



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS

**EVALUACIÓN DE COTAS DE INUNDACIÓN EN EL LITORAL MEXICANO POR
CICLONES TROPICALES, FRENTE FRÍOS Y TSUNAMIS**

MODALIDAD DE GRADUACIÓN: **TESIS**
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
RUBÍ ESMERALDA MARTÍNEZ MARTÍNEZ

TUTOR PRINCIPAL
RODOLFO SILVA CASARÍN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ESCALANTE SANDOVAL CARLOS A.

Secretario: DR. MENDOZA BALDWIN EDGAR GERARDO

Vocal: DR. SILVA CASARÍN RODOLFO

1^{er.} Suplente: DR. PEDROZO ACUÑA ADRIÁN

2^{d o.} Suplente: DRA. MARTÍNEZ VÁZQUEZ MA. LUISA

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

FIRMA

(Segunda hoja)

A mis padres por su apoyo incondicional Sofía y José.
Al amor de mi vida David por su paciencia y motivación.

Agradecimientos

A mis padres, Sofía y José, que con su amor y apoyo me han enseñado a no darme por vencida sin antes haber luchado, que la felicidad no es la meta es el camino, gracias a sus consejos, sus cuidados que desde antes de mi nacimiento me dieron, gracias por reír y llorar a mi lado, por enseñarme que nunca existen derrotas sino aprendizajes, que después de una caída hay que levantarse y que cuando llega el momento de abrir las alas hay que aprender a volar y volar muy alto, papá, mamá, los amo.

Al amor de mi vida, David, gracias por haberme acompañado todos estos años, por enseñarme que la distancia es relativa y que uno está donde el corazón extraña, por esos días de alegrías y tristezas, por ayudarme a crecer y a ver el mejor lado de las cosas, por motivarme a ser mejor cada día y no conformarme, por eso y más muchas gracias.

A mis hermanos José, Víctor y Toño, porque sin ustedes mi vida no habría sido igual, por tantos juegos y pleitos que en el fondo escondieron el amor de hermanos que siempre nos tendremos, a sus hijos que cada día los extraño más, Víctor Alexander, Axel Gael, Kitzia Eugenia, Jorge Damian, Julián y los que vengan, esos pedacitos de alegría que iluminan los días más oscuros y a sus mamás.

A toda mi familia, y no los menciono por que necesitaría mil páginas más para no olvidar a ninguno, pero que todos saben que son y han sido un pilar importante para que llegara a este día, tanto a los que siguen con nosotros como a los que ya se nos adelantaron y que donde estén espero se sientan muy orgullosos de su nieta, prima, sobrina...

A los doctores Rodolfo Silva y Edgar Mendoza que sin conocerme me abrieron las puertas para formar parte del Instituto de Ingeniería UNAM, que han sido como una segunda familia en esta etapa, por todos sus consejos y enseñanzas, muchas académicas y profesionales, pero principalmente de vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo brindado durante estos dos años de dedicación al posgrado, gracias al cual fue posible cumplir una meta más.

A mis amigas de Tepic, Reyna, Rocío, Tania y Mily, a quienes conocí en la secundaria y aún hoy en día, a pesar de los años, la distancia y los distintos caminos que tomamos nos seguimos frecuentando y apoyando. A Oralia y Gladys, mis amigas y hermanas de la carrera con quienes he compartido muchas de las más grandes alegrías y tristezas de mi vida, por consolarme y no dejarme sola, por escucharme y no juzgarme, por ser quien son y por no olvidar quien soy.

A mis nuevos amigos y amigas de Ciudad de México, tanto compañeros de la maestría, como amigos y compañeros del Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM y no los menciono de uno por uno para evitar pasar por alto el nombre de alguno, pues sepan que todos han sido parte importante para que llegara a este momento. Sin su ayuda, consejos, comentarios durante nuestras sesiones de ensayos, campañas de campo, asistencia a congresos, nada de esto

habría sido posible, pues es gracias a hermanos como ustedes es que uno explora y aprende más, se interesa y crea nuevos retos. Tantas tareas, proyectos, modelos, gráficas, análisis y presentación de resultados, y al mismo tiempo tardes de cine, comidas y festejos, gracias por hacer de esta etapa más agradable.

A todos y cada uno de mis profesores, desde el Jardín de Niños hasta la Maestría, ya que fueron precisamente ustedes los que me mostraron todo un mundo de conocimientos y que uno nunca termina de maravillarse con tanto que hay por aprender y tanto que queda por descubrir. Que con su ejemplo, constancia y amor por la enseñanza me hicieron soñar con un mundo mejor, que puedo ser parte del desarrollo del país y que cada acción es un granito de arena de una playa inundada por un mar de oportunidades.

Y finalmente, y no por eso menos importante, a todas esas personitas que saben tienen un lugar muy especial en mi vida, que por unos instantes nos acompañamos en el mismo sendero y que al tomar caminos separados nos dijimos adiós con una sonrisa en el rostro y con los mejores deseos para continuar nuestro andar en esto que llamamos vida.

ÍNDICE

Lista de Figuras	4
Lista de Tablas	7
Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
Objetivos.....	13
Objetivo Principal	13
Objetivos Complementarios.....	13
Metas	13
Organización de la Tesis.....	15
1. Inundaciones por fenómenos extremos en México	17
1.1 Inundaciones causadas por Ciclones Tropicales.....	17
1.1.1 Septiembre de 1955	18
1.1.2 Octubre de 1959.....	19
1.1.3 Septiembre de 1967	19
1.1.4 Septiembre de 1976	20
1.1.5 Septiembre de 1988	20
1.1.6 Septiembre y Octubre de 1995	21
1.1.7 Octubre de 1997.....	22
1.1.8 Octubre de 2002.....	22
1.1.9 Julio y Octubre de 2005.....	23
1.1.10 Agosto de 2007	24
1.2 Afectaciones causadas por Frentes Fríos.....	24
1.2.1 Tormentas Eléctricas.....	24
1.2.2 Granizadas	25
1.2.3 Tornados	25
1.3 Inundaciones causadas por Tsunamis.....	26
2. Marco Teórico	33
2.1 Ciclones Tropicales	33
2.1.1 Formación y características	33
2.1.2 Clasificación	35
2.1.3 Nomenclatura	36
2.1.4 Ecuaciones paramétricas	36
2.1.4.1 Campo de presiones	36

2.1.4.2	Campo de vientos.....	36
2.1.4.3	Campo de Oleaje.....	37
2.1.4.4	Cálculo del Run – Up.....	37
2.1.4.5	Sobreelevación por Marea de Tormenta.....	38
2.1.4.6	Estimación de la presión central de ciclones en el Pacífico y Atlántico mexicanos 39	
2.1.4.7	Estimación del radio del ojo del ciclón para las costas mexicanas.....	40
2.1.4.8	Cálculo simplificado de distancias en sistema métrico en función de posiciones geográficas.....	40
2.2	Frentes Fríos	40
2.2.1	Clasificación de los frentes.....	41
2.2.1.1	Frente frío	41
2.2.1.2	Frente cálido.....	41
2.2.1.3	Frente ocluido.....	42
2.2.1.4	Frente estacionario.....	43
2.2.2	Ecuaciones características.....	43
2.3	Tsunamis	43
2.3.1	Aspectos generales de sismología.....	44
2.3.2	Escalas de magnitud de los tsunamis.....	46
2.3.2.1	Escala de Imamura-Iida.....	46
2.3.2.2	Escala de Soloviev	46
2.3.2.3	Escala de Abe	47
2.3.3	Modelo paramétrico de generación de tsunamis	47
2.3.3.1	Consideraciones del modelo	48
3.	Caracterización Dinámica de las Costas	49
3.1	Clasificación de la Costa	50
3.2	Medición y Monitoreo de las Costas	51
3.2.1	Oleaje	51
3.2.2	Marea.....	52
3.2.3	Ciclones Tropicales	55
3.2.4	Tsunamis	56
3.3	Atlas Nacional de Riesgos	57
4.	Metodología	59
4.1	Delimitación de la Celda de Estudio.....	59
4.2	Esquema general	59
4.3	Ciclones Tropicales	62

4.4	Frentes Fríos	64
4.5	Tsunamis	75
4.6	Determinación de periodos de retorno	78
4.7	Vulnerabilidad de la Zona Costera	80
4.8	Organización de la información	81
5.	Peligro por Inundación en el Litoral Mexicano	83
5.1	Información generada	83
5.2	Resumen de Resultados	87
5.2.1	Censos de Población INEGI.....	87
5.2.2	Cotas de Inundación.....	90
5.3	Atlas de consulta interactiva.....	91
5.3.1	Base de datos principal	91
5.3.2	Municipios Costeros	95
5.3.3	Trayectoria de Huracanes	97
5.3.4	Peligros Costeros	98
	Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación.....	101
	Referencias Bibliográficas	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1 Trayectoria e intensidad de huracanes de la base de datos del HURDAT2 de la NOAA.	17
Figura 1.1.2 Izquierda: Trayectoria de los huracanes Hilda y Janet de 1955; Derecha: Inundación en Tampico (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).	18
Figura 1.1.3 Izquierda: Trayectoria del huracán de 1959; Derecha: Panorama de las afectaciones por el paso del huracán (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).	19
Figura 1.1.4 Izquierda: Trayectoria del huracán Beulah; Derecha: Panorama de la afectación causada (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).	19
Figura 1.1.5 Izquierda: Trayectoria del huracán Liza; Derecha: Inundación en La Paz por falla de bordo de protección (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).	20
Figura 1.1.6 Izquierda: Trayectoria del huracán Gilberto; Derecha: Inundación en Monterrey por el desbordamiento del río Santa Catarina (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).	20
Figura 1.1.7 Izquierda: Trayectoria de los huracanes Opal y Roxanne; Derecha: Situación en plataforma petrolera durante el paso del huracán Roxanne (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).	21
Figura 1.1.8 Izquierda: Trayectoria del huracán Pauline; Derecha: Devastación de Acapulco, Gro., por el paso del huracán (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).	22
Figura 1.1.9 Izquierda: Trayectoria del huracán Kenna; Derecha: Efectos del huracán Kenna tras su paso por Puerto Vallarta, Jalisco (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).	22
Figura 1.1.10 Izquierda: Trayectoria de los huracanes Emily, Stan y Wilma; Derecha: Daños causados por el huracán Emily (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).	23
Figura 1.1.11 Trayectoria del huracán Dean.	24
Figura 1.3.1 Epicentros de sismos generadores de tsunamis que han llegado a costas mexicanas.	32
Figura 2.1.1 Estructura de un huracán.	33
Figura 2.1.2 Variación radial de la presión y velocidad del viento de un ciclón tropical.	34
Figura 2.1.3 Semicírculo manejable y semicírculo peligroso en un ciclón.	34
Figura 2.1.4 Componentes de viento y presión de la marea de tormenta de un huracán (modificada de: http://www.nhc.noaa.gov/surge/).	38
Figura 2.2.1 Izquierda: Estructura del frente frío; Derecha: Simbología de frente frío (modificado de: http://ametse.org/foro/index.php?topic=71.0).	41
Figura 2.2.2 Izquierda: Estructura del frente cálido; Derecha: Simbología del frente cálido (modificado de: http://ametse.org/foro/index.php?topic=71.0).	42
Figura 2.2.3 Izquierda: Estructura del frente ocluido cálido; Centro: Simbología del frente ocluido; Derecha: Estructura del frente ocluido frío (modificado de: http://ametse.org/foro/index.php?topic=71.0).	42
Figura 2.2.4 Izquierda: Estructura de un frente estacionario; Derecha: Simbología de un frente estacionario.	43
Figura 2.3.1 Características de un tsunami (modificada de: (Silva & Mendoza, 2012)).	44
Figura 2.3.2 Placas tectónicas de la Tierra.	44
Figura 2.3.3 Izquierda: Placas tectónicas en México; Derecha: Subducción de la Placa de Cocos bajo la plataforma Continental de Norteamérica.	45
Figura 2.3.4 Movimiento cosísmico.	45
Figura 2.3.5 Definición de variables para la aplicación del modelo paramétrico.	48
Figura 3.2.1 Ubicación de las estaciones mareográficas a cargo de la SEMAR.	53
Figura 3.2.2 Ubicación de las estaciones mareográficas a cargo del IMT.	54
Figura 3.2.3 Ubicación de las estaciones mareográficas a cargo de la UNAM.	54

Figura 3.2.4 Ubicación de las estaciones mareográficas a cargo del CICESE.	55
Figura 3.2.5 Ubicación de las estaciones mareográficas a cargo del PSMSL.	55
Figura 4.1.1 Puntos de estudio en el litoral mexicano.	59
Figura 4.2.1 Diagrama general de trabajo.	60
Figura 4.2.2 Topografía y Batimetría de GEBCO_08 y división política de Natural Earth.....	60
Figura 4.2.3 Topografía del Continuo de Elevaciones del INEGI.	61
Figura 4.2.4 División política Estatal y Municipal de CONABIO.	61
Figura 4.2.5 Marea astronómica interpolada en el litoral mexicano.	62
Figura 4.3.1 Diagrama de análisis de ciclones tropicales.....	63
Figura 4.4.1 Diagrama de análisis de frentes fríos.	64
Figura 4.4.2 Densidad de la base de datos de viento y oleaje.	65
Figura 4.4.3 Puntos de la base de datos de viento y oleaje utilizados para cuantificar el efecto de los frentes fríos.	65
Figura 4.4.4 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para las islas del estado de Colima.	66
Figura 4.4.5 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Colima.	66
Figura 4.4.6 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Baja California.	67
Figura 4.4.7 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Baja California Sur.....	67
Figura 4.4.8 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Campeche.	68
Figura 4.4.9 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Chiapas.	68
Figura 4.4.10 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Guerrero.	69
Figura 4.4.11 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Jalisco.	69
Figura 4.4.12 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Michoacán de Ocampo.	70
Figura 4.4.13 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Nayarit.	70
Figura 4.4.14 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Oaxaca.	71
Figura 4.4.15 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Quintana Roo.	71
Figura 4.4.16 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Sinaloa.	72
Figura 4.4.17 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Sonora.	72
Figura 4.4.18 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Tabasco.....	73
Figura 4.4.19 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Tamaulipas.	73
Figura 4.4.20 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave.	74
Figura 4.4.21 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Yucatán.	74

Figura 4.5.1 Diagrama de análisis de tsunamis por el método paramétrico.....	75
Figura 4.5.2 Ubicación de epicentros para los escenarios seleccionados.	76
Figura 4.5.3 Epicentros y puntos de afectación en el Golfo de México.	76
Figura 4.5.4 Epicentros y puntos de afectación en el Mar Caribe.	77
Figura 4.5.5 Epicentros y puntos de afectación en el Mar de Cortés y Océano Pacífico.	77
Figura 4.5.6 Epicentros noroeste y puntos de afectación en el Océano Pacífico.	77
Figura 4.5.7 Epicentros centro-sur y puntos de afectación en el Océano Pacífico.	78
Figura 4.6.1 Diagrama de desarrollo de la distribución de Gumbel.....	78
Figura 4.8.1 Pendiente calculada a la cota +5.00 m.	83
Figura 5.1.1 Cotas de inundación por ciclones tropicales asignadas a periodos de retorno para el punto 0530.....	85
Figura 5.1.2 Cotas de inundación por frentes fríos asignadas a periodos de retorno para el punto 0530.....	86
Figura 5.1.3 Cotas de inundación por tsunamis asignadas a magnitudes de sismos para la celda 0530.....	87
Figura 5.2.1 Población nacional en estados y municipios costeros.....	88
Figura 5.2.2 Población nacional en estados costeros.	88
Figura 5.2.3 Población nacional en municipios costeros.	89
Figura 5.2.4 Población estatal en municipios costeros.	89
Figura 5.2.5 Cotas de inundación promedio por ciclones tropicales por estado.	90
Figura 5.2.6 Cotas de inundación promedio por frentes fríos por estado.....	90
Figura 5.2.7 Cotas de inundación promedio por tsunamis por estado.	91
Figura 5.3.1 Estructura del atlas.	91
Figura 5.3.2 Estructura de la base de datos principal.	92
Figura 5.3.3 Mapa de Puertos Marítimos.....	94
Figura 5.3.4 Mapa de Puntos utilizados del Atlas del Clima Marítimo.....	94
Figura 5.3.5 Mapa de epicentros de sismos tsunamigénicos.	95
Figura 5.3.6 Mapa de puntos de estudio.....	95
Figura 5.3.7 Información nacional del mapa de municipios costeros.	96
Figura 5.3.8 Información estatal del mapa de municipios costeros.....	96
Figura 5.3.9 Información municipal del mapa de municipios costeros.	97
Figura 5.3.10 Mapa de trayectoria de huracanes.	98
Figura 5.3.11 Franjas de influencia del huracán Gilbert.	98
Figura 5.3.12 Estructura del mapa de peligros costeros	99
Figura 5.3.13 Mapa de Peligros Costeros.....	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.2.1 Algunos tornados en México de 2000 a 2007.....	25
Tabla 1.3.1 Lugar de observación e intensidad de los principales tsunamis detectados en costas mexicanas	29
Tabla 2.1.1 Escala Beaufort	35
Tabla 2.1.2 Escala Saffir - Simpson	35
Tabla 2.3.1 Valores de las constantes pi para las expresiones b e $I2$	48
Tabla 3.1.1 Regiones en las que Ortiz y de la Lanza clasifican las costas de México	51
Tabla 5.1.1 Ciclones que han afectado a la celda 0530 de 1949 a 2012.	84
Tabla 5.1.2 Extracto del registro de ciclones que han afectado la celda 0530.	84
Tabla 5.1.3 Extracto del registro de vientos que han afectado la celda 0530.	85
Tabla 5.1.4 Extracto de escenarios de tsunamis para la celda 0530.	86
Tabla 5.1.5 Máximo efectos calculados por tsunamis para la celda 0530.	87

RESUMEN

La evaluación de los efectos causados por amenazas costeras puede ser una tarea muy laboriosa en la cual intervienen muchas áreas del conocimiento. Entre las complejidades que más difícil es sortear se cuenta la falta de información recabada en campo como resultado de prácticas de monitoreo permanente. Un medio de gran ayuda en el cálculo de valores preliminares es el uso de modelos numéricos, con los que se pueden determinar, con pocos datos de entrada y de manera eficaz, los parámetros representativos de cada evento extremo.

En este trabajo se presenta una estimación de cotas de inundación asociada a tres fenómenos que han afectado gran parte del territorio nacional y principalmente las regiones costeras: ciclones tropicales, frentes fríos y tsunamis, mediante el uso de modelos paramétricos. Si bien, ya existen en la literatura algunas referencias con estimaciones de estos fenómenos, usualmente consisten en mapas con escalas de colores de muy baja resolución, por lo que la determinación de los valores en zonas específicas se torna subjetiva y dependiente del criterio del observador, lo que puede llevar a graves imprecisiones.

Para la estimación que se presenta en esta tesis se trabajó con información de los 17 estados y de los 149 municipios costeros de México, que se distribuyó, empleando diferentes técnicas, en 1,163 puntos a lo largo del litoral de todo el país. Esta información se procesó de diversas bases de datos entre las que se incluyen la Atlantic HURDAT2 de la NOAA que cuenta con las trayectorias de 1 740 huracanes en el Océano Atlántico entre los años 1851 y 2012; la NE/NC Pacific HURDAT2 con 977 trayectorias de huracán en el Océano Pacífico de 1949 a 2012; el Atlas del Clima Marítimo con información de viento y oleaje de 1948 a 2010; 79 epicentros propuestos para la afectación por tsunamis; 33 puntos con información de los mareógrafos administrados por la SEMAR; y la información de censos de población a nivel nacional, estatal y municipal. Los resultados obtenidos se presentan en cuatro mapas de consulta interactiva que pueden ser visualizados en Google Earth. El primero es un mapa general con los resultados en tablas de las variables de cálculo así como las gráficas de régimen extremal asociando cotas de inundación a periodos de retorno y datos de interés de la zona costera mexicana. El segundo es un mapa de municipios costeros con información de los censos de población del INEGI y un resumen de los resultados de la evaluación de los fenómenos. En el tercer mapa se presentan las trayectorias de los huracanes que han tocado aguas nacionales. Finalmente en el cuarto mapa se presenta los resultados del análisis de los fenómenos indicando, mediante una escala de color, el nivel de la cota de inundación obtenido asociado a periodos de retorno (para el caso de ciclones tropicales y frentes fríos) o a magnitudes de sismos tsunamigénicos (para el caso de tsunamis).

ABSTRACT

Assessing the effects of coastal hazards can be a very laborious task which involves many areas of knowledge. Among the complexities that is difficult to overcome the lack of information collected in the field as a result of ongoing monitoring practices are included. A medium of great help in the calculation of preliminary values is the use of numerical models, which can be determined with little input data and effectively monitor parameters of each extreme event.

In this paper it is presented estimates of flood levels associated with three phenomena that have affected much of the country and mainly the coastal regions: Tropical cyclones, cold fronts and tsunamis, using parametric models. While there are already some references in the literature estimates of these phenomena usually consist of maps with color scales to very low resolution, so that the determination of the values in specific areas becomes subjective and dependent on the judgment of the observer, which can lead to serious inaccuracies.

To estimate presented in this thesis has worked with information from the 17 states and 149 coastal municipalities of Mexico, which was distributed using different techniques, 1,163 points along the coastline of the entire country. This information is processed in different databases among which include the NOAA Atlantic HURDAT2 featuring trajectories of 1740 hurricanes in the Atlantic Ocean between 1851 and 2012; the NE / NC Pacific HURDAT2 with 977 trajectories in the Pacific Ocean from 1949 to 2012; Marine Climate Atlas with information on wind and wave from 1948 to 2010; 79 epicenters proposed involvement by tsunamis; 33 points with information of the gauges managed by SEMAR; and population census data at the national, state and municipal levels. The results are presented in four maps interactively query that can be viewed in Google Earth. The first is a general map with results in tables of the variables involves and graphs of extreme regime associating flood levels with return periods and points of interest of the Mexican coastal zone. The second is a map of coastal municipalities with information INEGI population census and a summary of the results of the evaluation of phenomena. In the third map are presented the paths of hurricanes that have hit national waters. Finally in the fourth map the results of analysis of phenomena indicating by a color scale, it shows the level of the flood level obtained associated with return periods (in the case of tropical cyclones and cold fronts) or magnitudes of earthquakes tsunamigenic (in the case of tsunamis).

INTRODUCCIÓN

México se encuentra sometido a la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos y geológicos por encontrarse en una zona con alta actividad tanto ciclónica como sísmica en prácticamente toda su extensión, lo cual genera situaciones de riesgo en la población.

Los fenómenos hidrometeorológicos han sido definidos en el Atlas Nacional de Riesgos del CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (CENAPRED, 2001), como: “aquellos en los que intervienen partículas de agua en alguno de sus estados físicos y su desplazamiento en la atmósfera, tales como: precipitación pluvial, tormentas de granizo y nieve, heladas, ciclones tropicales, escurrimientos, inundaciones, sequías, erosión del suelo, viento y marea de tormenta”; mientras que los fenómenos geológicos son definidos como: “aquellos en los que intervienen la dinámica y los materiales del interior o superficie de la Tierra, mismos que se clasifican en: sísmicidad, vulcanismo, tsunamis y movimiento de laderas y suelos”.

Para hacer frente a los problemas que estos fenómenos dejan, a nivel mundial se está buscando una cultura de prevención de desastres, en lugar de la de reacción ante el desastre que actualmente se maneja. Para esto en diciembre de 1999 se creó la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, por sus siglas en inglés) cuyo principal objetivo es construir naciones y comunidades resilientes como una condición esencial para el desarrollo sustentable. Su estrategia es guiar y coordinar los esfuerzos de un amplio conjunto de colaboradores para alcanzar una sustancial reducción en las pérdidas por desastres (UNISDR, 2014).

En México, la institución encargada de atender a la población en situación de desastres es el SINAPROC (Sistema Nacional de Protección Civil) a través de sus Unidades Estatales, fundado en 1985 después del sismo que devastó a la Ciudad de México (SINAPROC, 2014).

El CENAPRED se creó en 1988 para apoyar al SINAPROC. En los requerimientos técnicos que su operación demanda, realiza actividades de investigación, capacitación, instrumentación, difusión acerca de fenómenos naturales y antropogénicos que puedan originar situaciones de desastre. Además dirige acciones para reducir y mitigar los efectos negativos de tales fenómenos coadyuvando así a una mejor preparación de la población para enfrentarlos (CENAPRED, 2014).

El FONDEN (Fondo de Desastres Naturales) fue establecido en 1996 como un mecanismo presupuestario para apoyar de manera eficaz y oportuna a la rehabilitación de la infraestructura federal y estatal afectada por desastres naturales. En la actualidad se compone de dos instrumentos presupuestarios complementarios: el Programa FONDEN para la Reconstrucción y el Programa Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN) (GFDRR, 2012).

Con las actividades de estos tres instrumentos, sumado a las diversas instancias nacionales y mundiales que se encargan del monitoreo de fenómenos naturales es como se puede llegar a cumplir las metas propuestas de reducir los riesgos a los que se expone la población. Sin embargo, mientras se sigan tomando decisiones de reaccionar solo ante la ocurrencia de desastres y no se contemplen las acciones necesarias para reducirlo o prevenirlo, se continuará teniendo efectos tan destructivos como los que han azotado al país, mismos que con algunas medidas de prevención podrían ser reducidos.

La estrategia de prevención del CENAPRED establece tres pasos fundamentales:

1. Conocer los peligros y amenazas a los que se está expuesto, estudiando el mecanismo generador de los mismos.
2. Identificar y establecer a nivel nacional, estatal, municipal y comunitario, las características y los niveles actuales de riesgo.
3. Diseñar acciones y programas para mitigar y reducir estos riesgos antes de la ocurrencia de los fenómenos, a través del reforzamiento y adecuación de la infraestructura y preparando a la población para que sepa cómo actuar durante todo el proceso de una contingencia.

Uno de los retos que se ha propuesto el CENAPRED es la integración de un atlas detallado del nivel de riesgo al que está expuesto el territorio nacional. Sin embargo hasta la fecha principalmente cuenta con estimaciones cualitativas del riesgo esperado y no estimaciones cuantitativas de los posibles efectos que se tendrían ante las diversas amenazas. Con este enfoque, este trabajo tiene la finalidad de construir un atlas de peligros en las costas del país con resultados puntuales y estimaciones cuantitativas, información indispensable para la evaluación del riesgo.

Las amenazas que fueron estudiadas son las que pueden ocasionar la inundación de origen marino de la costa debido a ciclones tropicales, frentes fríos y tsunamis, evaluando sus efectos en 1,163 puntos distribuidos en todo el litoral mexicano.

Estos tres fenómenos han ocasionado pérdidas de todo tipo alrededor del mundo y México no es la excepción. Anualmente eventos como ciclones tropicales y frentes fríos afectan gran parte del territorio dejando tras su paso inundaciones con repercusiones en diversos sectores sociales y económicos, principalmente en las zonas costeras. Los tsunamis, aunque con menor recurrencia, también han causado daños.

Esta situación se debe a que el país se encuentra en una región intertropical, lo que la hace vulnerable al embate de huracanes tanto en el Océano Pacífico como en el Atlántico. Además, se encuentra en el Cinturón de Fuego del Pacífico, donde están el 75% de los volcanes del mundo y ocurren el 90% de los terremotos, convirtiéndola en una zona con alta actividad sísmica (Geography, 2014).

Con una extensión de más de 11,500 km de litoral y una tendencia de crecimiento más alta que la media anual de la población nacional en zonas costeras, el estudio de los efectos que estos fenómenos pueden alcanzar es de vital importancia para la adecuación de planes de desarrollo urbano y protección civil en pro de reducir los daños que estos eventos ocasionan. Los resultados se presentan asociados a periodos de retorno, con la finalidad de que puedan ser utilizados en la evaluación del riesgo y, una vez validados, emplearlos como datos preliminares en el diseño de obras de protección e infraestructura costera.

La principal aportación de este trabajo es la presentación de información relativa a cotas de inundación a nivel nacional en un atlas de consulta interactiva con acceso puntual a los datos generados, complementando información hasta el momento no valorada y reduciendo la incertidumbre presente al momento de utilizar información de mapas de contornos en los que el esfuerzo de evaluar cuantitativamente los fenómenos se ve mermado por la evaluación visual al momento de emplear la información contenida en los mismos.

OBJETIVOS

OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de este trabajo es elaborar mapas de peligro ante la ocurrencia de ciclones tropicales, frentes fríos y tsunamis que puedan provocar la inundación de la zona costera. El principal parámetro a evaluar es la cota de inundación en la vertiente Pacífica y Atlántica del litoral mexicano con la finalidad de que sirvan como base en la elaboración de mapas de riesgo y en el diseño preliminar de obras de protección e infraestructura costera.

OBJETIVOS COMPLEMENTARIOS

Para alcanzar el objetivo principal es necesario llevar a cabo los siguientes objetivos secundarios:

- ❖ Recopilar información histórica referente a los fenómenos de estudio que han afectado a las costas mexicanas.
- ❖ Recopilar información de mediciones de marea y oleaje.
- ❖ Recopilar información batimétrica del mar territorial mexicano.
- ❖ Elaborar una caracterización hidrodinámica de las costas del país.
- ❖ Generar las mallas de análisis.
- ❖ Ejecutar los modelos paramétricos que permitan obtener resultados de viento, marea, oleaje y run-up ante condiciones extremas.
- ❖ Elaborar un análisis extremal, con base a los resultados obtenidos, que permita encontrar relaciones entre los fenómenos estudiados y sus respectivos periodos de retorno.
- ❖ Elaborar mapas de peligro presentando los resultados de todos los fenómenos estudiados sobre determinados puntos del litoral.

METAS

- ❖ Integrar los respectivos mapas de peligro ante distintos escenarios con una combinación de fenómenos en una presentación adecuada para su rápida interpretación.
- ❖ Elaborar un atlas de consulta interactiva de fácil acceso y uso para la consulta de la base de datos que se genere del análisis de la información recopilada.

ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados, a continuación se presenta la organización del libro de tesis, la cual describe el desarrollo del presente trabajo.

Capítulo 1. Inundaciones por fenómenos extremos en México

En este capítulo se abordan brevemente las principales inundaciones causadas en México por los fenómenos de estudio y los daños que generaron, así como el avance que se ha tenido en material de protección civil y prevención de desastres.

Capítulo 2. Marco Teórico

Se presenta el estado del arte en cuanto al estudio de las amenazas de los fenómenos estudiados, sus características, el análisis a las ecuaciones que los representan, así como los modelos paramétricos empleados de generación sintética de vientos y presiones ciclónicas para el caso de huracanes; run-up y marea de tormenta por viento para frentes fríos y ciclones tropicales; y el modelo paramétrico de altura de ola por tsunamis debido a sismos en la zona marítima.

Capítulo 3. Caracterización Dinámica de las Costas

Aquí se presenta un resumen de las principales características geográficas y físicas de la zona de estudio, así como la red de medición de variables que actualmente registra las oscilaciones del mar y las perturbaciones tanto atmosféricas como geológicas de los fenómenos analizados.

Capítulo 4. Metodología

En este apartado se presenta el procedimiento propuesto para el desarrollo del trabajo, la selección de los modelos para el cálculo de la cota de inundación, los bancos de información empleados, la delimitación de la celda de estudio, así como los criterios para la selección de los puntos a analizar. Se presenta también la metodología utilizada para el análisis extremal donde se hace la asociación de periodos de retorno a los resultados obtenidos.

Capítulo 5. Peligro por Inundación en el Litoral Mexicano

Se presentan los resultados obtenidos, así como la interfaz de los mapas de consulta interactiva cargados en el programa Google Earth. Se elaboraron cuatro mapas interactivos con parte de la información generada en este estudio mostrando así la evaluación de los tres fenómenos de interés.

Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación

Finalmente, se presentan las conclusiones a las que se llegaron después de analizar los resultados obtenidos y las futuras líneas de investigación para continuar y mejorar el presente estudio, así como las recomendaciones que emanan del mismo.

1. INUNDACIONES POR FENÓMENOS EXTREMOS EN MÉXICO

La definición oficial de inundación según la UNESCO es: “aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce”. Se ocasionan principalmente por precipitación, oleaje, marea de tormenta, tsunamis, la falla de una estructura hidráulica o una combinación de estos factores, incrementando la superficie libre del agua, tanto en los cauces de los ríos como en el mar, donde el agua alcanza a penetrar o invadir zonas que en condiciones normales no se encuentra, afectando a la población, infraestructura, sectores económicos y medio ambiente (CENAPRED, 2013).

1.1 INUNDACIONES CAUSADAS POR CICLONES TROPICALES

Por sus dimensiones, características físicas, zonas de afectación y tiempo de vida, los ciclones tropicales son fenómenos meteorológicos con alto potencial destructivo que han causado algunos de los mayores desastres debido a fenómenos naturales en todo el mundo. Sin embargo, y pese a sus consecuencias negativas, juegan un papel crucial en la distribución de lluvia en el país, pues de no ser por ellos, las zonas áridas y semiáridas no podrían beneficiarse con el agua que los acompaña, recurso vital para el desarrollo social y económico de cualquier lugar.

El promedio anual de ciclones tropicales en el Océano Pacífico alcanza los 15.1, mientras que para el Océano Atlántico es de 10.3, de los cuales 4 o 5 suelen penetrar en el territorio y causar daños severos, lo que da una clara idea del grado de peligro en el que se encuentra el país. (CENAPRED, 2013).

En la Figura 1.1.1 se ilustran las trayectorias e intensidades de los huracanes de los que se tiene registro en la base de datos HURDAT2 de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) en donde para el océano Atlántico el registro comienza en 1851 y en el Pacífico en 1949, culminando ambos en 2012. Como se aprecia, en la totalidad de las costas del país estos fenómenos se han sentido en más de una ocasión con efectos tan destructivos que debido a la recurrencia de los mismos debería ser posible tomar medidas efectivas para evitar lo que año tras año acontece.

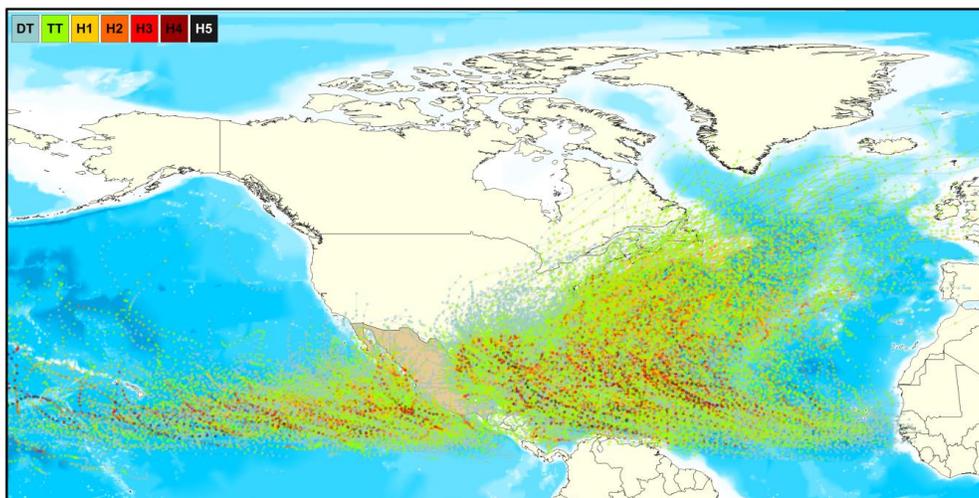


Figura 1.1.1 Trayectoria e intensidad de huracanes de la base de datos del HURDAT2 de la NOAA.

La temporada de ciclones tropicales en la República Mexicana comienza el 15 de mayo en el Océano Pacífico y el 1° de junio en el Atlántico, finalizando el 30 de noviembre en ambos océanos

(Rosengaus et al., 2002), por lo que prácticamente la mitad del año se presentan condiciones de peligro por estos fenómenos.

Los principales efectos de los ciclones son: viento, que puede generar diversos daños a la infraestructura y elementos naturales; precipitación anormal, puesto que se presentan fuertes lluvias en lapsos cortos; marea de tormenta, que es una sobreelevación del nivel del mar por el empuje del viento sobre la superficie del océano en dirección normal a la masa continental y por la compensación del gradiente de presiones atmosféricas (efecto de barómetro inverso); y oleaje, que es uno de los elementos que mayor energía acarrea hacia la costa durante la ocurrencia de tormentas.

De acuerdo con (Zúñiga, 2013) los ciclones tropicales que han provocado el mayor impacto en términos de pérdidas humanas y materiales desde 1953 han sido los que a continuación se mencionan.

1.1.1 SEPTIEMBRE DE 1955

En septiembre de 1955, los huracanes Hilda y Janet (Figura 1.1.2) afectaron Cozumel, Chetumal (donde destruyeron prácticamente todas las edificaciones), Veracruz y Tampico, con vientos de hasta 280 km/h. Ambos produjeron más de mil muertos y pérdidas por 1,500 millones de dólares.

El huracán Hilda, cuya formación se registró en Las Antillas el 10 de septiembre de 1955, alcanzó su máxima intensidad dos veces con categoría de 3. La primera frente a las costas de Quintana Roo con vientos de más de 185 km/h el 15 de septiembre y la segunda el 18 de septiembre con vientos de más de 200 km/h en el Golfo de México. En su trayectoria impactó dos veces las costas del país; la primera el 16 de septiembre en Punta Allen, en el municipio de Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo saliendo al Golfo de México por Isla Arena en Calkiní, Campeche el 17 de septiembre; y la segunda en Ciudad Madero, Tamaulipas inundando la ciudad de Tampico con una altura mayor a 3 m dejando 1,200 damnificados. Terminó de degradarse el 20 de septiembre en el estado de San Luis Potosí.

El huracán Janet se formó el 21 de septiembre en el Océano Atlántico, registrándose su máxima intensidad como huracán categoría 5 el 28 de septiembre con vientos que superaron los 275 km/h frente a las costas de Quintana Roo. Al igual que Hilda impactó dos veces las costas del país; la primera al sur del municipio Othón P. Blanco el 28 de septiembre pasando sobre la ciudad de Chetumal con vientos más de 240 km/h y saliendo al Golfo de México el 28 de septiembre por el municipio de Champotón para impactar el 29 de septiembre el municipio de Vega de Alatorre, Veracruz en playa Las Lechuguillas. Se disipó el 30 de septiembre dentro del país en el estado de Puebla.



Figura 1.1.2 Izquierda: Trayectoria de los huracanes Hilda y Janet de 1955; Derecha: Inundación en Tampico (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).

1.1.2 OCTUBRE DE 1959

En octubre de 1959, un huracán al que no se le asignó nombre golpeó la costa del Pacífico (Figura 1.1.3), con vientos de más de 260 km/h. El mayor daño sucedió en Jalisco y Colima, dejando casi 2 mil muertos, cifra que se incrementó al ocurrir un deslizamiento que liberó cientos de serpientes y escorpiones. Además dejó 1,600 damnificados, una flota de barcos mercantiles naufragó, el 25% de las casas de Cihuatlán fueron totalmente destruidas, hubo daño en carreteras y se descarrilaron varios trenes.

El registro inicial de este huracán se encuentra en el Océano Pacífico a 350 km al sur del estado de Oaxaca como huracán categoría 1 el 23 de octubre, impactando el municipio de la Huerta en el estado de Jalisco el 27 de octubre con vientos de más de 250 km/h, alcanzando la categoría de huracán 5 sosteniendo la misma intensidad más de 60 km tierra adentro. Se disipó el 29 de octubre en el estado de Zacatecas.



Figura 1.1.3 Izquierda: Trayectoria del huracán de 1959; Derecha: Panorama de las afectaciones por el paso del huracán (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).

1.1.3 SEPTIEMBRE DE 1967

La región norte del Golfo de México fue afectada en 1967 por el impacto del huracán Beulah (Figura 1.1.4), causando daños por 700 millones de dólares, provocando algunas de las peores inundaciones en la historia de Tamaulipas en Reynosa y Matamoros y el sur de Texas. Su formación se registró el 5 de septiembre en el Océano Atlántico y su disipación el 22 de septiembre en el estado de Coahuila. En su trayectoria impactó dos veces el país, siendo la primera el 17 de septiembre con vientos de más de 160 km/h en Cozumel, saliendo al Golfo de México 12 horas después por Progreso en el estado de Yucatán. Su máxima intensidad la tuvo el 20 de septiembre cuando impactó el norte del municipio de Matamoros, Tamaulipas, cerca del límite entre México y Estados Unidos.



Figura 1.1.4 Izquierda: Trayectoria del huracán Beulah; Derecha: Panorama de la afectación causada (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).

1.1.4 SEPTIEMBRE DE 1976

En 1976, el huracán Liza (Figura 1.1.5) se convirtió en el peor desastre natural en la historia de Baja California Sur. Se produjo una avenida súbita en la ciudad de La Paz con graves inundaciones por la falla de un bordo de protección de la ciudad. Cobró la vida de más de 1,000 personas y dejó entre 10,000 y 12,000 damnificados. Los daños se estimaron en más de 400 millones de dólares.

Se formó el 25 de septiembre en el Océano Pacífico con una trayectoria casi vertical disipándose el 1° de octubre en el estado de Sonora. Su mayor magnitud se presentó del 29 de septiembre al primero de octubre alcanzando la categoría de huracán 4 con vientos de más de 220 km/h. Impactó directamente el noroeste del municipio de Ahome, Sinaloa y el municipio de Huatabampo, Sonora.

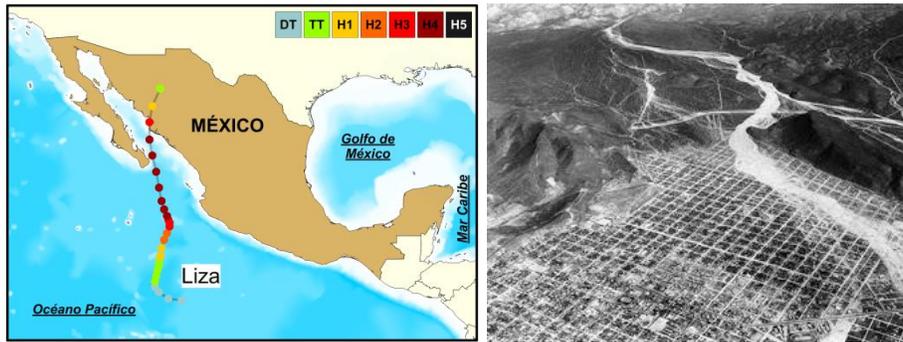


Figura 1.1.5 Izquierda: Trayectoria del huracán Liza; Derecha: Inundación en La Paz por falla de bordo de protección (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).

1.1.5 SEPTIEMBRE DE 1988

En septiembre de 1988 el huracán Gilbert (Figura 1.1.6) azotó la ciudad de Cozumel con vientos de hasta 300 km/h, un oleaje de más de 10 m de altura y una sobre elevación del nivel medio del mar superior a 2.5 m, resultando dañadas amplias zonas turísticas, agrícolas y boscosas. Los daños por precipitación pluvial se registraron básicamente en Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas. El mayor número de víctimas se registró en la ciudad de Monterrey sobre el río Santa Catarina, miles de viviendas fueron afectadas. Este huracán cobró 250 vidas, dejó 150,000 damnificados y los daños ascendieron a 4 mil millones de dólares.



Figura 1.1.6 Izquierda: Trayectoria del huracán Gilbert; Derecha: Inundación en Monterrey por el desbordamiento del río Santa Catarina (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).

Se formó el 8 de septiembre en el Océano Atlántico y se disipó el 19 de septiembre en Illinois, Estados Unidos. Su velocidad de traslación hasta el 17 de septiembre se mantuvo entre 20 y 30 km/h, para luego acelerar hasta alcanzar 75 km/h. Su máxima intensidad se presentó el 14 de septiembre con vientos de más de 285 km/h frente a la Isla de Cozumel, lugar que impactó, atravesando la península de Yucatán y saliendo al Golfo de México con vientos de más de 185 km/h en el municipio de Progreso, Yucatán el 15 de septiembre, impactando nuevamente al país en el norte del municipio de Soto la Marina, Tamaulipas el 16 de septiembre con vientos de más de 200 km/h.

1.1.6 SEPTIEMBRE Y OCTUBRE DE 1995

En 1995, los huracanes Opal y Roxanne (Figura 1.1.7) devastaron la Península de Yucatán, Tabasco y Veracruz, y provocaron las peores inundaciones que Campeche había padecido desde 1927. El hundimiento de un buque y la suspensión de la extracción petrolera causaron cuantiosas pérdidas.

Opal se formó al sur de las costas de Quintana Roo el 27 de septiembre, intensificándose en su trayecto sobre la península de Yucatán, siendo una condición anormal del fenómeno, con una velocidad de traslación inferior a los 10 km/h en los primeros cuatro días desde su formación. Salió al Golfo de México el 1° de octubre como tormenta tropical con vientos superiores a 80 km/h y una velocidad de traslación de 14 km/h, intensificándose hasta alcanzar su máxima magnitud el 4 de octubre al norte del Golfo de México como huracán categoría 4 con vientos superiores a 240 km/h y con una velocidad de traslación de 34 km/h. Continuó su trayectoria con dirección norte noreste disipándose entre Estados Unidos y Canadá entre los estados de Nueva York y Ontario el 6 de octubre.

Roxanne se formó el 7 de octubre en el Mar Caribe frente a las costas al norte de Nicaragua. Alcanzó su máxima intensidad el 11 de octubre como huracán categoría 3 con vientos que superaron los 185 km/h impactando la laguna costera Boca Paila al norte del municipio de Felipe Carrillo Puerto en Quintana Roo; atravesó la Península de Yucatán con una velocidad de traslación promedio de 15 km/h entrando al Golfo de México el 12 de octubre por la localidad de Villa Madero en el municipio de Champotón, Campeche. Se disipó el 20 de octubre en el Golfo de México frente a la costa central de Veracruz. Una característica peculiar de este huracán fue su trayectoria irregular, causando daños en plataformas marítimas por reactivar actividades una vez que el huracán pasó por primera vez.



Figura 1.1.7 Izquierda: Trayectoria de los huracanes Opal y Roxanne; Derecha: Situación en plataforma petrolera durante el paso del huracán Roxanne (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).

El recuento de daños en México por los efectos de ambos huracanes se estimó en: 51 muertes, 290,000 damnificados, el desbordamiento de los ríos Grijalva, Usumacinta, Nautla, Colipa,

Actopan, Misantla y Bobos, daños a la infraestructura en vías de comunicación y ciudades, pérdida en zonas de cultivo así como en la industria ganadera y la destrucción del 60% de las playas del estado de Quintana Roo.

1.1.7 OCTUBRE DE 1997

En octubre de 1997, el huracán Pauline (Figura 1.1.8) cobró la vida de 393 personas, dejó más de 50,000 damnificados, así como 54,000 casas dañadas y 122,282 ha de cultivos, se perdieron 80,000 ha de bosques y selvas en Oaxaca, presentando inundaciones en los estados de Guerrero y Oaxaca, se dañaron 20 puentes y vías carreteras, hubo 350 deslizamientos e interrupción de servicios públicos. Las pérdidas que provocó se estiman en 11 mil millones de dólares.

Este huracán se formó el 5 de octubre a 400 km al sur del estado de Oaxaca, alcanzó su máxima intensidad el 7 y 8 de octubre como huracán categoría 4 con vientos de más de 200 km/h, presentándose el 8 de octubre a 40 km al sur de las costas de Oaxaca impactando el 9 de octubre la laguna costera de La Pastoría, en el municipio de Villa de Tututepec de Melchor Ocampo, Oaxaca. Siguió una trayectoria casi paralela a la costa en todo el estado de Guerrero hasta disiparse el 10 de octubre en el estado de Michoacán. Mientras se presentó sobre el mar, este huracán conservó una velocidad de traslación inferior a los 10 km/h, y antes de tocar tierra aceleró hasta superar los 25 km/h para posteriormente desacelerar mientras continuaba en su trayectoria por el país hasta los 15 km/h antes de su disipación.

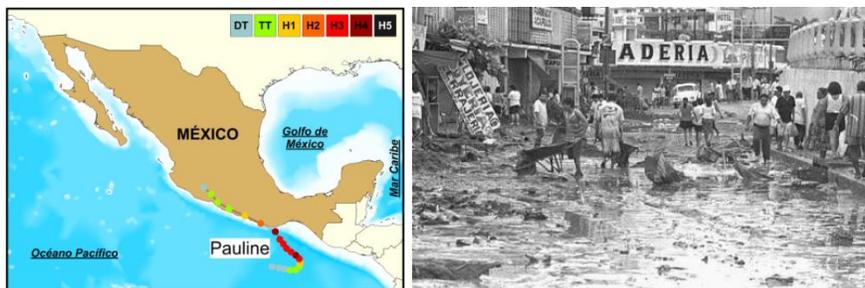


Figura 1.1.8 Izquierda: Trayectoria del huracán Pauline; Derecha: Devastación de Acapulco, Gro., por el paso del huracán (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).

1.1.8 OCTUBRE DE 2002

Kenna (Figura 1.1.9) se convirtió en el tercer huracán más intenso que ha golpeado el Pacífico mexicano cuando llegó a Nayarit en octubre de 2002. Las olas de más de 5 metros que provocó, así como sus fuertes vientos, devastaron la costa y causaron cientos de millones de dólares en daños.



Figura 1.1.9 Izquierda: Trayectoria del huracán Kenna; Derecha: Efectos del huracán Kenna tras su paso por Puerto Vallarta, Jalisco (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).

Su formación se registró el 22 de octubre a 600 km al sur de Guerrero con una velocidad de traslación promedio de 20 km/h hasta antes de alcanzar su máxima intensidad el 25 de octubre como huracán categoría 5 con vientos de más de 260 km/h frente a los estados de Jalisco y Nayarit. Aún en el mar, empezó su degradación e impactó las costas del estado de Nayarit como huracán categoría 3 con vientos que superaron los 185 km/h cerca a la desembocadura del río Santiago. Se disipó el 25 de octubre entre los estados de Coahuila, Durango y Zacatecas.

1.1.9 JULIO Y OCTUBRE DE 2005

En 2005 los huracanes Emily, Stan y Wilma (Figura 1.1.10) devastaron la zona del caribe y partes del Golfo de México. El huracán Emily obtuvo el “honor” de convertirse en el huracán más fuerte de la historia en formarse antes de Agosto. Poco después el huracán Stan, del 1° al 5 de octubre, desbordó 3 ríos, destrozó miles de casas y provocó enormes daños en Oaxaca y Chiapas. Wilma, golpeó Cozumel, Cancún y Playa del Carmen y es considerado el huracán más destructivo en la historia de México, pues debido a las evacuaciones, al cierre del aeropuerto, el corte del suministro eléctrico y demás daños sumó casi 10 mil millones de dólares en pérdidas.

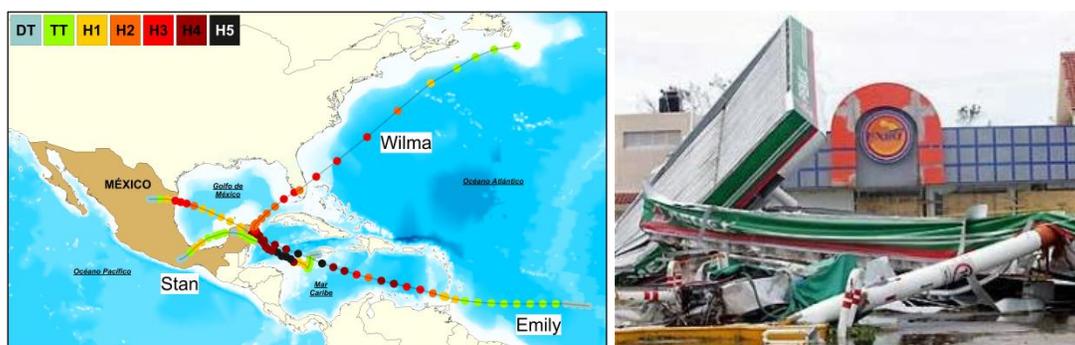


Figura 1.1.10 Izquierda: Trayectoria de los huracanes Emily, Stan y Wilma; Derecha: Daños causados por el huracán Emily (Tomada de: (Zúñiga, 2013)).

El huracán Emily se formó el 11 de julio en el Océano Atlántico con una velocidad de traslación entre 25 y 35 km/h atravesando la totalidad del Mar Caribe. Alcanzó su máxima intensidad el 17 de julio en el Mar Caribe como huracán categoría 5 con vientos superiores a 250 km/h. Impactó dos veces las costas del país. La primera como huracán categoría 4 con vientos de más de 200 km/h en el municipio de Tulum, Quintana Roo el 18 de octubre donde permaneció casi estacionado por media hora. Salió al Golfo de México como huracán categoría 1 con vientos de más de 120 km/h seis horas después de haber impactado Tulum. En su trayecto por el Golfo de México se intensificó hasta alcanzar una categoría de huracán 3 con vientos superiores a 200 km/h el 20 de julio, impactando con esa intensidad la laguna Madre, al norte del estado de Tamaulipas, en el municipio de San Fernando. Posterior a este impacto se disipó en el interior del país el 21 de julio.

El huracán Stan se formó el 1° de octubre frente a las costas de Quintana Roo impactando dos veces las costas del país. La primera el 2 de octubre como tormenta tropical con vientos de más de 60 km/h en el municipio de Felipe Carrillo Puerto pasando de una velocidad de traslación promedio de 10 km/h a más de 20 km/h cuando salió al Golfo de México en el municipio de Calkiní, Campeche. Siguió una trayectoria casi parabólica impactando el 4 de octubre con categoría de huracán 1 con vientos que superaron los 120 km/h el municipio de Catemaco, Veracruz. Se disipó el 5 de octubre en el estado de Oaxaca.

El huracán Wilma se formó el 15 de octubre en el Mar Caribe frente a las costas de Jamaica alcanzando su máxima intensidad el 19 de octubre como huracán categoría 5 con vientos

superiores a 250 km/h mientras aún estaba sobre el Mar Caribe. Impactó la punta norte de la Península de Yucatán con una intensidad de huracán categoría 4 con vientos que superaron los 220 km/h y una velocidad de traslación promedio de 5 km/h del 21 al 23 de octubre, permaneciendo estacionado entre Cozumel y Playa del Carmen, al menos por 15 minutos. Una vez que salió al Golfo de México, tomó una trayectoria con dirección noreste atravesando Florida y disipándose el 26 de octubre frente a las costas de Canadá alcanzando una velocidad de traslación de más de 90 km/h.

1.1.10 AGOSTO DE 2007

En agosto de 2007 el huracán Dean (Figura 1.1.11) asoló la Riviera Maya y Veracruz. A su paso destruyó cientos de edificios, dañó instalaciones petroleras y provocó el cierre del puerto de Mahahual por más de un año. Los daños ascendieron a 200 millones de dólares.



Figura 1.1.11 Trayectoria del huracán Dean.

Este huracán se formó el 13 de agosto en el Océano Atlántico frente a las costas de África. Alcanzó su máxima intensidad el 21 de agosto como huracán categoría 5 con vientos de más de 270 km/h. Impactó el sur de Quintana Roo en el municipio de Othón P. Blanco cerca de Chetumal, y atravesó la Península de Yucatán con una velocidad de traslación promedio de 30 km/h, saliendo al Golfo de México por el municipio de Champotón, Campeche, degradándose a huracán categoría 1. Impactó nuevamente las costas del país con una intensidad de huracán categoría 2 el 22 de agosto en la localidad de Tecolutla, Veracruz. Se disipó el 22 de agosto en el interior del país.

1.2 AFECTACIONES CAUSADAS POR FRENTE FRÍOS

Dependiendo de su intensidad, un frente frío puede considerarse como una tormenta severa, misma que es definida en (CENAPRED, 2013) como aquella tormenta que es susceptible de producir daños materiales importantes, muertes o ambos. Generalmente se acompañan de lluvias intensas, vientos fuertes y pueden producir granizo, rayos y truenos, inundaciones repentinas e incluso tornados. Si se presentan sobre el océano, también producen oleaje intenso.

Algunos frentes fríos se mueven rápidamente. Son fuertes y pueden causar perturbaciones atmosféricas tales como tormentas eléctricas, chubascos, tornados, vientos fuertes y cortas tempestades de nieve durante su paso, acompañadas de condiciones secas a medida que el frente avanza. Dependiendo de la época del año y de su localización geográfica, los frentes fríos pueden presentarse con un periodo de entre 5 a 7 días en promedio.

1.2.1 TORMENTAS ELÉCTRICAS

Las tormentas eléctricas son descargas bruscas de electricidad atmosférica que se manifiestan por un resplandor breve (rayo) y por un ruido seco o estruendo (trueno). Son de carácter local y se reducen casi siempre a sólo unas decenas de kilómetros cuadrados.

1.2.2 GRANIZADAS

El granizo es un tipo de precipitación en forma de piedras de hielo y se forma en las tormentas severas cuando las gotas de agua o los copos de nieve son arrastradas por corrientes ascendentes de aire.

En el país los daños más importantes por granizadas se presentan principalmente en las zonas rurales, ya que se destruyen las siembras y plantíos y en ocasiones la pérdida de animales de cría. En las regiones urbanas afectan a las viviendas, construcciones, alcantarillas, vías de transporte y áreas verdes. Cuando se acumula en cantidad suficiente puede obstruir el paso del agua en coladeras o desagües, generando inundaciones o encharcamientos importantes durante algunas horas. Se producen principalmente en la región del altiplano, particularmente en la porción sur y en la Sierra Madre Occidental, en la Sierra Madre del Sur y en algunas regiones de Chiapas, Guanajuato, Durango y Sonora.

1.2.3 TORNADOS

Un tornado es la perturbación atmosférica más violenta en forma de vórtice. Es el resultado de una gran inestabilidad, provocada por un fuerte descenso en la presión del centro del fenómeno y fuertes vientos que circulan en forma ciclónica alrededor de este. Algunos tornados están constituidos por un solo vórtice, mientras que otros forman un sistema de varios de ellos que se mueven en órbita alrededor del centro de la circulación más grande del tornado. Estos vórtices se pueden formar y desaparecer en segundos.

Este fenómeno se diferencia de un huracán por la magnitud del evento, ya que en un huracán la velocidad de los vientos fluctúa entre los 120 y 240 km/h mientras que en un tornado la velocidad fluctúa entre 60 y 420 km/h, el diámetro oscila entre 100 m y 1 km mientras que en un huracán es entre 500 m a 1,800 km y su duración va de minutos a horas mientras que en un huracán es de pocos días a algunas semanas. Esta última característica es la que lo hace más peligroso.

La escala con la que se mide este fenómeno es la de Fujita, la cual está en relación con la velocidad de sus vientos, sin embargo en México no existe sistema alguno que permita alertar la presencia de este fenómeno hidrometeorológico.

En la Tabla 1.2.1 se presenta una recopilación de reportes periodísticos de la ocurrencia de tornados en el país de 2000 a 2007, la cual se tomó de (CENAPRED, 2013).

Tabla 1.2.1 Algunos tornados en México de 2000 a 2007

Fecha	Lugar de afectación	Comentarios y/o daños
Abril 10 de 2000	Nativitas Coatlán, Guigovelaga y Lachiguiri, Sierra Mixe Zapoteca, Oaxaca	Aplica el DN-III. Daña una tromba cien viviendas en tres poblaciones de Oaxaca. Arrancó docenas de árboles y destruyó los techos de unas cien viviendas en diez minutos. Debido a la fuerza del meteoro las tres localidades carecieron del servicio de energía eléctrica.
Mayo 18 de 2001	Cacahoatán, Chiapas	Vientos y lluvias arrasaron con 20 casas, la primaria y la iglesia del ejido Santa Lucía, Cacahoatán.
Junio 16 de 2001	Teapan, Sierra de Tabasco	Un tornado acaba con plantíos de plátano y papaya en Tabasco, se perdieron 25 ha de estos cultivos.
Julio 30 de 2002	Los Mogotes, Coyuca de Benítez, Guerrero	Un tornado derribó techos y árboles en Guerrero. Dejó a un turista lesionado, 11 viviendas sin techo, 30 árboles derribados, una barda de 300 m derrumbada y ocho automóviles con daños en los parabrisas y láminas.

Fecha	Lugar de afectación	Comentarios y/o daños
Abril 6 de 2003	Reynosa, Tamaulipas	Tornado inunda vecindarios en la ciudad fronteriza de México. Varias calles quedaron bloqueadas por árboles y cables eléctricos caídos. También quedaron dañados carteles publicitarios, barandales de metal, señales de tránsito y varias viviendas de madera en zonas pobres de la ciudad.
Junio 15 de 2004	San Antonio del Río, municipio de San José García, Aguascalientes	Se observó la formación de extrañas nubes en forma de embudo y dejaron consecuencias en San José de García. Se formó tornado de categoría mínima, que entre la gente del campo es mejor conocido como culebra.
Marzo 2 de 2005	Huamantla, Tlaxcala	Tornado daña casas, derriba árboles y postes. El viento arrancó los techos de lámina y dañó la estructura de la tienda del ISSSTE.
Mayo 27 de 2005	Santiago, Nuevo León	Tromba arrastra árboles y techos de lámina en el Barrial ante sorpresa de lugareños. Los techos de sus casas volaron por los aires. Prácticamente algunas azoteas de las caballerizas de la Asociación de Charros Cañón del Huánuco, A.C. desaparecieron, una gran cantidad de árboles fueron arrancados por los fuertes vientos en el camino de Los Fresnos.
Octubre de 2005	Madera, Chihuahua	Tornado derriba miles de árboles en Madera, Chihuahua con daños en al menos 50 ha.
Abril 16 de 2006	Cacalomacán, Toluca, Edo. de México	Fuertes vientos provocaron el colapso de varias bardas de las mansiones que se localizan en el sitio conocido como "La Macaria". Asimismo los vientos arrancaron algunos árboles e incluso un poste de teléfono ubicado en la calle de Miguel Hidalgo en esta zona.
Agosto 6 de 2006	Puebla, Puebla	Tornado arrasa viviendas en la zona sur de Puebla. Fueron dañadas al menos unas 30 casas.
Junio 7 de 2007	Las Choapas, Veracruz	Tromba y granizo afecta a 120 casas. Otras viviendas fueron dañadas en el municipio de Las Choapas, durante su trayectoria destechó viviendas, derribó postes de telefonía y energía eléctrica y arrancó árboles de raíz.
Agosto de 2007	Apan, Hidalgo	Víbora de agua arrasó con 25 árboles en Apan. Ocasiónó el desprendimiento de al menos 25 árboles pequeños y la techumbre de un corral, así como inundaciones en los campos de cultivo de la localidad de Cocinilla.
Agosto 27 de 2007	San Cristóbal de las Casas, Chiapas	Lluvias y tornado causan daños a casas en Chiapas. En San Cristóbal de las Casas, en la región de los Altos, un tornado derribó cables de energía eléctrica y algunos árboles, levantó techos de láminas, estructuras metálicas y tejas de varias casas.

1.3 INUNDACIONES CAUSADAS POR TSUNAMIS

Los tsunamis son ondas oceánicas gravitacionales generadas por movimientos súbitos del fondo marino, atribuidos principalmente a sismos, deslizamientos de tierra, actividad volcánica y procesos geológicos en general, aunque también se pueden producir por el impacto de meteoritos en el agua (Silva & Mendoza, 2012). La mayoría son imperceptibles en aguas profundas, pero conforme avanzan hacia la costa, por efectos de someramiento pueden llegar a la playa con gran altura y provocar efectos destructivos.

La mayoría de los tsunamis son provocados por sismos someros de gran magnitud, cuyo hipocentro se localiza a menos de 60 km de profundidad, y en zonas de subducción, principalmente en el contorno costero del Océano Pacífico.

De acuerdo con la ubicación de la zona de generación, los tsunamis se clasifican en: locales, cuando el lugar de arribo está muy cercano o dentro de la zona de generación; regionales, cuando el lugar de arribo está a menos de 1,000 km; y lejanos, remotos, transpacíficos o teletsunamis, cuando el sitio de arribo está a más de 1,000 km de distancia de la zona de generación.

Aunque este fenómeno es poco frecuente, cuando ha ocurrido sus impactos han sido devastadores. A escala mundial, los peores tsunamis de los que se tienen registro son (NOAA, 2014):

1. Isla Santorini, Grecia (-1650)

El origen de este posible tsunami se debió a una explosión de la isla volcánica, que actualmente es un archipiélago localizado en el sur del mar Egeo. Se cree que las olas pudieron haber alcanzado de 100 a 150 m de altura.

2. Valparaíso, Chile (1730)

Este tsunami, que afectó alrededor de 1,000 km de costa, se generó por un fuerte sismo que causó daños en Valparaíso, siendo la primera vez en la historia del puerto que fue inundado y severamente dañado, además de destruir casas, fortificaciones y bodegas.

3. Lisboa, Portugal (1755)

Generado por un sismo de magnitud de 9.0 en la escala de Richter y ocurrido el 1° de noviembre con epicentro en la falla de Azores – Gibraltar, se estima que las olas alcanzaron entre 6 y 20 m de altura sobre el puerto de Lisboa. Cobró la vida de más de 10,000 personas entre España, Portugal y el norte de África.

4. Krakatoa, Indonesia (1883)

Causado por la explosión del volcán Krakatoa el 27 de agosto de 1883, desapareciendo el volcán junto con el 45% de la isla que lo albergaba, produjo una ola de entre 15 y 42 m de altura y con un saldo de 20,000 personas aproximadamente.

5. Messina, Italia (1908)

Un terremoto al sur de Italia de magnitud 7.5 en la escala de Richter ocurrido el 28 de diciembre, provocó un tsunami con olas de hasta 17 m que acabó con la vida de 200,000 personas.

6. Océano Pacífico (1946)

Un terremoto de magnitud 7.4 grados cerca del estrecho de Alaska provocó un tsunami con olas de hasta 36 metros de altura que arrasaron con las islas de Hawái causando la muerte de 165 personas en Hawái y Alaska. Este maremoto hizo que los estados de la zona del Pacífico creasen un sistema de alertas que entró en funcionamiento en 1949.

7. Alaska, EUA (1958)

El 9 de julio de 1958, en la bahía de Lituya, al noroeste del golfo de Alaska, un sismo de 8.3 grados en la escala de Richter provocó una avalancha, generando una pared de agua que se elevó sobre los 580 m, convirtiéndose en la ola más grande de la que se tenga registro y llegando a calificarse al suceso de megatsunami.

8. Valdivia, Chile (1960)

El terremoto de Valdivia o Gran Terremoto de Chile, ocurrido el 22 de mayo, es el sismo de mayor magnitud registrado hasta ahora por sismógrafos a nivel mundial con una magnitud de 9.5 en la escala de Richter. El hipocentro se localizó a 6 km de profundidad y causó un tsunami que se propagó por el Océano Pacífico, devastando la isla de Hilo a 10,000 km del epicentro, así como regiones costeras de Sudamérica, Japón, Hawái, Filipinas y la costa oeste de Estados Unidos. El número de muertes se estimó en 3,000.

9. Tumaco, Colombia (1979)

El tsunami provocado por un sismo de 8.1 grados Richter ocurrido el 12 de diciembre a lo largo de la costa pacífica de Colombia y Ecuador, causó la destrucción de la ciudad de Tumaco y otras poblaciones con un saldo de 259 muertos.

10. Nicaragua (1992)

El terremoto ocurrido en las costas del pacífico de Nicaragua el 2 de septiembre de entre 7.2 y 7.8 grados Richter, provocó un tsunami que cobró más de 170 vidas.

11. Hokkaido, Japón (1993)

El tsunami, causado por un terremoto el 12 de julio, dejó como resultado 202 muertes con olas que alcanzaron una altura de 31 m.

12. Océano Índico (2004)

Ocurrido el 26 de diciembre, este es considerado el tsunami más devastador de la historia. Fue ocasionado por un sismo de 9.1 grados Richter, el tercero de mayor magnitud registrado, que cobró la vida de aproximadamente 280,000 personas. Afectó a once países, entre ellos India, Indonesia, Tailandia y Sri Lanka.

13. Chile (2007)

Un sismo de 6.1 grados Richter generado el 21 de abril y que tuvo lugar en el Fiordo Aysén, produjo deslizamientos en las riberas del mismo, tres de las cuales generaron tsunamis que causaron la muerte de tres personas y severos daños.

14. Chile (2010)

Este tsunami fue producido por un sismo de 8.8 grados Richter ocurrido el 27 de febrero cuyo hipocentro se localizó a 47.4 km de profundidad y con epicentro frente a la costa de la localidad Cobquecura. El tsunami destruyó varias de las localidades que fueron devastadas por el sismo.

15. Japón (2011)

El terremoto de 9.0 grados Richter del 11 de marzo generó un tsunami que arrasó con edificios, viviendas y vialidades, además de causar severos daños en reactores nucleares y cobrar un saldo de 20,896 muertes. Las olas del tsunami alcanzaron hasta 40.5 m de altura.

En México, la información histórica registra el arribo de 60 tsunamis en los últimos 250 años, de los cuales los de origen lejano han tenido olas de hasta 2.5 m de altura. Sin embargo, los tsunamis generados en aguas nacionales han rebasado los 10 m de altura (Centro de Alerta de Tsunamis, 2012). Aunque se desconoce que en México hayan ocurrido tsunamis tan destructivos como los de Chile, Alaska, el Océano Índico y Japón, no se debe descartar la posibilidad de que este tipo de eventos puedan ocurrir en la costa del Pacífico Mexicano.

En la Tabla 1.3.1 se presenta un resumen de la base de datos de la NOAA (NOAA, 2014), en la que se muestran las fuentes de generación de tsunamis y los sitios en México en los que se tiene registro del run-up alcanzado.

Tabla 1.3.1 Lugar de observación e intensidad de los principales tsunamis detectados en costas mexicanas

Fecha	Origen	Lon.	Lat.	Mag. Sismo	Punto de Observación	Run-Up (m)
25/02/1732	Sur de México	-99.9	16.8	*	Acapulco	3.00
01/09/1754	Sur de México	-99.2	16.8	*	Acapulco	4.00
28/03/1784	Acapulco, Guerrero	-99.9	16.9	*	Acapulco	3.00
28/03/1787	San Marcos, Oaxaca	-98.5	16.5	8.3	Acapulco	4.00
03/04/1787	San Marcos, Oaxaca	-97	15.5	7.3	Costa de Oaxaca	4.00
04/05/1820	Sur de México	-99.6	17.2	7.6	Acapulco	4.00
29/11/1852	Norte de México	-115.5	32.5	7.0	Boca del Río Colorado	3.00
10/05/1877	Costa Norte de Chile	-70.5	-21.5	8.3	Acapulco	1.00
14/04/1907	Guerrero	-100	17	8.1	Acapulco	2.00
16/11/1925	Sur de México	-107	18.5	7.0	Zihuatanejo	10.00
					Bahía San Pedrito, Manzanillo	3.00
03/06/1932	Costa de Jalisco	-104.25	19.5	8.1	Manzanillo	0.75
					Mismaloya, Jalisco	10.00
18/06/1932	Centro de Colima	-103.632	19.452	7.9	Manzanillo	1.00
22/06/1932	Centro de México	-104.5	19	7.0	Cuyutlán	10.00
04/12/1948	Isla María Madre	-106	22	6.9	Islas Mariás	5.00
04/11/1952	Península de Kamchatka	159.5	52.75	9.0	Acapulco	1.12
					Salina Cruz	0.60
					Acapulco	0.32
					Ensenada	0.52
09/03/1957	Alaska	-175.629	51.292	8.6	La Paz	0.20
					Manzanillo	0.60
					Mazatlán	0.20
28/07/1957	Acapulco	-99.1	16.5	7.9	Acapulco	1.30
					Acapulco	0.96
					Ensenada	1.23
22/05/1960	Valdivia, Chile	-74.5	-39.5	9.5	Guaymas	0.39
					La Paz	0.73
					Mazatlán	0.61
					Salina Cruz	0.79
11/05/1962	Sur de México	-99.6	17.2	7.0	Acapulco	0.81
19/05/1962	Sur de México	-99.5	17.2	7.2	Acapulco	0.34

Fecha	Origen	Lon.	Lat.	Mag. Sismo	Punto de Observación	Run-Up (m)
13/10/1963	Islas Kuril, Rusia	149.798	44.77	8.5	Acapulco	0.50
					Salina Cruz	0.50
28/03/1964	Alaska	-147.73	61.04	9.2	Acapulco	0.53
					Ensenada	1.42
					La Paz	0.27
					Manzanillo	0.66
					Mazatlán	0.20
04/02/1965	Islas Aleutianas, Alaska	178.55	51.29	8.7	Salina Cruz	0.43
					Acapulco	0.40
					Manzanillo	0.30
					Mazatlán	0.10
23/08/1965	Oaxaca	-95.8	16.3	7.8	Salina Cruz	0.50
17/10/1966	Perú	-78.638	-10.748	8.1	Acapulco	0.40
16/05/1968	Japón	143.2	40.8	8.2	Ensenada	0.30
					Manzanillo	0.40
					Acapulco	0.43
30/01/1973	Sur de México	-103	18.48	7.5	La Paz	0.21
					Manzanillo	1.13
29/11/1975	Hawái	-155.033	19.451	7.7	Acapulco	0.30
					Cabo San Lucas	0.30
					Ensenada	0.50
					Isla Guadalupe	0.40
					Manzanillo	0.30
					Puerto Vallarta	0.20
					Salina Cruz	0.30
14/01/1976	Islas Kermadec	-177.657	-28.427	8.0	Acapulco	0.24
					Manzanillo	0.21
29/11/1978	Oaxaca	-96.591	16.01	7.8	Puerto Escondido	1.50
14/03/1979	Guerrero	-101.276	17.813	7.6	Acapulco	1.30
					Manzanillo	0.42
25/10/1981	Michoacán	-102.084	18.048	7.3	Acapulco	0.09
					Acapulco	1.15
					Boca De Apisa	1.50
					Bucerías (Faro)	3.00
					Cuyutlán	2.00
					Ixtapa	1.50
					Lázaro Cárdenas	2.80
					Manzanillo	1.00
					Playa Azul	2.50
					Zihuatanejo	3.00
21/09/1985	Sur de México	-101.647	17.802	7.6	Acapulco	1.20
					Zihuatanejo	1.20
05/03/1987	Chile	-70.161	-24.388	7.6	Isla Socorro	0.03
02/09/1992	Nicaragua	-87.34	11.742	7.7	Cabo San Lucas	0.14
					Isla Socorro	0.15
30/07/1995	Chile	-70.294	-23.34	8.0	Cabo San Lucas	0.05
					Isla Socorro	0.11
14/09/1995	Sur de México	-98.597	16.779	7.4	Manzanillo	0.20

Fecha	Origen	Lon.	Lat.	Mag. Sismo	Punto de Observación	Run-Up (m)
09/10/1995	Centro de México	-104.205	19.055	8.0	Barra de Navidad	5.10
					Boca de Iguanas	5.10
					Cabo San Lucas	0.26
					Chamela	3.20
					Cuastecomate	4.40
					Cuyutlán	2.70
					El Tecuan	3.80
					La Manzanilla	4.00
					Manzanillo	4.70
					Melaque	4.50
					Paraíso	1.80
					Perula	3.40
					Playa De Oro	4.10
					Punta Careyes	3.50
					Punta Chalacatepe	2.90
					21/02/1996	Perú
23/06/2001	Perú	-73.641	-16.265	8.4	Cabo San Lucas	0.13
22/01/2003	Centro de México	-104.104	18.77	7.5	Lázaro Cárdenas	0.12
					Manzanillo	0.61
					Zihuatanejo	0.35
26/12/2004	Indonesia	95.982	3.295	9.1	Cabo San Lucas	0.12
					Manzanillo	0.40
15/11/2006	Islas Kuril, Rusia	153.266	46.592	8.3	Ensenada	0.64
29/09/2009	Islas Samoa	-172.095	-15.489	8.0	Cabo San Lucas	0.21
					Manzanillo	0.62
07/10/2009	Islas Vanuatu	166.51	-13.006	7.6	Cabo San Lucas	0.04
27/02/2010	Chile	-72.898	-36.122	8.8	Acapulco	0.16
					Cabo San Lucas	0.36
					Manzanillo	0.32
11/03/2011	Japón	142.373	38.297	9.0	Acapulco	1.05
					Cabo San Lucas	0.17
					Manzanillo	1.70
20/03/2012	Sur de México	-98.231	16.493	7.4	Acapulco	0.20
					Lázaro Cárdenas	0.07
07/11/2012	Guatemala	-91.895	13.988	7.3	Salina Cruz	0.35
06/02/2013	Islas Salomón	165.114	-10.799	7.9	Cabo San Lucas	0.06

En la Figura 1.3.1 se muestran los epicentros de los sismos que han generado tsunamis y se han registrado en las costas mexicanas, como se observa la mayoría se encuentran en el Océano Pacífico.

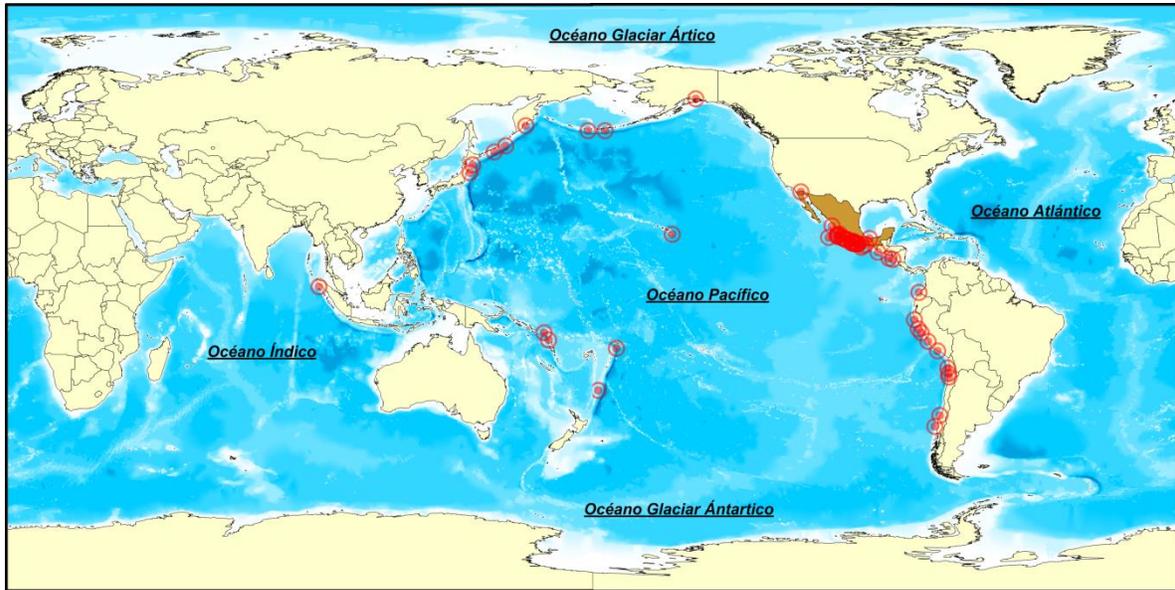


Figura 1.3.1 Epicentros de sismos generadores de tsunamis que han llegado a costas mexicanas.

2. MARCO TEÓRICO

La falta de información necesaria para la evaluación de los efectos que los fenómenos provocan tras su paso se debe, principalmente, a un déficit de estaciones de medición o la falla de las mismas cuando se presentan condiciones extremas. Es por este motivo que mundialmente se intentan desarrollar modelos que representen las condiciones generadas alimentándolos con la información disponible. Para ello es muy importante comprender y conocer las características principales de los mismos, así como también las leyes físicas que gobiernan su comportamiento. En los siguientes subtemas se presentan las ecuaciones que rigen los fenómenos de estudio de este trabajo.

2.1 CICLONES TROPICALES

Es común que la única información disponible de un ciclón tropical sea la que se reporta en los boletines meteorológicos, los cuales rara vez contienen el campo de velocidades. Afortunadamente, este tipo de eventos tienen una morfología muy bien definida y su caracterización se puede realizar de forma muy adecuada con el uso de modelos paramétricos (Silva & Mendoza, 2012).

2.1.1 FORMACIÓN Y CARACTERÍSTICAS

De acuerdo con (Rosengaus, 2002), los ciclones tropicales inician su desarrollo como pequeñas perturbaciones atmosféricas en las zonas del planeta y épocas del año que cumplen con las condiciones necesarias para su formación e intensificación (en el mar y en latitudes 5° a 15° en ambos hemisferios cuando la temperatura del mar es mayor o igual a 26°C). En este momento se le conoce como onda tropical y no presenta flujo de viento giratorio ni líneas de igual presión cerradas a su alrededor pero ya presenta actividad convectiva. Tienen un movimiento general de Este a Oeste con una ligera componente hacia el polo del hemisferio en el que se desarrollen. Conforme la presión central comienza a disminuir se produce el inicio de un flujo circular alrededor de la zona convectiva. Este flujo de aire es ascendente y en sentido antihorario en el hemisferio norte y horario en el hemisferio sur alrededor de la zona convectiva y tiende a intensificar la convección, reducir más la presión y alimentar al sistema de humedad. Si se conservan las condiciones necesarias, el fenómeno se sigue intensificando. En la Figura 2.1.1 se muestran las principales características de un huracán.



Figura 2.1.1 Estructura de un huracán.

El fenómeno funciona como un vórtice de aire que fluye alrededor de un centro de baja presión. Al centro del vórtice se le denomina "ojo" y es una zona de aparente calma que abarca desde 10 km hasta más de 100 km de diámetro. Cuanto menor es el ojo, mayor es la intensidad del ciclón.

Después del ojo se encuentra la pared del ciclón, la cual es la característica más impresionante, conformada por una pared vertical de 10 a 12 km de altura y de 10 km de espesor, aproximadamente. En esta zona se encuentran las condiciones más peligrosas del evento: los máximos vientos, las intensidades de lluvia mayores y el oleaje y marea de tormenta más destructivos.

Otra de las características de los ciclones tropicales es la fuerte variación de las condiciones en la dirección radial, desde el centro del ciclón tropical hacia afuera. En la Figura 2.1.2 se muestra un esquema de esta condición, donde se observa que tanto la presión como la velocidad del viento tienen sus valores mínimos en el ojo del huracán, después la velocidad del viento aumenta rápidamente hasta el radio ciclostrofico donde encuentra su máximo, para posteriormente descender gradualmente conforme se aleja de esta zona. La presión, por su parte, aumenta gradualmente hasta encontrar las condiciones de presión atmosférica normal lejos del ojo del huracán.

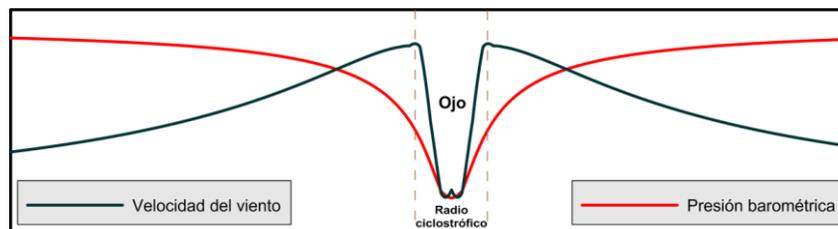


Figura 2.1.2 Variación radial de la presión y velocidad del viento de un ciclón tropical.

Además de lo anterior, en el hemisferio Norte se tiene que el lado derecho de la trayectoria del ciclón tropical presenta vientos mayores que el lado izquierdo, esto se debe a que además de la velocidad de rotación del fenómeno, al lado derecho se le suma la velocidad de traslación mientras que al lado izquierdo se le resta. Las distribuciones radiales de presión y velocidad de giro se encuentran íntimamente ligadas, por lo que una no puede cambiar sin afectar a la otra. De esta manera, tanto la presión mínima como la velocidad máxima de giro se consideran medidas de la intensidad del ciclón.

Con este análisis se ha llegado a construir un esquema de peligrosidad de ciclones (Figura 2.1.3), el cual puede ser de utilidad en el manejo y acciones por tomar ante la ocurrencia de estos fenómenos para reducir el impacto en las poblaciones a las que afecta, en base a su ubicación de acuerdo a la trayectoria del ciclón.

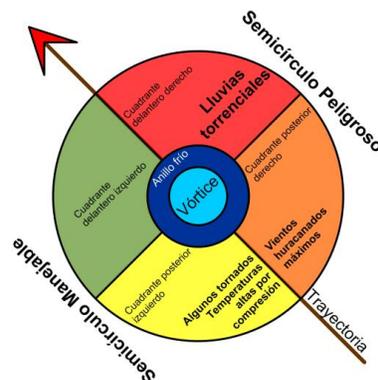


Figura 2.1.3 Semicírculo manejable y semicírculo peligroso en un ciclón.

2.1.2 CLASIFICACIÓN

Existen dos escalas para clasificar la intensidad de los ciclones tropicales, las cuales se basan en la velocidad del viento que producen, una es la Escala Beaufort y la otra la Escala Saffir-Simpson.

La Escala Beaufort, actualmente en desuso, es una medida empírica para la intensidad del viento, basada principalmente en el estado del mar y la fuerza del viento con una orientación naval (Tabla 2.1.1).

Tabla 2.1.1 Escala Beaufort

Fuerza	Término descriptivo	Aspecto del mar	Velocidad del viento (km/h)
0	Calma	Mar en calma	0 – 1
1	Ventolina	Pequeñas olas, pero sin espuma	1 – 5
2	Brisa muy débil	Crestas de apariencia cristalina, sin romper	6 – 11
3	Brisa débil	Pequeñas olas, crestas rompiendo	12 – 19
4	Brisa moderada	Olas de poca altura pero mayor longitud; nudos de espuma, marejadilla	20 – 28
5	Brisa fresca	Olas medianas y alargadas; espuma muy abundante (marejadilla)	29 – 38
6	Brisa fuerte	Se inicia la formación de grandes olas, algunas de ellas rompiendo; mar gruesa	39 – 49
7	Viento fuerte	Oleaje rompiendo con espuma arrastrada en la dirección del viento; mar muy gruesa	50 – 61
8	Viento duro	Olas de altura notable, las crestas despiden espuma; mar arbolada	62 – 74
9	Viento muy duro	Olas muy grandes rompiendo. La espuma empieza a afectar la visibilidad	75 – 88
10	Tormenta	Olas muy grandes con crestas empenachadas. Superficie del mar blanca	89 – 102
11	Ciclón	Olas extraordinariamente altas; visibilidad escasa a causa de la espuma	103 – 117
12	Huracán	Atmósfera y mar completamente llenos de espuma; visibilidad casi nula	> 118

La Escala Saffir – Simpson (Tabla 2.1.2) está basada en la intensidad del viento asociado a depresiones y tormentas ciclónicas y cinco niveles de huracanes. Los vientos que clasifica son sostenidos durante un minuto a una altura estándar de observación meteorológica de 10 m sobre la exposición sin obstáculos. A partir de 2010 ya no se relaciona la marea de tormenta ni la capacidad de producir inundaciones con la categoría de huracán, en virtud de que no existe una estricta relación entre estos dos efectos y la intensidad del viento.

Tabla 2.1.2 Escala Saffir - Simpson

Categoría	Presión central (mb)	Velocidad del Viento (km/h)	Efectos en las costas
Perturbación tropical	1008.1 a 1010	---	---
Depresión tropical	1004.1 a 1008	< 62	Suspensión de actividades recreativas
Tormenta tropical	985.1 a 1004	62.1 a 118	Suspensión de actividades de pesca menor y en pequeños puertos
Huracán categoría 1	980.1 a 985	118.1 a 154	Suspensión de actividades de pesca mayor y operación portuaria en general
Huracán categoría 2	965.1 a 980	154.1 a 178	Daños en puertos y embarcaciones pequeñas
Huracán categoría 3	945.1 a 965	178.1 a 210	Daños en embarcaciones medianas y destrucción de las pequeñas
Huracán categoría 4	920.1 a 945	210.1 a 250	Daños a rompeolas, embarcaciones mayores, erosión de playa y daños a muelles
Huracán categoría 5	< 920	> 250	Colapso de estructuras de protección, daños severos a embarcaciones mayores y muelles

2.1.3 NOMENCLATURA

Cuando el fenómeno tiene la intensidad de tormenta tropical se le asigna un nombre. Esta práctica se empezó a adoptar desde 1953 con el fin de identificar rápidamente a las tormentas en los mensajes de alerta, además de su difusión a la población por los medios de comunicación, ya que con esta medida se logró aumentar el interés por las advertencias y la preparación de la comunidad. Al inicio los nombres adoptados sólo correspondían a nombres de mujer y a partir de 1979 se empezaron a introducir nombres masculinos. En la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) se determinan las listas de nombres de ciclones para cada cuenca oceánica, por lo que no se repiten los nombres entre cuencas, están ordenadas alfabéticamente y se designan en ese orden conforme se van presentando. Para el Mar Caribe, Golfo de México y el Atlántico Norte, así como para el Pacífico Nororiental, se tienen seis listas de nombres, por lo que cada seis años se reciclan. Los nombres se modifican únicamente si una tormenta es tan mortal o costosa que el uso futuro de su nombre en una tormenta diferente sería inapropiado por razones de sensibilidad, por lo que cuando esto sucede, se realiza una reunión anual de los Comités de Ciclones Tropicales de la WMO en la que se borra el nombre de la lista y se selecciona otro para reemplazarlo.

2.1.4 ECUACIONES PARAMÉTRICAS

El modelo paramétrico de ciclones que se describe fue desarrollado por (Silva et al., 2002) y está compuesto por los submodelos de presión, viento y oleaje.

2.1.4.1 CAMPO DE PRESIONES

El campo de presiones se calcula con la siguiente relación:

$$P_r = P_0 + (P_N - P_0)e^{-R/r} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde: P_0 es la presión del centro del huracán; P_r es la presión a una distancia radial r ; P_N es la presión normal; y R es el radio de vientos ciclostróficos máximos. Las unidades de medida de las presiones se encuentran en milibares y las distancias en kilómetros.

2.1.4.2 CAMPO DE VIENTOS

Para la modelación de viento se determinan los valores del gradiente máximo del campo de vientos y la velocidad que alcanza el viento a diez metros sobre el nivel del mar. El gradiente máximo de vientos para un ciclón estacionario se puede determinar a través de la siguiente relación:

$$U_R = 21.8\sqrt{P_N - P_0} - 0.5fR \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde: U_R es el gradiente máximo de vientos (km/h); f es el parámetro de Coriolis, $f \approx 0.525 \sin \phi$; y ϕ es la latitud ($^\circ$). Por otro lado, la velocidad del viento que se evalúa a diez metros sobre el nivel del mar para un ciclón en movimiento y para una distancia r medida desde el centro del ciclón, se establece por:

$$W = 0.886[F_v U_R + 0.5V_F \cos(\theta + \beta)] \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde: W es la velocidad del viento a diez metros sobre la superficie del mar (km/h); V_F es la velocidad de traslación (km/h); $(\theta + \beta)$ representa el ángulo total entre V_F y U_R a una distancia radial r desde el centro del huracán y es positiva en el lado derecho y negativa en el lado izquierdo de la trayectoria del fenómeno (radianes); F_v es un factor de amortiguamiento que se evalúa como la relación de la velocidad del viento en r a través de las siguientes relaciones:

$$F_V = 1 - 0.971 \exp \left[-6.826 \left(\frac{r}{R} \right)^{4.798} \right]; \quad \frac{r}{R} < 1$$

$$F_V = \exp \left\{ A \ln^3 \left(\frac{r}{R} \right) \exp \left[B \ln \left(\frac{r}{R} \right) \right] \right\}; \quad \frac{r}{R} \geq 1$$
(Ec. 2.4)

Donde:

$$A = -0.99[1.066 - \exp(-1.936N_C)]$$
(Ec. 2.5)

$$B = -0.357[1.4456 - \exp(-5.2388N_C)]$$
(Ec. 2.6)

$$N_C = \frac{fR}{U_R}$$
(Ec. 2.7)

2.1.4.3 CAMPO DE OLEAJE

La altura de ola significativa, H_s , para un ciclón en movimiento está dada a través de la siguiente relación:

$$H_s = 0.2887F_H \left(1 - \frac{6.69N_C}{1+10.3N_C-3.25N_C^2} \right) \sqrt{R(P_N - P_0)} \left(1 + \frac{V_F \cos(\theta+\beta)}{2U_RF_V} \right)^2$$
(Ec. 2.8)

Donde: H_s es la altura de ola significativa (m); F_H es el factor de altura de ola que se calcula de acuerdo a la siguiente relación:

$$F_H = A; \quad \frac{r}{R} \leq 1$$

$$F_H = A - \frac{N_C \left(\frac{r}{R} - 1 \right)}{1+B \left(\frac{r}{R} - 1 \right) + \frac{N_C \left(\frac{r}{R} - 1 \right)}{10}}; \quad \frac{r}{R} > 1$$

$$F_H = 0; \quad F_H < 0$$
(Ec. 2.9)

Donde:

$$A = \frac{1+0.8974 \left(\frac{r}{R} - 1 \right)}{1+0.742 \left(\frac{r}{R} - 1 \right) + 0.073815 \left(\frac{r}{R} - 1 \right)^2}$$
(Ec. 2.10)

$$B = \frac{0.37N_C^{2.55}}{0.13+N_C^{2.55}}$$
(Ec. 2.11)

El periodo de ola significativa se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$T_s = 12.1 \sqrt{H_s/g}$$
(Ec. 2.12)

Donde: g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

2.1.4.4 CÁLCULO DEL RUN – UP

Para el cálculo del run-up se utilizó la ecuación propuesta por (Stockdon et al., 2006), en la que:

$$R_U = 1.1 \left[0.35\beta_f \sqrt{H_0 L_0} + \frac{\sqrt{H_0 L_0 (0.563\beta_f^2 + 0.004)}}{2} \right]; \quad Ir \geq 0.3$$

$$R_U = 0.043 \sqrt{H_0 L_0} \quad Ir < 0.3$$
(Ec. 2.13)

Donde: R_U es el run-up (m); β_f es la pendiente de la playa (adimensional); H_0 es la altura de ola en aguas profundas, la cual se considera igual al calculado en la ecuación (2.8) (m); L_0 es la longitud de onda en aguas profundas (m); Ir es el número de Iribarren (adimensional).

La longitud de onda en aguas profundas se calcula con la siguiente ecuación:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Donde: T es el periodo de ola y se considera igual que al calculado en la ecuación (2.12) (s).

El número de Iribarren se calcula con la siguiente expresión:

$$Ir = \frac{\beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Donde: β es la pendiente de la playa (adimensional).

2.1.4.5 SOBREELEVACIÓN POR MAREA DE TORMENTA

La marea de tormenta es la manifestación menos obvia de un ciclón tropical y la que mayor número de muertes produce. Se define como una sobreelevación anormal del nivel del mar debido a factores meteorológicos extremos, como los sistemas ciclónicos y frentes fríos. Esta sobreelevación es generada, principalmente por dos factores: la componente del viento y el efecto de barómetro invertido. La componente del viento es causada por el movimiento rotatorio de un huracán o vientos asociados a frentes fríos, la cual tiende a empujar el agua hacia tierra. La baja presión al centro del huracán causa el efecto de barómetro invertido como resultado de la diferencia de presiones entre el centro del meteoro y la presión ambiental fuera del sistema, este gradiente se equilibra con un incremento en el nivel de la superficie libre del agua. Cuando este fenómeno ocurre en aguas profundas, la marea se desvanece sin ocasionar daño alguno; sin embargo, cuando se presenta cerca de la costa provoca efectos dañinos, como inundación de áreas costeras y erosiones, las cuales pueden tener como consecuencia la pérdida de vidas, daños a estructuras, destrucción de plantíos y vegetación, intrusión salina y afectaciones para la salud (Silva & Mendoza, 2012). De estos dos factores, el que más influye en el apilamiento del agua hacia tierra es la componente del viento, ya que aporta aproximadamente el 95% de la fuerza cortante necesaria para elevar el nivel del mar (Figura 2.1.4).



Figura 2.1.4 Componentes de viento y presión de la marea de tormenta de un huracán (modificada de: <http://www.nhc.noaa.gov/surge/>).

Por su parte, dependiendo de la magnitud de las mareas astronómicas, éstas también pueden ser importantes en la magnitud de la marea de tormenta si el arribo del ciclón coincide con la pleamar.

Otros factores que pueden influir en la magnitud de la marea de tormenta son la anchura y la pendiente de la plataforma continental, ya que una pendiente poco profunda potencialmente podría producir una marea de tormenta mayor a la de una pendiente pronunciada.

Para el cálculo de la marea de tormenta se empleó el modelo propuesto por la Universidad de Cantabria (G.I.O.C., 2000), en el cual se consideran por separado los efectos de la presión atmosférica y la velocidad del viento.

Para el cálculo de la sobreelevación debida a la presión se utilizó la siguiente expresión:

$$S_{VP} = 0.01026(P_n - P_c)(1 - e^{-R/r}) \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Donde: S_{VP} es la sobreelevación debida al gradiente de presiones (m); P_c es la presión central del huracán (mb); P_n es la presión en el punto de interés (mb); R es el radio ciclostrofico del huracán (km); y r es la distancia del centro del ciclón al punto donde se desea conocer la sobreelevación (km).

La sobreelevación debida a la acción del viento, en su forma más simplificada, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\eta_v = \frac{Kw^2x}{g(h_1 - h - \eta_v)} \ln\left(\frac{h_1}{h + \eta_v}\right) \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde: η_v es la sobreelevación debida al viento (m); K es un coeficiente experimental adimensional (3.3×10^{-6}); w es la componente de la velocidad del viento perpendicular a la costa (m/s); h es la profundidad del punto en el que se desea conocer la sobreelevación (m); h_1 es la profundidad en la que se inicia la sobreelevación debida al viento (m); x es la distancia horizontal entre h y h_1 (m).

2.1.4.6 ESTIMACIÓN DE LA PRESIÓN CENTRAL DE CICLONES EN EL PACÍFICO Y ATLÁNTICO MEXICANOS

Los modelos paramétricos de presión, viento y oleaje que se reportan en la literatura generalmente dependen de la posición del centro del huracán, presión central, valor de presión de la última isobara cerrada y del radio ciclostrofico, conocido también como radio de máximo gradiente. Debido a que no todos los reportes meteorológicos dan a conocer el valor de la presión central, el modelo HURAC fue diseñado para eliminar dicha deficiencia de información utilizando el criterio de (Silva et al., 2002); en el cual se proponen dos curvas para estimar la presión central en función de la velocidad superficial máxima del viento, una para el océano Atlántico y la otra para el océano Pacífico, que son respectivamente:

$$P_0 = 1019.08 - 0.182V_v - 0.0007175V_v^2 \quad (\text{Ec. 2.18})$$

$$P_0 = 1017.45 - 0.1437V_v - 0.00088V_v^2 \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde: P_0 es la presión central del huracán (mb); y V_v es la velocidad máxima del viento promedio en un minuto (km/h).

2.1.4.7 ESTIMACIÓN DEL RADIO DEL OJO DEL CICLÓN PARA LAS COSTAS MEXICANAS

Actualmente, todos los parámetros que se requieren para la modelación de la interacción oleaje con viento ciclostrófico pueden encontrarse en muchos boletines climatológicos, a excepción del radio ciclostrófico que propiamente nunca se reporta. Después de analizar el comportamiento de 26 huracanes, (Silva et al., 2002) proponen la siguiente relación:

$$R = 0.478P_0 - 413.05 \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde: el radio ciclostrófico, R , está dado en kilómetros y puede tomar valores máximo y mínimo de 38 y 15 respectivamente para presiones centrales superiores a 880 mb.

2.1.4.8 CÁLCULO SIMPLIFICADO DE DISTANCIAS EN SISTEMA MÉTRICO EN FUNCIÓN DE POSICIONES GEOGRÁFICAS

Los avisos meteorológicos y la ubicación de los puntos de interés para estimar los campos de presiones y viento se reportan, generalmente, en coordenadas geográficas, pero su utilización en la práctica ingenieril es en unidades métricas; por ejemplo en kilómetros para definir las distancias. Para omitir la transformación de coordenadas, (Ruiz et al., 1998) proponen utilizar la siguiente ecuación para calcular el radio r :

$$r = |E_x \text{acos}[\text{sen}(\phi_i) \text{sen}(\phi_c) + \text{cos}(\phi_i) \text{cos}(\phi_c) \text{cos}(\lambda_c - \lambda_i)]| \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Donde: λ es la longitud (grados); ϕ es la latitud (grados); i e c indican las posiciones del punto de interés y del centro del ciclón, respectivamente; E_x es el radio de la Tierra que para cualquier latitud se determina como:

$$E_x = (E_{ra}^2 E_{re}) / [(E_{ra} \cos \phi)^2 + (E_{re} \text{sen} \phi)^2] \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Donde: E_{ra} es el radio de la Tierra en el ecuador (6,378.135 km); E_{re} es el radio polar de la Tierra (6,356.75 km).

El ángulo que se circunscribe entre el centro del ciclón y la velocidad del viento en el punto de interés, β , se puede evaluar como:

$$\beta = \text{atan}[(\lambda_i - \lambda_c) / (\phi_i - \phi_c)] \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Para obtener los ángulos de incidencia del viento y del oleaje se utiliza una formulación análoga a la ecuación (2.23) donde se sustituyen los valores de las latitudes y longitudes por las componentes del viento (u oleaje) evaluadas a una distancia $\Delta\phi$ y $\Delta\lambda$, respectivamente.

2.2 FRENTE FRÍOS

Un frente es una franja de separación entre dos masas de aire de diferentes temperaturas. Su frecuencia es muy variable y depende de su origen, la mayoría vienen del océano Pacífico (origen marítimo polar), algunos provienen del norte (polar continental) y otros tienen origen ártico continental.

En el periodo de noviembre a marzo, los frentes cruzan el territorio mexicano en el Istmo y reciben el nombre de Tehuantepecos, que son vientos fuertes que ocasionan anomalías térmicas en el golfo de Tehuantepec.

Cuando las masas polares atraviesan el Golfo de México dan origen a los fenómenos conocidos como nortes a lo largo del litoral, siendo frentes fríos acompañados de fuertes vientos del norte que producen tormentas con lluvias intensas, generalmente de origen orográfico en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche.

El paso de algunos frentes fríos puede producir nevadas en las montañas de México, al registrarse muy bajas temperaturas con presencia de humedad.

2.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS FRENTES

Los frentes se clasifican de acuerdo con el sentido de su movimiento en:

- ❖ Frente frío
- ❖ Frente cálido
- ❖ Frente ocluido
- ❖ Frente estacionario

2.2.1.1 FRENTE FRÍO

El frente frío es una franja de inestabilidad que ocurre cuando una masa de aire frío se acerca a una masa de aire caliente. El aire frío, siendo más denso, genera una cuña y se mete por debajo del aire cálido y menos denso. Su trayectoria es de noroeste a sureste. En la Figura 2.2.1 se puede apreciar la estructura y simbología de este tipo de frente.

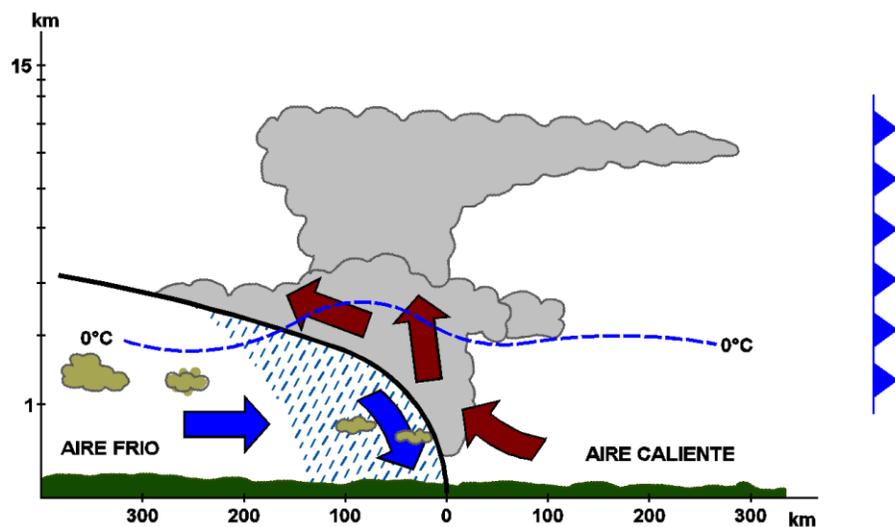


Figura 2.2.1 Izquierda: Estructura del frente frío; Derecha: Simbología de frente frío (modificado de: <http://ametse.org/foro/index.php?topic=71.0>).

2.2.1.2 FRENTE CÁLIDO

El frente cálido es la parte frontal de una masa de aire tibio que avanza para reemplazar a una masa de aire frío que retrocede. Generalmente tras su paso la temperatura y la humedad aumentan, la presión baja y aunque el viento cambia no es tan pronunciado como cuando pasa un frente frío. La precipitación en forma de lluvia, nieve o llovizna se encuentra generalmente al inicio de un frente superficial, así como las lluvias convectivas y las tormentas. La neblina es común en el aire frío que antecede a este tipo de frente, aunque algunas veces llega a generarse en la zona de aire caliente. En la Figura 2.2.2 se presenta la estructura y simbología de este frente.

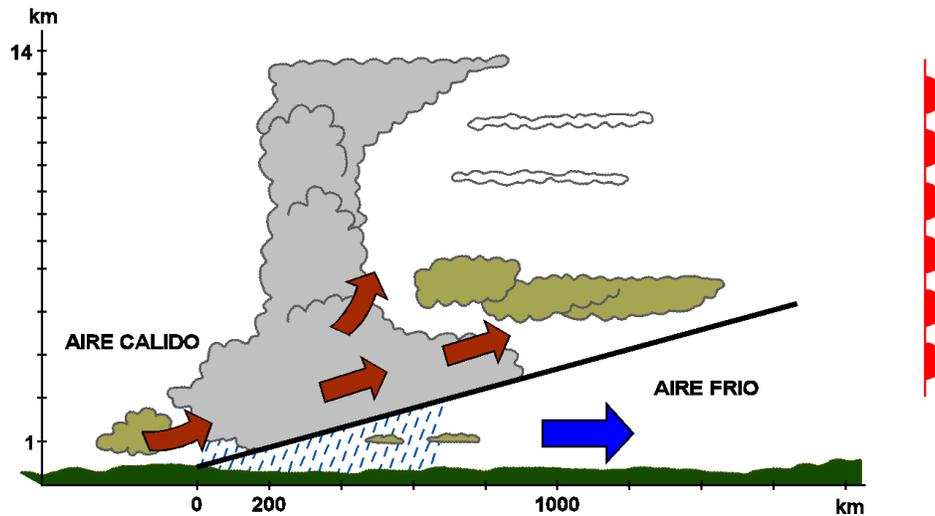


Figura 2.2.2 Izquierda: Estructura del frente cálido; Derecha: Simbología del frente cálido (modificado de: <http://ametse.org/foro/index.php?topic=71.0>).

2.2.1.3 FRENTE OCLUIDO

Un frente ocluido se forma donde un frente caliente móvil más lento es seguido por un frente frío con desplazamiento más rápido. El frente frío con forma de cuña alcanza al frente caliente y lo empuja hacia arriba. Los dos frentes continúan moviéndose uno detrás del otro y la línea entre ellos es la forma el frente ocluido. Así como los frentes inmóviles, se puede dar una gran variedad de condiciones climáticas a lo largo de este tipo de frente, pero por lo general, son asociados con los estratos de nubes y la precipitación ligera. Los frentes ocluidos se forman, generalmente, alrededor de áreas de baja presión y cuando estas están debilitándose.

Existen dos categorizaciones de este tipo de frente: fríos y cálidos. En los frentes ocluidos fríos el aire detrás del frente ocluido es el más frío, formándose la cuña del frente frío y encima de esta la cuña del frente cálido. En el caso del frente ocluido cálido, la masa de aire delante del frente ocluido es más fría que la masa de aire detrás de este, por lo que predomina la cuña del frente cálido y sobre esta se forma la cuña del frente frío empujando el aire caliente encima de ambos. En la Figura 2.2.3 se muestra la estructura y simbología de este frente.

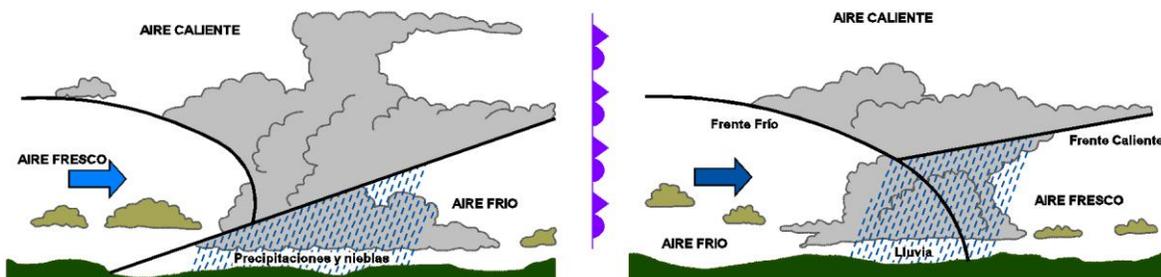


Figura 2.2.3 Izquierda: Estructura del frente ocluido cálido; Centro: Simbología del frente ocluido; Derecha: Estructura del frente ocluido frío (modificado de: <http://ametse.org/foro/index.php?topic=71.0>).

2.2.1.4 FRENTE ESTACIONARIO

Los frentes estacionarios tienen la misma estructura y comportamiento que un frente cálido, con la diferencia de que no se desplazan. En la Figura 2.2.4 se muestra la estructura y simbología de este frente.

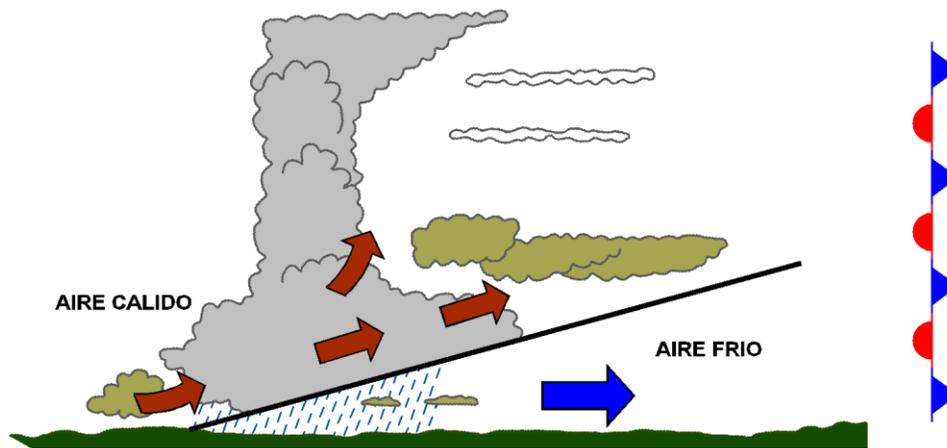


Figura 2.2.4 Izquierda: Estructura de un frente estacionario; Derecha: Simbología de un frente estacionario.

2.2.2 ECUACIONES CARACTERÍSTICAS

Este fenómeno es más simple que el fenómeno de huracanes, por lo que su representación matemática se simplifica al no intervenir procesos de vórtice en su comportamiento. Se consideran la velocidad y dirección de los vientos generados, información que se puede obtener de bases de datos como la del (ECMWF, 2014) en la que se tiene información puntual de parámetros atmosféricos alrededor del mundo a diferentes escalas espaciales y temporales.

Para la evaluación del fenómeno se calculó el run-up como se indica en las ecuaciones (2.13) a (2.15) y la marea de tormenta, influenciada únicamente por el efecto del viento, utilizando para su cálculo la ecuación (2.17), con la diferencia de que ahora x es la distancia entre el punto con información de vientos y el punto de estudio.

2.3 TSUNAMIS

Un tsunami es una serie de olas gigantes producidas por una perturbación bajo el agua o la costa, tal como un terremoto o una erupción volcánica. Estas series de perturbaciones pueden durar varias horas, con 20 o 30 minutos entre olas. Los tsunamis pueden ocurrir en todos los océanos, pero son más comunes en el Pacífico, donde se han registrado más de 200 tsunamis en los últimos cien años. Las olas de un tsunami parecen ser normales en aguas profundas, pero conforme se van acercando a la costa se peraltan logrando convertirse en algunas ocasiones en gigantescas murallas de agua que pueden rebasar los 30 m de altura y con velocidades que llegan a alcanzar los 1,000 km/h en aguas profundas reduciéndose conforme avanzan hacia la costa, teniendo una capacidad altamente destructiva.

El periodo de los tsunamis (de minutos a horas) es muy diferente al del oleaje (de segundos a minutos), y aunque más cercano, es menor que el de las mareas astronómicas o meteorológicas (varias horas). Las características principales de un tsunami se muestran en la Figura 2.3.1.

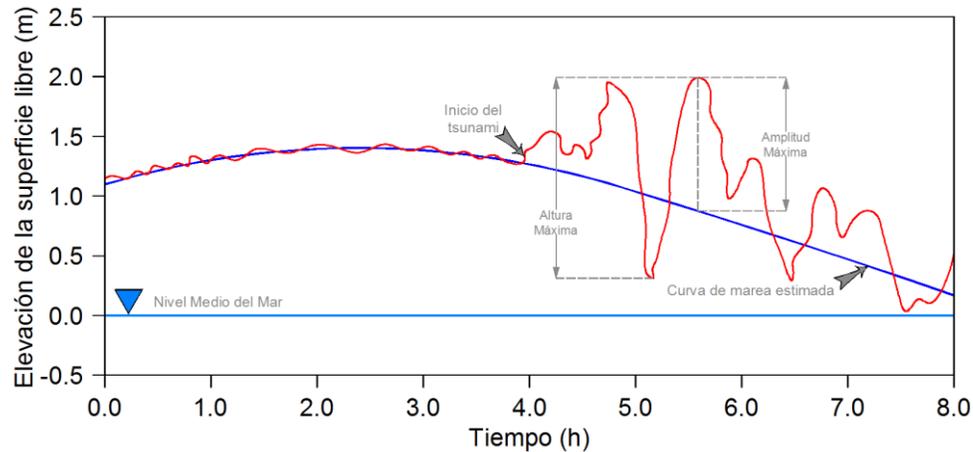


Figura 2.3.1 Características de un tsunami (modificada de: (Silva & Mendoza, 2012)).

El estudio de los tsunamis requiere la interacción de varias disciplinas. Su generación se relaciona con procesos geológicos y geofísicos, su propagación concierne a la oceanografía, hidráulica marítima e hidrodinámica y finalmente su comportamiento en la costa, como el run-up y la resonancia en bahías, es materia de la ingeniería costera. Además, los riesgos que representan los tsunamis en una región determinada deben ser estudiados tanto para la planeación demográfica y de infraestructura, como para la protección civil.

La forma en la que se modifica inicialmente la superficie libre del agua tras la ocurrencia de un tsunami depende del mecanismo generador del mismo. Los más estudiados son los sismos y los deslizamientos debido a que son los causantes de la mayoría de estos fenómenos.

2.3.1 ASPECTOS GENERALES DE SISMOLOGÍA

La superficie terrestre se compone de placas tectónicas separadas (Figura 2.3.2) que debido a su movilidad chocan entre ellas. Una de las formas más comunes en que colisionan es el mecanismo llamado subducción, en la que una de las placas se inserta debajo de otra.

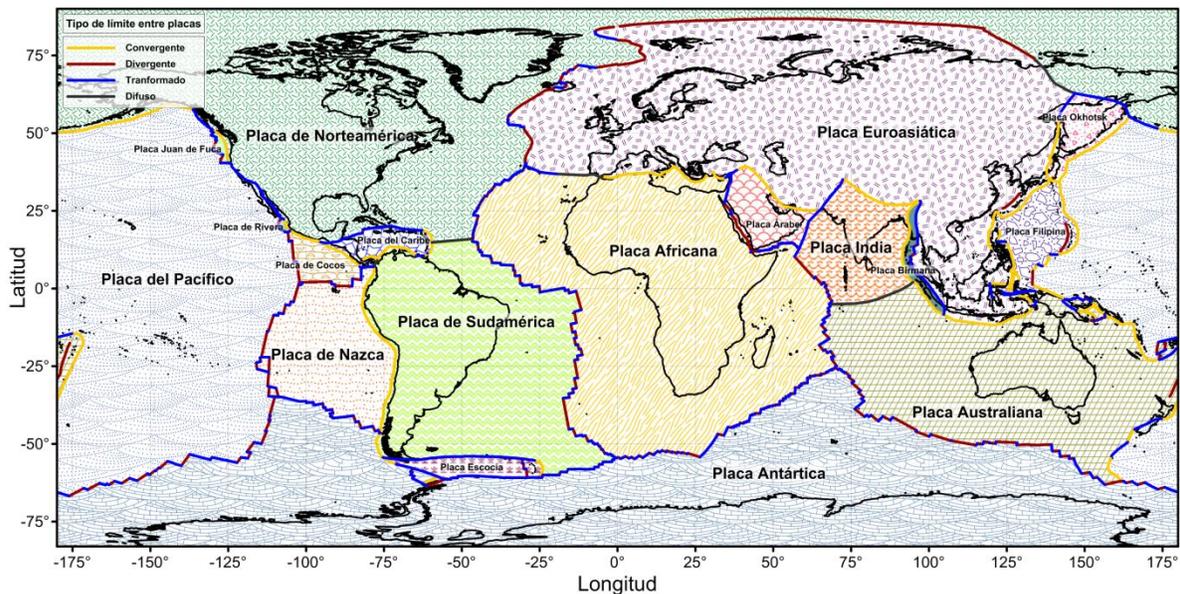


Figura 2.3.2 Placas tectónicas de la Tierra.

En la Figura 2.3.3 se muestra la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Plataforma Continental de Norteamérica, lo cual sucede frente a las costas mexicanas de Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

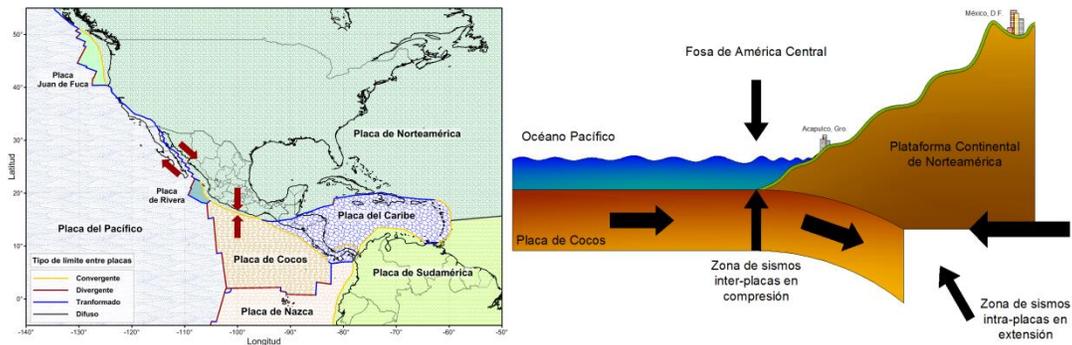


Figura 2.3.3 Izquierda: Placas tectónicas en México; Derecha: Subducción de la Placa de Cocos bajo la plataforma Continental de Norteamérica.

Durante el movimiento de las placas, la frontera entre ellas se mantiene temporalmente inmóvil, a costa de una flexión de las mismas. Un sismo ocurre cuando se vence la fricción estática que mantiene inmóvil la frontera, liberándose parte de la energía acumulada en la flexión. Un sismo generador de tsunami ocurre mediante este mecanismo y el desplazamiento experimentado por la superficie de la corteza terrestre es llamado movimiento cosísmico (Figura 2.3.4).

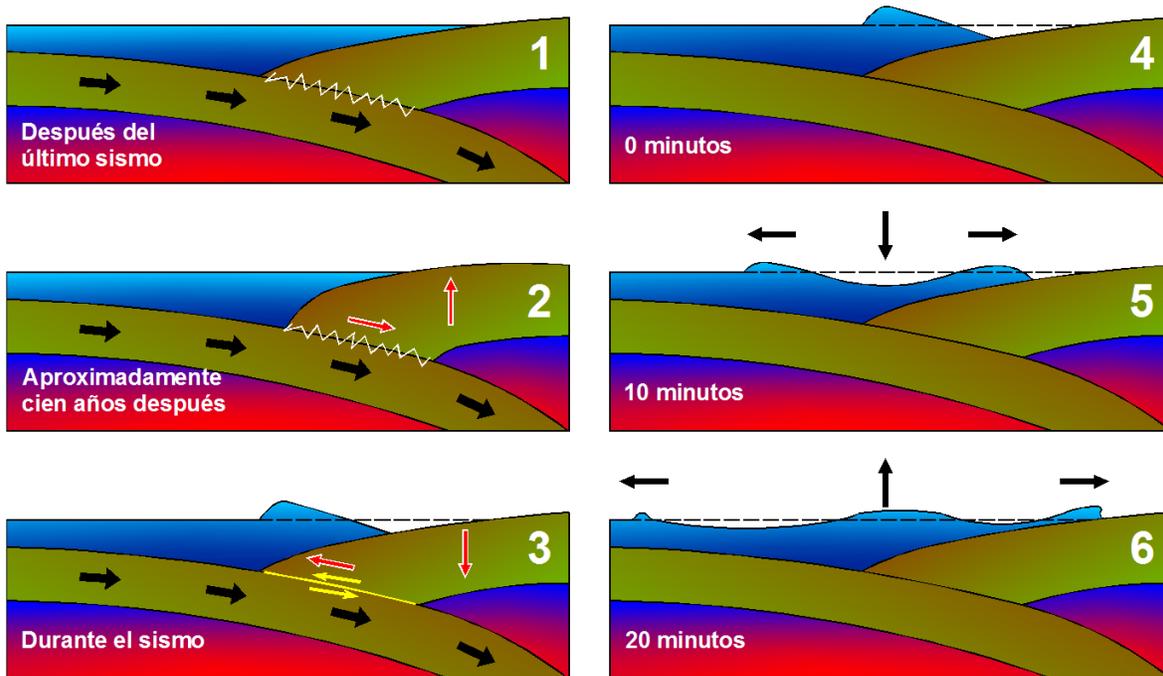


Figura 2.3.4 Movimiento cosísmico.

En general, puede suponerse que la superficie libre del agua reproduce la forma de la componente vertical del desplazamiento cosísmico durante la duración del terremoto. La propagación del tsunami en forma de ondas se debe a que la superficie libre del agua después de haberse modificado trata de encontrar de nuevo su nivel de reposo y durante ese proceso genera un vaivén vertical en el punto de generación. Esto explica por qué un tsunami se compone en realidad de

varias ondas superpuestas. Las ondas emitidas viajan alejándose de su lugar de origen y se esparcen por todo el cuerpo de agua.

El máximo desplazamiento cosísmico puede estimarse a partir de la magnitud del sismo. Si la totalidad del movimiento se desarrolla verticalmente, entonces la estimación arrojará la máxima amplitud posible del tsunami generado. Solo 20% de los sismos oceánicos generan tsunamis, que se aproximan en magnitud a lo estimado por la siguiente expresión (Geist & Dmowska, 1999):

$$A = 10^{0.5M_s - 3.3} \quad \text{Ec. (2.24)}$$

Donde: A es la amplitud del tsunami (m) y M_s la magnitud del sismo en la escala de Richter. Esta expresión es válida para un rango de M_s entre 5.5 y 8 grados y debe destacarse que no es la única ni es general y solo debe utilizarse para estimaciones preliminares.

2.3.2 ESCALAS DE MAGNITUD DE LOS TSUNAMIS

2.3.2.1 ESCALA DE IMAMURA-LIDA

La escala tradicional de magnitud de los tsunamis es la llamada escala “ m ” de Imamura-lida. Aunque su definición original era descriptiva, su valor se aproxima a:

$$m = \log_2 R_u \quad \text{Ec. (2.25)}$$

Donde: R_u es la altura máxima de run-up, (lida et al., 1967). Esta escala es similar a la intensidad de los sismos y es especialmente conveniente para tsunamis de tiempo atrás, de los que no se cuenta con registro de instrumentación.

(Hatori, 1979) extendió la escala de Imamura-lida para incluir más datos del tsunami. Consideró los efectos de la distancia respecto al punto de generación, d_{g-m} , y construyó una gráfica de R_u contra $\sqrt{d_{g-m}}$ en escala log-log. La gráfica, y por consiguiente la escala, se ajustó de tal forma que para los datos $R_u = 0.5$ m y $d_{g-m} = 1000$ km, la magnitud del tsunami sea $m = 3$.

Esta escala no es lineal; un incremento unitario de m representa una quintuplicación de la energía, lo cual se expresa con la siguiente ecuación:

$$m = 3 + \log[(R_u/0.5)\sqrt{d_{g-m}/1000}]/\log\sqrt{5} \quad \text{Ec. (2.26)}$$

Donde: R_u está en m y d_{g-m} en km. Esto indica que la disminución de la altura del tsunami respecto a la distancia a su punto de origen es proporcional a $(d_{g-m})^{-1/2}$ lo cual también puede deducirse con teorías de propagación de oleaje.

2.3.2.2 ESCALA DE SOLOVIEV

(Soloviev, 1970) consideró que la escala m de Imamura-lida era más una escala de intensidad de sismo que una magnitud de tsunami. También diferenció a la máxima altura del tsunami, H , de la altura media, \bar{H} . Definió a la intensidad del tsunami, i , como:

$$i = \log_2(\sqrt{2}\bar{H}) \quad \text{Ec. (2.27)}$$

Comparando esta escala con la de Imamura-lida, se intuye que la altura media del tsunami es $1/\sqrt{2}$ veces la altura máxima. La intensidad máxima i es la costa más cercana a la fuente se utiliza para cuantificar la generación del tsunami.

2.3.2.3 ESCALA DE ABE

Para un tsunami transpacífico la magnitud es, (Abe, 1979):

$$Mt = \log H + C + 9.1 \quad \text{Ec. (2.28)}$$

Para un tsunami regional es, (Abe, 1981):

$$Mt = \log H + \log d_{g-m} + 5.8 \quad \text{Ec. (2.29)}$$

Donde: H es la máxima altura del tsunami, C el factor de distancia que depende de la localización de la fuente y de los puntos de observación, y d_{g-m} la distancia al punto de generación en kilómetros. Las expresiones (2.28) y (2.29) fueron calibradas con la escala sísmica de Richter. La ecuación (2.29) indica que para Mt constante, la altura H decrece con $1/d_{g-m}$, lo cual difiere de la hipótesis utilizada para la escala m de Imamura-lida y es válido solo para tsunamis regionales.

2.3.3 MODELO PARAMÉTRICO DE GENERACIÓN DE TSUNAMIS

Para el cálculo del run-up generado por olas de tsunami es aplicable la ecuación (2.13). Sin embargo, para el cálculo de la altura de ola que se podría esperar se utilizó el modelo paramétrico propuesto por (Okal & Synolakis, 2004), basado en observaciones de altura máxima en varios eventos de tsunami importantes, propone una expresión que ajusta de manera aproximada a las mediciones a lo largo de la costa de afectación. La expresión es:

$$\zeta(y) = [b/(y/a)^2 + 1] \quad \text{Ec. (2.30)}$$

Donde: $\zeta(y)$ es la altura de ola, y es la distancia de la costa, a y b son factores que se obtienen de acuerdo a las características del sismo. El parámetro b tiene que ver con la altura máxima de ola y el parámetro a con la distribución de alturas en la costa.

Un valor adicional que está relacionado con los parámetros a y b es el dato I_2 definido como:

$$I_2 = b/a \quad \text{Ec. (2.31)}$$

Las expresiones para obtener los parámetros indicados son resultado de un proceso de ajuste de algunos eventos en México y Centroamérica y las expresiones resultantes se muestran a continuación:

$$b = p_1 Mo^2 + p_2 Mo + p_3 L^2 + p_4 L + p_5 h^2 + p_6 h + p_7 H^2 + p_8 H + p_9 \tan^2 \beta + p_{10} \tan \beta + p_{11} \quad \text{Ec. (2.32)}$$

$$I_2 = p_1 Mo^2 + p_2 Mo + p_3 L^2 + p_4 L + p_5 h^2 + p_6 h + p_7 H^2 + p_8 H + p_9 \tan^2 \beta + p_{10} \tan \beta + p_{11} \quad \text{Ec. (2.33)}$$

Donde: Mo es el momento sísmico (dinas centímetro), L es la distancia mínima del epicentro a la costa (km), h es la profundidad del hipocentro (km), H es la profundidad del agua (m), $\tan \beta$ es la pendiente media de la batimetría a partir de la costa y p_i son constantes de ajuste de las ecuaciones cuyos valores se indican en la Tabla 2.3.1.

Dada la magnitud del sismo, M , el momento sísmico se obtiene con la expresión de momento de (Hanks & Kanamori, 1979), la cual se representa a continuación:

$$Mo = 10^{(1.5M+16.1)} \quad \text{Ec. (2.34)}$$

Tabla 2.3.1 Valores de las constantes p_i para las expresiones b e I_2

Constante	b	I_2
p_1	-9.099E-58	-4.999E-60
p_2	9.919E-29	4.852E-31
p_3	7.250E-06	2.550E-07
p_4	-7.795E-03	-2.047E-04
p_5	-3.071E-04	2.857E-07
p_6	-9.143E-03	-9.571E-05
p_7	-2.500E-08	-7.500E-11
p_8	3.990E-04	1.655E-06
p_9	3.889E+02	3.045E+00
p_{10}	-6.124E+01	-4.430E-01
p_{11}	3.456E+00	5.108E-02

2.3.3.1 CONSIDERACIONES DEL MODELO

La manera de generar las variables para las ecuaciones anteriores es mediante la propuesta de una lista de eventos que contenga la magnitud del sismo y las coordenadas del hipocentro. Además se debe cumplir que los epicentros se localicen en el mar, las magnitudes de los sismos sean mayores a 6 grados en la escala de Richter, la profundidad del hipocentro sea menor a 60 km y la distancia máxima de afectación sea de 600 km. Adicionalmente se debe tener una lista de puntos definidos en la costa para su análisis. En la Figura 2.3.5 se muestra un esquema con la definición y consideraciones para la aplicación de este método.

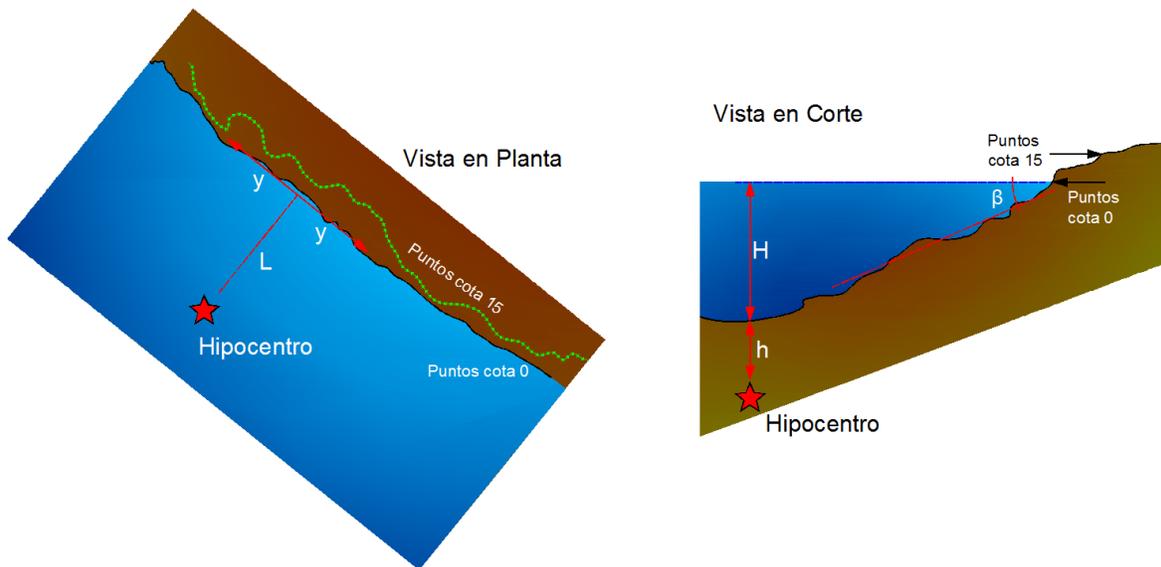


Figura 2.3.5 Definición de variables para la aplicación del modelo paramétrico.

3. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LAS COSTAS

La costa es el resultado de un equilibrio dinámico entre diversos procesos marinos y terrestres, por lo tanto es la interfase que existe entre los continentes o islas y el mar. Los procesos que se dan en esta interfase no son constantes ni permanentes y por ello su paisaje es cambiante. El clima, el viento, el oleaje, las mareas, las corrientes, los aportes de ríos, la actividad biológica y las actividades humanas, son factores que modifican las costas, quedando la velocidad de cambio condicionada por las características geológicas del sitio y la dinámica de regiones aledañas. El oleaje es el principal factor en la formación de playas, el cual, sumado a los efectos de las mareas astronómicas y meteorológicas, tsunamis y viento, principalmente, moldea de manera dinámica las playas, que pueden ser de sedimentos que van desde finos, como limos y arenas, hasta más gruesos, como cantos rodados, o una combinación de estos (Silva & Mendoza, 2012).

Una caracterización es la determinación, como su nombre lo indica, de las particularidades del elemento a estudiar. En este sentido la caracterización de las costas requiere de la revisión de parámetros que permitan evaluar los elementos que gobiernan su dinámica, como pueden ser: el oleaje, las mareas, el viento, la pendiente, su geomorfología, su biodiversidad, el tipo de material que las forma, el desarrollo económico y urbano que albergan, la presión antrópica, entre otros. Debido a esto, y por la extensión de sus litorales, muchos han sido los esfuerzos que se han realizado intentando clasificar y caracterizar las costas del país (Silva & Mendoza, 2012).

Según datos oficiales del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), México es un país localizado en el extremo meridional de América del Norte. Sus coordenadas geográficas extremas son: al Norte 32°43'06" latitud norte (extremo noroeste del poblado de los Algodones, Valle de Mexicali); al Sur 14°32'27" latitud norte (desembocadura del río Suchiate, frontera con Guatemala); al Este 86°42'36" longitud oeste (extremo suroeste de Isla Mujeres en el Caribe Mexicano); y al Oeste 118°27'24" longitud oeste (Punta Roca Elefante de la isla de Guadalupe, en el Océano Pacífico). La superficie aproximada del país es de 1'964,375 km², de los cuales 1'959,248 km² son superficie continental, 5,127 km² corresponden a superficie insular y 49,510 km² a aguas nacionales. El mar patrimonial está constituido por dos regiones: el mar territorial y la zona económica exclusiva, y tiene una extensión de 2.7 millones de km². En la Zona Económica Exclusiva se pueden contar más de tres mil islas, de las cuales solo 144 están habitadas por aproximadamente el 0.6% de la población nacional, siendo las islas del Carmen en Campeche y Cozumel las que cuentan con mayor población. De las 32 entidades federativas, 17 tienen colindancia con el mar.

De acuerdo con (Ortíz & de la Lanza, 2006), México cuenta con una línea de costa de 23,715 km, sin considerar la anchura correspondiente a las bocas lagunares (0.84%), de las cuales 43.62% (10,544.45 km) corresponden a su costa frontal; 45.11% (10,697.94 km) a su costa interior y 11.27% (2,673.12 km) a la línea de costa de sus islas. Del litoral frontal, 75.73% (7,984.66 km) conciernen a costas de arenas (arena y grava), 22.38% (2,359.79 km) a costas rocosas (acantilados y terrazas) y 1.89% (199.61 km) a bocas lagunares. De la costa interior o barras protegidas, las barras interiores representan 37.56% (4,017.72 km) y costa interior 62.44% (6,680.21 km).

El litoral de la vertiente del Océano Pacífico mexicano tiene una longitud de costa frontal (expuesta a mar abierto) de 7,775.2 km, de los cuales 5,426.6 km (69.769%) corresponden a playas de arena, 2,213.3 km (28.466%) a costas rocosas y 137.2 km (1.765%) a anchuras de bocananas. La margen interior continental suma una longitud total de 5,797.34 km, de los cuales 2,222.65 km

(38.34%) corresponden a la parte interior de las barras y 3 574.69 km (61.66%) a la costa de los cuerpos interiores.

El litoral de la costa del Golfo de México y Mar Caribe mexicanos tiene una longitud de costa frontal de 2 768.838 km, de los cuales 2 559.97 km (92.46%) corresponden a playas de arena, 146.495 km (5.29%) a costas rocosas y 62.373 km (2.25%) a anchuras de bocanas. La margen interior continental suma una longitud total de 4 900.247 km, de los cuales 1 795.075 km (36.63%) corresponden a la parte interior de las barras y 3 105.172 km (63.37%) a la costa de los cuerpos interiores.

3.1 CLASIFICACIÓN DE LA COSTA

Algunas de las clasificaciones que hasta la fecha se han realizado con el intento de clasificar las costas de México son las que a continuación se mencionan.

(Lugo-Hubp & Fernández-Arteaga, 1990) hicieron una clasificación morfo-hidrográfica de la costa mexicana, destacando dentro de las formas del relieve oceánico: plataforma continental, talud continental, cañones submarinos, borde continental, dorsales oceánicas, planicie abisal y trinchera.

Otra clasificación de las zonas marinas está en función de la influencia de las corrientes oceánicas, como son la corriente del Lazo, la corriente del Caribe, la corriente de California y la corriente de Costa Rica.

Una clasificación más es la elaborada por (Moreno-Casasola et al., 1998) que toma en cuenta la cobertura vegetal de las dunas costeras, dividiendo al país en cinco regiones florísticas: Pacífico Norte, Golfo de California, Pacífico Sur, Golfo de México y Península de Yucatán. Esta clasificación es de ayuda en análisis de vulnerabilidad costera, ya que como se menciona en (Seingier et al., 2009), las dunas costeras ofrecen protección natural contra inundaciones y eventos de origen marino, y la pérdida de cobertura vegetal en las mismas tiene implicaciones en la vulnerabilidad de desastres, misma que aumenta cuando un sitio es naturalmente peligroso y se modifica para instalar infraestructura urbana.

La regionalización más reciente y la más completa para fines de ingeniería es la propuesta por (Ortíz & de la Lanza, 2006), ya que dentro de los aspectos que toma en cuenta se citan el clima, los procesos oceanográficos y costeros, la actividad tectónica, geología y relieve, entre otros, identificando así 14 regiones en México, de las cuales cinco se ubican en el Golfo de México y Mar Caribe y las otras nueve en el Pacífico mexicano. En la Tabla 3.1.1 se hace mención de estas regiones.

Otra clasificación es la hecha por CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), contando con el apoyo del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), The Nature Conservancy (TNC), la Agencia Internacional para el Desarrollo de la Embajada de Estados Unidos (USAID), el Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (FMCN) y la participación del Instituto de Ecología como autoridad normativa gubernamental, en la que se identificaron regiones prioritarias del país, estableciéndolas bajo un criterio de importancia en la biodiversidad, considerando para ello características físicas y bióticas. Como resultado se identificaron 11 ecorregiones marinas, definidas como unidades geográficas que comparten una flora, fauna y ecosistemas característicos.

Una clasificación más que se ha realizado es la que considera las regiones fisiográficas, que son regiones con un mismo origen geológico, con tipos de rocas similares en la mayor parte de su

extensión y con una geomorfología en particular, de la que se han identificado 15 provincias fisiográficas.

Tabla 3.1.1 Regiones en las que Ortiz y de la Lanza clasifican las costas de México

Vertiente	Zona	Región
Costas del Pacífico	Costa occidental de la Península de Baja California	01 Costa del Pacífico noroccidental
		02 Costa suroccidental de la Península de California
	Golfo de California	03 Costa del alto golfo
		04 Costa oriental de la Península de California
		05 Costa oriental del golfo interior
	Pacífico tropical mexicano	06 Costa centro occidental del Pacífico mexicano
		07 Costa suroccidental del Pacífico mexicano
		08 Costa del golfo de Tehuantepec
		09 Costa meridional del pacífico mexicano
Costas del Atlántico	Golfo de México	10 Costa nororiental
		11 Costa centro oriental
		12 Costa centro sur
	Caribe mexicano	13 Costa noroccidental de la Península de Yucatán
		14 Costa del mar Caribe

3.2 MEDICIÓN Y MONITOREO DE LAS COSTAS

Uno de los principales problemas que investigadores y proyectistas enfrentan es conseguir información de calidad para el desarrollo de modelos que permitan evaluar y tener un mejor entendimiento de los fenómenos naturales y la creación de herramientas para el desarrollo de estrategias de prevención y control de desastres, así como el mejoramiento de los planes de desarrollo urbano. Esto se debe a que actualmente en México son pocas las instituciones que realizan mediciones de parámetros marinos, la falta de instalaciones de medición, la falla de éstas ante eventos extremos, y el difícil acceso a la información disponible.

3.2.1 OLEAJE

En México, actualmente solo se cuenta con 43 boyas para el monitoreo marino, las cuales son las siguientes (CONABIO, 2014):

La Boya Holbox, a cargo del CINVESTAV – Mérida, la cual cuenta con sensores oceanográficos, de calidad del agua y meteorológicos cuya información generada es transmitida cada hora al satélite GOES-13, recibida en la SEMAR y el SMN y publicada en la Web.

La Boya CINVESTAV – Mérida a cargo de la misma institución y ubicada al norte de Telchac Puerto, en Yucatán, sobre la Plataforma de Yucatán.

Las Boyas Metoceánicas CICESE – PEMEX, operadas por el CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada), son tres boyas metoceánicas en el Golfo de México que miden y transmiten al CICESE cada hora vía satélite datos meteorológicos y oceanográficos.

Las Boyas RENEOM – IMT, son un conjunto de 36 boyas que conforman la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM) que registran de forma continua las condiciones de oleaje, variaciones del nivel del mar y variables meteorológicas cuya información es recabada y transmitida de manera automatizada a la División de Ingeniería de Puertos y Costas del Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte para su

procesamiento, análisis, interpretación, integración en una base de datos, así como para la difusión de la misma en boletines de oleaje en la página http://galileo.imta.mx/boletin_oleaje.php.

La Boya Mazatlán – UNAM, a cargo del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM y en colaboración con la Unidad Académica de Mazatlán, Sinaloa, adjunto al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), próximamente pondrá en operación esta boya que medirá datos meteorológicos y oceanográficos en tiempo real.

La Boya II-ICMyL – Puerto Morelos, a cargo del Instituto de Ingeniería y de la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales (UASA) en Puerto Morelos, Quintana Roo, adjunto al ICMyL, ambos de la UNAM, tiene esta boya en operación cerca de sus instalaciones en Puerto Morelos.

A pesar de contar con estas boyas, muchas veces la información que reportan es de difícil acceso o no se encuentran en funcionamiento, por lo para la obtención de datos se recurre a las boyas de la NOAA, que cuenta con 1,207 estaciones alrededor del mundo para la medición en tiempo real de las condiciones oceánicas y cuyos datos se pueden obtener libremente.

Con la información y reanálisis de los datos proporcionados por estas boyas se ha logrado conformar dos bases de datos con información del oleaje nacional. Una fue desarrollada en 2004 y se conoce como el Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano (ATLOOM), a cargo de la División de Ingeniería de Puertos y Costas del IMT, en el que se definen las condiciones del oleaje medio y extremal así como los principales parámetros estadísticos de 23 puntos en el Golfo de México y Mar Caribe y 38 en el Océano Pacífico en el periodo comprendido del 1° de enero de 1958 al 31 de diciembre de 2001. Sin embargo el acceso a la información de este atlas es muy limitado y, de manera pública, solo se encuentra disponible la información de 1958 y no se ha validado con datos medidos en campo. La otra base de datos fue desarrollada en 2008 en el Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM con el nombre “Reanálisis de oleaje para México de 1948 a 2007” donde se empleó una modelación híbrida con los modelos WAM y HURAC, misma que ha sido validada (Ruiz-Martínez et al., 2009). El objetivo del proyecto fue obtener los parámetros de oleaje y viento, el cual incluye a más de 2,000 zonas del litoral mexicano, así como información de oleaje y viento por 60 años, a intervalos de una hora, tanto para regímenes medios como extremales, conformando 14 celdas de estudio (7 en la vertiente Atlántica y 7 en la Pacífica). Su aportación más importante es la obtención de una base de datos que posee un amplio marco de aplicación en ingeniería, y de otros ámbitos, especialmente por la variedad de información que se puede obtener a partir de la caracterización del clima marítimo (estadísticas de oleaje, análisis de condiciones extremales de viento y oleaje, datos de diseño para obras costeras y en altamar, entre otras). Los resultados se espera se publiquen en próximas fechas en uno de los Anexos del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, en su subdivisión de Obras Marítimas.

3.2.2 MAREA

Los dispositivos utilizados para la medición de la marea son los mareómetros o mareógrafos y se suelen situar en las entradas de los puertos para orientar e informar a los barcos de la disposición de calado existente. Forman parte de las redes de meteorología y oceanografía para la ayuda a la navegación marítima (IOC, 2014).

Según el fenómeno utilizado para realizar la medida se pueden distinguir dos tipos: el mareógrafo Aanderaa o mareógrafo de presión, el cual obtiene el nivel del mar a partir de la media de la presión hidrostática, la cual está influenciada por la presión atmosférica por lo que se debe hacer una corrección; y el mareógrafo Sonar o acústico Sonar, el cual usa el principio de medición de

distancia por el eco de un sonido, compuesto generalmente por un emisor – receptor de ultrasonidos colocado a una distancia de la superficie del agua midiendo el tiempo que tarda en llegar el eco de la señal.

En México se cuenta con 103 estaciones mareográficas ubicadas en los principales puertos del país administradas por diferentes instituciones nacionales que conforman la Red Mareográfica Nacional. 42 pertenecen a la Secretaría de Marina (SEMAR) administradas a través de la Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología y componen la Red Mareográfica Institucional, 32 al IMT por la División de Ingeniería de Puertos y Costas integrando la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM), 22 a la UNAM por el Servicio Mareográfico Nacional y 7 al CICESE por el Laboratorio del Nivel del Mar del Departamento de Oceanografía Física.

Parte de la información de las estaciones a cargo de la SEMAR (Figura 3.2.1) se encuentra disponible en la página web <http://oceanografia.semar.gob.mx/estaciones.html> en la que se indica para cada estación características de la forma en la que recolectan y transmiten los datos, gráficas de marea, fecha de instalación, situación operativa, ubicación, niveles de referencia, croquis, tablas numéricas y calendarios de algunos años muestreados.

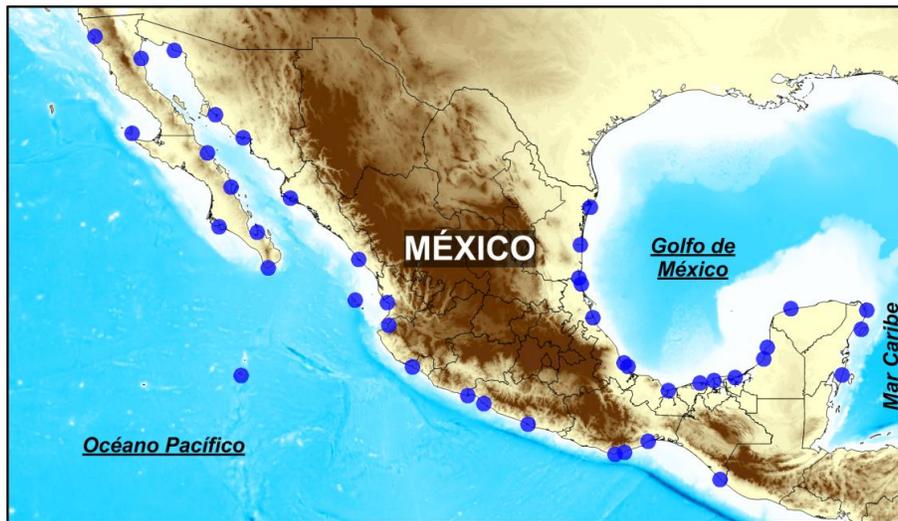


Figura 3.2.1 Ubicación de las estaciones mareográficas a cargo de la SEMAR.

La información de las estaciones a cargo del IMT (Figura 3.2.2) se puede consultar en la página web <http://www.imt.mx/SitioIMT/DIPC/ServiciosTecnologicos/Reneom/reneomDesarrollo.php> en la que se muestran gráficas en tiempo real de las variables que registran las estaciones, como son: oceanográficas (altura de ola, periodo, dirección, temperatura superficial del mar), mareográfica (nivel del mar) y meteorológicas (dirección del viento, velocidad del viento, presión atmosférica, temperatura, radiación solar, humedad relativa, precipitación pluvial, visibilidad).

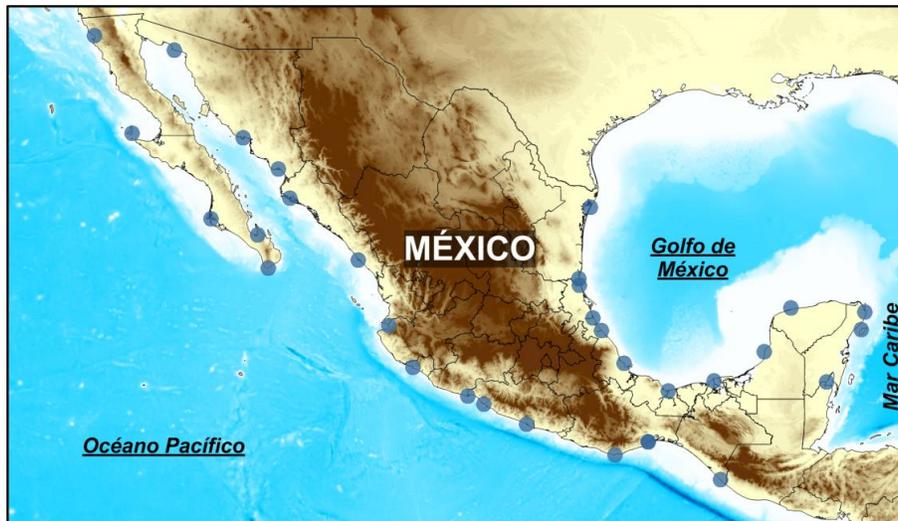


Figura 3.2.2 Ubicación de las estaciones mareográficas a cargo del IMT.

La información de las estaciones mareográficas de la UNAM (Figura 3.2.3) se encuentra disponible a través de la página web <http://www.mareografico.unam.mx/> del Servicio Mareográfico Nacional en la que se tiene acceso a la información recabada por los dispositivos en tiempo real y a los datos históricos, así como también se presenta un resumen de los planos de referencia, gráficas y datos, datos validados, pronósticos y croquis.



Figura 3.2.3 Ubicación de las estaciones mareográficas a cargo de la UNAM.

La información de las estaciones a cargo del CICESE (Figura 3.2.4) está disponible a través de la página web <http://observatorio.cicese.mx/>, en la que se muestran ligas de acceso a la información histórica y a la recabada en tiempo real por los dispositivos de medición.



Figura 3.2.4 Ubicación de las estaciones mareográficas a cargo del CICESE.

Además de estas instituciones nacionales que recaban información de mareas en tiempo real, existe una base de datos más completa con información mundial del Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) a cargo del Global Sea Level Observing System (GLOSS), el cual es un programa internacional bajo la dirección de la Comisión de la Junta Técnica para Meteorología y Oceanografía (JCOMM, por sus siglas en inglés) de la Organización Mundial de Meteorología (WMO, por sus siglas en inglés) y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (IOC, por sus siglas en inglés), donde se proporcionan datos de 1,410 estaciones del nivel del mar alrededor del mundo, de las cuales 22 pertenecen a México (Figura 3.2.5) con registros desde 1992 para algunas estaciones.



Figura 3.2.5 Ubicación de las estaciones mareográficas a cargo del PSMSL.

3.2.3 CICLONES TROPICALES

En México se tiene el Sistema de Alerta Temprana (SIAT) para avisar con antelación a la población de ciclones tropicales que se acercan al territorio. Se consolidó en el año 2000 después de los

desastres hidrometeorológicos ocurridos en 1999 por los cuantiosos daños que dejaron, con la finalidad de prevenir o mitigar los desastres por medio del alertamiento oportuno a la población, en función de la intensidad, trayectoria y distancia del ciclón tropical.

La instrumentación empleada para medir y vigilar los ciclones tropicales hoy en día es la vista desde el espacio exterior, desarrollándose con ello tecnologías satelitales que envían información capturada a los distintos centros meteorológicos para su procesamiento e interpretación. En el país, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se encarga de realizar dicha labor con el fin de proveer al SIAT de la información necesaria para el desarrollo de las actividades para mitigar los efectos de los ciclones en las costas mexicanas.

En el SMN se emplea el Radar Meteorológico para la medición y seguimiento de fenómenos atmosféricos constituidos por agua en forma de lluvia, granizo y nieve principalmente (CONAGUA, 2014). La Red Nacional de Radares Meteorológicos está formada por 13 radares, todos provistos con el sistema Doppler y cuentan con un sistema ininterrumpible de energía, sistema de protección contra incendios y un sistema de comunicaciones con el centro colector de datos ubicado en las instalaciones del SMN en la Ciudad de México, donde se analiza, procesa y almacena toda la información. La red proporciona una cobertura aproximada del 70% del territorio nacional.

Además de los radares, también se emplean las imágenes proporcionadas por los satélites GOES Este y Oeste de la NASA, los cuales son satélites meteorológicos geoestacionarios que transmiten imágenes con sensores de luz visible e infrarrojos. En las imágenes de luz visible se pueden apreciar las nubes, sistemas nublosos como frentes y tormentas tropicales, lagos, bosques, montañas, nieve, fuego y polución. Se puede determinar el viento por los patrones de nubes, alineamientos y movimiento en una sucesión de imágenes. En las imágenes infrarrojas se puede determinar la altura y tipo de nubes, calcular la temperatura de la superficie de la tierra y mar y localizar características del relieve oceánico (NOAA, 2014).

En Estados Unidos, la institución encargada del monitoreo de ciclones tropicales es el Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés), el cual es un componente de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés), y mediante la Unidad Especializada de Huracanes (HSU, por sus siglas en inglés) genera análisis y previsiones de huracanes en el Atlántico y Pacífico Oriental además de proporcionar la posición e intensidad estimada de los ciclones tropicales mediante la técnica Dvorak (NOAA, 2014). Esta información puede ser obtenida libremente en la página web <http://www.nhc.noaa.gov/>.

3.2.4 TSUNAMIS

Los mareógrafos con los que actualmente cuenta el SMN difícilmente pueden ayudar a alertar ante la ocurrencia de tsunamis, pues se encuentran ubicados cerca de las costas, lo que impide revisar la información con tiempo oportuno. Es por esta razón que la modernización de las estaciones mareográficas hacia estaciones con telemetría satelital permitiría la medición en tiempo real de los eventos, y aunque no se pueda dar una alerta local en el sitio donde se encuentra la estación, sí sería registrada la ocurrencia del tsunami y de su propagación hacia otros sitios, emitiéndose la alerta correspondiente de “cortesía”.

En México se cuenta con el Centro de Alerta de Tsunamis (CAT), que a partir de 2012 ha impartido el curso de “Teoría Básica de Tsunamis” a diferentes Dependencias que integran los Comités de Protección Civil, y ha capacitado al personal de las Administraciones Portuaria Integrales (API), Capitanías de Puertos y de la Dirección General de Marina Mercante, Mandos Navales del Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe, Delegados Estatales y Municipales de Protección Civil de

estados costeros, Secretaría de Defensa Nacional (SEDENA) y Fuerza Aérea Mexicana para la atención de emergencias (DIGAOHM, 2014). A partir de ese mismo año se encarga de la emisión de boletines informativos, de simulacro y de alerta de tsunamis dirigidos a las autoridades de protección civil y militares.

En Estados Unidos, otra de las agencias de la NOAA, el Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico (PTWC, por sus siglas en inglés), es uno de los dos centros de alerta de tsunamis de ese país. Forma parte de un sistema de alerta de tsunamis internacional y sirve como centro de operaciones del sistema de alerta de tsunamis del Pacífico. Fue inaugurado en 1949 tras el terremoto de las islas Aleutianas de 1946 y un tsunami que devastó las islas de Hawái. Después del terremoto del océano Índico de 2004, amplió su orientación de alerta a fin de incluir el Océano Índico, el Caribe y regiones adyacentes, hasta la capacidad de elaborar alertas regionales para estas áreas (NOAA, 2014).

El dispositivo que Estados Unidos utiliza para el monitoreo de tsunamis se basa en boyas con sistema DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) que ofrecen información detallada sobre los tsunamis, mientras están lejos de la costa. Cada estación se compone de una grabadora de presión en el fondo del mar (a 6,000 m de profundidad) que detecta el paso de un tsunami y transmite los datos a la boya de superficie mediante un módem acústico, la cual emite la información al PTWC a través del sistema satelital GOES. Con este sistema se ha mejorado considerablemente el pronóstico y alerta de tsunamis en el Pacífico.

Luego de revisar los datos sísmicos, el PTWC emite boletines de información, observación y advertencia de tsunamis, mismos que pueden ser consultados en <http://ptwc.weather.gov/ptwc/index.php>.

La información sobre los tsunamis que han sido registrados en el mundo se encuentra disponible en la página <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml>, en la que además de datos recopilados de la afectación de tsunamis también cuentan con animaciones de los más devastadores que recientemente se han presentado.

3.3 ATLAS NACIONAL DE RIESGOS

El Atlas Nacional de Riesgos fue desarrollado por el CENAPRED como un sistema integral de información que permite establecer bases de datos y realizar el análisis del peligro, la vulnerabilidad y el riesgo ante desastres a escala nacional, regional, estatal y municipal, con el objeto de generar mapas y sistemas geográficos de información. Esto se realiza con el fin de estar en posibilidad de simular escenarios de desastre, emitir recomendaciones para la oportuna toma de decisiones y establecer efectivas medidas de prevención y mitigación.

Desde su página de internet, <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php>, se tiene acceso a las diferentes evaluaciones cualitativas que se han elaborado a nivel nacional de los diferentes riesgos a los que el país está expuesto. Además presenta ligas para acceder a los atlas estatales de riesgo existentes a la fecha.

Los mapas con los que cuenta, en cuanto a la evaluación de riesgos geológicos, son: mapas de sismos, volcanes activos, tsunamis lejanos y locales y regiones potenciales de deslizamiento de laderas. En cuanto a la evaluación de riesgos hidrometeorológicos, cuenta con mapas relacionados a ciclones tropicales, peligro por inundaciones a nivel municipal, tormentas de granizo, heladas y nevadas, tornados, viento, sequías y frentes fríos. También cuenta con información de riesgos

químico-tecnológicos, sanitario-ecológicos, socio-organizativos y con estudios económicos y sociales.

La información de interés para los motivos del presente trabajo es la contenida en los mapas de evaluación de riesgos geológicos e hidrometeorológicos, sin embargo en estos mapas solo se presenta una evaluación cualitativa de los peligros, sin presentar los posibles valores medibles de los efectos que los fenómenos pudieran ocasionar.

4. METODOLOGÍA

4.1 DELIMITACIÓN DE LA CELDA DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende la totalidad de las costas del país, tanto en la zona continental como en la insular, y con base al objetivo principal de este trabajo, cuya meta es presentar los resultados en un atlas interactivo con acceso puntual a la información generada, se han propuesto puntos de estudio distribuidos aproximadamente a cada 0.1 grados teniendo en total 1,163 de los cuales 310 se encuentran en las costas del Golfo de México y Mar Caribe y 852 en las costas del Pacífico. En la Figura 4.1.1 se muestra su distribución y, como se aprecia, se tiene al menos un punto por municipio costero, lo que ayudará con estudios de vulnerabilidad y riesgo a escala municipal y local.

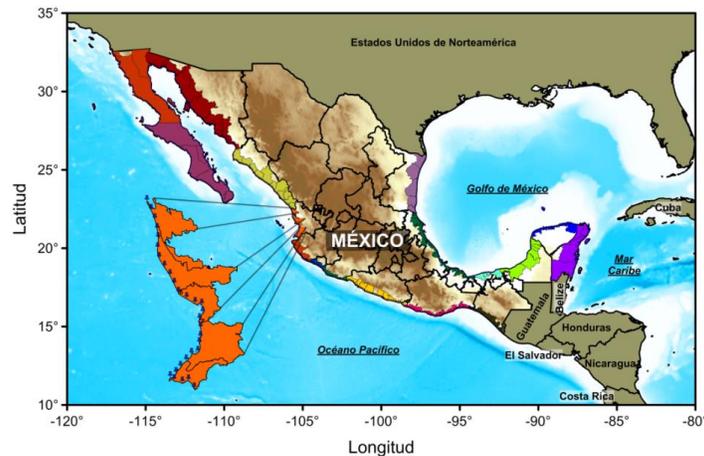


Figura 4.1.1 Puntos de estudio en el litoral mexicano.

4.2 ESQUEMA GENERAL

En este trabajo se evaluaron tres fenómenos extremos diferentes, y por lo mismo cada uno requiere de información específica. Para el cálculo de la cota de inundación se empleó la metodología propuesta por (García Contreras et al., 2013) en la que se propone que su cálculo se puede hacer mediante la siguiente ecuación:

Para ciclones tropicales y frentes fríos:

$$CI = MM + RU \quad \text{Ec. (4.1)}$$

Para tsunamis:

$$CI = RU \quad \text{Ec. (4.2)}$$

Donde: *CI* es la cota de inundación, *MM* es la marea meteorológica y *RU* es el run-up debido al oleaje o a las olas del tsunami, considerando las unidades en metros.

El esquema de trabajo seguido para la obtención de las cotas de inundación se presenta en la Figura 4.2.1 en la que se muestra que la evaluación de las cotas de inundación se realizó contemplando los resultados que arrojaron los modelos para la sobre elevación por marea de tormenta (en el caso de ciclones tropicales y frentes fríos) y run-up. Posterior a la obtención de

estos valores, y para poder hacer la suma de los mismos, se hizo un análisis de régimen extremal encontrando valores asociados a periodos de retorno de los parámetros contemplados.

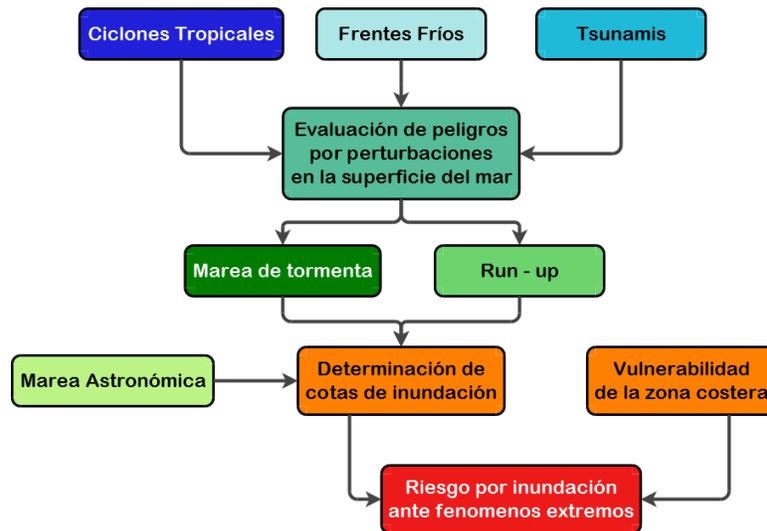


Figura 4.2.1 Diagrama general de trabajo.

En la ejecución de los modelos que representan a cada fenómeno, se requiere de la obtención de las bases de datos de algunos de sus parámetros e información geoespacial del territorio nacional como son: topografía, batimetría, línea de costa y, para el caso de la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo, de la división política, tanto estatal como municipal.

La información batimétrica se tomó de la base de datos de (GEBCO, 2013), en la cual se tiene información de elevación tanto de la superficie terrestre como del fondo marino con una resolución de 30 segundos (aproximadamente un punto a cada 925 metros), la cual es adecuada para los alcances del presente trabajo.

La información de la división política por países se tomó de la base de datos de (Natural Earth, 2013). En la Figura 4.2.2 se muestra un mapa combinando la información de topografía y batimetría de la base de datos de GEBCO y la división política por país de Natural Earth, así como la línea de costa.

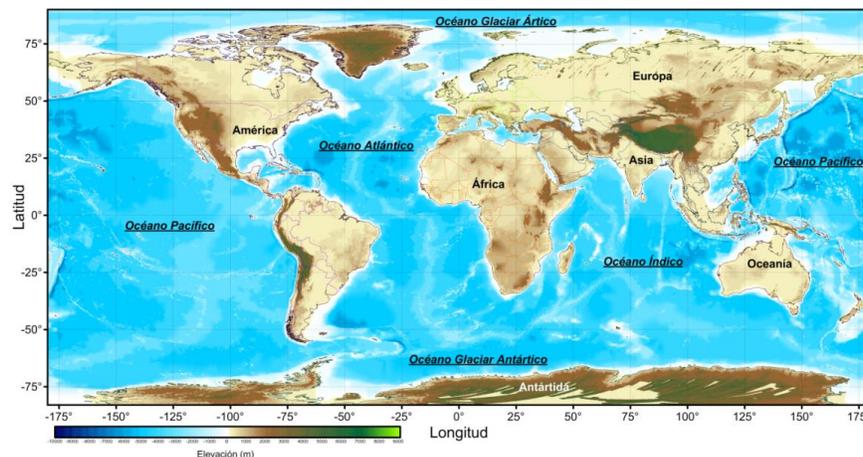


Figura 4.2.2 Topografía y Batimetría de GEBCO_08 y división política de Natural Earth.

La información topográfica de México se tomó del continuo de elevaciones de (INEGI, 2014), con una resolución de 120 m, con el fin de reducir el tamaño del archivo descargado, y la división política tanto Estatal como Municipal se tomó del geoportal de (CONABIO, 2013). En las Figuras Figura 4.2.3 y Figura 4.2.4 se muestran los mapas de estas bases de datos.

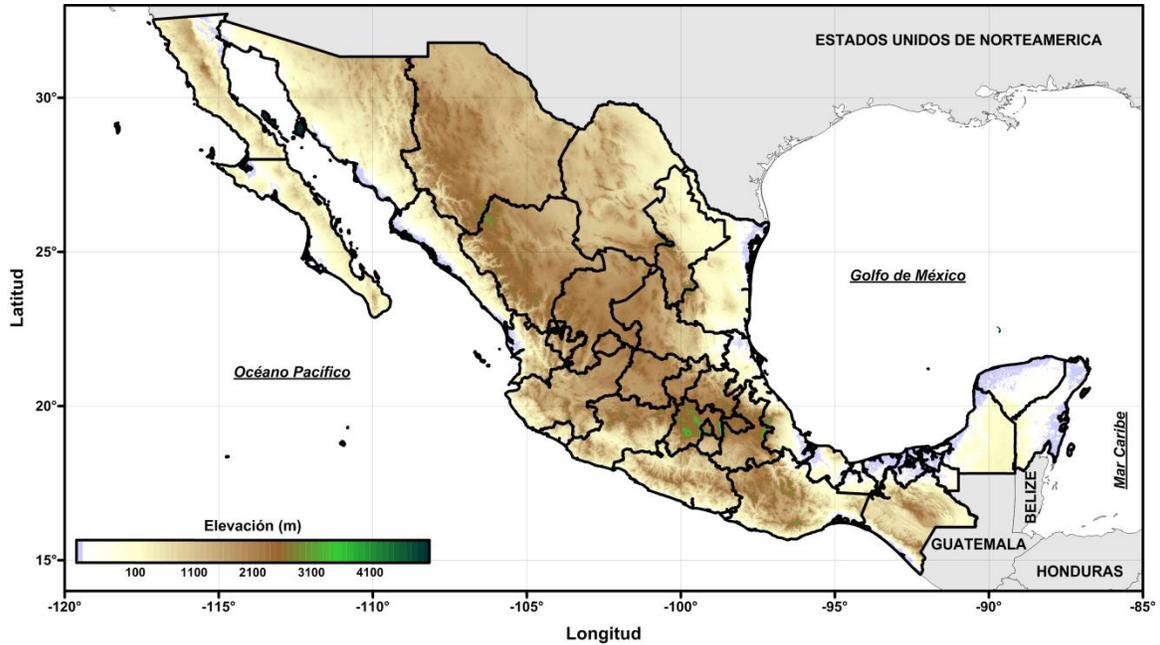


Figura 4.2.3 Topografía del Continuo de Elevaciones del INEGI.

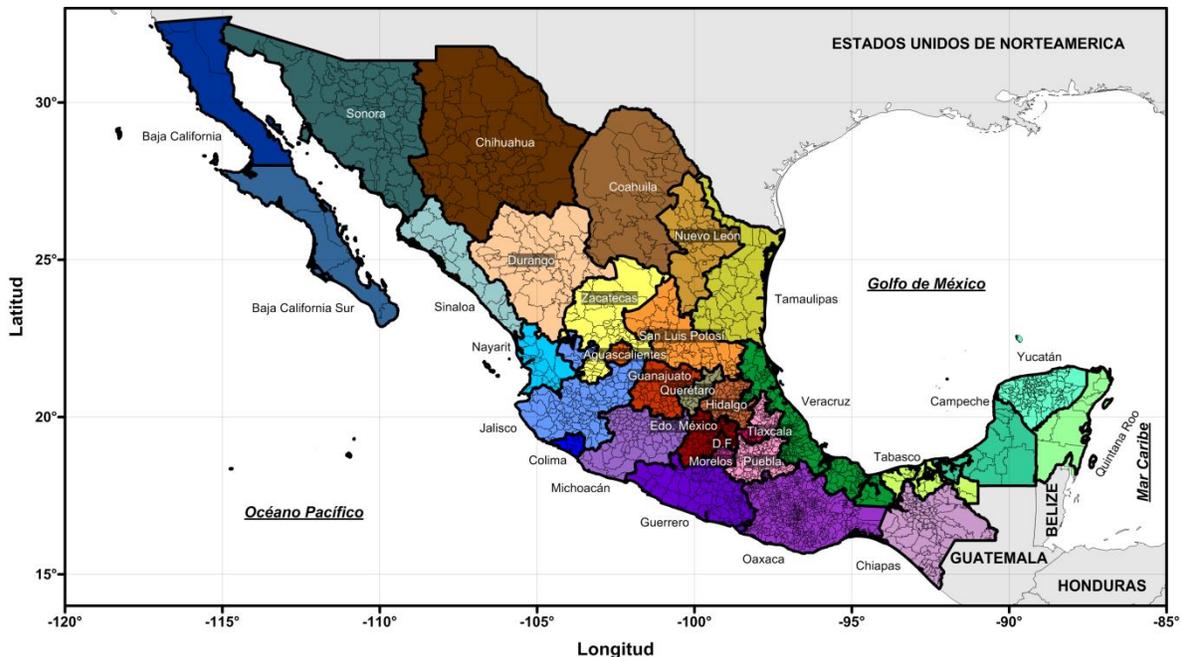


Figura 4.2.4 División política Estatal y Municipal de CONABIO.

La marea astronómica se calculó interpolando la información de los registros existentes de mareógrafos de la SEMAR entre los puntos de estudio en todo el litoral. En la Figura 4.2.5 se

muestra un mapa con los valores obtenidos de este proceso. Como se observa, la zona norte del Mar de Cortés es la región del país donde se presenta la mayor marea astronómica alcanzando niveles mayores a 6.00 m de altura sobre el nivel de bajar media inferior en pleamar máxima.

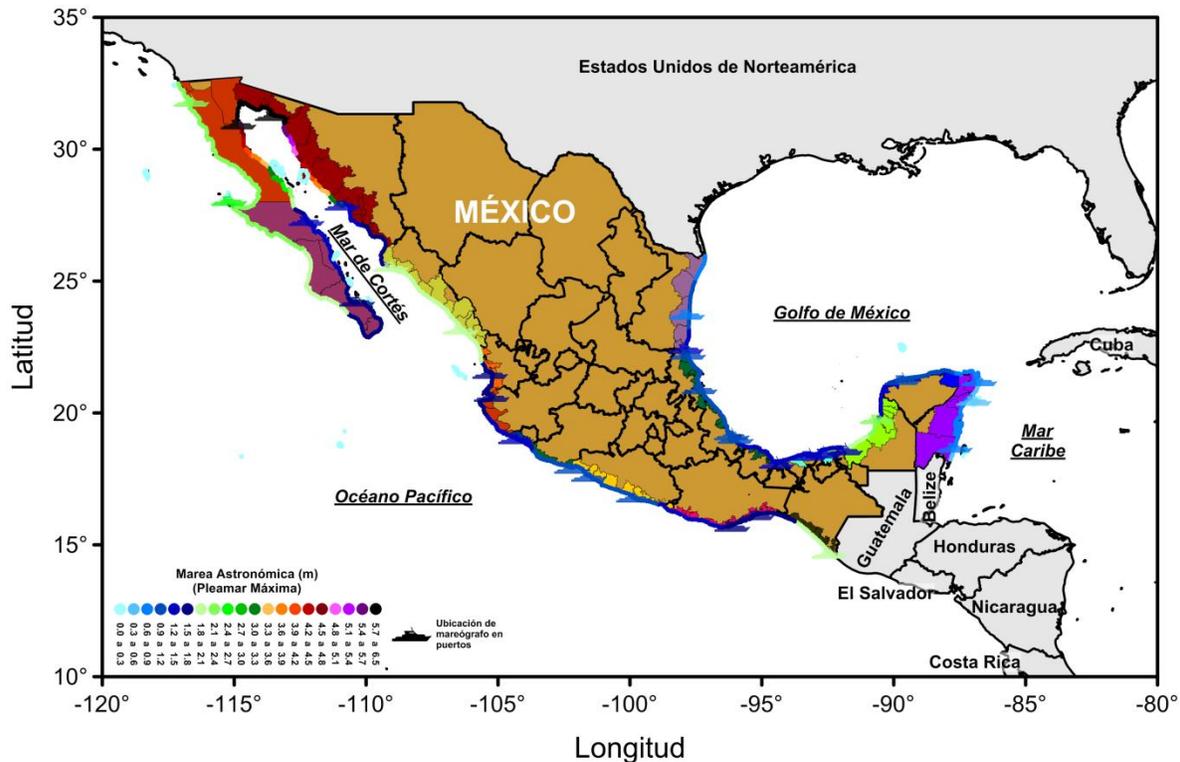


Figura 4.2.5 Marea astronómica interpolada en el litoral mexicano.

4.3 CICLONES TROPICALES

El procedimiento para la evaluación de los efectos de ciclones tropicales se muestra en el esquema de la Figura 4.3.1. Para este fenómeno la información indispensable requerida es la trayectoria, intensidad (velocidad del viento) y evolución del fenómeno. Estos datos fueron recopilados de las bases de datos Atlantic HURDAT2 y NE/NC Pacific HURDAT2 de la NOAA (NOAA, 2014), las cuales contienen esta información para los huracanes generados en el Océano Atlántico desde 1851 hasta 2012, y en el Noreste y Norte-Centro del Océano Pacífico, desde 1949 hasta 2012, respectivamente.

Para poder hacer comparaciones entre ambas vertientes se tomaron solo aquellos puntos de ciclón generados a partir de 1949 y que estuvieron a menos de 500 km de cada punto de estudio. Posteriormente se obtuvieron los parámetros que no se encuentran en la base de datos con ayuda de las ecuaciones (2.1) a (2.23) como son: presión central, radio ciclostrofico, velocidad de traslación y profundidad del mar en el centro del ciclón. Además se hicieron análisis de los puntos en la costa para la determinación de la pendiente, tanto hacia el mar como hacia tierra, la dirección de la línea de costa y se cuantificaron los ciclones que se han acercado a cada punto de estudio a 100, 200, 300, 400 y 500 km, así como la categoría con la que llegaron.

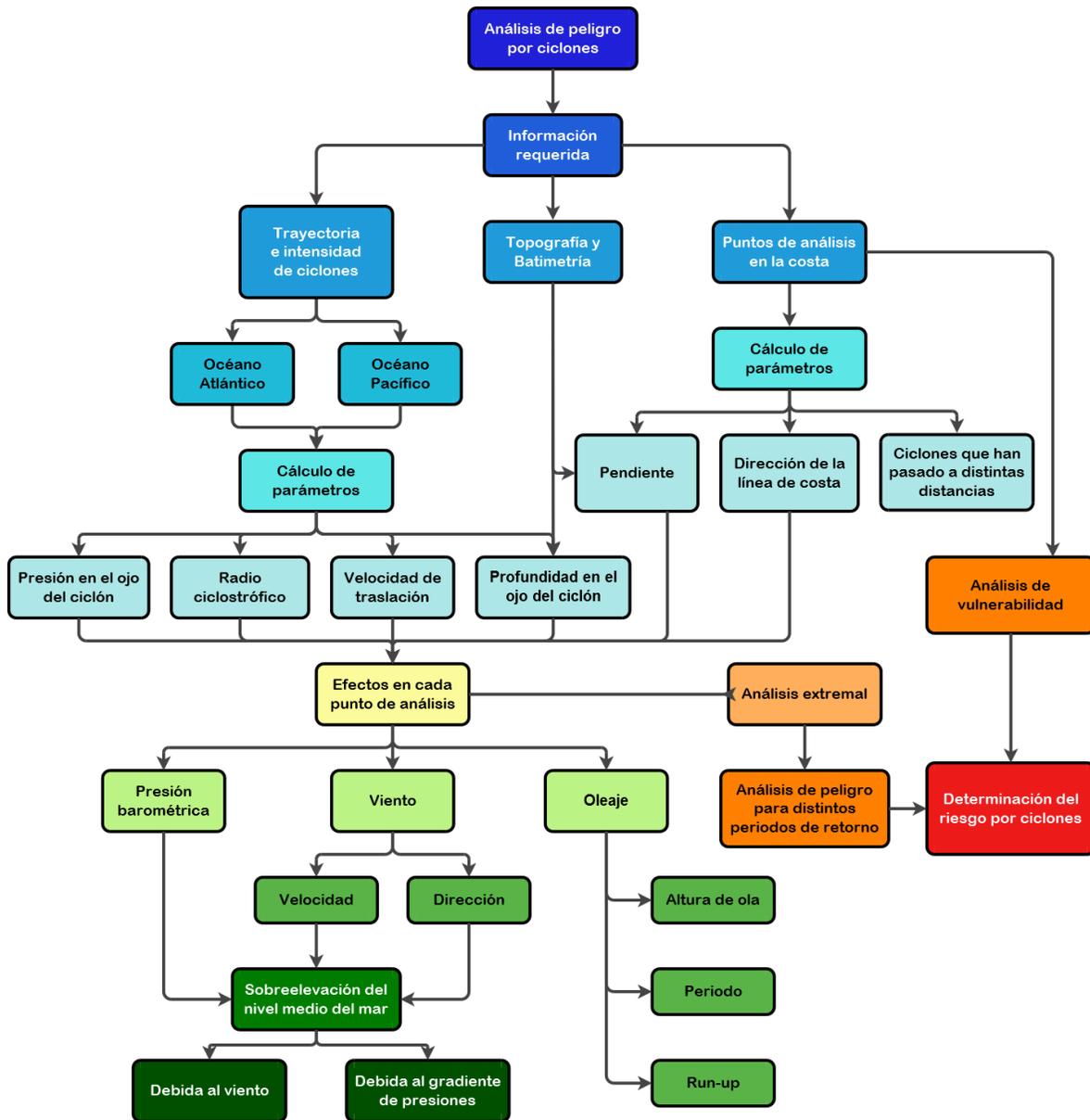


Figura 4.3.1 Diagrama de análisis de ciclones tropicales.

Con estos parámetros se calcularon los efectos de los huracanes en los puntos de estudio. Las variables calculadas fueron la velocidad y dirección del viento y la presión para calcular la marea de tormenta asociada cuando la dirección del viento tuvo alguna componente que incidiera sobre la costa, de acuerdo a las características de cada sitio; y el oleaje con su altura de ola y periodo en aguas profundas y run-up.

Posterior al cálculo de las diferentes variables a cuantificar, se hizo un análisis de régimen extremal para llegar a la determinación de valores asociados a periodos de retorno con los cuales se constituyeron las cotas de inundación.

4.4 FRENTE FRÍOS

En la Figura 4.4.1 se muestra un esquema general del procedimiento que se siguió para el análisis de los frentes fríos.

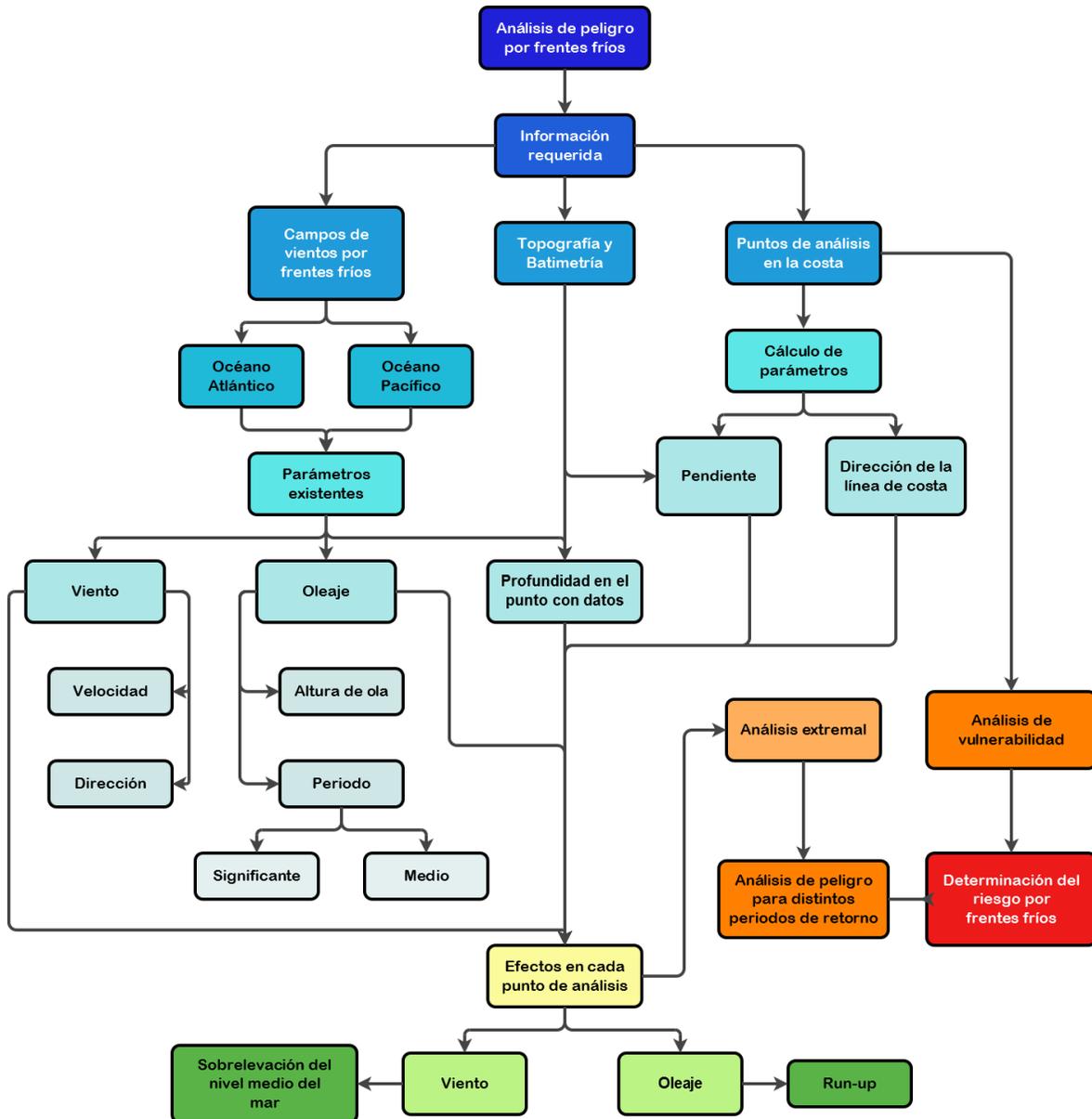


Figura 4.4.1 Diagrama de análisis de frentes fríos.

La base de datos de vientos y oleaje utilizada se tomó de (Silva et al., 2008) en la que se tiene información puntual para el Atlántico y el Pacífico, con información de fecha y hora del registro de vientos, velocidad y dirección del viento, altura de ola significativa, dirección del oleaje, periodo significativo y medio del oleaje, cuya densidad se muestra en la Figura 4.4.2.

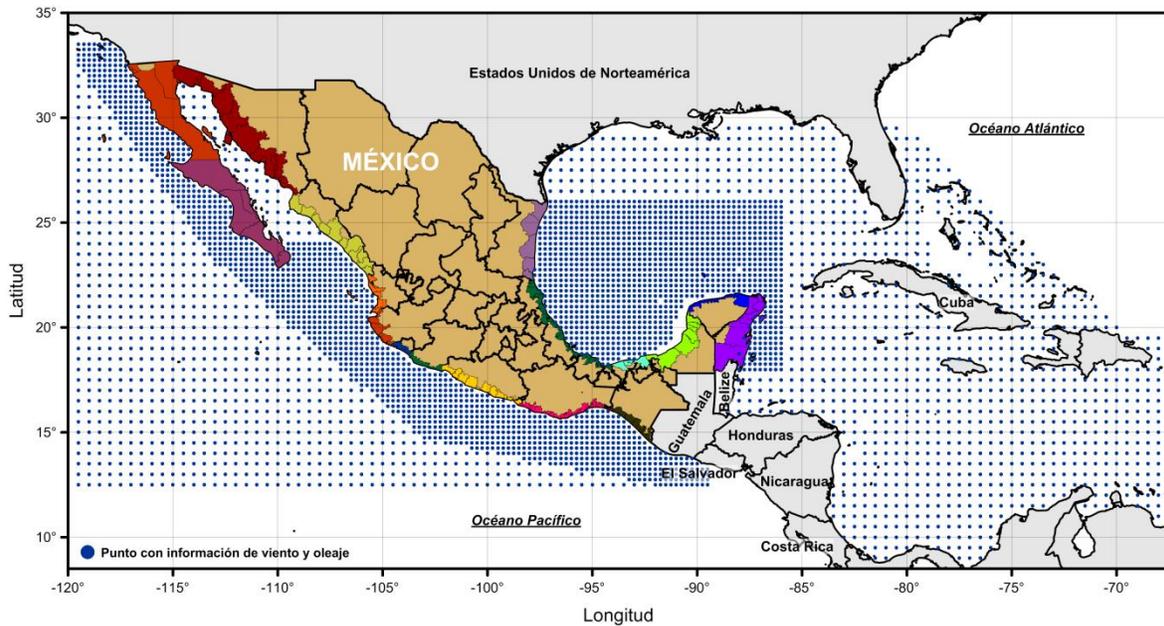


Figura 4.4.2 Densidad de la base de datos de viento y oleaje.

Esta base de datos está compuesta de 2,256 puntos en el Atlántico y de 2,257 puntos en el Pacífico. Para determinar qué puntos tomar en el análisis de frentes fríos, se usó como criterio utilizar aquellos que estuvieran más cerca de los puntos de estudio en el litoral y que se encontraran en la zona marítima, con lo cual se consideraron 79 para el Atlántico y 170 para el pacífico. En la Figura 4.4.3 se observan los que siguieron el criterio utilizado.

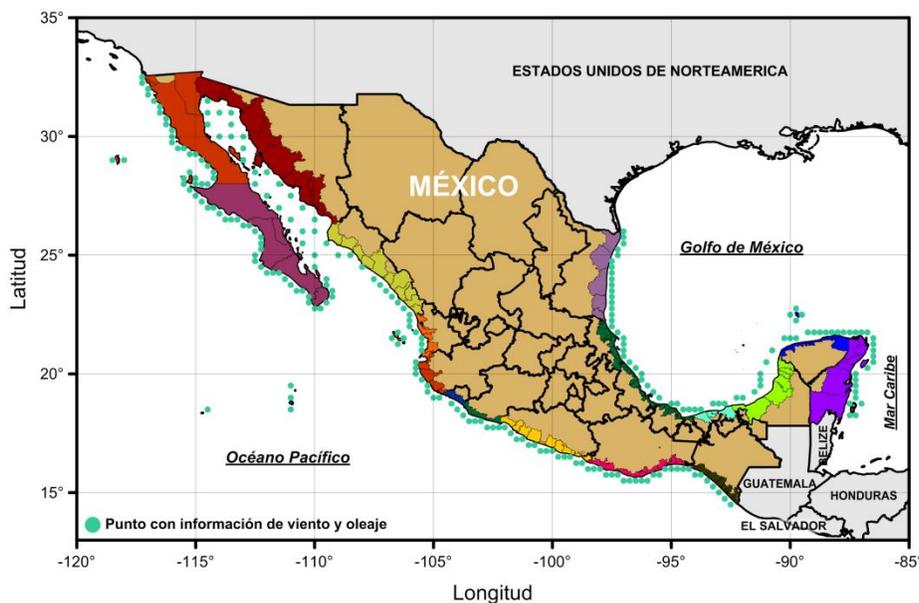


Figura 4.4.3 Puntos de la base de datos de viento y oleaje utilizados para cuantificar el efecto de los frentes fríos.

En las Figuras Figura 4.4.4 a Figura 4.4.21 se muestran los puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje con los puntos de estudio en el litoral que fueron utilizados para la cuantificación de los efectos por frentes fríos. Se muestran por estado y se encuentran

categorizados por color, donde los puntos de la base de datos de viento y oleaje se encuentran representados con el símbolo de un CD y los puntos en el litoral con un punto. Cada color está relacionando los puntos en el litoral para los cuales se tomó la información de la base de datos del punto con el mismo color.

Posterior a esto, se ejecutó un programa en lenguaje fortran para calcular el ascenso máximo del oleaje (run-up) y la marea de tormenta por viento en cada punto dónde la dirección del viento tuviera alguna componente hacia la costa y además excediera los 5 km/h, continuando con el análisis de régimen extremal similar al elaborado con los datos generados de ciclones tropicales.

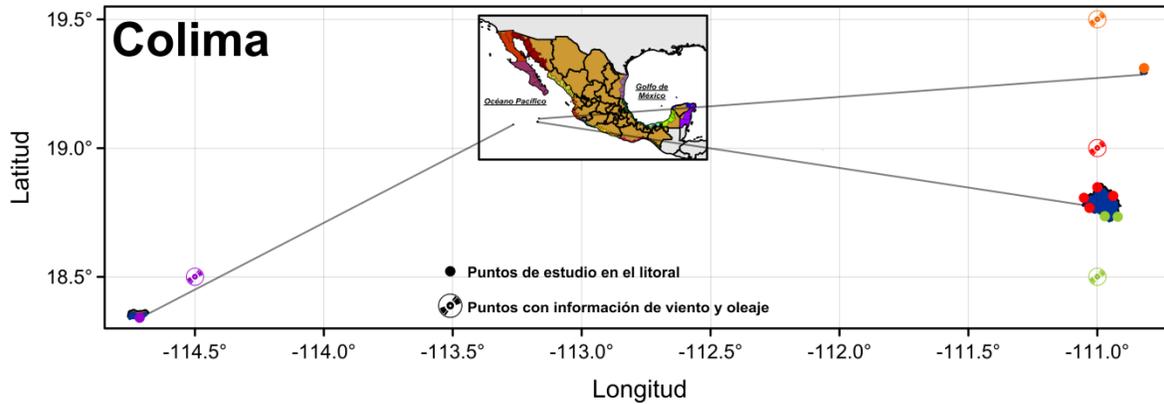


Figura 4.4.4 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para las islas del estado de Colima.

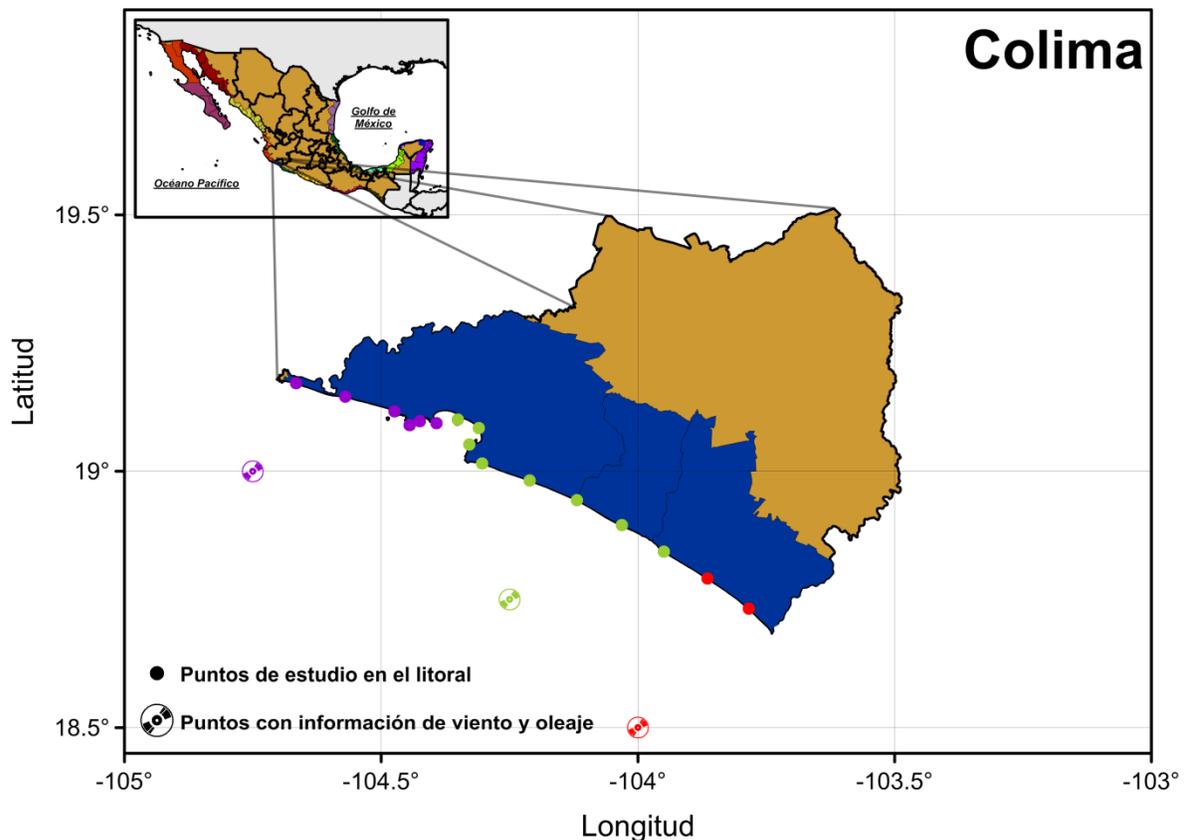


Figura 4.4.5 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Colima.

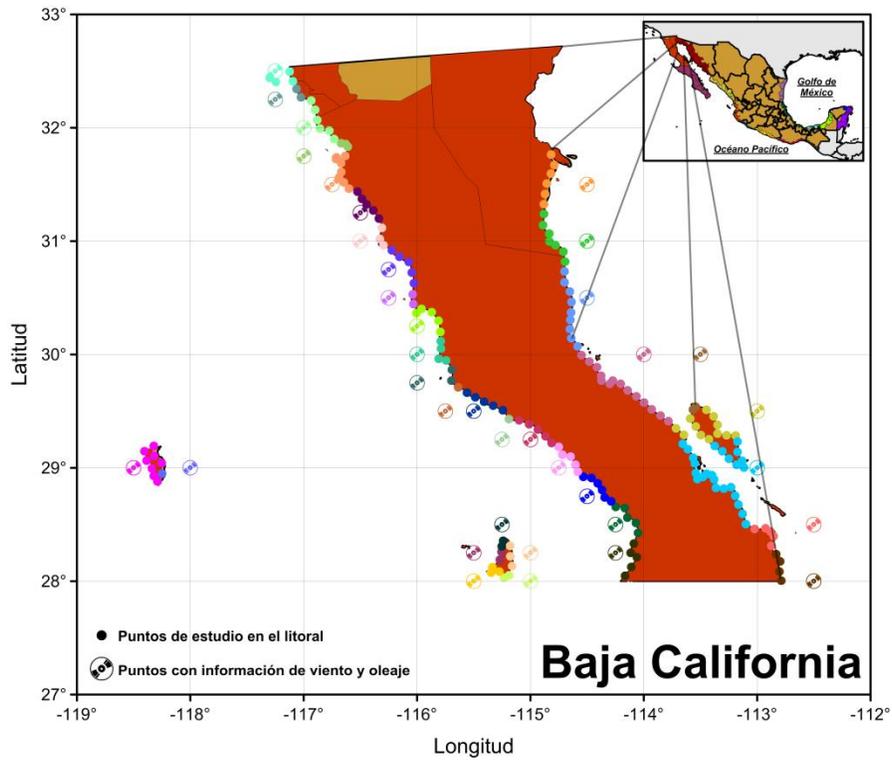


Figura 4.4.6 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Baja California.

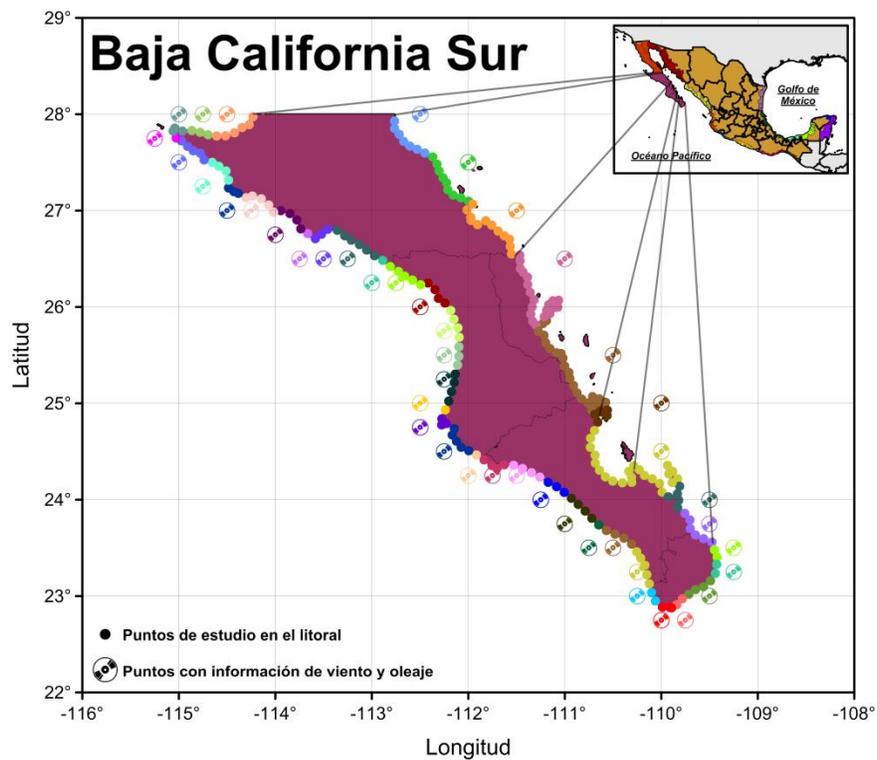


Figura 4.4.7 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Baja California Sur.

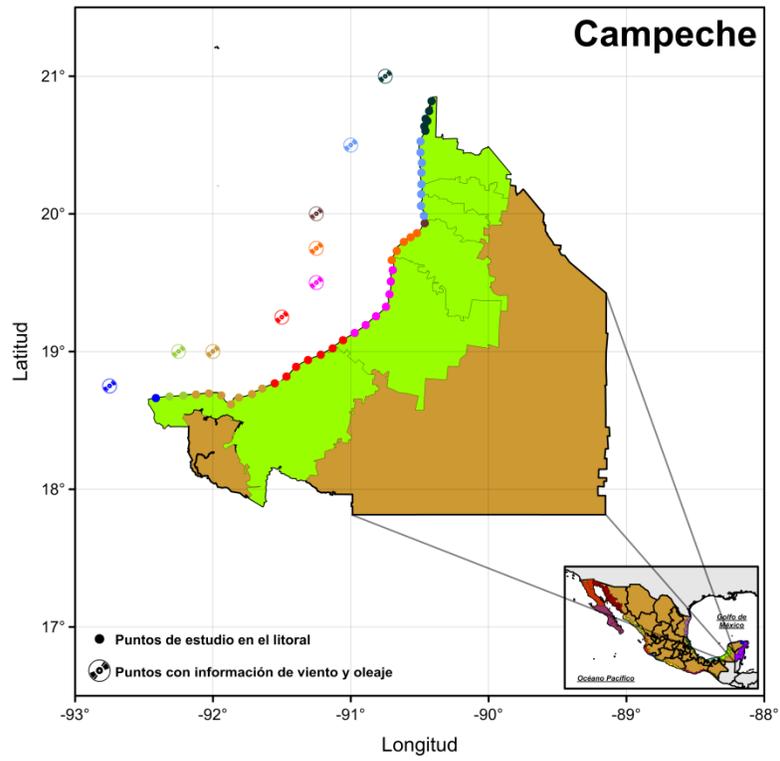


Figura 4.4.8 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Campeche.

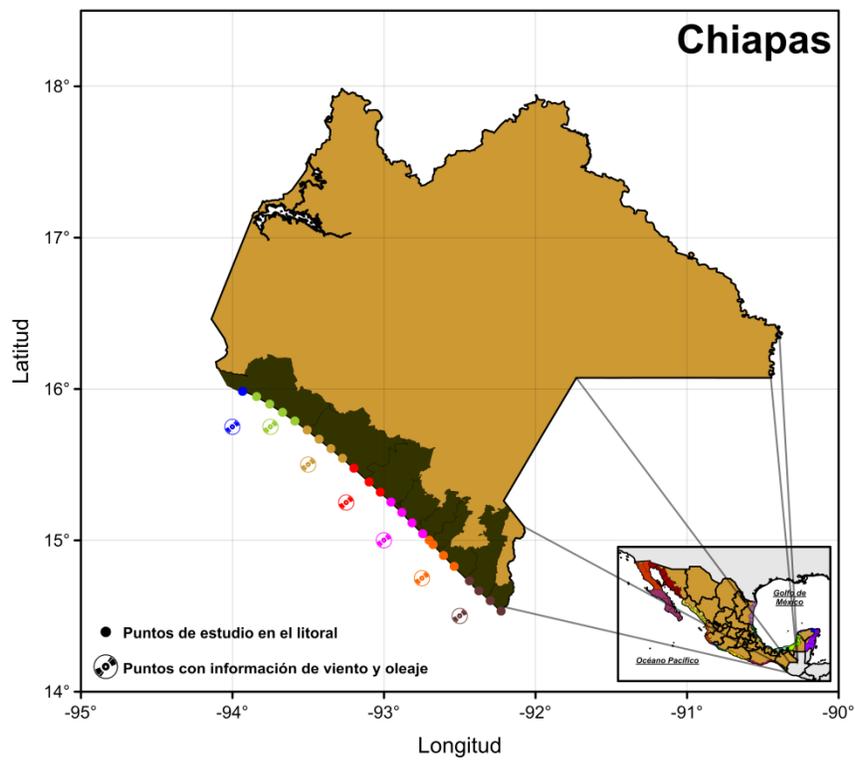


Figura 4.4.9 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Chiapas.

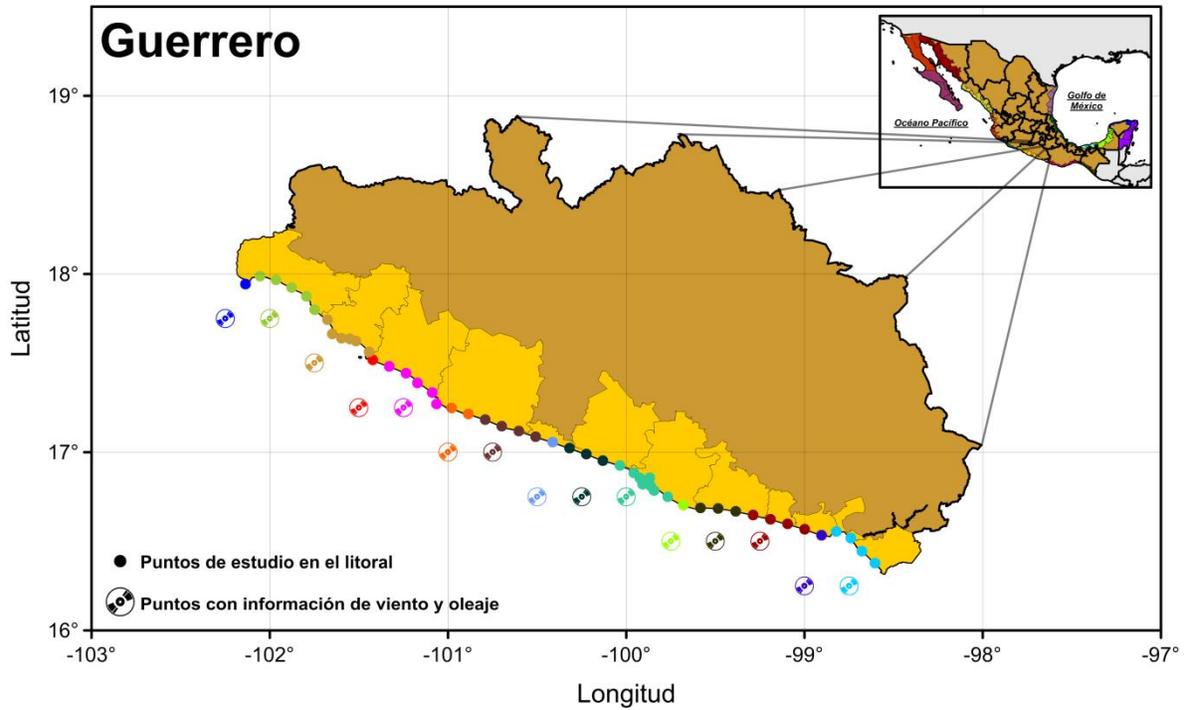


Figura 4.4.10 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Guerrero.

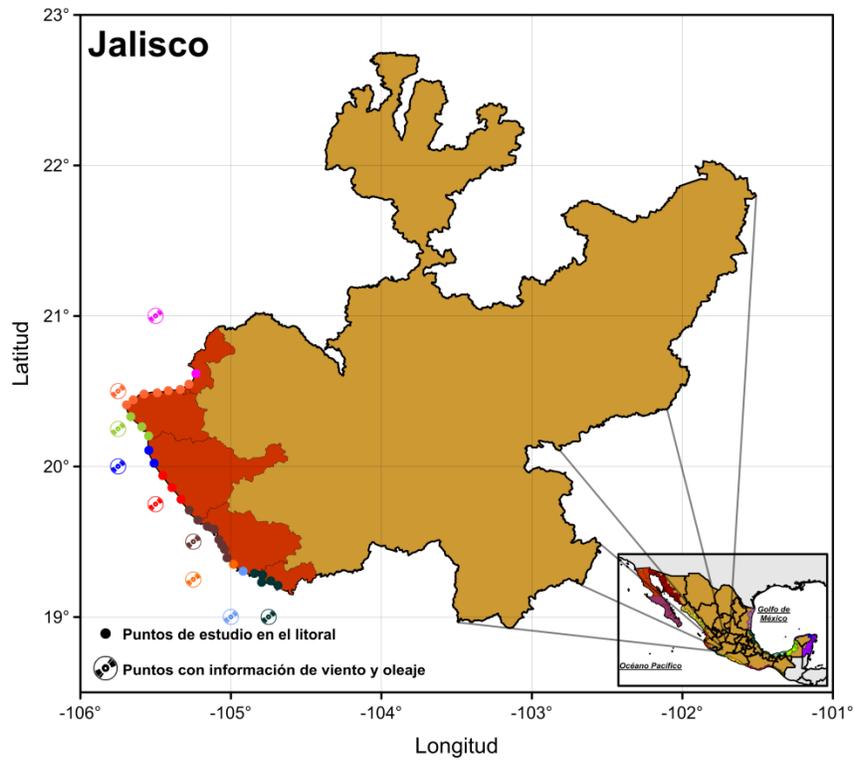


Figura 4.4.11 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Jalisco.

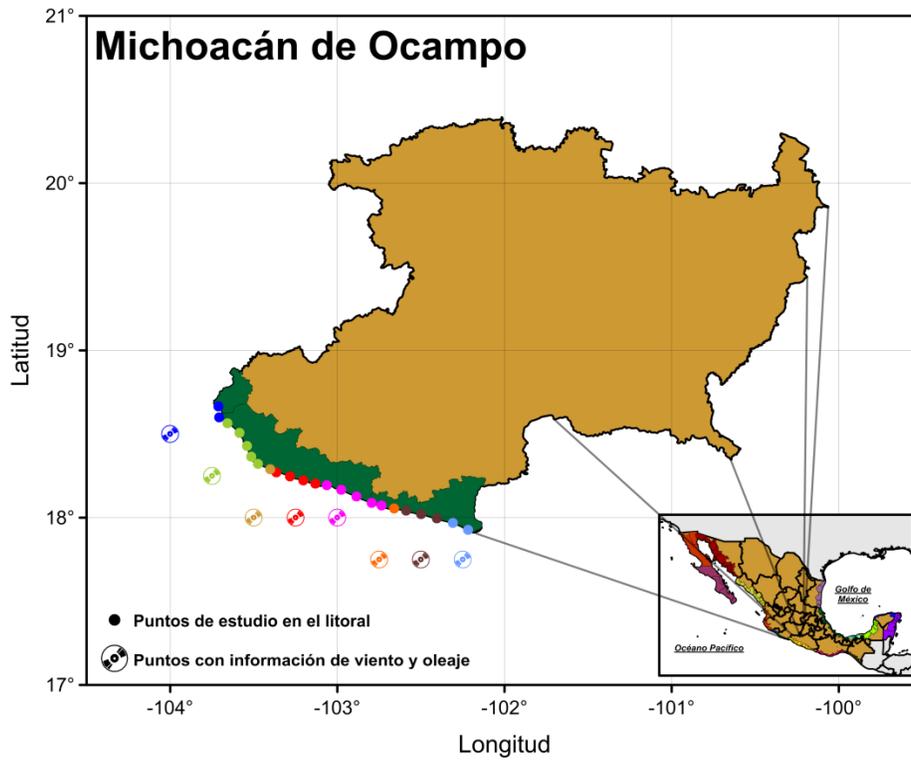


Figura 4.4.12 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Michoacán de Ocampo.

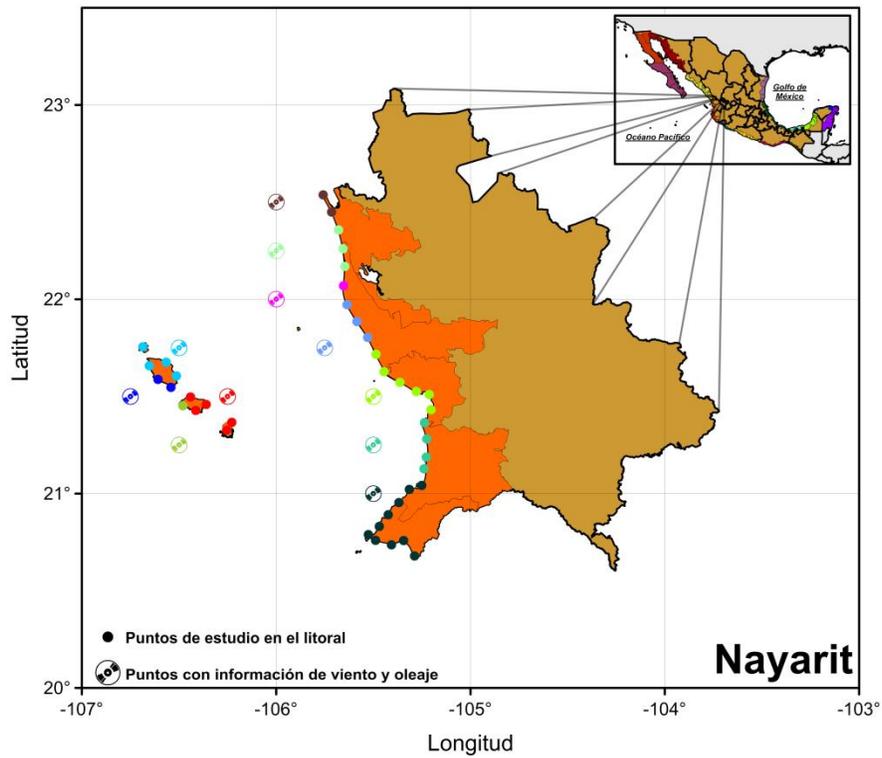


Figura 4.4.13 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Nayarit.

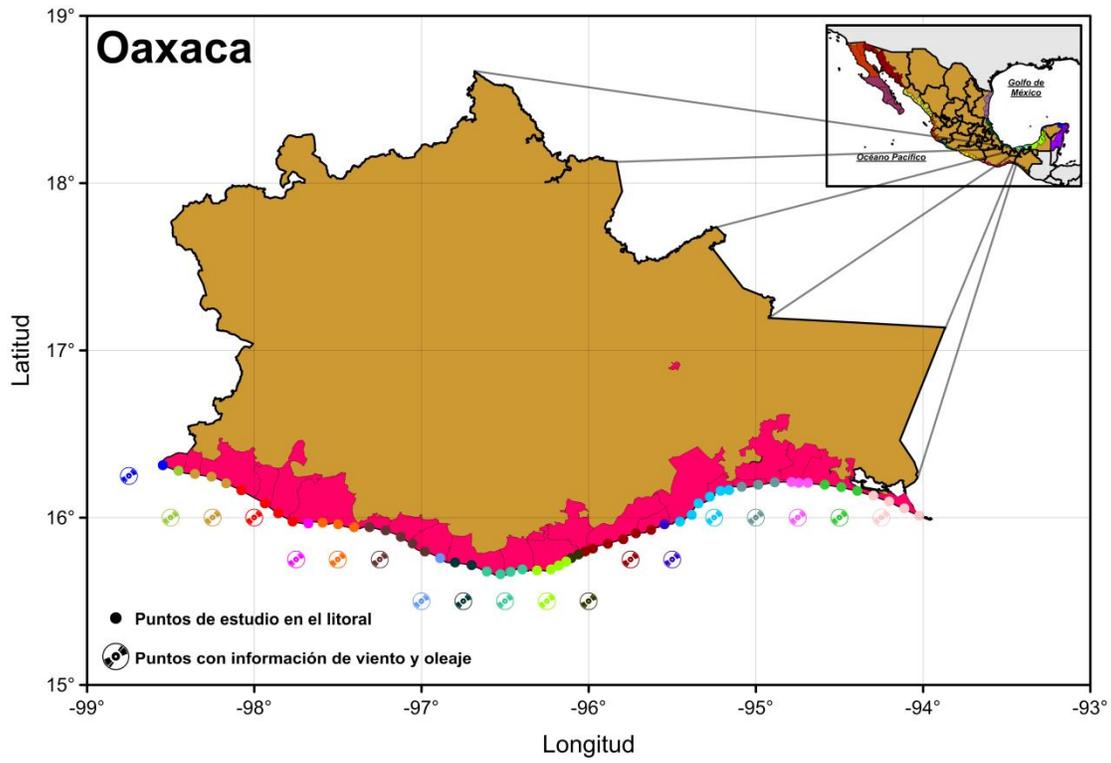


Figura 4.4.14 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Oaxaca.

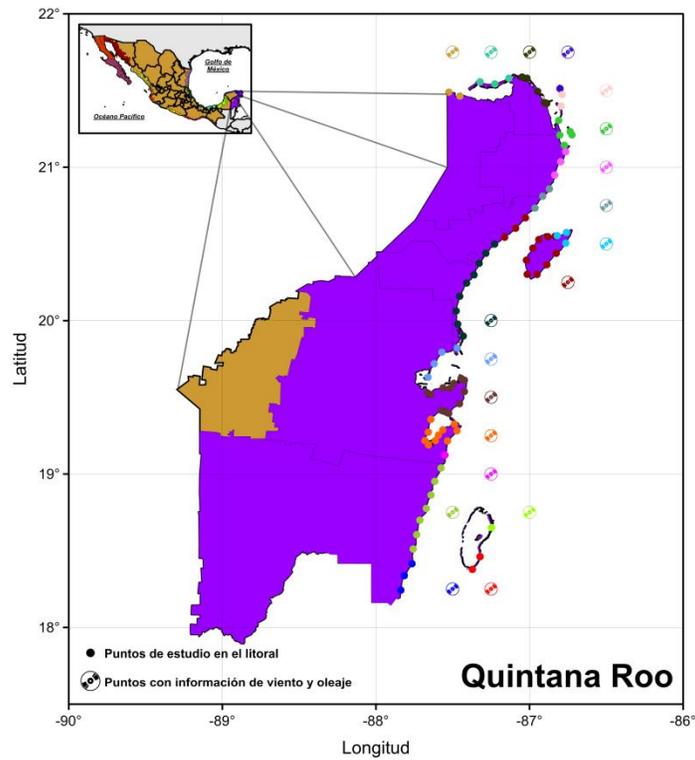


Figura 4.4.15 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Quintana Roo.

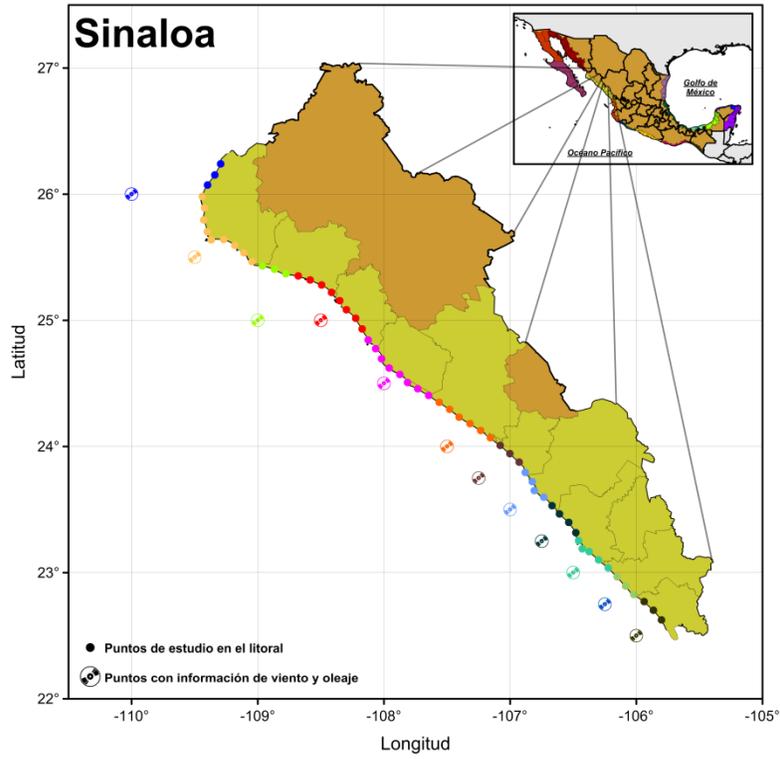


Figura 4.4.16 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Sinaloa.

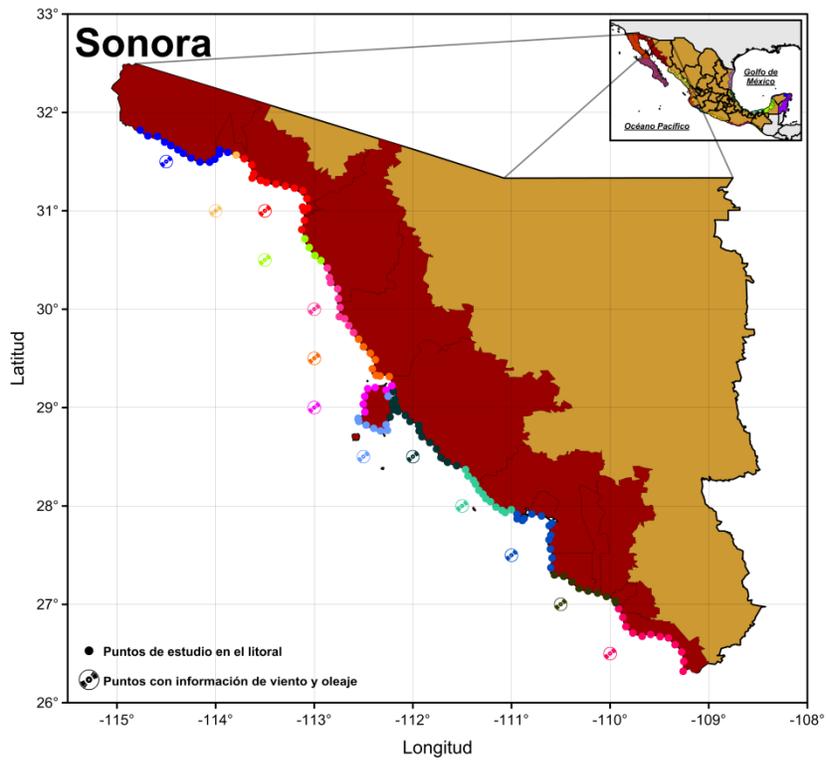


Figura 4.4.17 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Sonora.

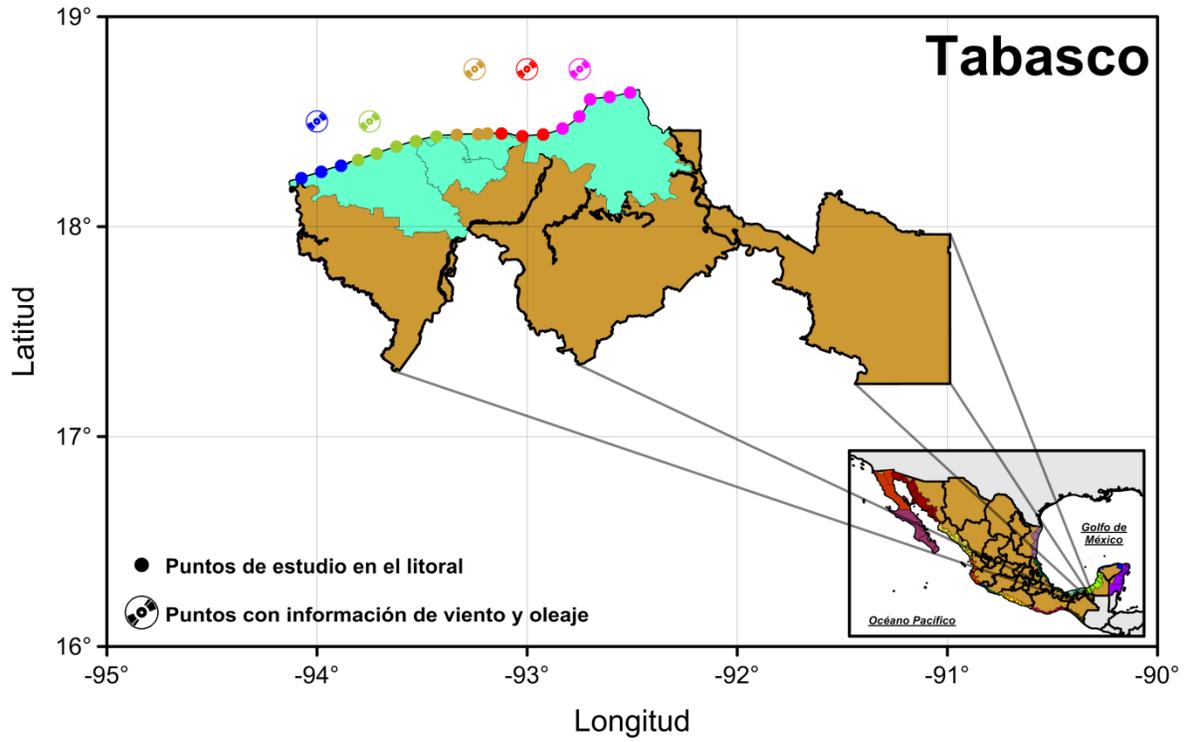


Figura 4.4.18 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Tabasco.

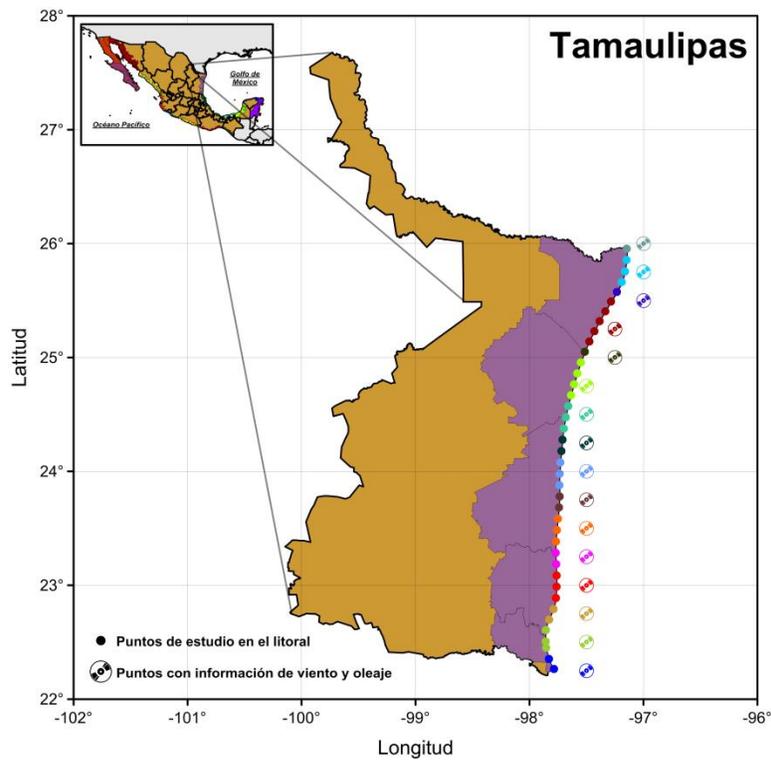


Figura 4.4.19 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Tamaulipas.

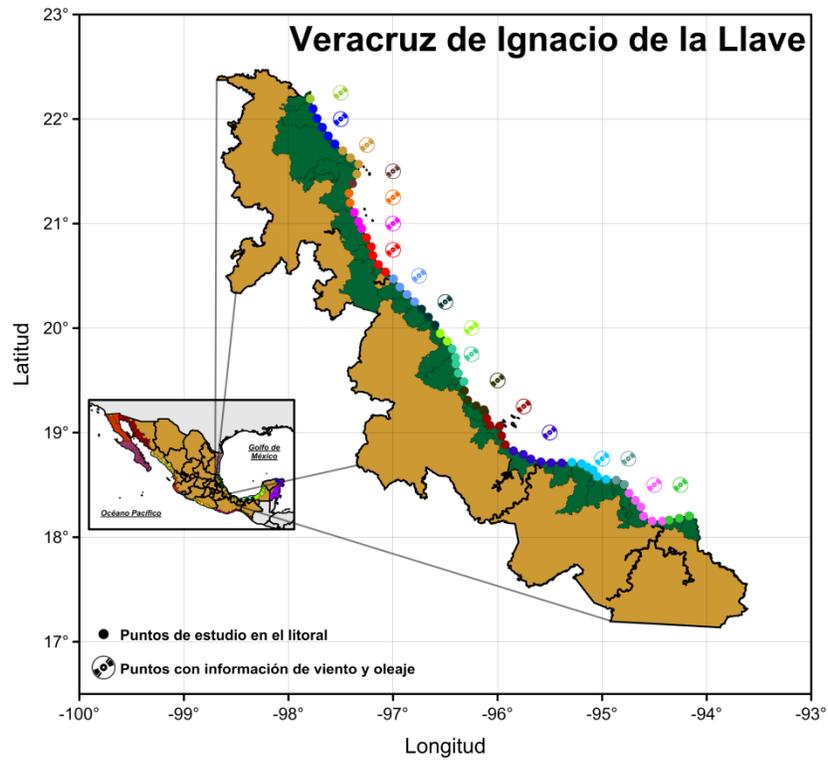


Figura 4.4.20 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave.

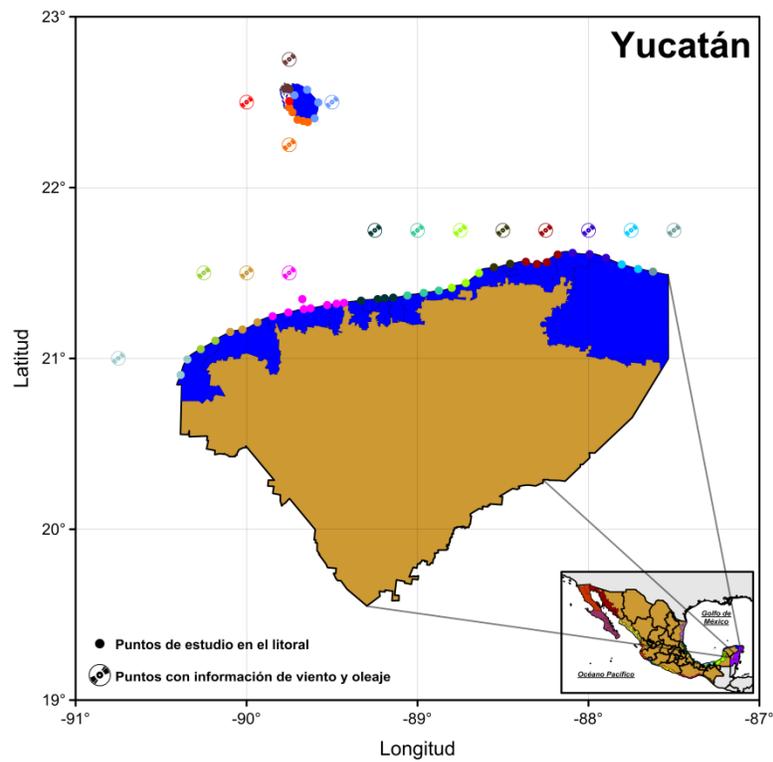


Figura 4.4.21 Puntos de influencia de la base de datos de viento y oleaje para el estado de Yucatán.

4.5 TSUNAMIS

La metodología empleada para obtener los resultados del estudio de tsunamis utilizando las ecuaciones paramétricas se muestra en la Figura 4.5.1. Los parámetros seleccionados para la construcción de los escenarios de estudio fueron sismos con magnitudes de 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5 y 9.0 grados en la escala de Richter y con hipocentros a 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 y 60 km de profundidad del lecho marino en 79 epicentros (Figura 4.5.2) distribuidos en los mares del país (5 en el Golfo de México, 9 en el Mar Caribe y 65 en el océano Pacífico). Con estos parámetros se tuvieron en total 4,424 escenarios. La ubicación de los epicentros se tomó de (García Martínez, 2012).

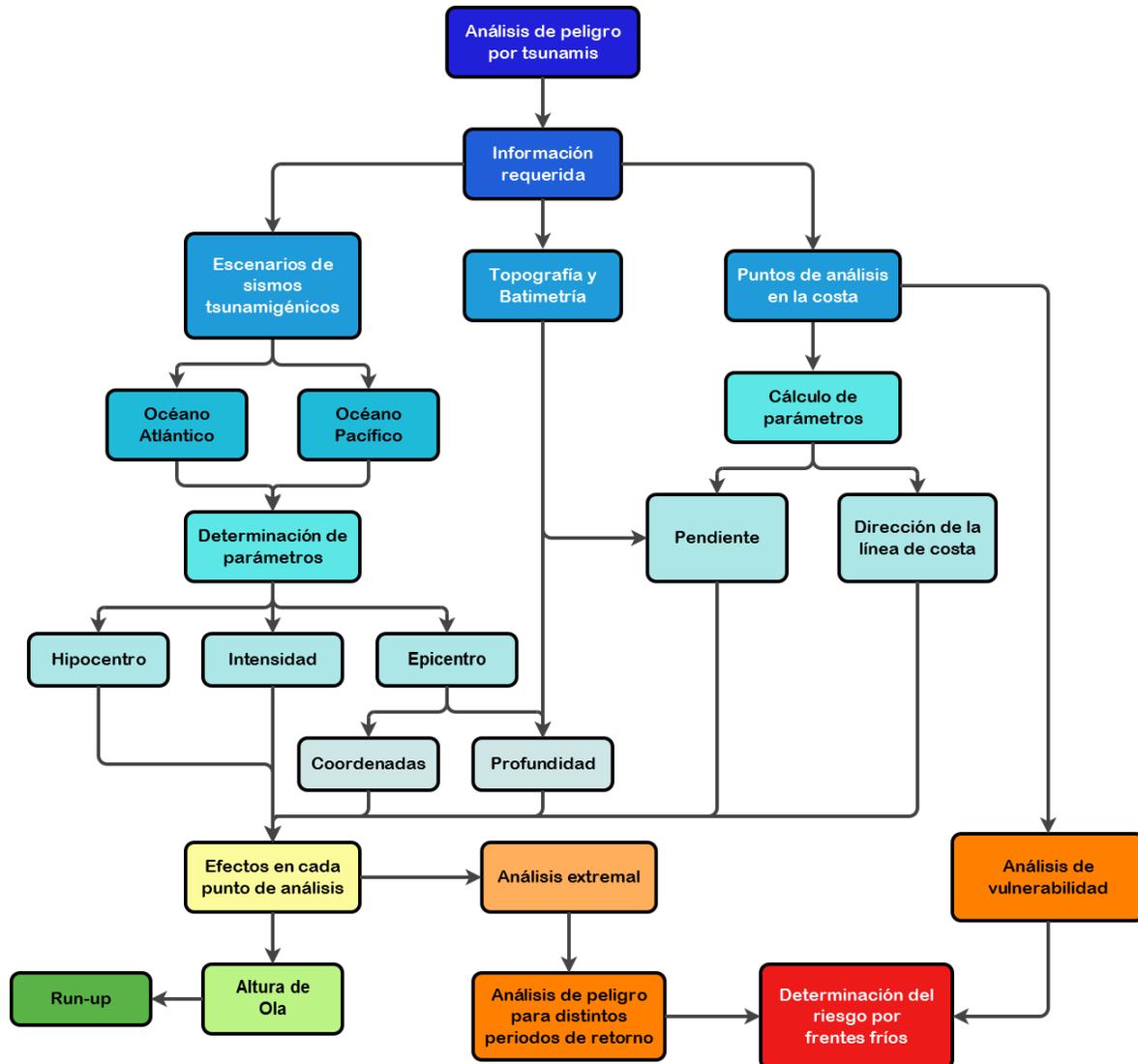


Figura 4.5.1 Diagrama de análisis de tsunamis por el método paramétrico.

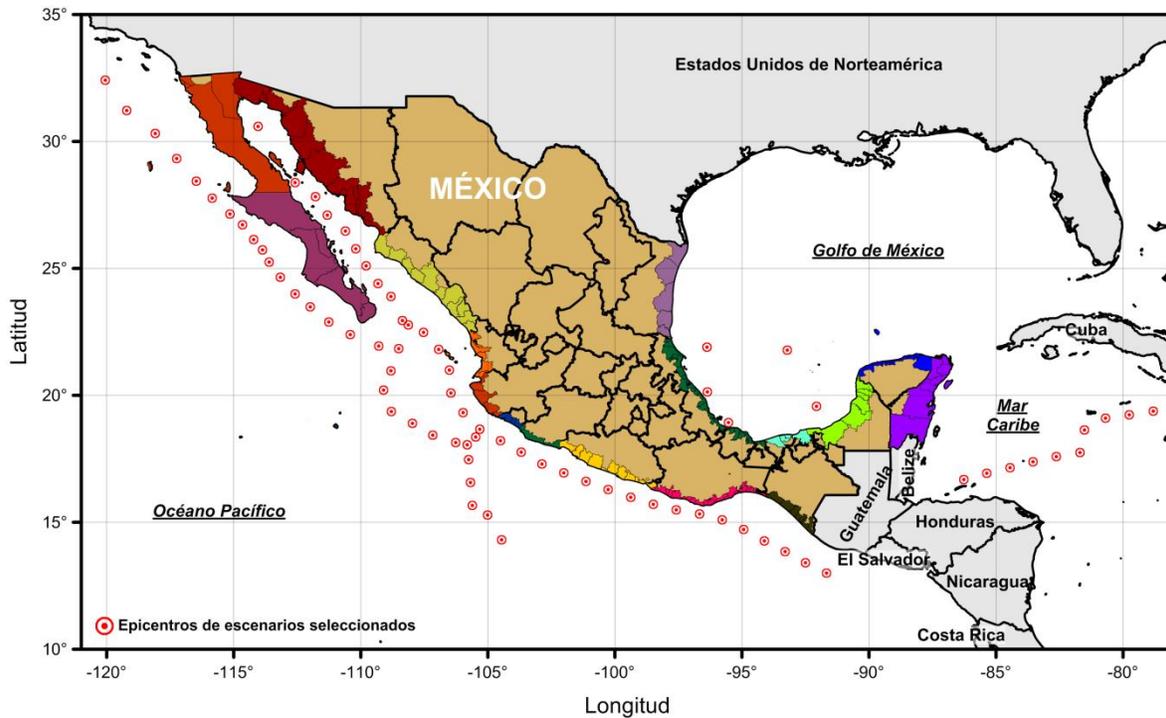


Figura 4.5.2 Ubicación de epicentros para los escenarios seleccionados.

Los efectos de los epicentros se aplicaron para diferentes puntos de estudio, separándolos en aquellos que afectarían al Golfo de México (Figura 4.5.3), Mar Caribe (Figura 4.5.4), Mar de Cortés y Océano Pacífico centro y sur (Figura 4.5.5), Océano Pacífico (Figura 4.5.6) y Océano Pacífico y Mar de Cortés (Figura 4.5.7).

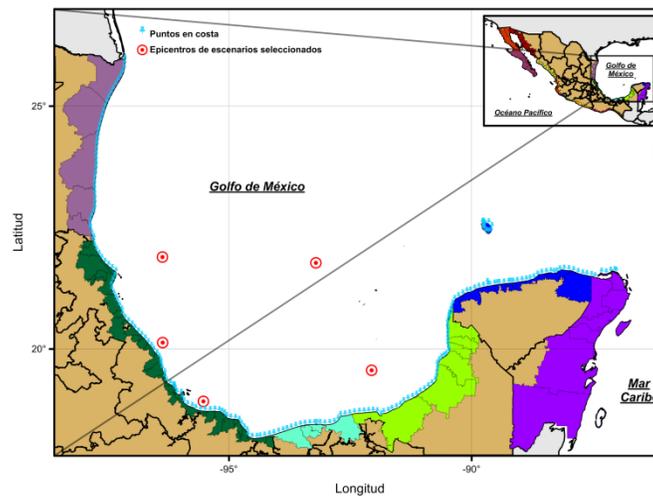


Figura 4.5.3 Epicentros y puntos de afectación en el Golfo de México.

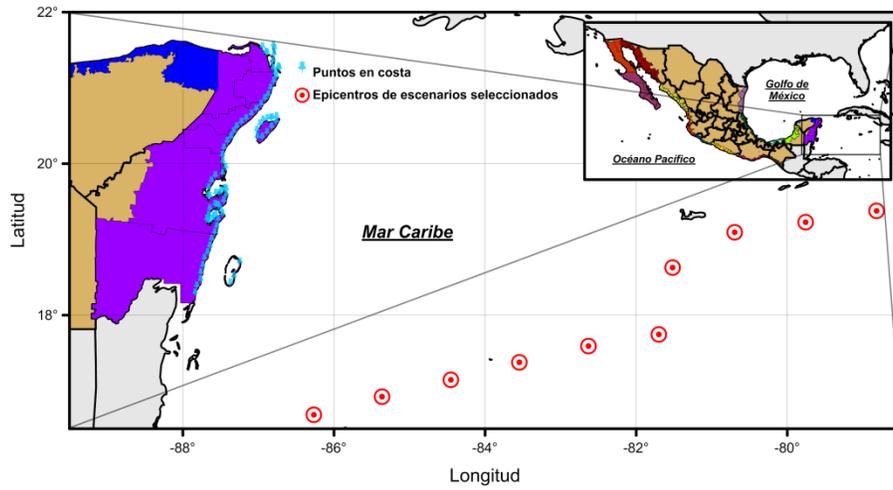


Figura 4.5.4 Epicentros y puntos de afectación en el Mar Caribe.

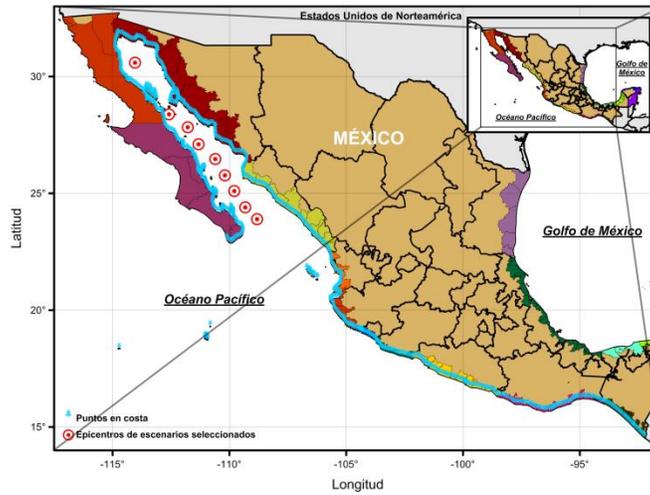


Figura 4.5.5 Epicentros y puntos de afectación en el Mar de Cortés y Océano Pacífico.

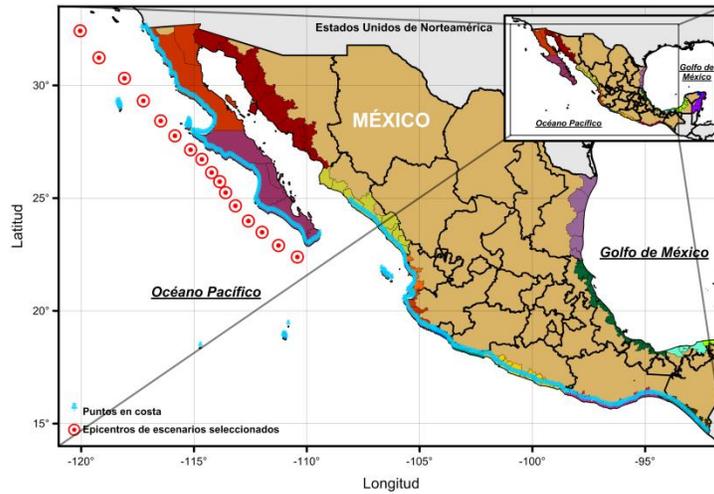


Figura 4.5.6 Epicentros noroeste y puntos de afectación en el Océano Pacífico.

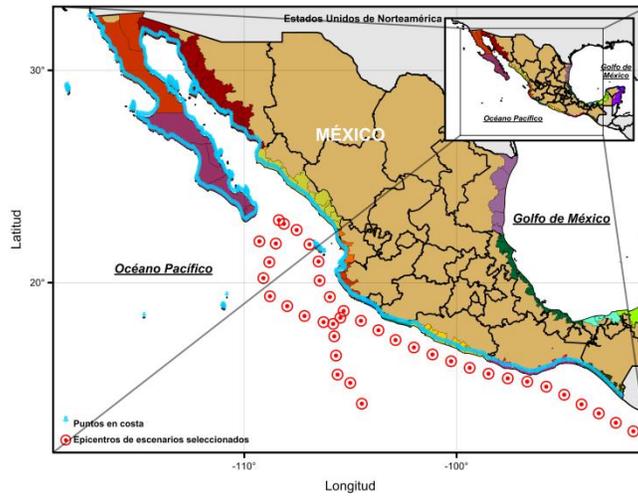


Figura 4.5.7 Epicentros centro-sur y puntos de afectación en el Océano Pacífico.

4.6 DETERMINACIÓN DE PERIODOS DE RETORNO

Los periodos de retorno para el caso de huracanes y frentes fríos se calcularon de acuerdo a la distribución de Gumbel para eventos extremos. En la Figura 4.6.1 se muestra un resumen de la principal secuencia a seguir para la ejecución del método.

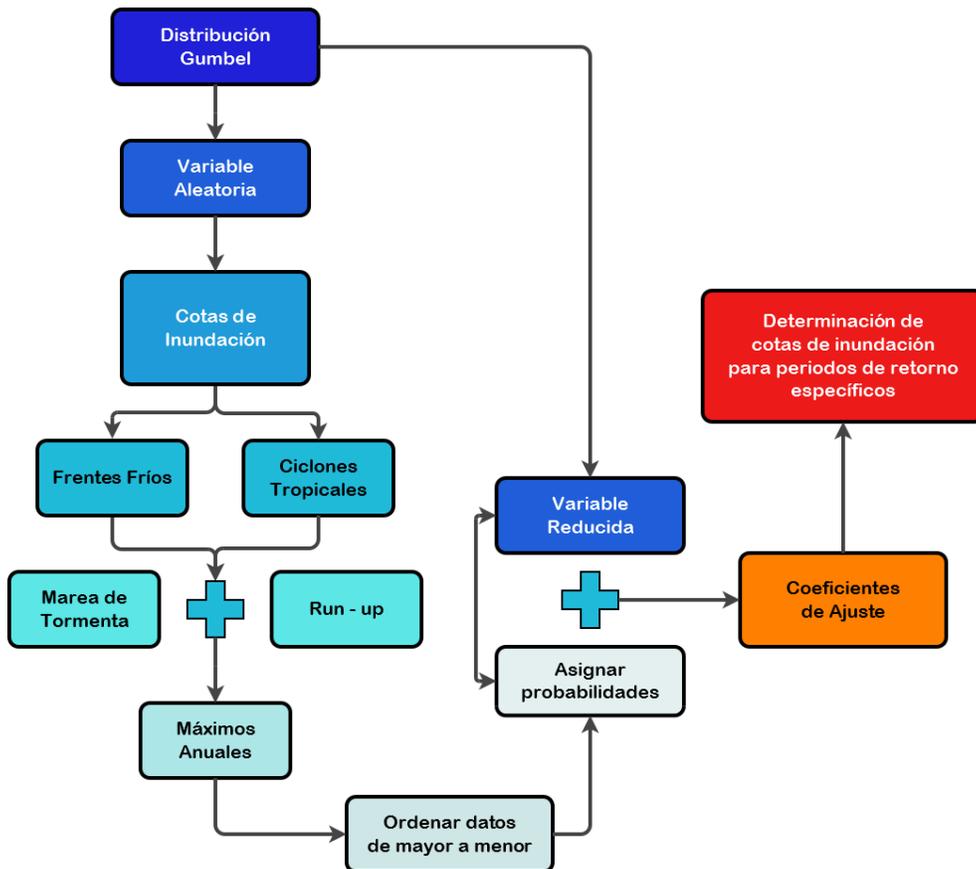


Figura 4.6.1 Diagrama de desarrollo de la distribución de Gumbel.

La distribución de Gumbel tiene como expresión matemática la ecuación:

$$\Phi(y) = e^{-e^{-y}} \quad \text{Ec. (4.3)}$$

Donde: $\Phi(y)$ es la función de distribución de la variable reducida y tiene como ecuación lineal:

$$y = \alpha_0(x - u_0) \quad \text{Ec. (4.4)}$$

Donde: x representa a la variable aleatoria (cota de inundación), α_0 y u_0 son los parámetros de ajuste de la función.

La determinación de la cota de inundación para cada dato calculado se consideró sumando los resultados de marea de tormenta y run-up. Posterior a esto se escogieron los máximos anuales y se ordenaron de mayor a menor, asignándole a cada dato una probabilidad empírica de Weibull de acuerdo a la expresión:

$$p_i = i/n + 1 \quad \text{Ec. (4.5)}$$

Donde: p_i es la probabilidad empírica de cada dato, i es el orden que le corresponde a cada valor ordenado, y n es el número de datos en el registro de máximos anuales.

La variable reducida se calculó con la siguiente relación:

$$y_i = -Ln[Ln(1/1 - p_i)] \quad \text{Ec. (4.6)}$$

Los coeficientes de ajuste se calcularon con la ayuda de las siguientes expresiones:

$$\alpha_0 = \sigma_n(y)/\sigma_x \quad \text{Ec. (4.7)}$$

Donde: σ_x es la desviación estándar de los datos observados, y $\sigma_n(y)$ es la desviación estándar de la variable reducida.

$$u_0 = \bar{x} - \bar{y}_n/\alpha_0 \quad \text{Ec. (4.8)}$$

Donde: \bar{x} es la media aritmética de la variable aleatoria y \bar{y}_n es la media aritmética de los valores de la variable reducida.

La media aritmética y la desviación estándar de los valores de la variable reducida son solo función del número de datos (n) del registro, por lo que estos parámetros se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\bar{y}_n = 1/n \sum_{i=1}^n -Ln\{Ln[(n+1)/(n+1-i)]\} \quad \text{Ec. (4.9)}$$

$$\sigma_n(y) = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (-Ln\{Ln[(n+1)/(n+1-i)]\} - \bar{y}_n)^2} \quad \text{Ec. (4.10)}$$

La media aritmética de la variable aleatoria se calculó con la expresión:

$$\bar{x} = 1/n \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ec. (4.11)}$$

Y la desviación estándar con la expresión:

$$\sigma_x = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ec. (4.12)}$$

Una vez obtenidos los coeficientes de ajuste se determinó el coeficiente de correlación de la función con la ecuación:

$$r = \sigma_{xy} / (\sigma_x \sigma_y) \quad \text{Ec. (4.13)}$$

Donde: r es el coeficiente de correlación y σ_{xy} es la covarianza, la cual se calcula de acuerdo a la siguiente función:

$$\sigma_{xy} = 1/n (\sum_{i=1}^n x_i y_i) - \bar{x} \bar{y}_n \quad \text{Ec. (4.14)}$$

Despejando x de la ecuación (4.4) se llega a la siguiente expresión:

$$x_i = u_0 + y_i / \alpha_0 \quad \text{Ec. (4.15)}$$

Con esta expresión se pueden calcular valores de la variable aleatoria (cota de inundación) para periodos de retorno específicos, determinando la probabilidad del periodo de retorno con la siguiente expresión y determinando con esta la variable reducida correspondiente.

$$p_i = 1/T_i \quad \text{Ec. (4.16)}$$

Para la evaluación del efecto de inundación por tsunamis no se calcularon periodos de retorno, por la dificultad en la determinación de la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los epicentros propuestos con sus características específicas, por lo que solo se presenta una relación de la magnitud del sismo y el máximo run-up generado para cada punto de estudio. Con los resultados obtenidos se hizo un ajuste a la función:

$$y = (a + b \ln x)^{-1} \quad \text{Ec. (4.17)}$$

Donde: y es el run-up alcanzado por el tsunami (m), a y b son coeficientes de ajuste de la función, y x es la magnitud del sismo (escala de Richter), obteniéndose para cada punto en el litoral una ecuación característica. Estas ecuaciones se obtuvieron con la ayuda de la función *fit* del programa Grapher y, en algunos casos, con el programa CurveExpert.

4.7 VULNERABILIDAD DE LA ZONA COSTERA

Los estudios de vulnerabilidad requieren la revisión de múltiples factores que influyen en su determinación, como son: tipo y uso de suelo, ubicación de infraestructura, tipo de construcciones, resiliencia de cada sitio específico, cómo reacciona la población ante el fenómeno, tipo de bienes y población expuesta, entre otros. Los alcances de este trabajo no abarcan estas revisiones, sin embargo se hicieron algunos cálculos con la información de los censos de población para indicar, de manera general, la población en la zona costera expuesta al embate los fenómenos estudiados.

Estos datos se obtuvieron de la página del INEGI www.inegi.org.mx de los censos de población nacional de 1895 a 2010, estatal de 1895 a 2010 y municipal de 1990 a 2010. Los cálculos que se realizaron incluyen la tasa de crecimiento anual calculada mediante la siguiente expresión:

$$TCA = 100 \left[(P_f / P_i)^{1/N} - 1 \right] \quad \text{Ec. (4.18)}$$

Donde: TCA es la tasa de crecimiento anual (%), P_f es la población al final del periodo analizado (habitantes), P_i es la población al inicio del periodo (habitantes) y N es el lapso de tiempo en años entre los registros de población final y población inicial.

Las revisiones incluyen cálculos de porcentaje de población en estados costeros con respecto a la población nacional, población en municipios costeros con respecto a la población nacional y estatal y tasas de crecimiento anual.

4.8 ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Debido a los volúmenes de información trabajados, se crearon códigos en lenguaje KML (Keyhole Markup Language) que pueden ser visualizados con la ayuda de Google Earth, logrando con eso presentar la información de forma ordenada y semejante a un SIG (Sistema de Información Geográfica) convencional.

Los archivos procesados se cargaron en la plataforma de DropBox, pudiendo acceder a ellos mediante ligas en el mismo mapa, reduciendo con esto el tamaño de los archivo y pudiéndolo compartir fácilmente con diversos usuarios que en algún momento pudieran llegar a necesitar la información generada.

5. PELIGRO POR INUNDACIÓN EN EL LITORAL MEXICANO

Para la evaluación del peligro de inundación por los eventos estudiados en este trabajo se consideraron las cotas de inundación obtenidas de los análisis. Sin embargo, para una apreciación más clara del efecto que estos valores pudieran tener en la costa, es necesario considerar la pendiente de la misma. En la Figura 4.8.1 se presenta un mapa con una escala de color de las pendientes a la cota +5.00 m calculadas, en donde las zonas con pendientes más suaves presentan mayor peligro a la inundación, pues el agua penetraría más en estas zonas que en aquellas con pendientes más pronunciadas. Además de la pendiente, se deben considerar las características del suelo como son tipo de suelo, cobertura vegetal, urbanización, vías de comunicación y diversos parámetros que influyen en cómo se presenta una inundación.

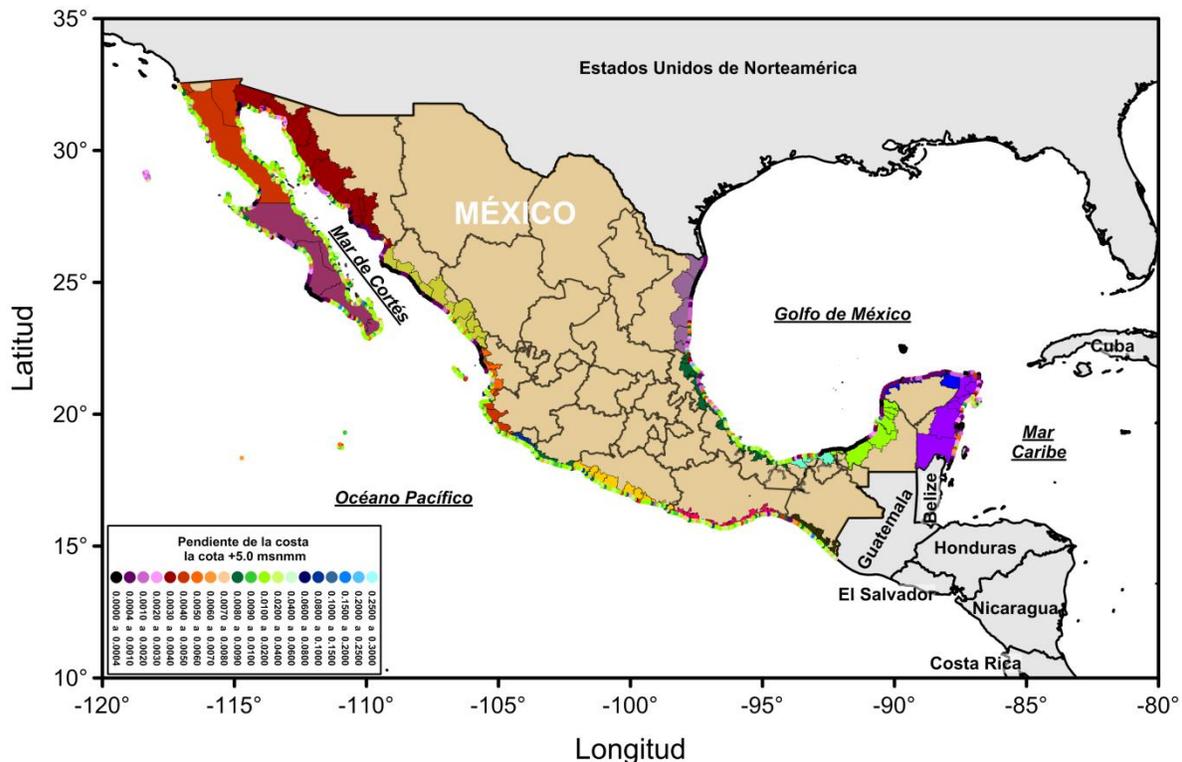


Figura 4.8.1 Pendiente calculada a la cota +5.00 m.

5.1 INFORMACIÓN GENERADA

Para cada punto de estudio se determinaron los efectos calculados por ciclones tropicales, frentes fríos y tsunamis. A modo de ejemplo se presentan los resultados que se pueden observar en el Atlas de consulta interactiva, en el punto número 0530 en coordenadas 105.45° longitud Oeste y 21.63° latitud Norte ubicado en el municipio de San Blas, Nayarit.

En la Tabla 5.1.1 se muestra la información de ciclones que se han acercado al punto de estudio a 500, 400, 300, 200 y 100 m, indicando el total general y la cantidad de ciclones para cada categoría de huracán. Con estos datos se puede determinar la probabilidad de incidencia de ciclones en algún punto, así como la categoría y distancia con la que se han presentado.

Tabla 5.1.1 Ciclones que han afectado a la celda 0530 de 1949 a 2012.

Dist. (km)	Total	Categoría						
		DT	TT	H1	H2	H3	H4	H5
500.0	235	59	107	46	11	7	4	1
400.0	147	37	65	27	10	5	2	1
300.0	86	16	43	17	5	2	2	1
200.0	48	13	20	8	3	2	2	0
100.0	11	5	5	0	0	1	0	0

Dist.: distancia máxima a la que se encontraba el ojo del huracán del punto de estudio

DT: Depresión Tropical

TT: Tormenta Tropical

H1: Huracán categoría 1

H2: Huracán categoría 2

H3: Huracán categoría 3

H4: Huracán categoría 4

H5: Huracán categoría 5

En la Tabla 5.1.2 se presenta parte del registro calculado para los efectos de ciclones tropicales, observándose los efectos cálculos por el huracán Kenna. En este registro se indica la fecha y hora del meteoro, el nombre asignado, la clave con la que se le denomina en el registro de ciclones de la base de datos HURDAT2, la distancia entre el ojo del fenómeno y el punto de estudio, la categoría del huracán, la presión en el punto de estudio, la velocidad y dirección del viento, la altura de ola y periodo significantes, el ascenso máximo del oleaje y la marea de tormenta por efectos de presión y viento. Estos dos últimos datos se utilizaron para el cálculo de la cota de inundación, presentándose para cada caso un ajuste de los máximos anuales, logrando asignar cotas de inundación para distintos periodos de retorno. En la Figura 5.1.1 se muestra la gráfica que resultó de este proceso obtenida para cada punto.

Tabla 5.1.2 Extracto del registro de ciclones que han afectado la celda 0530.

Año	M	D	H	Min.	Nombre	Clave	Dist. (km)	Cat.	Presión (mb)	VV (km/h)	DV (°)	Hs (m)	Ts (s)	Ru (m)	MT (m)
2002	10	25	0	0	KENNA	EP142 002	474.6	H5	1008.1	39.5	49.4	2.5	6.1	0.5	0.0
2002	10	25	6	0	KENNA		335.4	H5	1006.0	60.8	48.6	4.4	8.1	0.9	0.1
2002	10	25	12	0	KENNA		174.7	H4	999.1	112.1	49.3	9.3	11.8	1.9	0.1
2002	10	25	18	0	KENNA		63.4	H3	985.5	133.2	233.8	10.8	12.7	2.2	0.3

M: Mes

D: Día

H: Hora

Min.: Minuto

Dist.: Distancia

Cat.: Categoría del huracán

VV: Velocidad del viento

DV: Dirección del viento

Hs: Altura de ola significativa

Ts: Periodo significativa

Ru: Ascenso máximo del oleaje

MT: Marea de tormenta

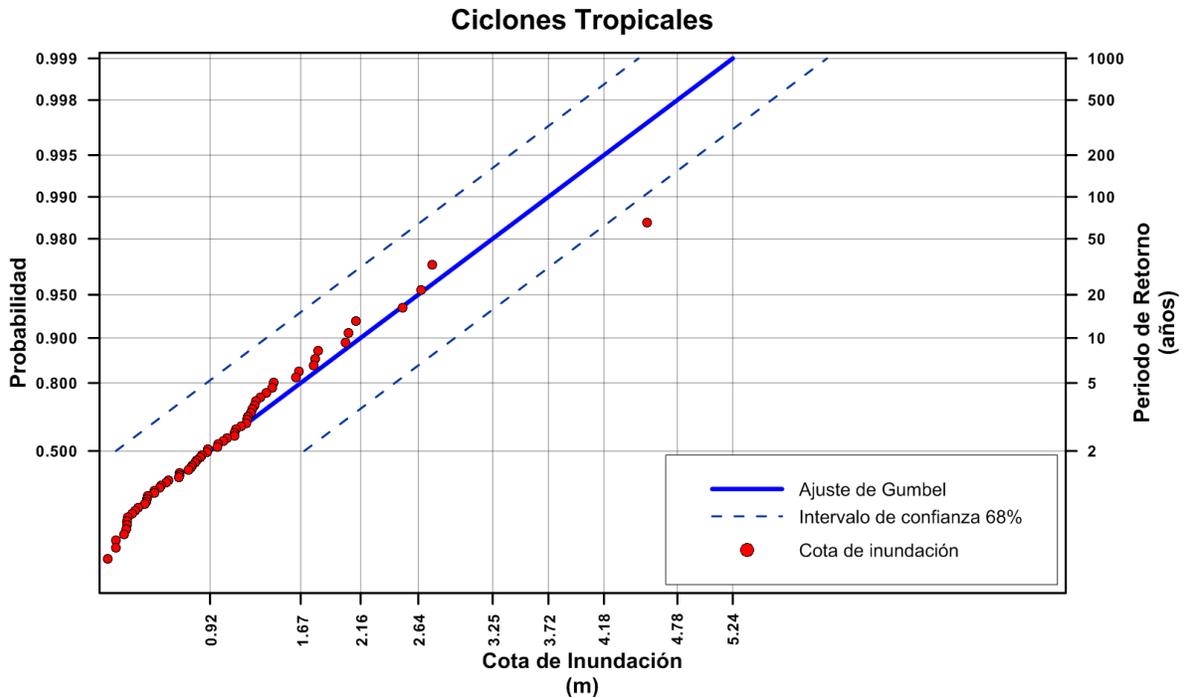


Figura 5.1.1 Cotas de inundación por ciclones tropicales asignadas a periodos de retorno para el punto 0530.

En cuanto a la evaluación de frentes fríos, también se elaboraron tablas con los cálculos obtenidos para este fenómeno, sin embargo, por el tamaño de los archivos no se adjuntaron en el atlas de consulta interactiva. En la Tabla 5.1.3 se presenta la estructura de la información generada para este rubro. En la Figura 5.1.1 se muestra el ajuste de los máximos anuales para cotas de inundación por este fenómeno para distintos periodos de retorno.

Tabla 5.1.3 Extracto del registro de vientos que han afectado la celda 0530.

Año	Mes	Día	Hora	VV (m/s)	DV (°)	Hs (m)	DH (°)	Ts (s)	Tm (s)	Ru (m)	MV (m)
2007	10	28	4	6.9	280.6	0.30	270.8	2.3	3.3	0.068	0.026
2007	10	28	5	6.9	280.6	0.30	270.8	2.3	3.3	0.068	0.026
2007	10	28	6	6.9	280.6	0.30	270.8	2.3	3.3	0.068	0.026
2007	10	28	7	6.9	280.6	0.30	270.8	2.3	3.3	0.068	0.026
2007	10	28	8	6.9	280.6	0.30	270.8	2.3	3.3	0.068	0.026
2007	10	28	9	6.9	280.6	0.30	270.8	2.3	3.3	0.068	0.026
2007	10	28	10	6.9	280.6	0.30	270.8	2.3	3.3	0.068	0.026

VV: Velocidad del viento

DV: Dirección del viento

Hs: Altura de ola significativa

DH: Dirección del oleaje

Ts: Periodo significativo

Tm: Periodo medio

Ru: Ascenso máximo del oleaje

MV: Marea de tormenta por efecto del empuje del viento

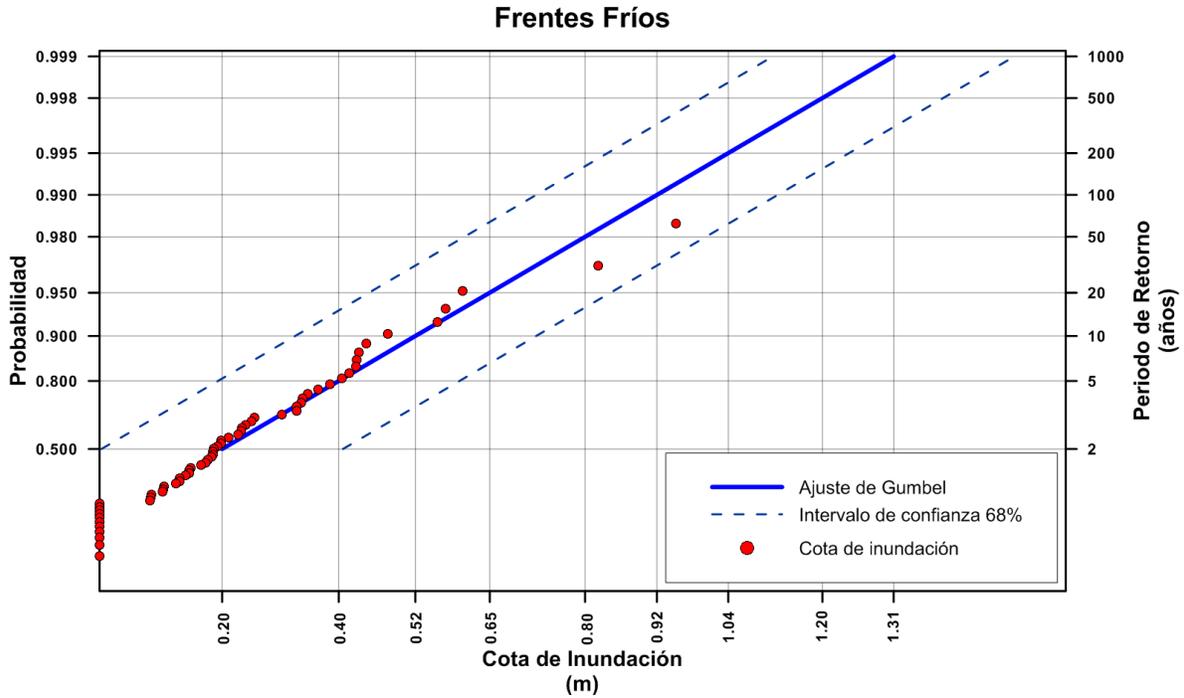


Figura 5.1.2 Cotas de inundación por frentes fríos asignadas a periodos de retorno para el punto 0530.

Finalmente, los efectos evaluados para tsunamis se presentan en una estructura similar a la presentada en la Tabla 5.1.4 mostrando los parámetros calculados para cada escenario de análisis. Además se presenta un resumen con la estructura mostrada en la Tabla 5.1.5 en la que se muestran los efectos máximos calculados para los escenarios de estudio de acuerdo a la intensidad de los sismos tsunamigénicos propuestos. También se presenta una gráfica de ajuste para los resultados máximos registrados (Figura 5.1.3).

Tabla 5.1.4 Extracto de escenarios de tsunamis para la celda 0530.

Y (km)	D (km)	H (m)	Ru (m)	Ms	Prof. (km)	NE	Lon. (°)	Lat. (°)
90.134	130.242	1.129	0.234	6.0	5.0	013	-106.51	21.00
90.134	130.242	1.133	0.235	6.5	5.0	013	-106.51	21.00
90.134	130.242	1.156	0.240	7.0	5.0	013	-106.51	21.00
90.134	130.242	1.289	0.268	7.5	5.0	013	-106.51	21.00
90.134	130.242	2.075	0.431	8.0	5.0	013	-106.51	21.00
90.134	130.242	6.842	1.420	8.5	5.0	013	-106.51	21.00
90.134	130.242	34.052	7.068	9.0	5.0	013	-106.51	21.00

Y: Distancia al punto en costa más cercano al epicentro

D: Distancia al epicentro

H: Altura de ola

Ru: Ascenso máximo del oleaje

Ms: Magnitud del sismo

Prof.: Profundidad del epicentro

NE: Número de epicentro

Lon., Lat.: Coordenadas del epicentro

Tabla 5.1.5 Máximo efectos calculados por tsunamis para la celda 0530.

Ms	Run-up	Epicentro
6.0	0.281	052
6.5	0.282	052
7.0	0.287	052
7.5	0.314	052
8.0	0.468	052
8.5	1.420	013
9.0	7.068	013

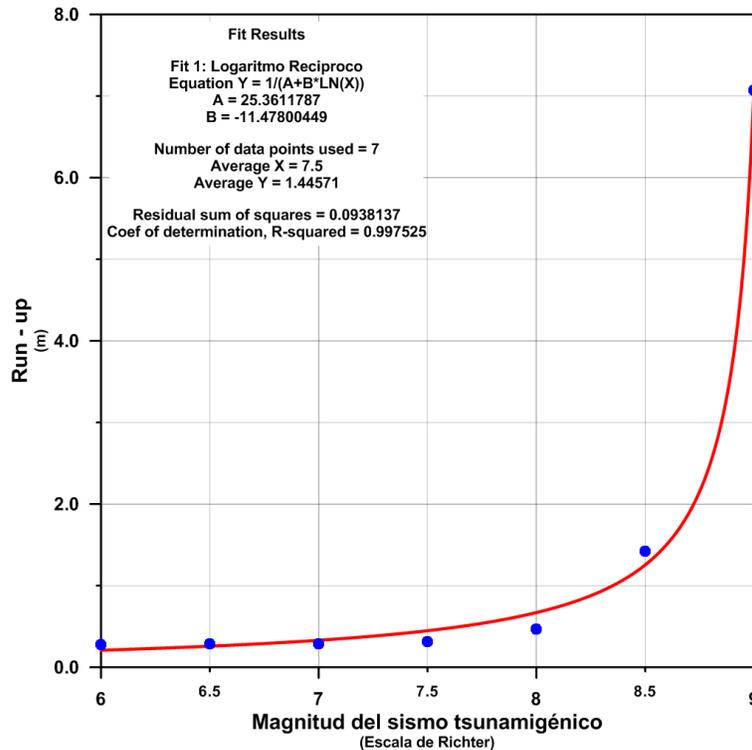


Figura 5.1.3 Cotas de inundación por tsunamis asignadas a magnitudes de sismos para la celda 0530.

5.2 RESUMEN DE RESULTADOS

5.2.1 CENSOS DE POBLACIÓN INEGI

Los análisis de población incluyen un resumen por municipio y estado de los parámetros contemplados, a saber, tasa de crecimiento de población anual, densidad de población, porcentaje de población con respecto a la población nacional y estatal, así como gráficas de los municipios costeros con mayor población por estado. Toda esta información se encuentra concentrada en el atlas de consulta interactiva, por lo que en este trabajo se presenta un resumen de resultados a nivel nacional.

Figura 5.2.1 se muestra una gráfica del porcentaje de población con respecto a la población nacional en municipios y estados costeros y las tasas de crecimiento anual. Se observa que más del 45% de la población nacional radica en estados costeros y más del 15% de la población nacional en municipios costeros frente al mar. También se observa que la tasa de crecimiento

anual en municipios costeros supera las tasas de crecimiento anual tanto nacional como estatal, aunque siguiendo la misma tendencia, la cual de 2005 a 2010 presenta un incremento de alrededor del 0.5% anual.

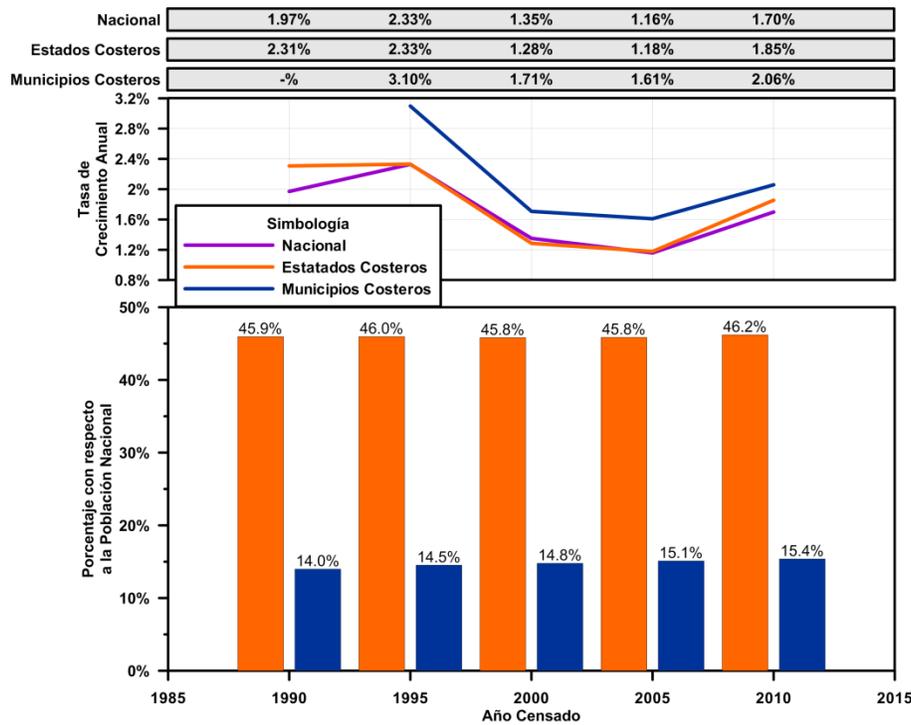


Figura 5.2.1 Población nacional en estados y municipios costeros.

En cuanto a la población en estados costeros en la Figura 5.2.2 se muestra el porcentaje de población en estados costeros con respecto a la población nacional, observándose que los estados con mayor población son Veracruz y Jalisco con más del 6% de la población nacional.

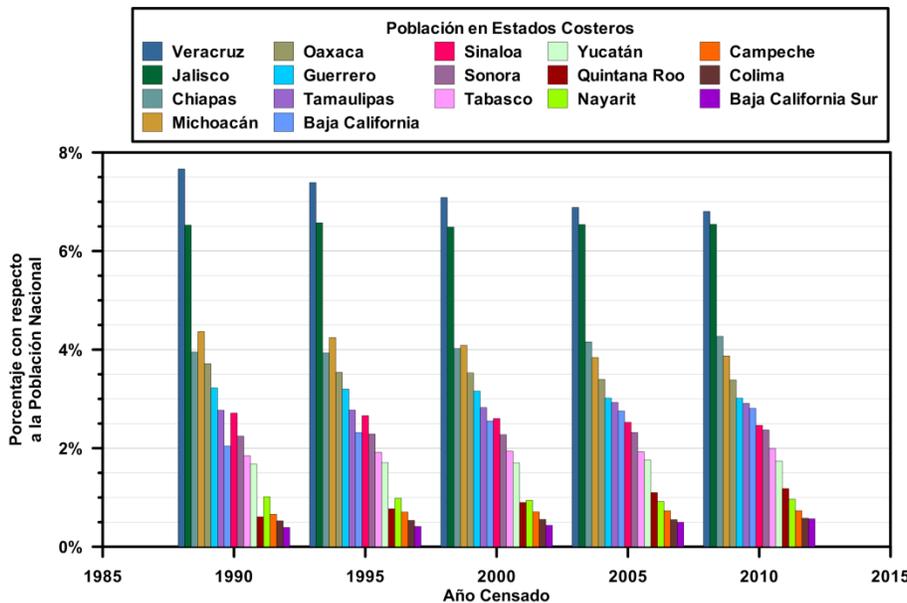


Figura 5.2.2 Población nacional en estados costeros.

En la Figura 5.2.3 se presenta el porcentaje de población en municipios de estados costeros con respecto a la población nacional. Se aprecia que los estados con mayor población en municipios costeros son Baja California y Sinaloa con más del 2% de la población nacional.

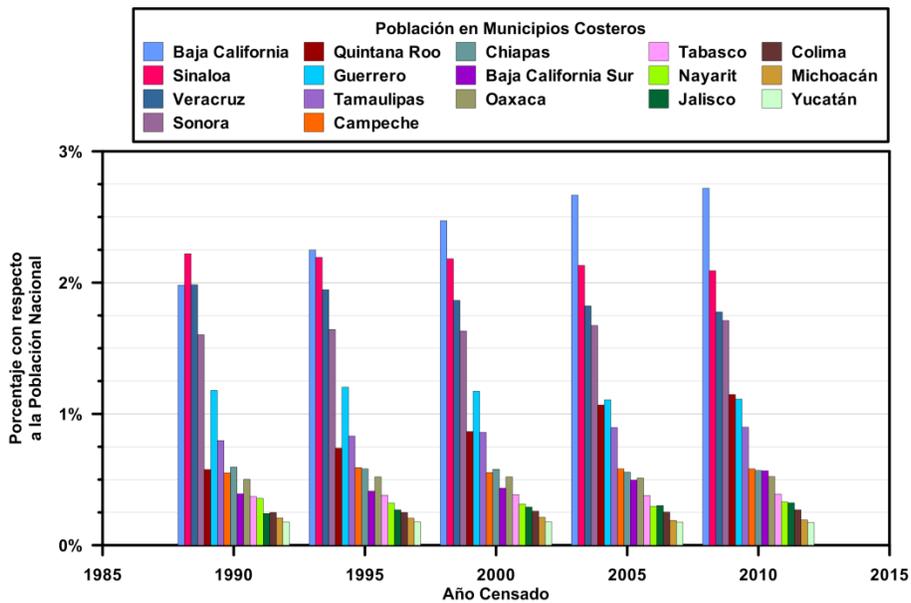


Figura 5.2.3 Población nacional en municipios costeros.

En la Figura 5.2.4 se presenta una gráfica similar a la anterior, pero comparando la población en municipios costeros con la población del estado. Se observa que Baja California Sur es el estado costero por excelencia, pues todos sus municipios tienen frente al mar y por lo tanto el 100% de su población se encuentra en municipios costeros, seguido de Quintana Roo, Baja California, Sinaloa, Campeche, y Sonora donde más del 50% de su población habita en municipios costeros.

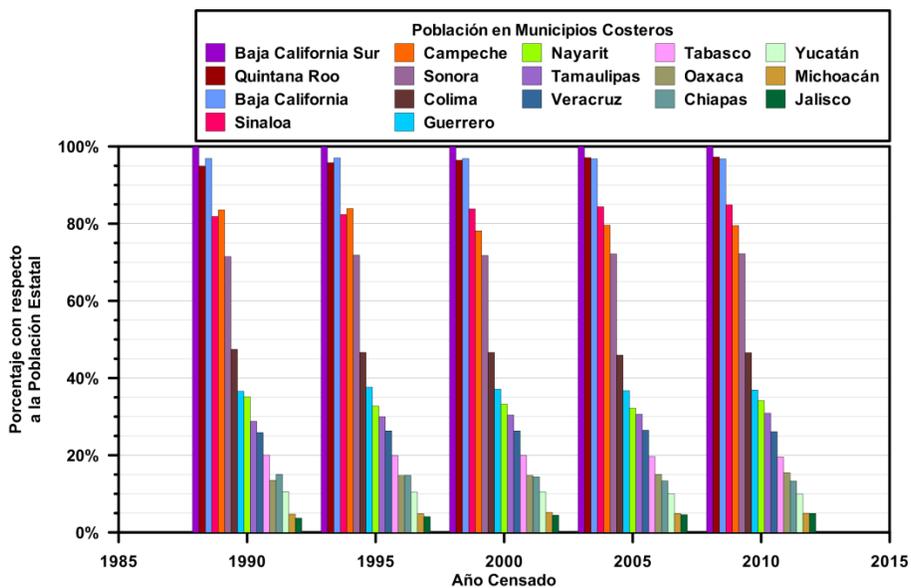


Figura 5.2.4 Población estatal en municipios costeros.

5.2.2 COTAS DE INUNDACIÓN

En la Figura 5.2.5, Figura 5.2.6 y Figura 5.2.7 se presentan promedios por estado de los resultados de cotas de inundación para ciclones tropicales, frentes fríos y tsunamis, respectivamente, para algunos de los periodos de retorno (ciclones tropicales y frentes fríos) y magnitudes de sismos tsunamigénicos calculados. Se aprecia que los estados con mayores cotas de inundación por ciclones tropicales son los de Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Tabasco y Michoacán, mientras que por frentes fríos son los estados de Quintana Roo, Jalisco, Veracruz y Tamaulipas.

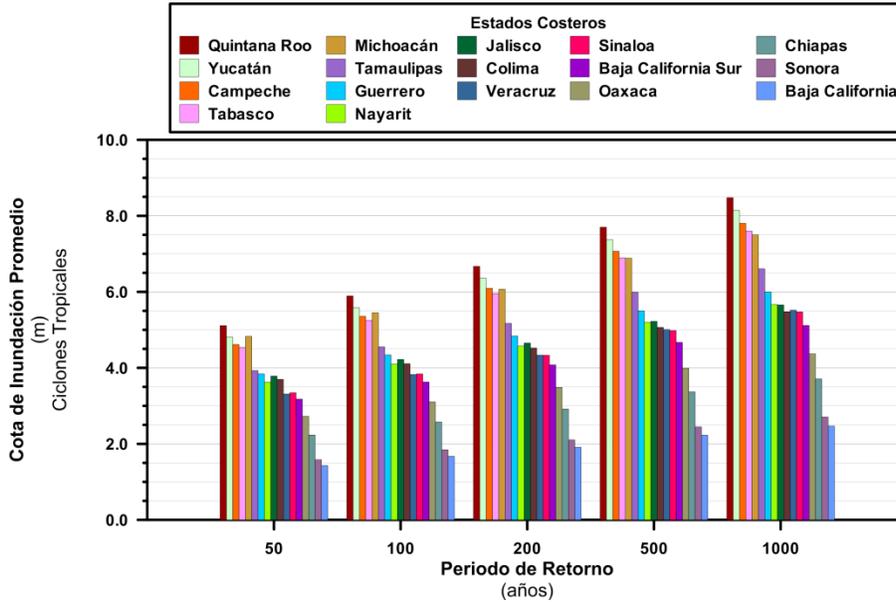


Figura 5.2.5 Cotas de inundación promedio por ciclones tropicales por estado.

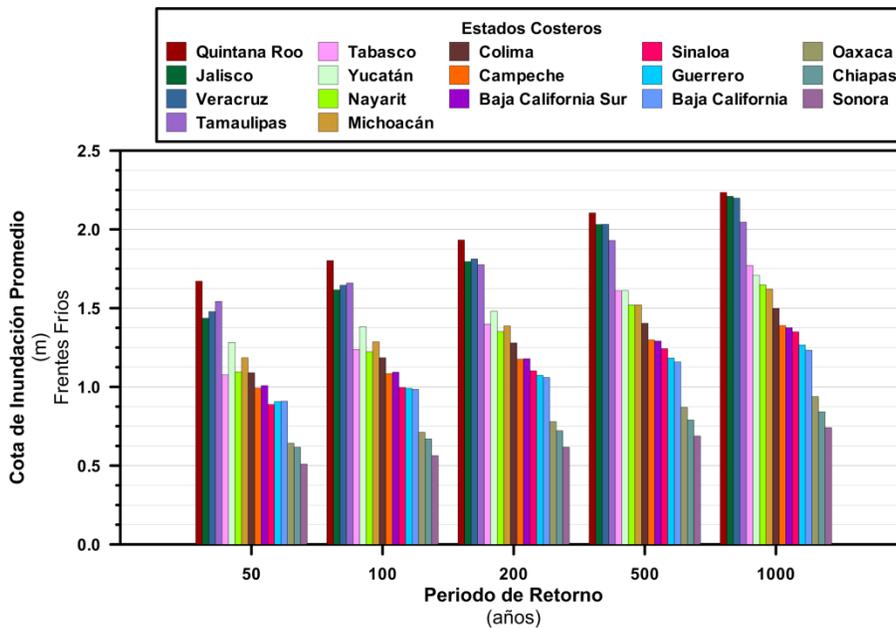


Figura 5.2.6 Cotas de inundación promedio por frentes fríos por estado.

Por tsunamis, los estados que se verían mayormente afectados son Jalisco y Michoacán.

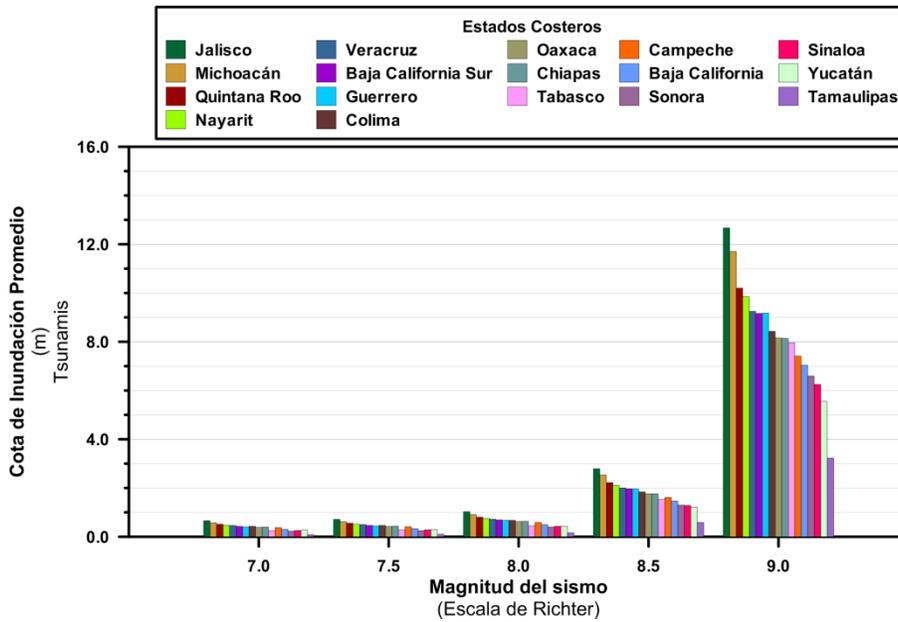


Figura 5.2.7 Cotas de inundación promedio por tsunamis por estado.

5.3 ATLAS DE CONSULTA INTERACTIVA

La estructura general del atlas se presenta en la Figura 5.3.1, donde se observa la subdivisión de los cuatro mapas.

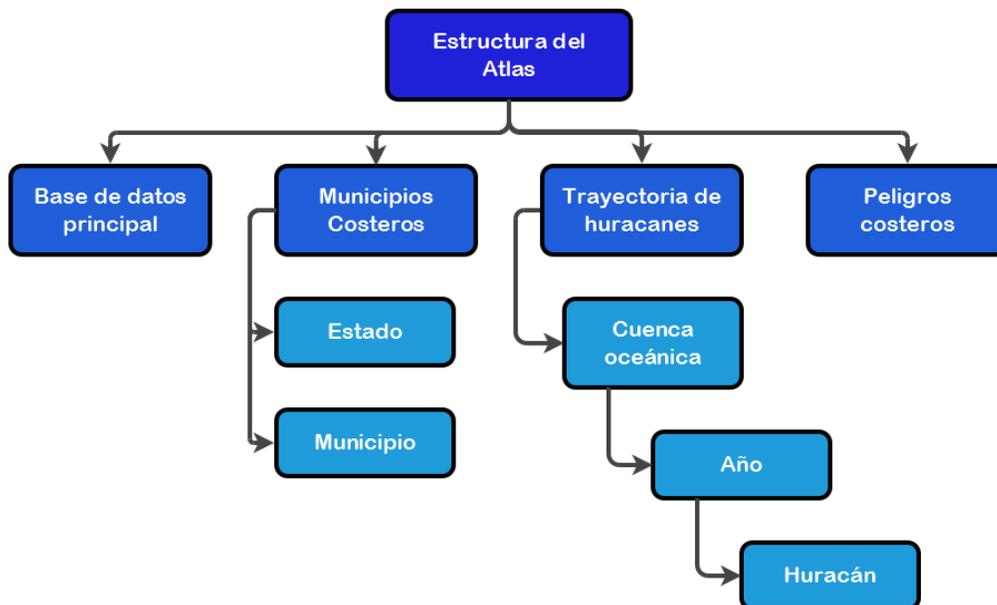


Figura 5.3.1 Estructura del atlas.

5.3.1 BASE DE DATOS PRINCIPAL

En la Figura 5.3.2 se muestra la estructura que guarda la base de datos principal. Esta se encuentra subdividida en cuatro mapas.

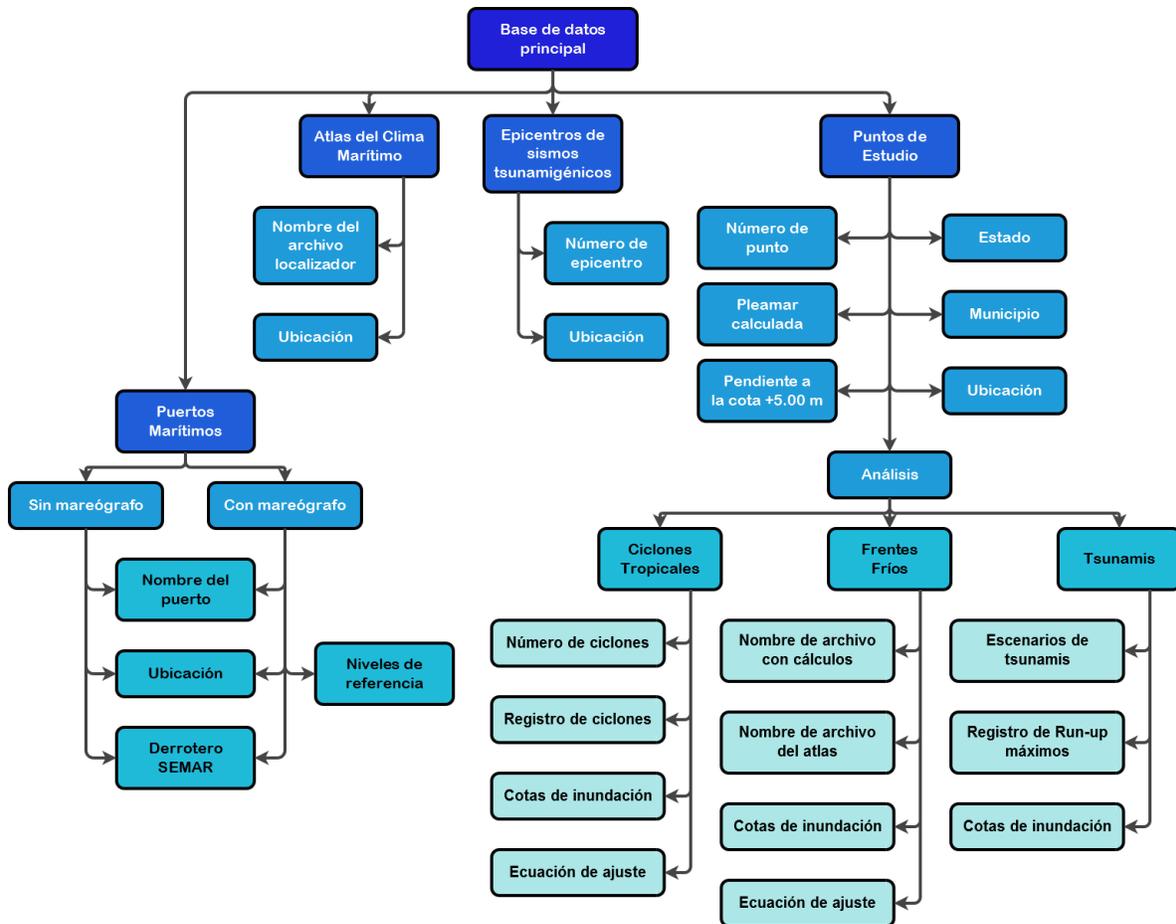


Figura 5.3.2 Estructura de la base de datos principal.

El mapa de puertos marítimos contiene algunos de los puertos del país con mareógrafos de la SEMAR y sin mareógrafos (Figura 5.3.3), presentando las características principales de los mismo. La información que se despliega en cada punto incluye el nombre del puerto, su ubicación geográfica, los niveles de referencia dispuestos en la página de la Red Institucional Mareográfica de la SEMAR (para aquellos puertos con mareógrafo), así como una liga que abre el archivo del derrotero del puerto obtenido de la SEMAR. Este último contiene información como nombre, ubicación, accidentes geográficos, hidrografía, meteorología, vegetación predominante, actividades económicas, autoridades locales y sitios turísticos.

En el mapa de Atlas del Clima Marítimo (Figura 5.3.4) se indican los puntos de la base de datos del Atlas del Clima Marítimo que fueron tomados para el análisis de frentes fríos. En este mapa se despliega el nombre del archivo de la base de datos y su ubicación.

En el mapa de epicentros de sismos tsunamigénicos (Figura 5.3.5) se presenta la ubicación y número de los epicentros considerados para los escenarios de tsunamis.

Finalmente, en el mapa de puntos de estudio (Figura 5.3.6) se muestra el grueso de la información procesada para cada punto costero. En este mapa se despliegan los resultados de la metodología empleada para el análisis de los fenómenos estudiados. La estructura de la información inicia con el identificador del número de punto costero asignado, el nombre del estado en el que se ubica con una liga que dirige a un archivo, también tomado de la página del derrotero digital de la SEMAR,

con información entre puertos, para cada estado se asignó un color pudiendo identificar rápidamente los puntos que pertenecen a cada uno. En este archivo se presenta una descripción de la costa del estado que incluye datos generales, puertos con infraestructura de atraques, lugares con actividad de embarcaciones menores, vías de comunicación, condiciones físicas, puntos notables en la costa, peligros a la navegación, corrientes, vientos y señalamiento marítimo. Además se incluye el nombre del municipio en el que se ubica cada punto, su ubicación geográfica, el nivel de pleamar máximo calculado con la interpolación de los datos de los puertos y la pendiente de la costa a la cota +5.00 m.

Posterior a esta información se presenta la división de los resultados obtenidos del análisis en:

Ciclones tropicales, con ligas a:

- ❖ Tablas del número de ciclones que se han acercado a cada punto a 100, 200, 300, 400 y 500 km categorizados por intensidad.
- ❖ Tablas del registro de los efectos del paso de cada huracán presentando la fecha y hora del fenómeno, así como su nombre, la clave con la que se identifica en la base de datos del HURDAT de la NOAA, la distancia a la que se encontraba del punto de estudio, su categoría, y datos calculados en los puntos de estudio como: presión, velocidad y dirección del viento, altura de ola, periodo y run-up del oleaje y la marea de tormenta calculada por los efectos de la diferencia de presiones entre el centro del meteoro y la presión en el punto de estudio, y el apilamiento por el empuje del viento sobre la superficie del océano.
- ❖ Gráfica de las cotas de inundación estimadas considerando los niveles de marea de tormenta y run-up para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, con bandas de confianza del 68% (desviación estándar).
- ❖ La ecuación de la función de Gumbel ajustada a los datos obtenidos con la cual se podría encontrar valores de cotas de inundación para periodos de retorno que no estén incluidos en el análisis, así como la correlación del ajuste con los datos obtenidos.

Frentes Fríos, con:

- ❖ El nombre del archivo generado con los resultados del análisis de datos del Atlas del Clima Marítimo. No se presenta una liga debido al tamaño de los archivos.
- ❖ El nombre del punto del que se tomó la información del Atlas del Clima Marítimo.
- ❖ Gráfica de las cotas de inundación con las mismas características que la gráfica descrita para ciclones tropicales.
- ❖ Al igual que en ciclones tropicales, la ecuación de ajuste de Gumbel con la correlación entre los datos analizados y la recta.

Tsunamis, presentando ligas a:

- ❖ Tabla de escenarios de tsunamis, con resultados de los cálculos elaborados indicando la posición del punto de estudio, la distancia al punto más cercano al epicentro, la distancia al epicentro, la altura de ola y run-up calculados, la magnitud y profundidad del sismo y el número de epicentro considerado.
- ❖ Tabla con resultados de run-up máximos para cada magnitud.
- ❖ Gráfica con función de ajuste de los máximos encontrados para cada magnitud.

Para facilitar la búsqueda de información en este mapa, se dividió la información en capas por estado y municipio, por lo que rápidamente se pueden seleccionar datos específicos a mostrar.

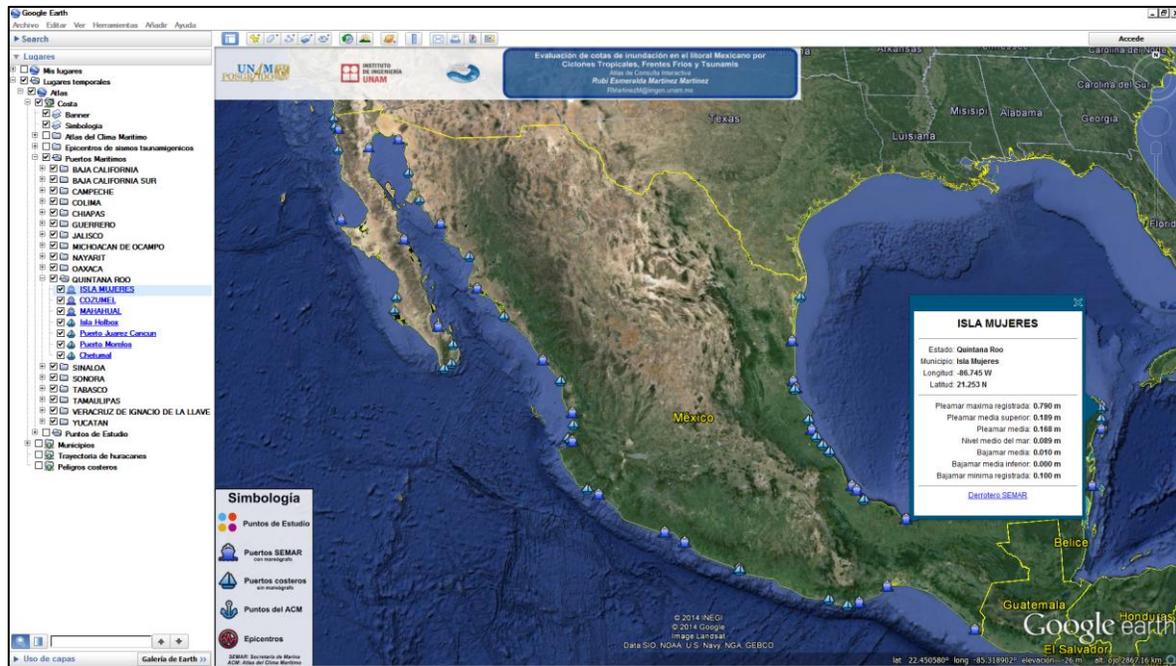


Figura 5.3.3 Mapa de Puertos Marítimos.

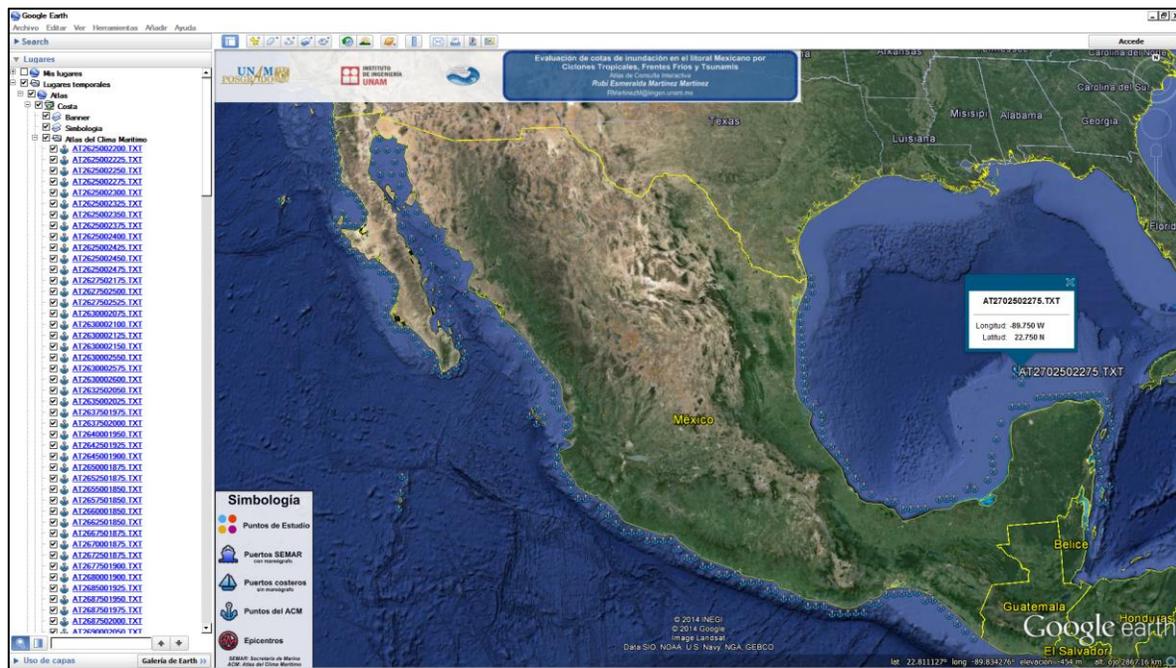


Figura 5.3.4 Mapa de Puntos utilizados del Atlas del Clima Marítimo.

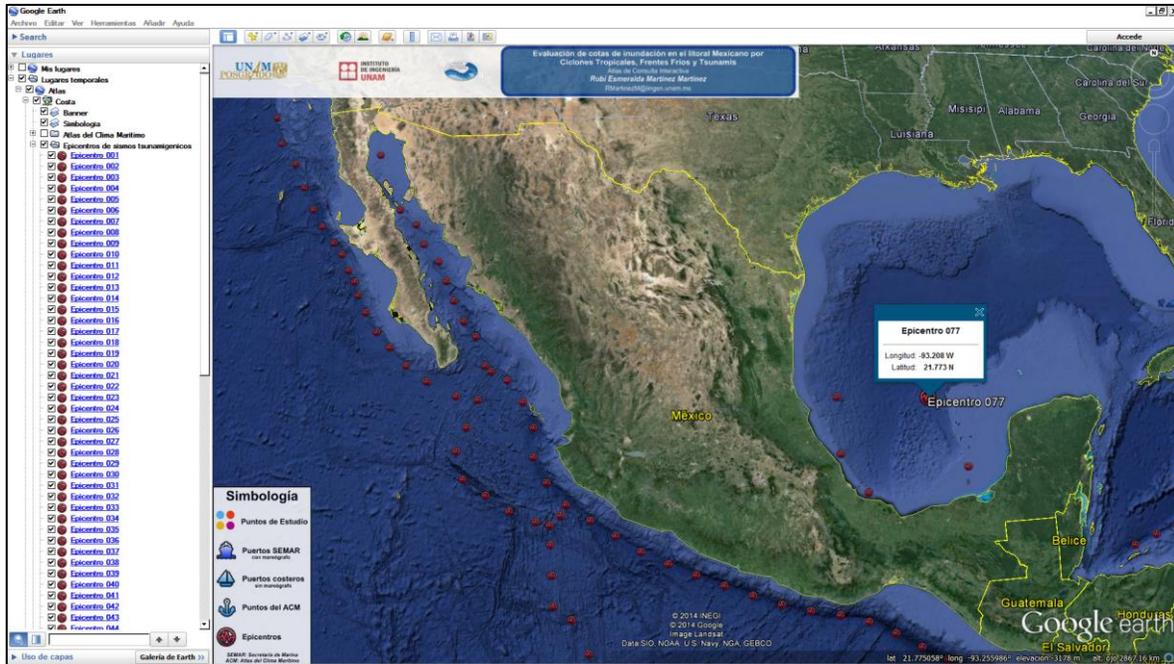


Figura 5.3.5 Mapa de epicentros de sismos tsunamigénicos.

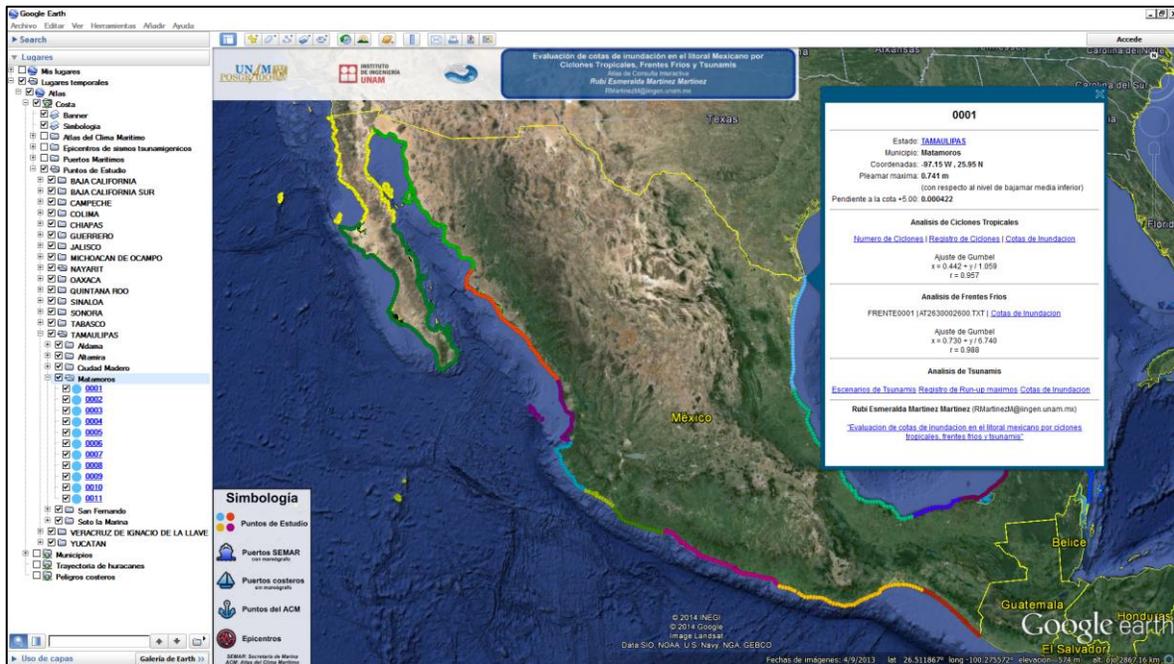


Figura 5.3.6 Mapa de puntos de estudio.

5.3.2 MUNICIPIOS COSTEROS

En este mapa se presenta un resumen de los resultados obtenidos, tanto de la evaluación de población como de los efectos calculados para cada fenómeno. Haciendo clic directamente sobre la carpeta principal de este mapa se muestra un resumen de población y cotas de inundación para cada fenómeno a nivel nacional. En la Figura 5.3.7 se presenta una captura en pantalla de la información que se despliega la cual incluye gráficas de estadísticas de población, nacional, estatal

y municipal y gráficas con promedios de cotas de inundación por estado de cada fenómeno estudiado.

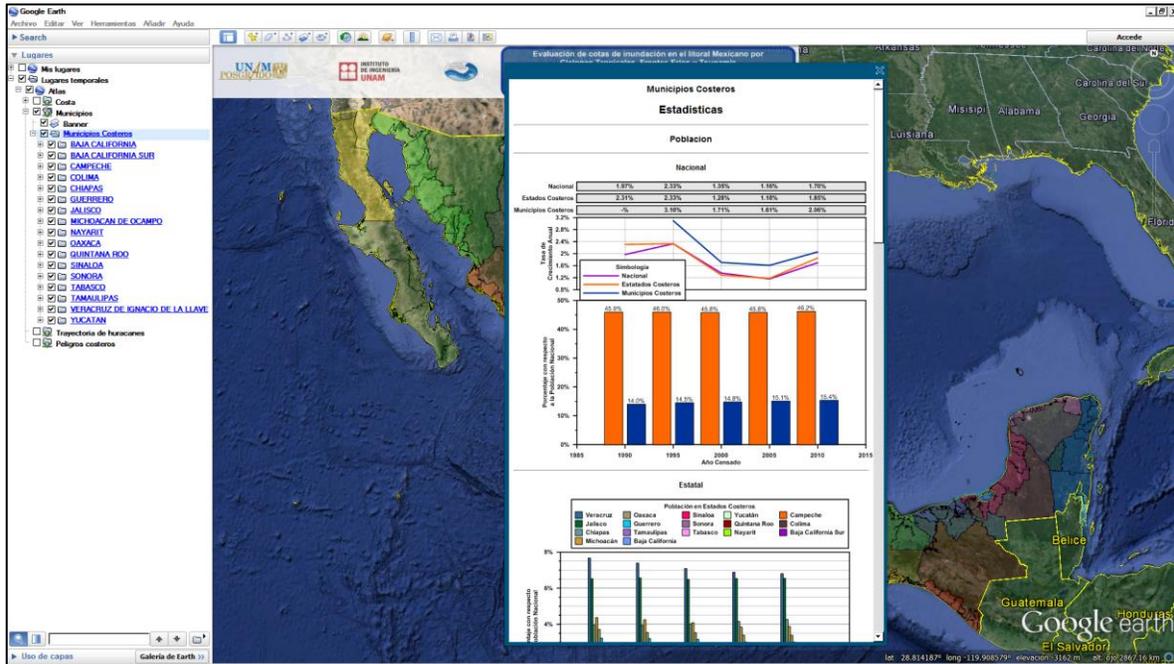


Figura 5.3.7 Información nacional del mapa de municipios costeros.

También se tienen ligas a los resúmenes por estado indicando las estadísticas de población así como las cotas de inundación promedio calculadas para cada municipio. En la Figura 5.3.8 se presenta una captura en pantalla de este enlace.

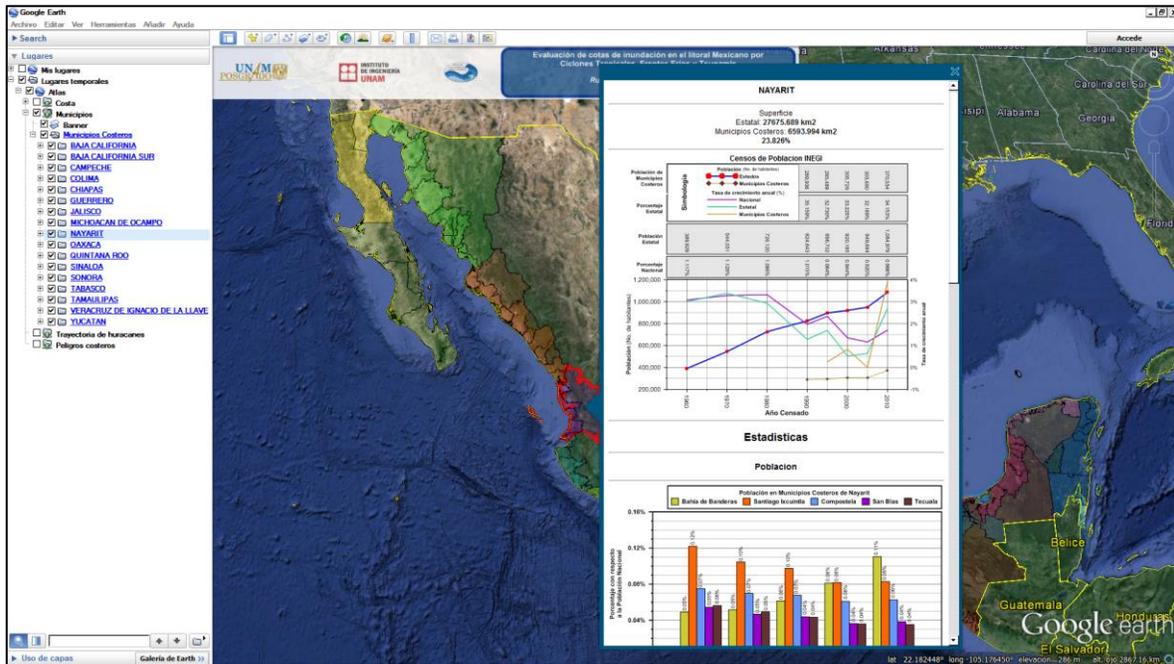


Figura 5.3.8 Información estatal del mapa de municipios costeros.

Finalmente, en la última capa de este mapa, se presenta un resumen con la información de población de cada municipio así como gráficas del promedio municipal de las cotas de inundación para algunos periodos de retorno o intensidades de sismos tsunamigénicos calculados para los fenómenos de estudio. En la Figura 5.3.9 se presenta una captura en pantalla de la información que despliega esta liga.

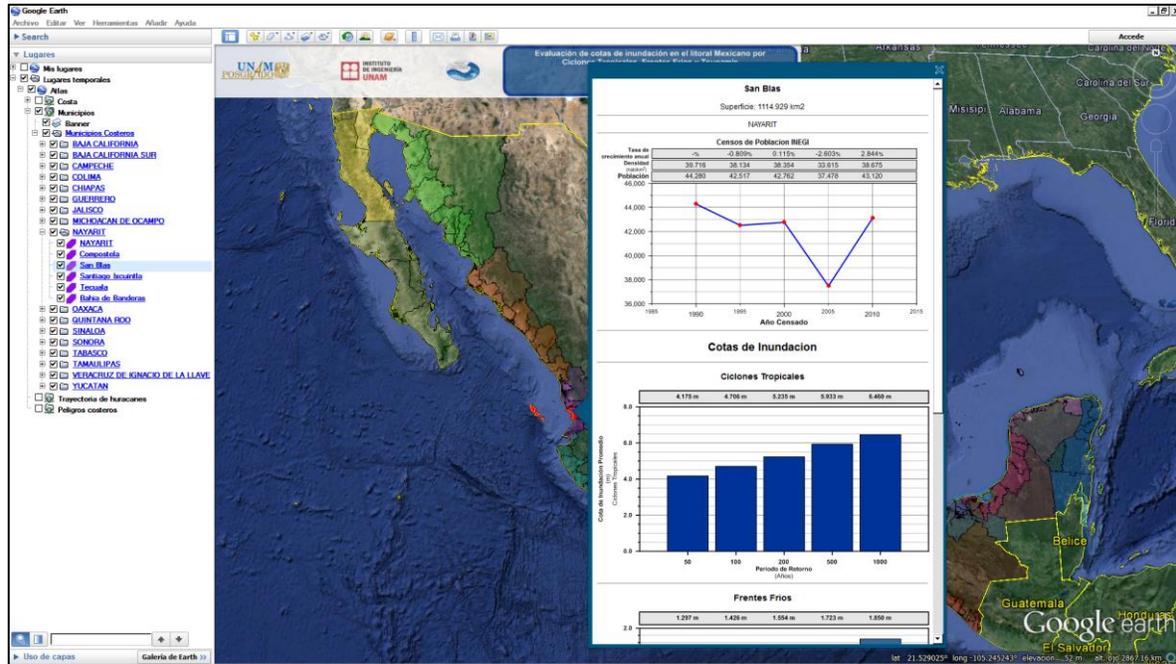


Figura 5.3.9 Información municipal del mapa de municipios costeros.

Además en este mapa se integran contornos de los municipios costeros de cada estado, y contornos de los estados costeros, donde los colores mostrados corresponden a los colores seleccionados a cada estado al igual que para los puntos de estudio.

5.3.3 TRAYECTORIA DE HURACANES

En la Figura 5.3.10 se presenta una captura de pantalla del mapa de trayectorias de huracanes. La estructura de este mapa se realizó por cuenca oceanográfica, teniendo dos capas principales (Atlántico y Pacífico), además de subdivisiones por año comenzando en 1949 y solo con los huracanes que en su trayectoria entraron a la celda comprendida entre longitudes 85° a 120° Oeste y entre latitudes 12° a 34° Norte, clasificando tanto trayectorias como puntos de ciclón de acuerdo a la intensidad del meteoro. Además de esto se encuentra en capas por huracán, lo que facilitará la búsqueda de la trayectoria de algún evento específico.

La información desplegable que se muestra, para cada punto de paso de huracán, incluye el nombre y clave del huracán, la fecha y hora en la que se presentó, su categoría, presión central, velocidad máxima de vientos sostenidos, radio ciclostrofico, velocidad de traslación y las coordenadas del ojo del huracán. Además de lo anterior se presentan las franjas de influencia tras el paso de cada huracán analizado. En la Figura 5.3.11 se observa esta franja para el huracán Gilbert.

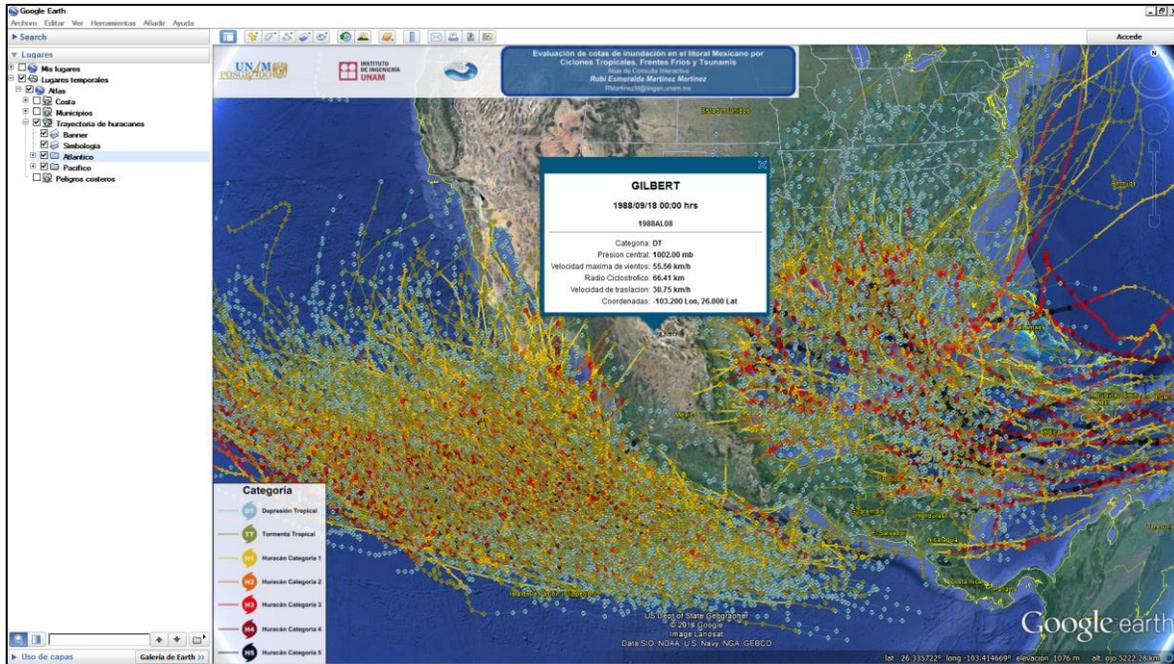


Figura 5.3.10 Mapa de trayectoria de huracanes.

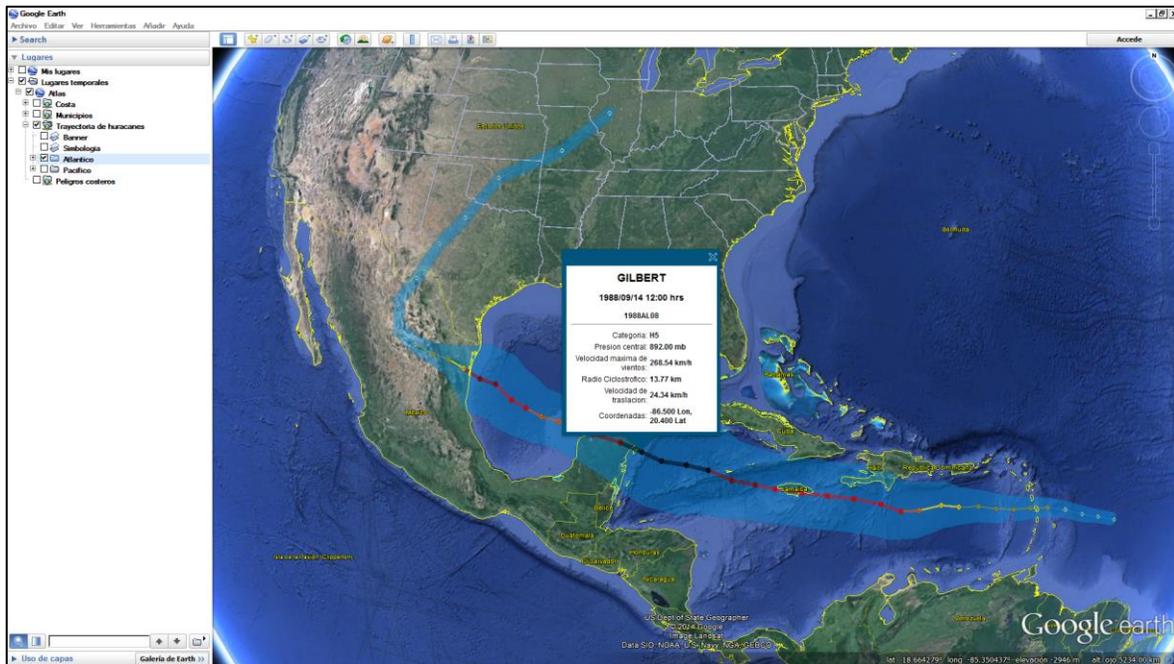


Figura 5.3.11 Franjas de influencia del huracán Gilbert.

5.3.4 PELIGROS COSTEROS

En la Figura 5.3.12 se ilustra un esquema de la organización del mapa de peligros costeros. Este mapa se presenta en capas por fenómeno, encontrando resultados para ciclones tropicales, frentes fríos y tsunamis y separando los mismos en periodos de retorno o intensidad del sismo y, al igual que los anteriores, por estado y municipio. En la Figura 5.3.13 se presenta una captura en pantalla de la visualización de este mapa, pudiendo observar la información desplegada para este, que

incluye el número de punto de estudio, el periodo de retorno o intensidad del sismo, de qué evento se trata, la cota de inundación calculada, el estado y municipio al que pertenece el punto y las coordenadas geográficas del mismo.

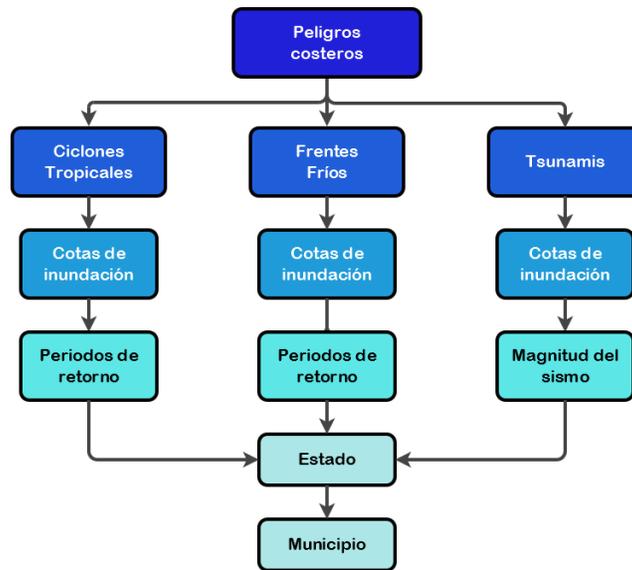


Figura 5.3.12 Estructura del mapa de peligros costeros

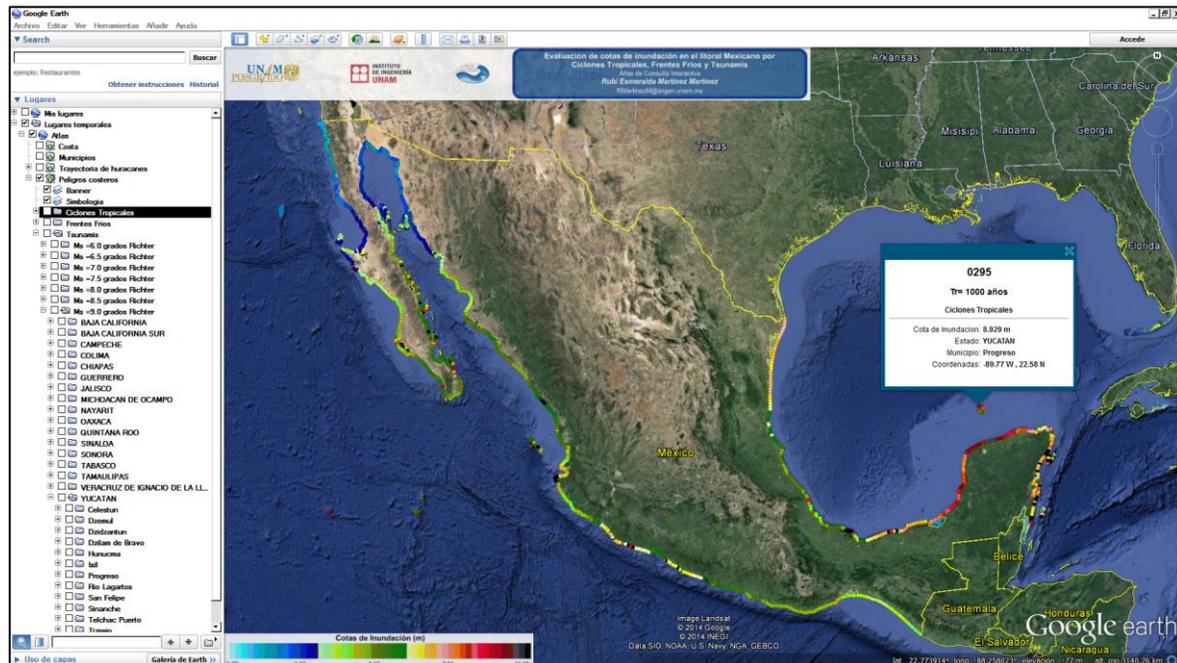


Figura 5.3.13 Mapa de Peligros Costeros.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Del análisis de ciclones tropicales se puede concluir que la zona con menor peligro es el norte de la península de Baja California y Sonora alcanzando niveles cercanos a 3.00 m para un periodo de retorno de 100 años sin considerar la marea astronómica. Sin embargo es precisamente en esta zona del país donde se dan las mayores mareas astronómicas superando los 6.00 m al norte del Mar de Cortés, resultando en niveles de inundación de aproximadamente 9.00 m. Este valor sirve como indicador del grado de peligro al que está expuesta esta zona, aunque faltaría por revisar la topografía y tipo de suelo de la región y con ello determinar si la franja de inundación sería extensa (debido a pendientes suaves) o estrecha (por pendientes pronunciadas). Además de lo anterior, estos dos estados son unos de los estados con mayor porcentaje de población en los municipios costeros.

La zona con mayor peligro por inundación para 100 años de periodo de retorno es la península de Yucatán con niveles que superan los 6.00 m al Noroeste de la península y los 10.00 m en la región de la Riviera Maya. En esta zona la marea astronómica oscila entre los 50 cm y 1.00 m, por lo que no tiene mucha influencia ante una inundación. Sin embargo, Quintana Roo y Campeche son estados donde más del 75% de la población se encuentran en municipios costeros, condición que agrava la situación ante una inundación en la zona costera.

En el resto del país las cotas de inundación para un periodo de retorno de 100 años oscilan entre los 1.75 y 6.00 m salvo algunos puntos específicos de donde estos valores se disparan pudiendo alcanzar cotas superiores a los 9.00 m.

Del análisis de frentes fríos se concluye que en comparación a los efectos que generan los ciclones tropicales, los de frentes fríos son menores al igual que la velocidad del viento alcanzada por estos. En la mayor parte del territorio, para un periodo de retorno de 100 años, la cota de inundación oscila entre los 0.00 m y los 2.00 m, salvo algunas excepciones en los estados de Veracruz, Quintana Roo, Jalisco y Michoacán, donde se calcularon niveles mayores a 3.00 m pero menores a 5.00 m.

Finalmente del análisis de tsunamis se concluye que para los epicentros de sismos tsunamigénicos locales, solo aquellos que superen los 8 grados en escala Richter podrían generar cotas de inundación mayores a 1.00 m, con algunas excepciones en los estados de Jalisco, Michoacán, Veracruz y Quintana Roo, donde para sismos tsunamigénicos menores se podrían esperar valores que superen la cota de 1.50 m. Sin embargo para sismos mayores a 9 grados en escala Richter en la mayor parte del país se calcularon cotas de más de 8.00 m de altura, lo que sumado a los niveles de marea astronómica y debido al mecanismo de estos eventos que se presentan de manera súbita, el peligro es mayor en comparación a los ciclones tropicales, pues ante estos últimos se puede alertar a la población con días de anticipación y para los tsunamis la reacción debe ser inmediata.

Las ecuaciones utilizadas para la evaluación de los eventos son ecuaciones paramétricas, debido a su funcionalidad al trabajar con grandes cantidades de datos, en tiempos cortos y espacio despreciable comparado con el requerido para modelos más robustos. Los valores obtenidos del presente estudio deben tomarse como datos preliminares debido a las simplificaciones intrínsecas de los modelos paramétricos. Para estudios más profundos se deberán elegir modelos que consideren procesos costeros como son la difracción, refracción, reflexión, someramiento y rotura del oleaje en batimetrías y topografías reales, ya que en este estudio solo se consideró una

pendiente media, despreciando las irregularidades que pueden presentar tanto el fondo marino como la superficie terrestre.

La principal aportación del trabajo es el Atlas de consulta interactiva, ya que hasta la fecha no se tiene registro de que se haya presentado un trabajo similar pudiendo acceder tan fácilmente a los resultados del estudio, de fácil distribución entre los interesados en revisar su contenido y en una interfaz amigable con el usuario.

Las futuras líneas de investigación que ayudarán a enriquecer este trabajo son:

- ❖ La implementación de modelos más robustos en el cálculo de las cotas de inundación y presentación de manchas de inundación en el litoral.
- ❖ Incluir los efectos por precipitación, siendo los principales causantes de la inundación.
- ❖ Elaboración de estudios de vulnerabilidad en la zona costera.
- ❖ Cálculo del riesgo por inundación.

Pese a lo que aún falta por elaborar, este trabajo puede ser de gran utilidad para atender la demanda de información de proyectos a menor escala, pues incluye de manera didáctica trayectorias, intensidades y efectos de los ciclones tropicales que se han presentado en el país, lo que da la posibilidad de estudiar más a fondo un fenómeno específico. También se pueden realizar estudios de caracterización del oleaje para una zona concreta, ya que gracias a que se presentan los puntos del Atlas del Clima Marítimo, se puede localizar rápidamente el archivo que contiene dicha información. Al estar presentado por estado y municipio, se podrán realizar estudios de vulnerabilidad y riesgo fácilmente.

En este trabajo se pudieron abordar dos de los tres pasos fundamentales establecidos por el CENAPRED para la prevención de desastres: conocer los peligros y amenazas a los que se está expuesto, e identificar y establecer a nivel nacional, estatal, municipal y local las características de los niveles actuales de peligro, faltando el estudio de vulnerabilidad para conocer los niveles de riesgo. Además de haber logrado integrar un atlas detallado con la información resultante.

En el Atlas de consulta interactiva solo se pudo presentar parte de la información generada debido a limitaciones de espacio, sin embargo se pretende incorporarlo en la página del Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM una vez que esta entre en funcionamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abe, K., 1979. Size of great earthquakes of 1873-1974 inferred from tsunami data. *Journal of Geophysical Research*, (84), pp.1561-68.
- Abe, K., 1981. Physical size of tsunamigenic earthquakes of the northwestern pacific. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, (27), pp.197-205.
- CENAPRED, 2001. *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CENAPRED, 2013. *Serie Fascículos: Ciclones Tropicales*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CENAPRED, 2013. *Serie Fascículos: Inundaciones*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CENAPRED, 2013. *Serie Fascículos: Tormentas Severas*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CENAPRED, 2014. CENAPRED. [Online] Available at: <http://www.cenapred.gob.mx/es/dirQuienesSomos/>.
- Centro de Alerta de Tsunamis, 2012. *Historia de los Tsunamis Locales ocurridos en México*. México: SEMAR.
- CONABIO, 2013. Portal de Geoinformación. [Online] Available at: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> [Accessed 13 Noviembre 2013].
- CONABIO, 2014. Mares Mexicanos. [Online] Available at: <http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/mares/boyasmex/index.html>.
- CONAGUA, 2014. Servicio Meteorológico Nacional. [Online] Available at: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=16 [Accessed 27 Febrero 2014].
- DIGAOHM, 2014. Centro de Alerta de Tsunamis. [Online] Available at: <http://digaohm.semar.gob.mx/InfoGralCAT.html> [Accessed 27 Febrero 2014].
- ECMWF, 2014. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. [Online] Available at: <http://data-portal.ecmwf.int/>.
- G.I.O.C., 2000. Documento de Referencia. In U.d. Cantabria, ed. *Dinámicas*. p.56.
- García Contreras, D., Herrero Lantarón, J., Baquerizo Azofra, A. & Losada Rodríguez, M.A., 2013. Cálculo de la cota de inundación en áreas litorales considerando de forma conjunta forzamientos marítimos y terrestres. *XII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*, pp.234-35.
- García Martínez, I.A., 2012. *Determinación de cotas de inundación por tsunami en las costas mexicanas*. México, D.F.: Facultad de Ingeniería, División de Ingeniería Civil y Geomática, UNAM.

- GEBCO, 2013. *General Bathymetric Chart of the Ocean*. [Online] Available at: <http://www.gebco.net/> [Accessed 13 Noviembre 2013].
- Geist, L. & Dmowska, R., 1999. Local tsunamis and distributed slip at the source. *Pure and Applied Geophysics*, pp.154: 485-512.
- Geography, 2014. *Pacific Ring of Fire*. [Online] Available at: <http://geography.about.com/cs/earthquakes/a/ringoffire.htm> [Accessed 11 Noviembre 2013].
- GFDRR, 2012. *El Fondo de Desastres Naturales de México - Una Reseña*. Washington, USA: Global Facility for Disaster Reduction and Recovery.
- Hanks, T.C. & Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. *J. Geophys. Res.*, (84), pp.2348-50.
- Hatori, T., 1979. Relation between tsunami magnitude and wave energy. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, (54), pp.531-41.
- Iida, K., Carey Cox, D. & Pararas-Carayannis, G., 1967. Preliminary Catalog of Tsunamis Occurring in the Pacific Ocean. *Data Report, HIG (Series)*, (67), p.264.
- INEGI, 2014. *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. [Online] Available at: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx> [Accessed 13 Marzo 2014].
- IOC, 2014. *Sea Level Station Monitoring Facility*. [Online] Available at: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php>.
- Lugo-Hubp, J. & Fernández-Arteaga, C., 1990. *Geomorfología Marina*. México: Instituto de Geografía, UNAM. Agrupado por CONABIO y edición posterior de PROCOMAR S.A. de C.V. Obtenido de geomorfología 1. Iv.3.3., atlas nacional de México, vol. II, escala 1:4000000.
- Moreno-Casasola, P. et al., 1998. Flora de los ambientes arenosos y rocosos de las costas de México. In *Diversidad biológica de Iberoamérica*. Especial ed. Xalapa, México: G. Halffter. Ch. Acta Zoológica mexicana, nueva serie. pp.177-264.
- Natural Earth, 2013. *Natural Earth*. [Online] Available at: <http://www.naturalearthdata.com/downloads/> [Accessed 13 Noviembre 2013].
- NOAA, 2014. *National Hurricane Center*. [Online] Available at: <http://www.nhc.noaa.gov/> [Accessed 27 Febrero 2014].
- NOAA, 2014. *Natural Hazards*. [Online] Available at: http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?bt_0=&st_0=&type_3=Exact&query_10=None+Selected&op_12=eq&v_12=&type_14=Exact&query_14=None+Selected&op_3=eq&v_3=MEXICO&type_4=Like&query_4=&bt_17=&st_17=&st_5=&bt_6=&st_6=&bt_5=&type_3=Exact&query_15=None+Selec.
- NOAA, 2014. *Office of Satellite and Product Operations*. [Online] Available at: <http://www.ospo.noaa.gov/Organization/History/index.html> [Accessed 27 Febrero 2014].

- NOAA, 2014. *Pacific Tsunami Warning Center*. [Online] Available at: <http://ptwc.weather.gov/> [Accessed 27 Febrero 2014].
- NOAA, 2014. *Pacific Tsunami Warning Center*. [Online] Available at: <http://ptwc.weather.gov/>.
- Okal, E.A. & Synolakis, C.E., 2004. Source discriminantes for near-field tsunamis. *Geophys. J. Intl.*, (158), pp.899-912.
- Ortíz, M. & de la Lanza, G., 2006. *Diferenciación del espacio costero de México. Un inventario Regional. Geografía para el siglo XX*. México: Serie Textos Universitarios.
- Rosengaus, M., 2002. *Efectos destructivos de ciclones tropicales*. México: MAPFRE, S.A.
- Rosengaus, M., Jiménez Espinosa, M. & Vázquez Conde, M.T., 2002. *Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México*. México, D.F.: CENAPRED.
- Ruiz-Martínez, G. et al., 2009. Modelo Híbrido para la caracterización del oleaje. *Ingeniería hidráulica en México*, p.24(3).
- Ruiz, G., Silva, R., Govaere, G. & Contreras, A., 1998. Comparison of 4 wave prediction models. *5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, pp.134-45.
- Seingier, G., Espejel, I. & Fermán Alamda, J.L., 2009. Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. *Investigación ambiental*, 1(1), pp.54-69.
- Silva, R. et al., 2002. Oceanographic vulnerability to hurricanes on the mexican coast. *ICCE Coastal Engineering*, pp.39-51.
- Silva, R. & Mendoza, E., 2012. Aspectos Generales de Meteorología y Descripción de las Oscilaciones del Mar. In *Manual de Diseño de Obras Civiles: A.2.13 Hidráulica Marítima*. México. pp.A.13-4-1 - A.13-4-34.
- Silva, R. & Mendoza, E., 2012. Ondas Largas. In *Electricidad, C.F.d. & Instituto de Ingeniería, U. Manual de Diseño de Obras Civiles: A.2.13. Hidráulica Marítima*. México. pp.A.13-6-1 - A.13-6-58.
- Silva, R. & Mendoza, E., 2012. Zonificación del Litoral Mexicano. In *Electricidad, C.F.d. & Instituto de Ingeniería, U. Manual de Diseño de Obras Civiles: A.2.13. Hidráulica Marítima*. México. pp.A.13-3-1 - A.13-4-68.
- Silva, R. et al., 2008. *Atlas de Clima Marítimo de la Vertiente Atlántica Mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- SINAPROC, 2014. *SINAPROC*. [Online] Available at: <http://www.proteccioncivil.gob.mx/>.
- Soloviev, S.L., 1970. Recurrence of tsunamis in the pacific. *Tsunamis of the pacific ocean*, pp.149-64.
- Stockdon, H.F. et al., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, (53), pp.573-88.
- UNISDR, 2014. *UNISDR*. [Online] Available at: <http://www.unisdr.org/> [Accessed 20 Febrero 2014].

Zúñiga, E., 2013. *Los 10 huracanes más devastadores en la historia de México*. [Online] Available at: <http://de10.com.mx/top10/2013/los-10-huracanes-mas-devastadores-en-la-historia-de-mexico-17333.html>.