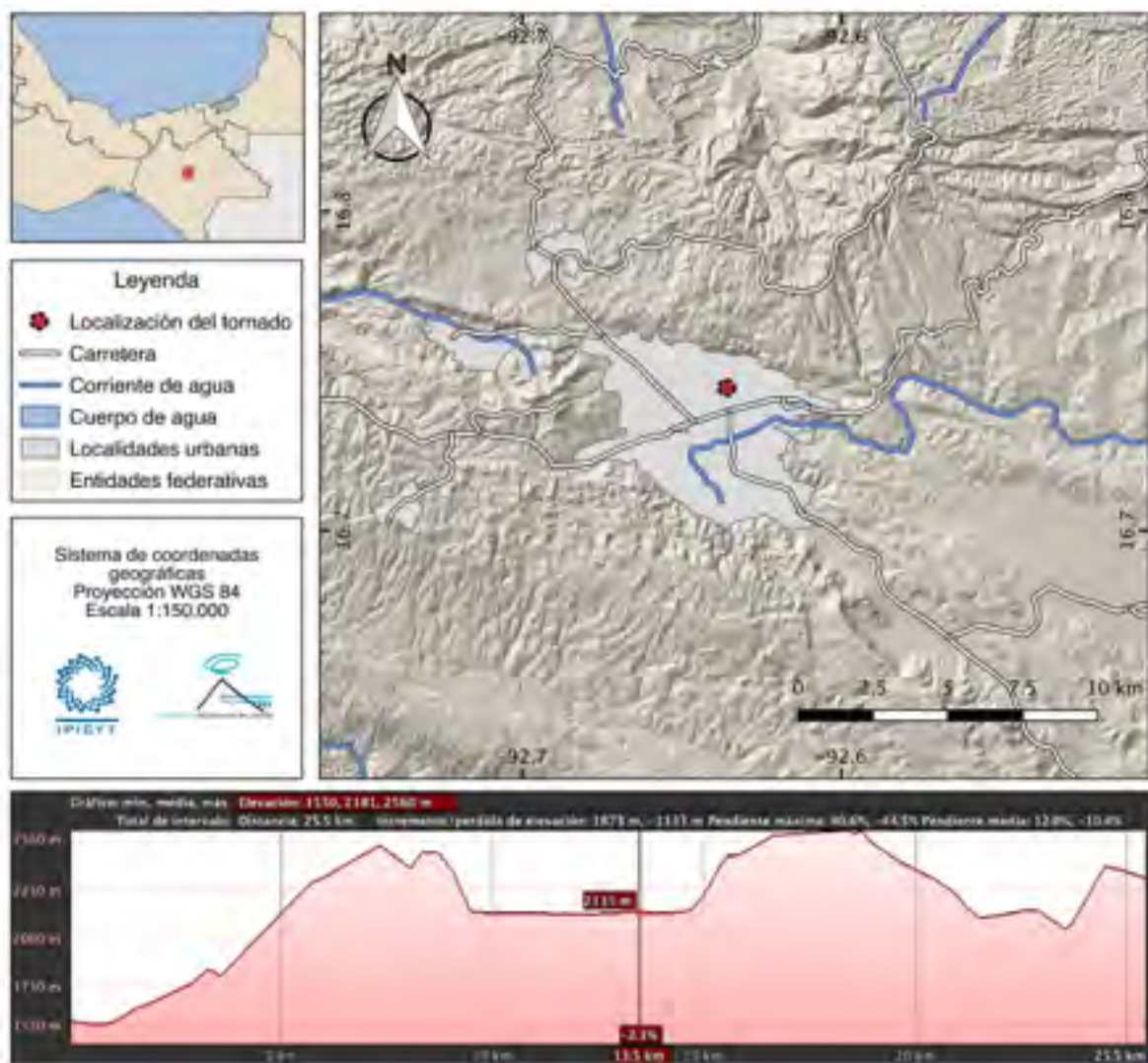


Figura 3.59 Mapa de ubicación del tornado de San Cristóbal de las Casas, Chiapas.

Características generales

Evento registrado el 6 de agosto de 2014 a las 14:00 horas en la Cabecera Municipal de San Cristóbal de las Casas, Chiapas. Tuvo una duración aproximada de 25 minutos y produjo vientos de entre los 70 y 100 km/h. Además, fue clasificado como un tornado F0 por el Centro Hidrometeorológico Regional de CONAGUA (**Uno Tv, 2014**). Los testigos aseguran que el fenómeno se originó en la Colonia 31 de Marzo, siguiendo por La Nueva Esperanza, Ojo de Agua, Morelos, Emiliano Zapata, 14 de

Septiembre y La Isla. Todas en la zona norte de la ciudad y con una dirección preferencial de este-oeste (**Cuarto Poder, 2014**).

Sobre los daños, las autoridades de Protección Civil mencionaron que fueron 500 viviendas afectadas en 13 barrios diferentes, donde los más afectados fueron Los Mexicanos (principalmente la calle Honduras y la Plazuela), San Ramón, El Cerrillo, La Isla, 14 de septiembre, Nueva Esperanza, entre otras. Los perjuicios se destacan por el desprendimiento de techos de lámina, daños a la infraestructura eléctrica, derribo de árboles y averías a automóviles por los proyectiles lanzados. Se reportó al menos una persona lesionada y ninguna defunción (**Cuarto Poder, 2014**).

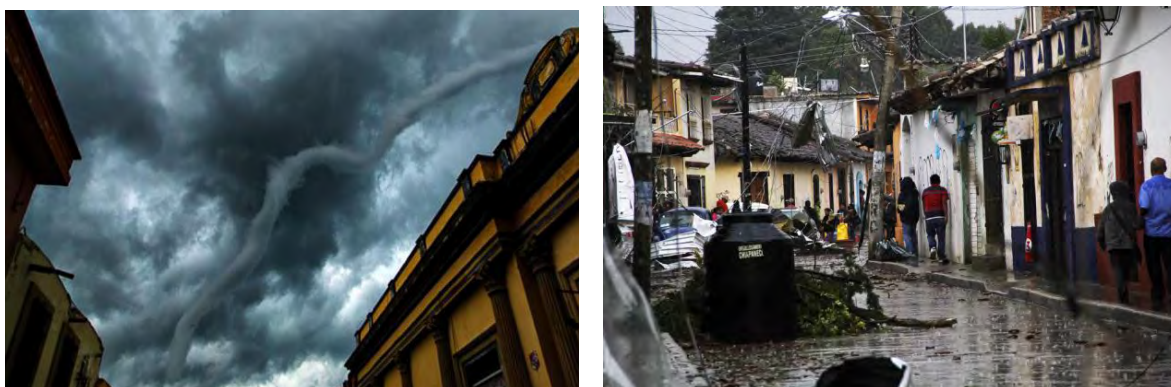


Figura 3.60 Fotografías del evento.

Fuente: <http://www.unionchiapas.mx/articulo/2014/08/09/gobierno/llega-ayuda-damnificados-de-torbellino>

Meteorología sinóptica

El boletín del SMN señalaba a las 07:00 horas del 6 de agosto una zona de baja presión con 10% de potencial de desarrollo ciclónico al sur de las costas de Guerrero, lo que ocasionaría un aporte de humedad hacia el occidente y sur de México. Además de un canal de baja presión localizado sobre la Península de Yucatán que favorecería nublados vespertinos y lluvias fuertes con actividad eléctrica en Chiapas y Campeche, además de lluvias menores en Tabasco Yucatán y Quintana Roo. Asimismo se pronosticaban vientos del sur y suroeste de 20 a 35 km/h para el Pacífico Sur. Por último una vaguada en dirección noreste-suroeste que cruzaba por el centro del estado de Chiapas (**SMN, 2014f**).

Para las 12:00 horas, aproximadamente dos horas antes del tornado, continuaba el potencial de lluvias fuertes a muy fuertes con tormentas eléctricas y granizadas en gran parte del país por los canales de baja presión y la nueva O.T. No. 19. Un canal de baja presión en superficie que se localizaba sobre la Sonda de Campeche favorecía nublados vespertinos con potencial de lluvias fuertes en Chiapas, Campeche, Yucatán y Quintana Roo. Por primera vez en los casos analizados, se advierte la posibilidad de formación de torbellinos en las entidades federativas señaladas con zonas de tormentas (**SMN, 2014g**).

A las 18:00 horas, pasada la hora de formación del fenómeno, el boletín apuntaba que las condiciones de inestabilidad y canales de baja presión persistían sobre el territorio mexicano favoreciendo la formación de tormentas. La O.T. No. 19 se movía en el occidente del Mar Caribe en dirección oeste e ingresaría en poco tiempo a Quintana Roo. Por último, pronosticaba cielo medio nublado a nublado y 80% de probabilidad de lluvias puntuales fuertes para el Pacífico Sur (**SMN, 2014h**).

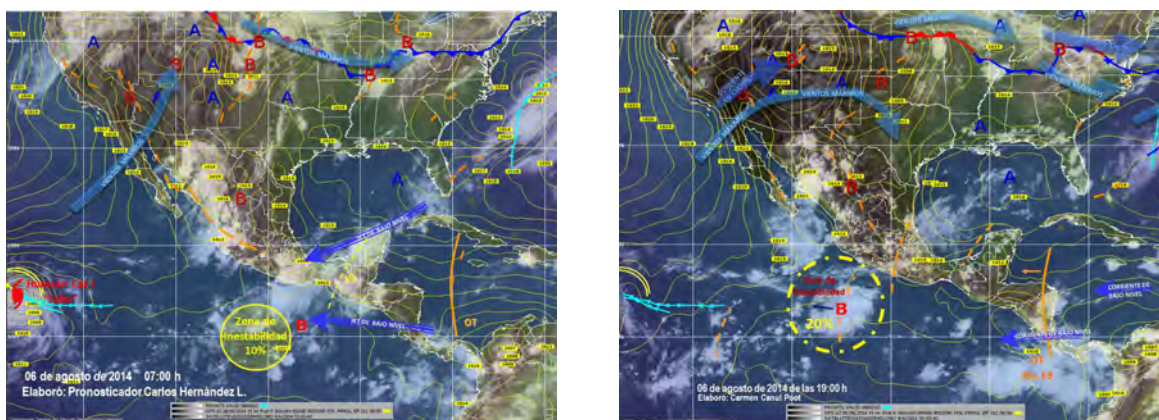


Figura 3.61 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas.

Simulación numérica

El modelo arrojó una temperatura media de 14°C en superficie al momento de presentarse el tornado (fig. 3.62a). La distribución de temperaturas se muestra relativamente normal, con masas cálidas aproximándose por el sur a la zona montañosa de Chiapas y creando gradientes de 10°C aproximadamente. Una leve zona al norte de la región estudiada se muestra con temperaturas bastante altas, y parece tener una leve intromisión a la región de los altos. Por su parte la humedad

relativa (fig. 3.62b) marca un 88% en la zona de San Cristóbal de las Casas. La región parece ser cruzada por una zona un tanto más seca (60%) y una gran masa de aire húmedo ingresa desde Campeche y la región este de Chiapas, creando una región de convergencia de humedad que cruza en dirección noroeste-sureste.

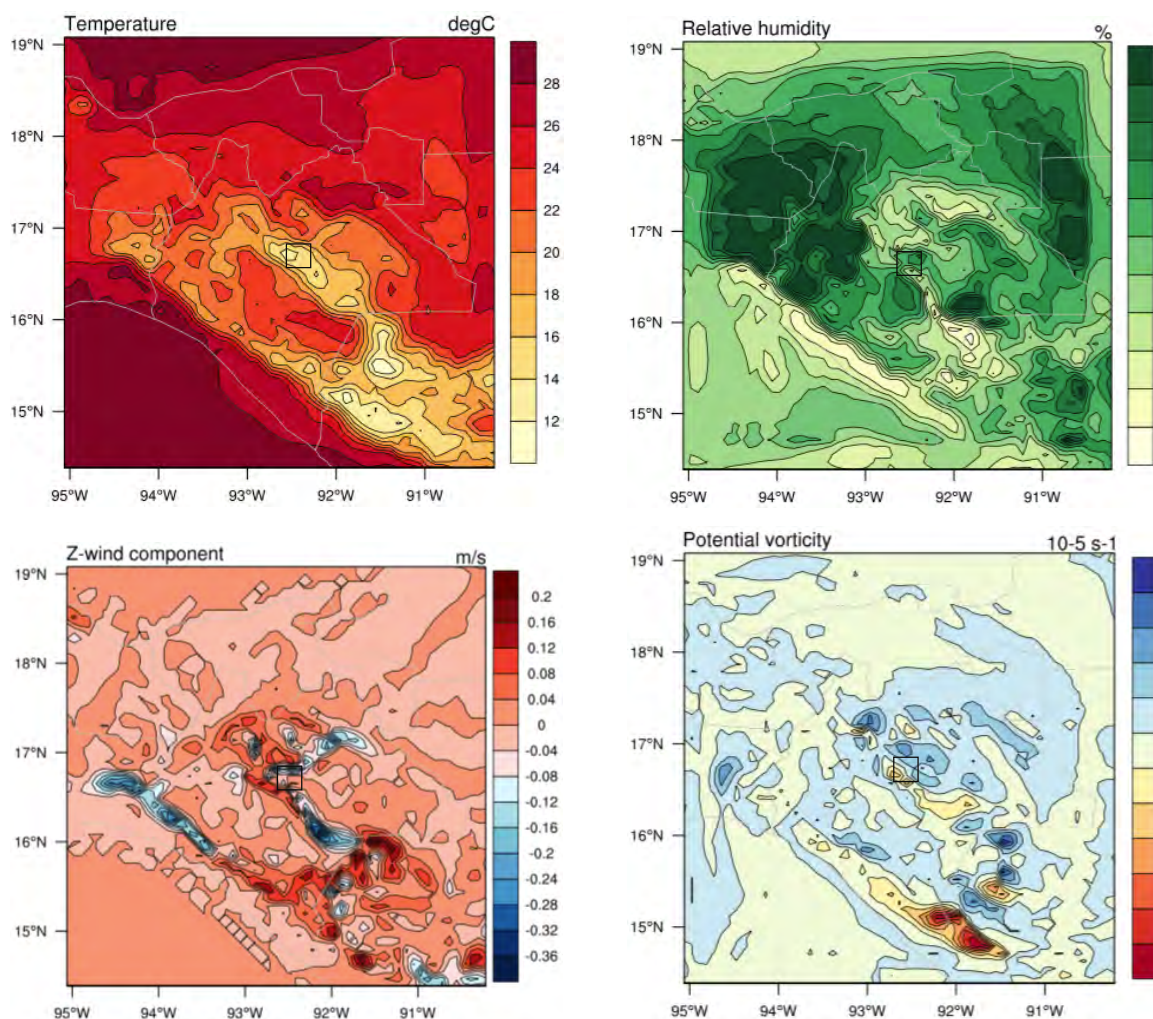


Figura 3.62 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo.

La velocidad del viento en Z (fig. 3.62c) indica claras zonas de corrientes descendentes (de hasta 0.24 m/s) extendiéndose en la misma dirección del contraste de humedad mencionado. La velocidad del viento alcanza los 0.2 m/s en algunas zonas. El contraste entre corrientes ascendentes y descendentes son indicadores de inestabilidad. La vorticidad potencial (fig. 3.62d) también muestra

disparidad, y se ven valores entre -3 y 2 PVU. Para las zonas más altas los valores positivos indican la dirección de giro del viento en las laderas de las montañas. La inestabilidad observada en la imagen satelital queda evidenciada con el análisis de las variables mencionadas.

El caso de la presión a nivel del mar indica, zonas de alta presión (1023 hPa) justo en la región de San Cristóbal de las Casas. Una baja presión que se extiende desde Tabasco parece avanzar en dirección norte-sur llegando muy cerca de la región de los altos de Chiapas. La misma situación es observada por el sur. La orografía del modelo nos indica que fue cerca de los 2500 msnm la altura bajo la que se desarrollo el tornado, una característica importante de los tornados mexicanos. Los vientos sobre la zona muestran una tendencia ciclónica, y la región de San Cristóbal de las Casas, parece tener una leve zona de convergencia. Los vectores y su distribución parecerían indicar zonas de convergencia extendidas relativamente cerca de donde se presentó el fenómeno, lo que demostraría la formación de celdas convectivas, inestabilidad y posibilidad de desarrollo de tormentas fuertes.

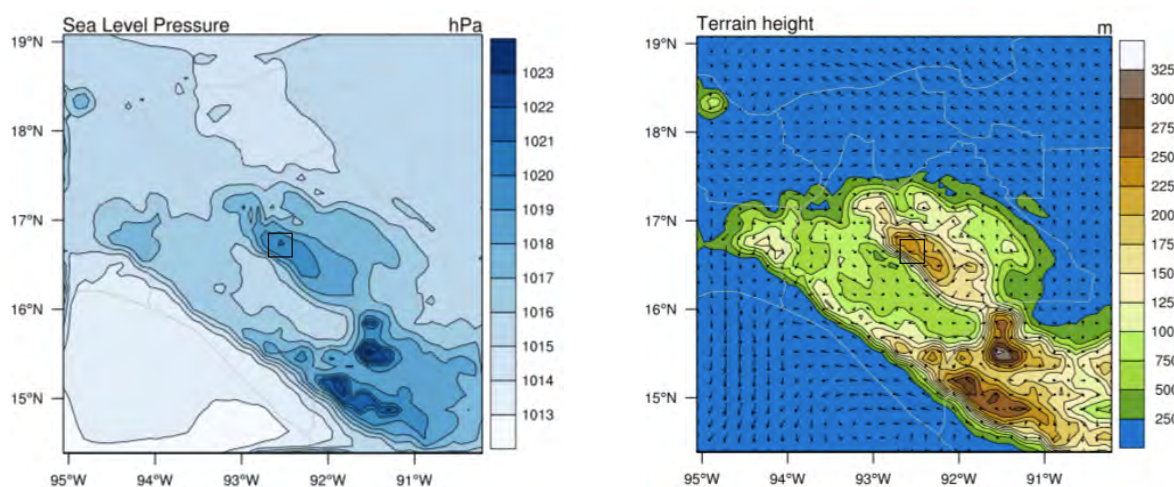


Figura 3.63 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo.

Para el corte en D1, San Cristóbal de las Casas se ubica justo sobre las cimas de las montañas representadas por la orografía en color negro. La distribución

de temperatura y humedad relativa a longitud constante (fig. 3.64a) muestra un valor medio de 80% de humedad a nivel del suelo. Por encima de este una masa un poco menos húmeda (70%) funciona como zona de transición para que alrededor de los 5 km una gran masa de aire húmedo se acercara desde la costa del Océano Pacífico. La temperatura muestra un decaimiento justo en la zona del tornado con valores que oscilan alrededor de los 15°C. El corte transversal (fig. 3.64b), parece tener una distribución similar, aunque la masa de aire húmedo que se acerca desde la sección izquierda de la gráfica contiene valores de humedad de hasta 90%.

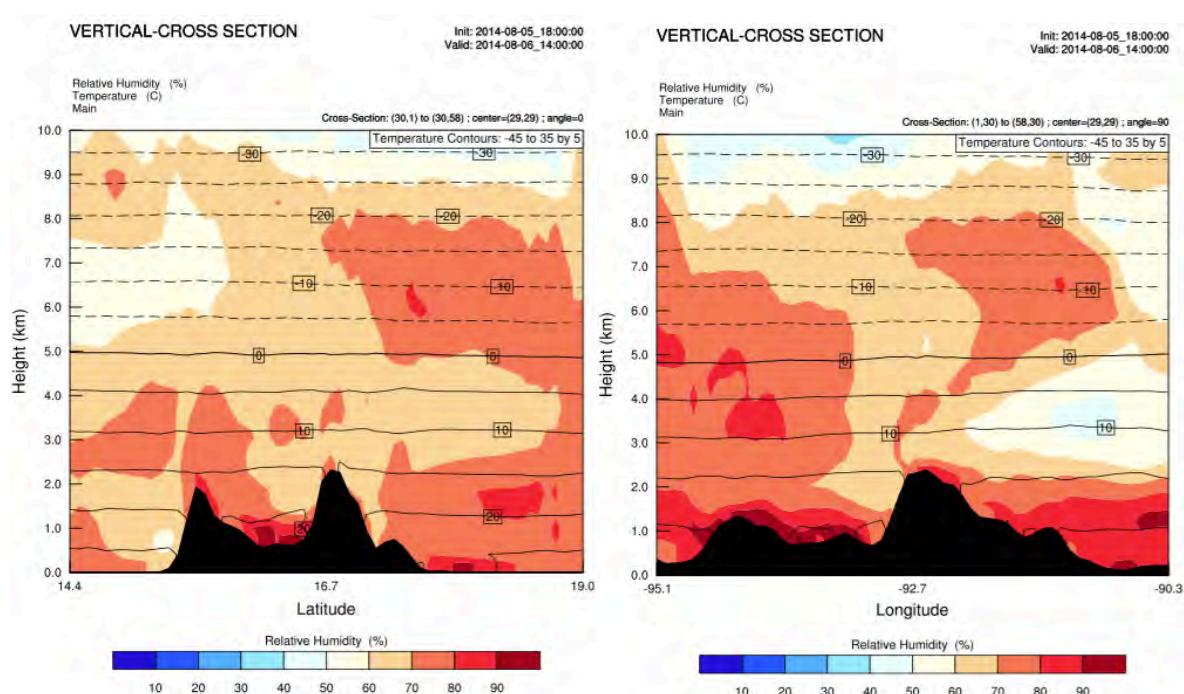


Figura 3.64 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante.

Los cortes de terreno en alta resolución (D3) son concluyentes en este caso. La vorticidad potencial muestra zonas de contraste con valores entre 5 y -6 PVU (fig. 3.65a). El vapor de agua en porción de mezcla indican una isla de valores altos (0.01 kg/kg) justo en la zona del evento. De nuevo los valores altos de PVU se ubican justo en las laderas de las montañas y van descendiendo hasta la zona del valle.

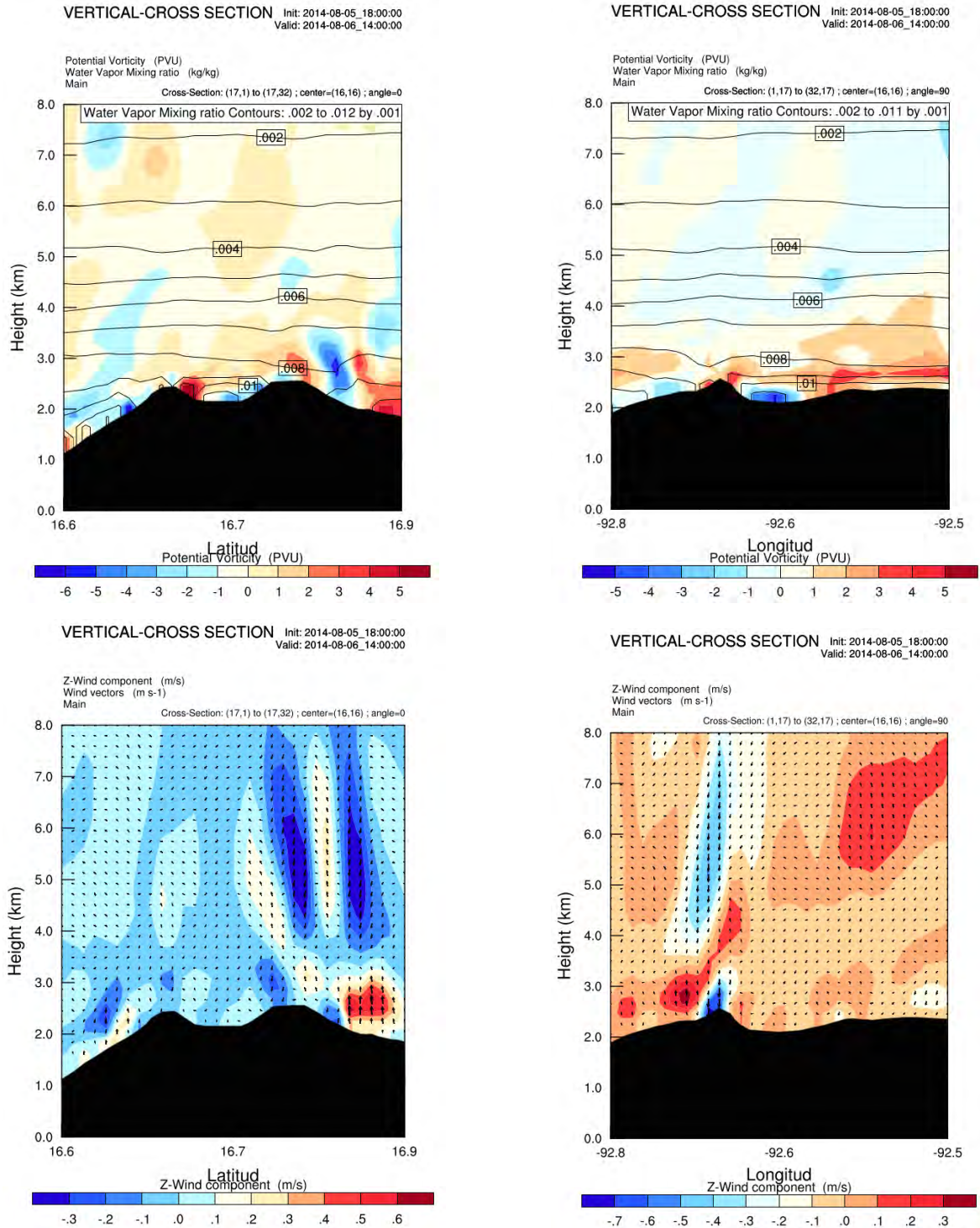


Figura 3.65 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3.

El corte transversal (fig. 3.65b) muestra zonas de vorticidad un tanto más cercanas a la superficie. Se alcanzan tan solo medio kilómetro del suelo y se extienden

por varios más en la horizontal. Una concentración de altos valores negativos (-5 PVU) se ubican justo en la zona del evento. El vapor de agua en porción de mezcla conserva valores de 0.011 kg/kg.

La velocidad del viento en la vertical (fig. 3.65c) demuestra como zonas de corrientes descendentes se ubican por encima de la ladera sur de la montaña. Estas, se van intercalando entre una corriente que asciende, esto debido a la convergencia de viento que produce la elevación y aceleración del mismo. Tal situación parece controlada en parte por la orografía de zona, y tiene al final, una corriente descendente un tanto débil en la zona centro del valle, lugar donde se presentó el tornado. Los valores van de los 0.3 m/s (descendentes) a los 0.6 m/s (ascendentes).

El corte transversal (fig. 3.65d) sigue la misma tónica. La zona más alta parece el catalizador de corrientes descendentes y ascendentes. Donde la cima está dominada por corrientes que vienen desde los 3 km de altura, intercaladas por una zona de vientos en ascenso de 0.3 m/s y terminando con otra corriente que va descendiendo desde más de 8 km en la vertical.

Las características de la distribución de tales variables en este caso, se asimilan bastante a otras previamente expuestas. Las intercalaciones de corrientes y la distribución de la vorticidad y vapor de agua en porción de mezcla, parecen indicar fuertes zonas de celdas convectivas. Esto favorecería la formación de tormentas y el enderezamiento del vórtice extendido en el suelo, para posteriormente convertirse en el tornado que fue registrado. Si se conjugan con los valores de humedad relativa, temperatura y vorticidad, se pueden explicar perfectamente las condiciones de inestabilidad en la atmósfera baja.

3.3.10 Caso de Huimiyucan, Almoloya, Hidalgo

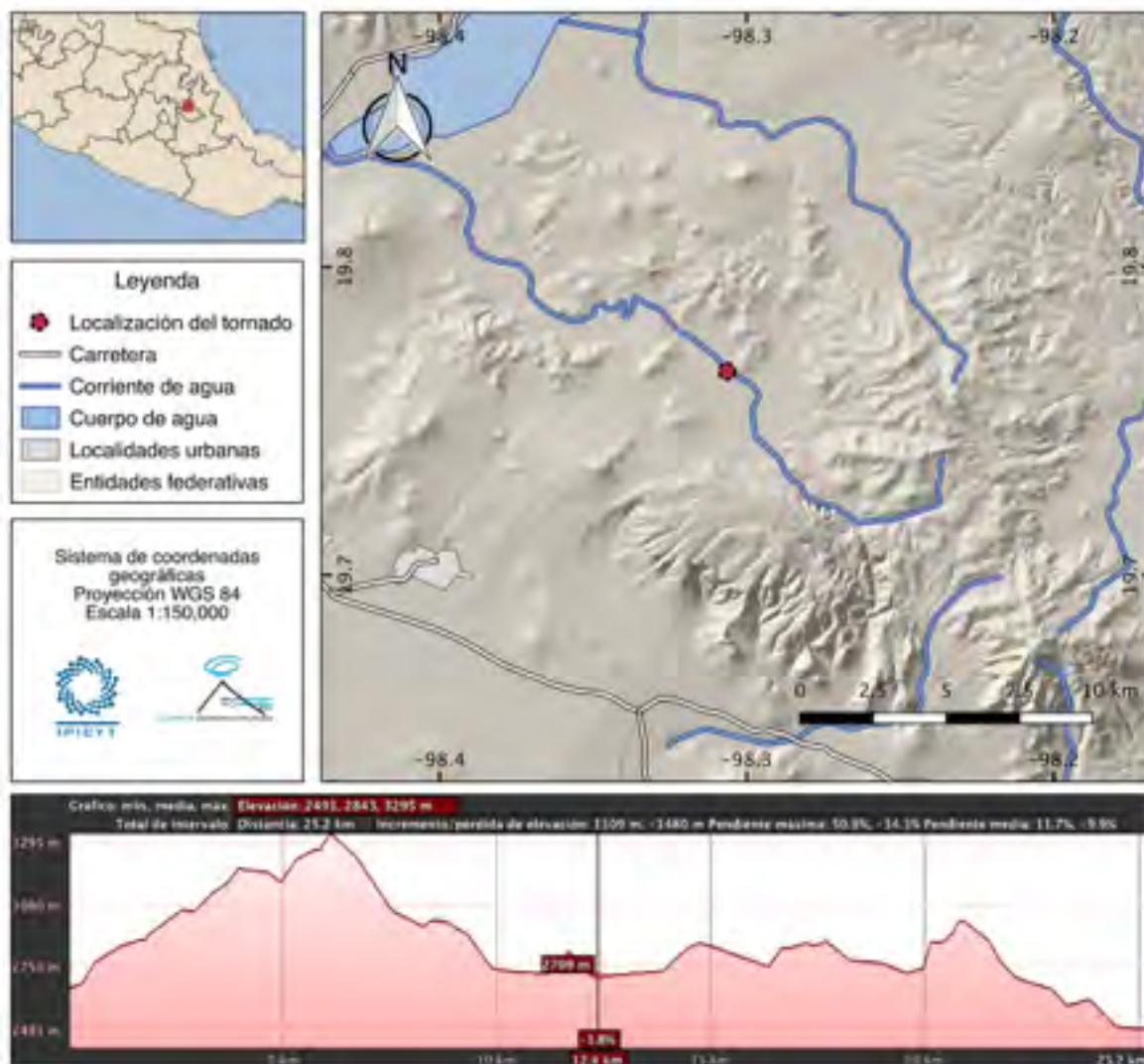


Figura 3.66 Mapa de ubicación del tornado de Almoloya, Hidalgo.

Características generales

Tornado originado el 17 de agosto de 2014 en la comunidad de Huimiyucan, Almoloya, Hidalgo. Fue alrededor de las 16:00 horas y tuvo una duración aproximada de 10 minutos con un desplazamiento que oscila entre los 10 y 15 km (El Universal, 2014). Fue mencionado como un tornado del tipo supercelda, y ocasionó daños en al menos 17 viviendas. 50 personas fueron trasladadas a un albergue temporal, y además de los daños a vías de comunicación y energía

eléctrica, provocó la pérdida de animales de granja y cultivos locales (**El Golfo, 2014**). No se pudieron obtener imágenes del fenómeno, sólo de los daños ocasionados por este.



Figura 3.67 Fotografías del evento.

Fuente: <https://www.facebook.com/almoloyahidalgo20122016/photos/a.625858457513071.1073742219.387236431375276/625861080846142/>

Condiciones sinópticas

El SMN (**2014i**) señalaba para las 07:00 horas del 17 de agosto una zona de inestabilidad que afectaba el noroeste, norte, occidente y centro de México, ocasionando potencial de lluvias y tormentas eléctricas con posibilidad de granizo en dichas regiones. Una zona de viento máximo se alzaba en dirección norte-sur con un giro sobre la Mesa Central de México, transitando sobre la zona de estudio. Las condiciones pronosticaban un cielo medio nublado a nublado con 60% de probabilidad de lluvias fuertes. Por la mañana y noche temperaturas frescas y cálidas durante el día. Viento de este-noroeste de 20-35 km/h con rachas en zonas de tormenta.

A las 12:00 horas el pronóstico extendido mencionaba que la zona de inestabilidad se asociaba a una línea de convergencia en los estados del noroeste, norte, occidente y centro del país. Al igual que en el caso de estudio pasado, se indicaba que las zonas de tormentas favorecerían la probable formación de torbellinos. Si bien es cierto ya se menciona el potencial de estas tormentas para el desarrollo de tornados, dichas zonas se extendían a lo largo de un canal de baja presión que abarcaba gran parte del territorio mexicano. Un tanto alejado de la zona, un jet de bajo nivel se movía paralelamente a las costas del occidente del país y la

O.T. No. 22 se movía en dirección este-oeste provocando nublados mayormente en los estados del Pacífico (**SMN, 2014j**).

Pasadas dos horas del tornado en Huimiyucan, el SMN (**2014k**) mencionaba a las 19:00 horas una zona de inestabilidad con potencial de tormentas en gran parte del territorio mexicano. Los nublados en la región del Golfo de México y unas leves entradas de humedad a la región centro se mantenían. Por otra lado, en el Pacífico, a 920 km aproximadamente del sur-suroeste de Cabo San Lucas, B.C.S. una zona de baja presión con se mantenía 80% de potencial ciclónico en las siguientes 48 horas. No se mencionó la ocurrencia del fenómeno en su reporte de resumen de eventos meteorológicos significativos.

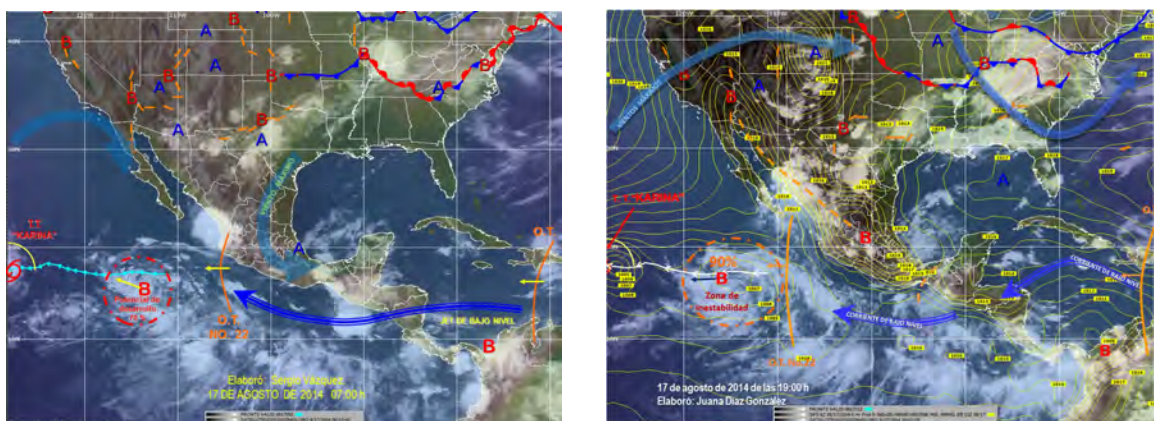


Figura 3.68 Imágenes interpretadas del Satélite GOES para las 07:00 y 19:00 horas.

Simulación numérica

El modelo señaló una temperatura media (fig. 3.69a) de 16°C a nivel del suelo al momento del tornado. La zona estaba dominada por condiciones templadas, entre los 12°C y 16°C, dada la zona elevada sobre la que se ubica la zona de estudio. Gradientes térmicos al este y oeste de la región por zonas bajas que la bordean son observables. La humedad relativa (fig. 3.69b) marcó un porcentaje de 72% aproximadamente. Una masa de aire más húmeda, con valores hasta de 88%, se extiende paralelamente a la región analizada, formando una línea de contraste humedad en dirección noroeste-sureste, y que disiente con zonas más secas al centro del dominio.

La velocidad del viento en Z (fig. 3.69c) indica zonas de convergencia de viento por corrientes del Golfo de México y del centro, provocando el ascenso de masas de aire. Una línea con valores de entre los 0.36 m/s de corrientes que ascienden contrasta con otra de valores de hasta 0.24 m/s de corrientes que bajan, indicando inestabilidad. Para el resto del dominio los valores se mantienen nulos con tendencias de movimiento muy débiles. La vorticidad potencial (fig. 3.69d) mantiene valores nulos en la mayoría del dominio. Una región extendida muy similar a la distribución de vientos en la vertical se alza con valores de entre 5 y -6 PVU. El tornado ocurre en una zona con de contraste, lo que favorecería la rotación del viento a nivel del suelo.

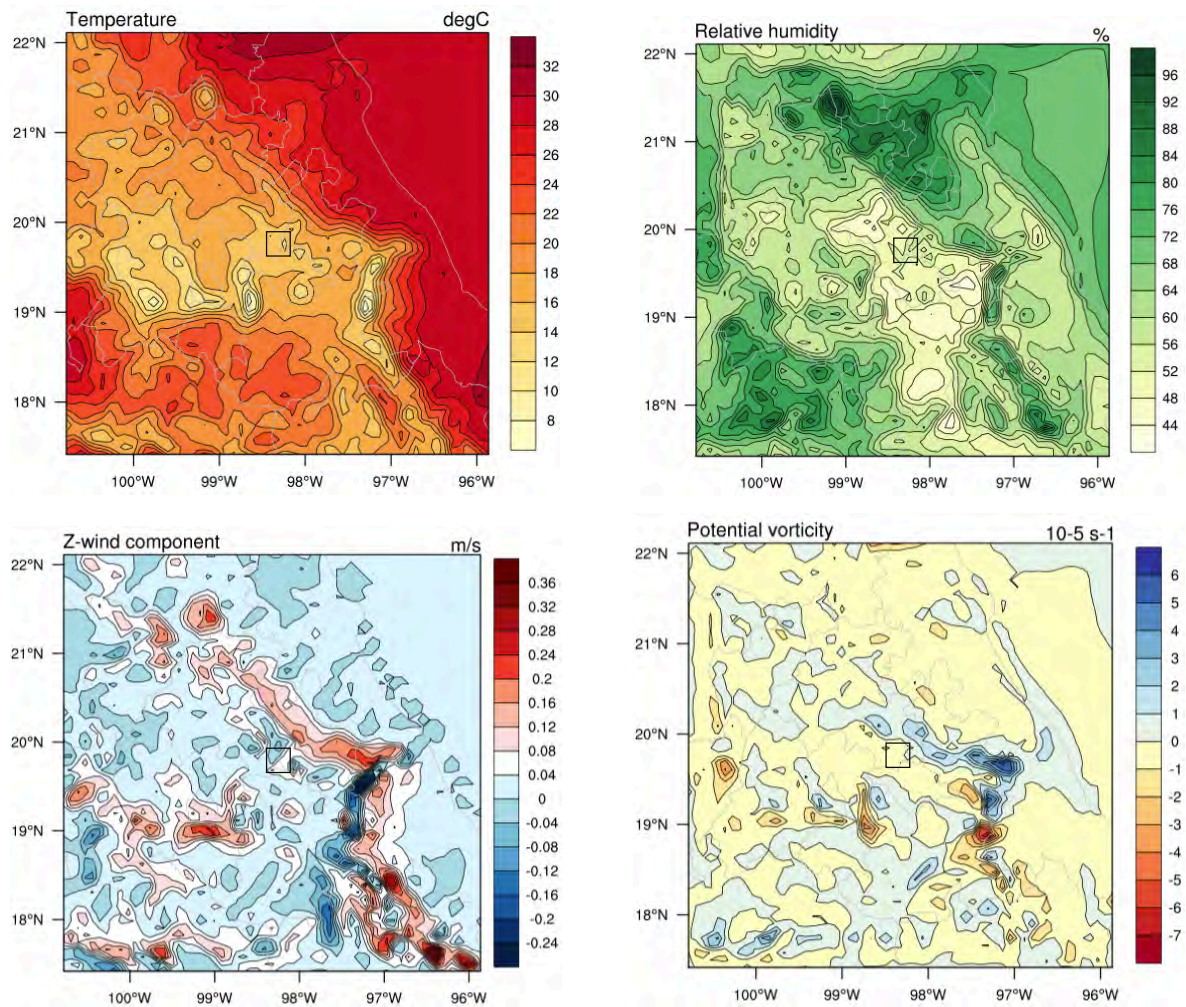


Figura 3.69 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en Z (c) y vorticidad potencial (d) a nivel del suelo.

Para la presión a nivel del mar (fig. 3.70a), se indica la ocurrencia del fenómeno en una zona de alta presión (1025 hPa). Regiones con valores similares se distribuyen paralelamente a las zonas montañosas. Una franja de baja presión se extiende desde el Atlántico y otra más por la Mesa Central, lo que indicaría zonas con bastantes nublados y posibles tormentas. La altitud sobre la que se dio el fenómeno fue poco más de los 3000 msnm, una zona bastante alta y con una topografía complicada a sus alrededores. Los vectores de viento (fig. 3.70b) sobre la superficie indican zonas de convergencia en la ubicación del tornado. El viento que se mueve desde el Atlántico, y va ascendiendo a las regiones montañosas para posteriormente girar en dirección oeste. Dichas corrientes chocan con otras provenientes de las zonas de valle que bordean a los picos más altos.

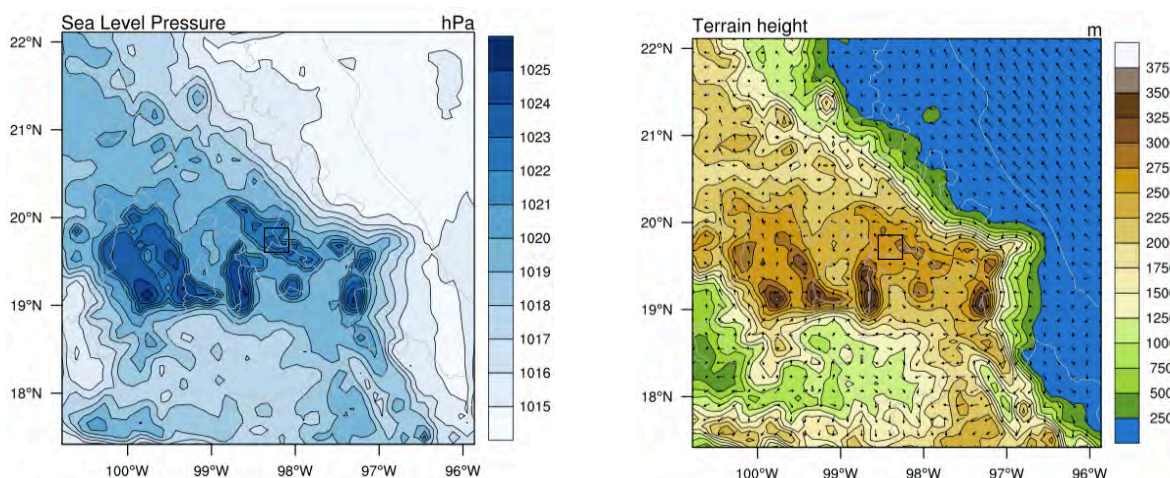


Figura 3.70 Distribución de presión a nivel del mar (a) y topografía con vectores de viento (b) a nivel del suelo.

El corte topográfico de humedad relativa y temperatura muestra una distribución bastante peculiar. Para el corte a longitud constante (fig. 3.71a), se observa como una masa de aire seco, entre los 40% y 50% se mantiene en niveles medios de 3 a 6 km en la vertical, mientras una masa de aire de entre 70% y 90% de humedad ingresa por la zona alta del dominio, pareciendo desplazarse. Una masa un tanto más húmeda se ubica sobre la ladera de la montaña vecina lugar donde se ubica la zona de estudio. Por su parte, el corte transversal (fig. 3.71b) muestra una gran mancha de aire seco (<40% de humedad) sobre la que se alzó la

masa de aire húmedo (80%). Este corte, muestra la entrada de aire seco en forma de cuña y su interacción desplazando zonas de mayor humedad hasta los 7 u 8 km. Esto favorecería la inestabilidad atmosférica, la liberación de calor y el generación de tormentas fuertes, y dadas las condiciones por encima de los 9 km, posiblemente la caída de granizo.

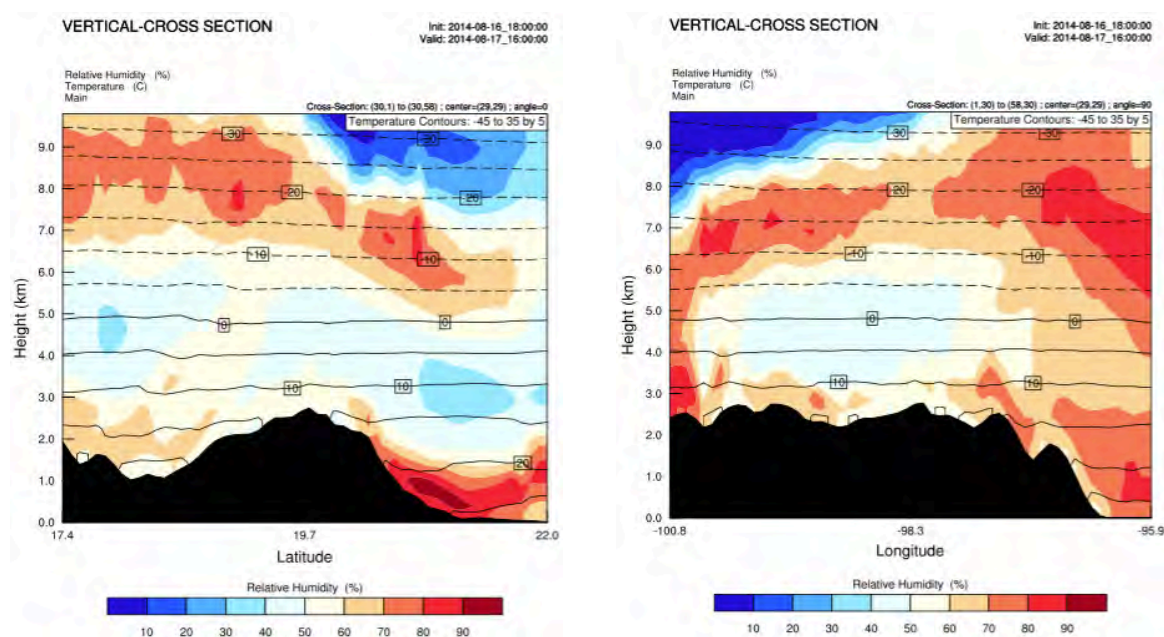


Figura 3.71 Cortes verticales de terreno con distribución de humedad relativa y temperatura en D1 a longitud (a) y latitud (b) constante.

Por otro lado, el corte en alta resolución (D3) a longitud constante (fig. 3.72a) del modelo, arrojó valores de vapor de agua en porción de mezcla de hasta 0.0068 kg/kg a los costados del punto de ubicación del tornado, con un leve disminución hasta los 0.006 kg/kg sobre el punto analizado. Estos valores altos se concentran sobre los primeros 4 km en la vertical. La vorticidad potencial indica en su mayoría valores positivos de hasta 4 PVU, los valores más altos bordean las zonas montañosas, lo que indicaría que la topografía es un valor importante para la generación de potencial en la rotación en el viento. El mismo caso se ve en el corte transversal (fig. 3.72b), aunque ahora los valores de vorticidad son relativamente bajos, aproximadamente de -1.6 PVU.

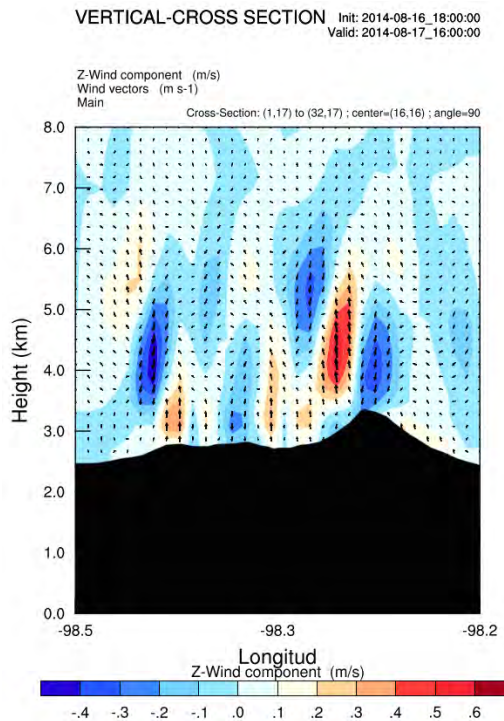
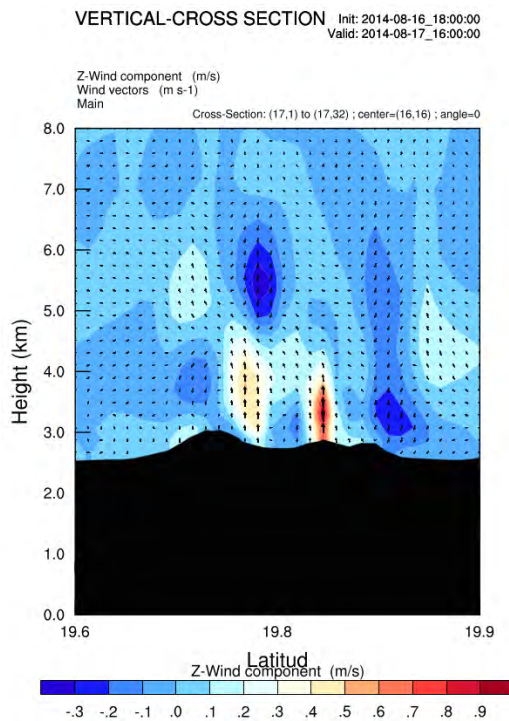
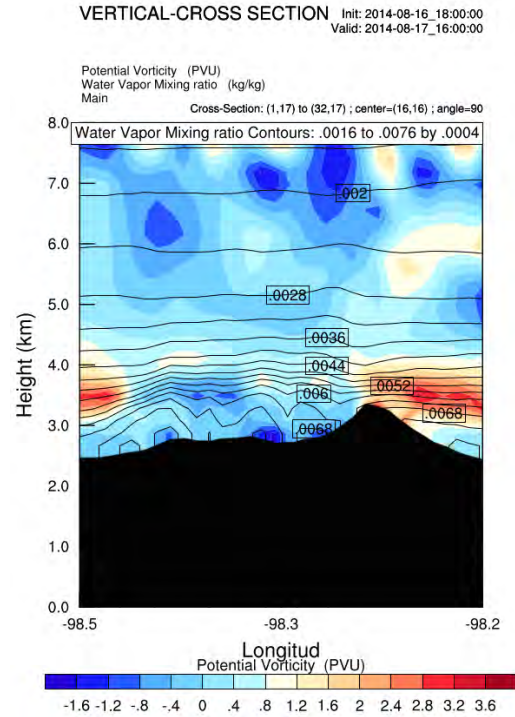
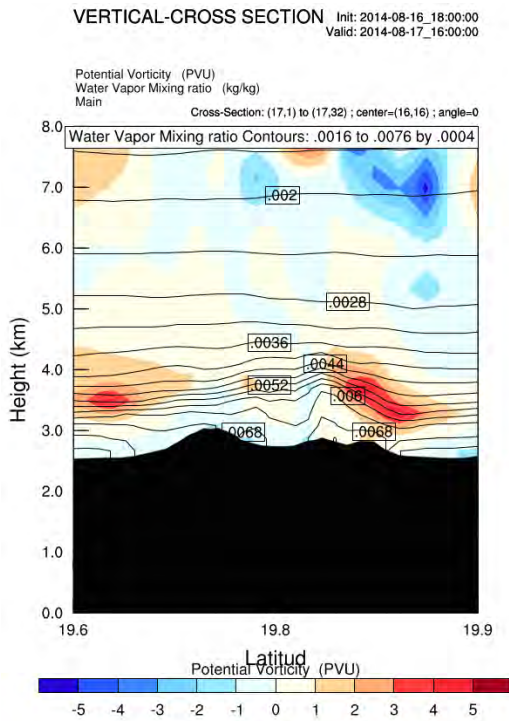


Figura 3.72 Corte vertical de terreno con distribución de vorticidad potencial con vapor de agua en porción de mezcla (a y b) y velocidad del viento en Z con vectores de viento (c y d) en D3.

En el caso de la velocidad del viento en Z (fig. 3.72c) se muestra una clara zona de corrientes ascendentes justo sobre el punto del tornado de entre 0.7 y 0.9

m/s. Una más a unos centenas de metros intercaladas sobre corrientes descendentes. Estas corrientes de aire que suben no sobrepasan los 4.5 km sobre la superficie. Las simulaciones parecen indicar que la convergencia de viento provocó celdas de convección, donde justo sobre las intercalaciones de corrientes que suben y bajan fue el lugar donde se registró el tornado.

El corte transversal (fig. 3.72d) es un tanto más complejo. El terreno parece influir para la ascensión de aire del valle hacia la ladera, misma corriente converge con una otra que baja de hasta los 5km en la vertical. Sobre la zona del tornado una corriente ascendente (0.5 m/s) es muy clara, nuevamente intercalada con corrientes que suben y bajan a las laterales del punto. Para este caso, de nuevo zonas de convección son bastante claras en el dominio. La presencia de humedad y la entrada de aire seco, provocaría una serie de condiciones inestables para que al aire comenzara a interactuar con el terreno, que junto con el potencial de rotación del aire sobre la superficie produjo condiciones favorables para la formación y enderezamiento del vórtice del que se desprendió el fenómeno.

3.4 Conclusiones

En este capítulo se presentaron y analizaron diez diferentes casos de tornados en México. Se utilizaron medios periodísticos, trabajos de tesis, investigaciones y disposiciones oficiales a fin de recrear las características principales del impacto de tales eventos. Por medio del modelo WRF se simularon las condiciones meteorológicas a nivel de mesoescala bajo las cuales los tornados se llevaron a cabo. Además de las simulaciones, cartas interpretadas y boletines meteorológicos del SMN se expusieron a manera de representar las condiciones a escala sinóptica.

Por las características de los eventos diversas interacciones dinámicas fueron encontradas. Desde la típica entrada de un frente frío en contraste con una masa de aire húmeda y caliente, la formación de canales de baja presión en conjugación con vaguadas o zonas de viento máximo y por supuesto, la reproducción de zonas de tormenta derivadas de bandas nubosas de ondas o tormentas tropicales. De igual forma, una gran variedad de ambientes orográficos

fueron explorados; desde zonas totalmente planas y a nivel del mar, tales como las planicies de Yucatán, Sinaloa y Veracruz, hasta zonas de altiplano como Hidalgo, incluso, zonas orográficamente complejas dentro del E.N.T.

Los cortes transversales de terreno así como las vistas de planta expuestas por medio de las gráficas muestran características interesantes. La creación de zonas de abanicos de divergencia, zonas de convergencia de viento, formación de líneas secas, entradas de humedad y calor en grandes proporciones, zonas de viento con tendencia a rotar e inclusive zonas de alta presión jugando un papel interesante en la meteorología local bajo la que se observaron tornados en el país.

El modelo WRF, en base a las observaciones hechas, se ha mostrado como una buena herramienta para la simulación de la meteorología de mesoescala de los casos analizados. Los resultados arrojados y sus análisis son una primera aproximación a este tema que carece de estudio en el país. Asimismo, exponen un panorama bastante complejo e interesante para posteriores estudios. En el siguiente capítulo se hace un recuento de las principales características en común que se encontraron sobre los casos analizados.

3.5 Referencias

- Avendaño, A. (2009). Evidencias y reconocimiento de los tornados en México. El caso del tornado de Quintana Roo. Presentado en XVIII Congreso Mexicano de Meteorología. III Congreso Internacional de Meteorología de la OMMAC, 2009. Disponible en: <http://ciatts.ciesas.edu.mx/Documentos/Ponencias/OMMAC-Cancun2009-Asuncion.pdf>.
- Cancún Foros (2009). Tornado en Leona Vicario. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.cancunforos.com/tornado-en-leona-vicario/>.
- Cuarto Poder (2014). Tornado deja destrozos en barrios y colonias de San Cristóbal de las Casas. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.cuartopoder.mx/tornado-deja-destrozos-en-barrios-y-colonias/>.

- Diario Oficial de la Federación (2013). Declaratoria de desastre natural por la ocurrencia del tornado el día 26 de julio de 2013, en el municipio de Ojinaga del estado de Chihuahua. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5309541&
- El cambio de Michoacán (2014). Tornado azota Tangancícuaro. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.cambiodemichoacan.com.mx/nota-220230>.
- El Debate (2012). Tornado deja daños en agrícolas de Costa Rica y Villa Juárez. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://193.47.76.62/eldebate/noticias/?IdArt=12480907&IdCat=12302>.
- El Golfo (2014). Tornado en Hidalgo deja 6 heridos. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.elgolfo.info/nota/269271-tornado-en-hidalgo-deja-seis-heridos/>.
- El Piñero de la Cuenca (2014). Emergencia en Otatitlán: tromba y turbonada destruyen viviendas y lesionan a 5 personas; urgen auxilio. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.elpinerodelacuenca.com.mx/epc/index.php/cosamaloapan/77414-emergencia-en-otatitlan-tromba-y-turbonada-destruyen-viviendas-y-lesionan-a-cinco-personas-urgen-auxilio>.
- El Sol de León (2013). Asusta tromba en Yuriria. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.oem.com.mx/elsoldeleon/notas/n3061136.htm>.
- El Tuxtepecano (2014). Tornado causa destrozos en Otatitlán. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://eltuxtepecano.com/2015/?p=36413>.
- El Universal (2014). Tornado deja 6 lesionados y daños en Hidalgo. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.eluniversal.com.mx/estados/2014/tornado-6-lesionados-danios-hidalgo-1031097.html>. fecha=07/08/2013.

- La Voz de Michoacán (2014). Activan alerta por tornado en Tangancícuaro. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.vozdemichoacan.com.mx/activan-alerta-por-tornado-en-tangancicuaro/>.
- León, J. (2013). Percepción del riesgo y expresiones de vulnerabilidad ante tornados. El caso de Huescalapa, municipio de Zapotiltic, Jalisco. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad de Colima. Colima, México.
- Macías, J., Campos, M. y Avendaño, A. (S/A). Tornado del Zócalo, Distrito Federal. Fichas. En Comisión Interinstitucional para el Análisis de Tornados y Tormentas Severas (CIATTS-CIESAS). Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://ciatts.ciesas.edu.mx/Documentos/Fichas/f10/f10.pdf>.
- Mundo Veracruzano (2014). Una muerte y lesionados deja tromba en Otatitlán. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.mundoveracruzano.com/una-muerte-y-lesionados-deja-tromba-en-otatitlan/>.
- Noroeste (2012). Azota remolino en Culiacán y Navolato. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://noroeste.com.mx/publicaciones.php?id=811398>.
- Por todos los medios (2012). Extraño tornado en Sinaloa deja 4 heridos. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: http://www.portodoslosmedios.com.mx/web/index.php?option=com_k2&view=item&id=5836:extra%C3%B1o-tornado-en-sinaloa-deja-4-heridos&Itemid=334.
- Servicio Meteorológico Nacional (2009a). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 285. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2009b). Discusión Meteorológica. Boletín No. 143. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2009c). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 286. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>

- Servicio Meteorológico Nacional (2012a). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 366. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2012b). Discusión Meteorológica. Boletín No. 153. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2012c). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 307. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2012d). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 440. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2012e). Discusión Meteorológica. Boletín No. 220. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2012f). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 441. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2012g). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 516. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2012h). Discusión Meteorológica. Boletín No. 257. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2012i). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 517. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2013a). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 401. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2013b). Discusión Meteorológica. Boletín No. 203. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2013c). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 402. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2013d). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 413. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2013e). Discusión Meteorológica. Boletín No. 209. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2013f). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 414. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>

- Servicio Meteorológico Nacional (2014a). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 161. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2014b). Discusión Meteorológica. Boletín No. 081. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2014c). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 162. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2014d). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 400. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2014e). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 401. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2014f). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 436. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2014g). Discusión Meteorológica. Boletín No. 219. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2014h). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 437. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2014i). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 458. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2014j). Discusión Meteorológica. Boletín No. 230. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2014k). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 459. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Sin Embargo (2012). Fuertes vientos y lluvia azotan al DF; destruyen parte del plantón del CNTE en el Zócalo; no hay lesionados. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.sinembargo.mx/01-06-2012/251850>.
- Televisa Regional (2013). Se forma tornado sobre la Laguna de Yuriria. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.televisaregional.tv/leon/noticias/Se-forma-tornado-sobre-la-laguna-de-Yuriria---216459571.html>.

- The Weather Research and Forecasting Model (2015). WRF ARW Users' Page. En WRF Model Users' Page. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>.
- The Weather Research and Forecasting Model (S/A). Home page. En WRF Model Page. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.wrf-model.org/index.php>.
- Uno Tv (2014). Categoría F0, tornado que dejó sin casas a familias de Chiapas. Consultado el 25 de marzo de 2015. Disponible en: <http://www.unotv.com/noticias/estados/suroeste/categoria-f0-tornado-que-dejo-sin-casas-a-familias-de-chiapas-970681/>.

Capítulo IV

Análisis e interpretación de resultados

4.1 Condiciones sinópticas

Si bien es cierto que los tornados son eventos puntuales y de pequeña escala, la revisión de la meteorología sinóptica brinda un panorama general para la comprensión de movimientos de masas de aire, creación de zonas de inestabilidad atmosférica e interacción de sistemas meteorológicos. Esto generalmente se ve complementado con imágenes de radar de efecto Doppler, lamentablemente, para la presente investigación no se logró obtener dicha información, por lo que el análisis sinóptico se limitó a imágenes de satélite. En resumen, para los 10 casos analizados se encontraron 3 diferentes escenarios.

El primer caso se da con la interacción entre la entrada de un frente frío con una zona de aire cálido y húmedo, en este caso representado por un canal de baja presión. En tal escenario sólo un evento fue cuantificado. Este se dio en la zona norte del país, en los límites con E.U.A. Por lo que se puede decir, que al menos en contexto sinóptico, dicha interacción es muy similar, por no decir igual, a la que se da en el norte del continente.

El segundo escenario se da cuando los tornados fueron observados bajo desprendimientos nubosos de alguna tormenta u onda tropical. Tales interacciones produjeron la formación de zonas o canales de baja presión, según sea el caso. Tal situación ocasionaría grandes extensiones con nublados prominentes y formación de nubes con desarrollo vertical, como cumulonimbos o cumulus congestus. En este segundo caso dos eventos fueron contabilizados. Uno en una zona plana a nivel del mar y el segundo en una zona con mayor altitud y orografía compleja.

En el tercer, y más interesante escenario, fueron observados la interacción de canales de baja presión, vaguadas y zonas de inestabilidad con franjas de vientos máximos. Fueron cinco los casos observados en dicha interacción. A dos

casos más se le añadieron condiciones de líneas de convergencia y jets de bajo nivel. Todos ellos fueron observados en condiciones de orografía compleja y sobre la franja montañosa central del país, con altitudes considerables y bajas latitudes. Sólo un evento de estos entra en zonas planas. En estos casos la formación de tormentas orográficas con los componentes sinópticos mencionados explican el desarrollo de los tornados.

4.2 Meteorología de mesoescala

La temperatura a nivel de suelo sobre la que se observaron tornados varía entre los 16°C hasta los 32°C. Cuatro eventos se dieron entre los 20°C y 24°C, cuatro más entre 30°C y 32°C y dos en 16°C aproximadamente. En esta variable no existe una valor base, sin embargo se observa que en general se dieron en condiciones de temperaturas altas (exceptuando los 16°C). Tal situación es considerada normal, dado que cuanto mayor sea esta, la inestabilidad en la parte baja de la atmósfera tendería a ser mayor. En ocho de los diez eventos la entrada de calor sobre alguna zona del dominio es visible. Ya sea de las zonas costeras cercanas (Pacífico o Golfo) o por valles bajos. De igual forma, gradientes térmicos derivados de zonas montañosas sobre las cuales se dieron los eventos de tornado son perceptibles en ocho de los diez casos.

Para la humedad relativa tampoco se encontró un valor base. Los porcentajes oscilan entre 40% y 88%. La mayoría se quedan en valores medios de 60% y 70%. En sólo un caso se encontró un contraste muy claro de valores, donde una masa de aire seco se encuentra e interacciona con una masa más húmeda. En siete de los diez eventos las entradas de humedad son bastante claras, y los océanos son los principales aportadores de dicho elemento. Otro aspecto interesante es que la mitad de los casos se observa (en unos eventos más claros que en otros) la formación de una línea seca, es decir una región alargada de contraste de humedad donde los gradientes son bastante fuertes.

Los cortes verticales de terreno en el dominio madre, con temperatura y humedad relativa confirman lo antes visto en las secciones en planta. En los diez

casos hay contrastes de humedad relativa. En cinco casos la entrada de masas de aire húmedo son las dominantes, en los otros cinco son la entrada de masas de aire seco. Sea cual sea el caso, la interacción entre masas de aire con características contrastantes provocarían la convección en las regiones analizadas y por ende la posibilidad de manifestación de tiempo severo. Tales contrastes de masas se ubican entre los 3 km y 9 km en la vertical.

La velocidad del viento en superficie tuvo valores entre los 0.002 m/s hasta los 0.45 m/s. El modelo arrojó valores muy diferenciados para cada uno de los casos estudiados. De los diez dominios, cuatro estuvieron dominados por corrientes descendentes y seis por corrientes ascendentes, y de nuevo, no hay un patrón establecido. La característica en común que mostró la mayoría de los casos (siete de diez), fue la formación de celdas de convección, por la conjugación de corrientes ascendentes y descendentes tanto por convergencia como divergencia de viento en superficie. Lo anterior indica que en la mayoría de los eventos la atmósfera se encontraba en condiciones inestables.

Para la vorticidad potencial, es decir la tendencia del viento a rotar en superficie, en cuatro de los eventos se obtuvieron valores nulos en la mayor parte del dominio. Los restantes seis casos se ubicaban en zonas con valores entre 0 y -2 PVU. El valor máximo obtenido fue de 14 y el mínimo de -2. Como característica particular, en tres casos se vieron contrastes claros en la zona del tornado. Este parámetro, aunque no calcula directamente el rotacional del vector velocidad, si funciona como indicador de zonas propensas del viento a rotar.

Los vectores de viento en superficie muestran en la mitad de los casos que el tornado se dio en zonas de convergencia. Cuatro eventos más sobre zonas de divergencia y sólo un evento en una zona donde el viento recorría de forma lateral. Sea cual sea el comportamiento, en la mayoría de los casos se dio sobre zonas inestables, viables para la formación de tormentas severas. Otra característica interesante es que en nueve casos las regiones montañosas cercanas a la zona estudiada servían para la formación de corrientes que descendían y convergían con otras, generalmente provenientes de zonas más bajas. Por último, seis de los casos

mostraron como zonas de valle entre montañas canalizaban las corrientes de viento en la zonas de estudio.

Los cortes verticales de terreno en alta resolución con la velocidad del viento en la vertical y los vectores de movimiento muestran que seis eventos se dieron en zonas de valle entre montaña(s) y cuatro más en regiones completamente planas. La velocidad del viento en la vertical varía de los 3.5 m/s a 0.2 m/s. Tales corrientes se ven desprenden los 3.5 km sobre la superficie hasta poco más de 800 m. En los seis casos de zonas montañosas, se observó convección sobre las zonas orográficas y el desprendimiento de corrientes de viento hacia el valle o viceversa, creando al centro del dominio, localización del tornado, convergencia o divergencia, según sea el caso. En la siguiente sección se hace una discusión más amplia.

4.3 Clasificación de tornados

Hecho el análisis de los 10 eventos de tornados seleccionados se encontraron evidencias de la formación de al menos dos tipos de fenómenos en el país: el derivado de una tormenta supercelda y el no supercelda, o designado aquí como tornado orográfico (nombre sugerido). Las características de ambos tipos de tornados ya han sido analizados anteriormente por literatura estadounidense, no obstante, es en el segundo caso donde la presente investigación hace observaciones puntuales dado que el desarrollo de estos eventos se liga directamente a la orografía bajo la cual fueron observados.

4.3.1 Tornado supercelda

Para los casos analizados dos eventos corresponden a este tipo de fenómenos. El ocurrido en Ojinaga, Chihuahua y el de Leona Vicario, Quintana Roo. Las características principales y que ya se analizaron en el capítulo I de la tesis son: el desarrollo del evento sobre zonas planas o relativamente planas con elevaciones de entre 0 y 1000 msnm. Los sistemas que interactuaron fueron por una lado una

masa de aire húmedo y caliente con otra masa de aire un tanto más seca y fría (tal interacción como tal se ve mejor reflejada en el caso de Ojinaga).

Tal choque de masas provocó fuertes sistemas convectivos en las zonas estudiadas. Estas corrientes ascendentes y descendentes se extendieron por encima de los 3 km en la vertical con velocidades elevadas de hasta 3.5 m/s según el modelo. Los valores de vorticidad potencial también mostraron niveles altos, al menos más de los que normalmente se observaron en los otros casos. La creación de zonas de inestabilidad y tormentas con rotación (superceldas) fue evidente (fig. 4.1). De tal sistema se desprendió el tornado, y en ambos casos tuvo una duración mayor a los 10 minutos.

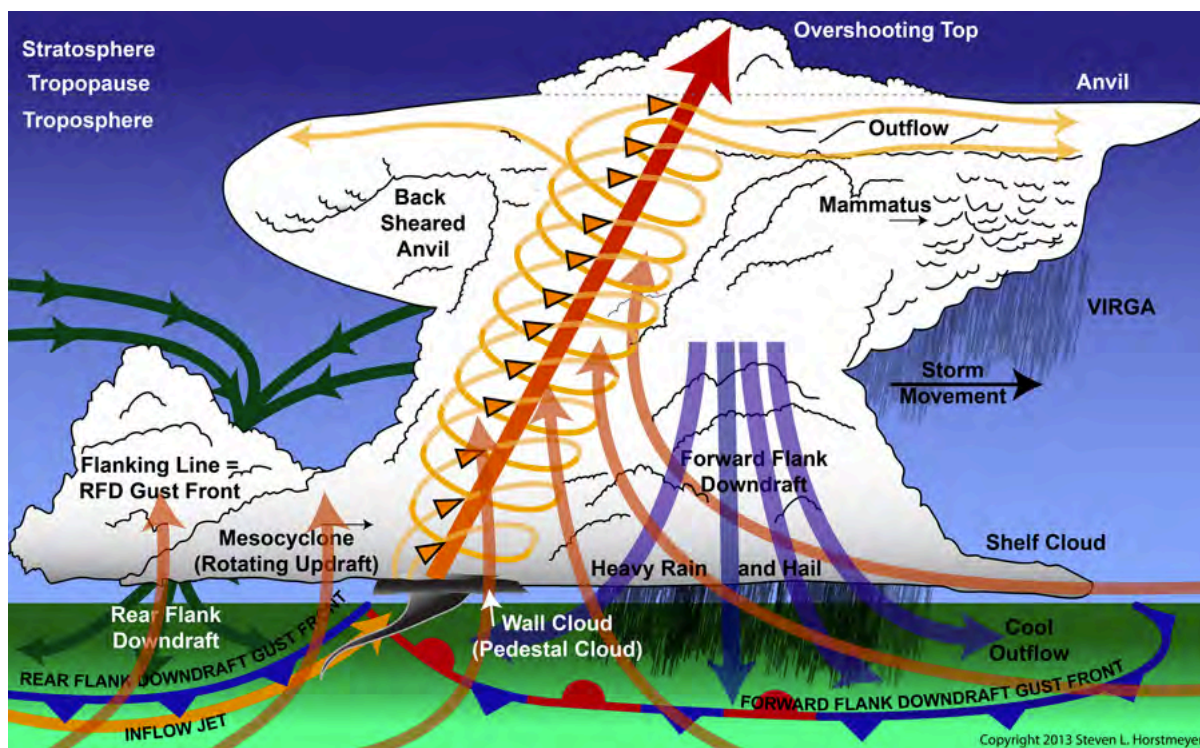


Figura 4.1 Diagrama de formación de tornado supercelda.

Fuente: http://3.bp.blogspot.com/-Tr4Cg2nJdUc/UbyOk4Lhn_I/AAAAAAAAAco/qpdthws344A/s1600/SupercellEIIRenoSM.jpg

4.3.2 Tornado no supercelda (tornado orográfico)

Los restantes ocho casos de tornado pertenecen a este tipo de eventos. Estos se asocian a latitudes más bajas y se distribuyen desde la región del Pacífico en Sinaloa, cruzando paralelamente al E.N.T. y terminando en los Altos de Chiapas. Dos eventos se dieron en altitudes no mayores a los 500 msnm y los restantes entre los 1000 y 3000 msnm. Una característica importante de estos segundos, es que fueron observados en zonas de valle bordeados a uno o los dos costados, por montañas, creando diferencias de altura considerables en unos pocos kilómetros cuadrados.

Sobre la temperatura se observaron gradientes térmicos importantes en regiones cercanas al punto analizado. Tales gradientes en buena parte asociados a los niveles de altura. La entrada de humedad y calor también fueron aspectos repetitivos en estos eventos. Dados por su cercanía a los océanos o incluso, y aquí se hace un anexo a este tipo de fenómenos, derivados de las bandas nubosas desprendidas de alguna Tormenta u Onda Tropical.

La creación de zonas de convergencia o divergencia en superficie fue otro de los parámetros considerados típicos en este tipo de fenómenos. Tales regiones de movimiento del viento son asociados a la orografía, de ahí el nombre de tornados orográficos. Las observaciones hechas indican que las interacciones montaña-valle o valle-montaña juegan un papel esencial en la creación de condiciones de inestabilidad en la atmósfera baja, estableciendo así zonas de convección relativamente pequeñas (comparadas con el caso de tornados supercelda) de hasta 1 km en la vertical. Por último, valores bajos de vorticidad potencial también son asociados en estos fenómenos.

La formación de este tipo de eventos se podría dividir en una serie de etapas bien diferenciadas. Partiendo de la rotación del viento sobre la horizontal, vorticidad, derivado del roce o interacción de corrientes de viento a pocos metros sobre la superficie. En ocasiones originadas de la geometría del terreno, donde los valles funcionan como canales de guía. Esta rotación continuaría hasta formar vórtices rotando a velocidades considerables sobre el suelo. Si esta zona de vorticidad se

ve cruzada con una región con convección importante, y por ende una línea de corrientes ascendentes lo suficientemente fuerte, comienza el proceso de enderezamiento del vórtice (fig. 4.2a).

La zonas de convección e inestabilidad se dan por el contraste de masas de aire. En el caso de México, el choque de masas frías y secas con húmedas y calientes no es tan marcado en la zona central del país. En el caso de los tornados orográficos, se plantea una situación donde la entrada de frentes cálidos y humedad (muchas veces del océano) interactúan con el aire proveniente de zonas altas y que es generalmente más frío. Los gradientes formados por el choque de estas masas es lo suficientemente fuerte para la creación de convección importante y tormentas en las zonas de valle cercanas. Las corrientes que descienden por las laderas de las montañas, impactan directamente con el viento del valle y provoca así, zonas de inestabilidad atmosférica.



Figura 4.2 Proceso de formación del tornado de Zapotiltic, Jalisco.

Fuente: Elaboración y recopilación propia con múltiples fuentes¹⁹.

Estas corrientes en la vertical se incrementan al contacto con la zona de vorticidad sobre superficie, provocando que el vórtice siga su proceso de enderezamiento (fig. 4.2b). Al alinearse lo suficiente, y tener un contacto con la nube

¹⁹ <http://i.ytimg.com/vi/TCzAi7tx9B8/hqdefault.jpg>
http://1.bp.blogspot.com/-9GZsiyZ8oUU/UCHrGZctGYI/AAAAAAAAAMOM/6DwQHRpv76M/s1600/557399_292556954185502_1813324891_n.jpg
<http://i.ytimg.com/vi/EGCEr-Hrdzg/hqdefault.jpg>

madre (generalmente una cumulonimbos o cumulus congestus), comienza la etapa madura del tornado. El centro de baja presión del sistema succiona parte de la base de la nube, aumenta la velocidad del viento a los costados del vórtice, creando una región de escombros sobre la superficie (fig. 4.2c). La duración de tal proceso no va más allá de los 30 minutos, posteriormente le sigue la etapa terminal del tornado. El mecanismo, en general, es una representación en pequeña escala de los contrastes de masas en E.U.A., no obstante, en este caso se plantea al terreno como el origen de tales.

4.4 Conclusiones

Tras el análisis de los 10 eventos de tornado se encontraron algunos patrones. A niveles sinópticos la ocurrencia de estos eventos se dividen en tres tipos; el contraste de choques de masas de aire húmeda y caliente con otra fría y seca, el desprendimiento de bandas nubosas de tormentas u ondas tropicales y bajo condiciones de canales y zonas de baja presión, vaguadas y líneas de convergencia en conjunto con zonas de vientos máximos.

Las simulaciones numéricas muestran panoramas similares a los anteriores. Las interacciones de masas de aire son constantes. La humedad relativa y temperatura sirven como referencia de esto. Valores de vorticidad potencial, velocidad del viento en superficie y en la vertical dan razón de la inestabilidad creada. La orografía compleja y las grandes altitudes favorecen el movimiento de masas de aire y el contraste entre ellas.

A razón de esto se definieron 2 tipos de tornados. El supercelda y no supercelda (o tornado orográfico). Esta investigación sugiere que las condiciones para la formación del segundo tipo de eventos en el país son mayores a las que se creía anteriormente. Así mismo, se plantea como una primera aproximación al estudio de la meteorología de estos fenómenos en México. Teniendo como punto de partida las condiciones geográficas tan diferentes con el país vecino del norte.

Conclusión final

La presente tesis establece un primer acercamiento a la problemática del entendimiento de la meteorología bajo la que se han observado tornados en el territorio mexicano. La primera sección aborda el marco teórico general en el estudio de estos fenómenos a nivel mundial. Las generalidades de los eventos, su climatología y clasificación sobre todo, dan razón del gran avance que otros países, incluso latinoamericanos, tienen sobre el tema.

La segunda sección se hace un análisis espacial y temporal generalizado del reporte de tornados en México. Se obtienen a raíz de la investigación 54 eventos en poco más de dos años de recopilación de datos. Estos, anexados a los 138 registros existentes funciona como una estadística actualizada de los reportes de tornados en el país hasta junio del año en curso. La curiosa distribución espacial sobre el E.N.T. provee de una primera visión a la problemática de la formación de tornados en México, dado que las condiciones de orografía compleja no son muy comunes para su generación.

La discusión y análisis a detalle se da en la tercera sección. En ella se analizaron 10 diferentes casos de tornado en México; desde regiones muy al norte y colindantes con E.U.A. hasta zonas al sur del país como los Altos de Chiapas. La meteorología de mesoescala se analizó por medio el modelo WRF a partir de 3 dominios y con una resolución de malla de hasta 1 km. Las observaciones de cada uno de los eventos fueron dadas a partir de variables como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento en la vertical, vorticidad potencial, presión a nivel del mar, vectores de viento en superficie, etc.

Al final, el análisis de características y similitudes derivó en la caracterización meteorológica de dos tipos de eventos: supercelda y no supercelda, cada uno de ellos con características propias de formación a niveles sinópticos y mesoescalares. El trabajo muestra el potencial de investigación de estos fenómenos y el gran campo de aplicación y profundización del tema.

Anexo 1

Tornado de Ciudad Acuña, Coahuila: el evento más mortífero en la historia de México

1.0 Área de estudio

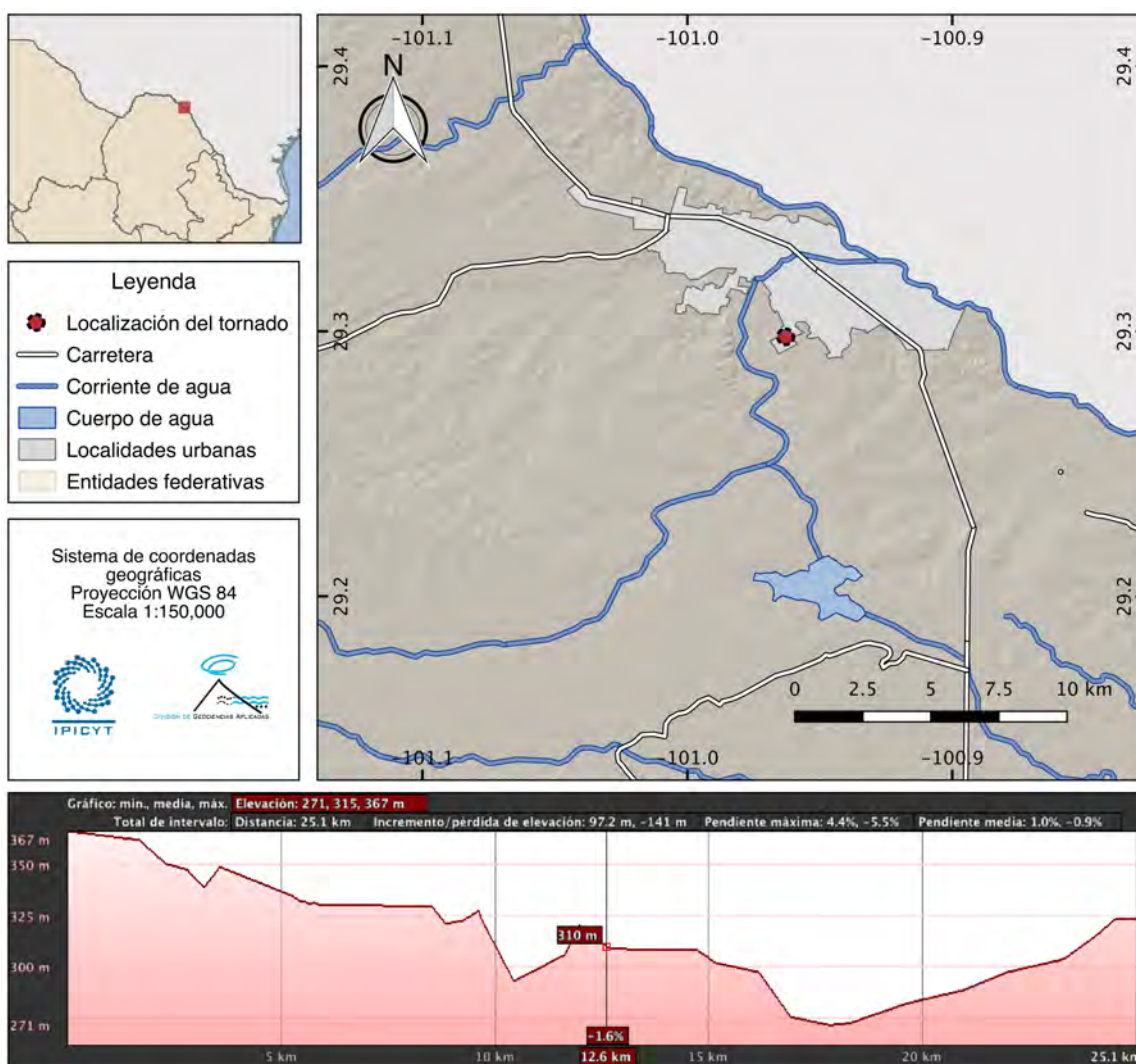


Figura 1.1 Mapa de ubicación del tornado de Ciudad Acuña, Coahuila.

1.1 Características generales

Fenómeno acontecido el 25 de mayo de 2015 en la cabecera municipal de Acuña, Coahuila cerca de las 05:50 horas. El tornado se originó en la región sur de la mancha urbana pasando sobre unidades habitacionales en una línea de dirección este-oeste de aproximadamente 3 kilómetros. No se conoce la duración exacta del fenómeno. Los testimonios mencionan que fueron apenas 10 segundos lo que causó los destrozos en sus hogares, lo que indicaría una alta velocidad de desplazamiento (**El Siglo Coahuila, 2015 y Noticieros Televisa, 2013**). La duración como tal, y según las interpretaciones hechas por imágenes satelitales y de radar (sección 1.2) fue de aproximadamente 20 minutos. Ostentó rachas de viento calculadas en 220 km/h y fue clasificado como un F2 en la Escala Fujita (**Noticias Terra, 2015**).

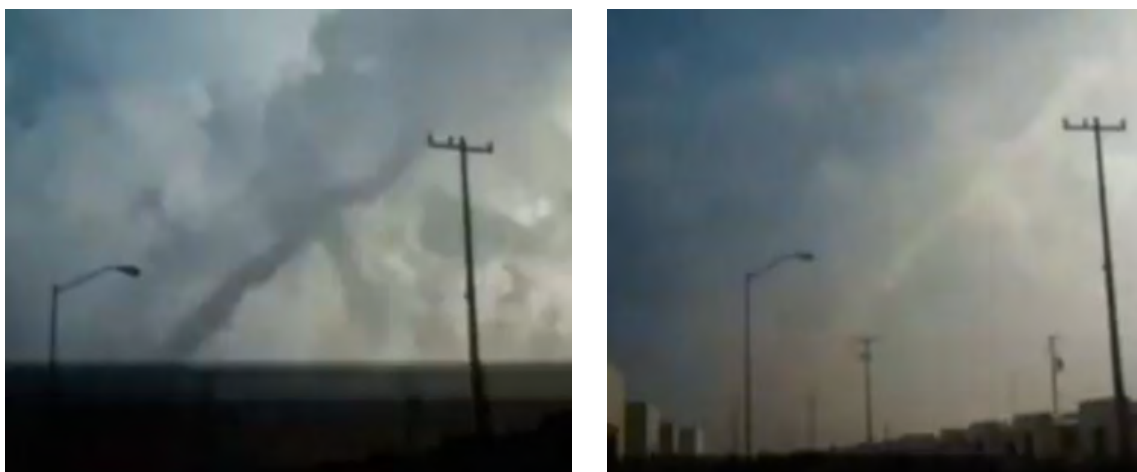


Figura 1.2 Fotografías del evento.

Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=TEWICo275UA>.

Los daños causados por el impacto de este tornado fueron enormes (fig. 1.3). Se contabilizaron un total de 290 personas lesionadas, de las cuales 94 tuvieron que ser hospitalizadas, además de 14 lamentables pérdidas humanas. Se calcularon un total de 1,300 viviendas afectadas: 600 de las cuales tuvieron pérdida total y 700 daños parciales (**El Financiero, 2015**). Además a 4,684 viviendas se les interrumpió el servicio de energía eléctrica. Más de 3 escuelas destruidas, daños

incontables a automóviles, postes de luz, tendido telefónico, árboles arrancados de raíz, entre otros. Se estimaron 2,300 damnificados y se habilitaron 8 albergues temporales. La Secretaría de Gobernación emitió el estado de emergencia y posteriormente la Declaratoria de Desastre Natural (**DOF, 2015**). Se calculó que el costo de recuperación sería de 250 mdp, sólo para las viviendas (**Excelsior, 2015**). Se clasifica, según nuestros datos, como el peor desastre por tornado en México en los últimos 16 años.



Figura 1.3 Tipos de daños ocasionados por el tornado.

Fuente: Elaboración propia con información de Telemundo Dallas.

1.2 Condiciones sinópticas

El SMN en su Boletín Meteorológico de las 06:00 horas del 25 de mayo enunciaba que el Sistema Frontal No. 53 se extendía sobre el noroeste de Coahuila, favoreciendo el potencial de lluvias acompañadas de tormentas eléctricas y caída de granizo en Coahuila y Nuevo León, mientras un canal de baja presión se ubicaba desde el norte hasta el centro del país e interaccionaba con entrada de humedad del Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe. Para la Mesa del Norte (lugar donde se ubica la zona de estudio), se pronosticaba temperaturas templadas por la mañana y noche y muy calurosas durante el día con un viento en dirección variable de 25-45 km/h con rachas (**SMN, 2015a**).



Figura 1.4 Imagen interpretada del satélite GOES para las 06:00 horas.

A esa misma hora el SMN emitió otro aviso meteorológico y pronóstico a muy corto plazo. Se mencionaba que las imágenes de satélite mostraban nubosidad con potencial de lluvias fuertes acompañadas de tormentas eléctricas, caída de granizo y vientos fuertes sobre el norte de Coahuila. Esto implicaba, según sus datos, la probable formación de torbellinos. Más no se emitió reporte alguno o alerta de tornado según los datos que se han recopilado (**SMN, 2015b**). Las imágenes de

satélite (fig. 1.5a) y radar de San Antonio, Texas, E.U.A. (fig. 1.5b) mostraban la formación de celdas de tormenta con potencial de rotación al igual que la llamada “Tornado Vortex Signature” algoritmo utilizado para la detección de formación de posibles tornados. La imagen de radar en 3-D (fig. 1.6) revela geometría de la celda a partir de la cual se desprendió el evento, con una extensión en la vertical de hasta 5 mil pies .

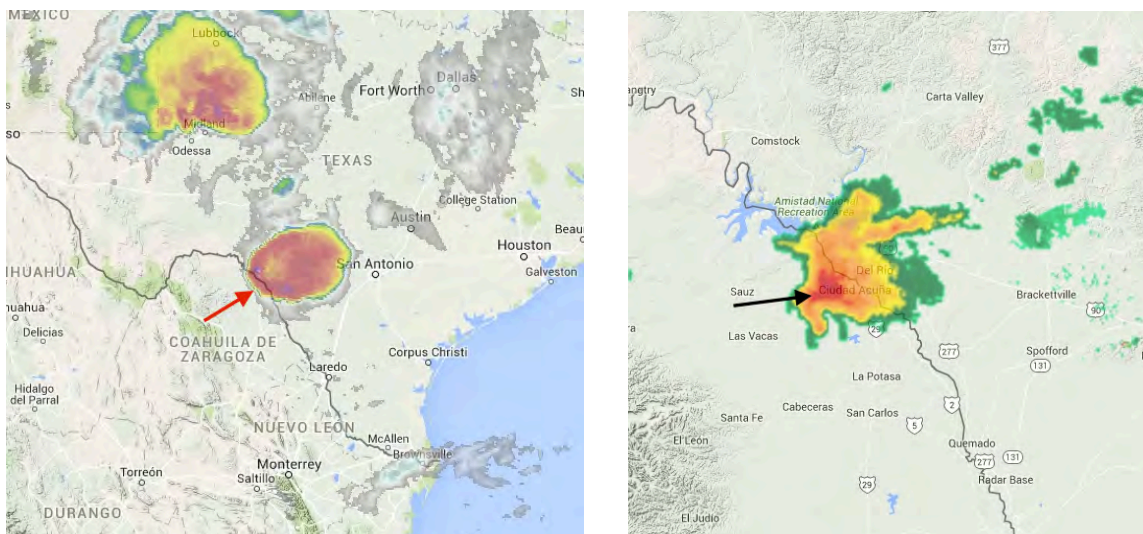


Figura 1.5 Imagen satelital (a) e imagen de radar (b) para las 5:50 horas.

Fuente: recopilación propia con información de Wunderground.

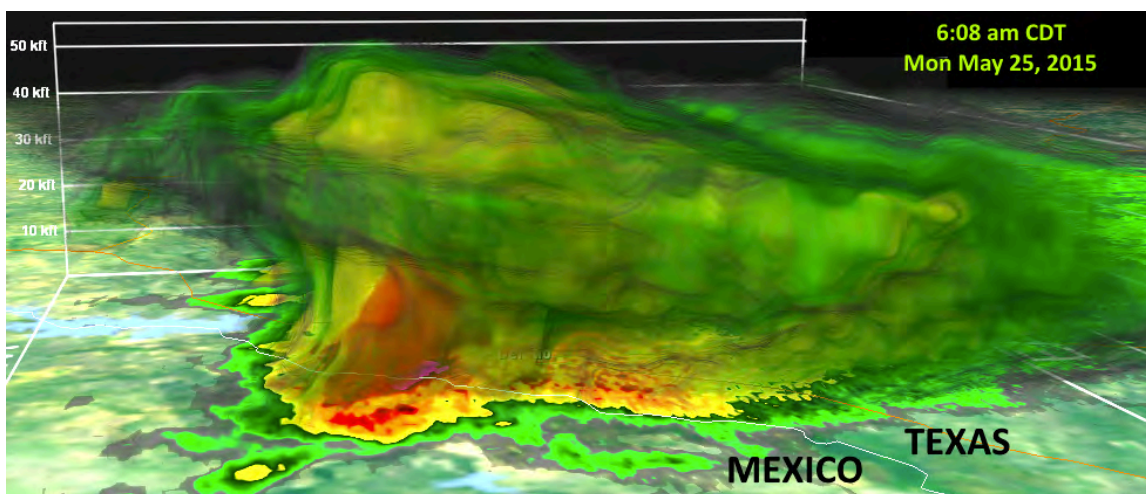


Figura 1.6 Imagen radar en 3-D para las 6:08 horas.

Fuente: cortesía de Stu Ostro.

1.3 Simulación numérica

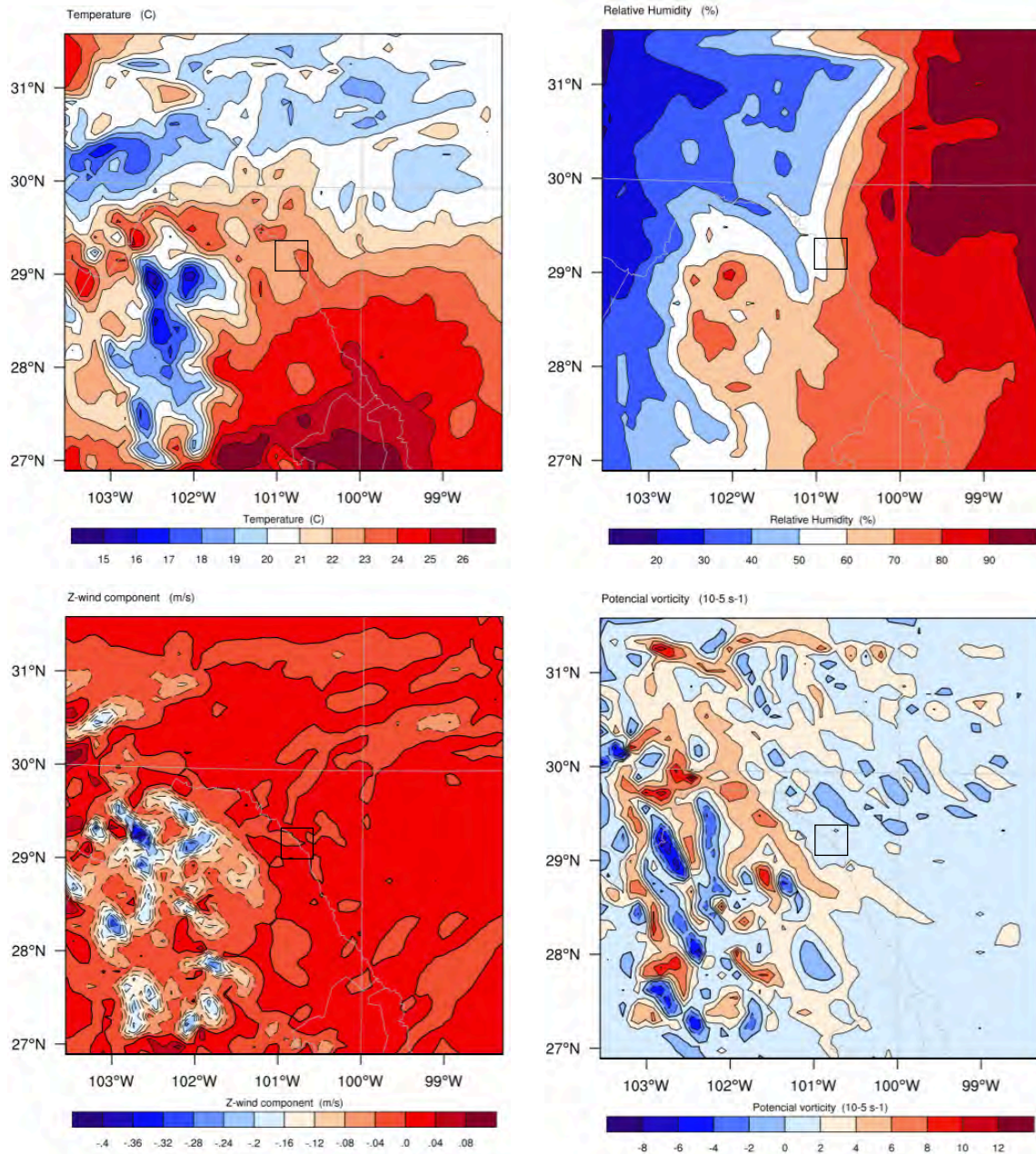


Figura 1.7 Distribución de temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento en la vertical (c) y vorticidad potencial (d) en superficie.

Para el caso de la temperatura a nivel del suelo el modelo arrojó un valor medio de 23°C al momento de la ocurrencia del tornado (fig.17.a). Una masa de aire cálido que se desplaza desde el sur del dominio contrasta en la región este (por

zonas montañosas) y norte (región de valle) con masas de aire más frío. Tal situación favorecería el ascenso de la masa caliente sobre la fría, la condensación de la misma cerca de los 8 kilómetros de altura y la formación de nubes de tormenta.

La humedad relativa apoya esta noción (fig. 1.7b), dado que el contraste de masas frías y secas con húmedas y calientes es muy evidente en el gráfico. Tal contraste se da entre los límites de lo 80% - 90% y 30% - 40%. Tiene una dirección preferencial de norte-sur, y la zona estudiada se ubica justo en el medio de tal contraste. El más importante se da en la zona montañosa (región suroeste del dominio) donde una masa cálida se encuentra con aire frío de la montaña. Esto formaría un sistema que se movería desde la región topográfica que sobresale, situación que se observó en las imágenes de radar previamente expuestas.

La velocidad del viento en la vertical (fig. 1.7c) muestra claras zonas de convección sobre la región montañosa y una muy leve (dado que las velocidades sobre las zonas montañosas son mucho mayores que sobre el valle) en la zona de estudio, que en general cuenta con valores positivos (corrientes ascendentes). Los valores máximos observados son de 0.4 m/s. La vorticidad potencial (fig. 1.7d) tiene una distribución similar, con valores de contraste en zonas montañosas pero que se acerca mucho más a la región de análisis. Tiene valores máximos de 12 PVU y mínimo de -6 PVU. Estos valores altos coinciden con los observados normalmente en tornados supercelda (ya explicados en el capítulo 4 de la tesis). Los valores nulos de vorticidad potencial no están extendidos, por lo que en general el dominio mostraba condiciones potenciales para la rotación del viento en la horizontal.

Para este caso específico se tuvo la posibilidad de observar los valores de CAPE (fig. 1.8a). Y si bien una región del dominio (la oeste) no cuenta con información, la sección estudiada y sus cercanías muestran tendencias claras. Se observa así un región de valores muy altos de CAPE (entre 2,200 y 2,800 J/kg) que indicaría potencial de tormentas muy fuertes. Y aunque el centro del sistema se encuentra al noreste de Ciudad Acuña, esto mostraría que el sistema tenía algunos cientos de kilómetros de extensión. Esta imagen corrobora lo observado en los satélites y radares, con una aproximación del modelo bastante buena a la realidad.

La última vista en planta muestra los vectores de viento en superficie y la topografía de la región (fig. 1.8b). El terreno nos indica que el tornado se desarrolló sobre los 400 msnm aproximadamente, en una zona totalmente plana y con regiones montañosas al oeste. Los vectores indican zonas de turbulencia por la región montañosa que convergen con viento en dirección suroeste-noreste cerca de la región analizada.

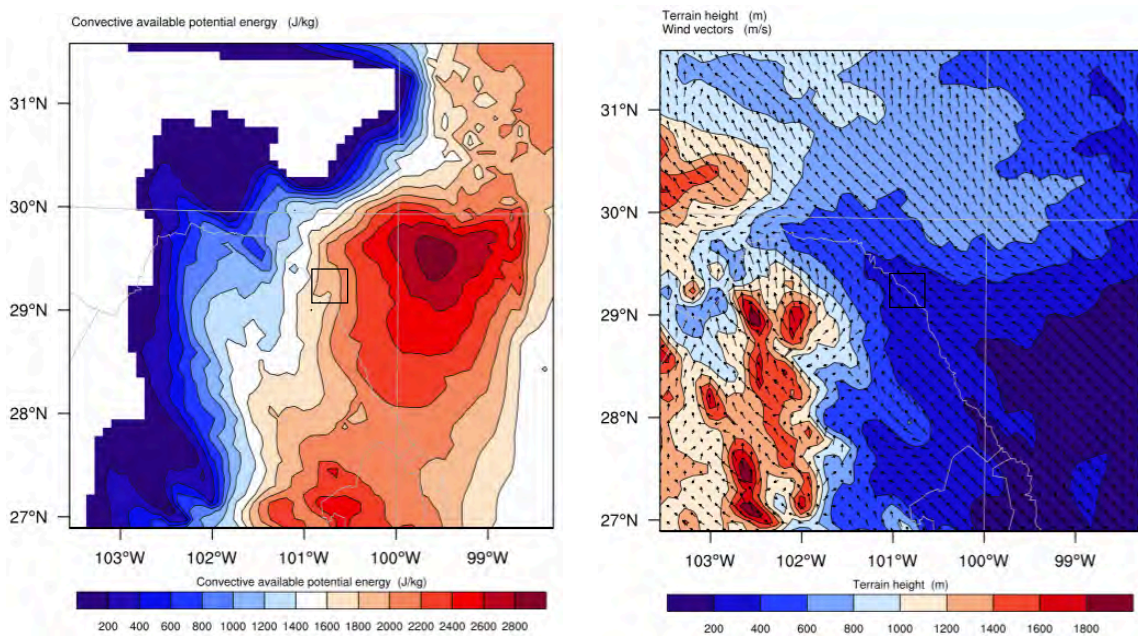


Figura 1.8 Distribución de energía potencial de convección (CAPE) y vectores de viento en superficie con orografía.

El corte en el D1 con humedad relativa y temperatura (fig. 1.9a y 1.9b) muestra en ambos casos (latitud y longitud constante) los choques de masas expuestos en las vistas en planta. La masas de aire caliente y más húmedo alcanzan extensiones de entre 2 y 5 km en la vertical. Mientras se ven desplazadas por aire seco y frío del norte y occidente del dominio que sobrepasa los 10 km en la vertical. Este aire frío correspondería al sistema frontal imperante en aquellos momentos en la región norte de Coahuila.

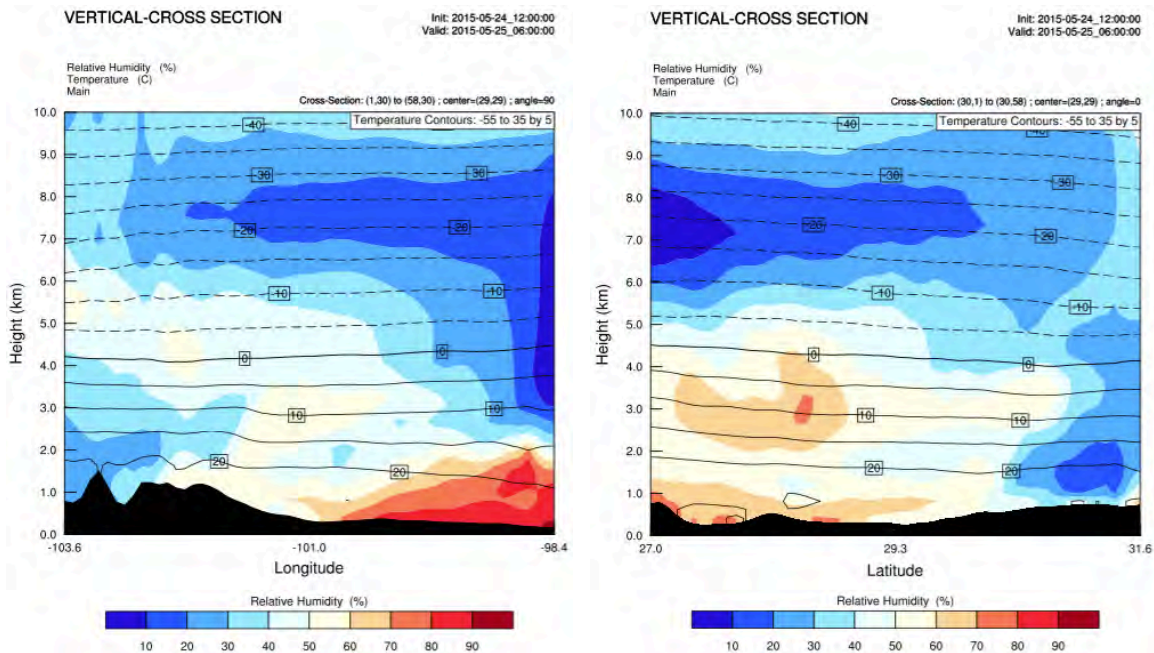


Figura 1.9 Corte vertical de terreno con humedad relativa a latitud (a) y longitud (b) constante.

Los cortes verticales en alta resolución (D3) son concluyentes para este caso. Se observan celdas de convección muy claras entre el nivel del suelo y los 3 km en la vertical. Las velocidades mostradas son de 0.16 m/s en las descendentes y 0.08 en las ascendentes (fig. 1.9a). Zonas de corrientes que ascienden son más claras por encima de los 3 km. Asimismo, zonas descendentes muy fuertes (0.1 m/s) son visibles sobre la zona del tornado, lo que podría indicar que además del vórtice, fuertes corrientes de viento provenientes del sistema pudieron haber impactado a Ciudad Acuña, causando aún más daño (fig. 1.9b).

La vorticidad potencial indica zonas inestables propensas para la rotación del viento en superficie con contrastes marcados entre el nivel del suelo y los 3 km (fig. 1.9c). El vapor de agua en porción de mezcla se comporta de manera similar con valores de 0.0040 kg/kg cerca de la superficie. Contrastes de PVU son claros en dirección horizontal. Una situación interesante es el leve pico de valores de vapor de agua en porción de mezcla de 0.0060 kg/kg que saltan sobre Ciudad Acuña (fig. 1.9d). Las características observadas en estos cortes evidencian condiciones altas de inestabilidad favoreciendo tormentas fuertes.

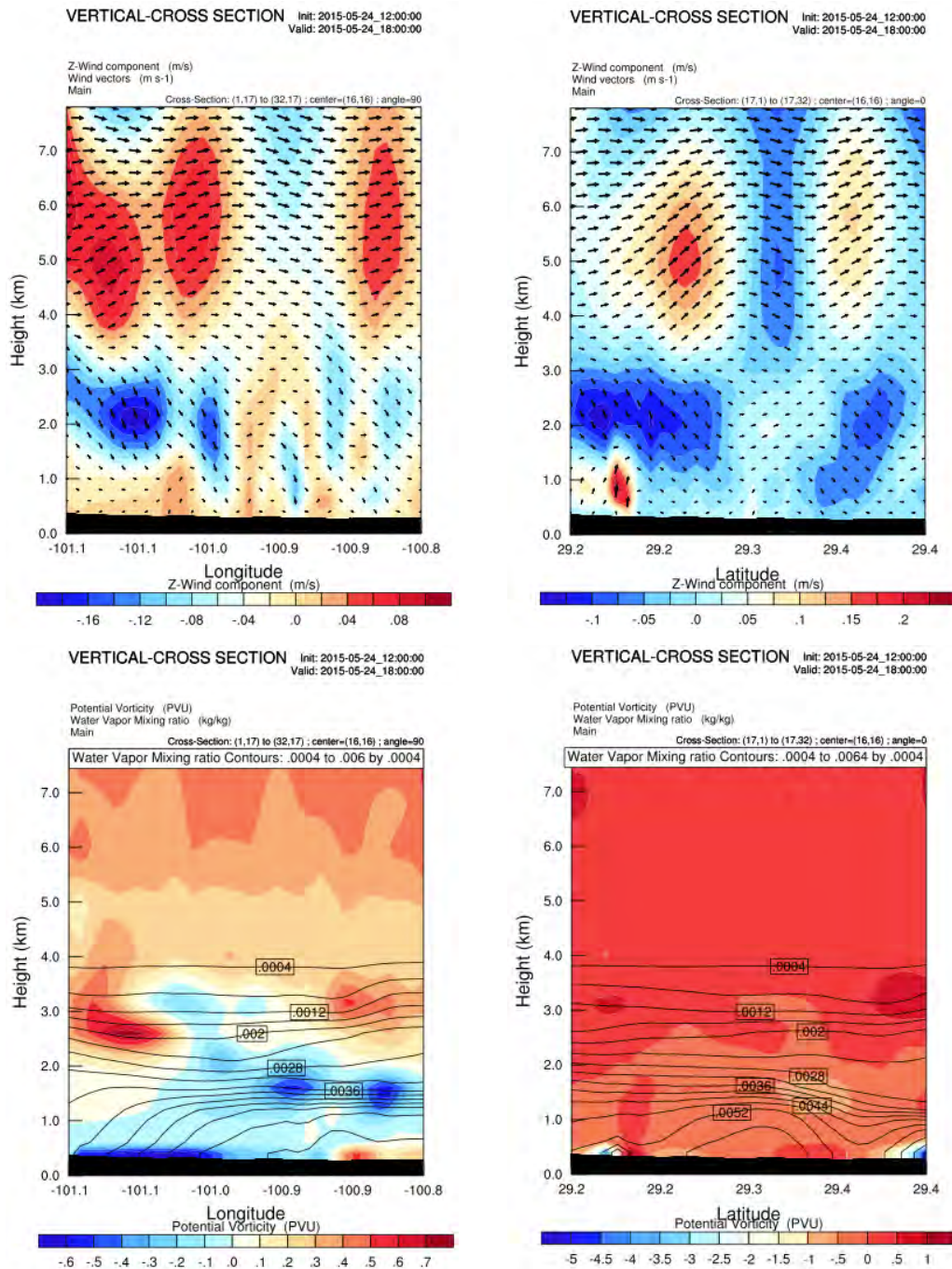


Figura 1.10 Corte vertical de terreno con distribución de vectores de viento y vorticidad potencial a latitud (a y c) y longitud (b y d) constante.

En resumen, las observaciones sinópticas y de mesoescala obtenidas por medio del modelo e imágenes satelitales coinciden en la formación de un evento por supercelda. Donde por definición se tendría un tornado categoría F2 o mayor. La creación de zonas de convección, choque de masas de aire con características

contrastantes, valores altos de PVU e índice de CAPE, y convergencia de viento en superficie son los elementos principales para este tornado. El evento en sí fue fuerte, pero no tanto como algunos antes estudiados, no obstante, los daños ocasionados fueron enormes. Este fenómeno pone en evidencia el potencial destructivo de los tornados en el país, donde en la mayoría de las veces ocurren sobre zonas poco pobladas, no dando opción a que los daños sean tan extremos como el que se vio en Ciudad Acuña.

Referencias

- Diario Oficial de la federación (2015). Declaratoria de Desastre Natural por la ocurrencia de tornado el 25 de mayo en 1 municipio de Coahuila de Zaragoza. Consultado el 22 de junio de 2015. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5394643&fecha=01/06/2015
- El financiero (2015). Decretan emergencia para 402 personas por tornado en Acuña. Consultado el 22 de junio de 2015. Disponible en: <http://www.elfinanciero.com.mx/nacional/inicia-evaluacion-de-danos-en-acuna-tras-tornado.html>
- El Siglo de Coahuila (2015). Costará 250 mdp reconstruir casas dañadas por tornado en Acuña. Consultado el 22 de junio de 2015. Disponible en: <http://siglocoahuila.mx/noticia/58953.costara-250-mdp-reconstruir-casas-danadas-por-tornado-en-acuna.html>
- Excelsior (2015). Aumenta a 14 cifra de víctimas del tornado en Ciudad Acuña. Consultado el 22 de junio de 2015. Disponible en: <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2015/05/27/1026274>
- Noticias Terra (2015). Recuento de víctimas y daños por tornado en Ciudad Acuña. Consultado el 22 de junio de 2015. Disponible en: <http://noticias.terra.com.mx/mundo/latinoamerica/recuento-de-victimas-y-danos-por-tornado-en-ciudad-acuna-coahuila,548bf16695fa9631aa4d26a84befe51166kiRCRD.html>

- Noticieros Televisa (2015). EPN atiende emergencia por tornado en Ciudad Acuña: hay 750 casas dañadas. Consultado el 22 de junio de 2015. Disponible en: <http://noticieros.televisa.com/mexico-estados/1505/epn-atiende-emergencia-tornado-ciudad-acuna-hay-750-casas-danad/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2015a). Pronóstico Meteorológico General. Boletín No. 289. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2015b). Pronóstico a muy corto plazo. Boletín No. 838. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>
- Stu Ostro (2015). Ciudad Acuña, Mexico tornado disaster. Consultado el 22 de junio de 2015. Disponible en: <https://twitter.com/stuostro>.
- Telemundo Dallas (2015). Fotos: mortal tornado golpea a Ciudad Acuña, México. Consultado el 22 de junio de 2015. Disponible en: <http://www.telemundodallas.com/fotos/Fotos-tornado-mortal-golpea-a-Ciudad-Acuna-Mexico-estado-ded-coahuila-304913321.html>
- Weather Undergroud (2015). Wundermap. Consultado el 22 de junio de 2015. Disponible en: wunderground.com/wundermap/.