



UNIVERSIDAD MICHOCÁNA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
POSTGRADO DE MAESTRIA EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE
ESTRUCTURAS

REGIONALIZACIÓN EÓLICA DEL ESTADO DE MICHOCÁN CON
FINES DE DISEÑO ESTRUCTURAL

TESIS

PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRA EN INGENIERÍA
ESTRUCTURAL

PRESENTA:

ING. MARÍA CLARA SOTO HERNÁNDEZ

ASESOR DE TESIS:

DR. HUGO HERNÁNDEZ BARRIOS

MORELIA, MICHOCÁN NOVIEMBRE DEL 2022

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido terminar los estudios de postgrado, la formación que por medio de los profesores me permitió recibir y la intercesión de la Santísima Virgen María y San José que permitieron las gracias necesarias para completar mis estudios.

A mis papás y hermanos que con mucho amor y entrega me apoyaron incondicionalmente durante el proceso.

A mis familiares, amigos y compañeros de escuela que estuvieron cercanos en las dificultades.

A todos los profesores que me formaron en éste proceso y que me apoyaron con entrega incondicional aún en las dificultades.

A mi asesor de tesis que me brindó su apoyo incondicional y el conocimiento necesario para finalizar mis estudios.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1	4
INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS	6
1.3. CICLONES TROPICALES	6
1.3.1. Huracán Janet, 1955	6
1.3.2. Huracán Gilbert, 1988	7
1.3.3. Huracán Pauline, 1997	8
1.3.4. Huracán Isidore, 2002.....	9
1.3.5. Huracán Kenna, 2002	10
1.3.6. Huracán Wilma, 2005	11
1.3.7. Huracán Carlotta, 2012	12
1.3.8. Huracán Marty, 2015	13
1.3.9. Huracán Patricia, 2015	14
1.3.10. Huracán Willa 2018	14
1.3.11. Huracán Agatha, 2022	15
1.4. TORNADOS	16
1.4.1. Piedras Negras Coahuila, 2007.....	16
1.4.2. San Cristóbal de las Casas Chiapas, 2014.....	17
1.4.3. Ciudad Acuña Coahuila, 2015.....	18
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	18
CAPÍTULO 2	21
ORIGEN Y NATURALEZA DEL VIENTO	21
2.1. EL VIENTO.....	21
2.2. LA ATMOSFÉRA	21
2.3. SUPERFICIE TERRESTRE	23
2.3.1. El efecto invernadero	24
2.3.2. Efecto Coriolis	24

2.4.	FENÓMENOS METEOROLÓGICOS.....	25
2.4.1	Viento normal, ordinario o natural, viento atmosférico	25
2.4.2	Ciclón tropical	25
2.4.3	Escala de Saffir-Simpson para huracanes.....	28
2.4.4	Nombres de Huracanes.....	29
2.4.5	Tormentas severas.....	30
2.4.6	Fenómenos atmosféricos que acompañan a las tormentas severas.....	30
2.4.7	Tornados superceldas	33
2.4.8	Tornado no-supercelda	34
2.4.9	Escala de Fujita-Pearson para tornados	34
2.4.10	Río atmosférico.....	35
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
CAPÍTULO 3	36
	REGIONALIZACIÓN EÓLICA DE LA REPÚBLICA MEXICANA.....	36
3.1.	VELOCIDADES Y FUERZAS DE VIENTO	36
3.2.	DAÑOS OCASIONADOS POR LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS.....	47
3.3.	ZONAS EÓLICAS DE ESTUDIO.....	51
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
CAPÍTULO 4	56
	LA COSTA DE LA REPÚBLICA MEXICANA, COMO ZONA EÓLICA	56
4.1.	ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	56
4.2.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE HURACANES	60
4.2.1.	Golfo de México.....	61
4.2.2.	Océano Pacífico	71
4.3.	SUSCEPTIBILIDAD DE HURACANES	80
4.4.	VELOCIDADES REGIONALES	83
4.4.1.	Decremento de la Velocidad Regional, V_R	85
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
CAPÍTULO 5	97
	REGIONALIZACIÓN EÓLICA DEL ESTADO DE MICHOACÁN.....	97
5.1.	ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	97
5.2.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CICLONES TROPICALES	98
5.3.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE TORNADOS EN MÉXICO	105

5.4. VELOCIDADES REGIONALES EN MICHOACÁN, V_R	107
CAPÍTULO 6	114
LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA (FVTM) COMO ZONA EÓLICA DE ESTUDIO.....	114
6.1. ACTIVIDAD VOLCÁNICA	115
6.2. ACTIVIDAD SÍSMICA.....	119
6.3. ACTIVIDAD TORNÁDICA	121
6.4. LA FVTM COMO ZONA EÓLICA	123
6.5. VELOCIDAD REGIONAL, V_R	124
CAPÍTULO 7	132
CONCLUSIONES.....	132
CAPÍTULO 8	137
RECOMENDACIONES.....	137

RESUMEN

Los fenómenos de tipo meteorológico son los que ocasionan mayor número de pérdidas humanas y económicas principalmente por la frecuencia de ocurrencia en la República Mexicana. Los riesgos que se presentan en las comunidades del país mexicano por los ciclones tropicales, sobresalen debido al número de ocurrencia y los daños ocasionados a la población, principalmente en la región costera, aunque también ocasionan daños tierra dentro.

El enfoque de ésta tesis, se basa en el estudio de tres zonas eólicas principales llamadas Regionalización Eólica de la República Mexicana, referentes a la incidencia de los eventos ciclónicos y tornados, ya que a mayor incidencia de eventos meteorológicos mayor será en daño ocasionado en dicha región. Se puede decir que una zona eólica es aquella que es vulnerable a eventos meteorológicos que ocasionan vientos fuertes, provocando daños destructivos como pérdidas humanas, daños económicos y/o materiales externos e interno.

En promedio, el 90.29% de daños ocasionados por fenómenos naturales, son ocasionados por los fenómenos meteorológicos; de entre los cuales, el 60.42% son resultado de los ciclones tropicales; no subestimando los tornados que, aunque se presentan con menos frecuencia, la presencia de ellos son devastadores a la población. La costa mexicana es representada por 17 estados y 169 municipios que la dividen; como zona de mayor riesgo por los ciclones tropicales, se ha visto afectada por 234 eventos de la categoría de huracanes que han tocado tierra o se encuentran a 100 km de la costa mexicana, durante el período de 1850-2021. Aunque, la intensidad de huracanes es 1.26 veces mayor en el Océano Pacífico que en el Golfo de México.

En el estado de Michoacán, se registraron 72 ciclones tropicales localizados a 100 km o que han tocado tierra, durante el período de 1945-2021. Aunque, se han registrado 10 tornados que también han provocado daños; entre los cuales, los más conocidos son los tornados en los municipios de Tzintzuntzan (2006), Tangancícuaro (2014), Nuevo Parangaricutiro (2015) y el más actual en Morelia (2019).

PALABRAS CLAVE: Ciclones tropicales, tornados, velocidades máximas sostenidas, susceptibilidad, velocidades regionales.

ABSTRACT

Meteorological phenomena are those that cause the greatest number of human and economic losses, mainly due to the frequency of occurrence in the Mexican Republic. The risks that tropical cyclones present in the communities of the Mexican country stand out due to the number of occurrences and the damage caused to the population, mainly in the coastal region, although they also cause damage inland.

The focus of this thesis is based on the study of three main wind zones called Wind Regionalization of the Mexican Republic, referring to the incidence of cyclonic events and tornadoes, since the greater the incidence of meteorological events, the greater the damage caused in said region. It can be said that a wind zone is one that is vulnerable to meteorological events that cause strong winds, causing destructive damage such as human losses, economic damage and/or external and internal materials.

On average, 90.29% of damages caused by natural phenomena are caused by meteorological phenomena; among which, 60.42% are the result of tropical cyclones; not underestimating tornadoes that, although they occur less frequently, their presence is devastating to the population. The Mexican coast is represented by 17 states and 169 municipalities that divide it; as an area of greatest risk for tropical cyclones, it has been affected by 234 events of the hurricane category that have made landfall or are within 100 km of the Mexican coast, during the period 1850-2021. Although, the intensity of hurricanes is 1.26 times greater in the Pacific Ocean than in the Gulf of Mexico.

In the state of Michoacán, 72 tropical cyclones located within 100 km or that have made landfall were recorded, during the period 1945-2021. Although, there have been 10 tornadoes that have also caused damage; among which, the best known are the tornadoes in the municipalities of Tzintzuntzan (2006), Tangancícuaro (2014), Nuevo Parangaricutiro (2015) and the most current in Morelia (2019).

OBJETIVOS

Objetivo general

Demostrar los daños provocados y la presencia de eventos ciclónicos y tornados ocurridos en las zonas eólicas de la República Mexicana realizando un análisis estadístico de éstos eventos. Así como también, proponer mapas de Velocidades Regionales por zonificación del estado de Michoacán para diferentes períodos de retorno, realizando una comparación de las Velocidades Regionales propuestas por los Manuales de Diseño de Obras Civiles por viento de los años 1993, 2008 y 2020.

Objetivos particulares

Realizar una descripción de los daños provocados por los eventos ciclónicos y tornados ocurridos en la República Mexicana.

Realizar un análisis estadístico de los eventos ciclónicos de la base de datos del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA).

Realizar un análisis estadístico de los tornados de la base de datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Información Meteorológica y Sísmica de México (METMEX) y de la Comisión Interinstitucional para el Análisis de Tornados y Tormentas Severas (CIATTS).

Comparar las Velocidades Regionales propuestas por los Manuales de Diseño de Obras Civiles de las principales ciudades de la República Mexicana.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

México es un país vulnerable a la influencia de los ciclones tropicales que se generan tanto en el Océano Atlántico como en el Golfo de México (Díaz, 2010). Las afectaciones a la población son cada vez mayores, ya que tanto mar adentro como en tierra firme las amenazas por los eventos ciclónicos aumentan según la frecuencia y la intensidad con la que se presentan. Ya que las fuerzas de viento provocadas por un huracán, son capaces de destruir estructuras débiles, e incluso levantar objetos como los automóviles. Por lo que, cualquier objeto que es arrastrado por los fuertes vientos de un huracán, son motivo de preocupación, pues se convierte en un proyectil capaz de causar daños importantes. Los ciclones tropicales se encuentra ente los fenómenos meteorológicos más peligrosos y destructivos de la tierra (Jiménez et al., 2021).

Un ciclón tropical se define como un fenómeno meteorológico generado sobre aguas marítimas de zonas tropicales y subtropicales, se caracteriza por formarse en aguas oceánicas cercanas al Ecuador, asociados a bajas presiones atmosféricas, cuyos vientos circulan en dirección ciclónica. Estos eventos pueden ocasionar pérdidas humanas y económicas debido a la intensidad de sus vientos, a la marea de tormenta y a las lluvias torrenciales que provocan inundaciones y deslaves. México se encuentra en una región tropical, por lo que en sus aguas marinas se dan algunas de estas características, como lo son la isoterma de los 26 °C y el parámetro de Coriolis (Díaz, 2010).

Varios autores atribuyen estos fenómenos al calentamiento global como Díaz (2010) menciona que la fuerza destructiva de algunos de los eventos ciclónicos en los últimos años ha provocado que se crea que estos meteoros se han incrementado en frecuencia y/o intensidad como consecuencia del cambio climático global; más tarde, Frausto (2014) dice que los cambios climáticos globales han producido una serie de fenómenos hidrometeorológicos con mayor frecuencia y mayor intensidad en su fuerza destructiva que ha provocado que la mayoría de los asentamientos humanos tenga una alta vulnerabilidad y García (2014) dice que la modificación de los patrones climáticos como consecuencia del actual proceso de calentamiento global produce diversos efectos, entre ellos, una mayor intensidad y frecuencia de eventos meteorológicos extremos.

México también se ha visto afectado por otros fenómenos meteorológicos que amenazan la población, los tornados, que se definen como la perturbación atmosférica más violenta en forma de vórtice, el cual aparece en la base de una nube de tipo cumuliforme, resultado de una gran inestabilidad, provocada por un fuerte descenso de la presión en el centro del

fenómeno y fuertes vientos que circulan en forma ciclónica alrededor de éste (Prieto et al., 2021). Aunque la insuficiencia de medidas preventivas y el bajo nivel del manejo de sistemas de alerta temprana, nos llevan a diversos factores devastadores de afectación en el país tanto a la población como la economía del país.

1.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Los antecedentes históricos de eventos meteorológicos que han ocurrido en el país mexicano, las consecuencias destructivas que estos provocan y la susceptibilidad de ocurrencia en el país mexicano; me han motivado interés de realizar un estudio estadístico de la ocurrencia de estos eventos, como lo son los ciclones tropicales y tornados; seleccionando así mismo tres zonas de estudio que son vulnerables a este tipo de eventos las cuales son: la costa de la República Mexicana, el estado de Michoacán y la Faja Volcánica Transmexicana (FVT).

Para la elaboración de esta tesis, recopile información histórica de la presencia de los eventos ciclónicos que tocaron tierra o que se encuentran a 100 km de la costa mexicana y del estado de Michoacán; esta recopilación se llevó a cabo en la base de datos del “National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)”, Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED), así como también revistas y artículos encontrados referidos a este tema. Mientras que, en la Faja Volcánica Transmexicana realice un estudio histórico de los eventos tornádicos obtenida de la base de datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Información Meteorológica y Sísmica de México (METMEX) y de la Comisión Interinstitucional para el Análisis de Tornados y Tormentas Severas (CIATTS), realizando una comparación de los sismos y orografía volcánica que se encuentra en esta zona.

A partir de esta información recopilada, realice cálculos estadísticos para conocer las zonas susceptibles a eventos ciclónicos. Para la realización de mapas referenciales de las estadísticas calculadas se llevó a cabo con el programa ArcGis.

Con la ayuda de los Manuales de Diseño de Obras Civiles por vientos de 1993, 2008 y 2020, así como también del programa de Sistema Viento V2.0. 2018; realice comparaciones de velocidades de diseño en el estado de Michoacán y en los municipios que son parte de la FVT para la elaboración de una propuesta de velocidades con fines de diseño por viento en el estado de Michoacán.

1.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Los riesgos que se presentan en las comunidades del país mexicano por los ciclones tropicales, sobresalen debido al número de ocurrencia y los daños ocasionados a la población, principalmente en la región costera, aunque también ocasionan daños tierra dentro. Ya que en los últimos años se ha visto elevadamente los cambios climáticos, provocando frecuentemente los diversos fenómenos meteorológicos.

A continuación, se describen algunos fenómenos meteorológicos, tanto de ciclones tropicales cómo tornados que han impactado el país mexicano; detallando sus características eólicas y los efectos y/o daños que produjeron en el país.

1.3. CICLONES TROPICALES

Los ciclones tropicales son un tipo de fenómenos naturales meteorológicos que han afectado históricamente en el país mexicano, tanto en pérdidas humanas como materialmente. En el Golfo de México ocurrieron 4 huracanes históricos que causaron entre 1000 y 2000 muertes humanas, uno de ellos ocurrió en el mes de noviembre de 1590, el otro ocurrió en el mes de octubre de 1780, otro el 28 de agosto de 1909 destacado por una pérdida devastadora en el estado de Monterrey N.L. y en el Caribe de México el huracán Inés en el año 1966 según Frausto (2014). Aunque la base de datos de los registros de ciclones tropicales comenzó a partir del año 1810 en el Golfo de México y más tarde en el Océano Atlántico (CONAGUA, 2012). Aunque, algunos eventos que ocurrieron anteriormente, han quedado en la memoria histórica de los estados que han sido dañados por dichos eventos.

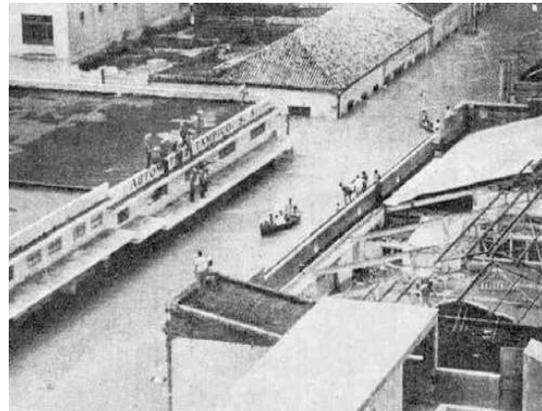
Este tipo de fenómenos meteorológicos, llegan a causar daños devastadores aun cuando son de una baja intensidad. A continuación, se describen algunos huracanes que impactaron directamente en tierras mexicanas y que provocaron daños graves en los estados de ocurrencia del evento:

1.3.1. Huracán Janet, 1955

El 27 de septiembre de 1955, Janet se convierte a huracán de categoría H5, aumentando a una velocidad de 260 km/h en su trayectoria antes de tocar tierra, el 28 de septiembre toca tierra en Chetumal, Q. Roo con una velocidad máxima sostenida de 278 km/h, causo daños destructivos en la capital, dejando casas y edificios destruidos, provocó aproximadamente entre 538 y 681 muertes (Frausto, 2014); en las Figura 1.1 se muestran algunos daños provocados por Janet en los estados de Quintana Roo y Tamaulipas; así como la descripción de un monumento que recuerda el instante en el que una tabla atraviesa un poste de madera del alumbrado público, que demuestra las fuerza del vientos que provocó Janet.



a) Chetumal Q. Roo
 (<https://twitter.com/carlosjoaquin/status/1442664602672717824>)



b) Tampico, Tamps (Rosengaus *et al.*, 2002)



c) Chetumal Q. Roo (Frausto, 2018)



d) Chetumal Q. Roo (Frausto, 2018)

Figura 1.1 Hogares y comercios destruidos e inundaciones por el huracán Janet, 1955

1.3.2. Huracán Gilbert, 1988

El día 8 de Septiembre de 1988 se formó el ciclón tropical Gilbert como depresión tropical, durante su trayectoria se convirtió en huracán categoría H5, con velocidad de viento máximo sostenido de 296 km/h; toco tierra en Cancún Q. Roo el día 14 de septiembre, atravesando su trayectoria por Yucatán y después por el Golfo de México, tocando tierra nuevamente el 16 de septiembre en el estado de Tamaulipas con velocidad máxima sostenida de 204 km/h; caracterizado por olas formadas de 5m de altura afectando navíos e instalaciones turísticas, destruyeron la mampostería de rompeolas del Puerto Progreso. Causando en su totalidad 225

mueritos y 46 heridos, perjudico 364 mil hectáreas, se afectaron viviendas y se evacuaron 139,374 personas (Figura 1.2).



a) Cancún



b) Monterrey



c) Golfo de México



d) Golfo de México

Figura 1.2 Daños ocasionados por huracán Gilbert, 1988 (Rosengaus *et al.*, 2002).

1.3.3. Huracán Pauline, 1997

El día 05 de octubre de 1997 se formó el huracán Pauline en el Océano Pacífico como depresión tropical, dirigiéndose hacia el país mexicano; alcanzando una velocidad máxima sostenida del viento de 213 km/h clasificada como categoría H4 según la escala de Saffir-Simpson, toca tierra en la costa del estado de Oaxaca, dirigiéndose por la costa del estado de Guerrero y terminando su trayectoria en el estado de Michoacán.

Provocó la muerte de 228 personas y 165 desaparecidos en la costa de los estados de Oaxaca y Guerrero respectivamente, causando daños a la red carretera de estos estados como: 7 puentes caídos, 18 puentes dañados, 6 colapsos totales de la carretera, 305 derrumbes y deslaves y 60 torres de energía eléctrica derribadas en el estado de Guerrero; el 61% de la

población ubicada en las localidades dañadas por Pauline, fueron afectadas; resultando dañado principalmente el puerto de Acapulco, donde se produjeron flujos de escombros y de lodo, producto de las intensas lluvias que dejó a su paso el huracán sobre la zona montañosa cercana (Rosengaus *et al.*, 2002). En la Figura 1.3 se muestran algunos daños ocasionados en el estado de Guerrero.



a) Flujo de escombros (Rosengaus *et al.*, 2002)



b) Flujo e escombros (Rosengaus *et al.*, 2002)



c) Puente derribado por flujo de agua (<http://www.panoramadelpacifico.com/a-23-anos-del-huracan-paulina/>)



d) Intensa corriente de agua (<https://stormcatcher.com.mx/blog/2019/08/20/huracan-paulina-1997/>)

Figura 1.3 Daños en Acapulco, Gro. por el paso del huracán Pauline (1997).

1.3.4. Huracán Isidore, 2002

El huracán Isidore resultó ser el fenómeno natural con mayor impacto destructivo de todos los fenómenos ocurridos en este año 2002. Isidore se formó a partir de la depresión tropical No. 10 del Atlántico el día 14 de septiembre del 2002; dirigiéndose por el mar Caribe aumento su intensidad el día 21 de septiembre a categoría H3, con velocidad del viento máxima sostenida de 185 km/h y presión mínima de 955mb, ubicada en la parte media del canal de Yucatán a 120 km al Este-Noroeste de Cabo Catoche, Q. Roo. Un día más tarde toco

tierra firme en el municipio de Telchac Puerto del estado de Yucatán, clasificado como categoría H3 en la escala de Saffir-Simpson, con vientos máximos sostenidos de 204 km/h y presión de mínima de 936mb.

Tras el paso del Huracán Isidore, causó inundaciones en 21 municipios del estado de Yucatán, destruyó 8,352 postes del sector eléctrico y 4,414 postes que perdieron su verticalidad, aproximadamente 2000 señalamientos dañados, provocando afectaciones también a 813.2 km de carretera y afectaciones en más de 1000 techos de viviendas. En la Figura 1.4 se muestran daños por la ocurrencia de huracán Isidore (Bitrán *et al.*, 2003).



a) Árbol desprendido (Rosengaus *et al.*, 2002) b) Socavación de cimentación (Bitrán *et al.*, 2003)

Figura 1.4 Daños ocasionados en el estado de Yucatán por Isidore 2002.

1.3.5. Huracán Kenna, 2002

Inició el 22 de octubre del 2002 como depresión tropical en el Océano Pacífico, el día 25 llegó a su velocidad máxima de 269 km/h y presión de 915mb, clasificado como categoría H5 en la escala de Saffir-Simpson; tocó tierra ese mismo día más tarde, en el municipio Boca del Asadero Tepic Nayarit como categoría H4, con velocidad máxima sostenidas del viento de 222 km/h y presión mínima de 950mb.

La llegada de Kenna generó inundaciones de hasta 13 km tierra adentro, los fuertes vientos y la marea de tormenta provocaron daños materiales de importancia en los estados de Jalisco y Nayarit. Alrededor de 2,000 personas damnificadas y un total de 151,452 habitantes afectados, el 75% del porcentaje total de daños pertenece a daños de la zona turística de Puerto Vallarta (hoteles, restaurantes y comercio).

La zona afectada en el estado de Nayarit fue debido al oleaje, con una marea de corriente de 2m aproximadamente y fuertes vientos, en el cual había 374,400 habitantes afectados, entre ellos dos muertos y el resto, damnificados; hubo desprendimiento de techos, así como también gasolineras afectadas, y muros derribados en edificios (Figura 1.5).



a) Impacto en Colima, Jalisco y Nayarit



b) Impacto en Colima, Jalisco y Nayarit



c) Impacto en México

Figura 1.5 Daños provocados por huracán Kenna, 2002 (Rosengaus *et al.*, 2002).

1.3.6. Huracán Wilma, 2005

El 15 de octubre del 2005 se formó la depresión tropical en el mar Caribe, dirigiéndose hacia la costa mexicana, alcanzando durante su trayectoria una velocidad máxima sostenida de vientos de 390 km/h el día 19 de octubre clasificada como huracán categoría H5 según la escala de Saffir Simpson, tocó tierra en isla de Cozumel Q. Roo y después en la costa del estado de Quintana Roo por los municipios de Playa del Carmen, Puerto Morales y Cancún el día 22 de octubre.

Ocasionó importantes daños en México, principalmente en la infraestructura turística de Cancún, en el estado de Quintana Roo. Los daños por viento consistieron principalmente en el colapso de construcciones ligeras de tipo nave industrial, en las cancelerías de las estructuras como: rotura de cristales, ventanales y domos de hoteles de la región; así como la pérdida del suministro eléctrico por el colapso de postes de energía eléctrica y torres de transmisión, letreros espectaculares doblados, falla en muros estructurales, árboles

fracturados, señales de tránsito tiradas, desprendimiento de tejas de las fachadas y techos, así como de los tanques estacionarios de gas y tinacos (Avelar, 2008).

En el Mirador, frente a playa Delfines ocurrió una situación grave, debido a que es mar abierto, el oleaje fue más fuerte y produjo una erosión de la playa severa; se removió la arena de una extensa área y se arrastraron rocas de gran tamaño hasta sitios cercanos a los hoteles de playa (García *et al.*, 2006). En la Figura 1.6 se muestran los daños a transmisión eléctrica y colapso de muro de estructura ocasionados por Willma.



a) Daños a infraestructura eléctrica



b) Muro de estructura afectado

Figura 1.6 Afectaciones por huracán Wilma, 2005

(<https://www.unioncancun.mx/articulo/2016/10/21/medio-ambiente/huracan-wilma-el-desastre-mas-carro-de-mexico-1752-mdd>).

1.3.7. Huracán Carlotta, 2012

Se formó el día 12 de junio del 2012 como depresión tropical, en el Océano Pacífico al norte de la República, los fuertes vientos alcanzaron a una velocidad máxima sostenida de 176 km/h clasificada de categoría H2 según la escala de Saffir-Simpson, dirigiéndose hacia el estado de Oaxaca toca tierra el día 16 de junio con una velocidad de 167 km/h; atravesando su trayectoria por Oaxaca y Guerrero ocasiono la muerte de 7 personas. En Oaxaca se reportaron 12,500 viviendas dañadas, 674 escuelas, 8 unidades de salud, áreas de cultivo y caminos afectados, así como también la destrucción de alrededor de 6000 nidos de tortuga en la playa La Escobilla, equivalentes a 580 mil huevos (García *et al.*, 2014), como se muestra en la Figura 1.7.



a) Techo de lámina dañada



b) Nidos de tortuga destruidos

Figura 1.7 Impacto en el estado de Oaxaca por huracán Carlotta (García *et al.*, 2014).

1.3.8. Huracán Marty, 2015

Se formó el día 26 de septiembre del 2015 como depresión tropical, alcanzando una velocidad máxima sostenida de 130 km/h y presión mínima de 987 mb el día 28 de septiembre, clasificada como categoría H1 en la escala de Saffir-Simpson, ubicada su trayectoria a unos kilómetros de la costa del estado de Guerrero. No tocó tierra firme pero las fuertes lluvias causó impacto en Guerrero. El 16 de agosto, se presentó una depresión tropical llamado 16-E; entre estos dos fenómenos causaron fuertes lluvias en las comunidades cercanas, a pesar de que ninguno de estos fenómenos tocara tierra y las velocidades del viento no son tan fuertes a comparación de otros ciclones tropicales. Estos fenómenos, se concentraron en siete municipios, afectando principalmente Hermosillo y Guaymas, los daños se manifestaron en agrietamiento de carpeta asfáltica y expulsión de material fino de capa subyacente, afectaciones en la infraestructura eléctrica y al sector agrícola e inundaciones de empresas del sector comercial (Figura 1.6).



a) Agrietamiento de carpeta asfáltica



b) Afectaciones en línea de alta tensión

Figura 1.8 Desastres en Sonora por huracán Marty 2015 (García *et al.*, 2017).

1.3.9. Huracán Patricia, 2015

El día 15 de octubre se formó la depresión tropical en el Océano Pacífico a kilómetros del estado de Chiapas México, dirigiéndose al norte hacia la costa de Jalisco, el 23 de octubre, y en menos de 24 horas, se convirtió en huracán categoría H5 en la escala de Saffir-Simpson, con una velocidad máxima sostenida de 450 km/h. Fue catalogado por la Comisión Nacional del Agua y el Centro Nacional de Huracanes como el más poderoso que haya existido en el planeta en toda la historia; no obstante, impactó en una zona de poca exposición y baja densidad poblacional en la costa del estado de Jalisco, por lo que se tuvieron efectos económicos reducidos en comparación con la magnitud del fenómeno, así como un número nulo de víctimas fatales (García *et al.*, 2017).

Los efectos de Patricia fueron relativamente menores a los esperados en los diversos pronósticos. Tres estados se declararon en emergencia: Nayarit, Colima y Jalisco y al ser evaluados los daños se encontró que sólo Jalisco y Colima sufrieron los efectos por lluvias a causa de este fenómeno, mientras que Nayarit no presentó ninguna afectación; sin embargo, Michoacán se unió a las declaratorias de desastre, también por el impacto de las lluvias a causa del ciclón (García *et al.*, 2017). En la Figura 1.9 se muestran algunas afectaciones que tuvieron los estados de Jalisco y Michoacán, causa de las intensas lluvias y fuertes vientos que ocasiono Patricia.



a) Daños en cultivo, Cihuatlán, Jalisco.



b) Daños en Aquila Michoacán

Figura 1.9 Daños ocasionados por Patricia 2015 (García *et al.*, 2017).

1.3.10. Huracán Willa 2018

El día 19 de octubre se formó la depresión tropical en el Océano Pacífico al sur de la costa de México, a kilómetros de la costa de Oaxaca, dirigiéndose al sur con gran intensidad, alcanzando una velocidad máxima sostenida de 340 km/h clasificada como categoría H5 en la escala de Saffir Simpson, tocó tierra el día 24 de octubre entre la costa de Sinaloa y Nayarit con una velocidad máxima sostenida de 244 km/h como categoría H3 de la escala de Saffir-

Simpson. Provocando en estos estados 9 fallecimientos, afectaciones en 5,034 viviendas, 763 escuelas afectadas, 18 unidades de salud entre los que se tienen registrados (Franco *et al.*, 2020), así como también afectaciones a techos de lámina, postes de anuncios espectaculares y de energía eléctrica colapsados y daños a la infraestructura de carreteras y puentes, como se muestra en la Figura 1.10.



a) Daños en techo laminado



b) Anuncio espectacular colapsado



c) Socavación en puente



d) Puente colapsado

Figura 1.10 Afectaciones en Sinaloa y Nayarit por Willa (Franco *et al.*, 2020).

1.3.11. Huracán Agatha, 2022

Agatha azotó el Este del Océano Pacífico en México, cerca de Puerto Escondido, con vientos máximos sostenidos de 169 km/h el 30 de mayo de 2022. Esto hizo que esta tormenta de categoría H2 fuera el huracán de mayo más fuerte que haya tocado tierra a lo largo de la costa del Océano Pacífico de México desde que comenzó el mantenimiento de registros modernos en 1949, según el Centro Nacional de Huracanes (<https://ciencia.nasa.gov/huracan-agatha-azota-mexico>).

Agatha hizo historia como el huracán más potente que ha tocado tierra en mayo durante la temporada de tormentas en el pacífico, después de tocar tierra en playas turísticas poco pobladas y pueblos pesqueros del estado de Oaxaca. Perdió fuerzas rápidamente al avanzar tierra dentro (https://www.vozdeamerica.com/a/huracan-agatha-debilita-mexico/6596864.html). Las autoridades del estado de Oaxaca informo de 10 personas muertas y 20 desaparecidas, además de numerosos daños materiales (https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-61640555). En la Figura 1.11, se muestra la formación del huracán Agatha desde el espacio.



Figura 1.11 Huracán Agatha, 2022 (https://ciencia.nasa.gov/huracan-agatha-azota-mexico).

1.4. TORNADOS

Los tornados son un tipo de fenómenos meteorológicos que no se pueden predecir fácilmente, debido a los bajos recursos de equipamiento en México, por lo que no hay registros sólidos de la ocurrencia de estos eventos, aunque contamos con ciertos artículos, noticias y actualmente fotografías que muestran la presencia de eventos tornádicos en varias regiones de la República Mexicana como se describen a continuación.

1.4.1. Piedras Negras Coahuila, 2007

El 24 de abril del 2007 se formó una tormenta severa supercelda, la cual ocasiono el tornado en el municipio de Piedras Negras Coahuila, este evento se presentó con vientos fuertes, granizo del tamaño de una pelota de golf con lluvia intensa que causo la muerte de 3 personas en Piedras Negras y otras 7 en Rosita Valley, presentando daños severos a ciudades y colonias, incluyendo la ciudad vecina de Eagle Pass, Texas.

La velocidad máxima del viento que alcanzó el evento se estimó de 225 km/h clasificado como de categoría EF3 según la escala de Fijita para tornados; ocasionando daños severos a casas habitación siendo aniquiladas desde los cimientos o aplastadas totalmente, hogares móviles dañados, edificios educativos, techos, árboles abatidos y automóviles desplazados y expulsados. En la Figura 1.12 se muestran algunos daños ocasionados por éste evento tornadico.



a) Daños en muros



b) Daños producidos en Techos

Figura 1.12 Afectaciones por tornado Piedras Negras Coahuila (García *et al.*, 2009).

1.4.2. San Cristóbal de las Casas Chiapas, 2014

El día 06 de agosto de 2014 se presentó un evento tornado en el municipio de San Cristóbal de las Casas, estado de Chiapas. Se reportaron daños por los fuertes vientos. Perjudico a 5,655 personas, ocasionando el desprendimiento de láminas en los techos de las casas con un total de 1,131 viviendas dañadas, 47 árboles, 24 vehículos, 11 postes, cuatro transformadores y se afectaron 8 instituciones educativas; presentando el mayor impacto económico en viviendas e instituciones educativas según las cifras del CENAPRED. En la Figura 1.13 se muestran daños en techumbres de lámina ocasionados por tornado en San Cristóbal de las Casas Chiapas.



a) Daños producidos en Chiapas



b) Daños producidos en Chiapas

Figura 1.13 Daños por tornado 2014, en techos de lámina (García *et al.*, 2021).

1.4.3. Ciudad Acuña Coahuila, 2015

El 25 de mayo de 2015 alrededor de las 6:00 am se registró la formación de un tornado en Ciudad Acuña Coahuila. Los vientos en el interior del fenómeno meteorológico alcanzaron 200 km/h y su velocidad de traslación fue aproximadamente de 30 km/h. La longitud de la trayectoria de recorrido fue de 2 km y el tiempo de traslación fue de aproximadamente 4 minutos. La trayectoria del tornado se registró de sur a norte y afectó principalmente zonas residenciales, específicamente en las colonias: Altos de Santa Teresa, Santa Teresa, Las Aves y fraccionamiento Santa Rosa (García *et al.*, 2017). En cuestión de minutos cobró la vida de 14 personas y generó un impacto económico por poco más de 250 millones de pesos (García *et al.*, 2018).



a) Automóviles expulsados

b) Formación de tornado

Figura 1.14 Afectaciones por tornado en Coahuila 2015 (García *et al.*, 2017).

Los daños generados por los ciclones tropicales y tornados son verdaderamente severos. Por lo que, el ingeniero civil tiene un trabajo muy importante a la hora de diseño, ya que tiene que estudiar las bases fundamentales de las fuerzas generadas por el viento en la región de estudio, para evitar daños mínimos a las estructuras ante eventos ciclónicos o tornados.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Avelar Frausto, C. (2008). Mapas de isotacas de velocidad de viento por ciclones tropicales para la República Mexicana.

Bitrán Bitrán, D., Domínguez Morales, L., Durán Hernández, R., Fuentes Mariles, O., García Arróliga, N., Jiménez Espinosa, M., López Bátiz, O., Matías Ramírez, L.G., Reyes Salinas, C., Salas Salinas, M.A. y Zepeda Ramos O. (2003). Impacto Socioeconómico de los

Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2002. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2012). Servicio Meteorológico Nacional: 135 años de historia en México.

Días Castro, S.C. (2010). Variabilidad de los ciclones tropicales que afectan a México.

Franco Vargas, E., Méndez Estrada, K. M. y Olmedo Santiago, C. (2020). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en 2018. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Frausto Martínez, O. (2014). Monitoreo de riesgo y desastre asociados a fenómenos hidrometeorológicos y cambio climático. Universidad de Quintana Roo.

Frausto Martínez, O. (2018). Turismo oscuro: el desastre del huracán Janet de 1955 en la ciudad de Chetumal, México.

García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Bitrán Bitrán, D., Matías Ramírez, L. G., Jiménez Espinosa, M., Eslava Morales, H., García Jiménez, F., Vázquez Conde, M. T., Salas Salinas, M. A. y Fuentes Mariles, O. A. (2006). Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2005. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Eslava Morales, H., Jiménez Espinosa, M., García Jiménez, F., Matías Ramírez, L. G., Salas Salinas, M. A. y Domínguez Morales, L. (2009). Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2007. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Reyes Rodríguez, R., Baeza Ramírez, C., Eslava Morales, H., Reyes Pimentel, T. A., González Huesca, A. E., Flores Corona, L., Aragón Cárdenas, J., Pacheco Martínez, M. A., López Bátiz, O. y Albino Tiburcio, C. (2014). Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2012. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N. M., Méndez Estrada, K. M., Nava Sánchez, S. y Vázquez Bravo, F. (2021). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en 2014. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N. M., Méndez Estrada, K. M., Nava Sánchez, S. y Vázquez Bravo, F. (2017). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en 2015. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N. M., Méndez Estrada, K. M. y Vázquez Bravo, F. (2018). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en 2016. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García, M. C. (2014). Escenario de riesgo climático por tormentas severas y granizadas en Mar del Plata y Necochea-Quequén, Argentina. *Revista Brasileira de Climatología*, 14(14), 39-49.

Jiménez Espinosa, M., Matías Ramírez, L. G., Fuentes Mariles, O. A., y Prieto González, R. (2021). *Ciclones Tropicales. Serie Fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).*

Prieto González, R., Avendaño García, M. A., Matías Ramírez, L. G. y Eslava Morales, H. (2021). *Tormentas severas. Serie Fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).*

Rosengaus Moshinsky, M., Jiménez Espinosa, M., y Vázquez Conde, M. T. (2002). *Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. México. Secretaría de Gobernación; México. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).*

CAPÍTULO 2

ORIGEN Y NATURALEZA DEL VIENTO

2.1. EL VIENTO

El viento forma parte de la circulación atmosférica, se puede definir como el movimiento de masas de aire con respecto a la superficie terrestre y se produce fundamentalmente por el calentamiento variable de la atmósfera, la acción de la gravedad, los cambios de posición de masas de aire de diferentes densidades, posición geográfica, fuerzas de coriolis debido a la rotación terrestre y fuerzas de centrifugas debido a la trayectoria curva. En la generación de vientos intensos (tormentas severas) intervienen, además la rugosidad de la superficie terrestre, la viscosidad del aire, y la temperatura.

El National Geographic define el viento como el movimiento del aire desde un área de alta presión a un área de baja presión. El viento existe porque el sol calienta irregularmente la superficie de la Tierra. Conforme sube el aire caliente, el aire más frío se mueve para rellenar el vacío.

El viento es obstruido por objetos en la superficie terrestres; en la tierra, por: edificios, estructuras, árboles y características topográficas; sobre aguas abiertas, por las olas. Estas obstrucciones se denominan genéricamente rugosidad superficial (Peraza *et al.*, 2014).

La rugosidad superficial altera la variación de la velocidad del viento con la altura. Es decir, En campo abierto hay muy pocas obstrucciones que impiden el flujo del viento, por lo que la velocidad del viento que se acerca a una estructura sería mayor que si se acercara desde un área suburbana/urbana, donde las casas y los árboles permitirían la disminución de la velocidad del viento (Peraza *et al.*, 2014). Para comprender esto, es importante comenzar a describir lo que es la atmósfera, las capas que la componen y sus características.

2.2. LA ATMOSFÉRA

La atmósfera de la tierra es una cobertura gaseosa compuesta principalmente de Nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂) molecular con pequeñas cantidades de otros gases, entre los principales se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Principales gases de la atmósfera (Camilloni y Vera, 2007).

Gases permanentes			Gases variables		
Gas	Fórmula	Porcentaje por volumen	Gas	Fórmula	Porcentaje por volumen
Nitrógeno	N ₂	7,808	Vapor de agua	H ₂ O	0 a 4
Oxígeno	O ₂	2,095	Dióxido de carbono	CO ₂	0,036
Argón	Ar	093	Metano	CH ₄	000,017
Neón	Ne	00,018	Óxido nitroso	N ₂ O	000,003
Helio	He	00,005	Ozono	O ₃	0,000,004
Hidrógeno	H ₂	000,006	Partículas (polvo, etc.)		0,000,001
Xenón	Xe	0,000,009	Clorofluorocarbonos (CFC)		000,000,002

El vapor de agua es un gas muy importante para el estudio del comportamiento meteorológico, debido a que el vapor de agua se transforma en agua líquida durante la condensación, proceso en el que se liberan grandes cantidades de energía que llevan a la formación de las tormentas o ciclones tropicales. La atmósfera es dividida en diversas capas según la variación de la temperatura con la altura, a como se muestra en la Figura 2.1.

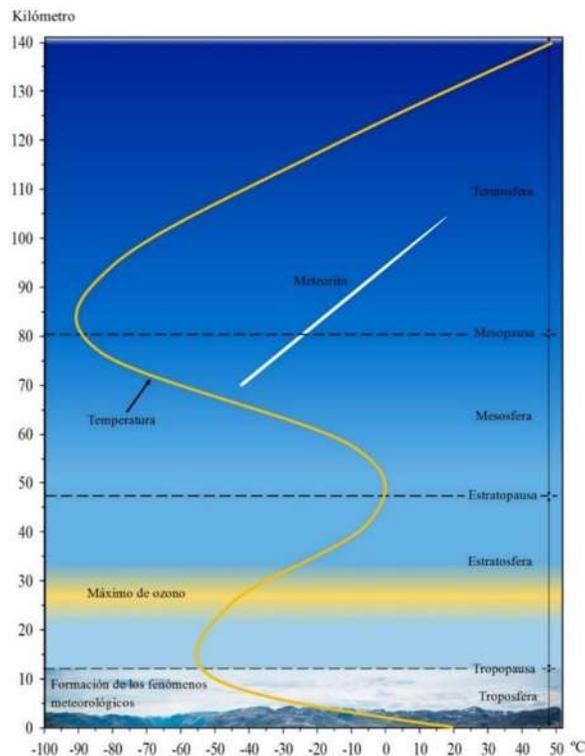


Figura 2.1 Capas de la atmósfera.

La capa más cercana a la superficie terrestre es la troposfera, en esta capa, se concentra la mayor densidad de aire y de vapor de agua que contiene la atmósfera; por lo que es la capa donde ocurren los fenómenos meteorológicos más relevantes (Camilloni y Vera 2007). La presión y la atmósfera disminuyen a mayor altura.

2.3. SUPERFICIE TERRESTRE

La superficie terrestre recibe el calor del sol que es la energía electromagnética o radiación, y esta energía afecta a la atmósfera, los océanos, la tierra y los seres vivos, antes de ser de nuevo irradiada al espacio. Si la cantidad de energía que absorbe es proporcional a la que se emite quiere decir que el planeta está en equilibrio de radiación y la temperatura atmosférica se mantiene constante; en cambio si la energía que absorbe la tierra no es la misma que emite, se presenta un desequilibrio de radiación en el planeta (lo cual sucede, por la existencia de la capa atmosférica); es decir, cuando la tierra irradia más energía que la que absorbe se enfría la tierra, lo cual sucede durante la noche; pero, durante el día cuando la tierra absorbe más energía del sol y de la atmósfera, que la que emite, la superficie terrestre se calienta (Figura 2.2).

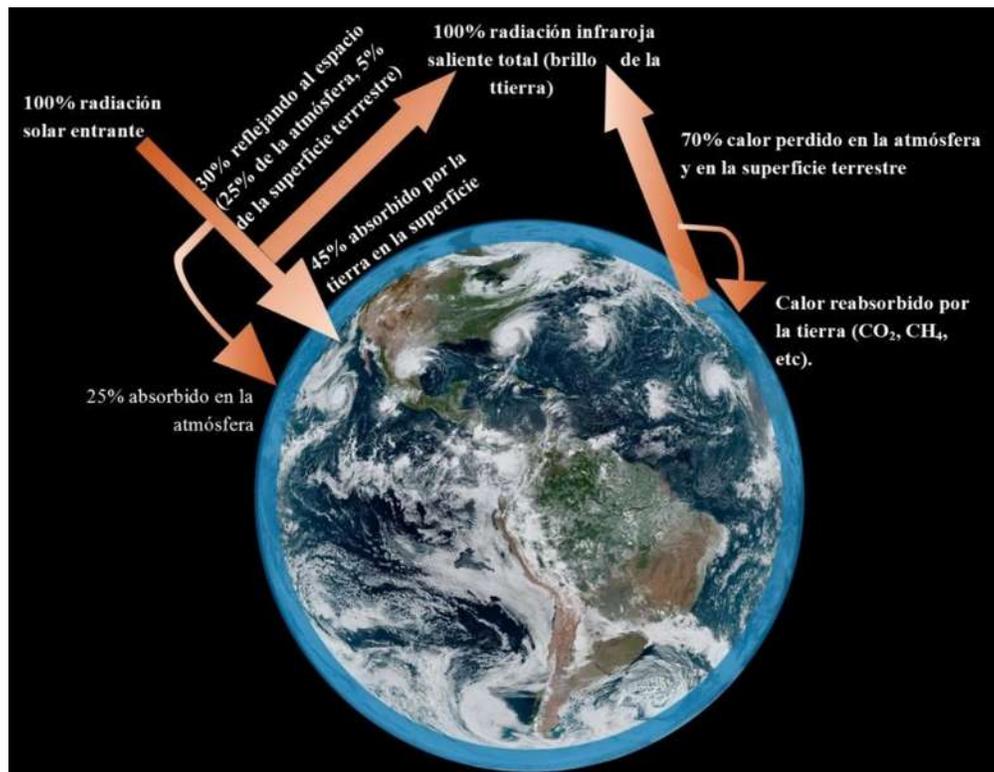


Figura 2.2 Radiación absorbida y emitida por la superficie terrestre.

La radiación del sol, llega a los polos de la tierra con un ángulo de incidencia muy pequeño, por lo que la radiación por unidad de superficie que se recibe en dicha región, es mucho más baja que en el Ecuador; es decir, la tierra y la atmósfera tienen mayor temperatura en el Ecuador que en los polos (en el Ecuador el aire caliente se expande debido a su temperatura, mientras que en los polos se contrae).

2.3.1. El efecto invernadero

La radiación emitida por la superficie terrestre se le llama radiación infrarroja. La energía solar calienta la superficie terrestre solo durante el día, mientras que la superficie terrestre emite constantemente radiación infrarroja hacia el exterior durante el día como durante la noche.

El efecto invernadero es la acción de determinados componentes de la atmósfera llamados gases de invernadero, que consiste en la absorción de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre y su radiación devuelta a la superficie, este fenómeno, permite que las temperaturas de la superficie terrestre sean las adecuadas para la vida. En la Tabla 2.2 se muestra algunos gases de invernadero más importantes.

Tabla 2.2 Principales gases de invernadero (Camilloni y Vera, 2007).

Nombre y fórmula química	Concentración (ppm)
Vapor de agua (H ₂ O)	0,1 (Polo Sur) - 40.000 (trópicos)
Dióxido de carbono (CO ₂)	375
Metano (CH ₄)	17
Óxido nitroso (N ₂ O)	03
Ozono (O ₃)	0,01 (en la superficie)
Freón-11 (CCl ₃ F)	000,026
Freón-12 (CCl ₂ F ₂)	000,047

Los gases de invernadero tienen la particularidad de realizar una absorción selectiva de una porción de la radiación solar entrante, pues permiten que la mayor parte de la radiación solar entrante llegue a la superficie terrestre, pero absorben una buena cantidad de la radiación infrarroja terrestre, evitando así que se escape rápidamente al espacio.

2.3.2. Efecto Coriolis

El aire que se mueve de una zona de alta presión a una de baja presión tiende a circular en una trayectoria casi recta. La fuerza o efecto de Coriolis desvía los vientos hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. En el Ecuador los patrones de vientos no son desviados por el efecto de Coriolis.

El viento en la atmósfera es la consecuencia de los desequilibrios que se producen en ella debido a la rotación del planeta, por lo que el sol no calienta uniformemente a la tierra y a la atmósfera. Aunque el sol es la fuente primaria de energía para todos los movimientos que ocurren en la atmósfera terrestre, el calentamiento de la atmósfera es debido principalmente al calor irradiado por la tierra.

El viento se puede volver nocivo cuando hay inestabilidad en el movimiento de masas. Por lo que la estabilidad atmosférica se obtiene cuando un volumen de aire permanece en su sitio o cambia su posición vertical; es decir, una masa de aire es estable si sus paquetes de aire resisten el movimiento vertical o vuelven a su posición original después que se han movidos.

El movimiento de las masas de aire es provocado principalmente por los cambios de la presión atmosférica. En Ecuador se encuentran la presión y temperatura más alta y la densidad del aire es menor que en los polos; lo cual, lo hace la región principal causante de los ciclones tropicales.

2.4. FENÓMENOS METEOROLÓGICOS

Los fenómenos meteorológicos se llaman así porque se originan por la inestabilidad de las masas de aire que se encuentran en la atmósfera que producen vientos. La presencia de estos fenómenos se caracteriza por la zona de ocurrencia, forma en que se presenta, las velocidades de vientos que originan, tiempo de duración e incluso los daños que puede provocar a la población donde ocurre dicho fenómeno. A continuación, se describe la clasificación de estos fenómenos.

2.4.1 Viento normal, ordinario o natural, viento atmosférico

Conocido como fenómeno meteorológico normal, este se produce por diferencia de presión atmosférica, es decir, la velocidad del viento es muy baja y la turbulencia no es muy grande, y sólo se considera su componente horizontal.

2.4.2 Ciclón tropical

Son un fenómeno meteorológico extremo. Se define como un fenómeno meteorológico generado sobre aguas marítimas de zonas tropicales y subtropicales, asociados a bajas presiones atmosféricas, cuyos vientos circulan en dirección ciclónica (Figura 2.3); es decir, en el hemisferio norte los vientos circulan en el sentido contrario a las manecillas del reloj, y en el hemisferio sur circula en sentido de las manecillas del reloj.



Figura 2.3 Huracán Madeline y Lester (<https://www.nasa.gov>).

Los ciclones tropicales pierden su fuente de energía cuando se mueven sobre la tierra (por la orografía del terreno), cuando se mueve hacia los océanos más fríos haciendo que se disipen, o si el ciclón se mueve en un régimen de viento desfavorable que interrumpa la estructura del sistema. Este tipo de fenómeno, son conocidos por varios nombres según la región donde ocurren:

- a) Huracanes: en el océano Atlántico, golfo de México, mar Caribe y en el océano Pacífico del noreste.
- b) Ciclones: en el mar de Arabia, la bahía de Bengala y en el océano Índico, al este de Mauricio y Madagascar.
- c) Tifones: en el mar de China y la costa de Japón.
- d) Willy-Willy: en el Pacífico Sur, al este de Australia y Samoa.
- e) Baguios: en las Filipinas

Los parámetros de los ciclones tropicales son principalmente: la presión mínima central, los vientos máximos sostenidos, la dirección de trayectoria y velocidad de traslación. La energía de un ciclón es mayor conforme más grande es la diferencia de presiones entre su centro y la habitual de su periferia. Las condiciones para que se originen los ciclones tropicales son las siguientes:

- Superficie oceánica con temperatura mayor a los 26 °C, entre las altitudes de 5° a 15° tanto en el hemisferio norte, como en el sur; vinculado con una zona de baja presión atmosférica, hacia la cual convergen vientos de todas direcciones.
- Cambios pequeños en la dirección y rapidez del viento con la altura en la capa de la troposfera, en la cual, los vientos fluyen y aumentan el ascenso del aire caliente y húmedo que libera vapor de agua que, al llegar al proceso de condensación, se convierte en la fuente de energía del ciclón tropical.
- Una vez iniciada la distribución vertical de humedad y temperatura alta, a través de la columna central, se incrementa la entrada de aire en los niveles bajos, con la

correspondiente salida en el nivel superior del fenómeno, que permita la formación de las nubes cumulonimbus.

- La existencia de una concentración de rotación ciclónica en las partes bajas y medias de la troposfera, influenciada por la fuerza de rotación de la tierra; el aire converge, gira y comienza a moverse en espiral permitiendo la perturbación inicial del fenómeno.
- Una localización en las zonas oceánicas tropicales del planeta, en donde la fuerza de Coriolis no sea demasiado pequeña, es decir, más allá de los 4 ó 5 grados de latitud hacia el polo del hemisferio en que se encuentran.

Al formarse este tipo de fenómeno meteorológico, tiene un área casi circular con la presión más baja en el centro, los cuales transportan gran cantidad de humedad trasladándose con velocidades comprendidas de entre 10 a 40 km/h⁵. Las etapas de evolución de un ciclón tropical son:

1. Perturbación tropical: es la zona de inestabilidad atmosférica, asociada a la existencia de un área de baja presión, genera vientos convergentes que derivan a la postre en una depresión tropical.
2. Depresión tropical: etapa en donde los vientos se incrementan en la superficie por una zona de baja presión y alcanzan una velocidad sostenida menor o igual a 62 km/h.
3. Tormenta tropical: el incremento continuo de los vientos provoca que estos alcancen velocidades de 63 y 118 km/h, las nubes se distribuyen en forma de espiral. Cuando el ciclón alcanza esta intensidad se le asigna un nombre preestablecido por la Organización Meteorológica Mundial.
4. Huracán: en esta etapa los vientos máximos sostenidos alcanzan o superan los 119 km/h, el área nubosa cubre una extensión entre los 500 y 900 km de diámetro, produciendo lluvias intensas. El ojo del huracán alcanza normalmente un diámetro de entre 24 y 40 km, sin embargo, puede llegar a los 100 km.

La evolución de un ciclón tropical puede apreciarse en la Figura 2.4.



a) Depresión tropical b) Tormenta tropical c) Huracán

Figura 2.4 Evolución de los ciclones tropicales (<https://www.nasa.gov>).

2.4.3 Escala de Saffir-Simpson para huracanes

Esta escala, clasifica los huracanes según la intensidad del viento, desarrollada en 1969 por el ingeniero civil Hervert Saffir y el director del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos, Bob Simpson. En la Tabla 2.3 se muestra la clasificación de los ciclones tropicales según la presión que existe en su centro y la velocidad de sus vientos.

Tabla 2.3 Escala de Saffir Simpson para huracanes
(<https://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>).

Ciclón tropical	Velocidad del viento (promediación a 1 min)		
	Kts (nodos)	mph	km/h
Depresión	≤ 33	≤ 38	≤ 62
Tormenta tropical	34 - 63	39 - 73	63 - 118
Categoría 1	64 - 82	74 - 95	119 - 153
Categoría 2	83 - 95	96 - 110	154 - 177
Categoría 3	96 - 112	111 - 129	178 - 208
Categoría 4	113 - 136	130 - 156	209 - 251
Categoría 5	≥ 137	≥ 157	≥ 252

Los ciclones tropicales se caracterizan por producir fuertes vientos, oleaje elevado, una sobrelevación del mar y lluvia abundante.

Las lluvias intensas asociadas a los ciclones tropicales ocurren principalmente en el semicírculo derecho y pueden extenderse a grandes distancias de su región central. En huracanes muy simétricos, la lluvia suele encontrarse cerca de su centro y en todas direcciones. La intensidad de lluvia se define como la precipitación acumulada en cierto intervalo de tiempo entre la duración de dicho periodo. La intensidad de lluvia se puede extender a otros fenómenos no ciclónicos.

El oleaje que se presenta por un evento ciclónico es ocasionado por los fuertes vientos, aunque también puede ser provocado por las embarcaciones o fenómenos como terremotos submarinos.

La sobrelevación del nivel medio del mar es producida por la presión atmosférica del centro del ciclón y los fuertes vientos que se presentan ante este evento, a lo cual se le llama marea de tormenta; provocando inundaciones en la costa y daños en las estructuras en esta zona. Los vientos son más fuertes, mientras la presión del ciclón tropical es menor.

2.4.4 Nombres de Huracanes

Los meteorólogos empezaron a nombrar los huracanes y tormentas tropicales para permitir facilidad de comunicación entre ellos y el público en general en áreas relacionadas con las previsiones, avisos y peligros. Al darle nombre a los huracanes, hay una reducción en la confusión sobre qué tormenta es la que se está describiendo. Los nombres permiten una mejor identificación entre los servicios meteorológicos y los usuarios que reciben la información (informes de alerta, información en general), ya que particularizan el fenómeno y de esa manera se conoce a cuál evento se refieren los boletines de alerta.

Por siglos, muchos huracanes en las Antillas eran nombrados por el santo del día en que afectaba el huracán. Por ejemplo, el Huracán de Santa Ana, que azotó Puerto Rico con excepcional violencia el 26 de Julio de 1825, y San Felipe (el primero) y San Felipe (el segundo) que afectaron Puerto Rico, ambos en septiembre 13, el primero en 1928 y el segundo en 1976. Igualmente, el Huracán de San Zenón, que destruyó la ciudad de Santo Domingo (República Dominicana), el día 3 de septiembre de 1930.

El primer meteorólogo que utilizó un nombre propio (de mujer) para referirse a un huracán fue el australiano Clement Wragge a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. En 1953, los Estados Unidos abandonaron, por confuso, el plan de nombrar las tormentas usando un alfabeto fonético (Able, Baker, Charlie) cuando se introdujo un nuevo alfabeto fonético internacional. En ese año (1953), la Oficina el Tiempo de Estados Unidos de América los llamó únicamente con nombres de mujeres.

La práctica de usar únicamente nombres de mujeres terminó en 1978 cuando se incluyó nombres de mujeres y de hombres en las listas de tormentas para el Pacífico Norte Oriental. En 1979 la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Servicio Meteorológico de Estados Unidos (National Weather Service) incorporaron nombres alternos de hombres y mujeres.

La experiencia ha demostrado que el uso de nombres de mujeres y hombres en la comunicación escrita y hablada es más corto, más rápido y causa menos errores que cualquier otra identificación de huracanes usada hasta la fecha. Cada año, se prepara una lista potencial de nombres para la venidera temporada de huracanes. La lista contiene un nombre por cada letra del alfabeto (las letras Q, U, X, Y, Z no se incluyen debido a que pocos nombres empiezan con esas letras). Estas listas son recicladas cada seis años y se reemplazan los nombres cuando el nombre de un huracán ha sido retirado.

Los nombres de huracanes muy destructivos se retiran, quedando en los registros históricos y son sustituidos por otros que inician con la misma letra. Los nombres de huracán se retiran (es decir, no se usan otra vez para una nueva tormenta) si se considera que fue muy notable

debido al daño y/o muertes que causó. Al retirar el nombre de tormentas memorables evita confundir una tormenta bien conocida históricamente con una actual.

Siempre que un huracán haya tenido un impacto importante, cualquier país afectado por la tormenta puede solicitar que se retire el nombre del huracán por acuerdo de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Retirar el nombre realmente significa que no puede ser reusado durante por lo menos 10 años, para facilitar las referencias históricas, acciones legales, actividades de reclamaciones de seguros, etc., y evitar las confusiones del público con otra tormenta del mismo nombre. Si el nombre es retirado, se selecciona un nombre del mismo género (<https://www.snet.gob.sv/ver/seccion+educativa/meteorologia/huracanes/nombres/>).

2.4.5 Tormentas severas

Es un fenómeno meteorológico extremo, se caracteriza por que están acompañadas de lluvias intensas y vientos fuertes; pueden producir granizo, rayos y truenos, inundaciones severas, tornados y downburst (chaparrón, reventón o ráfaga, que se caracteriza por ser un descenso repentino de viento, lluvia y granizo y suele expandirse horizontalmente al tocar el suelo).

Las tormentas severas son susceptibles a producir daños materiales importantes, muertes o ambos. Si se presentan en el mar, producen oleaje alto y marejada intensa. Una tormenta severa se forma a partir de la convección, es decir, el calor contenido en el ambiente después de un día muy caluroso.

Para la formación de una tormenta severa, es necesario el desarrollo de las nubes cumulonimbus, las cuales son densas y de considerable dimensión vertical en forma de coliflor. Una parte de su región superior es generalmente lisa, fibrosa o estriada y casi siempre aplanada, la cual se extiende frecuentemente en forma de yunque o de vasto penacho.

Las nubes cumulonimbus son de gran tamaño, pueden llegar a la parte superior de la troposfera o la parte inferior de la estratosfera, y se desarrollan al menos que tengan la suficiente energía, es decir, la masa de aire atmosférico necesita contener gran cantidad de vapor de agua distribuidas por toda la capa vertical.

2.4.6 Fenómenos atmosféricos que acompañan a las tormentas severas

Existen diferentes fenómenos atmosféricos que pueden acompañar las tormentas severas, además de la precipitación que las acompañan

a) Tormenta eléctrica: Las tormentas eléctricas son descargas bruscas de electricidad atmosférica que se manifiestan por un resplandor breve llamado rayo y por un ruido seco o estruendo llamado trueno (Figura 2.5).

Se asocian a nubes convectivas o cumulonimbus y pueden estar acompañadas de precipitación en forma de chubascos; pero en ocasiones puede ser nieve, nieve granulada, hielo granulado o granizo. Son de carácter local y se reducen casi siempre a sólo unas decenas de kilómetros cuadrados (Prieto *et al.*, 2021).



Figura 2.5 Tormenta eléctrica en Colima, conocida como la noche de los mil tenedores (<https://www.goodnewsnetwork.org/foto-compuesta-por-50-rayos/>).

Este tipo de tormentas, se forman por una combinación de humedad, entre el aire caliente que sube (proceso de convección) con rapidez y una fuerza capaz de levantar a éste, como un frente frío, una brisa marina o una montaña (NSSL).

El ciclo de duración es de una a dos horas y empieza cuando una posición de aire está más caliente que el de su entorno, o bien, cuando el aire más frío penetra por debajo de ella. El estado de madurez se asocia con una gran cantidad de precipitación y rayos. El rayo es una descarga electrostática que resulta de la acumulación de cargas positivas y negativas dentro de una nube de tormenta. Los riesgos que se presentan a la población afectada por una tormenta eléctrica son parálisis, quemaduras, intensos dolores de cabeza, pérdida de audición y de la memoria, hasta llegar a la muerte.

b) Tormentas de nieve (nevadas): Las tormentas de nieve son una forma de precipitación sólida en forma de copos. Un copo de nieve es la aglomeración de cristales transparentes de hielo que se forman cuando el vapor de agua se condensa a temperaturas inferiores a la de solidificación del agua (Figura 2.6). Estas tormentas se forman a partir de que en el ambiente exista una alta concentración de humedad en la atmósfera y una temperatura inferior a 0°C. La condensación de la nieve tiene la forma de ramificaciones intrincadas de cristales hexagonales planos en una variedad infinita de patrones. Los copos de nieve tienen diferentes formas y tamaño, ello depende de la temperatura y humedad de la atmósfera.

Los fenómenos meteorológicos que provocan las nevadas son los que ocurren generalmente durante el invierno, como son las masas de aire polar y los frentes fríos, que en algunas

interacciones llegan a interactuar con corrientes en chorro, líneas de vaguadas, y entrada de humedad de los océanos hacia tierra.



Figura 2.6 Nevada en San Pedro Martir, B.C
(<https://www.infobaja.info/nevo-en-sierra-de-san-pedro-martir/>).

c) Tormentas de granizo (granizadas): El granizo es un tipo de precipitación en forma de piedra de hielo y se forma en las tormentas severas cuando las gotas de agua o los copos de nieve formados en las nubes de tipo cumulonimbus son arrastrados por corrientes ascendentes y descendentes de aire (Figura 2.7).

Las piedras de granizo se forman dentro de una nube cumulonimbus a alturas superiores al nivel de congelación y crecen por las colisiones sucesivas de estas partículas de agua sobre enfriada. Cuando las partículas de granizo se hacen demasiado pesadas para ser sostenidas por las corrientes de aire caen hacia el suelo. El tamaño de las piedras de granizo está entre los 5mm de diámetro hasta pedriscos del tamaño de una pelota de golf, y las mayores pueden ser muy destructivas, como para romper ventanas y abollar las láminas de los automóviles, pero el mayor daño se produce en los cultivos, o a veces, varias piedras pueden solidificarse formando grandes masas de hielo y nieve sin forma (Jiménez *et al.*, 2012).



Figura 2.7 Granizada en Guadalajara, Jalisco 2019
(https://wradio.com.mx/radio/2019/07/01/nacional/1561943858_500740.html).

d) Tornados: Un tornado es la perturbación atmosférica más violenta en forma de vórtice, el cual aparece en la base de una nube de tipo cumuliforme, resultado de una gran inestabilidad, provocada por un fuerte descenso de la presión en el centro del fenómeno y fuertes vientos que circulan en forma ciclónica alrededor de éste. Para que se denomine tornado, el vórtice debe extenderse hacia abajo desde una nube y debe tocar tierra (Figura 2.8). Los tornados se forman cuando chocan masas de aire con diferentes características físicas de densidad, temperatura, humedad y velocidad.

Se forman entre las latitudes de 5° a 15° norte y sur, la velocidad del viento varía de entre 62 a 420 km/h; en casos escasos supera los 500 km/h. el diámetro promedio es de 250 m, oscilando de entre los 100 m y 1 km, el ciclo de duración es desde unos minutos hasta horas en casos muy escasos. Los tornados según su origen, se clasifican en tornados superceldas y no superceldas.



Figura 2.8 Tornado en San Cristobal, 2008

(https://www.researchgate.net/figure/Tornado-en-San-Cristobal-Edo-Tachira-31-10-2008_fig13_234097007).

2.4.7 Tornados superceldas

Estos tornados tienen su origen en una tormenta severa de larga duración cuyo viento se encuentra en rotación, conocida como mesociclón o supercelda. Se forma cuando una columna de nube cumulonimbus genera corrientes ascendentes dentro de ella misma, puede llegar a extenderse hasta algunos kilómetros de diámetro, lo que origina un tipo de tormenta convectiva con ciertas condiciones que pueden generar fuertes vientos, grandes granizadas y tornados violentos que puede devastar sobre una larga trayectoria (Prieto *et al.*, 2021).

2.4.8 Tornado no-supercelda

Este tipo de tornados suelen ser de menor magnitud a diferencia de los tornados supercelda. Se forman cuando una nube cumulus congestus, en rápida formación, atrae el aire que circula lentamente y de manera giratoria en los niveles inferiores de la superficie de la tierra. Los tornados no-supercelda que ocurren en el mar o en otro cuerpo de agua reciben el nombre de tromba o waterspout.

2.4.9 Escala de Fujita-Pearson para tornados

La escala para medir la intensidad de un tornado universalmente es la Escala de Fujita o también llamada Fujita-Pearson, elaborada por Tetsuya Fujita y Allan Pearson de la universidad de Chicago en 1971; la cual permite conocer la intensidad del tornado a partir de los daños generados, por lo que se clasifican en cinco escalas (Tabla 2.4).

Tabla 2.4 Escala de Fujita-Pearson.

Número en la escala	Denominación de Intensidad	Velocidad del viento km/h	Tipo de daños
F0	Vendaval	60-100	Daños en chimeneas, rotura de ramas, árboles pequeños rotos, daños en señales y rótulos.
F1	Tornado moderado	100-180	Desprendimiento de algunos tejados, mueve coches y camper, arranca algunos árboles pequeños.
F2	Tornado importante	180-250	Daños considerables. Arranca tejados y grandes árboles de raíz, casas débiles destruidas, así como objetos ligeros que son lanzados a gran velocidad.
F3	Tornado severo	250-320	Daños en construcciones sólidas, trenes afectados, la mayoría de los árboles son arrancados.
F4	Tornado devastador	320-420	Estructuras sólidas seriamente dañadas, estructuras con cimientos débiles arrancadas y arrastradas, coches y objetos pesados arrastrados.
F5	Tornado increíble	420-550	Edificios grandes seriamente afectados o colapsados, coches lanzados a distancias superiores a los 100 metros, estructuras de aceros sufren dañados.

2.4.10 Río atmosférico

Los ríos atmosféricos (RAS) son irrupciones/cintas transportadoras relativamente estrechas, muy ricas en vapor de agua que desde las zonas tropicales avanzan hacia latitudes medias conducidas por fuertes vientos y siendo potencialmente precursoras y generadoras de precipitaciones persistentes y a veces intensas en zonas terrestres.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Camilloni, I., y Vera, C. (2007). La atmósfera. Ciencias Naturales. Explora. Las ciencias en el mundo contemporáneo.

Jiménez Espinosa, M., Matías Ramírez, L. G., Fuentes Mariles, O. A., y Prieto González, R. (2021). Ciclones Tropicales. Serie Fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Jiménez, M., Baeza, C., Matías, L., y Eslava, H. (2012). Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidro-meteorológicos. Sistema Nacional de Protección Civil.

Peraza, D. B., Coulbourne, W. L., & Griffith, M. (Eds.). (2014, August). Engineering investigations of hurricane damage: Wind versus water. American Society of Civil Engineers.

Prieto González, R., Avendaño García, M. A., Matías Ramírez, L. G. y Eslava Morales, H. (2021). Tormentas severas. Serie Fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Rosengaus Moshinsky, M., Jiménez Espinosa, M., y Vázquez Conde, M. T. (2002). Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. México. Secretaría de Gobernación; México. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

National Severe Storm Laboratory (NSSL). (2021). National Oceanic Atmospheric and Administration. <https://www.nssl.noaa.gov/>

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2018). Caracterización de Escenarios de Riesgo por Ciclones Tropicales.

Wilches, G. (2009). Ese océano de aire en que vivimos: origen, evolución, estado actual y futuros posibles de la atmósfera terrestre.

CAPÍTULO 3

REGIONALIZACIÓN EÓLICA DE LA REPÚBLICA MEXICANA

La República Mexicana es uno de los países que constantemente se ve afectada por los diversos fenómenos naturales que frecuentemente se presentan, como son los ciclones tropicales, las tormentas severas y sismos que son los que más causan afectaciones a la población y a la economía del país, también las erupciones volcánicas y deslaves que no con frecuencia se presentan, pero cuando ocurren, causan daños significativos.

Los fenómenos de tipo meteorológico son los que ocasionan mayor número de pérdidas humanas y económicas principalmente por la frecuencia de ocurrencia en la República Mexicana, aunque los fenómenos de tipo geológico a un corto tiempo son los que ocasionan mayor perjuicio por las afectaciones en las infraestructuras (García *et al.*, 2006).

los fenómenos meteorológicos comprenden daños severos a la infraestructura económica, social y productiva; la infraestructura económica en el área de comunicaciones y transportes y urbana; la infraestructura social en vivienda, educación, salud e infraestructura hidráulica; y el sector productivo en el área agropecuario, pesquero, agrícola, comercios y servicios. Así cómo también causan daños a la población provocando pérdidas humanas.

3.1. VELOCIDADES Y FUERZAS DE VIENTO

El Manual de Diseño de Obras Civiles por Viento (MDOC), presenta los procedimientos necesarios para la determinación de velocidades de viento en la República Mexicana y las fuerzas mínimas correspondientes, que deben emplearse para el diseño eólico de los diferentes tipos de estructuras que se pretendan construir.

El MDOC propone unos mapas de isotacas en dónde presenta la velocidad regional de ráfaga para diseño en la República Mexicana. La velocidad regional de ráfaga del viento (V_R), es la velocidad máxima asociada a un período de retorno fijo (T), con una probabilidad de excedencia de $1/T$, en una zona o región determinada del país, dónde el período de retorno está dado en años. Los MDOC de los años 1993, 2008 y 2020; proponen velocidades regionales (V_R) de las principales ciudades de la República Mexicana. En la Tabla 3.1 se muestran las velocidades regionales propuestas por los manuales de las ciudades principales que se utilizaron para realizar el incremento de velocidades regionales.

Tabla 3.1 Velocidades regionales en km/h de los MDOC 1993, 2008 y 2020.

Ciudad	MDOC-1993			MDOC-2008			MDOC-2020		
	T=10	T=50	T=200	T=10	T=50	T=200	T=10	T=50	T=200
Aguascalientes, Ags.	118.00	141.00	160.00	110.00	120.00	140.00	111.40	134.40	152.70
Ensenada, B.C.	100.00	148.00	190.00	86.00	105.00	120.00	81.00	96.80	109.60
Mexicali, B.C.	100.00	149.00	190.00	83.00	101.00	116.00	110.20	123.20	133.70
Tijuana, B.C.				100.00	119.00	130.00	94.41	108.33	119.36
Cd. Constitución, B.C.S.				105.00	137.00	164.00	102.50	135.60	160.80
La Paz, B.C.S.	135.00	171.00	200.00	124.00	164.00	197.00	124.80	165.00	195.00
Loreto, B.C.S.				101.00	131.00	157.00	109.10	141.30	167.80
Puerto Cortés, B.C.S.	129.00	155.00	172.00	110.00	140.00	170.00	118.60	153.30	180.70
Campeche, Camp.	98.00	132.00	159.00	108.00	135.00	160.00	100.90	126.80	154.80
Cd. del Carmen, Camp.				104.00	120.00	136.00	93.08	110.85	128.03
Cd. Acuña, Coah.				143.00	170.00	188.00	125.77	142.02	154.05
Monclova, Coah.	123.00	145.00	159.00	128.00	147.00	164.00	122.90	143.00	159.20
Piedras Negras, Coah.	137.00	155.00	168.00	160.00	180.00	190.00	171.80	193.60	209.10
Saltillo, Coah.	111.00	124.00	142.00	120.00	130.00	140.00	119.50	137.50	151.90
Torreón, Coah.	136.00	168.00	193.00	130.00	150.00	160.00	133.00	156.40	175.10
Colima, Col.	105.00	128.00	147.00	130.00	150.00	170.00	95.57	119.67	136.81
Isla Socorro, Col.				169.00	222.00	270.00	169.00	215.00	248.10
Manzanillo, Col.	110.00	158.00	195.00	127.00	164.00	195.00	137.20	184.20	218.30
Comitán, Chis.	72.00	99.00	124.00	97.00	110.00	123.00	86.40	98.40	108.30
San Cristóbal de las Casas, Chis.	75.00	92.00	105.00	100.00	110.00	120.00	82.10	95.30	106.10
Tapachula, Chis.	90.00	111.00	132.00	100.00	119.00	130.00	86.20	101.50	113.90
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	90.00	106.00	120.00	104.00	120.00	131.00	111.40	127.50	140.30
Cd. Juárez, Chlh.	116.00	144.00	158.00	129.00	144.00	160.00	126.06	140.91	152.92
Chihuahua, Chih.	122.00	136.00	147.00	130.00	150.00	162.00	116.10	134.90	150.00
Delicias, Chih.				130.00	148.00	160.00	131.30	148.50	162.40
Hidalgo del Parral, Chlh.				120.00	133.00	150.00	127.40	149.20	166.50
Nuevo Casas Grandes, Chih.	117.00	134.00	148.00	127.00	144.00	160.00	121.60	141.90	158.10
México, Central	98.00	115.00	129.00	100.00	110.00	120.00	104.10	118.80	130.80

Tabla 3.1 Velocidades regionales en km/h de los MDOC 1993, 2008 y 2020, continuación.

Ciudad	MDOC-1993			MDOC-2008			MDOC-2020		
	T=10	T=50	T=200	T=10	T=50	T=200	T=10	T=50	T=200
Durango, Dgo.	106.00	117.00	126.00	110.00	124.00	140.00	110.60	126.20	138.90
Gómez Palacio, Dgo.				130.00	149.00	160.00	132.12	155.18	175.05
Tepehuanes, Dgo.				120.00	140.00	150.00	133.50	152.10	167.10
Celaya, Gto.				113.00	128.00	140.00	100.11	115.28	124.83
Guanajuato, Gto.	127.00	140.00	148.00	140.00	160.00	170.00	137.90	157.00	171.50
Irapuato, Gto.				123.00	139.00	151.00	114.55	130.88	146.41
León de los Aldama, Gto.	127.00	140.00	148.00	140.00	159.00	170.00	120.66	137.52	152.80
Salamanca, Gto.				120.00	137.00	148.00	101.74	117.10	128.03
Acapulco, Gro.	129.00	162.00	181.00	120.00	150.00	173.00	112.00	140.70	163.40
Chilpancingo, Gro.	109.00	120.00	131.00	120.00	138.00	150.00	112.90	129.70	143.30
Iguala de la Independencia, Gro.				110.00	127.00	139.00	104.52	120.37	133.59
Pachuca, Hgo.	117.00	128.00	137.00	100.00	117.00	128.00	90.30	103.50	114.30
Tulancingo, Hgo.	92.00	106.00	116.00	106.00	124.00	135.00	95.50	108.90	119.80
Cd. Guzmán, Jal.	101.00	120.00	132.00	120.00	140.00	150.00	85.10	101.70	115.40
Colotlán, Jal.	131.00	148.00	161.00	120.00	131.00	150.00	126.20	147.30	164.10
Guadalajara, Jal.	146.00	164.00	176.00	100.00	110.00	120.00	92.80	107.60	119.70
Lagos de Moreno, Jal.	118.00	130.00	141.00	124.00	136.00	147.00	119.00	134.30	146.70
Puerto Vallarta, Jal.	108.00	146.00	171.00	114.00	137.00	155.00	114.16	145.71	170.34
Tlaquepaque, Jal.				109.00	126.00	140.00	97.10	112.59	124.16
Tonalá, Jal.				110.00	128.00	141.00	98.07	113.64	125.54
Buenavista, Edo. Méx.				100.00	111.00	121.00	92.48	106.62	118.31
Cd. López Mateos, Edo. Méx.				100.00	112.00	122.00	92.68	106.75	118.14
Cd. Nezahualcóyotl, Edo. Méx.				100.00	111.00	121.00	90.93	105.32	117.68
Chalco de Díaz Covarrublas, Edo. Méx.				100.00	111.00	122.00	91.35	105.79	117.95
Chapingo, Edo. Méx.	91.00	110.00	126.00	100.00	110.00	120.00	88.30	103.70	117.00
Chicoloapan de Juárez, Edo. Méx.				100.00	110.00	120.00	90.10	104.42	116.47
Chimalhuacán, Edo. Méx.				100.00	110.00	120.00	90.76	105.14	117.46

Tabla 3.1 Velocidades regionales en km/h de los MDOC 1993, 2008 y 2020, continuación.

Ciudad	MDOC-1993			MDOC-2008			MDOC-2020		
	T=10	T=50	T=200	T=10	T=50	T=200	T=10	T=50	T=200
Cuautitlán Izcalli, Edo. Méx.				100.00	110.00	121.00	92.88	107.00	118.47
Ecatepec de Morelos, Edo. Méx.				100.00	111.00	121.00	91.47	105.65	117.47
Huixquilucan, Edo. Méx.				100.00	114.00	125.00	92.34	106.42	117.86
Ixtapaluca, Edo. Méx.				100.00	111.00	121.00	90.74	105.10	117.16
Los Reyes Acaquilpan, Edo. Méx.				100.00	111.00	121.00	91.10	105.50	117.86
Metepec, Edo. Méx.				100.00	114.00	125.00	90.15	103.73	113.05
Naucalpan de Juárez, Edo. Méx.				100.00	113.00	123.00	92.61	106.73	118.57
Ojo de Agua, Edo. Méx.				100.00	110.00	121.00	91.40	105.48	117.00
San Francisco Coacalco, Edo. Méx.				100.00	110.00	121.00	92.49	106.62	118.22
Tlalnepantla, Edo. Méx.				100.00	112.00	122.00	92.62	106.80	118.64
Toluca, Edo. Méx.	81.00	93.00	102.00	100.00	110.00	120.00	84.10	96.10	105.80
Villa Nicolás Romero, Edo. Méx.				100.00	111.00	121.00	93.01	107.07	118.24
Xico, Edo. Méx.				100.00	111.00	122.00	91.44	105.87	118.22
Morelia, Mich.	79.00	92.00	102.00	110.00	120.00	130.00	93.00	108.10	120.50
Uruapan, Mich.				127.00	150.00	166.00	95.24	111.14	125.49
Zamora, Mich.				123.00	142.00	156.00	98.40	115.10	128.80
Cuatla, Mor.				105.00	119.00	130.00	95.86	111.01	123.25
Cuernavaca, Mor.	93.00	108.00	120.00	102.00	120.00	130.00	94.70	110.30	122.90
Jiutepec, Mor.				106.00	120.00	132.00	94.79	109.85	122.23
Tepic, Nay.	84.00	102.00	115.00	110.00	130.00	149.00	112.50	132.50	148.80
Cd. Apodaca, N.L.				125.00	145.00	162.00	126.07	147.21	164.54
Cd. General Escobedo, N.L.				124.00	144.00	161.00	125.91	146.98	164.25
Cd. Santa Catarina, N.L.				124.00	144.00	159.00	124.53	144.97	161.77
Guadalupe, N.L.				125.00	145.00	161.00	126.04	147.16	164.47
Monterrey, N.L.	123.00	143.00	158.00	123.00	143.00	160.00	126.20	147.50	164.50
San Nicolás de los Garza, N.L.				125.00	145.00	161.00	125.94	147.01	164.33

Tabla 3.1 Velocidades regionales en km/h de los MDOC 1993, 2008 y 2020, continuación.

Ciudad	MDOC-1993			MDOC-2008			MDOC-2020		
	T=10	T=50	T=200	T=10	T=50	T=200	T=10	T=50	T=200
San Pedro Garza García, N.L.				124.00	144.00	160.00	125.18	145.90	162.94
Huajuapán de León, Oax.				110.00	130.00	140.00	105.90	121.90	134.90
Oaxaca, Oax.	104.00	114.00	122.00	100.00	110.00	120.00	115.50	129.00	140.00
Salina Cruz, Oax.	109.00	126.00	146.00	120.00	138.00	150.00	108.30	127.10	142.30
Puebla, Pue.	93.00	106.00	117.00	100.00	112.00	122.00	99.80	114.30	126.00
Tehuacán, Pue.				123.00	141.00	154.00	118.42	138.30	157.68
Querétaro, Qro.	103.00	118.00	131.00	115.00	129.00	143.00	117.80	137.60	153.30
San Juan del Río, Qro.				105.00	118.00	129.00	108.40	126.02	143.53
Cancún, Q. Roo				141.00	196.00	243.00	131.51	195.92	241.09
Chetumal, Q. Roo	119.00	150.00	180.00	113.00	153.00	189.00	96.40	150.10	189.70
Cozumel, Q. Roo	124.00	158.00	185.00	140.00	200.00	250.00	135.40	198.70	245.50
Playa del Carmen, Q. Roo				137.00	189.00	236.00	131.64	190.63	236.21
Cd. Valles, S.L.P.				120.00	134.00	150.00	108.22	124.92	137.97
Río Verde, S.L.P.	84.00	111.00	130.00	100.00	120.00	131.00	117.68	137.12	155.12
San Luis Potosí, S.L.P.	126.00	141.00	153.00	130.00	140.00	160.00	129.20	151.20	168.90
Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.				120.00	138.00	151.00	127.58	148.91	167.68
Tamuín, S.L.P.	121.00	138.00	155.00	120.00	138.00	150.00	110.00	126.50	140.00
Culiacán, Sin.	94.00	118.00	140.00	90.00	107.00	120.00	102.20	130.80	154.90
Los Mochis, Sin.				107.00	137.00	161.00	113.75	147.16	177.75
Mazatlán, Sin.	145.00	213.00	240.00	130.00	179.00	220.00	124.60	172.60	207.50
Cd. Obregón, Son.	147.00	169.00	186.00	140.00	156.00	173.00	131.00	152.00	168.90
Guaymas, Son.	130.00	160.00	190.00	139.00	159.00	170.00	97.90	123.60	146.80
Hermosillo, Son.	122.00	151.00	179.00	108.00	120.00	140.00	89.20	106.60	120.70
Heroica Nogales, Son.				115.00	134.00	150.00	112.11	125.70	137.16
Navojoa, Son.				140.00	155.00	173.00	130.47	151.64	169.84
Pilares de Nacozari, Son.				120.00	140.00	152.00	109.21	123.52	135.06
San Luis Río Colorado, Son.				85.00	104.00	122.00	105.72	118.87	130.41
Villahermosa, Tab.	114.00	127.00	138.00	112.00	128.00	140.00	112.40	130.80	145.50

Tabla 3.1 Velocidades regionales en km/h de los MDOC 1993, 2008 y 2020, continuación.

Ciudad	MDOC-1993			MDOC-2008			MDOC-2020		
	T=10	T=50	T=200	T=10	T=50	T=200	T=10	T=50	T=200
Cd. Madero, Tamps.				126.00	154.00	185.00	127.26	152.70	180.10
Cd. Victoria, Tamps.	135.00	170.00	197.00	135.00	159.00	170.00	108.10	127.60	143.60
Heroica Matamoros, Tamps.				134.00	164.00	190.00	113.20	164.60	204.70
Nuevo Laredo, Tamps.				130.00	151.00	170.00	114.86	130.24	140.98
Reynosa, Tamps.				130.00	156.00	170.00	99.15	115.56	131.64
Soto la Marina, Tamps.	130.00	167.00	204.00	139.00	166.00	186.00	109.70	133.60	165.30
Tampico, Tamps.	129.00	160.00	193.00	125.00	153.00	186.00	128.80	154.90	181.90
Tlaxcala, Tlax.	87.00	102.00	113.00	100.00	110.00	120.00	74.10	86.10	95.90
Coatzacoalcos, Ver.	117.00	130.00	145.00	132.00	148.00	163.00	122.80	140.00	153.90
Córdoba, Ver.				138.00	159.00	174.00	129.23	151.07	170.31
Laguna Verde, Ver.				109.00	137.00	160.00	133.48	153.95	170.29
Minatitlán, Ver.				128.00	142.00	157.00	122.87	139.91	154.00
Orizaba, Ver.	126.00	153.00	172.00	130.00	147.00	163.00	129.80	152.70	171.10
Poza Rica de Hidalgo, Ver.				120.00	141.00	160.00	92.13	111.74	127.77
Tuxpan, Ver.	122.00	151.00	172.00	123.00	149.00	169.00	96.90	129.50	163.50
Veracruz, Ver.	150.00	175.00	194.00	140.00	170.00	180.00	161.20	180.00	193.80
Xalapa, Ver.	118.00	137.00	152.00	120.00	139.00	150.00	112.00	131.30	146.60
Mérida, Yuc.	122.00	156.00	186.00	126.00	172.00	213.00	123.10	164.20	197.30
Progreso, Yuc.	103.00	163.00	198.00	130.00	180.00	220.00	130.00	189.60	231.40
Valladolid, Yuc.	100.00	163.00	198.00	123.00	157.00	195.00	107.80	153.60	189.30
Fresnillo, Zac.				117.00	134.00	145.00	119.91	137.53	151.67
Sombrerete, Zac.				120.00	140.00	150.00	120.00	134.70	146.70
Zacatecas, Zac.	110.00	122.00	131.00	117.00	133.00	146.00	119.80	139.10	154.70

Debido al cambio climático causa del calentamiento global, que provoca una gran incertidumbre de daños a la población mexicana por el aumento de las velocidades del viento que provocan los fenómenos meteorológicos, las velocidades regionales propuestas tienen que aumentar año con año; por lo que se realizó la comparación de velocidades regionales de un manual a otro (1993-2008, 2008-2020 y 1993-2020), utilizando la Ecuación 3.1 se logra

obtener el incremento de velocidades regionales de las principales ciudades de la República Mexicana, mostrándose en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 por período de retorno (T) con incremento mayor al 5%.

$$I_{a-b} = \frac{(V_{Rb} - V_{Ra})}{V_{Ra}} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Dónde

I = Incremento de velocidades regionales de las principales ciudades.

V_R = Velocidad regional del MDOC de los años a y b (ej. comparativa 1993-2008, a=1993 y b=2008).



a) MDOC 1993-2008



b) MDOC 2008-2020



c) MDOC 1993-2020

Figura 3.1 Incremento de velocidades mayor al 5% para un T=10 años.



c) MDOC 1993-2020

Figura 3.2 Incremento de velocidades mayor al 5% para un T=50 años.



a) MDOC 1993-2008



b) MDOC 2008-2020



c) MDOC 1993-2020

Figura 3.3 Incremento de velocidades mayor al 5% para un T=200 años.

Las ciudades principales cuya velocidad regional ha incrementado mayor al 5% en los años 2008 y 2020, para los periodos de retorno de 10, 50 y 200 años son Manzanillo Col., Piedras Negras Coah., Tuxtla Gutiérrez Chis., Zacatecas Zac. y Monterrey N.L.; Mientras que las ciudades principales con incremento de velocidades regionales mayor al 10% en la comparación del MDOC 2008-2020 para los periodos de retorno de 10, 50 y 200 años son Mexicali B.C., Río Verde S.L.P., Oaxaca Oax. y Culiacán Sin. Esto quiere decir que, según los MDOC, éstas últimas ciudades se han visto más afectadas por eventos meteorológicos en los últimos 12 años lo que ocasiona un incremento de velocidades para los tres periodos de retorno. Es de suma importancia conocer éstos datos importantes, ya que son de utilidad para realizar una comparación con el análisis eólico que se pretende realizar en esta tesis.

3.2. DAÑOS OCASIONADOS POR LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS

La República Mexicana se ve constantemente atacada por los diferentes tipos de fenómenos naturales que se presentan día con día, provocando así daños económicos a la población. En la base de datos del Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED), describe los diferentes tipos de fenómenos que se presentan en México, los cuales los clasifica en fenómenos meteorológico, geológico, químico, sanitario y socio-organizativo. De los cuáles en la Tabla 3.2, se muestra el porcentaje del total de daños que han generado desde el año 2000 al 2020.

Tabla 3.2 Total de daños originados por los fenómenos naturales en México (%).

Año	Fenómeno natural					Total
	Meteorológicos	Geología	Químico	Sanitarios	Socio-organizativos	
2000	92.55	7.45	0.00	0.00	0.00	100.00
2001	97.61	1.18	0.00	0.00	1.21	100.00
2002	97.39	0.02	1.68	0.44	0.46	100.00
2003	61.21	18.51	14.47	5.31	0.49	100.00
2004	85.36	0.05	8.09	0.00	6.51	100.00
2005	99.27	0.00	0.63	0.00	0.10	100.00
2006	92.76	0.02	5.57	0.00	1.65	100.00
2007	97.58	2.07	0.28	0.00	0.07	100.00
2008	97.20	0.55	1.69	0.56	-	100.00
2009	96.26	0.49	2.19	-	1.05	100.00
2010	89.36	9.55	1.00	-	0.09	100.00
2011	95.49	1.01	3.32	0.00	0.18	100.00

Tabla 3.2 Total de daños originados por los fenómenos naturales en México (%), continuación.

Año	Fenómeno natural					Total
	Meteorológicos	Geología	Químico	Sanitarios	Socio-organizativos	
2012	88.19	8.99	2.14	0.00	0.68	100.00
2013	91.81	1.34	6.72	0.00	0.13	100.00
2014	84.91	7.12	7.77	0.00	0.20	100.00
2015	96.22	1.39	1.38	0.03	0.98	100.00
2016	86.62	0.32	12.97	-	0.09	100.00
2017	92.38	6.80	0.82	-	0.00	100.00
2018	84.48	9.89	4.64	-	1.00	100.00
2019	86.04	1.47	10.51	0.01	1.96	100.00
2020	83.44	14.33	1.78	0.00	0.45	100.00

Los fenómenos meteorológicos que se han presentado en el país son los ciclones tropicales, lluvias e inundaciones, bajas temperaturas y temperaturas extremas, sequías y otros fenómenos como fuertes vientos o tormentas severas. De los cuáles el mayor porcentaje de daños son ocasionados por los ciclones tropicales, no dejando a un lado los daños que ocasionan las tormentas severas, aunque no se tiene un registro formal de los daños generados por éstos fenómenos meteorológicos. En la Tabla 3.3 se muestran el porcentaje de daños por fenómeno meteorológico.

Tabla 3.3 Total de daños originados por fenómenos meteorológicos en México (%).

Año	Fenómenos meteorológicos					
	Ciclones tropicales	Lluvias e Inundaciones	Bajas temperaturas	Temperaturas extremas	Sequía	Otros Fenómenos
2010	60.53	35.20	0.00	0.00	3.48	0.79
2011	23.58	39.85	-	0.00	19.60	16.97
2012	83.81	7.19	-	0.06	3.21	5.73
2013	85.51	4.00	3.10	0.00	6.96	0.43
2014	90.40	7.45	0.58	0.13	0.00	1.43
2015	28.44	62.41	2.91	0.00	2.51	3.73
2016	24.59	71.74	2.39	0.00	-	1.27
2017	91.47	8.51	-	-	-	0.02
2018	62.54	34.74	-	2.64	-	0.09
2019	53.45	27.65	-	0.43	18.46	0.01

Los fenómenos meteorológicos son los que causan mayores daños económicos a la población con un promedio del 90.29%, alcanzando los 26 mil millones de pesos aproximadamente al año, de daños ocasionados por éste tipo de fenómenos.

Los ciclones tropicales que han marcado historia por la cantidad de daños generados son Odile (2014), Manuel (2013), Alex (2010), Karl (2010), Mathew (2010), Stan (2005) y Wilma (2005); en la Tabla 3.4 se muestran las afectaciones que provocaron y los daños económicos totales en millones de pesos (mdp) generados por dichos eventos ciclónicos.

Tabla 3.4 Afectaciones de los ciclones tropicales que mayor afectaron al país.

Año	Ciclón tropical	Categoría	Daños totales (mdp)
2014	Odile	H4	\$ 24,133.17
2013	Manuel	H1	\$ 23,441.40
2010	Alex	H2	\$ 21,500.90
2010	Karl y Matthew	H3	\$ 24,679.80
2005	Stan	H1	\$ 15,031.20
2005	Wilma	H5	\$ 18,258.00

El número de fallecidos por éstos eventos ciclónicos son de: Odile 6, Manuel 105, Alex 9, Karl y Matthew 23 e Stan 86 muertes registradas, con Wilma no se registraron fallecidos, aunque los mayores daños se registraron en viviendas, escuelas, áreas de cultivo, caminos afectados, entre otros. Mientras que, los huracanes Ingrid y Manuel (2013), Pauline (1997), Gilbert (1988) y Paul (1982) han provocado un mayor número de muertes de 180, 240, 288 y 225 respectivamente.

Otros fenómenos meteorológicos que han causado daños drásticos a la población son las tormentas severas y los fuertes vientos. Entre las tormentas severas que se han presentado en la República Mexicana son las granizadas, tormentas eléctricas, heladas y tornados, en la Tabla 3.5 se muestra el total de daños en millones de pesos de éste tipo de eventos meteorológicos registrados en la base de datos del CENAPRED.

Tabla 3.5 Total de daños generados por tormentas severas y fuertes vientos.

Año	Fenómeno meteorológico	Total de daños (mdp)
2004	Fuertes vientos	\$ 1.70
2005	Granizada	\$ 35.40
2005	Tormenta eléctrica	\$ 2.40
2005	Helada	\$ 65.00
2005	Granizada	\$ 20.70
2005	Fuertes vientos	\$ 99.90

Tabla 3.5 Total de daños generados por tormentas severas y fuertes vientos continuación.

Año	Fenómeno meteorológico	Total de daños (mdp)
2007	Tornado (Piedras Negras, Coahuila)	\$ 125.17
2007	Helada	\$ 16.91
2007	Granizada	\$ 5.79
2007	Fuertes vientos	\$ 1.24
2009	Fuertes vientos	\$ 4.70
2009	Granizada	\$ 11.50
2009	Helada	\$ 10.90
2011	Fuertes vientos	\$ 2.20
2011	Granizadas	\$ 8.40
2011	Heladas	\$ 6,699.80
2012	Granizadas	\$ 269.00
2012	Heladas	\$ 604.20
2012	Fuertes vientos	\$ 1.30
2013	Tormentas severas (Granizo y tormentas eléctricas)	\$ 245.00
2014	Fuertes vientos	\$ 18.22
2014	Tormentas severas (Tornado San Cristóbal de las Casas, Chiapas)	\$ 248.14
2015	Tormenta severa (Tornado Ciudad Acuña, Coahuila)	\$ 582.40
2015	Vientos fuertes	\$ 10.50
2015	mar de fondo	\$ 45.00
2016	Fuertes vientos	\$ 148.00
2016	Tormentas severas: Tornado (Chihuahua) y tormenta eléctrica (S.L.P.)	\$ 4.20

Como se muestra en la Tabla 3.4, los tornados son los fenómenos que causan un mayor impacto económico, ocasionando también un mayor número de viviendas dañadas, como el caso de los tornados de: Piedras Negras, Coahuila (2007), San Cristóbal de las Casas, Chis. (2014) y el de Ciudad Acuña, Coahuila (2015); que provocaron 2200, 2136 y 2380 viviendas dañadas respectivamente. Esto de los daños registrados en la base de datos, pero hay muchos otros daños ocasionados como automóviles volcados, postes eléctricos tirados, vidrios de ventanas rotas, entre otros.

Con esta parte estadística de los daños generados por los fenómenos meteorológicos, sustento la importancia del estudio de este trabajo, y la importancia de continuar profundizando en los

daños que éstos fenómenos pueden generar a las estructuras civiles, para poner una mayor importancia en el diseño por viento de los diferentes tipos de estructuras que se pretendan diseñar, pero aun con mayor enfoque aquellas estructuras que son más vulnerables a los efectos causados por estos fenómenos.

3.3. ZONAS EÓLICAS DE ESTUDIO

Los daños causados a las estructuras por los fenómenos meteorológicos son devastadores generando así una cantidad de daños económicos importante a la población. El enfoque de ésta tesis, se basa en el estudio de tres zonas eólicas principales llamadas Regionalización Eólica de la República Mexicana, referentes a la incidencia de los eventos ciclónicos y tornados, ya que a mayor incidencia de eventos meteorológicos mayor será en daño ocasionado en dicha región.

Las tres zonas eólicas de estudio son la costa de la República Mexicana, el estado de Michoacán y la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM); a continuación, se presenta una breve descripción de las zonas.

- **La costa de la república mexicana**

Los ciclones tropicales se generan en aguas marítimas de zonas tropicales y subtropicales; por lo que, los estados y municipios pertenecientes a la costa de la República Mexicana son los más afectados por el alto nivel de ocurrencia de los ciclones tropicales, principalmente por aquellos ciclones que han tocado tierra en el país debido a los graves desastres materiales que han generado e incluso muertes de los habitantes.

La población se ha visto afectada de muchas maneras, desde quienes se ven obligados a abandonar sus hogares por las inundaciones, incluso personas que han perdido totalmente sus bienes a causa de los deslaves, por la cantidad de precipitación generada por estos eventos; hasta quienes han perdido incluso los cultivos que con tanto esfuerzo lo han trabajado.

Aunque para algunos es favorable las intensas lluvias que generan estos fenómenos para la alimentación de los víveres o cultivos en aquellos municipios o estados alejados de la costa, para quienes lo viven directamente es realmente una preocupación por la incertidumbre de los daños que generan.

- **Regionalización eólica del estado de Michoacán**

El estado de Michoacán es uno de los estados de la República Mexicana que se ha visto afectada por los fenómenos meteorológicos, tanto por los eventos ciclónicos en la costa en

los municipios de Aquila, Coahuayana y Lázaro Cárdenas con mayor intensidad, como la presencia de eventos tornádicos que se han registrado en el estado. Ya que la investigación de ésta tesis se lleva a cabo en el estado de Michoacán, es importante realizar este estudio aplicándolo al estado, para beneficio de la población, principalmente de los ingenieros o futuros investigadores en el área de ingeniería eólica.

- **La Franja Volcánica Transmexicana (FVT)**

Es una zona que se reconoce por el tipo de material volcánico por el que se compone y por la frecuencia de eventos sísmicos y volcánicos que constantemente ocurren en la zona. Pero se puede reconocer también como zona eólica, debido a la ocurrencia de eventos tornádicos que han ocurrido en esta zona en el transcurso del tiempo. En los siguientes capítulos, se profundiza acerca de la incidencia de eventos meteorológicos y velocidades regionales en éstas zonas de estudios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bitrán Bitrán, D. (2001). Características del Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Occurridos en México en el período 1980-99. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Bitrán Bitrán, D. (2000). Evaluación del Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Naturales Occurridos en la República Mexicana, durante 1999. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Bitrán Bitrán, D., Jiménez Espinosa, M., Eslava Morales, H., Salas Salinas, M. A., Vázquez Conde, M. T., Matías Ramírez, L. G., Camacho Quintana, K. S. y Acosta Colsa, L. (2001). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Occurridos en la República Mexicana en el año 2000. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Bitrán Bitrán, D., Acosta Colsa, L., Eslava Morales, H., Gutiérrez Martínez, C., Salas Salinas, M. A. y Vázquez Conde, M. T. (2002). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Occurridos en la República Mexicana en el año 2001. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Bitrán Bitrán, D., Domínguez Morales, L., Durán Hernández, R., Fuentes Mariles, O., García Arróliga, N., Jiménez Espinosa, M., López Bátiz, O., Matías Ramírez, L.G., Reyes Salinas, C., Salas Salinas, M.A. y Zepeda Ramos O. (2003). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Occurridos en la República Mexicana en el año 2002. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Bitrán, D., Arróliga, N., Cambranis, R., Salas Salinas, M. A., Eslava Morales, H., Gómez Vázquez, A., Martínez Bringas, A., Matías Ramírez, L. G., García Jiménez, F., Vázquez Conde, M. T., Jiménez Espinosa, M., Pacheco Martínez, M. A., Reyes Salinas, C. y Gutiérrez Martínez, C. A. (2004). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2003. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Bitrán Bitrán, D., García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Eslava Morales, H., Jiménez Espinosa, M., Salas Salinas, M. A., Zepeda Ramos, O. y Vázquez Conde, M. T. (2005). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2004. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Dirección de Análisis y Gestión de Riesgo, Subdirección de Estudios Ecnómicos y Sociales y Centro Nacional de Prevención y Desastres. (2021). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en México. Resumen Ejecutivo 2020. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Franco Vargas, E., Méndez Estrada, K. M. y Olmedo Santiago, C. (2020). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en 2018. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Bitrán Bitrán, D., Matías Ramírez, L. G., Jiménez Espinosa, M., Eslava Morales, H., García Jiménez, F., Vázquez Conde, M. T., Salas Salinas, M. A. y Fuentes Mariles, O. A. (2006). Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2005. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Eslava Morales, H., García Jiménez, F., Jiménez Espinosa, M., Matías Ramírez, L. G., Salas Salinas, M. A. y Domínguez Morales, L. (2009). Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2008. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Eslava Morales, H., Jiménez Espinosa, M., García Jiménez, F., Matías Ramírez, L. G., Salas Salinas, M. A. y Domínguez Morales, L. (2009). Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2007. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Jiménez Espinosa, M., Salas Salinas, M. A., Eslava Morales, H., Matías Ramírez, L. G. y García Jiménez, F. (2007).

Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2006. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Reyes Rodríguez, R., Baeza Ramírez, C., Eslava Morales, H., Reyes Pimentel, T. A., González Huesca, A. E., Flores Corona, L., Aragón Cárdenas, J., Pacheco Martínez, M. A., López Bátiz, O. y Albino Tiburcio, C. (2014). Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2012. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Salas Salinas, M. A. y García Jiménez, F. (2010). Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2009. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Troncoso Arriaga, N., Matías Ramírez, L. G., Domínguez Morales, L., Martínez Bringas, A., Albino Tiburcio, C., Jiménez Espinosa, M., Robles Montero, T. P., García Jiménez, F. y Salas Salinas, M. A. (2012). Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2010. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N., Marín Cambranis, R., Méndez Estrada, K., Troncoso Arriaga, N., Salas Salinas, M. A., Robles Montero, T. P., Matías Ramírez, L. G., Baeza Ramírez, C., Domínguez Morales, L., y Reyes Pimentel, T. A. (2013). Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2011. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N. M., Méndez Estrada, K. M., Franco Vargas, E. y Olmedo Santiago, C. (2019). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en 2017. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N. M., Méndez Estrada, K. M., Franco Vargas, E. y Olmedo Santiago, C. (2019). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana durante 2017. Resumen Ejecutivo. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N. M., Méndez Estrada, K. M., Nava Sánchez, S. y Vázquez Bravo, F. (2021). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en 2014. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N. M., Méndez Estrada, K. M., Nava Sánchez, S. y Vázquez Bravo, F. (2017). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en 2015. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N. M., Méndez Estrada, K. M., Reyes Rodríguez, R. y Marín Cambranis, R. H. (2021). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en 2013. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

García Arróliga, N. M., Méndez Estrada, K. M. y Vázquez Bravo, F. (2018). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en 2016. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Manual de Diseño de Obras Civiles (1193).

Manual de Diseño de Obras Civiles (2008).

Manual de Diseño de Obras Civiles (2020).

Méndez Estrada, K. M., Franco Vargas, E., Olmedo Santiago, C. y García Vega, A. (2021). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en 2019. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Méndez Estrada, K. M., Franco Vargas, E., Olmedo Santiago, C. y García Vega, A. (2020). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en México. Resumen Ejecutivo 2019. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Rodríguez Esteves, J. M. (2022). Desastres y covid-19: dos modelos para reducir el riesgo en México. Frontera norte, 34.

Subdirección de Estudios Económicos y Sociales, CENAPRED. (2021). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres. Resumen Ejecutivo 2018.

CAPÍTULO 4

LA COSTA DE LA REPÚBLICA MEXICANA, COMO ZONA EÓLICA

Un ciclón tropical, se define como un fenómeno meteorológico generado sobre aguas marítimas de zonas tropicales y subtropicales, asociados a bajas presiones atmosféricas; la costa de la República Mexicana se puede nombrar como zona eólica, debido a que se caracteriza por ser una zona de incidencia de eventos ciclónicos, generados por la inestabilidad atmosférica, ocasionando fuertes vientos. La base de datos del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA), ha registrado estos eventos desde hace aproximadamente 170 años, utilizando estaciones meteorológicas colocadas en diversos puntos de la República Mexicana e instrumentaciones satelitales.

4.1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Las estaciones meteorológicas son instrumentos conformados por un grupo de sensores que permite registrar y transmitir información meteorológica de forma automática, como la velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica, temperatura del aire, humedad ambiental, precipitación pluvial y la radiación solar. Su función principal es la recopilación y monitoreo de dichas variables, cuya información es enviada vía satelital. México, cuenta con aproximadamente 120 estaciones meteorológicas del NOAA en la República Mexicana que están activas hasta la fecha, la distribución de las estaciones se muestra en la Figura 4.1.

Es importante señalar que son diferentes las velocidades de los vientos normales a las velocidades de los vientos ocasionados por los fenómenos meteorológicos, ya que son dos fenómenos que no ocurren con la misma probabilidad, para fines de realizar mapas de isotacas se es necesario tomar la información en conjunto para la obtención de datos más realistas (Pozos, 2016). En éste caso, para el análisis que se pretende realizar, solamente se tomará en cuenta las velocidades ocasionadas por los fenómenos meteorológicos, obtenida de la base de datos históricos de ciclones tropicales del NOAA y las velocidades regionales obtenidas de los MDOC.



Figura 4.1 Estaciones meteorológicas del NOAA.

En la Tabla 4.1, se muestra la localización (latitud, longitud y elevación) de las estaciones meteorológicas del NOAA, número de identificación y estado en las que se ubican.

Tabla 4.1 Estaciones meteorológicas del NOAA localizadas en la República Mexicana (<https://www.ncei.noaa.gov/maps/global-summaries/>).

No.	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación
1	760013	General Abelardo L. Rodríguez, B.C.	32.54	-116.97	149.04
2	760053	General Rodolfo Sánchez Taboada, B.C.	32.63	-115.24	22.55
3	760400	Ejido Nuevo León, B.C.	32.40	-115.18	11.00
4	760550	San Felipe, B.C.	31.03	-114.85	15.00
5	760610	Puerto Peñasco, Son.	31.30	-113.55	62.00
6	760753	Abraham González, Chih.	31.64	-106.43	1189.93
7	761130	Altar, Son.	30.72	-111.83	398.00
8	761180	Pilares de Nacozari, Son.	30.37	-109.68	1041.00
9	761220	Nuevas Casas Grande, Chih.	30.37	-107.95	1487.00
10	761600	General Ignacio P. García, Son.	29.10	-111.05	191.10
11	762200	Temosachic, Chih.	28.95	-107.82	1932.00
12	762250	Chihuahua, Chih.	28.63	-106.08	1433.00
13	762253	General R. Fierro Villalobos, Chih.	28.70	-105.96	1360.01
14	762430	Piedras Negras, Coah.	28.63	-100.54	274.62
15	762530	Ciudad Obregón, Son.	27.39	-109.83	62.48
16	762555	General José María Yáñez, Son.	27.97	-110.93	17.98

Tabla 4.1 Estaciones meteorológicas del NOAA localizadas en la República Mexicana, (continuación).

No.	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación
17	762560	Empalme, Son.	27.95	-110.77	12.00
18	762580	Ciudad Obregón, Son.	27.48	-109.92	38.00
19	762863	Quetzalcóatl, Tamps.	27.44	-99.57	147.52
20	763050	Loreto, B.C.S.	25.99	-111.35	10.36
21	763110	Choix, Sin.	26.73	-108.28	238.00
22	763230	Hidalgo del Parral, Chih.	26.93	-105.67	1661.00
23	763420	Monclova, Coah.	26.96	-101.47	568.14
24	763503	General Lucio Blanco, Tamps.	26.01	-98.23	42.36
25	763615	Valle del Fuerte, Sin.	25.69	-109.08	4.87
26	763730	Tepehuanes, Dgo.	25.35	-105.75	1967.00
27	763820	Torreón, Coah.	25.57	-103.41	1124.10
28	763900	Saltillo, Coah.	25.37	-101.02	1790.00
29	763930	Monterrey, N.L.	25.73	-100.30	515.00
30	763940	Del Norte, N.L.	25.87	-100.24	449.88
31	763943	General Mariano Escobedo, N.L.	25.78	-100.11	389.53
32	763993	General Servando Canales, Tamps.	25.77	-97.53	7.62
33	764020	Ciudad Constitución, B.C.S.	25.00	-111.63	48.00
34	764050	La Paz, B.C.S.	24.17	-110.30	18.00
35	764055	General Manuel Márquez de León, B.C.S.	24.07	-110.36	21.03
36	764056	Los Cabos, B.C.S.	23.15	-109.72	113.99
37	764120	Culiacán, Sin.	24.76	-107.47	32.91
38	764230	Durango, Dgo.	24.05	-104.60	1872.00
39	764235	Durango, Dgo.	24.12	-104.53	1860.49
40	764580	Colonia Juan Carrasco Mazatlán, Sin.	23.20	-106.42	4.00
41	764593	General Rafael Buelna, Sin.	23.16	-106.27	11.58
42	764710	Sombrerete, Zac.	23.63	-103.65	2351.00
43	764900	Isla Pérez, Yuc.	22.38	-89.68	1.52
44	764910	Ciudad Victoria, Tamps.	23.74	-99.17	336.00
45	764915	General Pedro José Méndez, Tamps,	23.70	-98.96	231.95
46	764990	Soto la Marina, Tamps.	23.77	-98.20	21.00
47	765190	Colotlán, Jal.	22.10	-103.27	1673.00
48	765250	Zacatecas, Zac. (La Bufa Zac.)	22.78	-102.57	2612.00
49	765255	General Leobardo C. Ruiz, Zac.	22.90	-102.69	2176.57
50	765390	Ponciano Arriaga, S.L.P.	22.25	-100.93	1839.46
51	765480	Tampico, Tamps.	22.20	-97.85	25.00
52	765493	General Francisco Javier Mina, Tamps.	22.30	-97.87	24.38
53	765560	Tepic, Nay.	21.42	-104.84	920.49

Tabla 4.1 Estaciones meteorológicas del NOAA localizadas en la República Mexicana, (continuación).

No.	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación
54	765710	Jesús Terán, Ags.	21.71	-102.32	1862.93
55	765730	Lagos De Moreno, Jal.	21.35	-101.92	1942.00
56	765770	Guanajuato, Gto.	21.00	-101.28	1999.00
57	765773	Guanajuato, Gto.	20.98	-101.48	1815.38
58	765810	Rio Verde, S.L.P.	21.93	-99.98	983.00
59	765850	Matlapa, S.L.P.	21.32	-98.82	132.00
60	765930	Progreso, Yuc.	21.30	-89.65	2.00
61	765950	Cancún, Q. Roo	21.04	-86.88	6.09
62	766013	Licenciado Gustavo Díaz Ordaz, Nay.	20.68	-105.25	7.01
63	766120	Guadalajara, Jal.	20.67	-103.38	1551.00
64	766127	Tajín, Ver.	20.60	-97.46	151.48
65	766133	Don Miguel Hidalgo y Costilla, Jal.	20.52	-103.31	1528.87
66	766250	Querétaro Intercontinental, Qro.	20.62	-100.19	1919.02
67	766320	Pachuca, Hgo.	20.13	-98.75	2435.00
68	766340	Tulancingo, Hgo.	20.08	-98.37	2181.00
69	766400	Tuxpan, Ver.	20.95	-97.40	28.00
70	766440	Licenciado Manuel Crescencio Rejon, Yuc.	20.94	-89.66	11.58
71	766470	Valladolid, Yuc.	20.68	-88.20	27.00
72	766480	Cozumel, Q. Roo	20.52	-86.93	9.14
73	766534	Playa De Oro, Col.	19.14	-104.56	9.14
74	766540	Manzanillo, Col.	19.05	-104.32	3.00
75	766546	Licenciado y Gen Ignacio López Rayón, Mich.	19.40	-102.04	1602.63
76	766560	Ciudad Guzmán, Jal.	19.72	-103.47	1515.00
77	766580	Colima, Col.	19.28	-103.58	751.94
78	766620	Zamora, Mich.	19.98	-102.32	1562.00
79	766650	Morelia, Mich.	19.70	-101.18	1913.00
80	766655	General Francisco J. Mujica, Mich.	19.85	-101.03	1838.85
81	766750	Toluca, Mex.	19.28	-99.68	2720.00
82	766753	Licenciado Adolfo López Mateos, Mex.	19.34	-99.57	2580.43
83	766793	Licenciado Benito Juárez, Cd. Mex.	19.44	-99.07	2229.91
84	766800	México (Central) D.F.	19.40	-99.18	2303.00
85	766810	Geografía Unam, Cd. Méx.	19.32	-99.18	2278.00
86	766830	Tlaxcala, Tlax.	19.32	-98.25	2248.00
87	766850	Hermanos Serdán, Pue.	19.16	-98.37	2243.63
88	766870	Jalapa, Ver.	19.55	-96.92	1389.00
89	766913	General Heriberto Jara, Ver.	19.15	-96.19	27.43
90	766920	Hacienda Ylang Ylang Veracruz, Ver.	19.15	-96.12	16.00

Tabla 4.1 Estaciones meteorológicas del NOAA localizadas en la República Mexicana, (continuación).

No.	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación
91	766950	Ingeniero Alberto Acuna Ongay, Camp.	19.82	-90.50	10.36
92	766980	Felipe Carrillo Puerto, Q. Roo	19.57	-88.05	10.00
93	767260	General Mariano Matamoros, Mor.	18.84	-99.26	1303.62
94	767370	Orizaba, Ver.	18.85	-97.10	1259.00
95	767380	Córdoba-In-Veracruz, Ver.	18.90	-96.93	882.70
96	767383	Minatitlán, Ver.	18.10	-94.58	10.97
97	767410	Coatzacoalcos, Ver	18.18	-94.50	16.00
98	767430	Villahermosa, Tab.	17.98	-92.93	16.00
99	767433	C. P. A. Carlos Rovirosa, Tab.	17.98	-92.82	14.02
100	767493	Ciudad del Carmen, Camp.	18.65	-91.80	3.04
101	767500	Chetumal, Q. Roo	18.50	-88.33	11.88
102	767501	Chichen Itza Intl, Yuc.	20.64	-88.45	31.08
103	767503	Cabo San Lucas, B.C.S.	22.95	-109.94	210.00
104	767584	Ixtapa Zihuatanejo, Gro.	17.60	-101.46	7.92
105	767620	Chilpancingo Gro.	17.55	-99.50	1265.00
106	767730	Huajuapán de León, Oax.	17.79	-97.77	1606.00
107	767750	Oaxaca, Oax.	17.05	-96.72	1518.00
108	767755	Xoxocotlán, Oax.	17.00	-96.73	1520.64
109	768050	Acapulco, Gro.	16.75	-99.75	3.00
110	768056	General Juan N. Álvarez, Gro.	16.76	-99.75	3.96
111	768400	Arriaga, Chis.	16.23	-93.90	48.00
112	768430	Tuxtla Gutiérrez, Chis.	16.75	-93.13	576.00
113	768450	Sn. Cristóbal las Casas, Chis.	16.75	-92.63	2116.00
114	768480	Comitán, Chis.	16.25	-92.13	1646.00
115	768485	Bahías de Huatulco, Oax.	15.78	-96.26	141.42
116	768550	Puerto Ángel, Oax.	15.68	-96.48	46.00
117	768556	Puerto Escondido, Oax.	15.88	-97.09	89.61
118	768560	Puerto Ángel, Oax.	15.67	-96.50	-999.90
119	769030	Tapachula, Chis.	14.92	-92.25	118.00
120	769043	Tapachula, Chis.	14.79	-92.37	29.56

4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE HURACANES

Uno de los fenómenos meteorológicos que ocasionan fuertes vientos son los ciclones tropicales, resultado de la inestabilidad de las masas de aire con baja presión atmosférica.

El movimiento de los ciclones tropicales resulta, principalmente, debido a que las tormentas están sumergidas en una región de aire en movimiento de mayor tamaño, conocida como “corriente conductora”, que tiende a mover la circulación de los niveles bajos y altos y la convección de nubes cumulonimbus en la dirección de dicho flujo. El movimiento del ciclón también está influenciado por la fuerza de Coriolis que se origina por la rotación del planeta. Por lo que los ciclones grandes e intensos tienen la capacidad para modificar las condiciones del flujo atmosférico a su alrededor, lo que puede aportar una fracción importante del desplazamiento total del ciclón (Jiménez *et al.*, 2021).

Los huracanes causan los siguientes tipos de daños: daños por el viento y objetos volantes, daños por los oleajes de tormentas y su depresión, erosión costera por el efecto de over-wash, inundaciones como consecuencia de las precipitaciones fuertes durante y después del impacto e incendios en la estación seca siguiente. Los incendios como consecuencia indirecta de un impacto son olvidados a menudo. La temporada de sequía siguiente al paso de huracanes, puede causar extensas áreas de madera seca que son vulnerables a los incendios (Frausto, 2014).

Con la ayuda de la base de datos del NOAA, se ubicaron las trayectorias de los huracanes ocurridos en la costa mexicana, con un período de 170 años de información, desde el año 1850-2021. La importancia de estos datos es conocer las características de los ciclones tropicales como: fecha de ocurrencia, trayectoria, velocidad máxima y presión mínima; y con información obtenida de las redes de comunicación electrónica se indagó sobre los daños provocados, tanto de infraestructura como pérdidas de vidas humanas.

La orografía del terreno permite que los eventos meteorológicos como los huracanes, pierdan la fuerza que han adquirido durante su trayecto. Esto quiere decir, que los eventos meteorológicos alcanzan una fuerza de viento considerable según las condiciones ambientales con el que se haya generado, a su trayectoria, ésta fuerza aumenta constantemente; pero cuando el fenómeno se encuentra de frente al terreno montañoso, éste pierde la fuerza y la velocidad disminuye hasta que se desvanece.

4.2.1. Golfo de México

Los registros de ciclones tropicales en la costa del Golfo de México comienzan desde el año 1850, con un total de 120 registros de huracanes, de los cuales el 28.33% corresponde a huracanes de categoría H1, el 31.67% a categoría H2, el 20% a categoría H3, el 9.17% a categoría H4 y el 10.83% corresponde a huracanes de categoría H5. En la Figura 4.2 se muestran el número de huracanes por categoría registrados en el Golfo de México.

Las trayectorias de los ciclones tropicales que han ocurrido en la costa del Golfo de México, se muestran en las Figuras 4.3 a 4.9, para intervalos de ocurrencia de 25 años. Para la realización de éste análisis estadístico se seleccionaron únicamente la trayectoria de los

ciclones tropicales de la categoría de huracanes que han tocado tierra o que se encuentran a una distancia de 100 km de la costa mexicana.

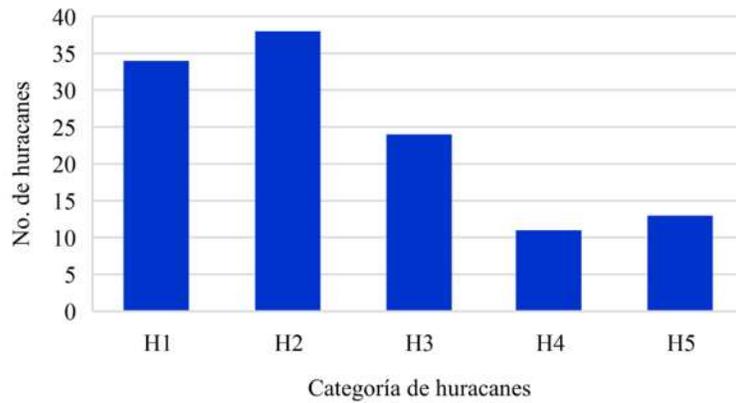


Figura 4.2 Número de huracanes por categoría.

En las Figuras 4.3 a 4.6 pertenecientes a la trayectoria de huracanes de los años 1850 – 1950, en la simbología, se observa que los huracanes se identifican por una numeración abreviada como, por ejemplo, el huracán ocurrido el 29 de junio de 1851 que toco tierra entre los estados de Veracruz y Tamaulipas con la identificación numérica de 1851181N19275 en la base de datos del NOAA observado en la Tabla 4.2, se abrevia en la simbología de las Figuras 4.3 a 4.6 como el año de ocurrencia y los último dos dígitos, en este caso como: 1851-75.

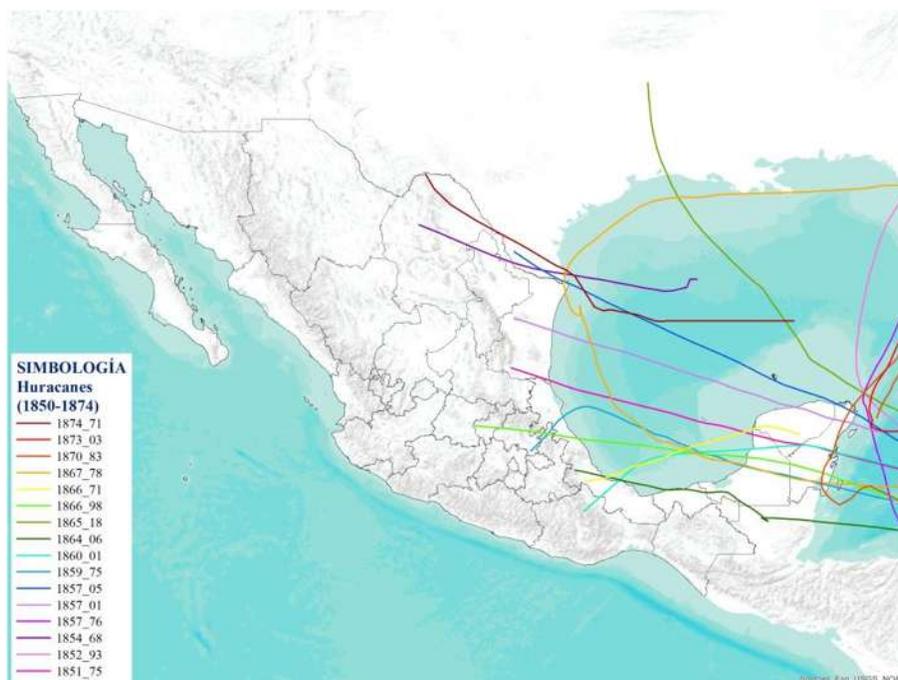


Figura 4.3 Huracanes de la costa del Golfo de México (1850-1874).

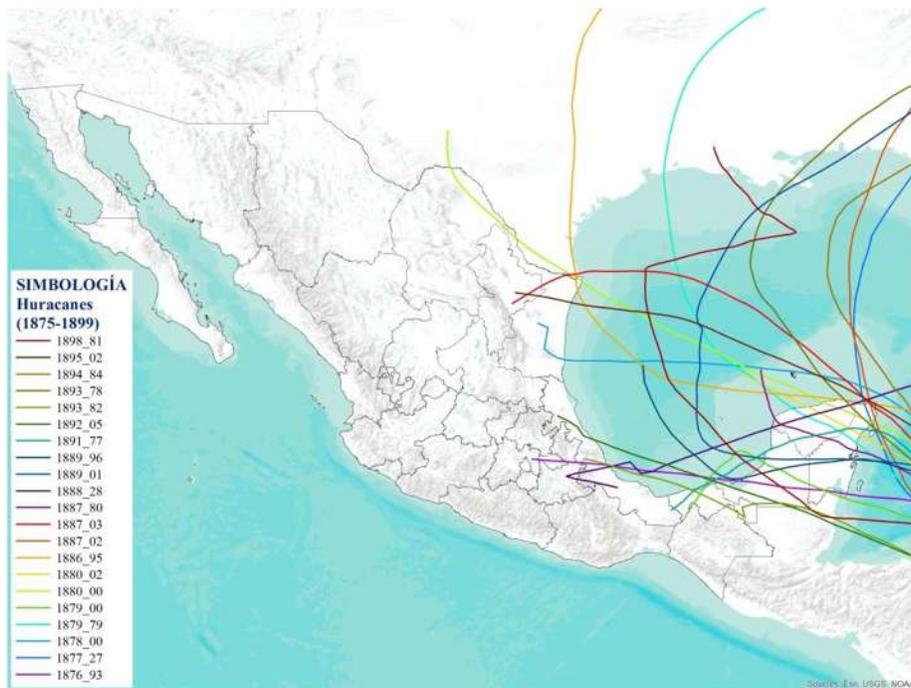


Figura 4.4 Huracanes de la costa del Golfo de México (1875-1899).

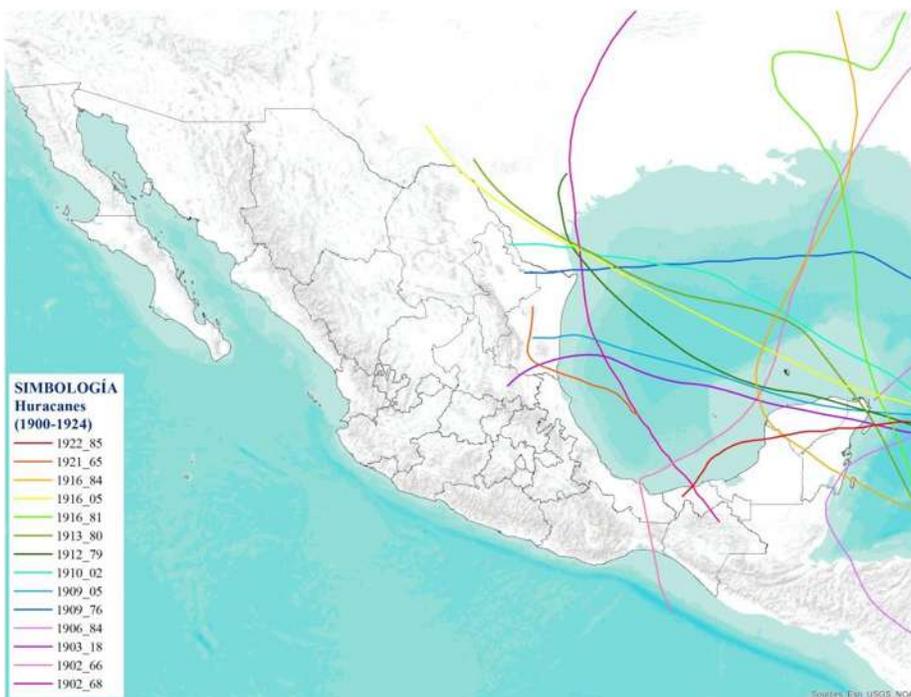


Figura 4.5 Huracanes de la costa del Golfo de México (1900-1924).



Figura 4.6 Huracanes de la costa del Golfo de México (1925-1949).

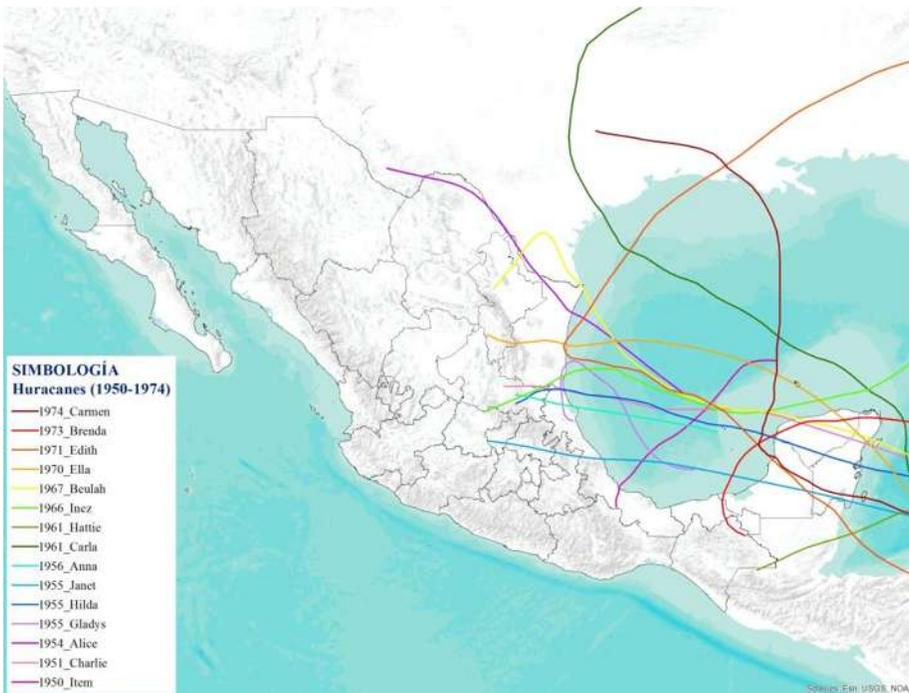


Figura 4.7 Huracanes de la costa del Golfo de México (1950-1974).

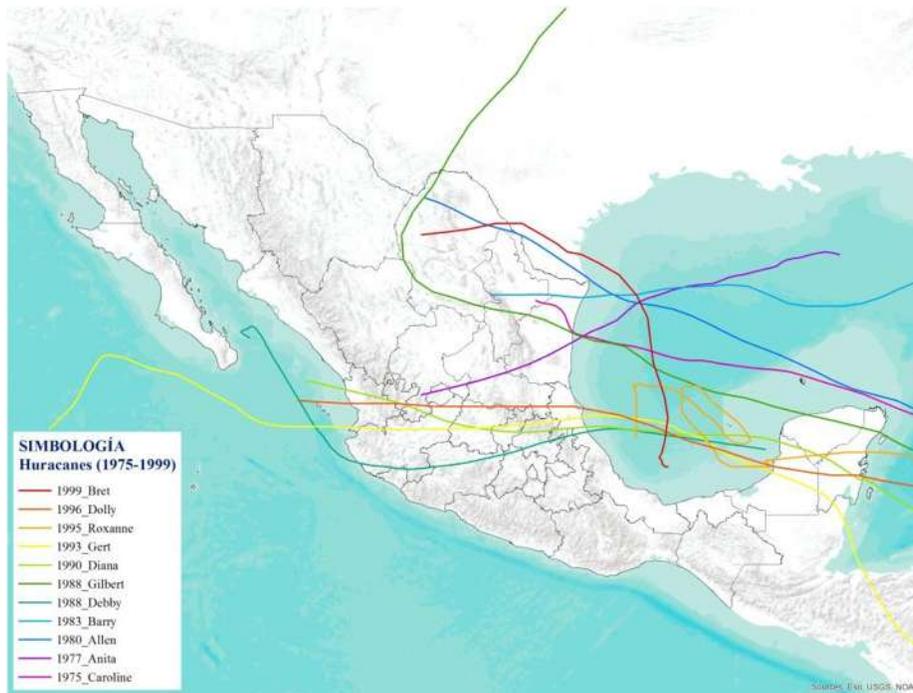
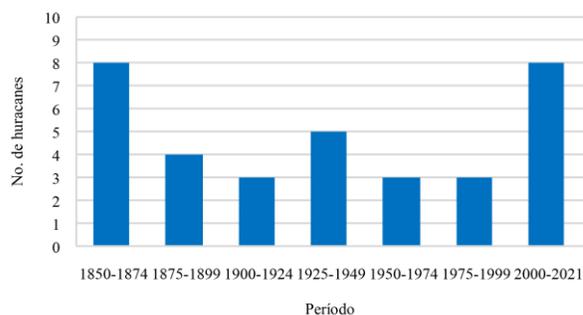


Figura 4.8 Huracanes de la costa del Golfo de México (1975-1999).

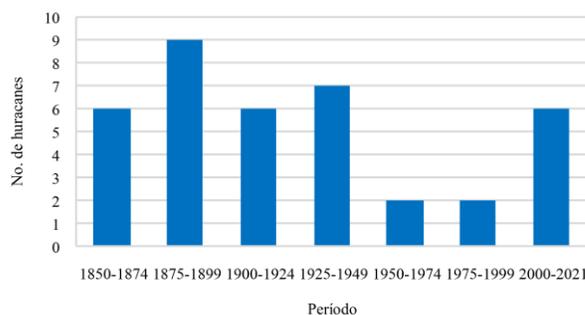


Figura 4.9 Huracanes de la costa del Golfo de México (2000-2021).

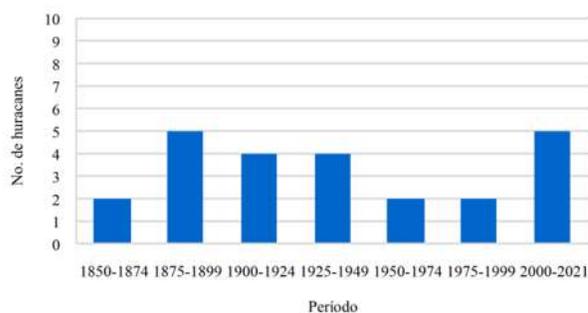
En la Figura 4.10 se muestra el número de huracanes por fecha de incidencia y por categoría; de la cual se observa, que el mayor número de ocurrencia de huracanes desde el año 1850-2021, pertenece a los huracanes de categoría H1, H2 y H3, con un número de ocurrencia de 34, 38 y 24 huracanes, respectivamente. Aunque a partir del año 1875 comenzaron a tocar tierra los huracanes de categoría H4 y a partir de año 1925 los de categoría H5 comenzaron a tocar tierra en la costa del Golfo de México.



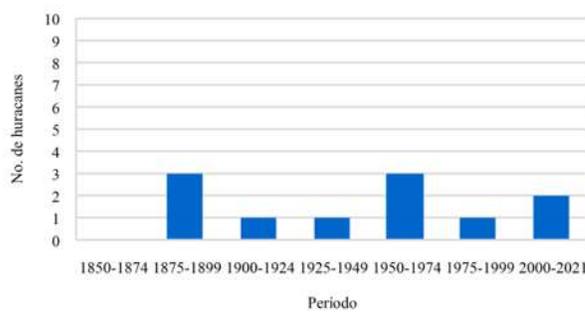
a) Categoría H1



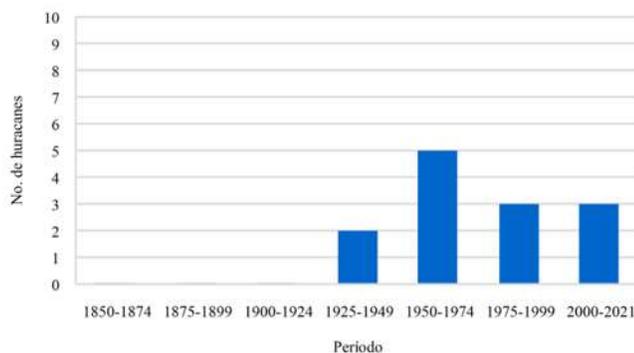
b) Categoría H2



c) Categoría H3



d) Categoría H4



e) Categoría H5

Figura 4.10 Número de huracanes por categoría y por periodo de 25 años.

En la Figura 4.11 se muestra el porcentaje de ocurrencia de huracanes en la costa del Golfo de México por intervalo de incidencia de 25 años. En los periodos 1850-1874, 1875-1899, 1900-1924, 1925-1949, 1950-1974, 1975-1999 y 2000-2021 se registraron un total de 16 (13.33), 21 (17.50%), 14 (11.67%), 19 (15.83%), 15 (12.50%), 11 (9.17%) y 24 (20%) huracanes respectivamente.

En promedio, 17 huracanes ocurren en un intervalo de incidencia de 25 años (la cual se muestra en línea roja en la Figura 4.11) que representan el 14.29% del número total de huracanes ocurridos en la costa del Golfo de México, desde el año 1850-2021; por lo que se observa que durante el período 2000-2021 aumento un 40% con respecto del promedio de incidencia de huracanes; realizando operaciones estadísticas, utilizando una distribución de Poisson de los registros de la ocurrencia de huracanes de los últimos 100 años (1922-1921), se tiene que existe el 77% de probabilidad de que durante los años 2022-2025 ocurran mínimo dos huracanes; esto quiere decir que, la probabilidad de que la incidencia de huracanes durante el período 2000-2025 sea mayor al 40% con respecto del promedio, es mayor al 50%.

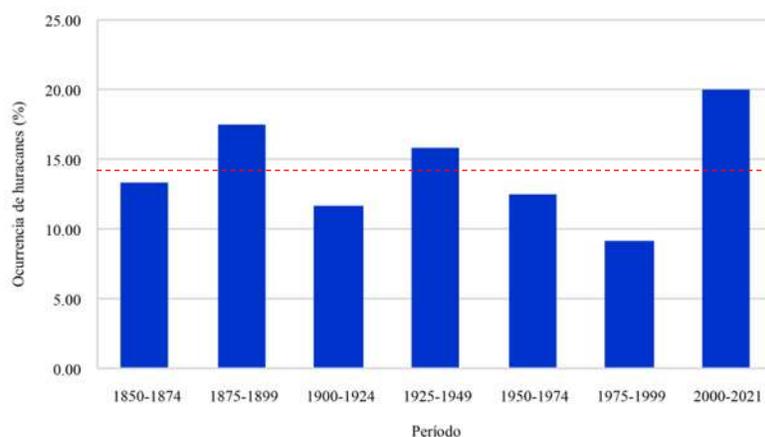


Figura 4.11 Porcentaje de la ocurrencia de huracanes por periodo de 25 años.

En la Tabla 4.2, se presentan las características de los huracanes ocurridos en la costa del Golfo de México, mostrando las velocidades del viento de los huracanes promediadas a un minuto, 10 minutos y tres segundos, según el método de Bloemendaal, *et al.*, 2020.

En el artículo de Bloemendaal *et al.* (2020) plantea factores de conversión para velocidades de viento provocadas por ciclones tropicales. Propone un factor de 0.5144 para la conversión de la promediación de un minuto, entre unidades de kts (nodos) a m/s; para la conversión de una promediación de un minuto a 10 minutos en m/s, propone el factor de 0.88, mientras que para la conversión de una promediación de 10 minutos a tres segundos se utilizó el factor de 0.67, según se muestra en la Tabla 4.2. Las trayectorias de los huracanes y la información de éstos mismos se obtuvieron de la base de datos del NOAA de las paginas <https://coast.noaa.gov/hurricanes/> y <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php>.

Tabla 4.2 Ocurrencia de huracanes en el Golfo de México (1850-2021).

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad Máxima				Presión Mínima (mb)
				1 min		10 min	3 s	
				(kts)	m/s	(m/s)	(km/h)	
2021	Grace	13 Ago - 21 Ago	H3	105	54.01	47.53	255.39	967
2020	Zeta	24 Oct -30 Oct	H3	100	51.44	45.27	243.23	970
2020	Delta	04 Oct - 11 Oct	H4	120	61.73	54.32	291.87	953
2020	Gamma	02 Oct - 06 Oct	H1	65	33.44	29.42	158.10	978
2020	Hanna	23 Jul - 26 Jul	H1	80	41.15	36.21	194.58	973
2017	Katia	05 Sep - 09 Sep	H2	90	46.30	40.74	218.90	972
2017	Franklin	06 Ago - 10 Ago	H1	75	38.58	33.95	182.42	981
2016	Earl	02 Ago - 06 Ago	H1	75	38.58	33.95	182.42	979
2013	Ingrid	12 Sep - 17 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	983
2012	Ernesto	01 Ago - 10 Ago	H2	85	43.72	38.48	206.74	973
2011	Rina	22 Oct - 29 Oct	H3	100	51.44	45.27	243.23	966
2010	Paula	11 Oct - 15 Oct	H2	90	46.30	40.74	218.90	981
2010	Karl	13 Sep - 18 Sep	H3	110	56.58	49.79	267.55	956
2010	Alex	24 Jun - 02 Jul	H2	95	48.87	43.00	231.07	946
2009	Ida	04 Nov - 11 Nov	H2	90	46.30	40.74	218.90	975
2008	Dolly	20 Jul - 27 Jul	H2	85	43.72	38.48	206.74	963
2007	Lorenzo	25 Sep - 28 Sep	H1	70	36.01	31.69	170.26	990
2007	Dean	13 Ago - 23 Ago	H5	150	77.16	67.90	364.84	905
2005	Wilma	15 Oct - 26 Oct	H5	160	82.30	72.43	389.16	882
2005	Stan	01 Oct - 05 Oct	H1	70	36.01	31.69	170.26	977
2005	Emily	11 Jul - 21 Jul	H5	140	72.02	63.37	340.52	929
2003	Erika	14 Ago - 17 Ago	H1	65	33.44	29.42	158.10	986
2002	Isidore	14 Sep - 27 Sep	H3	110	56.58	49.79	267.55	934
2000	Keith	28 Sep - 06 Oct	H4	120	61.73	54.32	291.87	939
1999	Bret	18 Ago - 25 Ago	H4	125	64.30	56.58	304.03	944
1996	Dolly	19 Ago - 25 Ago	H1	70	36.01	31.69	170.26	989
1995	Roxanne	07 Oct - 21 Oct	H3	100	51.44	45.27	243.23	956
1993	Gert	14 Sep - 21 Sep	H2	85	43.72	38.48	206.74	970
1990	Diana	04 Ago - 09 Ago	H2	85	43.72	38.48	206.74	980
1988	Gilbert	08 Sep - 20 Sep	H5	160	82.30	72.43	389.16	888
1988	Debby	31 Ago - 08 Sep	H1	65	33.44	29.42	158.10	987
1983	Barry	23 Ago - 29 Ago	H1	70	36.01	31.69	170.26	986
1980	Allen	31 Jul - 11 Ago	H5	165	84.88	74.69	401.32	899
1977	Anita	29 Ago - 03 Sep	H5	150	77.16	67.90	364.84	926
1975	Caroline	24 Ago - 01 Sep	H3	100	51.44	45.27	243.23	963

Tabla 4.2 Ocurrencia de huracanes en el Golfo de México (1850-2021), continuación.

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad Máxima				Presión Mínima
				1 min		10 min	3 s	
				(kts)	m/s	(m/s)	(km/h)	(mb)
1974	Carmen	29 Ago - 10 Sep	H4	130	66.87	58.85	316.19	928
1973	Brenda	18 Ago - 22 Ago	H1	80	41.15	36.21	194.58	977
1971	Edith	05 Sep - 18 Sep	H5	140	72.02	63.37	340.52	943
1970	Ella	08 Sep - 13 Sep	H3	110	56.58	49.79	267.55	962
1967	Beulah	05 Sep - 24 Sep	H5	140	72.02	63.37	340.52	923
1966	Inez	21 Sep - 11 Oct	H5	145	74.59	65.64	352.68	927
1961	Hattie	26 Oct - 01 Nov	H5	145	74.59	65.64	352.68	914
1961	Carla	03 Sep - 18 Sep	H4	125	64.30	56.58	304.03	927
1956	Anna	25 Jul - 27 Jul	H1	75	38.58	33.95	182.42	991
1955	Janet	21 Sep - 30 Sep	H5	150	77.16	67.90	364.84	914
1955	Hilda	12 Sep - 20 Sep	H3	105	54.01	47.53	255.39	952
1955	Gladys	03 Sep - 06 Sep	H1	65	33.44	29.42	158.10	996
1954	Alice	24 Jun - 27 Jun	H2	95	48.87	43.00	231.07	-
1951	Charlie	12 Ago - 23 Ago	H4	115	59.16	52.06	279.71	968
1950	Item	08 Oct - 11 Oct	H2	90	46.30	40.74	218.90	980
1949	1949264N26268	20 Sep - 26 Sep	H1	80	41.15	36.21	194.58	-
1947	1947221N13285	09 Ago - 16 Ago	H2	95	48.87	43.00	231.07	977
1945	1945236N21266	24 Ago - 29 Ago	H3	100	51.44	45.27	243.23	963
1944	1944263N19276	19 Sep - 22 Sep	H1	70	36.01	31.69	170.26	-
1944	1944230N12301	16 Ago - 24 Ago	H3	105	54.01	47.53	255.39	973
1942	1942309N22288	05 Nov - 11 Nov	H2	95	48.87	43.00	231.07	-
1942	1942236N15286	23 Ago - 01 Sep	H3	100	51.44	45.27	243.23	950
1938	1938235N14286	23 Ago - 29 Ago	H3	105	54.01	47.53	255.39	979
1938	1938222N11301	10 Ago - 15 Ago	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1936	1936241N18274	28 Ago - 31 Ago	H1	70	36.01	31.69	170.26	-
1936	1936228N21273	15 Ago - 20 Ago	H1	65	33.44	29.42	158.10	999
1934	1934156N17273	04 Jun - 21 Jun	H2	85	43.72	38.48	206.74	966
1933	1933259N11302	16 Sep - 25 Sep	H5	140	72.02	63.37	340.52	929
1933	1933254N17272	10 Sep - 16 Sep	H2	95	48.87	43.00	231.07	960
1933	1933234N13335	22 Ago - 05 Sep	H5	140	72.02	63.37	340.52	940
1933	1933206N14306	24 Jul - 05 Ago	H1	80	41.15	36.21	194.58	975
1933	1933176N09318	24 Jun - 07 Jul	H2	95	48.87	43.00	231.07	-
1931	1931252N15307	08 Sep - 16 Sep	H2	85	43.72	38.48	206.74	987
1931	1931250N12297	06 Sep - 13 Sep	H4	115	59.16	52.06	279.71	-
1922	1922284N12285	11 Oct - 22 Oct	H2	95	48.87	43.00	231.07	-

Tabla 4.2 Ocurrencia de huracanes en el Golfo de México (1850-2021), continuación.

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad Máxima				Presión Mínima
				1 min		10 min	3 s	
				(kts)	m/s	(m/s)	(km/h)	(mb)
1921	1921248N21265	04 Sep - 08 Sep	H1	70	36.01	31.69	170.26	-
1916	1916283N19284	09 Oct - 19 Oct	H2	95	48.87	43.00	231.07	970
1916	1916225N13305	12 Ago - 20 Ago	H4	115	59.16	52.06	279.71	932
1916	1916181N13281	28 Jun - 10 Jul	H3	105	54.01	47.53	255.39	950
1913	1913172N11280	21 Jun - 29 Jun	H1	65	33.44	29.42	158.10	-
1912	1912286N18279	11 Oct - 18 Oct	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1910	1910248N17302	05 Sep - 15 Sep	H2	95	48.87	43.00	231.07	-
1909	1909232N15305	20 Ago - 28 Ago	H3	105	54.01	47.53	255.39	-
1909	1909177N25276	25 Jun - 30 Jun	H2	85	43.72	38.48	206.74	972
1906	1906281N11284	08 Oct - 23 Oct	H3	105	54.01	47.53	255.39	953
1903	1903218N12318	06 Ago - 16 Ago	H3	105	54.01	47.53	255.39	958
1902	1902276N14266	03 Oct - 13 Oct	H2	90	46.30	40.74	218.90	970
1902	1902172N17268	21 Jun - 29 Jun	H1	70	36.01	31.69	170.26	-
1898	1898245N14281	02 Sep - 13 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1895	1895234N13302	22 Ago - 30 Ago	H2	95	48.87	43.00	231.07	-
1894	1894270N12284	01 Oct - 12 Oct	H3	105	54.01	47.53	255.39	-
1893	1893271N16278	27 Sep - 05 Oct	H4	115	59.16	52.06	279.71	948
1893	1893185N14282	04 Jul - 07 Jul	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1892	1892279N11305	05 Oct - 16 Oct	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1891	1891278N12277	05 Oct - 15 Oct	H4	120	61.73	54.32	291.87	951
1889	1889258N12296	14 Sep - 21 Sep	H3	100	51.44	45.27	243.23	-
1889	1889255N16301	12 Sep - 26 Sep	H2	95	48.87	43.00	231.07	-
1888	1888239N13328	31 Ago - 08 Sep	H3	110	56.58	49.79	267.55	-
1887	1887282N18280	09 Oct - 16 Oct	H3	100	51.44	45.27	243.23	-
1887	1887255N13303	11 Sep - 22 Sep	H2	85	43.72	38.48	206.74	973
1887	1887201N12302	20 Jul - 28 Jul	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1886	1886259N21295	16 Sep - 24 Sep	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1880	1880217N16300	04 Ago - 14 Ago	H4	130	66.87	58.85	316.19	931
1880	1880218N13302	04 Ago - 11 Ago	H2	95	48.87	43.00	231.07	-
1879	1879254N14300	10 Sep - 20 Sep	H1	80	41.15	36.21	194.58	-
1879	1879231N17279	19 Ago - 24 Ago	H2	90	46.30	40.74	218.90	964
1878	1878220N15300	08 Ago - 19 Ago	H1	70	36.01	31.69	170.26	-
1877	1877260N17327	21 Sep - 05 Oct	H3	100	51.44	45.27	243.23	-
1876	1876200N16293	17 Jul - 23 Jul	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1874	1874245N25271	01 Sep -07 Sep	H3	105	54.01	47.53	255.39	953

Tabla 4.2 Ocurrencia de huracanes en el Golfo de México (1850-2021), continuación.

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad Máxima				Presión Mínima (mb)
				1 min		10 min	3 s	
				(kts)	m/s	(m/s)	(km/h)	
1873	1873269N13303	26 Sep - 10 Oct	H3	100	51.44	45.27	243.23	959
870	1870300N14283	30 Oct - 03 Nov	H1	70	36.01	31.69	170.26	-
1867	1867268N18278	02 Oct - 09 Oct	H2	90	46.30	40.74	218.90	-
1866	1866229N20271	17 Ago - 19 Ago	H1	65	33.44	29.42	158.10	-
1866	1866225N14298	13 Ago - 18 Ago	H2	90	46.30	40.74	218.90	-
1865	1865247N13318	06 Sep - 14 Sep	H2	90	46.30	40.74	218.90	-
1864	1864239N15306	26 Ago - 01 Sep	H1	70	36.01	31.69	170.26	-
1860	1860208N11301	25 Jul - 01 Ago	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1859	1859172N18275	20 Jun - 27 Jun	H1	80	41.15	36.21	194.58	990
1857	1857267N16305	24 Sep - 30 Sep	H2	90	46.30	40.74	218.90	-
1857	1857261N16301	17 Sep - 30 Sep	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1857	1857229N16276	16 Ago - 23 Ago	H1	65	33.44	29.42	158.10	-
1854	1854176N26268	25 Jun - 27 Jun	H1	70	36.01	31.69	170.26	-
1852	1852278N14293	06 Oct - 11 Oct	H2	90	46.30	40.74	218.90	-
1851	1851181N19275	29 Jun - 04 Jul	H1	80	41.15	36.21	194.58	-

4.2.2. Océano Pacífico

En la costa del Océano Pacífico se registraron 114 huracanes que tocaron tierra o se encuentran a 100km de la costa, ocurridos durante los años 1949-2021. En la Figuras 4.12, 4.13 y 4.14, se muestran la trayectoria de cada de los huracanes ocurridos en esta costa del Océano Pacífico.

Se observa que del periodo de 1851-1948 no se encontró huracanes en la costa del Océano Pacífico, mientras que la densidad de huracanes, se observa notablemente del año 1949-2021, esto se debe a que probablemente no se tenían las estaciones climatológicas operando en esta zona, por lo que seguramente ocurrieron otros huracanes que no fueron registrados.

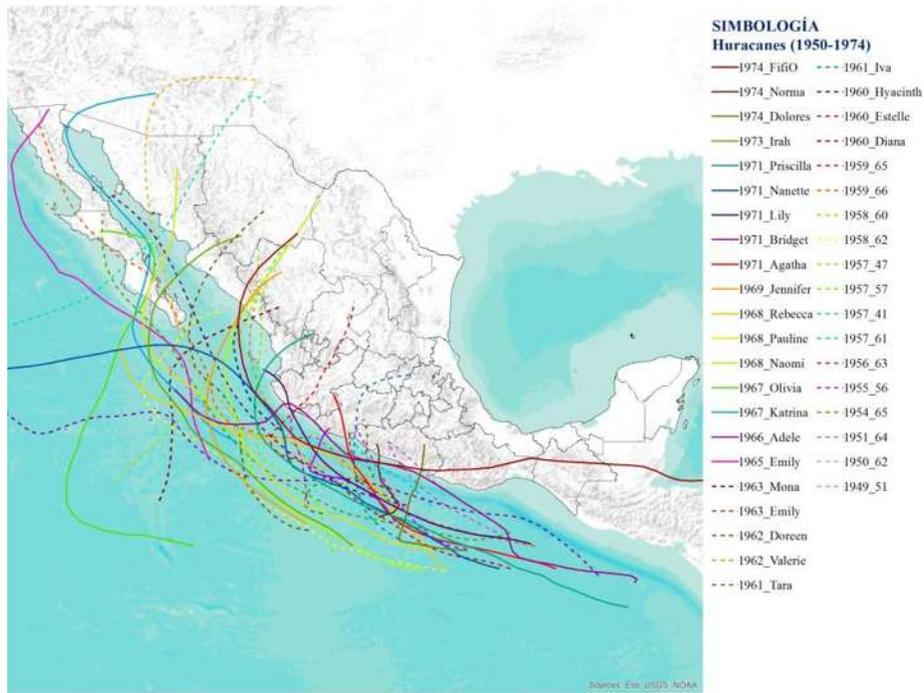


Figura 4.12 Huracanes de la costa del Océano Pacífico (1949-1974).

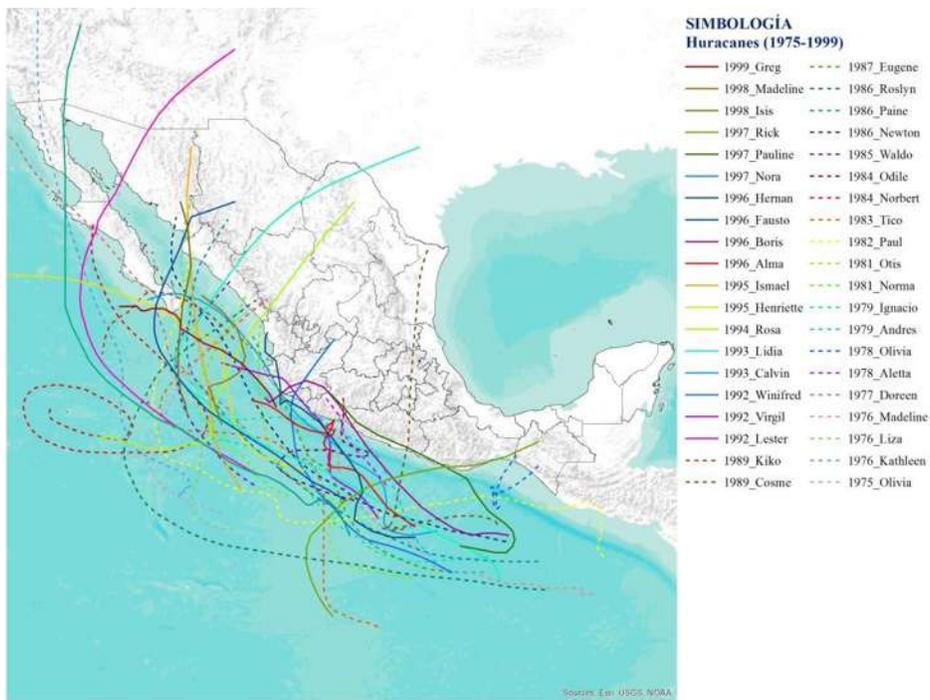


Figura 4.13 Huracanes de la costa del Océano Pacífico (1975-1999).

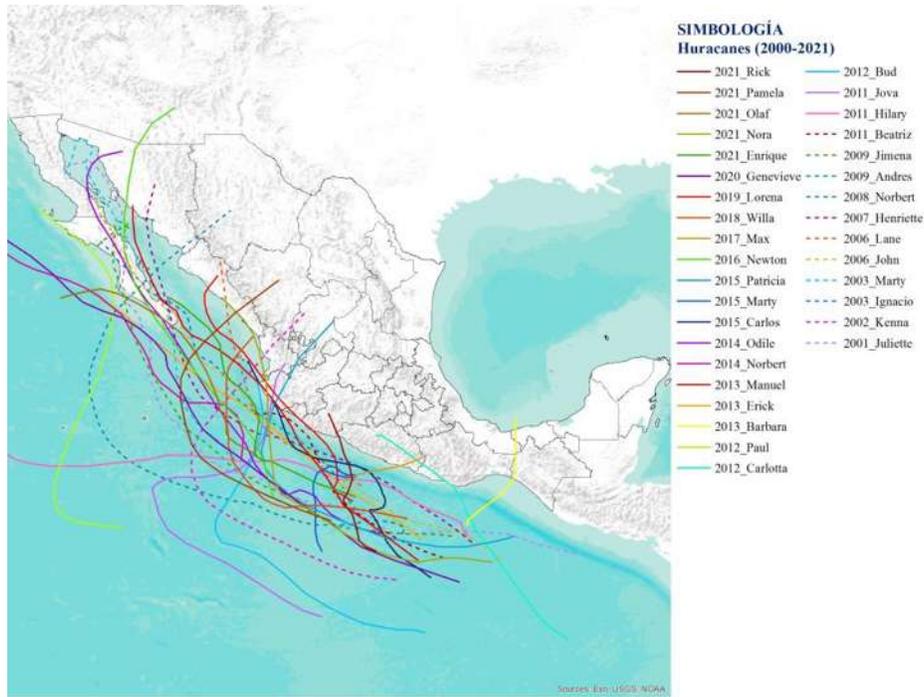


Figura 4.14 Huracanes de la costa del Océano Pacífico (2000-2021).

En la Figura 4.15 se muestran la ocurrencia de huracanes por intervalo de incidencia de 25 años; durante el período 1980-1974 ocurrieron un total 39 huracanes, en el período 1975-1999 ocurrieron 40 huracanes y en el período 2000-2021 han ocurrido 34 huracanes; esto quiere decir, que en el período 2000-2021 aún no completa los 25 años y ya el número de ocurrencia es idéntico a los anteriores, ya a la fecha (2022) han ocurrido aproximadamente 5 huracanes en ésta costa; por lo que, al 2025 el número de ocurrencia de huracanes habrá crecido considerablemente.

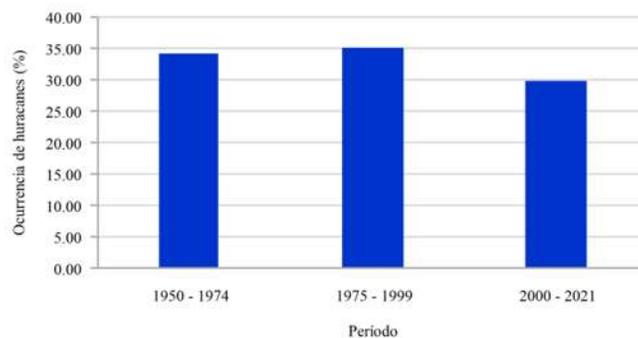


Figura 4.15 Porcentaje de la ocurrencia de huracanes período de 25 años.

De los 114 huracanes registrado en el Océano pacifico el 51.75% pertenece a huracanes de categoría H1, el 18.42% pertenece a huracanes de categoría H2, el 10.53% a huracanes de

categoría H3, el 16.67% a huracanes de categoría H4 y el 2.63% a huracanes de categoría H5; con un número de ocurrencia de 59, 21, 12, 19 y 3 respectivamente (Figura 4.16).

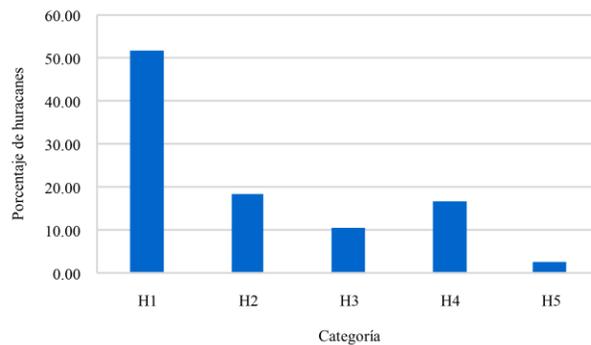
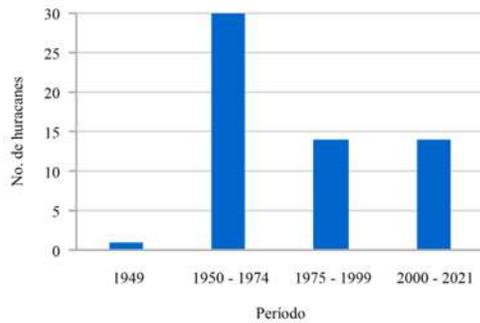
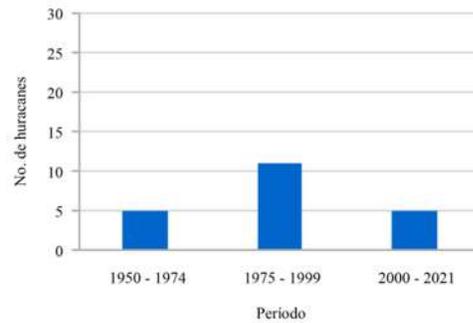


Figura 4.16 Ocurrencia de huracanes por categoría (%).

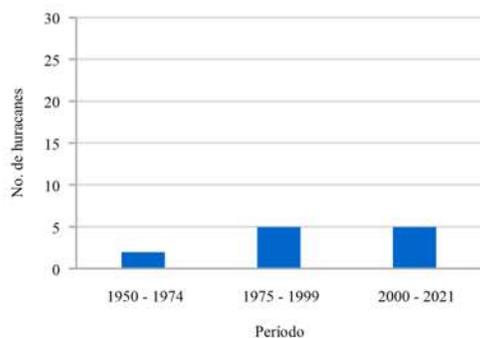
En la Figura 4.17, se muestra la clasificación de la ocurrencia de huracanes por categoría e intervalo de incidencia de 25 años; en la cual se muestra como a partir de año 2000 se han presentado huracanes de categoría H5, aunque los más frecuentes son los de categoría H1, H2 y H4.



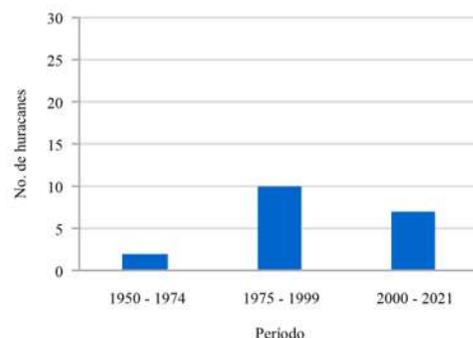
a) Categoría “H1”



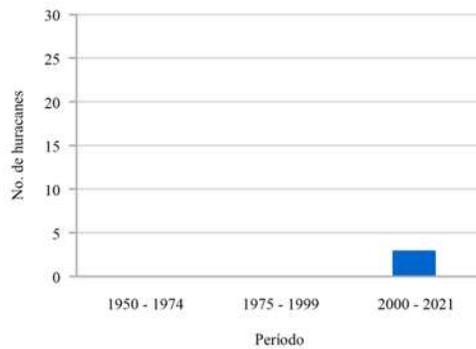
b) Categoría “H2”



c) Categoría “H3”



d) Categoría “H4”



e) Categoría “H5”

Figura 4.17 Ocurrencia de huracanes por categoría y periodo en el Océano Pacífico.

El número de ocurrencia de huracanes es 1.6 veces mayor en el Océano pacífico que en el Golfo de México; ya que del período de 1950-2021 el número total de huracanes ocurridos en ambas costas de la república mexicana es de 163 huracanes, de los cuales el 70% ocurrieron en la costa del Océano pacífico, mientras que el 30% ocurrieron en el Golfo de México.

En la Tabla 4.3 se muestran los huracanes que se han presentado en el Océano Pacífico, con algunas características que los destacan, como la fecha de ocurrencia, categoría, velocidad máxima del viento y la presión mínima que se obtuvieron de la base de datos del NOAA: <https://coast.noaa.gov/hurricanes/> y <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php>.

Utilizando los factores de conversión para velocidades de viento provocadas por ciclones tropicales planteados por Bloemendaal *et al.* (2020): factor de 0.5144 para la conversión de la promediado de un minuto, entre unidades de kts (nodos) a m/s; para la conversión de una promediado de un minuto a 10 minutos en m/s, propone el factor de 0.88, mientras que para la conversión de una promediado de 10 minutos a tres segundos se utilizó el factor de 0.67.

Tabla 4.3 Ocurrencia de huracanes en el Océano Pacífico (1950-2021).

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad Máxima				Presión Mínima (mb)
				1 min		10 min	3 s	
				(kts)	m/s	(m/s)	(km/h)	
2021	Rick	22 Oct - 28 Oct	H2	90	46.30	40.74	218.90	977
2021	Pamela	10 Oct - 13 Oct	H1	65	33.44	29.42	158.10	987
2021	Olaf	07 Sep - 11 Sep	H2	90	46.30	40.74	218.90	975
2021	Nora	25 Ago - 30 Ago	H1	75	38.58	33.95	182.42	976
2021	Enrique	25 Jun -30 Jun	H1	80	41.15	36.21	194.58	972

Tabla 4.3 Ocurrencia de huracanes en el Océano Pacífico (1950-2021), continuación.

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad Máxima				Presión Mínima (mb)
				1 min		10 min	3 s	
				(kts)	m/s	(m/s)	(km/h)	
2020	Genevieve	16 Ago - 22 Ago	H4	115	59.16	52.06	279.71	950
2019	Lorena	17 Sep - 22 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	985
2018	Willa	19 Oct - 24 Oct	H5	140	72.02	63.37	340.52	925
2017	Max	13 Sep - 15 Sep	H1	80	41.15	36.21	194.58	980
2016	Newton	04 Sep - 08 Sep	H1	80	41.15	36.21	194.58	977
2015	Patricia	20 Oct - 24 Oct	H5	185	95.16	83.74	449.97	872
2015	Marty	26 Sep - 30 Sep	H1	70	36.01	31.69	170.26	987
2015	Carlos	10 Jun - 18 Jun	H1	80	41.15	36.21	194.58	978
2014	Odile	09 Sep - 18 Sep	H4	120	61.73	54.32	291.87	918
2014	Norbert	02 Sep - 11 Sep	H3	110	56.58	49.79	267.55	950
2013	Manuel	13 Sep - 19 Sep	H1	65	33.44	29.42	158.10	983
2013	Erick	04 Jul - 09 Jul	H1	70	36.01	31.69	170.26	983
2013	Barbara	28 May - 30 May	H1	70	36.01	31.69	170.26	983
2012	Paul	13 Oct - 18 Oct	H3	105	54.01	47.53	255.39	959
2012	Carlotta	13 Jun - 17 Jun	H2	95	48.87	43.00	231.07	973
2012	Bud	20 May - 26 May	H3	100	51.44	45.27	243.23	961
2011	Jova	05 Oct - 12 Oct	H3	110	56.58	49.79	267.55	955
2011	Hilary	21 Sep - 03 Oct	H4	125	64.30	56.58	304.03	942
2011	Beatriz	18 Jun - 22 Jun	H1	80	41.15	36.21	194.58	977
2009	Jimena	28 Ago - 05 Sep	H4	135	69.44	61.11	328.36	931
2009	Andres	21 Jun -24 Jun	H1	70	36.01	31.69	170.26	984
2008	Norberto	04 Oct -12 Oct	H4	115	59.16	52.06	279.71	945
2007	Henriette	30 Ago - 06 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	972
2006	Lane	13 Sep - 17 Sep	H3	110	56.58	49.79	267.55	952
2006	John	28 Ago 04 Sep	H4	115	59.16	52.06	279.71	948
2003	Marty	18 Sep - 26 Sep	H2	85	43.72	38.48	206.74	970
2003	Ignacio	22 Ago - 27 Ago	H2	90	46.30	40.74	218.90	970
2002	Kenna	22 Oct - 26 Oct	H5	145	74.59	65.64	352.68	913
2001	Juliette	21 Sep - 03 Oct	H4	125	64.30	56.58	304.03	923
1999	Greg	05 Sep - 09 Sep	H1	65	33.44	29.42	158.10	986
1998	Madeline	16 Oct - 20 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	979
1998	Isis	01 Sep - 03 Sep	H1	65	33.44	29.42	158.10	988
1997	Rick	07 Nov - 10 Nov	H2	85	43.72	38.48	206.74	973
1997	Pauline	05 Oct - 10 Oct	H4	115	59.16	52.06	279.71	948

Tabla 4.3 Ocurrencia de huracanes en el Océano Pacífico (1950-2021), continuación.

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad Máxima			Presión Mínima (mb)	
				1 min		10 min		3 s
				(kts)	m/s	(m/s)	(km/h)	
1997	Nora	16 Sep - 26 Sep	H4	115	59.16	52.06	279.71	950
1996	Hernan	30 Sep - 04 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	980
1996	Fausto	10 Sep - 14 Sep	H3	105	54.01	47.53	255.39	955
1996	Boris	27 Jun - 01 Jul	H1	80	41.15	36.21	194.58	979
1996	Alma	20 Jun - 27 Jun	H2	90	46.30	40.74	218.90	969
1995	Ismael	12 Sep -15 Sep	H1	70	36.01	31.69	170.26	983
1995	Henriette	01 Sep - 08 Sep	H2	85	43.72	38.48	206.74	970
1994	Rosa	08 Oct - 15 Oct	H2	90	46.30	40.74	218.90	974
1993	Lidia	08 Sep - 14 Sep	H4	130	66.87	58.85	316.19	930
1993	Calvin	04 Jul - 09 Jul	H2	95	48.87	43.00	231.07	966
1992	Winifred	06 Oct - 10 Oct	H3	100	51.44	45.27	243.23	960
1992	Virgil	01 Oct - 05 Oct	H4	115	59.16	52.06	279.71	948
1992	Lester	20 Ago - 24 Ago	H1	70	36.01	31.69	170.26	985
1989	Kiko	25 Ago - 29 Ago	H3	105	54.01	47.53	255.39	955
1989	Cosme	18 Jun - 23 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	979
1987	Eugene	22 Jul - 26 Jul	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1986	Roslyn	15 Oct - 22 Oct	H4	125	64.30	56.58	304.03	-
1986	Paine	28 Sep -02 Oct	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1986	Newton	18 Sep - 24 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1985	Waldo	07 Oct - 09 Oct	H2	90	46.30	40.74	218.90	-
1984	Odile	17 Sep - 23 Sep	H2	90	46.30	40.74	218.90	-
1984	Norbert	14 Sep - 26 Sep	H4	115	59.16	52.06	279.71	-
1983	Tico	11 Oct - 19 Oct	H4	115	59.16	52.06	279.71	-
1982	Paul	18 Sep - 30 Sep	H2	95	48.87	43.00	231.07	-
1981	Otis	24 Oct - 30 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1981	Norma	08 Oct - 12 Oct	H3	110	56.58	49.79	267.55	-
1979	Ignacio	23 Oct - 30 Oct	H4	125	64.30	56.58	304.03	938
1979	Andres	31 May - 04 Jun	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1978	Olivia	20 Sep - 23 Sep	H1	65	33.44	29.42	158.10	-
1978	Aletta	30 May - 01 Jun	H1	65	33.44	29.42	158.10	-
1977	Doreen	13 Ago - 18 Ago	H1	65	33.44	29.42	158.10	979
1976	Madeline	29 Sep - 08 Oct	H4	125	64.30	56.58	304.03	941
1976	Liza	25 Sep - 02 Oct	H4	120	61.73	54.32	291.87	948
1976	Kathleen	07 Sep - 11 Sep	H1	70	36.01	31.69	170.26	986
1975	Olivia	22 Oct - 25 Oct	H3	100	51.44	45.27	243.23	-

Tabla 4.3 Ocurrencia de huracanes en el Océano Pacífico (1950-2021), continuación.

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad Máxima				Presión Mínima (mb)
				1 min		10 min	3 s	
				(kts)	m/s	(m/s)	(km/h)	
1974	Fifi-Orlene	21 Sep - 24 Sep	H2	90	46.30	40.74	218.90	-
1974	Norma	09 Sep - 10 Sep	H1	65	33.44	29.42	158.10	-
1974	Dolores	14 Jun - 17 Jun	H1	70	36.01	31.69	170.26	-
1973	Irah	22 Sep - 27 Sep	H2	95	48.87	43.00	231.07	955
1971	Priscilla	06 Oct - 13 Oct	H3	110	56.58	49.79	267.55	951
1971	Nanette	03 Sep - 09 Sep	H2	85	43.72	38.48	206.74	990
1971	Lily	28 Ago - 01 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1971	Bridget	14 Jun - 20 Jun	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1971	Agatha	21 May - 25 May	H2	85	43.72	38.48	206.74	972
1969	Jennifer	09 Oct - 12 Oct	H1	65	33.44	29.42	158.10	-
1969	Rebecca	06 Oct - 11 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1968	Pauline	26 Sep - 03 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	1008
1968	Naomi	09 Sep - 13 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1967	Olivia	06 Oct - 15 Oct	H3	110	56.58	49.79	267.55	-
1967	Katrina	30 Ago - 03 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1966	Adele	20 Jun - 24 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1965	Emily	30 Ago - 06 Sep	H1	80	41.15	36.21	194.58	-
1963	Mona	17 Oct - 19 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1963	Emily	29 Jun - 30 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1962	Doreen	01 Oct - 05 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1962	Valerie	24 Jun - 26 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1961	Tara	10 Nov - 12 Nov	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1961	Iva	09 Jun - 12 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1960	Hyacinth	21 Oct - 23 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1960	Estelle	29 Ago - 09 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1960	Diana	17 Ago - 20 Ago	H1	75	38.58	33.95	182.42	987
1959	1959296N12265	22 Oct - 28 Oct	H4	120	61.73	54.32	291.87	958
1959	1959247N13266	04 Sep - 11 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1958	1958273N16260	30 Sep- 06 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1958	1958157N12262	06 Jun- 16 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	992
1957	1957294N16247	20 Oct - 22 Oct	H4	120	61.73	54.32	291.87	-
1957	1957291N13257	17 Oct - 20 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1957	1957275N17241	01 Oct - 06 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1957	1957260N15261	17 Sep - 18 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-

Tabla 4.3 Ocurrencia de huracanes en el Océano Pacífico (1950-2021), continuación.

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad Máxima				Presión Mínima (mb)
				1 min		10 min	3 s	
				(kts)	m/s	(m/s)	(km/h)	
1956	1956165N13263	12 Jun - 14 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1955	1955289N15256	15 Oct - 16 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1954	1954193N14265	12 Jul - 17 Jul	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1951	1951152N14264	01 Jun - 02 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1950	1950166N14262	14 Jun - 19 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1949	1949253N19251	09 Sep - 11 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-

En total el número de huracanes registrados desde el año 1851-2022 es de 234 huracanes, de los cuales el 39.74% pertenece a la ocurrencia huracanes de categoría “H1”, el 25.21% de categoría H2, el 15.38% de categoría H3, el 12.82% de categoría H4 y el 6.84% de categoría H5, a como se muestra en la Figura 4.18, donde se clasifica por costa, Golfo de México (GM) y el Océano Pacífico (OP).

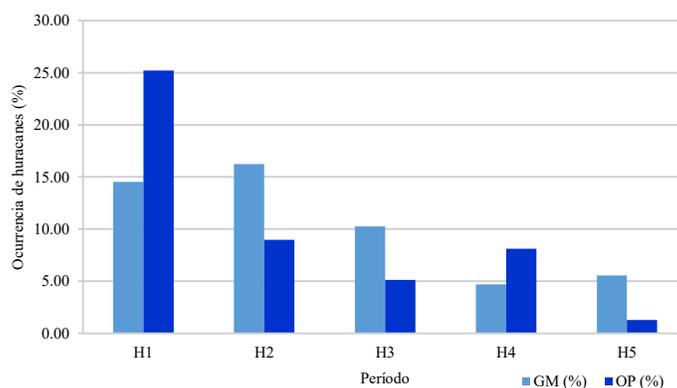


Figura 4.18 Ocurrencia de huracanes por categoría (%).

El huracán registrado con mayor velocidad desde el periodo de 1851-2022 es el huracán Patricia ocurrido en el mes de octubre de 2015 con velocidades máximas sostenidas de 343 km/h, y el huracán Allen del mes de agosto de 1980 con velocidad máxima sostenida de 306 km/h; ambos huracanes clasificados de categoría H5, según la escala de Saffir-Simpson. En el último periodo (2000-2021), la ocurrencia de huracanes aumento un 14%; esto se debe mucho a la variación del calentamiento atmosférico. La temporada de huracanes comienza desde el mes de mayo hasta noviembre; aunque el mes de agosto, septiembre y octubre son los meses con el mayor número de ocurrencia de huracanes en toda la costa de la República Mexicana, desde el período de 1851-2021, con la ocurrencia de 52 (22.13%), 76 (32.34%) y 54 (22.98%) huracanes consecutivamente.

4.3. SUSCEPTIBILIDAD DE HURACANES

El peligro que presentan los huracanes en un país, está en función de la probabilidad de que un huracán de cierta intensidad impacte en el país y de la vulnerabilidad del país a dicho impacto. Ser vulnerable a un fenómeno natural es poseer una predisposición intrínseca o ser susceptible, tanto un sujeto o un grupo de elementos, a sufrir un daño (García, 2014).

La costa es la zona con mayor peligrosidad climática, debido a la frecuencia de eventos meteorológicos. Y esto se ha visto con mayor auge debido al cambio climático en los últimos 20 años. Los huracanes son uno de los impactos físicos del cambio climático, los cuales amenazan severamente la seguridad de la población. La costa mexicana se define como los municipios con frente de mar y a aquellos en planicies costeras con presencia de vegetación de humedales (segundo y tercer orden) (Rivera *et al.*, 2010).

En su totalidad 17 estados y 169 municipios son parte de la región costera de la República Mexicana. Se puede decir que los estados con una probabilidad mayor de riesgo costero debido a la frecuencia e intensidad de los huracanes, son aquellos estados que tienen una costa larga, una gran proporción de planicie costera, que sufre una frecuencia presencia de huracanes y está habitado por una densa población marginada, además que ha eliminado o ha transformado la vegetación costera (Rivera *et al.*, 2010).

En las Figuras 4.19 y 4.20, se muestran el porcentaje de susceptibilidad de eventos huracanados en los estados y municipios de la costa mexicana.



Figura 4.19 Estados de la costa mexicana susceptibles a huracanes.

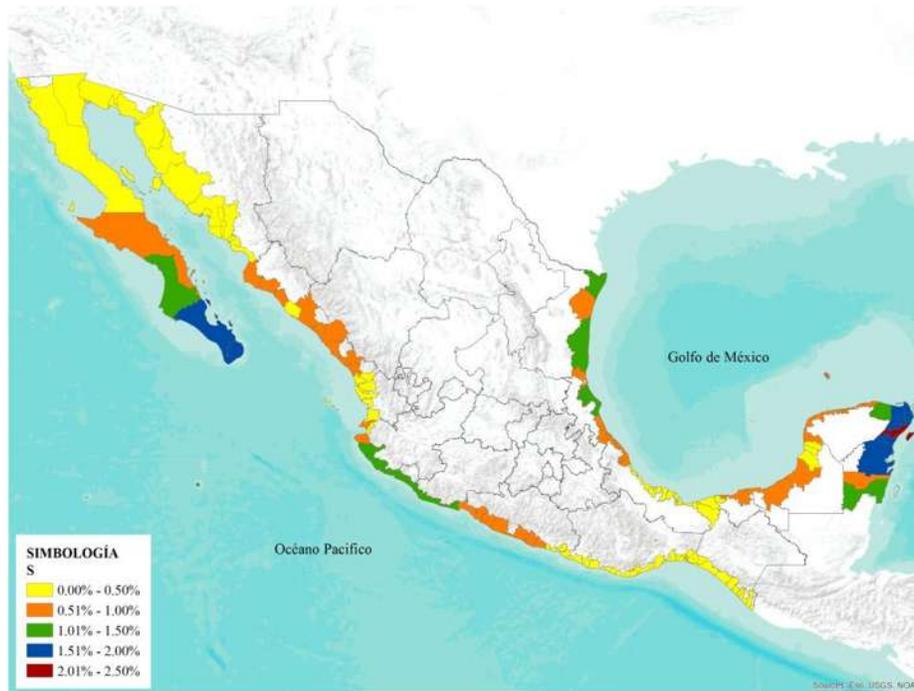


Figura 4.20 Municipios de la costa mexicana susceptibles a huracanes.

En la Figura 4.19 se muestra que los estados de Baja California, Chiapas, Oaxaca, Sonora y Tabasco se encuentran entre una susceptibilidad de 0% - 4.0% (amarillo) con incidencia de entre 0 - 18 eventos; Campeche, Colima, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán se encuentran entre una susceptibilidad del 4% - 8.0% (verde) con incidencia de 19 y 37 eventos; Baja California Sur y Tamaulipas se encuentran entre el 8% - 12.0% (azul) con incidencia de entre 38 y 56 eventos; mientras que el estado de Quintana Roo tiene una susceptibilidad mayor al 12% con 72 eventos huracanados.

En la Figura 4.20 se muestra la susceptibilidad de huracanes por municipios costeros, en dónde, se destacan en color rojo los municipios con una susceptibilidad mayor al 2% como son: Cozumel, Felipe Carrillo Puerto, Benito Juárez y Solidaridad Quintana Roo con un número de incidencia mayor a 38 eventos. En color azul se resaltan los municipios con una susceptibilidad de $1.5\% < S \leq 2\%$, entre los que se encuentran: Puerto Morales, Islas mujeres, Tulum y Lázaro Cárdenas Quintana Roo y; la Paz y Los Cabos del estado de Baja California del Sur con un número de incidencia de entre 30 y 38 eventos. En color verde se muestran los municipios con una susceptibilidad de entre el $1.0\% < S \leq 1.5$, entre los cuales se encuentran: Comondú Baja California Sur; Armería, Manzanillo y Tecomán Colima; Cihuatlán, La Huerta y Tomatlán Jalisco; Aquila, Coahuayana y Lázaro Cárdenas Michoacán; Othón P. Blanco Quintana Roo; Aldama, Matamoros y Soto la Marina de Tamaulipas; Ozuama de Mascareñas, Tamiahua y Tampico Alto Veracruz; y Tizimín Yucatán con un número de incidencia entre 20 y 29 huracanes. En color naranja se muestran

los municipios con una susceptibilidad de entre el $0.5\% < S \leq 1.0\%$ entre los cuales están: Mulegè y Loreto B.C.S.; Calkiní, Carmen y Champotón Campeche; Acapulco de Juárez, Benito Juárez, Coyuca de Benítez, Zihuatanejo, Petatlán, San Marcos, Técpan de Galeana y La Unión de Isidoro Montes de Oca Guerrero; Cabo Corriente Jalisco; Bahía de Banderas Nayarit; Bacalar Q. Roo; Ahome, Angostura, Culiacán, Elota, Escuinapa, Guasave, Mazatlán, Rosario y San Ignacio Sinaloa; Centla y Paraíso Tabasco; Altamira, Ciudad Madero y San Fernando Tamaulipas; Actopán, Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, Cazones de Herrera, Gutiérrez Zamora, Nautla, Papantla, Pueblo Viejo, Tecolutla, Tuxpan, Vega de Alatorre y San Rafael del estado de Veracruz y de Yucatán: Celestún, Dzemul, Dzidzantún, Dzilam de Bravo, Hunucmá, Ixil, Progreso, Río Lagartos, San Felipe, Sinanché, Telchac Puerto y Yobaín. Y en color amarillo se muestran los municipios con una susceptibilidad menor o igual al 0.5% entre los que se encuentran en su mayoría los municipios de Baja California, Chiapas, Nayarit, Oaxaca, Sonora y el 50% de los municipios de Veracruz.

En promedio 28 eventos se presentan por estado. Los estados que exceden el promedio de incidencia de huracanes son: Baja California Sur, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Quintana Roo, Sinaloa, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán (Figura 4.21).

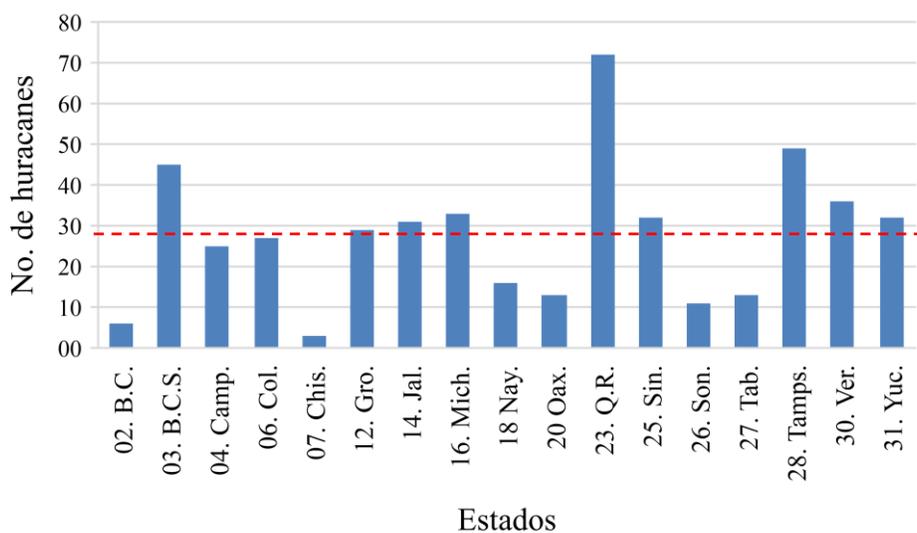


Figura 4.21 Incidencia de huracanes por estados costeros de la República Mexicana.

En la Tabla 4.4 se muestra el porcentaje de municipios del número total de municipios pertenecientes a la costa mexicana con respecto a los límites de susceptibilidad que se encuentran en la Figura 4.20.

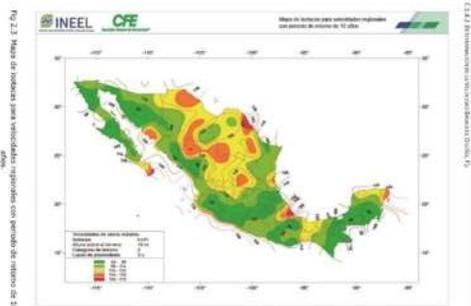
Tabla 4.4 Porcentaje del número de municipios en relación a los límites de susceptibilidad de huracanes.

Color	S	NTM	NTM (%)	NHS
Amarillo	$0 \leq S \leq 0.5$	88	52.07	0 - 9
Naranja	$0.5 < S \leq 1.0$	53	31.36	10 - 19
Verde	$1.0 < S \leq 1.5$	18	10.65	20 - 29
Azul	$1.5 < S \leq 2$	6	3.55	30 - 38
Rojo	$S > 2$	4	2.37	> 38
Total =		169	100	

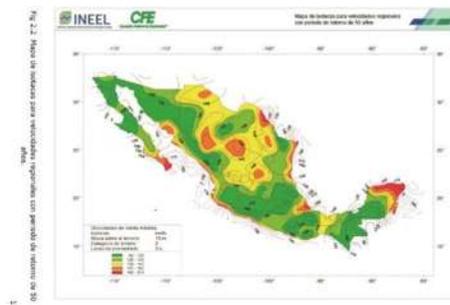
En dónde, S = susceptibilidad de huracanes, NTM = número total de municipios con respecto a los límites de S, NTM (%) = porcentaje del número total de municipios con respecto a los límites de S y NHS = Incidencia de huracanes con respecto a S. Se observa que solo el 2.37% de municipios costeros se encuentran entre una susceptibilidad mayor al 2% con una incidencia mayor a 38 eventos, el 3.55% de municipios están entre la susceptibilidad de 1.5% y 2.0% con incidencia de 30 – 38 huracanes, el 10.65% de municipios están entre la susceptibilidad de 1.0% y 1.5% con incidencia de 20 – 29 eventos. Esto quiere decir que el 16.57% de municipios costeros son susceptibles con un porcentaje mayor al 1.0% con una incidencia promedio de 28 eventos por municipio. Mientras que el 5.92% de huracanes no son susceptibles a huracanes, es decir, con un número de incidencia de huracanes nulo, entre los que se encuentran: Tijuana y Playa el Rosarito Baja California, Acapetahua, Huixtla, Mapastepec, Mazatlán, Villa Comaltitlán, Suchiate y Tapachula Chiapas; y Caborca Sonora.

4.4. VELOCIDADES REGIONALES

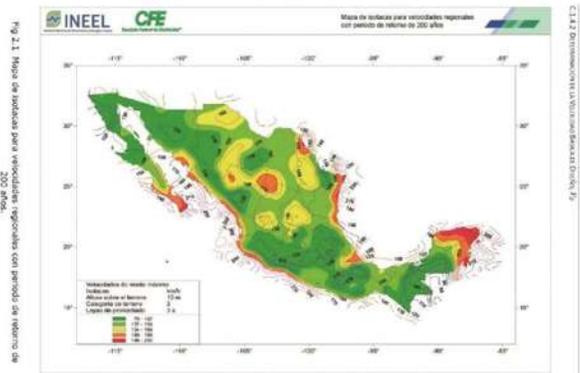
Los Manuales de Diseño de Obras Civiles por Viento, proponen una serie de mapas de isotacas de velocidades regionales (V_R) para el diseño de obras civiles. Las cuales se muestran en las Figura 4.22 y 4.23.



a) T = 10años



b) T = 50años

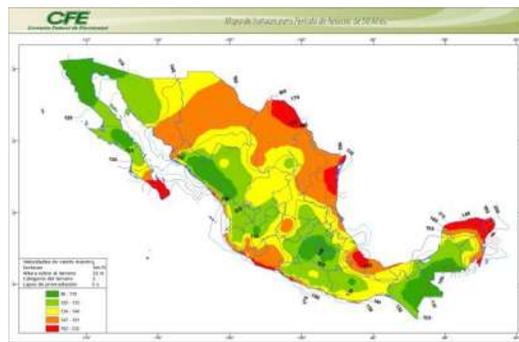


c) T = 200 años

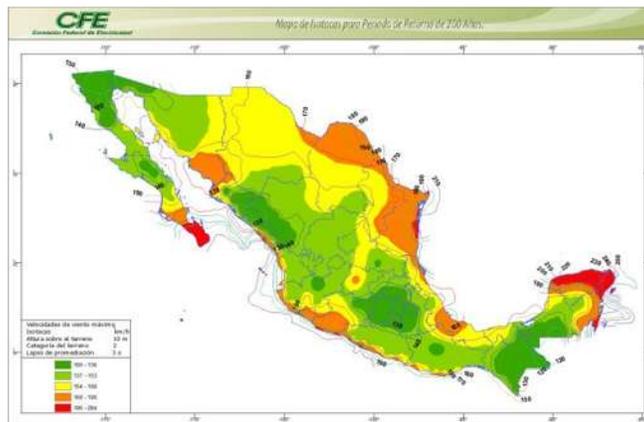
Figura 4.22 Mapa de isotacas para V_R del MDOC (2020).



a) T = 10 años



b) T = 50 años



c) T = 200 años

Figura 4.23 Mapa de isotacas para V_R del MDOC (2008).

4.4.1. Decremento de la Velocidad Regional, V_R

La velocidad regional de ráfaga del viento (V_R), es la velocidad máxima asociada a un período de retorno fijo (T), con una probabilidad de excedencia de $1/T$, en una zona o región determinada del país, donde el período de retorno está dado en años. Los MDOC de los años 1993, 2008 y 2020; proponen velocidades regionales (V_R) de las principales ciudades de la República Mexicana.

En el tercer capítulo se explica cómo las velocidades regionales propuestas para diseño de estructuras, deben aumentar al paso de los años por varios aspectos, principalmente por el cambio climático que ocasiona velocidades del viento cada vez mayores y provoca daños a las estructuras civiles. Pero, se ha observado que, las velocidades regionales de algunas ciudades principales han disminuido.

Al realizar comparaciones de velocidades regionales, utilizando la Ecuación 3.1 referente al incremento de velocidades, algunos resultados dieron negativos, expresando el decremento de velocidades regionales. En la Figura 4.24, 4.25 y 4.26 se muestra el decremento de velocidades regionales (V_R) de la comparación de los MDOC de 1993-2008, 2008-2020 y 1993-2020, por períodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 años consecutivamente.

Se observa que, para los tres periodos de retorno, en la comparación de velocidades regionales del MDOC 2008-2020, hubo un mayor número de ciudades principales en el estado de México en las que se presentó un decrecimiento de velocidades regionales de entre el 5 y 15%. Mientras que las ciudades principales para los tres periodos de retorno que disminuyeron velocidades de entre el 10 y 30% son Colima Col.; Comitán, San Cristóbal de las Casas y Tapachula Chiapas; Cd. Acuña Coahuila; Toluca estado de México; León de los Aldama y Salamanca Guanajuato; Cd. Guzmán, Tlaquepaque, y Tonalá Jalisco; Uruapan y Zamora Michoacán; Guaymas y Hermosillo Sonora; Cd. Victoria, Reynosa, Soto la Marina y Nuevo Laredo Tamaulipas; Tlaxcala Tlax., y Poza Rica de Hidalgo Veracruz.

En la comparación de los MDOC 1993-2008, las ciudades de Guadalajara Jalisco, Ensenada Baja California y Hermosillo Sonora, hubo un decremento de velocidades de entre el 10 y 40% para los periodos de retorno de 10, 50 y 200 años.

En los MDOC 1993-2008, las ciudades que ocupan un decremento mayor de velocidades regionales de entre el 10 y 40%, para los tres períodos de retorno son Ensenada Baja California; Pachuca Hidalgo; Cd. Guzmán y Guadalajara Jalisco; Mazatlán Sinaloa; Hermosillo y Guaymas Sonora; Cd. Victoria y Soto la Marina Tamaulipas; y Tlaxcala Tlax.



a) MDOC 1993-2008



b) MDOC 1993-2020



c) MDOC 2008-2020, $0 \leq V_R < 5$



d) MDOC 2008-2020, $5 \leq V_R < 10$



e) MDOC 2008-2020, $10 \leq V_R < 20$



f) MDOC 2008-2020, $V_R > 20$

Figura 4.26 Decremento (%) de V_R de las principales ciudades para un $T = 200$ años.

Como se observa, hubo un decremento de velocidades regionales principalmente en los estados de México, Baja California Sur, Sonora, Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Quintana Roo, Campeche, Veracruz, y Tamaulipas.

En las Figuras 4.27, 4.28 y 4.29 se muestra una comparación de la susceptibilidad (S) de huracanes y el decremento de velocidades regionales (V_R) de las principales ciudades pertenecientes a los municipios de la costa de la República Mexicana, con periodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 años consecutivamente.

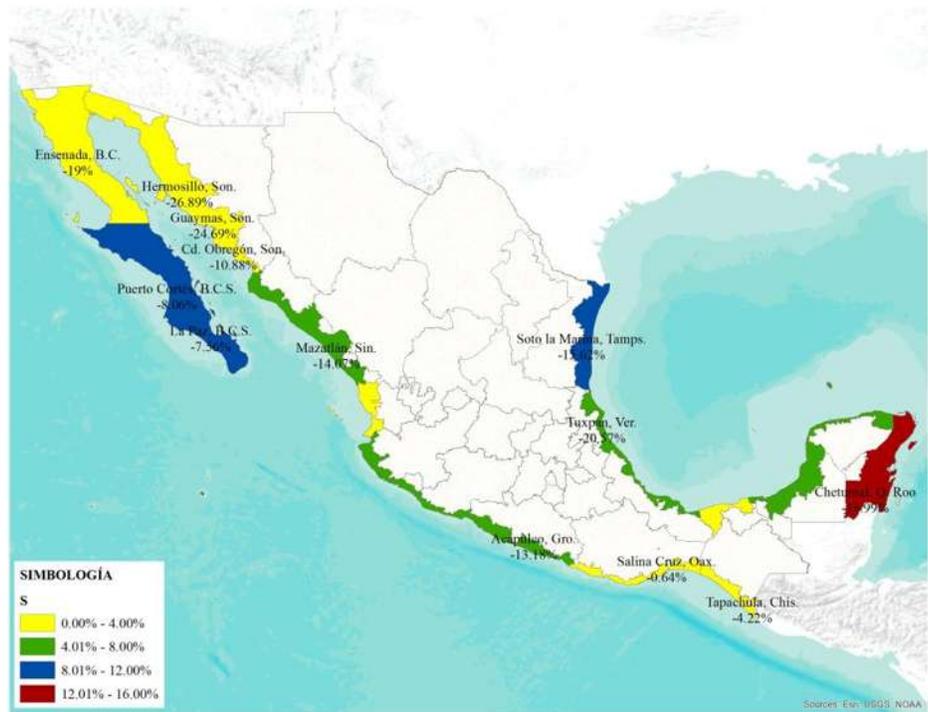
En la Figura 4.26 se observa que, en la comparación de los MDOC de 1993-2008 de las ciudades de Puerto Cortés B.C.S. (14.73%), la Paz B.C.S. (8.15%), y Chetumal Q. Roo (5.04%); así como de los MDOC de 2008-2020, la Cd. Constitución B.C.S. (2.38%), Cancún (6.73%), Chetumal (14.69%), Cozumel (3.29%) y Playa del Carmen (3.91%) del estado de Q. Roo, Heroica Matamoros (15.52%) y Soto la Marina (21.08%) Tamaulipas; y de los MDOC 1993-2020 las ciudades de Puerto Cortés (8.06%) y La Paz (7.6%) B.C.S., Soto la Marina Tamaulipas (15.62%) y Chetumal Q. Roo (18.99%); se encuentran en los municipios de costa de la República Mexicana con una susceptibilidad (S) de huracanes (por estado) mayor al 8%.



a) MDOC 1993-2008



b) MDOC 2008-2020



c) MDOC 1993-2020

Figura 4.27 Susceptibilidad de huracanes y V_R para un $T = 10$ años.

Las ciudades con decremento de V_R que se encuentran en municipios con una susceptibilidad (S) de huracanes (por estado) de entre el $4\% > S \leq 8\%$ son Culiacán y Mazatlán Sinaloa, Acapulco Guerrero, Puerto Vallarta Jalisco, Veracruz, Coatzacoalcos y Tuxpan Veracruz, Campeche y Ciudad del Carmen Campeche, para los periodos de retorno de 10, 50 y 200 años.

En la Figura 4.27 se observa que, el decremento de las ciudades que se encuentran en los estados con una susceptibilidad de huracanes por estado mayor al 8% para los MDOC de 1993-2008 son Puerto Cortés B.C.S. (9.68%) y la Paz B.C.S. (4.09%); de los MDOC de 2008-2020, la Cd. Constitución B.C.S. (1.02%), Cancún (0.04%), Chetumal (1.9%) y Cozumel (0.65%) del estado de Q. Roo, y Soto la Marina Tamaulipas (19.52%); y de los MDOC 1993-2020 las ciudades de Puerto Cortés (1.1%) y La Paz (3.51%) B.C.S., y Soto la Marina Tamaulipas (20%).



a) MDOC 1993-2008



b) MDOC 2008-2020



c) MDOC 1993-2020

Figura 4.28 Susceptibilidad de huracanes y V_R para un $T = 50$ años.

Las ciudades con decremento de V_R que se encuentran en municipios con una susceptibilidad (S) de huracanes (por estado) de entre el $0\% > S \leq 4\%$ son Ensenada, Mexicali y Tijuana B.C., Cd. Obregón, Guaymas y Hermosillo Sonora, Salinas Cruz Oaxaca y Tapachula Chiapas, para los periodos de retorno de 10, 50 y 200 años.

En la Figura 4.28 se observa que, el decremento de las ciudades que se encuentran en los estados con una susceptibilidad de huracanes por estado mayor al 8% para los MDOC de 1993-2008 son Puerto Cortés B.C.S. (1.16%), la Paz B.C.S. (1.05%) y Soto la Marina Tamaulipas (8.82%); de los MDOC de 2008-2020, la Cd. Constitución B.C.S. (1.95%), La paz B.C.S. (1.02%), Cancún (0.79%) y Cozumel (1.8%) del estado de Q. Roo, Cd. Madero (2.65%) y Soto la Marina Tamaulipas (11.13%); y de los MDOC 1993-2020 las ciudades de La Paz (2.5%) B.C.S., y Soto la Marina Tamaulipas (18.97%).



a) MDOC 1993-2008



b) MDOC 2008-2020



c) MDOC 1993-2020

Figura 4.29 Susceptibilidad de huracanes y V_R para un $T = 200$ años.

Las principales ciudades en las que se presentaron un decremento de velocidades regionales y que se encuentran en zonas susceptibles a huracanes, corren el riesgo de futuros daños extremos tanto en las estructuras civiles, como cultivos e incluso a vidas humanas; ya que la intensidad de huracanes se ha presentado con mayor frecuencia en los últimos años, ocasionando velocidades de viento extremas.

La población de los municipios pertenecientes a la costa de la República Mexicana es de 57,919,913 habitantes y la población de los municipios a los que pertenecen las ciudades en donde se presentaron decrementos de V_R y que pertenecen a la costa es de 40,368,983 habitantes; se puede decir que, estadísticamente el 70% de la población costera está en riesgo ante la presencia de fuertes vientos por huracanes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Civil Engineers. (2017, June). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers.

Bloemendaal, N., De Moel, H., Muis, S., Haigh, I. D., y Aerts, J. C. (2020). Estimation of global tropical cyclone wind speed probabilities using the STORM dataset. *Scientific data*, 7(1), 1-11.

Chock, G. Y. (2016). Design for tsunami loads and effects in the ASCE 7-16 standard. *Journal of Structural Engineering*, 142(11), 04016093.

Harper, B. A., Kepert, J. D., y Ginger, J. D. (2010). Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions (p. 52). Geneva, Switzerland: WMO.

Frausto Martínez, O. (2014). Monitoreo de riesgo y desastre asociados a fenómenos hidrometeorológicos y cambio climático. Universidad de Quintana Roo. (Frausto, 2014).

García, M. C. (2014). Escenario de riesgo climático por tormentas severas y granizadas en Mar del Plata y Necochea-Quequén, Argentina. *Revista Brasileira de Climatología*, 14(14), 39-49.

Jiménez Espinosa, M., Matías Ramírez, L. G., Fuentes Mariles, O. A., y Prieto González, R. (2021). *Ciclones Tropicales. Serie Fascículos*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). Base de Datos. <https://www.inegi.org.mx/>

Jiménez Espinosa, M., Salas Salinas, A., García Jiménez, F., Eslava Morales, H., Alarcón Ferreira, A. M., Gómez Vázquez, A., Martínez Bringas, A. y Domínguez Morales, L. (2013). Peligros Naturales y Tecnológicos Relevantes Durante el Período 1810-2010. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Manual de Diseño de Obras Civiles (1193).

Manual de Diseño de Obras Civiles (2008).

Manual de Diseño de Obras Civiles (2020).

Martínez, F. y Arellano Molina, C. (2010). Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). Global Climate Station Summaries. National Center for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/maps/global-summaries/>

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). Hurricane Safety Tips and Resources. Historical Hurricane Tracks. National Weather Service. <https://coast.noaa.gov/hurricanes/>

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). Tropical Cyclone Reports. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center. <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php>

Rivera Arriaga, E., Azuz Adeath, I., Gual, L. A., y Villalobos-Zapata, G. J. (2010). Cambio Climático en México: Un enfoque Costero y Marino. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Cety. Gobierno del Estado de Campeche. Pp. 669.

Rosengaus Moshinsky, M., Jiménez Espinosa, M., y Vázquez Conde, M. T. (2002). Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. México. Secretaría de Gobernación; México. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

CAPÍTULO 5

REGIONALIZACIÓN EÓLICA DEL ESTADO DE MICHOACÁN

El estado de Michoacán es uno de los estados de la República Mexicana que se ha visto afectada por los fenómenos meteorológicos, principalmente eventos ciclónicos presenciados en la costa de los municipios de Aquila, Coahuayana y Lázaro Cárdenas, así como también, la presencia de eventos tornádicos que se han registrado en el estado.

En éste capítulo, se describe un estudio estadístico de los eventos ciclónicos y tornádicos que han ocurrido en el estado de Michoacán, conociendo así las velocidades máximas sostenidas provocadas por fenómenos meteorológicos y las velocidades regionales que los Manuales de Diseño de Obras Civiles promueven para el diseño de estructuras en la región de Michoacán. Y así proponer una serie de Velocidades para el estado que sea factible para el ingeniero civil a la hora de construir.

5.1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS

La definición de estaciones meteorológicas, se refiere a los instrumentos conformados por un grupo de sensores que permite registrar y transmitir información meteorológica de forma automática, cómo la velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica, temperatura del aire, humedad ambiental, precipitación pluvial y la radiación solar (Capítulo 4). Ya que la diferencia de velocidades sostenidas normales es diferente a las ocasionadas por los fenómenos meteorológicos; las estaciones permiten el registro de ambos fenómenos naturales, lo cual permite una facilidad mayor para la realización de estudios eólicos en la zona.

En la base de datos del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA), se encontró que en el estado de Michoacán se cuenta con cuatro estaciones meteorológicas que se encuentran activas a la fecha, su distribución se muestra en la Figura 5.1.

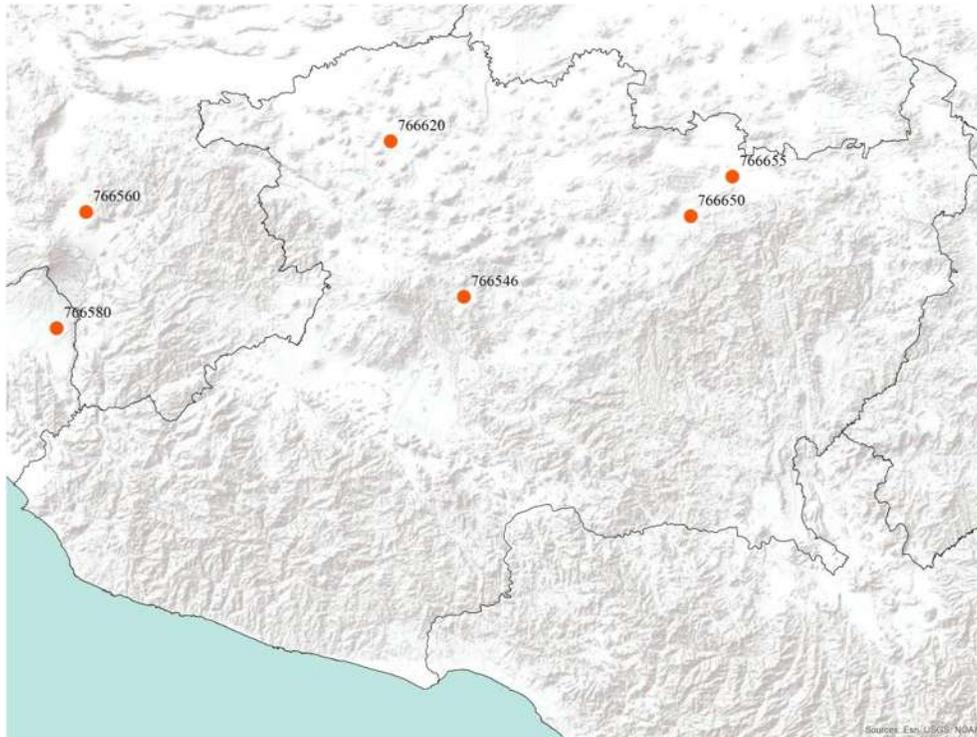


Figura 5.1 Estaciones meteorológicas del NOAA localizadas en Michoacán.

La estación 766546 se encuentra en el municipio de Uruapan con una latitud de 19.40 y longitud de -102.04; la estación 766620 se encuentra en el municipio de Zamora con una latitud de 19.98 y longitud de -102.32; la estación 766650 se encuentra en el municipio de Morelia con una latitud de 19.70 y longitud de -101.18; y la estación 766655 se encuentra en el municipio de Álvaro Obregón con una latitud de 19.85 y longitud de -101.03. Actualmente las estaciones localizadas en el estado están operando.

5.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CICLONES TROPICALES

El estado de Michoacán se encuentra en la costa del océano pacifico, está conformado por 113 municipios de los cuales tres pertenecen a la zona costera, Aquila, Coahuayana y Lázaro Cárdenas; la costa de Michoacán se encuentra en el quinto lugar de la susceptibilidad de huracanes con un porcentaje del 6.98%.

De acuerdo con la base de datos del NOAA, un total de 72 ciclones tropicales localizados a 100 km o que han tocado tierra, han ocurrido en la costa del estado de Michoacán durante el período de 1945-2021; de los cuales, el 41.67% corresponde a tormentas tropicales (TS) con un número de 30 eventos, y el 58.33% corresponde a la categoría de huracanes con un total

de 42 eventos de huracanes. Del 58.33% de huracanes, el 61.90%, 21.43%, 2.38% y el 14.29% corresponde a huracanes de categoría H1, H2, H3 y H4 respectivamente (Figura 5.2).

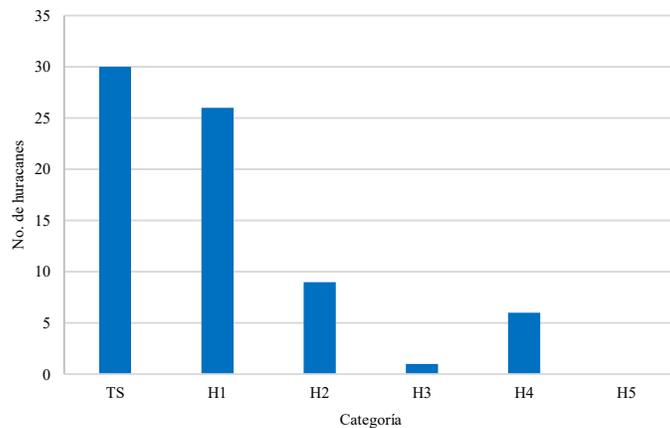
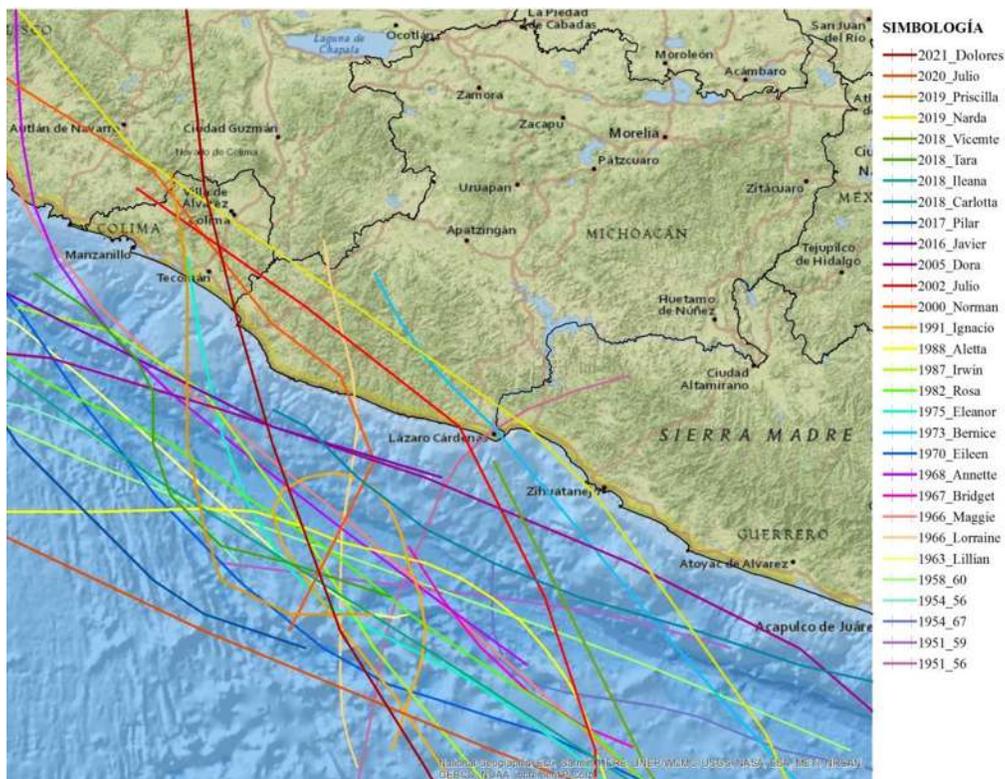
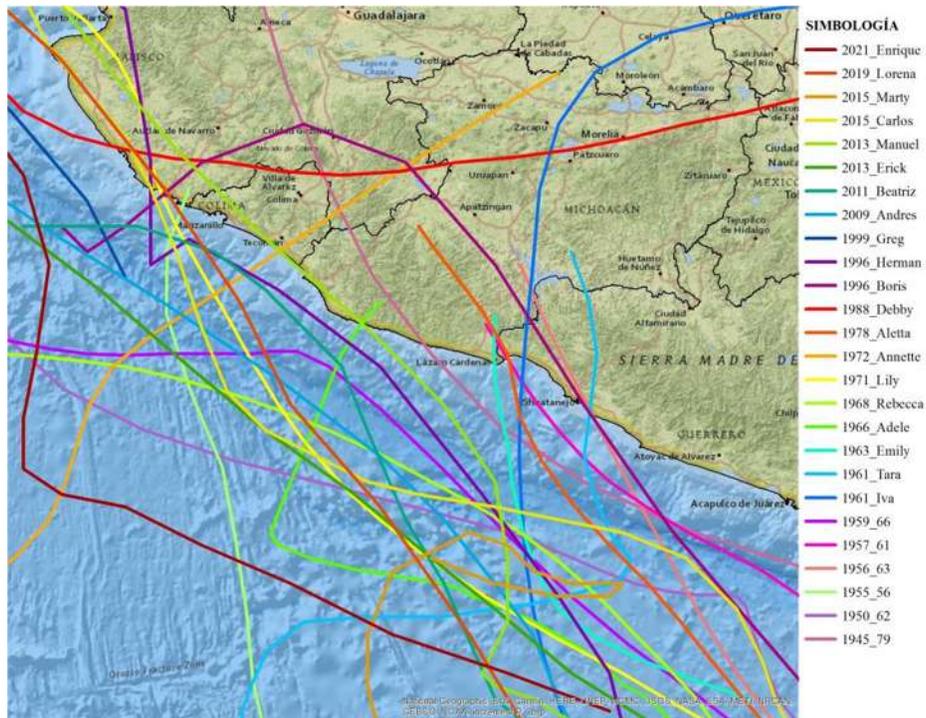


Figura 5.2 Ocurrencia de ciclones tropicales por categoría en Michoacán.

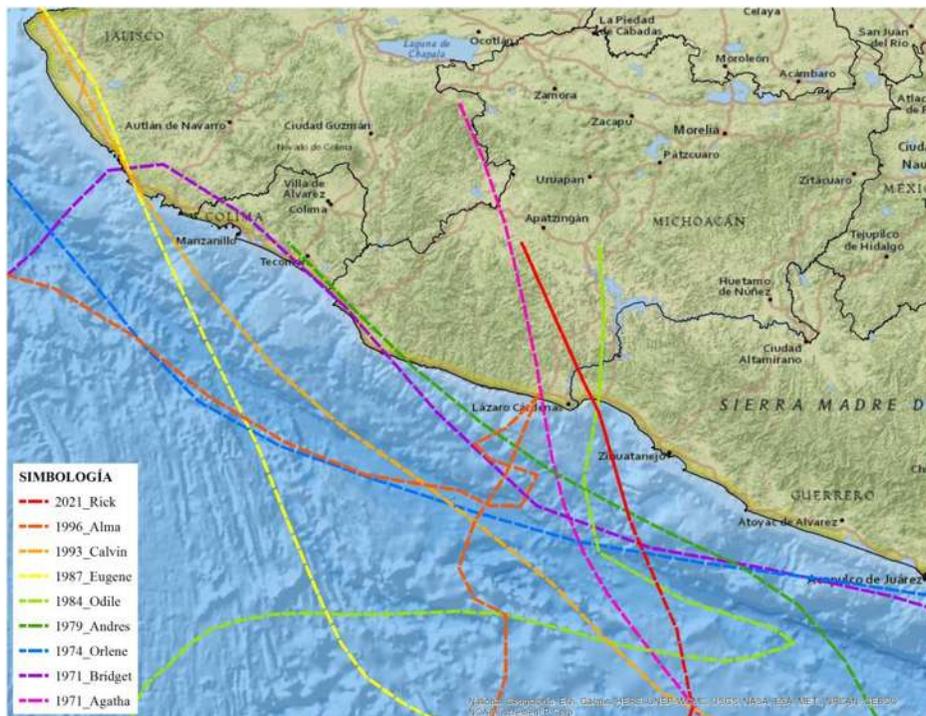
En la Figura 5.3 incisos a, b, c, d y e; se muestran las trayectorias de los ciclones tropicales por categoría TS, H1, H2, H3 y H4 respectivamente; ocurridos en el estado de Michoacán durante el periodo de 1945-2021.



a) Trayectoria de tormentas tropicales (TS).



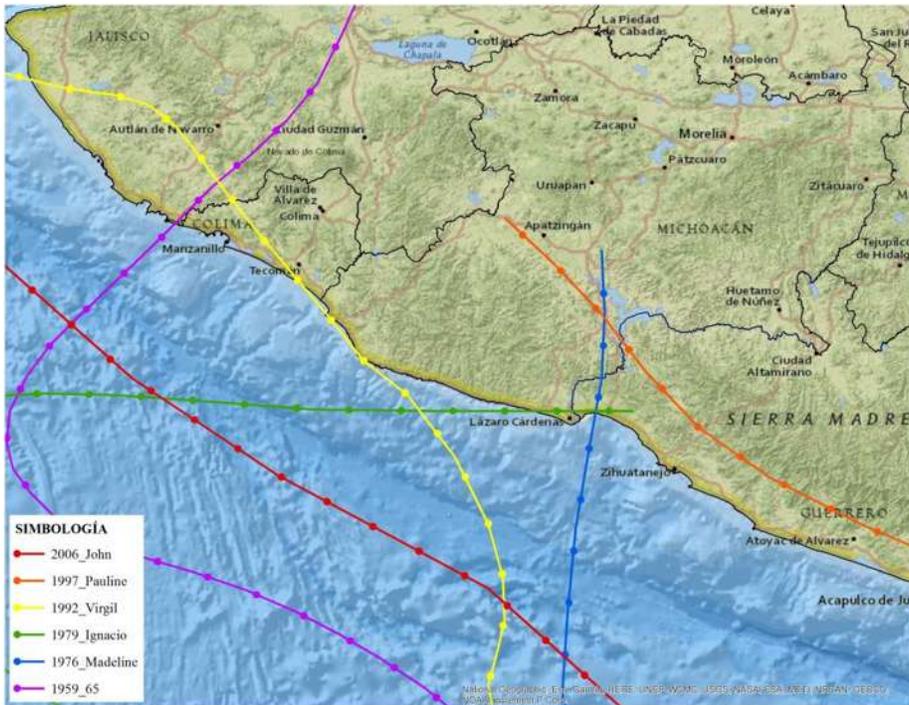
b) Trayectoria de huracanes categoría H1.



c) Trayectoria de huracanes categoría H2.



d) Trayectoria de huracanes categoría H3.



e) Trayectoria de huracanes categoría H4.

Figura 5.3 Trayectoria de ciclones tropicales en el estado de Michoacán (1945-2021).

De los 72 huracanes que afectaron el estado de Michoacán en el periodo 1945-2021, 26 huracanes tocaron tierra en el estado, representando el 36.11% del número total de ocurrencia de estos eventos. De entre ellos el 26.92% son tormentas tropicales (TS) y el 73.08% son de la categoría de huracanes (Figura 5.4).

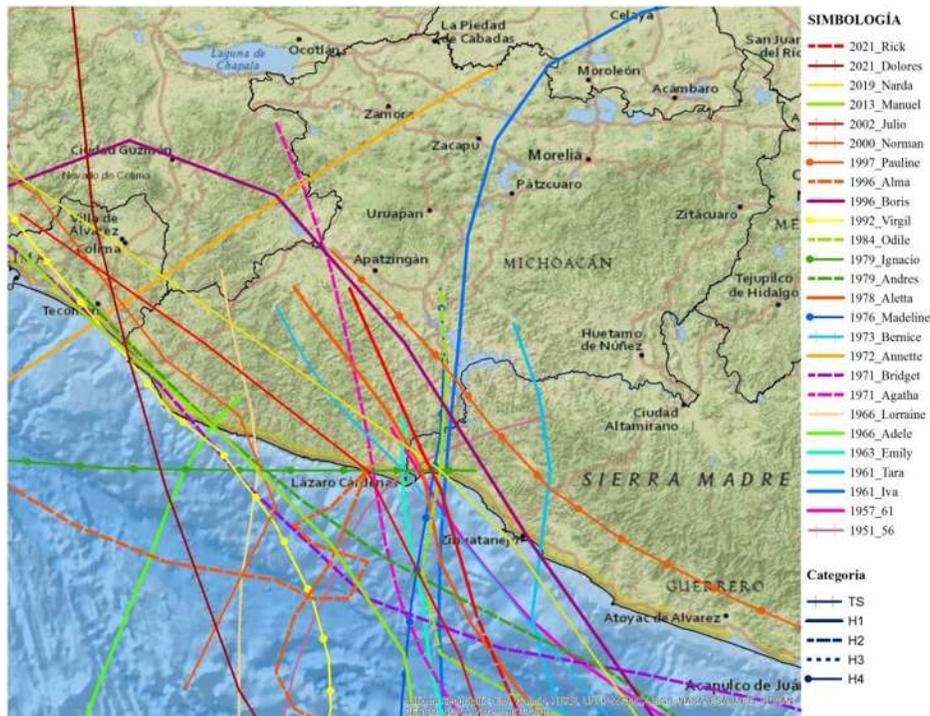


Figura 5.4 Ciclones tropicales que tocaron tierra en Michoacán (1945-2021).

En la Figura 5.5 se muestran el número de huracanes por año y categoría. En promedio, por año ha ocurrido un huracán. Se observa que en los últimos 10 años la frecuencia aumento con respecto del promedio anual.

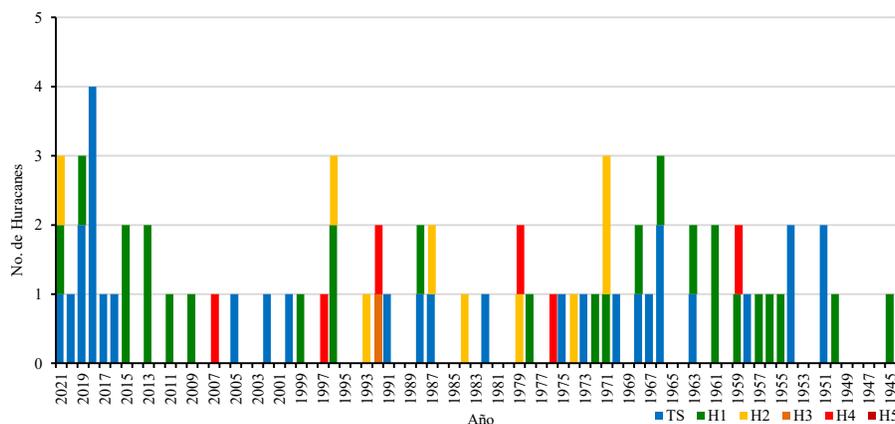


Figura 5.5 Ocurrencia de ciclones tropicales en el estado de Michoacán (1945-2021).

En la tabla 5.1 se muestran las características de los eventos ciclónicos que impactaron en el estado de Michoacán: nombre, fecha de ocurrencia, categoría, velocidad máxima sostenida del viento (promediada a un minuto, 10 minutos y tres segundos), y la presión mínima; resaltando aquellos huracanes que notablemente tocaron tierra en el estado. La base de datos utilizada para la obtención de las características de los ciclones tropicales que se muestran en la Tabla 5.1, es del NOAA en: <https://coast.noaa.gov/hurricanes/#map=4/32/-80> y <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2021&basin=epac>.

Los factores de conversión de velocidades máximas sostenidas promediada a 1min, 10 min y 3s; se utilizaron para conversión de unidades de velocidades de nodos (kts) a m/s el factor de 0.5144, para la conversión de un promediado de 1 min a 10 min se utilizó el factor de 0.88 y 0.67 para la conversión de un promediado de 10 min a 3 segundos; planteado por Bloemendaal *et al.* (2020).

Tabla 5.1 Característica principales de los ciclones tropicales ocurridos en el estado de Michoacán (1945-2021)

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad máxima				Presión (mb)
				1 min		10 min	3s	
				(kts)	(m/s)	(m/s)	(km/h)	
2021	Rick	22 Oct - 25 Oct	H2	90	46.30	40.74	218.90	977
2021	Enrique	25 Jun - 30 Jun	H1	80	41.15	36.21	194.58	972
2021	Dolores	18 Jun - 20 Jun	TS	60	30.86	27.16	145.94	989
2020	Julio	04 Sep -07 Sep	TS	40	20.58	18.11	97.29	1004
2019	Lorena	17 Sep - 22 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	985
2019	Narda	29 Sep -01 Oct	TS	45	23.15	20.37	109.45	997
2019	Priscilla	20 Oct -21 Oct	TS	40	20.58	18.11	97.29	1003
2018	Tara	14 Oct - 16 Oct	TS	55	28.29	24.90	133.77	995
2018	Ileana	04 Ago - 07 Ago	TS	55	28.29	24.90	133.77	998
2018	Carlotta	14 Jun - 18 Jun	TS	55	28.29	24.90	133.77	997
2018	Vicente	19 Oct -23 Oct	TS	45	23.15	20.37	109.45	1002
2017	Pilar	23 Sep - 25 Sep	TS	45	23.15	20.37	109.45	1000
2016	Javier	07 Ago -09 Ago	TS	55	28.29	24.90	133.77	997
2015	Carlos	10 Jul - 17 Jul	H1	80	41.15	36.21	194.58	978
2015	Marty	26 Sep - 30 Sep	H1	70	36.01	31.69	170.26	987
2013	Erick	04 Jul - 09 Jul	H1	70	36.01	31.69	170.26	983
2013	Manuel	13 Sep - 19 Sep	H1	65	33.44	29.42	158.10	983
2011	Beatriz	19 Jun - 22 Jun	H1	80	41.15	36.21	194.58	977
2009	Andrés	21 Jun -24 Jun	H1	70	36.01	31.69	170.26	984
2006	John	28 Ago - 04 Sep	H4	115	59.16	52.06	279.71	948
2005	Dora	04 Jul - 06 Jul	TS	40	20.58	18.11	97.29	1003

Tabla 5.1 Característica principales de los ciclones tropicales ocurridos en el estado de Michoacán (1945-2021), continuación.

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad máxima				Presión (mb)
				1 min		10 min	3s	
				(kts)	(m/s)	(m/s)	(km/h)	
2002	Julio	25 Sep - 26 Sep	TS	40	20.58	18.11	97.29	1000
2000	Norman	20 Sep - 22 Sep	TS	45	23.15	20.37	109.45	998
1999	Greg	05 Sep -09 Sep	H1	65	33.44	29.42	158.10	986
1997	Pauline	05 Oct -10 Oct	H4	115	59.16	52.06	279.71	948
1996	Alma	20 Jul - 27 Jul	H2	90	46.30	40.74	218.90	969
1996	Boris	27 Jun - 01 Jul	H1	80	41.15	36.21	194.58	979
1996	Herman	30 Sep - 4 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	980
1993	Calvin	04 Jul - 09 Jul	H2	95	48.87	43.00	231.07	966
1992	Virgil	01 Oct - 05 Oct	H4	115	59.16	52.06	279.71	948
1992	Winifred	06 Oct - 10 Oct	H3	100	51.44	45.27	243.23	960
1991	Ignacio	16 Sep - 19 Sep	TS	55	28.29	24.90	133.77	994
1988	Debby	31 Ago - 08 Sep	H1	65	33.44	29.42	158.10	987
1988	Aletta	16 Jun - 21 Jun	TS	60	30.86	27.16	145.94	992
1987	Eugene	22 Jul - 26 Jul	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1987	Irwin	03 Ago - 09 Ago	TS	55	28.29	24.90	133.77	-
1984	Odile	17 Sep - 23 Sep	H2	90	46.30	40.74	218.90	-
1982	Rosa	30 Sep - 06 Oct	TS	45	23.15	20.37	109.45	-
1979	Ignacio	23 Oct - 30 Oct	H4	125	64.30	56.58	304.03	938
1979	Andres	31 May - 04 Jun	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1978	Aletta	30 May - 01 Jun	H1	65	33.44	29.42	158.10	-
1976	Madeline	29 Sep - 08 Oct	H4	125	64.30	56.58	304.03	941
1975	Eleanor	10 Jul - 12 Jul	TS	35	18.00	15.84	85.13	-
1974	Orlene	21 Sep - 24 Sep	H2	95	48.87	43.00	231.07	993
1973	Bernice	22 Jun - 23 Jun	TS	60	30.86	27.16	145.94	-
1972	Annette	01 Jun - 08 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	993
1971	Bridget	14 Jun - 20 Jun	H2	85	43.72	38.48	206.74	-
1971	Agatha	21 May - 25 May	H2	85	43.72	38.48	206.74	972
1971	Lily	28 Ago - 01 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1970	Eileen	26 Jun - 30 Jun	TS	40	20.58	18.11	97.29	-
1968	Rebecca	06 Oct - 11 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1968	Annette	20 Jun -22Jun	TS	45	23.15	20.37	109.45	-
1967	Bridget	16-jun	TS	40	20.58	18.11	97.29	-
1966	Adele	20 Jun - 24 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1966	Maggie	16 Oct - 19 Oct	TS	45	23.15	20.37	109.45	-

Tabla 5.1 Característica principales de los ciclones tropicales ocurridos en el estado de Michoacán (1945-2021), continuación.

Año	Nombre	Fecha	Categoría	Velocidad máxima				Presión (mb)
				1 min		10 min (m/s)	3s (km/h)	
				(kts)	(m/s)			
1966	Lorraine	04 Oct - 05 Oct	TS	45	23.15	20.37	109.45	-
1963	Emily	29 Jun - 30 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1963	Lillian	24 Sep - 29 Sep	TS	45	23.15	20.37	109.45	-
1961	Tara	10 Nov - 12 Nov	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1961	Iva	09 Jun - 12 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1959	1959296N12265	22 Oct - 28 Oct	H4	120	61.73	54.32	291.87	958
1959	1959247N13266	04 Sep - 11 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1958	1958208N16260	26 Jul - 30 Jul	TS	45	23.15	20.37	109.45	-
1957	1957260N15261	17 Sep - 18 Sep	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1956	1956165N13263	12 Jun - 14 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1955	1955289N15256	15 Oct - 16 Oct	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1954	1954264N17256	21 Sep - 27 Sep	TS	45	23.15	20.37	109.45	-
1954	1954169N13267	18 Jun - 22 Jun	TS	45	23.15	20.37	109.45	-
1951	1951178N17259	26 Jun - 27 Jun	TS	45	23.15	20.37	109.45	-
1951	1951138N11256	17 May - 21 May	TS	45	23.15	20.37	109.45	-
1950	1950166N14262	14 Jun - 19 Jun	H1	75	38.58	33.95	182.42	-
1945	1945275N16279	02 Oct - 07 Oct	H1	80	41.15	36.21	194.58	982

Los huracanes que alcanzaron una velocidad máxima sostenida de 200 km/h y que además tocaron tierra son los huracanes Ignacio (1979) y Madeline (1976), clasificados como categoría H4 de la escala de Saffir Simpson.

Los municipios del estado de Michoacán que han sido más afectados por los eventos ciclónicos debido a que son parte de la costa de la república mexicana son: Aquila, Coahuayana y Lázaro Cárdenas. Los meses de junio, septiembre y octubre son los meses en los que han ocurrido la mayoría de los eventos, con una frecuencia del 27.78%, 26.39% y 19.44% respectivamente; el 5.56%, 11.11%, 8.33% y el 1.39% son el porcentaje de ocurrencia de huracanes de los meses de mayo, julio, agosto y noviembre respectivamente.

5.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE TORNADOS EN MÉXICO

Los tornados son fenómenos meteorológicos perteneciente a la clasificación de tormentas severas. El NOAA lo describe como un fenómeno terrestre, ya que el calentamiento solar de la superficie terrestre generalmente contribuye al desarrollo de la tormenta eléctrica que

genera el vórtice. Los tornados requieren de un cambio de velocidades y de dirección del viento con la altura, para proporcionar las condiciones ideales de la formación del tornado.

En la base de datos de la Comisión Interinstitucional para el Análisis de Tornados y Tormentas Severas (CIATTS), de Información Meteorológica y Sísmica de México (METMEX) y medios de comunicación vía internet. En el estado de Michoacán se han registrado la ocurrencia de 10 tornados a partir del año 2000, la distribución de los eventos se muestra en la Figura 5.6.

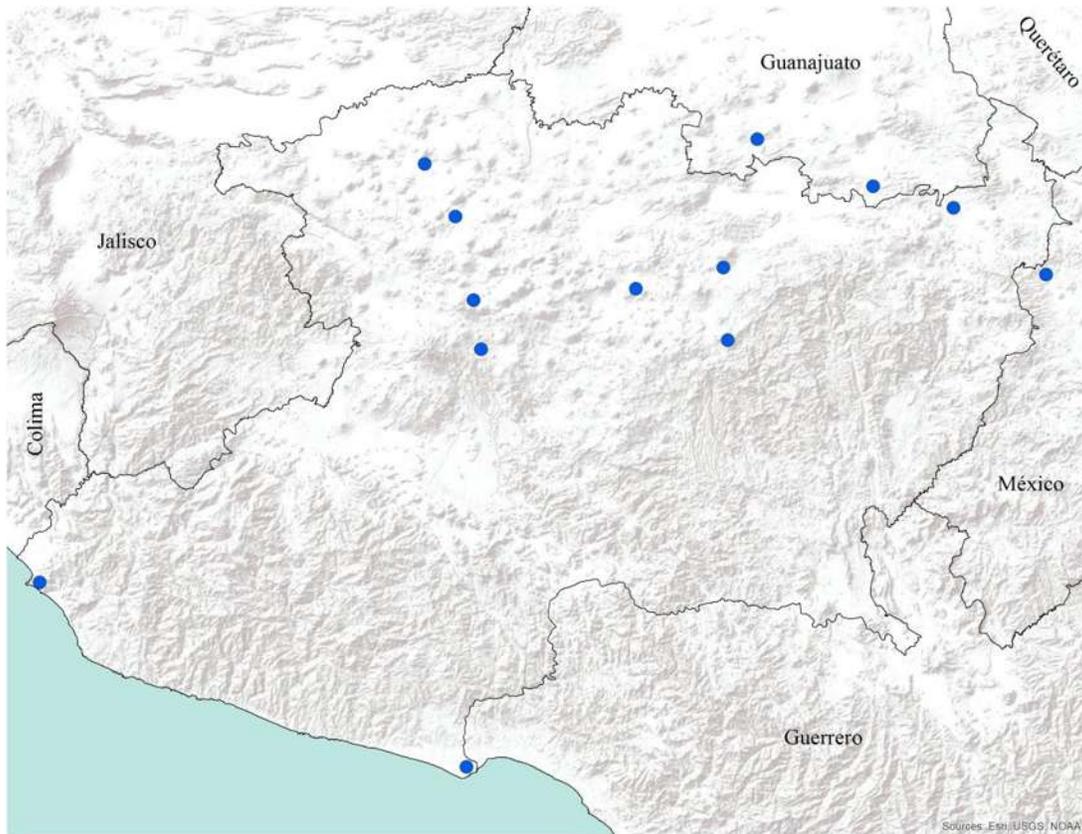


Figura 5.6 Tornados registrados en el estado de Michoacán (2000-2021).

De los eventos tornádicos que se han registrado en el estado, los más conocidos son el caso del tornado en el municipio de Tzintzuntzan (2006), Tangancícuaro Michoacán (2014), Nuevo Parangaricutiro (2015) y el más actual en Morelia Michoacán (2019). En México existe un reto impresionante al querer realizar registros de eventos tornádicos, ya que aún no se tiene la instrumentación y los avances tecnológicos para este tipo de instrumentación no se han visualizado para registrar las características de este tipo de eventos o para una temprana prevención a la población. Por lo que la mayoría de los registros son de fuentes que han registrado los daños generados, también basados en fotografías de la formación del tornado y testimonios que han presenciado los eventos.

5.4. VELOCIDADES REGIONALES EN MICHOACÁN, V_R

El estado de Michoacán está conformado por 113 municipios. Para el análisis de velocidades regionales (VR) se obtuvieron las coordenadas de cada municipio del estado de la base de datos del INEGI, para así, con el programa de Sistema Viento V.2.0 de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), obtener las velocidades regionales por periodo de retorno (T) de 10, 50 y 200 años.

El lapso de promediado es el intervalo de tiempo que se selecciona para determinar la velocidad máxima promedio. La relación entre la velocidad máxima promediada sobre un lapso t_1 , y otra promediada sobre un lapso mayor t_2 , se denomina factor de ráfaga (g). Tomando en cuenta que las velocidades regionales que se obtienen del programa están promediadas a 3s y se considera el factor de corrección por temperatura y altura con respecto al nivel del mar (G), se realizaron los siguientes pasos para obtener las velocidades regionales requeridas.

- Paso 1. Con la base de datos del INEGI se obtuvo la longitud, altitud y elevación de cada municipio del estado de Michoacán. Ejemplo Acuitzio Michoacán está localizado con las coordenadas de latitud 19.50° , longitud -101.33° y altitud 2227 msnm.
- Paso 2. Con la ayuda del programa de Sistema Viento V.2.0 de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), para cualquier tipo de estructuras, utilizando las coordenadas de cada municipio, se determinó la velocidad para cada periodo de retorno (T) de 10, 50 y 200 años. Por ejemplo, para las coordenadas de Acuitzio Michoacán se determinaron las velocidades de 93.90, 109.27 y 121.56 km/h, para los periodos de retorno de 10, 50 y 200 años respectivamente.
- Paso 3. Dado que el factor de ráfaga (g) permite transformar las velocidades asociadas a un tiempo de promediado de tres segundos a velocidades con un tiempo de promediado de 10 minutos, la V_R obtenida del programa se transforman a un tiempo de promediado de 10 minutos. Citando la curva de Durst (proveniente de un análisis estadístico de datos obtenidos de vientos fuertes) mostrada en la Figura 5.7, se obtienen los factores de ráfaga de 3 segundos y 10 minutos (600 segundos).

$$g\left(\frac{V_3}{V_{3600}}\right) = 1.52 \quad g\left(\frac{V_{600}}{V_{3600}}\right) = 1.07$$

La relación entre estos dos valores da como resultado el factor de conversión requerido.

$$\frac{V_3}{V_{60}} = \frac{1.52}{1.07} = 1.42$$

Esto quiere decir que, la velocidad de ráfaga de tres segundos será 1.42 veces mayor que la velocidad de ráfaga de 10 minutos (Castillo y Johanning, 2016).

$$V_3 = 1.42V_{600} \quad \therefore V_{600} = \frac{V_3}{1.42}$$

Realizando operaciones con el ejemplo de Acuitzio Michoacán, se obtienen los valores de 66.127, 76.951 y 85.606 km/h, para los periodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 años sucesivamente.

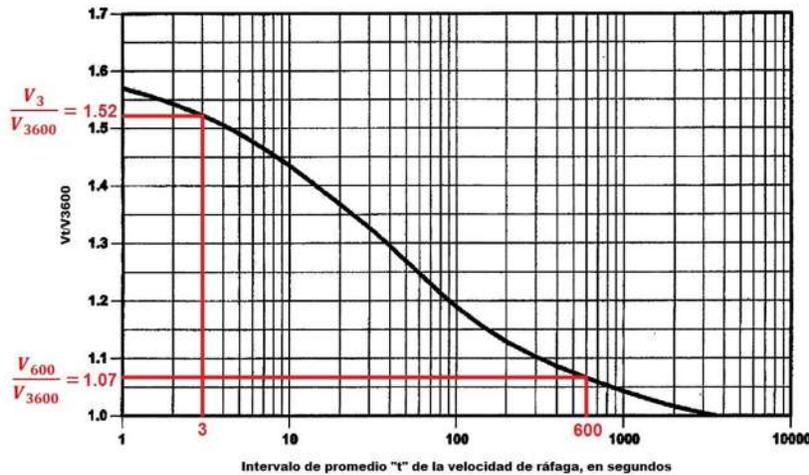


Figura 5.7 Curva Durst, relación de velocidades de ráfaga con intervalos de promediado diferentes.

- Paso 4. Para obtener el valor del factor de corrección G, se utiliza la Ecuación 5.1 descrita en el MDOC 2020 (pag. 164) de la sección de comentarios.

$$G = \frac{8 + h_m}{8 + 2h_m} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

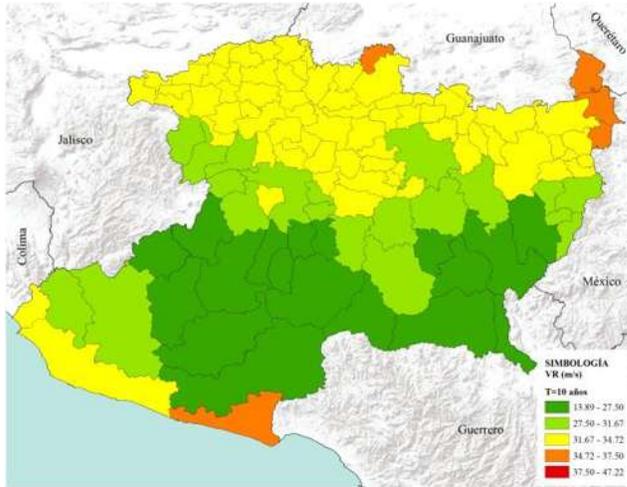
Dónde:

h_m = altitud en metros sobre el nivel del mar.

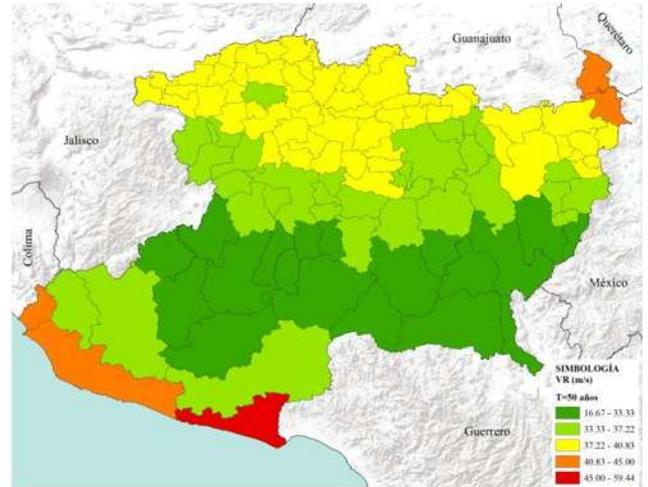
Este factor varía según la altura del terreno, a menor altura el valor de G se acerca a la unidad. Es decir que en los lugares cercanos a la costa el valor de G es igual a la unidad. Para el ejemplo de Acuitzio Michoacán con una altura de 2227 msnm, se obtiene un valor de $G = 0.821$.

- Paso 5. Ya que la V_R obtenida del programa considera el valor de G, para no considerar este factor se realizó una relación de la V_R y el valor de corrección G. Para el ejemplo se obtienen los resultados de 80.526, 93.707 y 104.247 para los periodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 años respectivamente, utilizando la V_R promediada a 10 minutos. Y por último se convertirá de unidades de km/h a m/s.

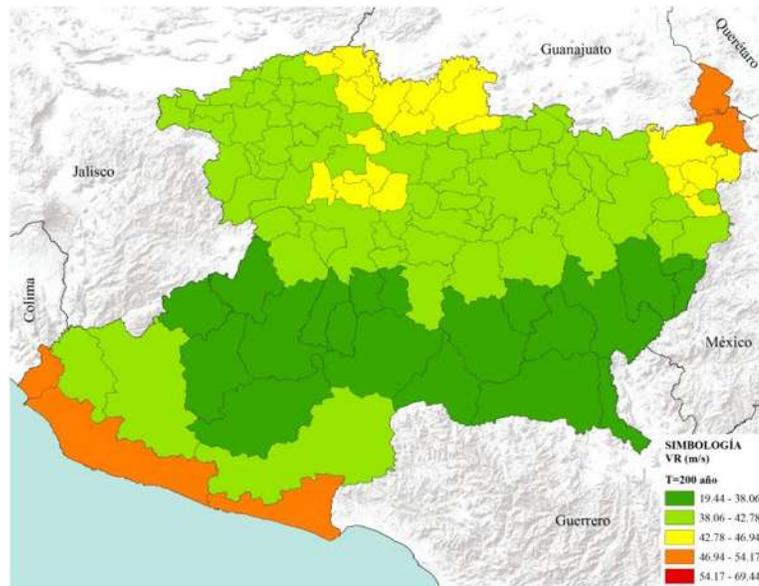
En las Figura 5.8 y 5.9 se muestran las V_R promediadas a 3 segundos y 10 minutos consecutivamente, sin la consideración del factor de corrección (G), para cada período de retorno (T), se utilizaron los mismos colores que en los mapas de isoyetas del MDOC con los límites afectados por la unidad en m/s.



a) T = 10 años.



b) T = 50 años.

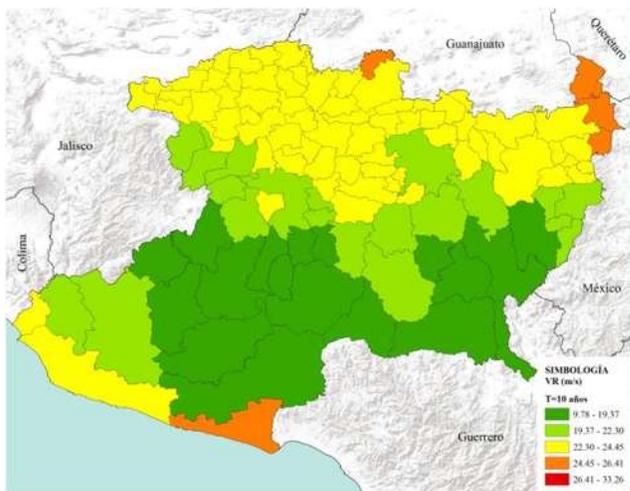


c) T = 200 años.

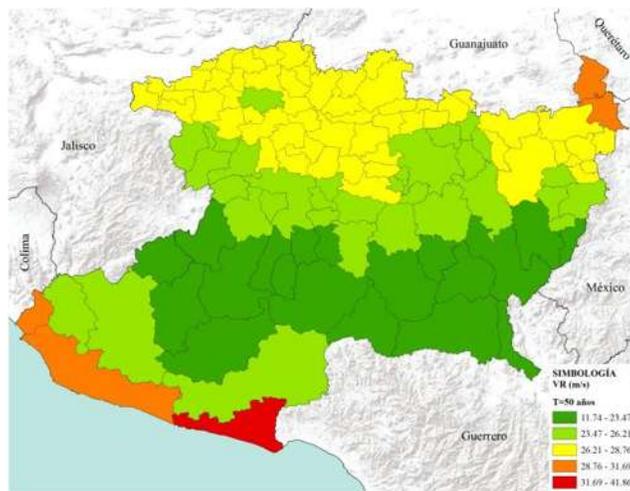
Figura 5.8 V_R para el estado de Michoacán, en m/s promediado a 3 segundos.

En la Figura 5.8 se observa que las velocidades regionales para los tres periodos de retorno son mayores en los extremos de la costa de la República Mexicana, municipios de Aquila, Coahuayana y Lázaro Cárdenas; así como también en el extremo del centro del país, es decir,

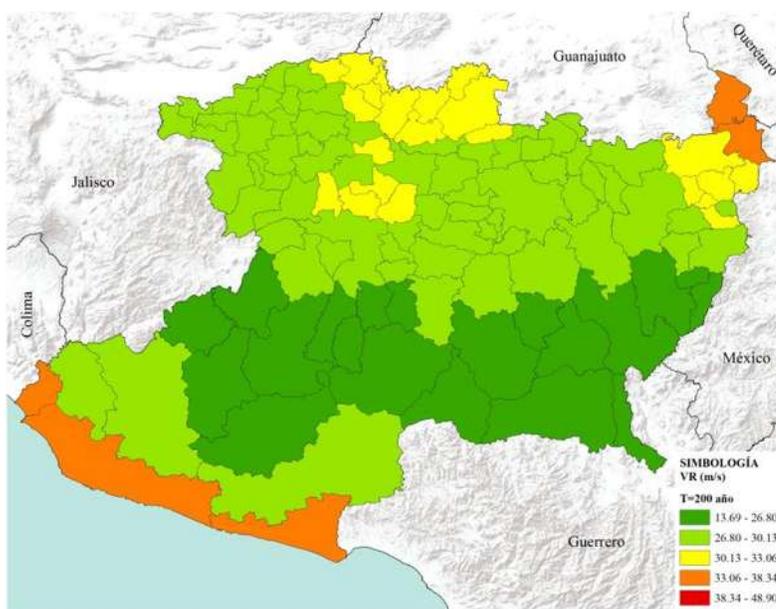
en los límites de Guanajuato y Querétaro. Mientras que en el centro del estado se muestran velocidades bajas.



a) T = 10 años.



b) T = 50 años.

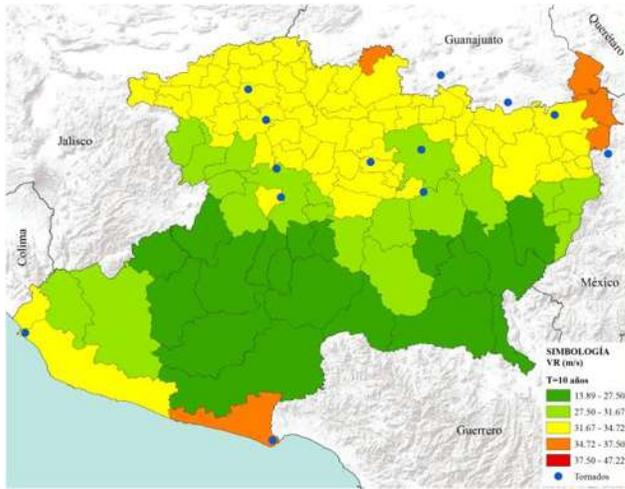


c) T = 200 años.

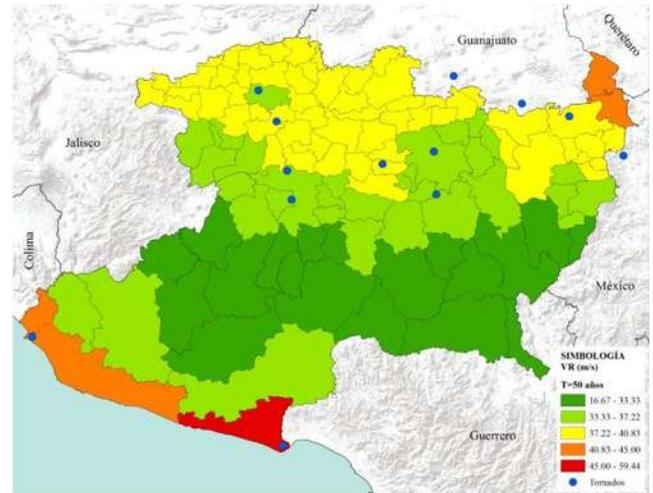
Figura 5.9 V_R para el estado de Michoacán, en m/s promediado a 10 minutos.

De acuerdo a los fenómenos meteorológicos que se han presentado, se puede decir que los municipios más afectados por los ciclones tropicales son los de la costa de Michoacán en los municipios de Aquila, Coahuayana y Lázaro Cárdenas, pero los municipios afectados por la presencia de eventos tornádicos son los de la parte norte y sur del estado, a como se muestra en la Figura 5.10; en la cual se observa que en los estados dónde se presentaron tornados, las

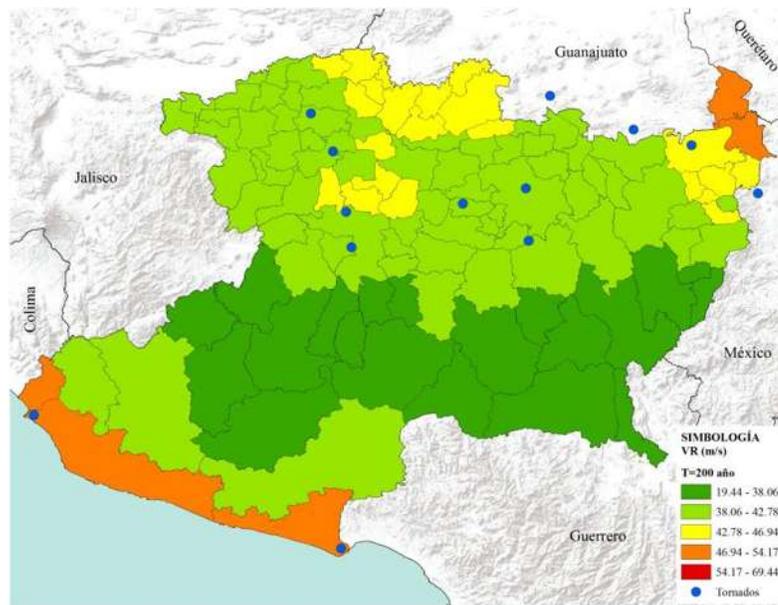
velocidades regionales propuestas por el MDOC son velocidades medias y bajas coloreadas en amarillo y verde bajo, para los períodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 años.



a) T = 10 años.



b) T = 50 años.

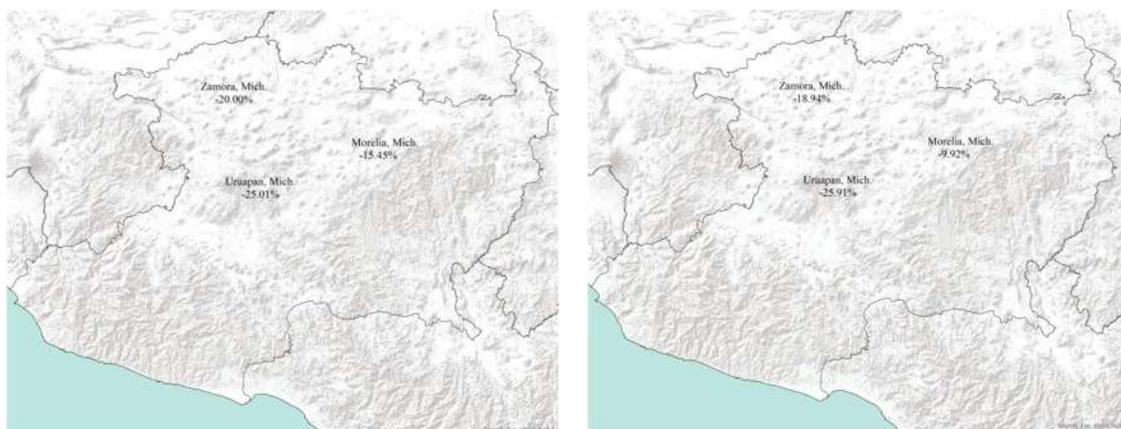


c) T = 200 años.

Figura 5.10 V_R para el estado de Michoacán, en m/s promediado a 3 segundos.

5.4.1. Comparación de V_R de los MDOC

Realizando comparaciones de velocidades regionales (V_R) que presentan los MDOC del 2008-2020 de las principales ciudades del estado de Michoacán, se encontraron decrementos mayores al 10% de V_R para los períodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 en las ciudades de Morelia, Uruapan y Zamora (Figura 5.11).



a) T = 10 años.

b) T = 50 años.



c) T = 200 años.

Figura 5.11 Decremento (%) de V_R de MDOC 2008-2020.

De las cuales se observó que son ciudades en las que se han presentado fuertes vientos por la presencia de tornados y ciclones tropicales que han tocado tierra cuya trayectoria se acerca a estas ciudades como en el caso de: Iva (1961), Agatha (1971), Madeline (1976), Aletta (1978), Odile (1984), Debby (1988), Boris (1996), Pauline (1997) y Rick (2021).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (AOML). (2022). Hurricanes vs. Tornadoes. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA). <https://www.aoml.noaa.gov/hrd-faq/>

Castillo Barahona, R., y Johanning Cordero, D. (2016). Medición del viento y su aplicación en la ingeniería estructural.

Comisión Interinstitucional para el Análisis de Tornados y Tormentas Severas (CIATTS). (2022). Base de Datos. <https://ciatts.ciesas.edu.mx/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017. Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2017.

Información Meteorológica y Sísmica de México (METMEX). 2021. Reporte de Fenómenos Meteorológicos. <https://metmex.net/reportes-de-fenomenos-meteorologicos/>

Manual de Diseño de Obras Civiles (1193).

Manual de Diseño de Obras Civiles (2008).

Manual de Diseño de Obras Civiles (2020).

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA). Historical Hurricane Tracks. <https://coast.noaa.gov/hurricanes/#map=4/32/-80>

National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center (NHC). Tropical cyclone reports. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA). <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2021&basin=atl>

CAPÍTULO 6

LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA (FVTM) COMO ZONA EÓLICA DE ESTUDIO

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) se define como un arco magmático continental, construido por cerca de 8000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos, que se extienden desde las costas del Pacífico, en San Blás, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz. La provincia tiene aproximadamente 1000 km de longitud y una amplitud irregular entre los 80 y 230 km, y se distribuye con una dirección preferencial E-W en su parte central y oriental, WNW-ESE en su parte occidental, formando un ángulo cercano a los 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana. Esta característica ha dado lugar a que la provincia reciba el nombre de FVTM (Gómez *et al.*, 2005).

La FVTM constituye uno de los arcos volcánicos más complejos y variados de la región circum-Pacífica. Entre los cuales se encuentran:

- La gran variabilidad del estilo volcánico y composición química a lo largo del arco.
- La presencia de un volcanismo alcalino de tipo intraplaca, asociado al volcanismo dominante relacionado con la subducción.
- La oblicuidad de su parte central y oriental con la trinchera.
- La notable variación del ancho del arco.

La Faja Volcánica Transmexicana es una zona de alto riesgo geológico, esto por la gran variabilidad de actividad volcánica y dado que está rodeado de un sistema de fallas geológicas que afectan la zona volcánica por los eventos sísmicos de subducción (Ferrari, 2000); es de suma importancia realizar un estudio histórico de los fenómenos naturales que han ocurrido en la FVTM ya que además concentra a la mayor parte de la población e infraestructura del país (Gómez *et al.*, 2005). Aparte de los fenómenos geológicos por la que se caracteriza esta provincia, se han encontrado fenómenos meteorológicos de tornados que representan un valor importante de estudio para la FVTM.

Con la ayuda de la base de datos del INEGI, se descargó el archivo tipo shape de las provincias fisiográficas, de las cuales en el programa ArcGis 10.6 se extrajo únicamente la zona de estudio para éste capítulo que se refiere a la FVTM.

EL Eje Neovolcánico comprende los estados de Nayarit, Colima, Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, México, Puebla, Veracruz de Ignacio de la Llave, Tlaxcala, Morelos, Ciudad de México, Michoacán de Ocampo, Guerrero, Oaxaca y Zacatecas.

6.1. ACTIVIDAD VOLCÁNICA

Un volcán se define como una estructura en forma de loma o montaña que se construye alrededor de la abertura por la acumulación de material magmático o sus derivados que salen de ella. Cuando el sitio de salida no es aproximadamente circular, como en el caso de una fisura, el volcán puede tomar una forma diferente a la cónica. Los cráteres son las grandes cavidades en forma aproximadamente circular que tiene el volcán en su cumbre o costado.

Hay dos tipos de volcanes, los llamados poligenéticos o centrales que son los que se forman por la acumulación de materiales emitidos por varias erupciones a lo largo del tiempo geológico; y los monogenéticos los cuales nacen, desarrollan una erupción que puede durar algunos años y se extinguen sin volver a tener actividad, en ocasiones, en lugar de ocurrir otra erupción en ese volcán, puede nacer otro volcán similar en la misma región. En la Figura 6.1 se muestra el Volcán Popocatepetl, que es un ejemplo del tipo de volcán poligenético.



Figura 6.1 Volcán Popocatepetl
(<https://www.nationalgeographic.com.es/temas/volcanes/fotos>).

Un volcán es activo, cuando existe magma fundido en su interior, o cuando puede recibir nuevas aportaciones de magma y por tanto mantiene el potencial de producir erupciones. Estos se distribuyen por diferentes regiones definidas por los procesos tectónicos de escala global, como las interacciones de las placas tectónicas que conforman la corteza y las corrientes convectivas del manto terrestre que las mueven (Cruz, 2021).

La mayor concentración de volcanes en la República Mexicana se encuentra en la FVTM, que es un arco volcánico originado por la subducción de las placas de Rivera y Cocos, por debajo de la placa de Norteamérica en la trinchera Mesoamericana (SIGPOT, 2013).

Algunos de los volcanes ubicados en la FVTM que han marcado la historia de México debido a la erupción que generaron se muestran en la Tabla 6.1, por fecha de erupción del volcán y en la columna de fecha de erupción, aparece en paréntesis el número de erupciones del volcán en dicho año.

Tabla 6.1 Activación volcánica en el tiempo histórico de México.

Fecha	Nombre del Volcán	Estado
2015	Volcán de Fuego de Colima	Colima
2013	Volcán de Fuego de Colima	Colima
2005	Volcán de Fuego de Colima	Colima
2000	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1999	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1998	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1998	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1997	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1997	Volcán de Fuego de Colima	Colima
1995	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1994 (2)	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1994	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1993	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1991 (3)	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1987	Volcán de Fuego de Colima	Colima
1983	Volcán de Fuego de Colima	Colima
1960	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1957	Volcán de Fuego de Colima	Colima
1953	Bárcena	Archipiélago de Revillagigedo, Col.
1952	Bárcena	Archipiélago de Revillagigedo, Col.
1943	Paricutín	Michoacán
1941	Volcán de Fuego de Colima	Colima
1932	Volcán de Fuego de Colima	Colima
1927	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1919	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1913	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1909	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1908	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima

Tabla 6.1 Activación volcánica en el tiempo histórico de México, continuación.

Fecha	Nombre del Volcán	Estado
1903 (2)	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1893	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1891	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1890	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1889	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1886	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1875	Ceboruco	Nayarit
1872	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1870 (2)	Ceboruco	Nayarit
1869	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1867	Pico de Orizaba	Puebla-Veracruz
1864	Pico de Orizaba	Puebla-Veracruz
1859	Sangangüey	Nayarit
1847	Pico de Orizaba	Veracruz
1846	Pico de Orizaba	Puebla-Veracruz
1818	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1806	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1775	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1771	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1742	Sangangüey	Nayarit
1720	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1697	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1690	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1687	Pico de Orizaba	Puebla-Veracruz
1622	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1613	Pico de Orizaba	Puebla-Veracruz
1611	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1606 (2)	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1592	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1590	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1589	Pico de Orizaba	Puebla-Veracruz
1585	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1576	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1571	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1569	Pico de Orizaba	Puebla-Veracruz
1566	Pico de Orizaba	Puebla-Veracruz
1560	Volcán de Fuego de Colima	Jalisco - Colima
1548	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México

Tabla 6.1 Activación volcánica en el tiempo histórico de México, continuación.

Fecha	Nombre del Volcán	Estado
1545	Pico de Orizaba	Puebla-Veracruz
1540	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1539	Pico de Orizaba	Puebla-Veracruz
1539	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1533	Pico de Orizaba	Puebla-Veracruz
1530	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1528	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1518	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1512	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1509	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1363	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1354	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1347	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1100 D.C.	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
1000 D.C.	Ceboruco	Nayarit
700 D.C.	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
200 A.C.	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
800 A.C.	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
2800 A.C.	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México
3200 A.C.	Popocatepetl	Puebla, Morelos y México

A partir del año 1800 se muestra la actividad volcánica más frecuente, el volcán Popocatepetl y el volcán de Fuego de Colima son los volcanes que frecuentemente participan de erupción volcánica.

En la Figura 6.2 se muestra la ubicación de los volcanes existentes en la FVTM dónde: Por = Volcán Pico de Orizaba, PO = Volcán Popocatepetl, Iz = Volcán Iztaccíhuatl, NT = Volcán Nevado de Toluca, SN = Sierra Negra, LM = Volcán Malinche, NC = Volcán Nevado de Colima, CP = Volcán Cofre de Perote, VT = Volcán Tacaná, CT = Cerro Telapón, CA = Cerro el Ajusco, CJ = Cerro Jocotitlán, CM = Cerro el Mirador, TA = Volcán Tancítaro, CO = Volcán de Fuego de Colima, CC = Cerro Catedral, MO = Cerro el Morro, SR = Cerro San Rafael, CPO = Cerro Potosí, VT = Volcán Tláloc, CN = Cerro la Nieve, ZA = Cerro el Zamorano, PÑ = Cerro la Peña Nado, GA = Cerro grande de la Ascensión, SE = Sierra el Epazote, PI = Cerro la Pingüica, NO = Cerro la Nopalera, OS = Cerro el Oso, LN = Las Navajas, SA = Sangangüey, SJ = San Juan, CB = Ceboruco, TQ = Tequila, PH = Palo Huérfano y HO = La Joya. Como se observa, la mayoría de los volcanes se encuentran en la zona centro-este de la FVTM.

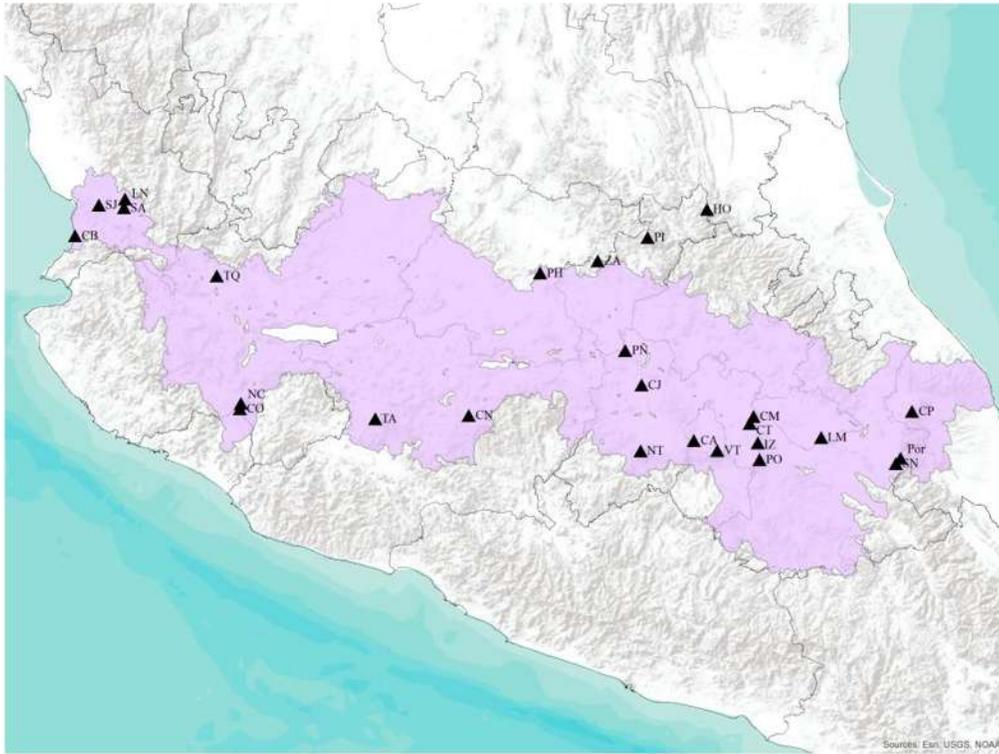


Figura 6.2 Localización de volcanes en la FVTM.

6.2. ACTIVIDAD SÍSMICA

Los sismos son vibraciones en la tierra ocasionadas por la propagación, en el interior o en la superficie de ésta, de varios tipos de ondas elásticas. La energía que originan las ondas proviene de una fuente sísmica.

Los epicentros de la mayor parte de los terremotos de gran magnitud (mayores a 7), que ocasionan grandes daños, se ubican en la costa del Pacífico, a lo largo de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas (Gutiérrez, 2014).

La base de datos utilizada para la obtención de los registros que han ocurrido en la FVTM es la de International Seismological Center (ISC), la U.S. Geological Survey (USGC), y el Servicio Sismológico Nacional (SSN), de los cuales se obtuvieron aproximadamente 7500 registros, registro del período de 1900-2021, con una profundidad de máximo 33km. Los cuales se muestran en la Figura 6.4.

Los registros que han marcado historia a lo largo de los años ubicados en la FVTM, con una magnitud mayor a 6 se muestran en la Figura 6.3, donde se especifica sus características.



Figura 6.3 Sismos ocurridos en la FVTM con $M_w > 6$.

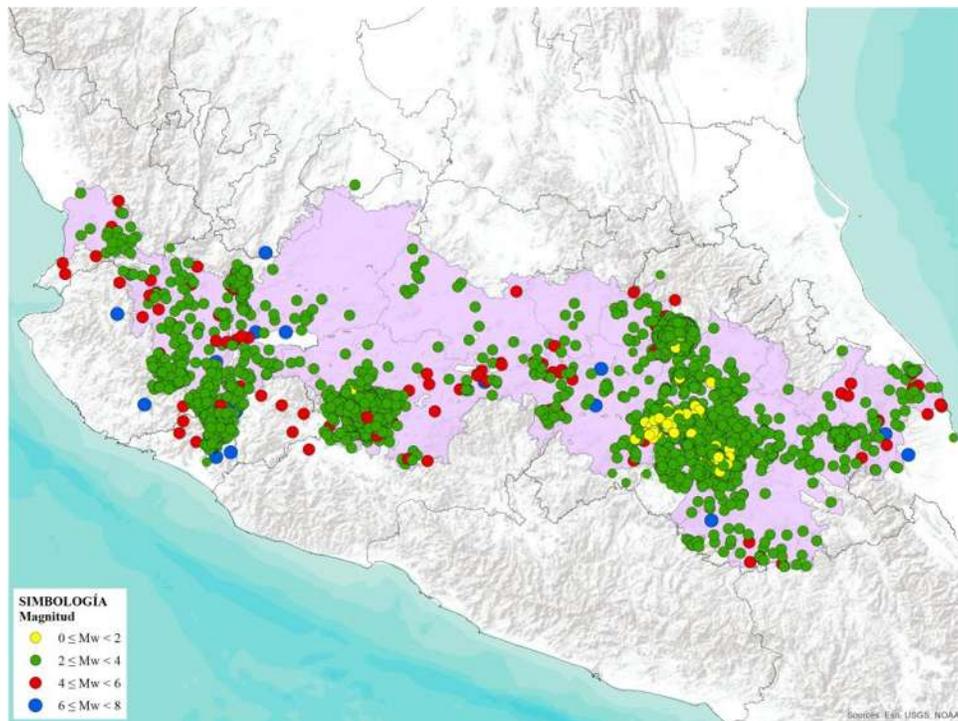


Figura 6.4 Actividad sísmica en la FVTM (1900-2021).

6.3. ACTIVIDAD TORNÁDICA

Los eventos volcánicos y sísmicos son muy comunes en la FVTM por el tipo de orografía que existe en esta zona; pero, existen otro tipo de fenómenos que en los últimos años se han manifestado con mayor intensidad, los tornados.

Un tornado es la perturbación atmosférica más violenta en forma de vórtice, el cual aparece en la base de una nube de tipo cumuliforme, resultado de una gran inestabilidad, provocada por un fuerte descenso de la presión en el centro del fenómeno y fuertes vientos que circulan en forma ciclónica alrededor de éste.

Lamentablemente la insuficiencia de medidas preventivas ante la presencia de los eventos tornádicos y el bajo nivel del manejo de sistemas de alerta temprana, nos llevan a diversos factores devastadores de afectación en el país tanto a la población como la economía del país. Los desastres naturales que han causado son de suma importancia, debido al gran número de pérdidas humanas y materiales, al daño en la infraestructura productiva y social.

En Figura 6.5, se muestran los tornados que han ocurrido durante el período 1521-2021. Debido a que en el país no tenemos la instrumentación necesaria para conocer las características reales del evento, no se tiene una base de datos muy sólida, por lo que algunos de los tornados localizados, no se tiene la fecha exacta de ocurrencia, ni la velocidad del viento o la trayectoria.

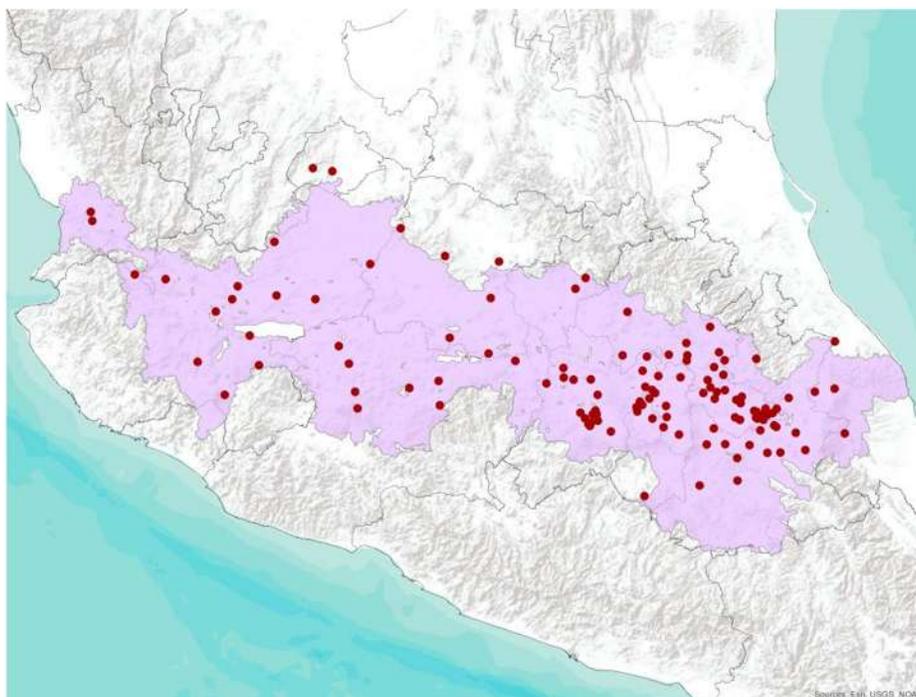


Figura 6.5 Actividad tornádica en la FVTM (1950-2021).

La base de datos utilizada para la realización de la ubicación de los eventos tornádicos es la del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), la base de datos de Información Meteorológica y Sísmica de México (METMEX) y, la Comisión Interinstitucional para el Análisis de Tornados y Tormentas Severas (CIATTS), aunque también se utilizó información de páginas noticieras vía internet. En un total se registraron 301 eventos en la República Mexicana, de los cuáles el 120 se encuentran en la FVTM que representan el 40%, y de éste sólo el 48% se tiene información sólida de ocurrencia. En la siguiente tabla se muestran solamente aquellos tornados que han ocurrido en la FVTM y que se tiene la fecha y lugar de ocurrencia del evento.

Tabla 6.2 Eventos tornádicos en la FVTM.

No.	Latitud	Longitud	Fecha	Localización
1	20.424	-103.601	06/08/2020	Acatlán de Juárez, Jalisco
2	19.809	-99.148	29/07/2020	San Juan Zitlaltepec, Estado de México
3	19.867	-103.150	28/07/2020	Concepción de Buenos Aires, Jalisco
4	19.588	-97.352	28/07/2020	Perote, Frijol Colorado, Veracruz
5	18.983	-97.450	10/05/2020	Ciudad Serdán, Puebla
6	19.933	-97.961	08/05/2020	Zacatlán, Puebla
7	19.162	-97.548	01/05/2020	San Nicolás Buenos Aires, Puebla
8	20.811	-104.447	30/04/2020	Amatlán de Cañas, Nayarit
9	20.568	-100.732	27/04/2020	Apaseo el Grande, Guanajuato
10	19.526	-97.625	25/04/2020	San Andrés Payuca, Puebla
11	19.353	-99.628	22/04/2020	San Andrés Cuexcontitlán, Estado de México
12	19.311	-97.950	20/04/2020	Huamantla, Tlaxcala
13	19.241	-97.777	20/04/2020	San José Chiapa, Puebla
14	19.975	-98.874	18/04/2020	Zapotlán de Juárez, Hidalgo
15	19.704	-101.276	2019	Morelia, Michoacán
16	19.556	-99.616	07/02/2018	Jiquipilco, Estado de México
17	19.289	-99.614	07/08/2017	Toluca de Lerdo, Edo. De México
18	20.665	-99.849	06/08/2017	Cadereyta de Montes, Querétaro
19	21.465	-104.905	18/07/2017	Xalisco, Nayarit
20	19.957	-99.103	29/06/2017	Tequixquiac, Edo. De México
21	19.621	-97.146	16/06/2017	Las Vigas de Ramírez, Veracruz
22	19.208	-98.406	30/05/2017	Huejotzingo, Puebla
23	19.395	-99.641	17/05/2017	Toluca de Lerdo, Edo. De México
24	19.354	-99.668	17/05/2017	Toluca de Lerdo, Edo. De México
25	19.142	-98.769	01/05/2017	Amecameca de Juárez, Edo. De México
26	19.578	-98.516	26/03/2017	Calpilalpan, Tlaxcala
27	19.901	-103.791	03/08/2016	Tapalpa, Jalisco
28	19.323	-98.182	27/05/2016	Chiautempan, Tlaxcala

Tabla 6.2 Eventos tornádicos en la FVTM, continuación.

No.	Latitud	Longitud	Fecha	Localización
29	19.233	-99.697	24/05/2016	Toluca de Lerdo, Edo. De México
30	19.919	-98.292	21/04/2016	Cuautepec de Hinojosa, Hidalgo
31	19.678	-100.151	23/03/2016	San José del Rincón, Edo. De México
32	19.752	-98.982	07/07/1905	Jiquipilco e Ixtlahuaca, Estado de México
33	19.224	-97.751	10/09/2015	San José Chiapa, Puebla
34	19.417	-102.122	10/09/2015	Nuevo Parangaricutiro, Michoacán
35	20.264	-98.443	14/04/2015	Acatlán, Hidalgo
36	19.766	-98.306	17/08/2014	Almoloya, Hidalgo
37	19.174	-99.480	21/05/2014	Santiago Tianguistenco, Edo. De México
38	19.882	-102.211	22/03/2014	Tangancicuaro, Michoacán
39	19.311	-99.046	01/06/2012	Tornado del zócalo, D.F. Ciudad de México
40	19.267	-99.686	06/08/2012	Toluca de Lerdo, Edo. De México
41	19.577	-99.017	01/06/2012	Ecatepec, Edo. De México
42	19.363	-99.631	16/03/2012	Toluca de Lerdo, Edo. De México
43	19.717	-99.867	01/09/2011	Atacomulco, Estado de México
44	19.412	-97.866	08/07/2011	Nazareth, Atltzayanca, Tlaxcala
45	19.719	-99.687	30/05/2011	Jocotitlán, Edo. De México
46	19.914	-98.687	15/05/2011	Zempoala, Hidalgo
47	19.348	-97.845	10/06/2011	San José de Xicohtécatl y Carrillo Puerto, Tlaxcala
48	20.690	-103.373	06/09/2010	Guadalajara, Jalisco
49	19.381	-97.959	2007	Xalpatlahuaya, Tlaxcala
50	19.711	-98.468	Agosto/2007	Apan, Hidalgo
51	19.629	-101.582	2006	Tzintzuntzan, Mich.
52	19.043	-98.285	06/08/2006	Puebla, Puebla
53	19.251	-99.713	16/04/2006	Cacalomacán, Toluca, México
54	19.320	-97.963	27/05/2005	Huamantla, Tlaxcala
55	19.390	-97.984	07/05/2004	El Carmén Xalpatlahuayana, Huamantla, Tlaxcala
56	19.636	-98.441	01/04/2002	Mala Yerba, Apan Hidalgo
57	19.453	-99.150	21/08/1521	Tlatelolco, Ciudad de México

En el caso del tornado del 01/abril/2002, ocurrieron tres tornados de manera simultánea.

6.4. LA FVTM COMO ZONA EÓLICA

En total se registraron 92 erupciones volcánicas, 7500 eventos sísmicos y 120 tornados que han marcado historia en la FVTM, mostrados en la Figura 6.6.

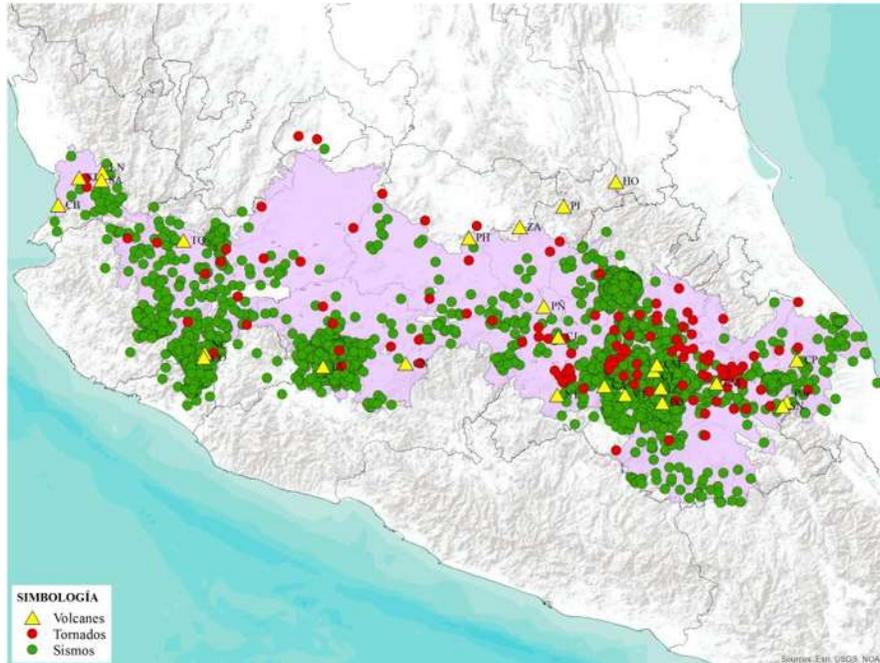


Figura 6.6 Eventos presentados en la FVTM

Se observa claramente que la mayor cantidad de eventos volcánicos, sismos y tornados, se concentra en los estados de Tlaxcala, México, Ciudad de México e Hidalgo en la parte oriental de la FVTM, en la parte central se concentra en el norte de Michoacán y en el Sur de Jalisco en la parte occidental de la FVTM.

6.5. VELOCIDAD REGIONAL, V_R

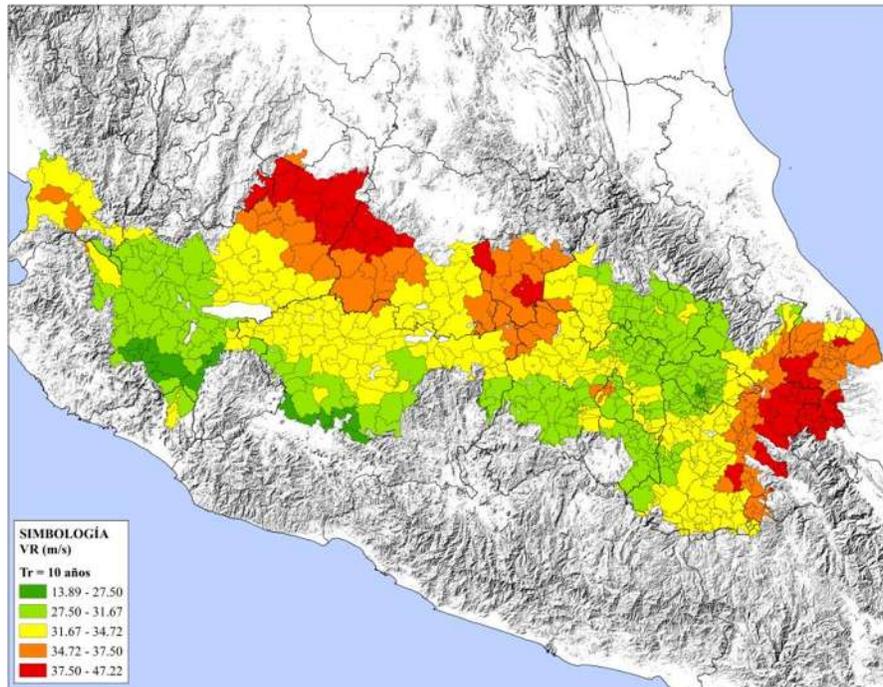
La FVTM abarca 802 municipios del país mexicano, de los cuales uno es de Aguascalientes, 5 de Colima, 16 de la CDMX, 35 de Guanajuato, 5 de Guerrero, 57 de Hidalgo, 104 de Jalisco, 114 de México, 99 de Michoacán, 22 de Morelos, 12 de Nayarit, 13 de Oaxaca, 171 de Puebla, 12 de Querétaro, 60 de Tlaxcala, 72 de Veracruz y 4 de Zacatecas.

Con la ayuda de la base de datos del INEGI se obtuvo la localización de los municipios que son parte de la FVTM y con el programa Sistema Vientos V.2.0 de la CFE se obtuvo las velocidades regionales (V_R) para los periodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 años.

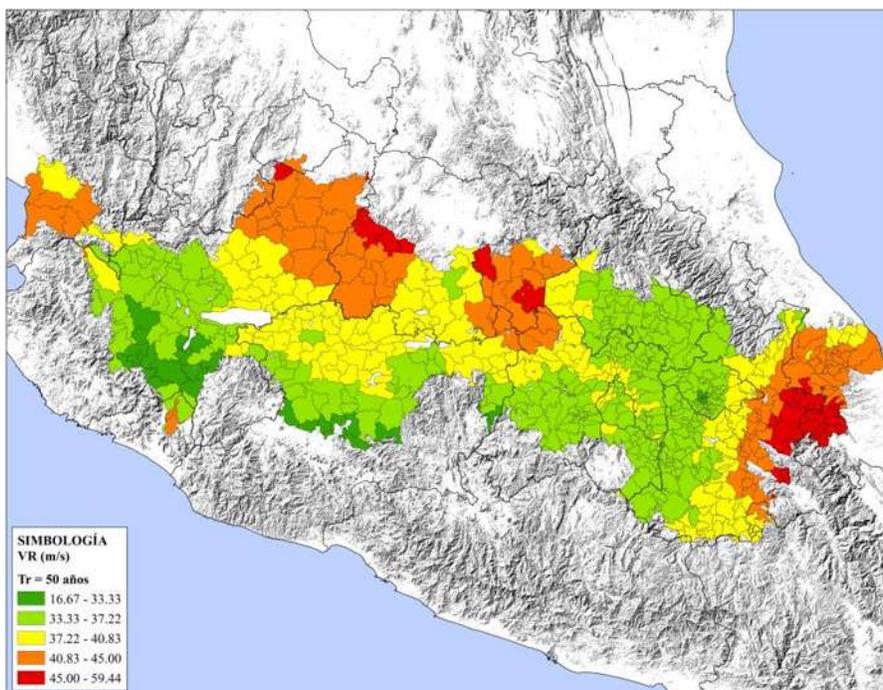
Los pasos para la obtención de la Velocidad Regional (V_R) requerida, son los que se describen en el Capítulo 5, apartado 5.4 referente a V_R .

Realizando las operaciones, se determinaron las velocidades regionales promediadas a 3s y 10m, para cada período de retorno. En las Figuras 6.7 y 6.8 se muestran las velocidades regionales en la FVTM, promediadas a 3 segundos y 10 minutos respectivamente para los periodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 años, sin la consideración del factor de corrección G,

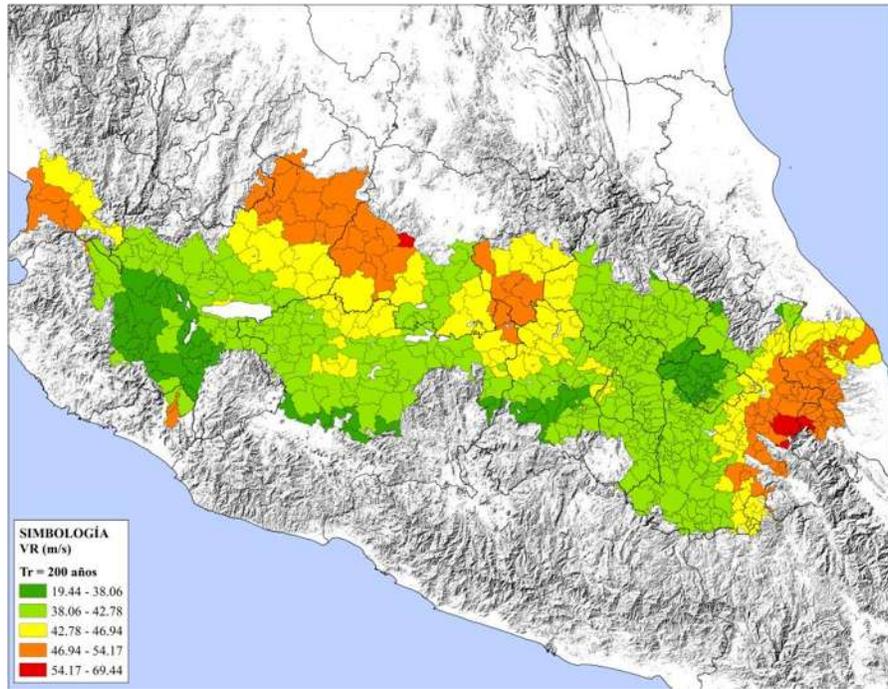
dónde se utilizan los mismos colores que en el Manual, pero con los intervalos de clasificación afectados por la unidad en m/s.



a) T = 10 años.

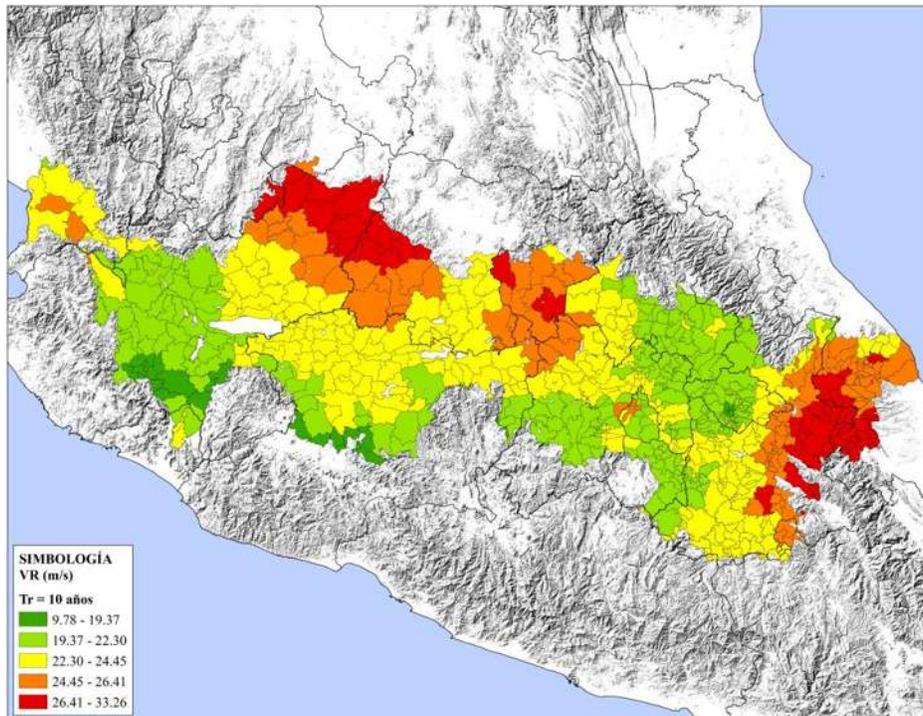


b) T = 50 años.

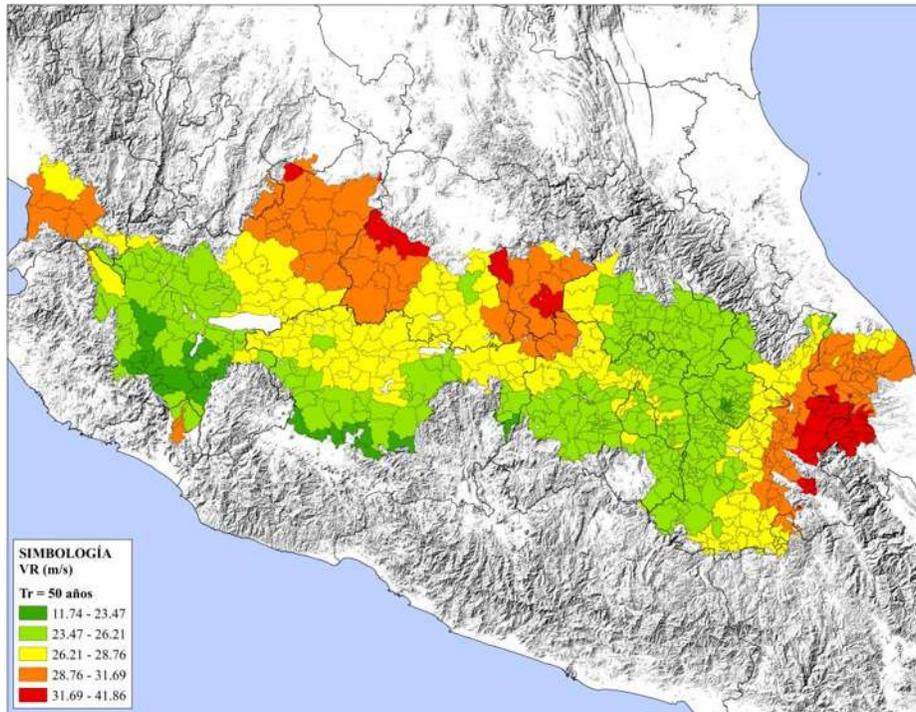


c) T = 200años.

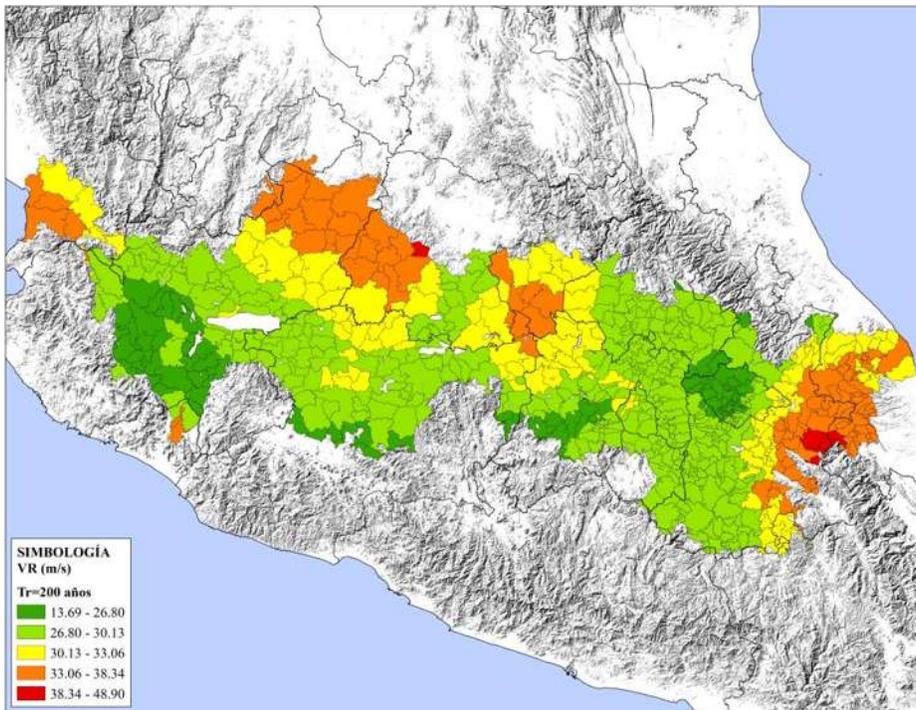
Figura 6.7 V_R sin factor de corrección G, en m/s promediado a 3s.



a) T = 10años.



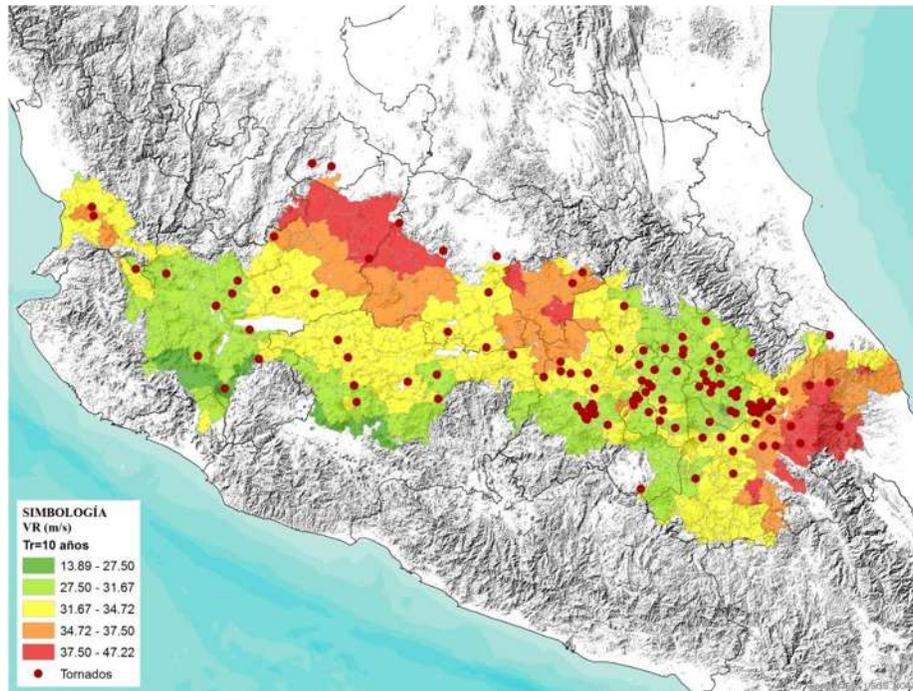
b) T = 50 años.



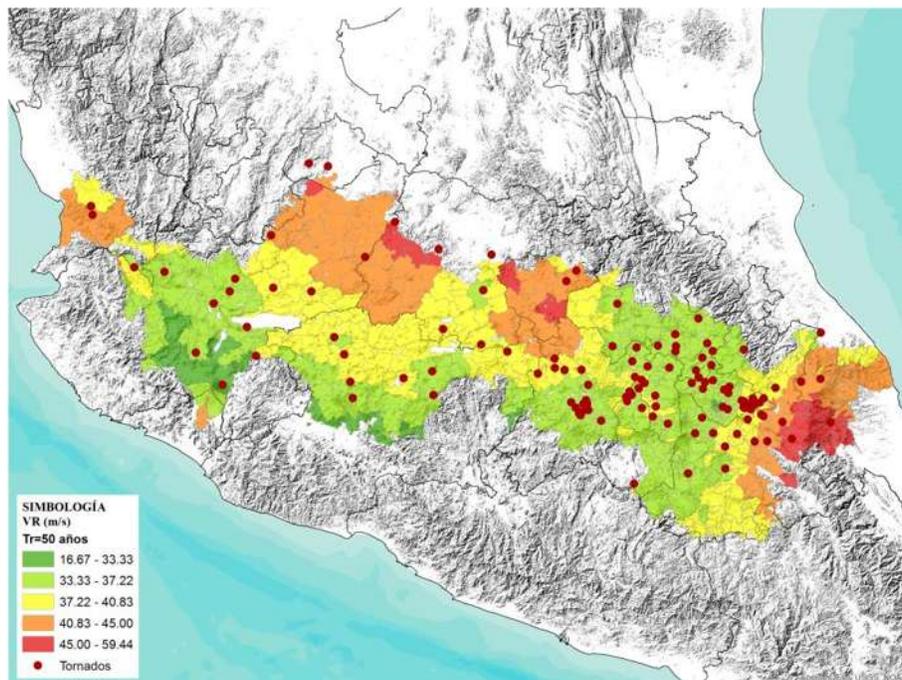
c) T = 200 años.

Figura 6.8 V_R sin factor de corrección G, en m/s promediado a 10m.

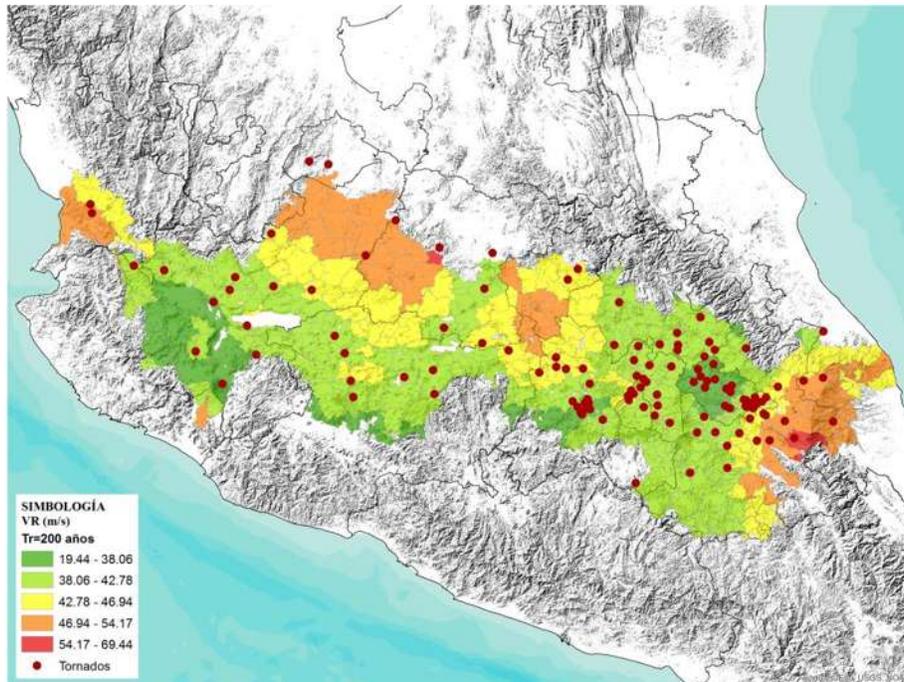
En la Figura 6.9, se muestra una comparación de la actividad tornádica en la FVTM y las velocidades regionales (V_R) promediadas a 3 segundos para los periodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 años, sin la consideración del factor de corrección G.



a) T =10años



b) T =50años



c) T =200años

Figura 6.9 V_R promediada a 3s y actividad tornádica en la FVTM

Se observa que, las regiones dónde se ve concentrada la actividad tornádica son: Ciudad de México, Estado de México, Tlaxcala, Hidalgo y en los municipios céntricos de Jalisco; realizando una comparación con las velocidades regionales propuestas por el MDOC por viento 2020, se muestra que las velocidades regionales recomendadas para los periodos de retorno de 10, 50 y 200 años, son las mínimas, por lo que se recomienda reconsiderar aumentar las velocidades regionales para los tres periodos de retorno en esta zona.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cruz Reyna, S. (2021). Serie Fascículos. Volcanes. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 84-92.

Gómez Tuena, A., Orozco Esquivel, M., y Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la faja volcánica transmexicana. *Boletín de la Sociedad geológica Mexicana*, 57(3), 227-283.

Gutiérrez Martínez, C., Quaas Weppen, R., Ordaz Schroeder, M., Guevara Ortiz, E., Muría Vilá, D., y Krishna Singh, S. (2014). Serie Fascículos. Sismos. Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de la Ciudad de México 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Colima 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Guanajuato 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Guerrero 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Jalisco 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de México 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Morelos 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Nayarit 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Anuario estadístico y geográfico de Oaxaca 2016.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Puebla 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Querétaro 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Zacatecas 2017.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2021.

Macías Medrano, J. M., y Avendaño García, A. (2014). Climatología de tornados en México. *Investigaciones geográficas*, (83), 74-87.

Rodríguez, L. M. E. (2021). Reconociendo los desastres socio-naturales ocurridos en México. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres–REDER*, 5(1), 96-109.

Sistema de Información Geográfica para la Planeación y Ordenamiento del Territorio (SIGPOT). (2013). Atlas de Riesgos del municipio de Coquimatlán Colima 2013. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU).

Viveros, J. A. B., Reynoso, G. S., & Schroeder, M. G. O. (2017). A probabilistic seismic hazard assessment of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico based on historical and instrumentally recorded seismicity. *Geofis Int*, 56, 87-101.

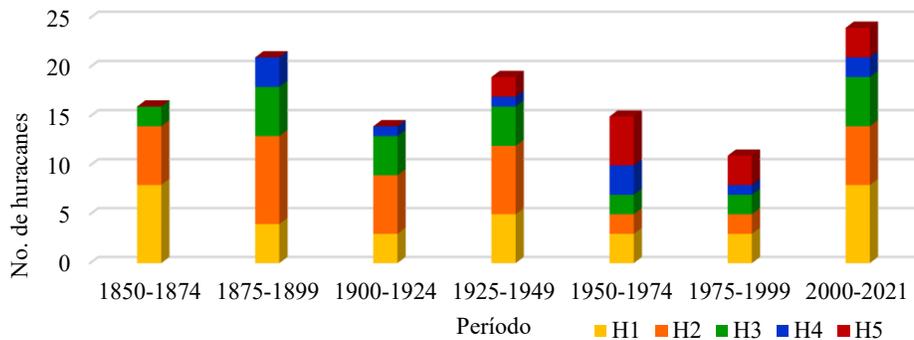
CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

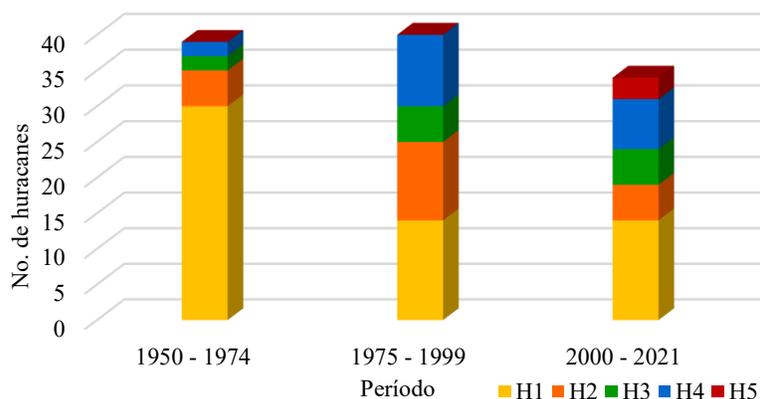
La República Mexicana se ha visto afectada por diversos fenómenos naturales, provocando pérdidas humanas y daños materiales y/o económicos a la población. En promedio, el 90.29% de daños ocasionados por fenómenos naturales, son ocasionados por los fenómenos meteorológicos, alcanzando los 26 mil millones de pesos anuales; de entre los cuales, el 60.42% son resultado de los ciclones tropicales; no subestimando los tornados que, aunque se presentan con menos frecuencia, la presencia de ellos son devastadores a la población. La República Mexicana cuenta con 120 estaciones meteorológicas instaladas por el NOAA que, a la fecha, están en funcionamiento, permitiendo el registro de los eventos ciclónicos. De entre los cuales en el estado de Michoacán se encuentra 4 estaciones, localizadas en los municipios de Uruapan (766546), Zamora (766620), Morelia (766650) y Álvaro Obregón (766655).

La costa mexicana es representada por 17 estados y 169 municipios que la dividen; como zona de mayor riesgo por los ciclones tropicales, se ha visto afectada por 234 eventos de la categoría de huracanes que han tocado tierra o se encuentran a 100 km de la costa mexicana, durante el período de 1850-2021. Entre ellos, 120 (51.28%) eventos ocurrieron en la Costa del Golfo de México siendo el 14.53% H1, 16.24% H2, 10.26% H3, 4.70% H4 y 5.55% H5; mientras que, 114 (48.72%) eventos acontecieron en el Océano Pacífico siendo el 25.21% H1, 8.98% H2, 5.13% H3, 8.12% H4 y 1.28% H5 (Figura 7.1).

La temporada de huracanes comienza desde el mes de mayo a noviembre; aunque el mes de agosto, septiembre y octubre son los meses con mayor intensidad de huracanes, con la ocurrencia de 52 (22.13%), 76 (32.34%) y 54 (22.98%) huracanes respectivamente.



a) Ocurrencia de huracanes en el Golfo de México (1850-2021)



b) Ocurrencia de huracanes en el Océano Pacífico (1850-2021)

Figura 7.1. Ocurrencia de huracanes por intervalo de 25 años y por categoría.

Debido a que en el Océano Pacífico los registros de ciclones tropicales, comenzaron a partir del año 1950, se tiene que durante el periodo de 1950-2021 se registraron un total de 163 huracanes en la costa mexicana; de los cuales, 50 (30.67%) eventos son del Golfo de México, mientras que 113 (69.33%) pertenecen al Océano Pacífico. Lo que quiere decir, que la intensidad de huracanes es 1.26 veces mayor en el Océano Pacífico que en el Golfo de México.

En promedio, 28 huracanes se presentan por estados costeros de la República Mexicana durante el período 1850-2021. Entre los estados que exceden el promedio de incidencia de huracanes son: Baja California Sur, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Quintana Roo, Sinaloa, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán con una susceptibilidad mayor al 6%.

El 16.57% de municipios costeros son susceptibles con un porcentaje mayor al 1.0% con una incidencia \geq a 20 eventos, entre los cuales se encuentran: Cozumel, Felipe Carrillo Puerto, Benito Juárez, Solidaridad, Puerto Morales, Islas mujeres, Tulum y Lázaro Cárdenas del estado de Quintana Roo; Comondú, la Paz y Los Cabos Baja California del Sur; Armería, Manzanillo y Tecomán Colima; Cihuatlán, La Huerta y Tomatlán Jalisco; Aquila, Coahuayana y Lázaro Cárdenas Michoacán; Othón P. Blanco Quintana Roo; Aldama, Matamoros y Soto la Marina de Tamaulipas; Ozuluama de Mascareñas, Tamiahua y Tampico Alto Veracruz; y Tizimín Yucatán. Mientras que el 5.92% de huracanes no son susceptibles a huracanes, es decir, con un número de incidencia de huracanes nulo, entre los que se encuentran: Tijuana y Playa el Rosarito Baja California, Acapetahua, Huixtla, Mapastepec, Mazatlán, Villa Comaltitlán, Suchiate y Tapachula Chiapas; y Caborca Sonora.

En comparación con las velocidades regionales (V_R) que presentan los MDOC de 1993, 2008 y 2020 de las principales ciudades de la República Mexicana, se encontraron decrementos

mayores al 5% de V_R para la comparación de los manuales de 1993-2008, 2008-2020 y 1993-2020 para los períodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 años y que además, se encuentran en estados susceptibles a huracanes con un porcentaje mayor al 4%; las ciudades principales que se encuentran en éste caso son: Puerto Cortés, La Paz Baja California Sur; Culiacán y Mazatlán Sinaloa; Puerto Vallarta Jalisco; Acapulco Guerrero, Heroica Matamoros y Soto la Marina Tamaulipas; Veracruz, Tuxpán y Coatzacoalcos Veracruz; Campeche y Cd. Del Carmen Campeche; Cancún y Chetumal Quintana Roo. Por lo que corren el riesgo de futuros daños extremos tanto en las estructuras civiles, como cultivos e incluso la pérdida de vidas humanas; ya que la intensidad de huracanes se ha presentado con mayor frecuencia en los últimos años, ocasionando velocidades de viento extremas consecuencia del cambio climático. Estadísticamente el 70% de la población costera está en riesgo ante la presencia de fuertes vientos por huracanes.

El enfoque de éste análisis estadístico está orientado a la incidencia de ciclones tropicales en el estado de Michoacán; en el cuál, se registraron 72 ciclones tropicales localizados a 100 km o que han tocado tierra, durante el período de 1945-2021; de los cuales, el 41.67% (30 eventos) son tormentas tropicales (TS) y el 58.33% (42 eventos) corresponden a la categoría de huracanes. Del 58.33% de huracanes, el 61.90% son H1, 21.43% son H2, 2.38% son H3 y el 14.29% son H4. De los 72 huracanes que afectaron el estado de Michoacán en el periodo 1945-2021, 26 huracanes tocaron tierra en el estado, representando el 36.11% del número total de incidencia de ciclones tropicales. De entre ellos el 26.92% son tormentas tropicales (TS) y el 73.08% son de la categoría de huracanes. En los últimos 10 años la frecuencia de ciclones aumento con respecto del promedio anual de la incidencia de huracanes.

A parte de los ciclones tropicales que afectan el estado, se han registrado 10 tornados que también ha provocado daños; entre los cuales, los más conocidos son el tornado en el municipio de Tzintzuntzan (2006), Tangancícuaro Michoacán (2014), Nuevo Parangaricutiro (2015) y el más actual en Morelia Michoacán (2019).

En comparación con las velocidades regionales (V_R) que presentan los MDOC del 2008-2020 de las principales ciudades del estado de Michoacán, se encontraron decrementos mayores al 10% de V_R para los períodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 en las ciudades de Morelia, Uruapan y Zamora, observándose, además que son ciudades en las que se han presentado fuertes vientos por la presencia de tornados y ciclones tropicales que han tocado tierra cuya trayectoria se acerca a estas ciudades como en el caso de: Iva (1961), Agatha (1971), Madeline (1976), Aletta (1978), Odile (1984), Debby (1988), Boris (1996), Pauline (1997) y Rick (2021).

En la FVTM, se han registrado 92 erupciones volcánicas desde el año 3200 A.C. hasta el 2015, en dónde el volcán Popocatepetl y el volcán de Fuego de Colima son los volcanes que frecuentemente participan de erupción volcánica. Se registraron también 7,500 eventos sísmicos con intervalo de incidencia del 1900-2021, con una profundidad de máximo 33km,

siendo 16 eventos sísmicos que han marcado historia con magnitudes (M_w) mayor a 6. Así también se registraron 301 eventos de tornados en la República Mexicana, de los cuales 120 eventos se encuentran en la FVTM (Figura 7.2).

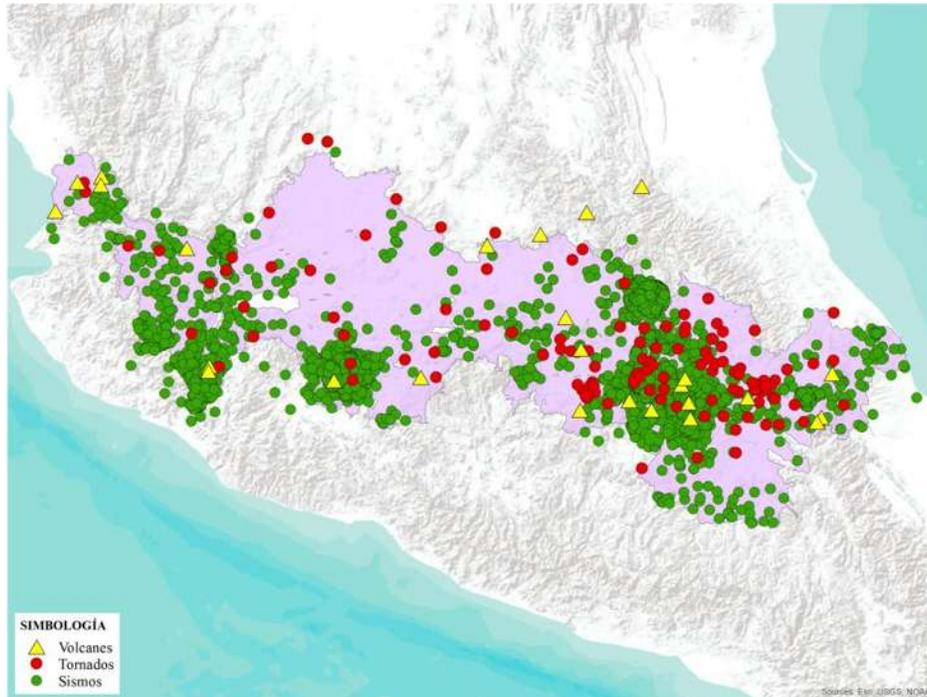


Figura 7.2 Localización de vientos tornádicos, sísmicos y volcanes en la FVTM.

Los estados de la FVTM dónde se ve concentrada la actividad tornádica son: la Ciudad de Mexico, Estado de México, Tlaxcala, Hidalgo y en los municipios céntricos de Jalisco; realizando una comparación con las velocidades regionales (V_R) propuestas por el MDOC por viento 2020, se muestra que las velocidades regionales recomendadas para los periodos de retorno (T) de 10 años para estos municipios son de 27.50 y 31.67 m/s, para T=50 años las V_R son de 33.33 y 37.22 m/s, para T=200 años las V_R son de 19.44 y 42.78 m/s, para un promediado de 3 segundos.

Los fenómenos naturales que ocasionan velocidades de viento intensas provocando daños destructivos son los ciclones tropicales y tornados, aunque los ciclones tropicales con frecuencia se originan mayormente que los tornados. No debemos dejar de buscar soluciones para combatir los riesgos, en este caso en las construcciones civiles. Ya que los daños económicos generados en las obras civiles originados por estos eventos son muy altos.

Se puede decir que una zona eólica es aquella que es vulnerable a eventos meteorológicos que ocasionan vientos fuertes, provocado daños destructivos como pérdidas humanas, daños económicos y/o materiales externos e interno; entre estas zonas eólicas la más vulnerable es la costa de la República Mexicana, por la frecuencia e intensidad con que se presentan año

con año los ciclones tropicales; otra es la FVTM, con la presencia de eventos tornádicos aunque con menor frecuencia pero con daños extremos generados, zona de importancia no solo por los vientos que provocan los tornados, sino por la orografía en la que se encuentra, con eventos volcánicos y aún con mayor intensidad los eventos sísmicos que ocasionan daños drásticos a la población.

El estado de Michoacán se clasifica cómo zona eólica, ya que en la costa y mar adentro se ha visto afectada por eventos ciclónicos de las diferentes categorías que han tocado tierra ocasionando daños directos a la población, así como también la presencia de eventos tornádicos.

CAPÍTULO 8

RECOMENDACIONES

La comparación de velocidades regionales (V_R) de las principales ciudades de los MDOC 1993, 2008 y 2020, se ha presentado un decremento mayor al 5%, principalmente en los estados que son susceptibles a huracanes en un porcentaje mayor al 4%, como son: Baja California Sur, Campeche, Guerrero, Jalisco, Sinaloa, Tamaulipas y Quintana Roo. Por lo que se recomienda la verificación y actualización del MDOC 2020.

En el estado de Michoacán se presenta un decremento mayor al 10% en la comparación de V_R de los MDOC 1993, 2008 y 2020, en las ciudades principales de Morelia, Uruapan y Zamora. Dado que es una zona afectada por ciclones tropicales que han tocado tierra y se han presenciado tornados que han causado daños directos a la población, se recomienda la actualización de las V_R propuestas por el MDOC 2020; así como también, se recomienda la zonificación de velocidades con fines de diseño mostrada en la Figura 8.1, que pueden facilitar al ingeniero o encargado de obras civiles para el diseño de estructuras análisis por viento, en cada región del estado de Michoacán. Se define la clasificación de seis zonas para la determinación de velocidades regionales para cada periodo de retorno (T) de 10, 50 y 200 años.



a) T = 10 años.



b) T = 50 años.



c) T = 200 años.

Figura 8.1 Clasificación de zonas para la determinación de V_R con fines de diseño.

Los valores recomendados de velocidades regionales promediado a 3 segundos y 10 minutos respectivamente, que se pretenden utilizar en la clasificación de las zonas propuesta, para los periodos de retorno (T) de 10, 50 y 200 años, se muestra en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1 V_R de la clasificación de zonas recomendadas promediada a 3 segundos.

Periodo de retorno (T)	Velocidades regionales (V_R) en m/s					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
10 años	37	---	34	33	30	19
50 años	47	43	40	37	33	---
200 años	54	50	47	43	40	36

Tabla 5.3 V_R de la clasificación de zonas recomendadas promediada a 3 minutos,

Periodo de retorno (T)	Velocidades regionales (V_R) en m/s					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
10 años	26	---	24	23	21	19
50 años	33	30	28	26	23	---
200 años	38	35	33	30	28	25

La FVTM, es una zona eólica en la que se han registrado eventos tornádicos, sísmicos y volcánicos. Ya que la actividad tornádica se concentra en: la Ciudad de Mexico, Estado de

México, Tlaxcala, Hidalgo y en los municipios céntricos de Jalisco; se observa que las velocidades regionales (V_R) propuestas por el MDOC por viento 2020 para los periodos de retorno (T) de 10 años son de entre 27.50 y 31.67 m/s, para T=50 años las V_R son de 33.33 y 37.22 m/s, para T=200 años las V_R son de 19.44 y 42.78 m/s, para un promediado de 3 segundos, son velocidades bajas, se recomienda en su totalidad actualizar las V_R para el correcto diseño de obras civiles, y así contrarrestar los daños a estructuras por los fuertes vientos.