



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL - AIRE**

RIESGOS QUÍMICOS POR MANEJO DE COMBUSTIBLES ASOCIADOS A FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS EN EL RECINTO PORTUARIO DE VERACRUZ.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

ING. GUADALUPE ISABEL LARA CARVAJAL.

TUTOR PRINCIPAL

DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA, CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM.

COMITÉ TUTORAL

DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGOMEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM.

DR. VÍCTOR ORLANDO MAGAÑA RUEDA, INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM.

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2020.



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. VÍCTOR ORLANDO MAGAÑA RUEDA
Secretario: DR. RODOLFO SILVA CASARÍN
1 er. Vocal: DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ
2 do. Vocal: DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ
3 er. Vocal: DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA

Lugares donde se realizó la tesis:

SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL-CENTRO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA-UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, CDMX.

ADMINISTRACIÓN PORTUARIA INTEGRAL DE VERACRUZ, VER.

TUTOR DE TESIS:

DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por su apoyo económico a través de las becas para estudios de posgrado.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y al Posgrado en Ingeniería, por darme la oportunidad de formar parte de esta institución académica y de crecer profesionalmente.

Al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, por su compromiso, apoyo y guía en la elaboración de esta tesis de maestría, además de su confianza depositada en mí para su cumplimiento.

A la Dra. Georgina Fernández Villagómez, por sus enseñanzas, apoyo y consejos en la mejora de esta tesis.

Al Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda, por sus asesorías, compromiso y tiempo dedicado a mi formación y al desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín, por su atención, asesoría y revisión de esta tesis.

Al Dr. Enrique César Valdez, por sus enseñanzas y tiempo dedicado a la revisión de la presente tesis.

Al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin, a la Dra. Mireille del Carmen Escudero Castillo, del Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por su apoyo y asesorías en la obtención de información oceanográfica de reanálisis.

Al Ing. Gustavo Vázquez Cruz del Grupo Clima y Sociedad del Instituto de Geografía de la UNAM, por su apoyo en mi formación y asesoría de este estudio.

Al Coordinador del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería el Dr. Juan Luis Francois Lacouture, por su gestión en el apoyo económico para asistir al *Taller de modelos de simulación y análisis de consecuencias en la evaluación de riesgos*, impartido por la empresa Dinámica Heurística.

Al Director de la Escuela Nacional de Protección Civil el Ing. Enrique Bravo Medina, por sus recomendaciones para el desarrollo de la Tesis.

A la Administración Portuaria Integral de Veracruz (APIVER), por su aportación en la información necesaria para la realización de este estudio. Al personal de APIVER el Ing. David Augusto de la O Nava, por su apoyo en la solicitud de información y gestión de visitas a las cesionarias del Recinto Portuario de Veracruz, así como al Gerente de Ingeniería el Ing. Sokaris De la Luz Aranda.

Al personal de la Terminal Marítima de PEMEX y del Centro Embarcador Bajos la Gallega, ubicados en el Recinto Portuario de Veracruz, por su apoyo durante la visita al área de estudio.

A la Secretaría de Marina y al Centro hidrometeorológico Veracruz-Boca del Río, por su transparencia y apertura en la solicitud de los registros del monitoreo que realizan en las estaciones meteorológicas en Veracruz, Ver.

Al Dr. Gilberto Fuentes García, por sus enseñanzas, guía y consejos durante mis estudios de maestría y desarrollo de tesis.

A los integrantes de la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM: al Bio. Pablo Sánchez Álvarez, al Dr. Elías Granados Hernández, a la M. en I. Ana Luisa Alarcón Jiménez, a la QFB. María del Carmen Torres Barrera, a la Dra. Elizabeth Vega Rangel, a la M. en C. Mónica Solano Murillo, a la M. en C. María Flor Navarrete Cisneros y a mis compañeros: el M. en I. Rafael Antonio Esteban Durán, a la M. en I. Angélica Mendoza Trejo, a la M. en I. Daimy Ávila Rodríguez, al M. en C. Luis Miguel Urbina Leonor, a la Ing. Ilse Araceli Alvarado Vázquez y al Ing. Roberto Antonio Morales Yáñez, por su apoyo y consejos durante mis estudios de maestría y mejora de la tesis.

Al personal in-situ encargado de la estación meteorológica APIVER-UNAM, en el Recinto Portuario de Veracruz, el Lic. Humberto Bravo Witt y al M. en I. José Hernández Téllez.

Al Dr. Ángel R. Terán Cuevas, del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del IPN, por su apoyo y guía en el desarrollo de la tesis.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ABREVIATURAS	xiii
GLOSARIO	xviii
RESUMEN.....	xxii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 General.....	2
1.3.2 Específicos.....	2
1.4 Hipótesis	3
1.5 Alcances.....	3
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Combustibles	4
2.1.1 Propiedades físicas y químicas.....	4
2.2 Riesgo	6
2.3 Riesgos químicos	7
2.3.1 Tipologías de accidentes químicos.....	7
2.3.2 Emergencias químicas	8
2.4 Fenómenos hidrometeorológicos.....	12
2.4.1 Ciclones tropicales.....	12
2.4.2 Nortes	12
2.4.3 Inundaciones costeras.....	13
2.4.4 Probabilidad de ocurrencia de eventos extremos	15
2.5 Desastres tecnológicos asociados a fenómenos naturales.....	17
2.5.1 Desastres tecnológicos asociados a fenómenos hidrometeorológicos.....	19

2.6	Descripción del área de estudio	21
2.6.1	Características climatológicas.	21
2.6.2	Áreas y actividades del Puerto de Veracruz.	22
2.6.3	Tipos de carga manejadas del Recinto Portuario de Veracruz	25
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA		30
3.1	Identificación y caracterización de los peligros	30
3.1.1	Experiencias en desastres	30
3.1.2	Información de reanálisis.....	30
3.1.3	Registros in-situ.....	34
3.2	Elementos expuestos y vulnerabilidad.....	36
3.2.1	Vulnerabilidad estructural	37
3.2.2	Vulnerabilidad funcional	40
3.2.3	Vulnerabilidad química	41
3.3	Escenarios de riesgo.....	49
3.3.1	Escenario de emisión por evaporación de un derrame	49
3.4	Modelo de riesgo	52
3.5	Propuestas de gestión.....	54
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		55
4.1	Identificación y caracterización de los peligros.....	55
4.1.1	Experiencias en desastres	55
4.1.2	Información de reanálisis.....	59
4.1.3	Información in-situ	66
4.2	Elementos expuestos y vulnerabilidad.....	72
4.2.1	Vulnerabilidad estructural	74
4.2.2	Vulnerabilidad funcional	79
4.2.3	Vulnerabilidad química	81
4.3	Escenarios de riesgo.....	93
4.3.1	Escenario de emisión por evaporación de un derrame	93
4.4	Modelo de riesgo	101

4.5	Propuestas de gestión.....	103
4.5.1	Vulnerabilidad estructural	103
4.5.2	Vulnerabilidad funcional	103
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		105
5.1	Conclusiones.....	105
5.2	Recomendaciones	106
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS		107
CAPÍTULO 7. ANEXOS		122
ANEXO I. Condiciones hidrometeorológicas		122
ANEXO II. Análisis histórico de accidentes		125
ANEXO III. Lista de Verificación Terminal Marítima de PEMEX y Centro Embarcador Bajos la Gallega		160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Emergencias químicas en México reportadas a PROFEPA en el periodo 2000-2014	9
Figura 2.2. Municipios con almacenamiento de sustancias peligrosas en Veracruz.....	10
Figura 2.3. Emergencias notificadas en el 2017 a PROFEPA, distribución por causa	11
Figura 2.4. Emergencias notificadas en el 2017 a PROFEPA, distribución por procedencia	11
Figura 2.5. Componentes del nivel del mar.....	13
Figura 2.6. Partes de las olas	14
Figura 2.7. Ocurrencia de accidentes provocados por circunstancias especiales.....	18
Figura 2.8. Ubicación Geográfica del Puerto de Veracruz.....	21
Figura 2.9. Climograma de Veracruz, periodo de años 1981-2018.....	22
Figura 2.10. Zonas que integran un Puerto.....	23
Figura 2.11. Grúas pórtico portacontenedores en el Recinto Portuario de Veracruz	26
Figura 2.12. Importación de vehículos	27
Figura 2.13. Exportación de vehículos	27
Figura 2.14. Silos de almacenamiento de maíz en el Recinto Portuario de Veracruz.....	27
Figura 2.15. Descarga de granel mineral.....	28
Figura 2.16. Buquetanque atracado en la Terminal Marítima del PEMEX, 2019	28
Figura 3.1. Mapa batimétrico de la malla NW Atlantic 10 min, profundidad en metros.....	31
Figura 3.2. Archivo de texto empleado para extraer de forma automatizada la información de altura de ola de la coordenada de interés.....	33
Figura 3.3. Fichero empelado para agrupar la información por variable	34
Figura 3.4. Datos hidrometeorológicos del Puerto de Veracruz.....	35
Figura 3.5. Caracterización de tanques.....	36
Figura 3.6. Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias	49
Figura 4.1. Peligros hidrometeorológicos	55
Figura 4.2. Accidentes asociados a peligros hidrometeorológicos.....	57
Figura 4.3. Fallas estructurales.....	58

Figura 4.4. Impactos observados en tanques de almacenamiento de combustibles a diferentes velocidades de viento.....	59
Figura 4.5. Histograma altura de ola significativa en metros, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 - mayo 2019	60
Figura 4.6. Relación de distribución de periodos de ola y altura de ola significativa	61
Figura 4.7. Rosa de oleaje Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019	61
Figura 4.8. Rosas de oleaje mensuales Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019.....	62
Figura 4.9. Histograma velocidad de viento Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019.....	63
Figura 4.10. Rosa de viento Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019	65
Figura 4.11. Rosas de viento mensuales Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019.....	65
Figura 4.12. Relación viento - oleaje, con datos obtenidos con el modelo Wavewatch III periodo 2005 - 2019. Los círculos celestes muestran los pares de datos x-y, la línea negra representa la tendencia suavizada y la línea azul oscuro la recta de regresión ambas con un margen de confianza del 95%.....	66
Figura 4.13. Rosa de viento de la estación meteorológica APIVER-UNAM mayo 2017 a septiembre 2019.....	68
Figura 4.14. Trayectorias de ciclones tropicales en el periodo de 1851 – 2017.....	70
Figura 4.15. Instalaciones de almacenamiento y distribución de PEMEX	73
Figura 4.16. Ubicación de los tanques de almacenamiento de combustibles del "Centro Embarcador Bajos la Gallega".....	73
Figura 4.17. Línea de costa frente al área de almacenamiento, 2019.....	75
Figura 4.18. Barda perimetral del Centro Embarcador Bajos la Gallega, 2019	76
Figura 4.19. Modificaciones al arrecife “la Gallega” y la línea de costa asociadas a la evolución de las obras de ampliación del Puerto de Veracruz	77
Figura 4.20. Tanques de almacenamiento del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, 2019	78
Figura 4.21. Datos ingresados al modelo emisión de un derrame en evaporación, escenario 1	93

Figura 4.22. Datos ingresados al modelo emisión de un derrame en evaporación, escenario 2	94
Figura 4.23. Escenario 1, $z_1 = 0$ m	98
Figura 4.24. Escenario 1, $z_2 = 1$ m	98
Figura 4.25. Escenario 1, $z_4 = 5$ m	98
Figura 4.26. Escenario 2, $z_1 = 0$ m	100
Figura 4.27. Escenario 2, $z_2 = 1$ m	100
Figura 4.28. Escenario 2, $z_4 = 5$ m	100
Figura 7.1. Validación de altura de ola significativa, además de velocidad y dirección de viento	122
Figura 7.2. Validación de periodo de ola.....	123
Figura 7.3. Imagen satelital Frente frío No. 11, 01 diciembre 2010	124
Figura 7.4. Pronóstico de oleaje con el modelo WW3, 01 diciembre 2010	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Datos de los petrolíferos: gasolina y Diésel	4
Tabla 2.2. Escala Saffir - Simpson	12
Tabla 2.3. Ejemplos de eventos natech.....	17
Tabla 2.4. Empresas cesionarias ubicadas en el Recinto Portuario de Veracruz	24
Tabla 3.1. Características de la malla empleada para generar la información meteorológica y oceanográfica.....	31
Tabla 3.2. Archivos de salida del modelo Wavewatch III.....	32
Tabla 3.3. Criterios de clasificación para líquidos inflamables.....	41
Tabla 3.4. Categorías de vulnerabilidad	43
Tabla 3.5. Criterios de evaluación de los factores de vulnerabilidad	44
Tabla 3.6. Matriz de riesgo.....	53
Tabla 4.1. Estadísticos descriptivos, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019	63
Tabla 4.2. Frecuencia de las velocidades de viento en Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019.....	64
Tabla 4.3. Estadísticos descriptivos de las rachas de viento de la estación de APIVER-UNAM, periodo mayo 2017 – septiembre 2019	68
Tabla 4.4. Frecuencia de las rachas de viento en la estación APIVER-UNAM, periodo mayo 2017 – septiembre 2019.....	69
Tabla 4.5. Períodos de Retorno Veracruz, Ver.....	71
Tabla 4.6. Características de los tanques de almacenamiento del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”	74
Tabla 4.7. Clasificación de peligro físico para la gasolina y Diésel.....	84
Tabla 4.8. Clasificación de peligro a la salud para la gasolina y el Diésel.....	85
Tabla 4.9. Clasificación de peligro al medio ambiente para la gasolina y el Diésel	89
Tabla 4.10. Valores asignados a las variables consideradas para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad (IV)	90
Tabla 4.11. Cálculo del índice de vulnerabilidad (IV)	92
Tabla 4.12. Categorías de vulnerabilidad	92
Tabla 4.13. Concentraciones de AEGL para benceno.....	95

Tabla 4.14. Riesgo químico asociado a peligro de viento extremo en los tanques del "Centro Embarcador Bajos la Gallega"	101
Tabla 7.1. Análisis histórico de accidentes 1970 - 2018	125
Tabla 7.2. Lista de verificación	160

ABREVIATURAS

- AEGL:** Acute Exposure Guideline Levels – Niveles Guía de Exposición Aguda.
- AFFF:** Aqueous Film Foming Foam.
- API:** American Petroleum Institute.
- APIVER:** Administración Portuaria Integral de Veracruz.
- ARIA:** Analyse, Recherche et Information sur les Accidents.
- ASCE:** American Society for Civil Engineers.
- ASEA:** Agencia de Seguridad Energía y Ambiente.
- BLEVE:** Boiling Liquid Expansion Vapour Explosion.
- CCA:** Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- CENAPRED:** Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CIIFEN:** Centro Internacional para la investigación del Fenómeno del Niño.
- CMIC:** Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.
- CONAMER:** Comisión Nacional de Mejora Regulatoria.
- COV:** Compuestos Orgánicos Volátiles.
- CVCE:** Confined Vapour Cloud Explosion – Explosión de nube de vapor confinado.
- DOF:** Diario Oficial de la Federación.
- DOT:** Department Of Transportation.
- DTW:** Deadweight tonnage – Tonelaje de peso muerto.
- EC:** European Commission – Comisión Europea.
- EEA:** European Environmental Agency.
- EESI:** Environmental and Energy Study Institute.
- EMA:** Entidad Mexicana de Acreditación.
- EMC:** Environmental Modelling Center.
- EPA:** Environmental Protection Agency.
- EUA:** Estados Unidos de América.
- F1:** Factor ubicación.
- F2:** Factor capacidad resistiva.
- F3:** Factor estado técnico.

F4: Factor preparación y respuesta de emergencias.

F5: Factor físico.

F6: Factor salud.

F7: Factor medio ambiente.

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FEMA: Federal Emergency Management Agency.

GFS: Global Forecast System or GFS.

GSHHS: Global Self-Consistent Hierarchical High Resolution Shoreline.

Hurmat: Hurricane-induced hazardous material releases.

ICAVE: Internacional de Contenedores Asociados de Veracruz.

INAFED: Instituto para el Federalismo y Desarrollo Municipal.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

IV: Índice de Vulnerabilidad.

LEL: Límite Inferior de Explosividad.

N: Norte.

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

Natech: Natural-hazard-triggered technological.

NCEI: National Center for Environmental Information.

NCEP: National Centers for Environmental Prediction.

NE: Noreste.

NFPA: National Fire Protection Association.

NHC: National Hurricane Center.

NNO: Nornoroeste.

NO: Noroeste.

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration.

O: Oeste.

OECD: Organisation for Economic Cooperation and Development – Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico.

OIT-ILO: Organización Internacional del Trabajo – International Labour Organization.

OMM: Organización Meteorológica Mundial.

OMS-WHO: Organización Mundial de la Salud – World Health Organization.

ONU: Organización de las Naciones Unidas.

PEMEX: Petróleos Mexicanos.

P: Peligro de viento extremo.

Pr: Periodo de retorno.

PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

RMS Error: Root-Mean-Square Error – Error cuadrático medio.

SCRI: Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias.

SE: Sureste.

SEMAR: Secretaría de Marina.

SEMARNAT: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SGA: Sistema Globalmente Armonizado.

SI: Scatter Index – Índice de dispersión.

SMMR: Scanning Multichannel Microwave Radiometer.

SMN: Servicio Meteorológico Nacional.

SO: Suroeste.

SPCV: Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz.

SPN: Sistema Portuario Nacional.

SSMI: Special Sensor Microwave Imagers.

STOT-RE: Specific Target Organ Toxicity – Repeat Exposure.

STOT-SE: Specific Target Organ Toxicity – Single Exposure.

TAD: Terminales de Almacenamiento y Distribución.

UEL: Límite Superior de Explosividad.

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.

UNISDR: Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres.

USACE: US Army Corps of Engineers.

UVCE: Unconfined Vapour Cloud Explosion.

V1: Variable elevación.

V10: Variable grado de corrosión.

V11: Variable sistemas de monitoreo y control.

V12: Variable alcantarillado.

V13: Variable sistemas contraincendios.

V14: Variable fuentes de alimentación eléctrica de emergencia.

V15: Variable sistemas de alerta hidrometeorológica.

V16: Variable capacitación al personal.

V17: Variable simulacros.

V18: Variable planes de emergencia.

V19: Variable servicios de bomberos.

V2: Variable orientación.

V20: Variable líquidos inflamables.

V21: Variable toxicidad aguda.

V22: Variable corrosión/irritación cutánea.

V23: Variable mutagenicidad en células germinales.

V24: Variable carcinogenicidad.

V25: Variable toxicidad para la reproducción.

V26: Variable toxicidad específica en organos diana por exposición única (STOT-SE).

V27: Variable toxicidad específica en organos diana por exposiciones repetidas (STOT-RE).

V28: Variable peligro por aspiración.

V29: Variable toxicidad aguda para el medio ambiente acuático.

V3: Variable distancia de la línea de costa.

V4: Variable geomorfología.

V5: Variable anclaje.

V6: Variable cantidad almacenada promedio.

V7: Variable anillos de refuerzo.

V8: Variable densidad de la sustancia almacenada.

V9: Variable presión crítica del tanque.

WW3: Wavewatch III.

GLOSARIO

AEGL-1: Concentración límite por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles, pero excluyendo hiper – susceptibles, puede experimentar molestias notables, irritación o ciertos efectos asintomáticos. Estos efectos son transitorios y reversibles una vez que cesa la exposición. Concentraciones por debajo del AEGL-1 representan niveles de exposición que producen ligero olor, sabor u otra irritación sensorial leve (Garza-Ayala, 2015).

AEGL-2: Concentración límite por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles, pero excluyendo hiper – susceptibles, puede experimentar efectos duraderos serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar. Concentraciones por debajo del AEGL-2 pero por encima del AEGL-1 representan niveles de exposición que pueden causar notable malestar (Garza-Ayala, 2015).

AEGL-3: Concentración límite por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles, pero excluyendo hiper – susceptibles, puede experimentar efectos amenazantes para la vida o incluso provocar la muerte. Concentraciones por debajo del AEGL-3 pero por encima del AEGL-2 representan niveles de exposición que pueden causar efectos duraderos, serios o irreversibles o impedir la capacidad de escapar (Garza-Ayala, 2015).

Amenaza o peligro: Un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (UNISDR, 2009).

Ocurrencia potencial de una tendencia o suceso físico de origen natural o humano que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, provisión de servicios, ecosistemas y recursos ambientales (IPCC, 2018).

Anclaje: Son elementos de acero al carbono, con rosca en el extremo libre ahogados en el concreto o en la cimentación, con el objeto de evitar desplazamientos del tanque en cualquier dirección, y bajo ciertas condiciones contrarrestar el efecto de volteo por sismo y el arrastre o volteo por viento (PEMEX, 2008).

Capacidad de respuesta: Combinación de todas las fortalezas, los atributos y los recursos disponibles dentro de una organización, comunidad o sociedad que pueden utilizarse para gestionar y reducir los riesgos de desastres y reforzar la **resiliencia** (UNISDR, 2016).

Corrosión: Proceso de deterioro de materiales metálicos (incluyendo tanto metales puros, como aleaciones de estos), mediante reacciones químicas y electroquímicas (Revie y Uhlig, 2008).

Diésel: Combustible también denominado: fueloil, gasoil o gasóleo. Puede obtenerse a partir de la destilación fraccionada de petróleo crudo (petrodiesel) o bien a partir de aceites vegetales (biodiesel). El nombre de Diésel es en honor al científico francés Rudolf Diesel, quien diseñó el motor que lleva su mismo apellido (Martín-Algarra, 2010).

ETOP0-1: Es un modelo de relieve global de 1 minuto de arco de la superficie de la Tierra, que integra la topografía terrestre y la batimetría oceánica. Construido a partir de conjuntos de datos mundiales y regionales, está disponible en "Superficie de hielo" (parte superior de las capas de hielo de Antártida y Groenlandia) y "Roca de fondo" (base de las capas de hielo) (NCEI, 2017).

Exposición: La presencia de personas, medios de subsistencia, especies o ecosistemas, funciones, servicios y recursos medioambientales, infraestructura, o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2018).

Fenómeno geológico: Agente perturbador que tiene como causa directa las acciones y movimientos de la corteza terrestre. A esta categoría pertenecen los sismos, las erupciones volcánicas, los tsunamis, la inestabilidad de laderas, los flujos, los caídos o derrumbes, los hundimientos, la subsidencia y los agrietamientos (DOF, 2012).

Fenómeno hidrometeorológico: Agente perturbador que se genera por la acción de los agentes atmosféricos, tales como: ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres; tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; heladas; sequías; ondas cálidas y gélidas; y tornados (DOF, 2012).

Hidrocarburos: Grupo de compuestos orgánicos que contienen principalmente carbono e hidrógeno. Son los compuestos orgánicos más simples y pueden ser considerados como las sustancias principales de las que se derivan todos los demás compuestos orgánicos (PEMEX, 2010a).

Instalaciones portuarias: Las obras de infraestructura y las edificaciones o superestructuras, construidas en un puerto o fuera de él, destinadas a la atención de embarcaciones, a la prestación de servicios portuarios o a la construcción o reparación de embarcaciones (DOF, 1993).

Marinas: El conjunto de instalaciones portuarias y sus zonas de agua o tierra, destinadas a la organización especializada en la prestación de servicios a embarcaciones de recreo o deportivas (DOF, 1993).

Modelos de primera generación: En estos modelos cada componente espectral evoluciona independiente de todas las otras componentes (modelos desacoplados de primera generación), los espectros son definidos con parámetros ajustados empíricamente. En estos modelos, el espectro de energía se representa como un arreglo de paquetes de energía discretizados en dos dimensiones: frecuencia y dirección. Estos modelos sobrestiman la

acción del viento y subestiman la fuerza de transferencia no lineal casi por un orden de magnitud (Montoya-Ramírez y Osorio-Arias, 2007).

Modelos de segunda generación: Proveen un acoplamiento entre las componentes individuales espectrales de forma no lineal, adicionalmente el “mar de viento” es manejado por una forma espectral independiente de los otros procesos, ajustada con los parámetros de Hasselmann. Estos modelos sufren de limitaciones en la parametrización de las transferencias no lineales de energía (Montoya-Ramírez y Osorio-Arias, 2007).

Modelos de tercera generación: En ellos no se impone una forma definida del espectro y tanto la ecuación de transporte de energía y los términos no lineales pueden calcularse completamente. Esto implica que para este tipo de modelos sea posible observar la evolución en el espacio y en el tiempo del espectro de frecuencias, la altura de ola significativa (H_s), entre otros, lo cual los hace mucho más precisos y útiles en el campo de la ingeniería (Montoya-Ramírez y Osorio-Arias, 2007).

Modelos numéricos de generación de oleaje: Se clasifican como modelos numéricos de generación de oleaje de primera, segunda y tercera generación de acuerdo con la forma numérica como es resuelta la ecuación de energía del oleaje y la evolución teórica y experimental, en la estimación de los términos que componen las fuentes o sumideros de energía (Montoya-Ramírez y Osorio-Arias, 2007).

Pandeo: Es un proceso por el cual una estructura no puede soportar cargas con su forma original, por lo que cambia esta forma para encontrar una nueva configuración de equilibrio (Godoy, 2002).

Peligro hidrometeorológico: Son de origen atmosférico, hidrológico u oceanográfico. Algunos ejemplos son los ciclones tropicales (también conocidos como tifones y huracanes); inundaciones, incluyendo inundaciones repentinas; sequía; olas de calor y períodos de frío; y marejadas costeras. Las condiciones hidrometeorológicas también pueden ser un factor en otros peligros tales como deslizamientos de tierra, incendios forestales, plagas de langostas, epidemias y en el transporte y dispersión de sustancias tóxicas y material de erupción volcánica (UNISDR, 2017).

Petróleo: El petróleo es una mezcla que se presenta en la naturaleza, compuesta predominantemente de hidrocarburos en fase sólida, líquida o gaseosa; denominando al estado sólido betún natural, al líquido petróleo crudo y al gaseoso gas natural, esto a condiciones atmosféricas (PEMEX, 2010a).

Puerto de altura: Clasificación de puertos debida a su navegación, se atienden embarcaciones, personas y bienes en navegación entre puertos o puntos nacionales e internacionales (DOF, 1993).

Puerto de cabotaje: Clasificación de puertos debida a su navegación, cuando sólo atiendan embarcaciones, personas y bienes en navegación entre puertos o puntos nacionales (DOF, 1993).

Resiliencia: La capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas (UNISDR, 2009; FAO, 2009).

Servicios portuarios: Los que se proporcionan en puertos, terminales, marinas e instalaciones portuarias, para atender a las embarcaciones, así como para la transferencia de carga y transbordo de personas entre embarcaciones, tierra u otros modos de transporte (DOF, 1993).

Susceptibilidad: Es el grado de fragilidad interna de un sujeto, objeto o sistema para enfrentar una amenaza y recibir un posible impacto debido a la ocurrencia de un evento adverso (CIIFEN, 2016).

Techo o membrana flotante: Pueden ser externo o interno (membrana flotante), diseñado en tal forma que le permite flotar sobre el líquido almacenado evitando los grandes volúmenes de gases y vapores que existen en los tanques de techo fijo, pueden ser de techos con boyas y pontón perimetral (PEMEX, 2008).

Terminal portuaria: La unidad establecida en un puerto o fuera de él, formada por obras, instalaciones y superficies, incluida su zona de agua, que permite la realización íntegra de la operación portuaria a la que se destina (DOF, 1993).

Tonelaje de peso muerto (DWT): El peso muerto es el peso real en toneladas que un buque puede transportar cuando está cargado hasta el calado máximo admisible incluyendo combustible, agua dulce, suministros, captura y tripulación (FAO, 2010).

Vulnerabilidad: Las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien, que los hacen **susceptibles** a los efectos dañinos de una amenaza (UNISDR, 2009; FAO, 2009).

Zona de desarrollo portuario: El área constituida con los terrenos de propiedad privada o del dominio privado de la Federación, de las entidades federativas o de los municipios, para el establecimiento de instalaciones industriales y de servicios o de cualesquiera otras relacionadas con la función portuaria y en su caso, para la ampliación del puerto (DOF, 1993).

RESUMEN

El Puerto de Veracruz es uno de los principales del Sistema Portuario Nacional (SPN) y es el único en el país que maneja un tipo de carga 100% comercial, la cual incluye: la carga general contenerizada y suelta, agrícola, mineral, fluidos no petroleros y petróleo y derivados, por lo que dentro de sus instalaciones se manejan sustancias peligrosas como la gasolina y el Diésel. Actualmente se desarrolla la ampliación de su infraestructura, con la cual se cuadruplicará su carga comercial de 23 a 95 millones de toneladas, dentro de lo que se planea aumentar el manejo de petrolíferos.

Debido a su ubicación este Puerto se encuentra expuesto a fenómenos hidrometeorológicos como: ciclones tropicales y nortes, los cuales tienen asociados intensos vientos y oleaje muy energético. Esto es de interés, ya que en otros sitios se han tenido desastres químicos a causa del efecto dominó provocado por fenómenos naturales, como los escenarios Natech (Natural-hazard-triggered technological) ocurridos en Luisiana, Estados Unidos, en el 2005, a causa de los efectos generados por el huracán Katrina, donde se demostró que los fenómenos hidrometeorológicos tienen la capacidad de desencadenar consecuencias catastróficas, en sitios industrializados vulnerables con almacenamiento de sustancias peligrosas.

El presente estudio contribuye a la evaluación de los riesgos químicos asociados a fenómenos hidrometeorológicos en el Puerto de Veracruz, donde se adaptó un modelo de riesgo que considera el peligro de exposición a viento-oleaje extremo y la vulnerabilidad de los tanques de almacenamiento de gasolina y Diésel, ubicados en el Recinto Portuario, en el “Centro Embarcador Bajos la Gallega” de Petróleos Mexicanos (PEMEX).

En el periodo de 1970 al 2018 a nivel internacional se identificaron y recopilaron datos de 100 accidentes en tanques de almacenamiento, asociados a la presencia de fenómenos hidrometeorológicos. Esta información se obtuvo de bases de datos de accidentes, registros de accidentes e incidentes, referencias de artículos e información meteorológica y oceanográfica. Posteriormente, se analizaron las condiciones de viento-oleaje extremo de la zona de estudio, por medio de información de reanálisis del modelo de oleaje Wavewatch III e información obtenida in-situ.

Se continuó con el cálculo del Índice de Vulnerabilidad (IV) para cada uno de los elementos expuestos, mediante la raíz cuadrada del producto de los valores otorgados a los factores de vulnerabilidad estructural, funcional y química, entre el total de las variables elegidas por su relevancia en desastres tecnológicos causados por fenómenos hidrometeorológicos. Posteriormente, con el resultado de la ponderación se representaron las categorías de vulnerabilidad en: “baja”, “moderada”, “alta” y “muy alta”, a través de los percentiles del IV del 25%, 50% y 75%.

Se simuló el escenario de “emisión por evaporación de un derrame” en el programa de Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias (SCRI), Modelos versión 4, tomando

como ejemplo la serie de sucesos de uno de los accidentes ocasionados por el huracán Katrina, en 2005, en Estados Unidos, con la finalidad de ilustrar las consecuencias químicas y a la salud que se pueden generar por el efecto dominó. En donde se identificó que el riesgo a la salud del personal del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, en un escenario de este tipo por exposición a benceno, es “baja”, porque las oficinas, el punto de reunión de emergencias y la salida de la instalación, están fuera de las áreas que cuentan con concentraciones de benceno iguales al Acute Exposure Guideline Levels-1 con exposición en 30 minutos (AEG1-1-30 min = 73 ppm) y al AEG1-2-30 min (1,100 ppm).

Los resultados obtenidos por medio del modelo de riesgo y los criterios de aceptabilidad propuestos, indican que el lugar tiene un bajo peligro de viento extremo, para vientos de 175 km/h; en cuanto a la vulnerabilidad estructural, funcional y química de los tanques que almacenan gasolina se observó que implican mayores consecuencias negativas en comparación con los que almacenan Diésel. Por lo que los tanques de almacenamiento de gasolina están en riesgo químico “moderado” asociado a peligro de viento-oleaje extremo, mientras los tanques con Diésel están en riesgo “bajo”.

Este estudio permite identificar las áreas de oportunidad en la gestión de riesgos químicos asociados a fenómenos hidrometeorológicos en el Puerto de Veracruz, poniendo de manifiesto la importancia en la calidad de bases de datos de accidentes y de la implementación, mantenimiento y operación del monitoreo in-situ de las variables hidrometeorológicas. Además de que a partir de visitas al área de estudio fue posible identificar vulnerabilidades en los tanques de almacenamiento del “Centro Embarcador Bajos la Gallega” de PEMEX y recomendar acciones para su reducción.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El Puerto de Veracruz está clasificado como un **puerto de altura** y se encuentra entre los cuatro principales del SPN manejando un tipo de carga 100% comercial, la cual incluye los segmentos de: general contenerizada y suelta, agrícola, mineral, fluidos no petroleros y petróleo y derivados. Actualmente, la Administración Portuaria Integral de Veracruz (APIVER) desarrolla el proyecto de optimización de su infraestructura, en el que se incluye en la primera etapa la ampliación del puerto y, en la segunda etapa el aumento de 35 posiciones de atraque, lo que lo llevaría a cuadruplicar su carga comercial de 23 a 95 millones de toneladas, convirtiéndolo así en el más importante de México (APIVER, 2013; 2017).

Entre los derivados de petróleo almacenados en el sitio, se encuentran: la gasolina y el **Diésel**, esto es de interés, ya que estas mezclas están clasificadas como sustancias peligrosas de Clase 3 de acuerdo con la NOM-002-SCT/2011 (DOF, 2011). Aunado a ello, en el año 2017 se evidenciaron altos volúmenes de productividad, destacando descargas de más de 14 millones de barriles de estos combustibles (PEMEX, 2018) y con la ampliación del Recinto Portuario se busca incrementar el manejo de fluidos petroleros (Consultores en gestión política y planificación ambiental S.C., 2017; DOF, 2016a).

El Puerto de Veracruz se ubica geográficamente en la parte central del litoral del Golfo de México (INAFED, 2010) y debido a su ubicación está expuesto a fenómenos hidrometeorológicos, como ciclones tropicales y nortes; los cuales tienen asociados un clima marítimo con viento y oleaje muy intensos que representan un peligro (Osorio-Tai, 2015; APIVER, 2013; Acevedo-Rosas y Luna-Díaz-Peón, 2006; Téllez, 2004).

Los fenómenos naturales tienen la capacidad de desencadenar una serie de accidentes tecnológicos en forma de efecto dominó en sitios vulnerables. Cuando esto ocurre y se tienen liberaciones químicas al ambiente como: derrames, fugas, incendios o explosiones; se adopta el término de eventos “Natech” (Natural-hazard-triggered technological). La importancia de que se realicen evaluaciones de riesgo que contemplen peligros naturales, es la de reducir vulnerabilidades y prevenir desastres, principalmente en zonas urbanas e industrializadas; ya que estos eventos impactan: la economía, el ambiente y la salud humana (WHO, 2018a; 2018b; OECD, 2011; Vetere-Arellano, et al., 2004).

1.2 Justificación

Se necesita evaluar los riesgos químicos en el actual Puerto de Veracruz considerando el **peligro hidrometeorológico** y la **vulnerabilidad** de los tanques de almacenamiento de combustibles, para mejorar las capacidades de preparación y respuesta a emergencias en el sitio (WHO, 2018a; ASEA, 2018; Silano, 1985).

Lo anterior debido a que los fenómenos naturales han demostrado exacerbar sus impactos al inducir la liberación de materiales peligrosos en instalaciones vulnerables, como los desastres generados durante el huracán Katrina en 2005, en el estado de Luisiana EUA, en donde se tuvieron más de 200 liberaciones de materiales peligrosos al ambiente (Santella, Steinberg y Sengul, 2010; Cruz y Krausmann, 2009; Bravo-Álvarez, et al., 2006a; 2006b).

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Evaluar los riesgos químicos que se presentan ante fenómenos hidrometeorológicos extremos (ciclones tropicales y nortes) de acuerdo con la vulnerabilidad del sitio en donde se exponen tanques de almacenamiento de combustibles, para el caso del Recinto Portuario de Veracruz.

1.3.2 Específicos

1. Identificar la intensidad del viento que representa peligro hidrometeorológico a los tanques de almacenamiento de combustibles, considerando información hidrometeorológica del Puerto de Veracruz y de desastres ocurridos en otros sitios.
2. Determinar los factores de vulnerabilidad de los tanques de almacenamiento de combustibles (elementos expuestos) en el actual Puerto de Veracruz, conforme a la información técnica del área de estudio y las experiencias de accidentes que involucran tanques de almacenamiento en otros sitios.
3. Adaptar a las condiciones del área de estudio una metodología de riesgo, combinando los elementos de peligro, vulnerabilidad y **exposición**.
4. Proponer medidas para la disminución de las condiciones de vulnerabilidad de los tanques de almacenamiento de combustibles en el Recinto Portuario de Veracruz.

1.4 Hipótesis

El Puerto de Veracruz está en riesgo químico debido a las condiciones de vulnerabilidad de las zonas de almacenamiento de combustibles y a su exposición a fenómenos hidrometeorológicos extremos como nortes y ciclones tropicales que provocan vientos mayores o iguales a 50 km/h (13.9 m/s)*.

*Con una velocidad de viento de 50 km/h el Puerto de Veracruz suspende las maniobras de buques con carga de hidrocarburos (APIVER, 2014).

1.5 Alcances

- El estudio contempló la relación multidisciplinaria de conocimientos de Ingeniería, Meteorología y Oceanografía.
- Se consideró información meteorológica y oceanográfica de reanálisis del modelo de oleaje Wavewatch III del periodo de febrero del 2005 a mayo del 2019.
- Se empleó la información meteorológica obtenida in-situ en la estación meteorológica APIVER-UNAM, del periodo de mayo del 2017 a septiembre del 2019.
- La evaluación de riesgos se enfocó a las zonas de almacenamiento de gasolinas y Diésel del “Centro Embarcador Bajos la Gallega” de PEMEX, en el actual Puerto de Veracruz.
- Se utilizó el software de Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias (SCRI) modelos versión 4, para simular un escenario de emisión por evaporación de un derrame, tomando como ejemplo la serie de sucesos de uno de los accidentes ocasionados por el huracán Katrina, en 2005, en Estados Unidos.
- La peligrosidad de los combustibles tomando en cuenta las características de sus componentes se consideró en la evaluación de vulnerabilidades, para hacer énfasis en el peligro originado por fenómenos hidrometeorológicos.
- Se contempló el análisis de viento y oleaje provocados por los fenómenos hidrometeorológicos: ciclones tropicales y nortes.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Combustibles

Los combustibles son materiales que pueden derivar de diversas fuentes y encontrar en estado líquido, sólido o gaseoso. Éstos se definen como: *“cualquier material capaz de liberar energía cuando se oxida de forma violenta con desprendimiento de calor”* (PEMEX, 2019).

En particular los combustibles fósiles son fuentes de energía no renovables, compuestos por **hidrocarburos** que tienen su origen en plantas y animales que vivieron en el planeta hace millones de años, los cuales fueron cubiertos gradualmente por estratos superiores de la corteza terrestre y se transformaron a través de procesos químicos y físicos (EC, 2019; Encyclopaedia Britannica, 2018).

Entre los combustibles fósiles se encuentran: el carbón, el **petróleo** y el gas natural. El petróleo en sus fases líquida y gaseosa, se considera la principal fuente de energía a partir de combustibles fósiles en países desarrollados (Encyclopaedia Britannica, 2018; EC, 2019; EESI, 2018).

En la normatividad mexicana, la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, denomina *“combustibles fósiles líquidos y gaseosos”* al gas natural y a los derivados del petróleo como: gasolinas, turbosina, Diésel, combustóleo, gasóleo y gas L.P. (DOF, 2005).

La NOM-016-CRE-2016, define a los petrolíferos como los *“productos que se obtienen de la refinación del petróleo o del procesamiento del gas natural y que derivan directamente de hidrocarburos, tales como gasolinas, Diésel, querosenos, combustóleo y gas licuado de petróleo, entre otros, distintos de los petroquímicos”* (DOF, 2016b).

2.1.1 Propiedades físicas y químicas

En la Tabla 2.1 se muestra la descripción general e identificación, además de las propiedades físicas y químicas de los petrolíferos: gasolina y Diésel.

Tabla 2.1. Datos de los petrolíferos: gasolina y Diésel

<i>Nombre de la sustancia</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Diésel</i>
<i>Descripción general</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Líquido volátil incoloro a ámbar claro, con olor a petróleo. • Menos denso que el agua. • Genera vapores más pesados que el aire. 	<ul style="list-style-type: none"> • Líquido de color amarillo pajizo a oscuro, con olor a petróleo. • Menos denso que el agua. • Genera vapores más pesados que el aire.

	<ul style="list-style-type: none"> • Los vapores filtrados pueden viajar a una fuente de ignición y luego regresar a la fuente original. 	
<i>Composición</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Tolueno $\geq 3\%$ • n-Hexano $\geq 3\%$ • Benceno $\geq 0.1\%$ 	—
<i>Número CAS</i>	8006-61-9	68334-30-5
<i>Número UN</i>	1203	1202
<i>Número de Guía</i>	128	128
<i>Punto de inflamación</i>	- 37.78 °C (- 36 °F)	51.66 °C (125 °F)
<i>Calor de combustión</i>	43700 kJ/kg	39700 kJ/kg
<i>Límite inferior de explosividad (LEL)</i>	1.4 %	1.3 %
<i>Límite superior de explosividad (UEL)</i>	7.4 %	6 %
<i>Temperatura de autoignición</i>	456.11 °C (853 ° F)	176.67 a 329.44 °C (350 a 625 °F)
<i>Punto de fusión</i>	—	-17.78 °C (0 °F)
<i>Presión de vapor</i>	51.01 kPa (382.58 mm Hg)	0.29 kPa a 21.11 °C (2.17 mm Hg a 70°F)
<i>Gravedad específica</i>	0.7321 a 20 °C (68 ° F)	0.841 a 20.44 °C (60.8 ° F)
<i>Punto de ebullición</i>	60 a 198.89 °C a 101.325 kPa (140 a 390 ° F a 760 mm Hg)	282.22 a 337.78 °C a 101.325 kPa (540 a 640 ° F a 760 mm Hg)
<i>Viscosidad cinemática (mm²/s)</i>	< 7 a 40 °C (104 °F)	2 – 4.5 a 40 °C (104 °F)
<i>Peso Molecular</i>	72 (aprox.)	—
<i>Solubilidad en agua</i>	Insoluble	Insoluble

Fuente: NOAA y EPA, 2018; Bp, 2020a; Bp, 2020b; Mercuria Energy Trading, 2015a; Dinámica Heurística, 2020.

2.2 Riesgo

El riesgo está definido como “*la probabilidad de que se produzca un evento y consecuencias negativas*”, como: muertes, lesiones, daños a la propiedad, afectaciones a los medios de vida, interrupción de las actividades económicas y/o deterioro ambiental (FAO, 2009; UNISDR, 2009).

Éste es causado por el resultado de interacciones entre las **amenazas** naturales o antropogénicas y las condiciones de **vulnerabilidad** de un elemento expuesto (FAO, 2009; UNISDR, 2009). De esta forma, de acuerdo con el tipo de amenazas que los ocasionan, los riesgos pueden clasificarse como:

- *Riesgos naturales*: son los asociados a fenómenos naturales como: **fenómenos geológicos e hidrometeorológicos** (SEMARNAT, 2013; CENAPRED, 2001).
- *Riesgos antropogénicos*: son producidos por actividades humanas, dentro de ellos se encuentran los químicos o tecnológicos, los sanitarios y los socio-organizativos (SEMARNAT, 2013; CENAPRED, 2001).

Existen varias propuestas para la evaluación de riesgos, por lo que este proceso puede elaborarse dependiendo de la naturaleza del peligro, el sistema involucrado y el contexto en el cual el riesgo evoluciona (OCDE, 2003).

Las condiciones riesgosas pueden dar lugar a desastres o catástrofes, los cuales implican una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad, que causa una gran cantidad de pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales y que exceden la capacidad de respuesta de la comunidad o sociedad afectada para afrontar la situación utilizando sus propios recursos (FAO, 2009).

2.3 Riesgos químicos

El desarrollo de las sociedades ha incrementado la demanda de diversos productos químicos que les permitan satisfacer sus necesidades, algunos de estos productos poseen características peligrosas: inflamables, tóxicas, reactivas o explosivas; por lo que esto ha implicado un riesgo potencial de accidentes en algunas de las etapas de su producción, almacenamiento, transporte o uso (Arcos-Serrano, et al., 2007; Arcos-Serrano, et al., 2006; Arcos-Serrano e Izcapa-Treviño, 2003; CENAPRED, 2001; FEMA, 2005).

2.3.1 Tipologías de accidentes químicos

Los accidentes químicos pueden provocar la liberación de las sustancias peligrosas al ambiente, ocasionando problemas de contaminación y de salud a la población. Se pueden clasificar en: fugas, incendios o explosiones (Storch-de-Gracia y García-Martín, 2008; Arcos-Serrano e Izcapa-Treviño, 2003).

Existe la posibilidad de que la aparición de un tipo de accidente de lugar al origen de otros tipos, a esto se le denomina “*efecto dominó*” (Storch-de-Gracia y García-Martín, 2008; Arcos-Serrano, et al., 2007; OIT, 1990).

Las fugas son unos de los accidentes más frecuentes y pueden presentarse en forma de emisiones (gases y vapores) o bien por derrames (líquidos) de materiales inflamables o tóxicos (Storch-de-Gracia y García-Martín, 2008).

La evolución de las fugas está en función de (Storch-de-Gracia y García-Martín, 2008):

- Las condiciones (presión, temperatura, cantidad) y del estado físico de fluido fugado.
- La naturaleza química (inflamabilidad, toxicidad).
- El tipo de sistema de contención en el que se origina la fuga (equipo abierto o cerrado).
- Las condiciones del entorno hacia el que se produce la fuga (geometría, topografía, meteorología).

Por otro lado, los incendios son reacciones de oxidación originados a partir de la inflamación de materiales combustibles con aire como comburente (Storch-de-Gracia y García-Martín, 2008). Entre sus efectos se encuentran:

- El calor (generalmente radiante).
- Los humos sofocantes y/o tóxicos.
- La onda explosiva de sobrepresión debida a la aceleración de la velocidad de reacción y/o contención.

Los incendios pueden clasificarse en cuatro tipos (Center for chemical process safety, 2010; Storch-de-Gracia y García-Martín, 2008; Arcos-Serrano, et al., 2007):

- Incendio de líquido en disposición abierta (de charco/pool-fire).
- Incendio de líquido con rebosamientos violentos (reboseamiento por ebullición/boil-over y rebosamiento superficial/slop-over).
- Incendio de gases o vapores en nube abierta (llamarada/flash fire y bola de fuego/fireball).
- Incendio de gases o vapores en fuga local presurizada (dardo/jet-fire).

En cuanto a las explosiones, son fenómenos caracterizados por una onda de choque, que pueden producir un estallido y causar daños a varios cientos de metros de distancia, este tipo de accidente se pueden provocar en (Storch-de-Gracia y García-Martín, 2008; Arcos-Serrano, et al., 2007; OIT, 1990):

- Sistemas cerrados: Confined Vapour Cloud Explosion (CVCE)/Explosión de nube de vapor confinado, o Explosiones confinadas de polvo suspendido.
- Sistemas abiertos: Unconfined Vapour Cloud Explosion (UVCE).
- Sistemas semiabiertos: Boiling Liquid Expansion Vapour Explosion (BLEVE).

De acuerdo con su origen las explosiones pueden ser: iniciadoras de fuego, consecuencia de fugas, consecuencia de incendios o consecuencia de otras explosiones (Storch-de-Gracia y García-Martín, 2008).

Las explosiones pueden producirse en forma de una deflagración o de una detonación, esto dependerá de la velocidad de combustión durante la explosión.

Se produce una deflagración cuando la velocidad de combustión o la velocidad de la llama es relativamente lenta, aproximadamente 1 m/s (generan presiones máximas entre 70-80 kPa), en cambio en una detonación la velocidad de la combustión es extremadamente elevada, desplazándose el frente de la llama como una onda de choque con una velocidad normal de 2,000 a 3,000 m/s, por ello las detonaciones son consideradas más destructivas al generar mayores presiones (200 kPa) (OIT, 1990).

2.3.2 Emergencias químicas

Mediante un análisis de emergencias realizado por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (por sus siglas en inglés OECD), con información de la base de datos OFDA/CRED International Disaster Data, en el periodo de años de 1950 al 2000, se observa que a nivel internacional los desastres tecnológicos como: explosiones, incendios y accidentes de transporte se vieron incrementados rápidamente desde el comienzo de la década de los 70's, paralelo a ello el aumento de los decesos y el gasto financiero asociado a estas causas, principalmente en países en desarrollo (OECD, 2003).

Entre los accidentes químico-tecnológicos con más afectaciones se encuentran: la colisión de un Ferry en 1987 en Filipinas (4,375 víctimas), el accidente en la fábrica de productos químicos de Bhopal India en 1984 (3,000 víctimas), el colapso del reactor nuclear en Chernóbil en 1986 (31 víctimas inmediatas, 135,000 reportes de afectados y 2.8 billones de dólares en pérdidas), la explosión de la plataforma petrolera Piper Alpha en 1988 en Reino Unido (167 víctimas, pérdidas aseguradas cercanas a 3 mil millones de dólares) y las explosiones de gas licuado de petróleo en San Juan Ixhuatepec México en 1984 (más de 500 muertos, 4,500 heridos, 1,000 desaparecidos, además de la destrucción masiva de viviendas), entre otros (Arcos-Serrano, et al., 2007; OECD, 2003).

En México el análisis de emergencias químicas realizado por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente PROFEPA (2015) en el periodo de 2000 al 2014, se puede observar en la Figura 2.1 que el estado de Veracruz se encuentra entre los primeros con mayor índice de reportes de emergencias químicas.

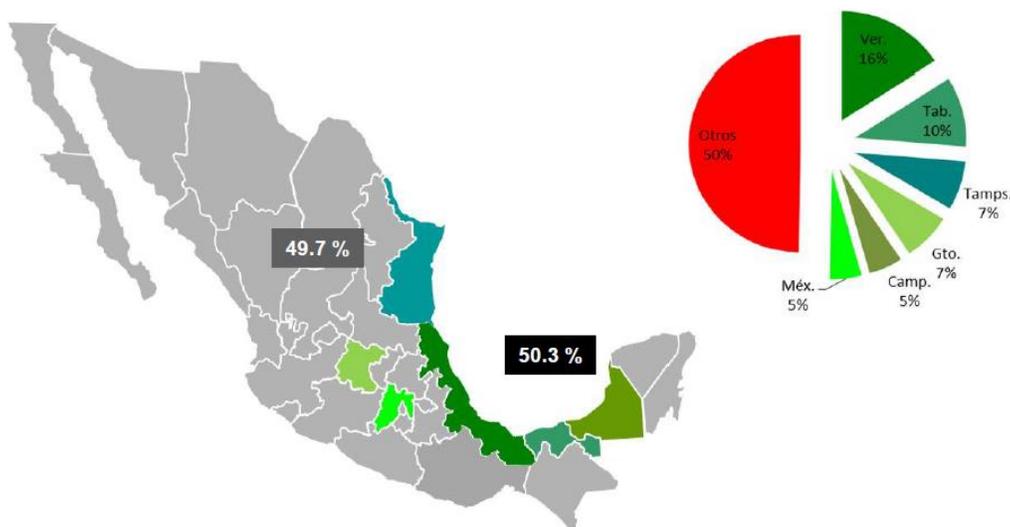


Figura 2.1. Emergencias químicas en México reportadas a PROFEPA en el periodo 2000-2014

Fuente: PROFEPA, 2015.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) destaca en la Figura 2.2 a los principales municipios del estado de Veracruz, que de acuerdo con el tipo de sustancias almacenadas pueden presentar mayores consecuencias negativas en caso de accidentes químicos, entre los cuales está el municipio de Veracruz, con un almacenamiento aproximado de 14,437 ton de gasolina, 13,238 ton de Diésel y 1,056 ton de gas licuado de petróleo (Arcos-Serrano e Izcapa-Treviño, 2003). Por otra parte, la PROFEPA declara en su Informe de Actividades del 2017 haber recibido 652 notificaciones de emergencias ambientales a nivel nacional, de las cuales 258 fueron provocadas por derrames de hidrocarburos y otras sustancias químicas, 124 por explosiones, 106 por fugas, 152 por incendios en instalaciones

y 12 por otras causas (Figura 2.3). En la Figura 2.4 se muestra que de las 652 emergencias, el 40.2% provenían de industria de hidrocarburos (PROFEPA, 2017).

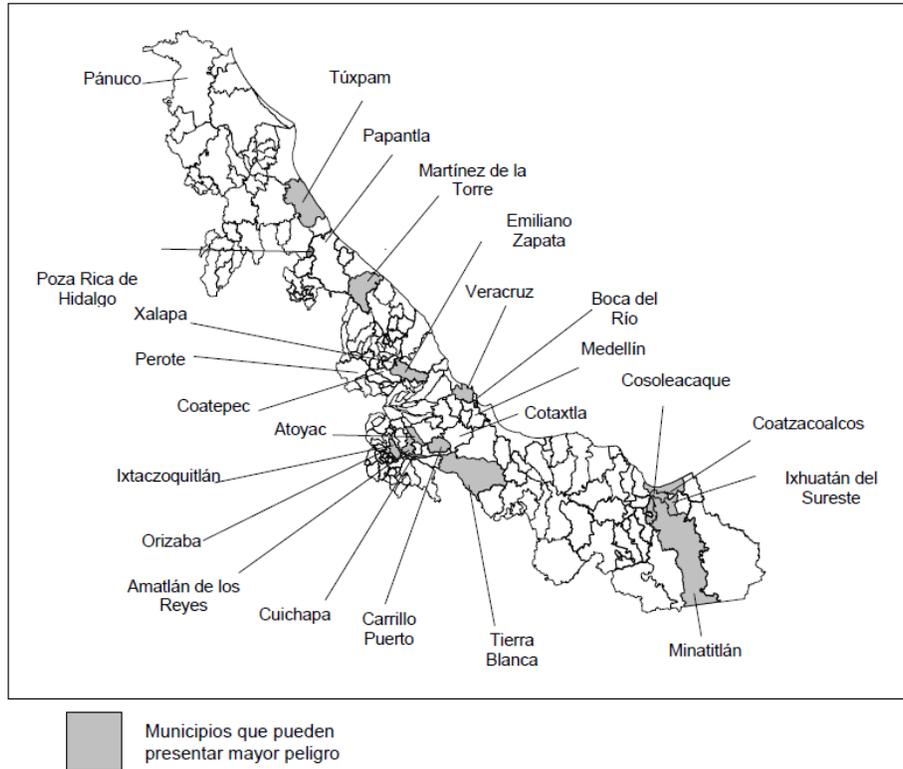


Figura 2.2. Municipios con almacenamiento de sustancias peligrosas en Veracruz

Fuente: Arcos-Serrano e Izcapa-Treviño, 2003.

Total de emergencias: **652**

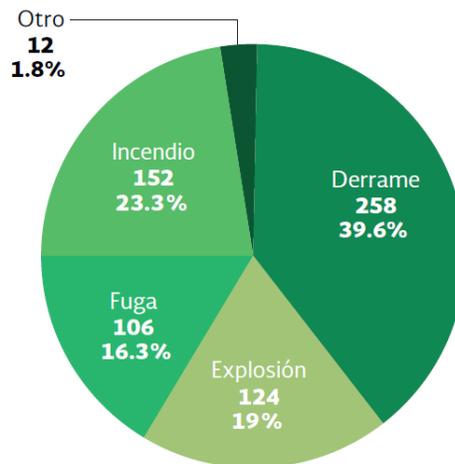


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**3. Emergencias notificadas en el 2017 a PROFEPA, distribución por causa**

Fuente: PROFEPA, 2017.

Total de emergencias: **652**

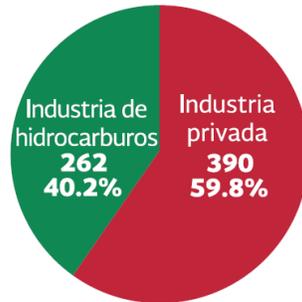


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**4. Emergencias notificadas en el 2017 a PROFEPA, distribución por procedencia**

Fuente: PROFEPA, 2017.

2.4 Fenómenos hidrometeorológicos

2.4.1 Ciclones tropicales

Los ciclones tropicales son tormentas intensas con flujo turbulento en rotación espiral que se desarrollan sobre los océanos tropicales en regiones de aguas muy cálidas; éstos se clasifican como sistemas de mesoescala, porque en ellos la escala horizontal de la región de convección intensa y vientos fuertes es de alrededor de unos 100 km de radio (Holton, 2004).

Se originan en el mar entre las latitudes 5° a 15°, tanto en el hemisferio norte como en el sur, en la época en que la temperatura del agua es mayor o igual a 26° C, cuando se ubican en el hemisferio norte, giran en el sentido contrario a las manecillas del reloj (Rosengaus-Moshinsky, Jiménez-Espinosa, y Vázquez-Conde, 2002).

Los ciclones tropicales se clasifican mediante la escala Saffir-Simpson, en la Tabla 2.2 se muestra la presión, velocidad de viento y afectaciones que se pueden tener en cada una de las categorías, sin dejar de lado que los impactos están relacionados con las condiciones de vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Tabla 2.2. Escala Saffir - Simpson

<i>Categoría</i>	<i>Presión, mb</i>	<i>Velocidad, km/h</i>	<i>Afectaciones</i>
Perturbación tropical	1008.1 – 1010	--	Ligera circulación de vientos
Depresión tropical	1004.1 - 1008	< 62	Localmente destructivo
Tormenta tropical	985.1 – 1004	62.1 – 118	Tiene efectos destructivos
Huracán categoría 1	980.1 – 985	118.1 – 154	Vientos peligrosos
Huracán categoría 2	965.1 – 980	154.1 – 178	Vientos extremadamente peligrosos
Huracán categoría 3	945.1 – 965	178.1 – 210	Devastador
Huracán categoría 4	920.1 – 945	210.1 – 250	Catastrófico
Huracán categoría 5	< 920	> 250	Catastrófico

Fuente: Stull, 2017; Rosengaus-Moshinsky, Jiménez-Espinosa, y Vázquez-Conde, 2002.

2.4.2 Nortes

El territorio mexicano se ve afectado por frentes fríos generados por ciclones de latitudes medias (Magaña-Rueda, 1999). Un frente describe el límite entre dos masas de aire con temperatura y/o contenido de vapor de agua diferente.

El frente frío en particular hace referencia a la zona de transición de una masa de aire frío y seco, de una masa de aire cálido; debido a que el aire frío es más denso que el aire caliente

el primero empuja por debajo al segundo obligándolo a elevarse. Los frentes fríos están acompañados de zonas de baja presión, donde los vientos soplan en sentido antihorario alrededor del área de baja presión en el hemisferio norte, derivado de ello, la dirección del viento antes del paso del frente frío es por lo general del sur o suroeste, con temperaturas cálidas y después de su paso, los vientos cambian a ser del oeste o noroeste y la temperatura del aire tiende a decaer (SMN, 2020).

Cuando estos sistemas de latitudes medias alcanzan bajas latitudes y el viento sopla de norte a sur sobre el Golfo de México o Centroamérica, se denominan nortes. Su temporada abarca comúnmente de octubre a mayo y se caracterizan por intensidades de viento entre 20 y 118 km/h (5.5 a 32.7 m/s), que se deben al contraste de presión entre la alta presión sobre el Golfo de México y la relativamente baja presión en el Pacífico tropical del este; se tienen descensos de temperatura de 2 a 5 °C y la formación de nubes que pueden provocar precipitación (Magaña-Rueda, 1999; Osorio-Tai, 2015; SMN, 2020).

2.4.3 Inundaciones costeras

En las zonas costeras existe el peligro de que las tormentas puedan provocar inundaciones a causa de la elevación del nivel del mar, esto ocurre cuando se tienen incrementos de oleaje y mareas astronómicas altas combinadas con marejada ciclónica, éstas dos últimas en su conjunto se denominan marea de tormenta (Shroder, Paron y Di Baldassarre, 2015; New Zealand Government, 2008; NHC, 2019).

Las componentes de la elevación del nivel del mar se pueden observar en la Figura 2.5.



Figura 2.5. Componentes del nivel del mar

Fuente: New Zealand Government, 2020.

Las olas son oscilaciones en la superficie del océano y su altura se ve afectada por la velocidad de viento, su duración y el fetch (distancia sobre el agua en que sopla el viento en

una sola dirección), las olas grandes solo se forman cuando se combinan estos tres factores. Si la velocidad del viento es baja solo se producen olas pequeñas, independientemente de la duración o el fetch; si la velocidad del viento es alta pero solo sopla durante unos minutos, no se producirán olas grandes, incluso si el fetch es ilimitado; al igual que no se forman grandes olas si soplan vientos fuertes durante un período de tiempo prolongado, pero durante un corto fetch (Webb, 2020; Duxbury, et al., 2002).

Las partes que componen las olas se muestran en la Figura 2.6, la parte más alta de la superficie de una ola se llama cresta y la parte más baja canal o valle, la distancia vertical entre la cresta y el canal es la altura de la ola y en cuanto a la distancia horizontal entre dos crestas o canales adyacentes se conoce como la longitud de onda (NOAA, 2019a).

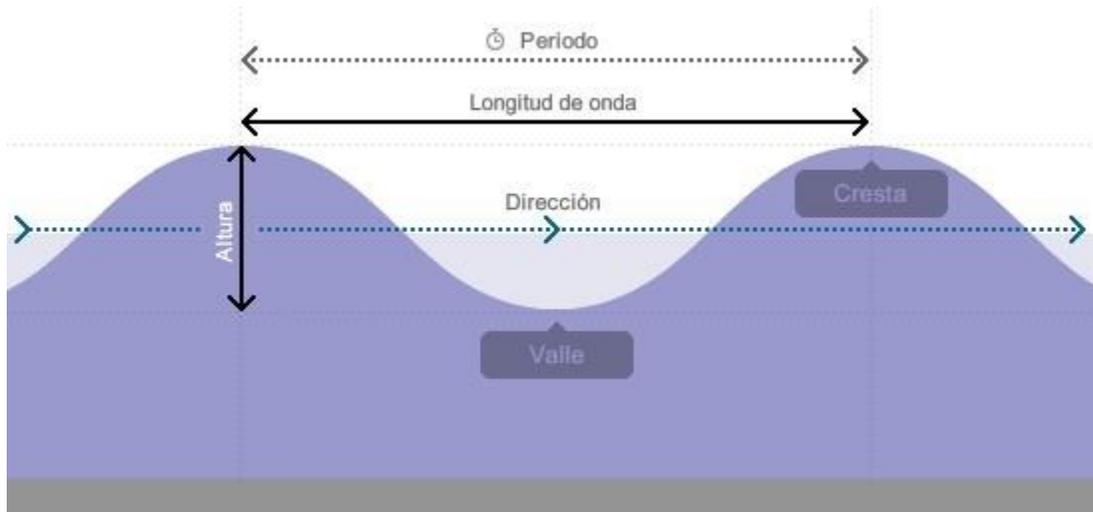


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**6. Partes de las olas**

Fuente: Ministerio de defensa marina de guerra del Perú, 2013.

En los reportes, el clima de oleaje se define por la altura de ola significativa (H_s), que es la altura promedio del 33% más alto de las olas durante un cierto período; el período de onda (T_m), que es el tiempo promedio entre ondas sucesivas y la dirección de la ola (New Zealand Government, 2008).

A medida que las olas impulsadas por el viento se acercan a la costa, la fricción entre el fondo del mar y el agua hace que ésta forme ángulos cada vez más pronunciados. Las olas que se vuelven demasiado empujadas e inestables se denominan "olas rompientes" (NOAA, 2019a; New Zealand Government, 2008).

Las olas rompientes contribuyen al aumento del nivel del agua y en consecuencia a inundaciones por medio de tres procesos consecutivos: oleaje, configuración de las olas y desbordamiento. El oleaje se presenta cuando se rompe la ola y el agua es impulsada hacia la playa; la configuración de las olas ocurre cuando éstas rompen continuamente en tierra y el agua se acumula a lo largo de la costa porque no pueden volver al mar; y en el

desbordamiento el agua se derrama a medida que las olas alcanzan la estructura de defensa, lo que resulta en la inundación de la tierra y las propiedades detrás de la barrera, las cuales pueden romperse aumentando el potencial de inundación. Por otra parte, el rocío de olas o salpicaduras sobre una estructura de defensa costera puede ser peligroso para las redes de transporte, aunque los volúmenes de inundación sean relativamente pequeños (NOAA, 2019a; New Zealand Government, 2008).

La marejada ciclónica se refiere al aumento temporal (de horas a días) del nivel del mar por encima de la altura de marea astronómica prevista, este fenómeno ocurre por varios factores, entre los que destacan: las características de la tormenta, el efecto de barómetro invertido y las características de la costa (NHC, 2012; New Zealand Government, 2008).

Las tormentas con vientos persistentes, mayor tamaño y velocidad de avance y ángulos de aproximación perpendiculares a la costa, hacen que se acumule agua en ella. En cuanto al efecto de barómetro invertido, éste permite que el nivel del mar en una región (100 km² o más) se eleve por encima del nivel del mar previo a la tormenta, dando como resultado un aumento de aproximadamente 1 cm de nivel del mar por cada caída de 1 hPa en la presión barométrica media anual. Por otra parte, se tendrá mayor marejada en pendientes de plataformas continentales poco profundas y costas cóncavas, además la geomorfología de la costa (islas de barrera, ensenadas, canales, bahías y ríos) afectará el comportamiento del flujo del agua, por ejemplo, en tormentas lentas se produce un oleaje más alto en bahías, brazos de mar y otros cuerpos de agua cerrados (NHC, 2012; New Zealand Government, 2008).

2.4.4 Probabilidad de ocurrencia de eventos extremos

La estimación de valores extremos de parámetros geofísicos como velocidad de viento y altura de oleaje tiene varias aplicaciones, que van desde el diseño de estructuras costeras, operación de instalaciones, enrutamiento de embarcaciones, evaluaciones de riesgo, entre otras (Young, et al., 2012; Vinoth y Young, 2011).

Los valores extremos pueden ser expresados de diversas formas, ya sea por parámetros estadísticos como el percentil igual o superior al 90, de la estimación de la función de densidad de probabilidad observada o; por periodos de retorno. Por ejemplo, el percentil 99 significa el valor que se superaría el 1% del tiempo. (IPCC, 2018; Young, et al., 2012; Vinoth y Young, 2011). Por otra parte, el período de retorno es el intervalo de tiempo promedio entre eventos sucesivos, en donde se iguala o excede una condición extrema tomada como referencia de diseño y se emplea en el ámbito de la ingeniería para extrapolar datos más allá de la longitud del registro (USACE, 2015).

En el cálculo de los periodos de retorno, de ser posible se debe evitar la extrapolación de datos más allá de 2 a 3 veces la longitud del registro; también es importante que en éstos se tengan muestras de datos de los fenómenos extremos a evaluar, de lo contrario no se representarán efectivamente en las estimaciones, es por ello que para las funciones de

| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

distribución extrema, se prefiere el valor máximo de cada evento para crear una serie de valores extremos de duración parcial y a menudo la serie de duración parcial se censura para excluir valores de datos inferiores a algún valor umbral (USACE, 2015).

2.5 Desastres tecnológicos asociados a fenómenos naturales

Actualmente existe evidencia sólida de que los fenómenos naturales tienen la capacidad de desencadenar una serie de accidentes tecnológicos en forma de efecto dominó, cuando esto ocurre y se tienen liberaciones químicas al ambiente por medio de derrames, fugas, incendios o explosiones, se adopta el término de eventos “Natech” (Natural-hazard-triggered technological) (WHO, 2018a; 2018b; OECD, 2011; Vetere-Arellano, et al., 2004).

Los fenómenos naturales causantes de estos tipos de eventos incluyen: terremotos, tsunamis, ciclones, tormentas, inundaciones, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, tornados y temperaturas extremas (WHO, 2018a; OECD, 2011; Cruz, Steinberg y Luna, 2001; Showalter y Myers, 1994). Algunos ejemplos se pueden visualizar en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Ejemplos de eventos natech

<i>Lugar y fecha</i>	<i>Fenómeno natural</i>	<i>Instalación química afectada</i>	<i>Accidente químico</i>
Japón, 2011	Terremoto, tsunami	Refinería	<ul style="list-style-type: none"> • Daños estructurales. • Incendios en tanques de almacenamiento con contenido de azufre, asfalto y gasolina. • Formación de nube tóxica. • Incendios en instalaciones aledañas.
Europa central, 2002	Inundaciones	Industrias químicas	<ul style="list-style-type: none"> • Liberación de 80 ton de cloro por desbordamiento del río Elba en la República Checa. • Contaminación significativa de mercurio, dioxinas en el agua y sedimentos posterior a la inundación.
Estados Unidos, 2005	Ciclón	Refinerías, instalaciones petroquímicas, vehículos, almacenes de combustible, sitios de desechos.	<ul style="list-style-type: none"> • Derrames de petróleo. • Liberación de combustibles por vehículos abandonados. • Contaminación por la inundación de sitios de desechos.
Francia, 2002	Temperaturas extremas	Industria química	<ul style="list-style-type: none"> • Liberación de 12,000 ton de ciclohexano por ruptura de tubería.

Fuente: WHO, 2018a.

La frecuencia de los eventos natech es poco conocida, debido a la falta de información en los reportes de las causas de los accidentes, sin embargo, es probable que el riesgo e impacto de este tipo de eventos esté aumentando por la creciente industrialización y urbanización de las ciudades, además del aumento imprevisto de peligros hidrometeorológicos causados por el cambio climático (WHO, 2018a; EEA, 2008; Cruz, et al., 2004; Cruz y Krausmann, 2009).

Actualmente los estadísticos presentados en la base de datos eMARS, muestran que, de los accidentes registrados, 107 han sido provocados por circunstancias especiales (categorías: contratistas, efecto dominó, natech y transfronterizos) y los accidentes de tipo natech conforman el 15.38% de los casos (Figura 2.7) (EC, 2017).

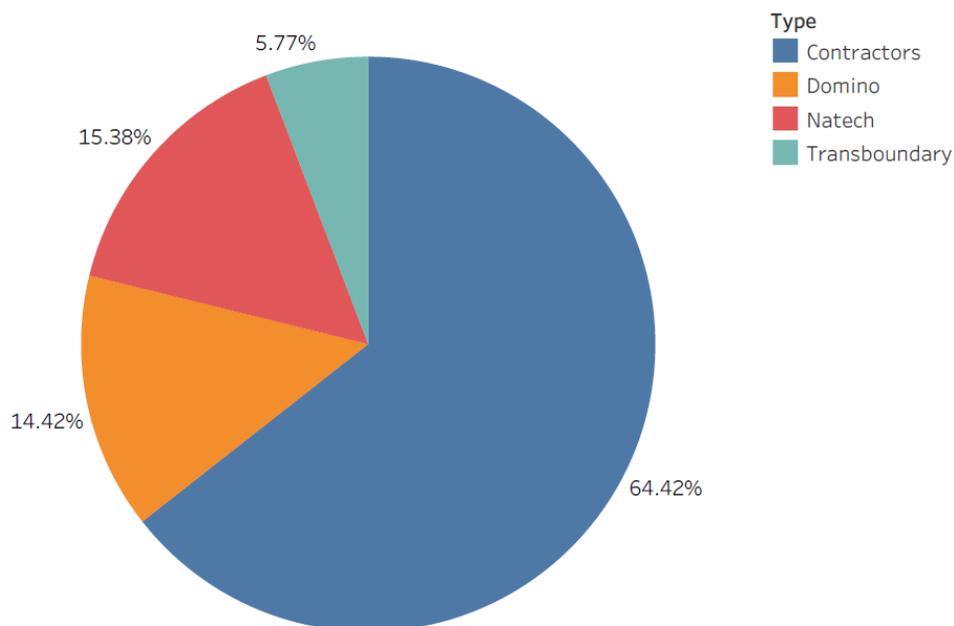


Figura 2.7. Ocurrencia de accidentes provocados por circunstancias especiales

Fuente: EC, 2017.

Aunque los eventos natech sean poco frecuentes para un sitio, la ocurrencia de ellos puede generar graves consecuencias desde el punto de vista económico, ambiental y social, puesto que en experiencias pasadas han amenazado la vida y salud de un gran número de personas, representando un problema clave en la gestión de riesgos (EEA, 2008; Cruz, et al., 2004).

Debido a estas experiencias algunos gobiernos como los pertenecientes a la Unión Europea, Estados Unidos y Japón, han promovido que se reevalúen las metodologías empleadas en el diseño y la gestión de riesgos de instalaciones industriales. Sin embargo, a pesar de que existen regulaciones para garantizar que las estructuras de las plantas industriales sean resistentes a fenómenos naturales hasta su nivel de diseño, existen pocas leyes sobre el

desempeño de medidas de seguridad y la respuesta a emergencias durante eventos naturales (Cruz y Okada, 2008).

Lindell y Perry (1996) señalan que se requiere de evaluaciones de vulnerabilidad precisas y exhaustivas para desarrollar planes de respuesta a emergencias, ya que éstos solo abordan las amenazas que se han identificado.

Para contar con un programa de emergencias exitoso se requiere de un enfoque integral de cuatro fases: mitigación, preparación, respuesta y recuperación. La mitigación se refiere a la reducción de las actividades que pueden producir un desastre, a través de un análisis de riesgos que cubra la identificación de peligros, el análisis de vulnerabilidad, la evaluación de impactos y los análisis costo-beneficio. La preparación es una actividad preventiva dedicada al desarrollo de planes multirriesgo, la validación del plan mediante su práctica, así como revisiones periódicas para las actualizaciones del plan y le compete principalmente al gobierno y a las organizaciones que manejan sustancias peligrosas. Por otra parte, la fase de respuesta incluye la gestión de los recursos para salvar vidas, propiedades y en general la asistencia de la emergencia, además de la coordinación y ayuda mutua entre las diferentes entidades. En cuanto a la recuperación involucra las actividades a corto y largo plazo que devuelven todos los sistemas a la normalidad o mejorados (Sylves y Waugh, 1990).

Los programas de prevención ante los eventos natech van a depender de la integración de factores como: los materiales peligrosos identificados, los recursos humanos disponibles, los sistemas de comunicación, los sistemas de transporte, los servicios contra incendios, las estrategias de mitigación, los servicios médicos, la población en riesgo y el desastre implicado.

2.5.1 Desastres tecnológicos asociados a fenómenos hidrometeorológicos

Estudios sobre la incidencia de los eventos natech demuestran que los peligros hidrometeorológicos se presentan con una mayor frecuencia en comparación con otros fenómenos de índole natural, en donde los ciclones tropicales han implicado mayores cantidades de producto liberado al ambiente, además de mayores pérdidas económicas, siendo los sistemas de almacenamiento los más afectados (Necci, Girgin y Krausmann, 2018; Girgin y Krausmann, 2016; Sengul, 2005).

Cruz, Steinberg y Luna (2001) han identificado los escenarios de liberación de materiales peligrosos en refinerías, inducidos por huracanes “hurmat” por sus iniciales en inglés **hurricane-induced hazardous material releases**, en donde destacan los peligros del viento, tormentas eléctricas e inundaciones que pueden ser causadas cuando se desbordan los cuerpos de agua, por el mar cuando se presentan mareas altas e incrementos de oleaje, o por la acumulación de precipitación (Necci, Girgin y Krausmann, 2018; WHO, 2018b; Shroder, Paron y Di Baldassarre, 2015); ya que estos peligros provocan daños estructurales a las instalaciones vulnerables, fallos en el suministro de energía y/o daños en los equipos que

| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

desencadenan accidentes cómo: emisiones atmosféricas (fugas) tóxicas o inflamables, incendios, explosiones y/o derrames.

2.6 Descripción del área de estudio

El Puerto de Veracruz se ubica geográficamente en la parte central del litoral del Golfo de México en el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (Figura 2.8).

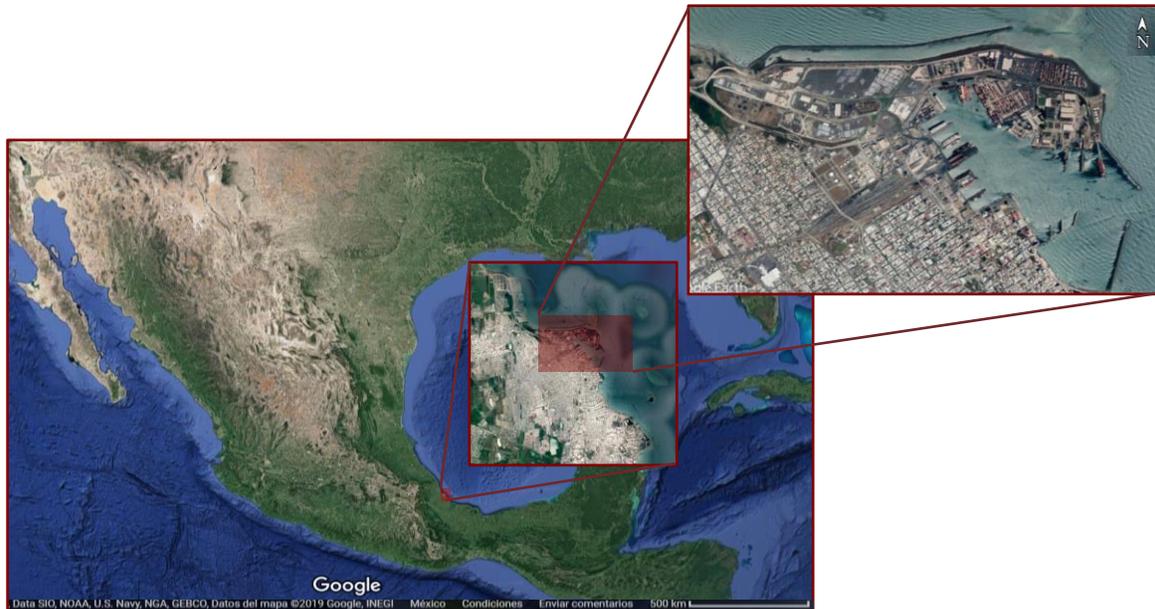


Figura 2.8. Ubicación Geográfica del Puerto de Veracruz

Fuente: Google-Earth-Pro, 2018.

Debido a las actividades desarrolladas se encuentra clasificado como un **puerto de altura**, conformado por una bahía artificial protegida por rompeolas al Sureste (SE), Noreste (NE) y Noroeste (NO) y rodeado por islas, arrecifes y bajos; también cuenta con una escollera al O y un muro interior llamado “muro de pescadores” (APIVER, 2013; 2017; SEMAR, 2013).

2.6.1 Características climatológicas.

El Puerto de Veracruz cuenta con precipitaciones en los meses de junio a noviembre y la total anual es de 1,753 mm. Por otra parte, su temperatura media anual es de 25.6 °C, las temperaturas máximas se presentan en el mes de marzo alcanzando hasta los 42.7 °C, mientras las mínimas se presentan en enero alrededor de los 7.9 °C, tal como se muestra en la Figura 2.9 (Centro hidrometeorológico Veracruz – Boca del Río, 2019).

Este Puerto está expuesto a fenómenos hidrometeorológicos como ciclones tropicales (depresiones y tormentas tropicales, y huracanes) y nortes (Osorio-Tai, 2015; APIVER, 2013; Acevedo-Rosas y Luna-Díaz-Peón, 2006; Téllez, 2004).

La temporada de ciclones tropicales comienza en junio y termina en noviembre, mientras, los nortes abarcan el periodo de septiembre a mayo (SPCV, 2017; APIVER, 2013; Acevedo-Rosas y Luna-Díaz-Peón, 2006).

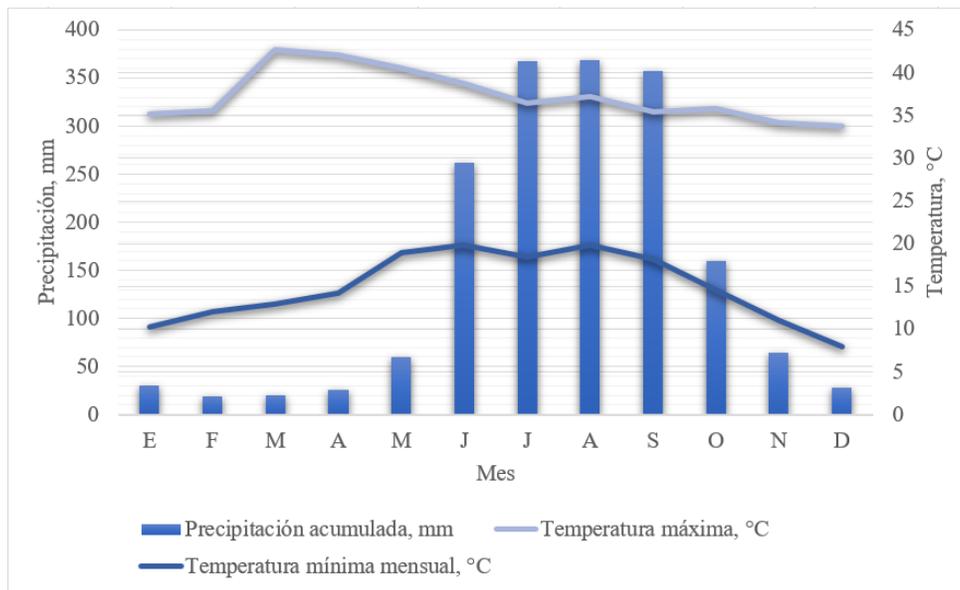


Figura 2.9. Climograma de Veracruz, periodo de años 1981-2018

Fuente: Centro hidrometeorológico Veracruz – Boca del Río, 2019.

En el Puerto de Veracruz se tienen vientos dominantes del Norte en los meses de septiembre a mayo con velocidades de más de 7 m/s (28 km/h) y del Este de abril a agosto con velocidades que van de 1 (7 km/h) a 7 m/s. Además, se llegan a registrar vientos entre 3 (14 km/h) y 7 m/s provenientes del NE y NO (APIVER, 2013; SEMAR, 2013).

2.6.2 Áreas y actividades del Puerto de Veracruz.

La Ley de Puertos define a un Puerto como: “*El lugar de la costa o ribera habilitado como tal por el Ejecutivo Federal para la recepción, abrigo y atención de embarcaciones, compuesto por el recinto portuario y, en su caso, por la zona de desarrollo, así como por accesos y áreas de uso común para la navegación interna y afectas a su funcionamiento; con servicios, terminales e instalaciones, públicos y particulares, para la transferencia de bienes y transbordo de personas entre los modos de transporte que enlaza*” (DOF, 1993).

Y como Recinto Portuario a “*la zona federal delimitada y determinada por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte y por la de Desarrollo Social en los puertos, terminales y marinas, que comprende las áreas de agua y terrenos de dominio público destinados al establecimiento de instalaciones y a la prestación de servicios portuarios*” (DOF, 1993).

En la Figura 2.10 se presentan las zonas que conforman un Puerto.

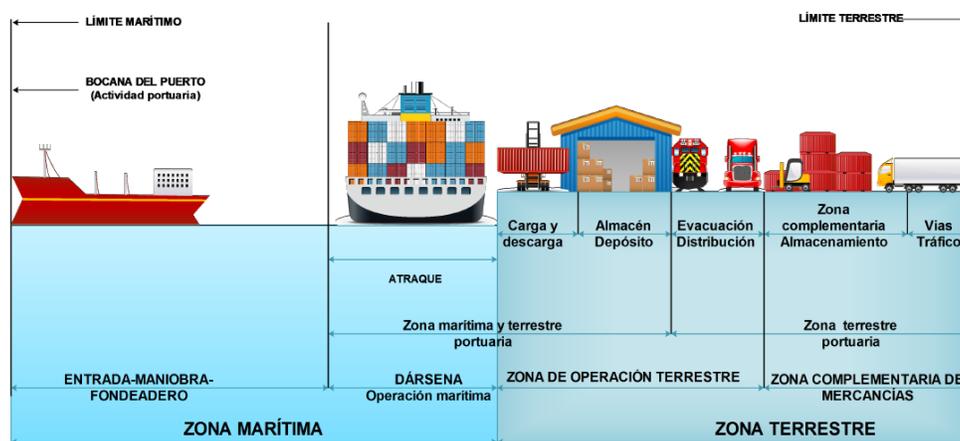


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..10. Zonas que integran un Puerto

Fuente: Truyols-Mateu, 2010.

El Puerto de Veracruz es uno de los puertos más activos y antiguos del país que data de la época colonial y cuenta con una infraestructura que se divide en varias etapas de construcción a raíz de proyectos de ampliación o modernización. Se encuentra integrado por empresas cesionarias, prestadores de servicios, líneas navieras, autoridades portuarias, agentes aduanales, transportistas, instituciones y organismos vinculados con la actividad portuaria (APIVER, 2013).

Entre los prestadores de servicios se encuentran más de 20 empresas cesionarias (Tabla 2.4), 31 prestadores de servicio portuarios y 61 prestadores de servicios conexos, quienes atienden las necesidades generales de las mercancías, embarcaciones y de la operación misma del puerto. En cuanto a la comunidad portuaria, incluye 20 agencias navieras quienes representan a 18 líneas que ofrecen servicios a Europa, Norte de Estados Unidos, Canadá, Centro y Sudamérica, entre otros; 300 agentes aduanales y 2 servicios de transporte ferroviarios (APIVER, 2018a).

Actualmente este sitio cuenta con 18 posiciones de atraque destinadas al manejo de carga comercial (APIVER, 2011; 2013).

Los objetivos planteados en el Programa Maestro de Desarrollo Portuario de Veracruz 2011-2016, contemplan la optimización de su infraestructura, proyecto que incluye en la primera etapa la ampliación del puerto y en la segunda etapa el aumento de 35 posiciones de atraque, lo que lo llevaría a cuadruplicar su carga comercial de 23 a 95 millones de toneladas, convirtiéndolo así en el puerto más importante de México. Aunado a esto el 24 de abril del 2014, el Diario Oficial de la Federación (DOF) publicó la modificación de la delimitación del Recinto Portuario de Veracruz, de una superficie de 569.56 ha a 7,722.86 ha, en el Título de concesión del 1° de febrero de 1994 y en el Acuerdo de delimitación y determinación del Recinto Portuario de Veracruz (APIVER, 2013; 2017).

Tabla 4. Empresas cesionarias ubicadas en el Recinto Portuario de Veracruz

<i>No.</i>	<i>Logo</i>	<i>Nombre de la empresa</i>
1		Internacional de Contenedores Asociados de Veracruz, S.A. de C.V.
2		Cargill de México, S.A. de C.V.
3		Talleres Navales del Golfo, S.A. de C.V.
4		Corporación Integral del Comercio Exterior, S.A. de C.V.
5		Terminal Marítima de Veracruz, S.A. de C.V.
6		SSA México, S.A. de C.V.
7		Servicios Especiales Portuarios, S.A. de C.V.
8		Corporación Portuaria de Veracruz, S.A. de C.V.
9		Reparación Integral de Contenedores, S.A. de C.V.
10		Vopak México, S.A. de C.V.
11		Almacenadora Golmex, S.A. de C.V.
12		Excellence Sea & Land Logistics, S.A. de C.V.
13		CIF Almacenes y Servicios, S.A. de C.V.

14		PEMEX Refinación.
15		Servicios, Maniobras y Almacenamientos de Veracruz, S.A. de C.V.
16		Cementos APASCO, S.A. de C.V.
17		Fire Late, S.A. de C.V.
18		Comunicaciones NEXTEL de México, S.A. de C.V.
19		Multimodos, S.C.
20		Puertos Especializados Trasnacionales Petra, S.A. de C.V.
21		Terminales de Cargas Especializadas, S.A. de C.V.
22		ESJ Renovable III, S. de R.L. de C.V.
23		Opever, S.A. de C.V.

Fuente: APIVER, 2018a.

2.6.3 Tipos de carga manejadas del Recinto Portuario de Veracruz

Actualmente el Puerto de Veracruz es uno de los cuatro principales puertos del SPN y el único que no se especializa en un tipo de carga particular, sino que maneja diversos tipos de carga comercial conteniendo los segmentos de carga: general contenerizada y suelta, agrícola, mineral, fluidos no petroleros y, petróleo y derivados (APIVER, 2013; 2017).

En cuanto al tráfico, el Puerto de Veracruz está posicionado en tercer lugar en el SPN, sin considerar el petróleo y sus derivados; y en la quinta posición considerando este tipo de carga (APIVER, 2017).

Los tipos de carga manejados en el Recinto Portuario de Veracruz se describen a continuación:

La *carga general contenerizada* es un tipo de carga unitizada que transporta contenedores de diferentes dimensiones y características, esto incluye principalmente la exportación de partes automotrices, de ensamble y productos químicos. Esta carga opera con dos sistemas, el primero es denominado especializado y consiste en utilizar grúas pórtico portacontenedores en muelle y grúas pórtico portacontenedores de patio tipo RTG con un sistema de traslación directo por medio de tractocamión. Las grúas pórtico portacontenedores se aprecian en la Figura 2.11 (APIVER, 2017; APIVER, 2013).

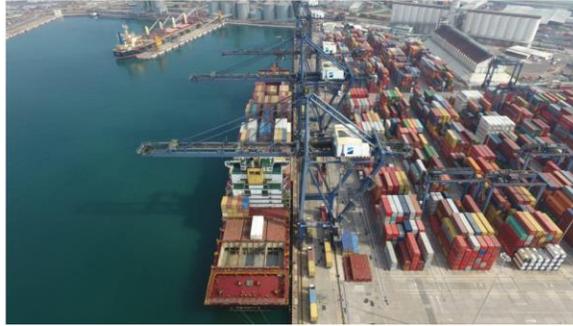


Figura 11. Grúas pórtico portacontenedores en el Recinto Portuario de Veracruz

Fuente: APIVER, 2018b.

En el segmento de *carga general suelta* se tienen productos de importación como: el acero, vehículos, aluminio, cobre y maquinaria, además mercancía de exportación como: tubos y vehículos. En la Figura 2.12 y 2.13 se observan las maniobras importación y exportación de vehículos en el Recinto Portuario (APIVER, 2017; 2013).

La *carga agrícola*, incluye cuatro productos importantes de importación: maíz, trigo, soya y sorgo, y la exportación intermitente de azúcar. Esta carga opera con tres sistemas: el mecanizado basado en equipos de succión, bandas transportadoras y silos de almacenamiento; el mixto que integra grúas de buque, bandas transportadoras y silos de almacenamiento; y el convencional directo, en donde la grúas de buque son descargadas directamente en unidades de transporte terrestre, por lo que éstas no son almacenadas en el puerto. Los silos de almacenamiento de maíz se pueden observar en la Figura 2.14 (APIVER, 2013).



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**12. Importación de vehículos**

Fuente: Carranza, 2018.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**13. Exportación de vehículos**

Fuente: Carranza, 2018.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**14. Silos de almacenamiento de maíz en el Recinto Portuario de Veracruz**

Fuente: Morales, 2016.

La *carga granel mineral* está compuesta principalmente por minerales de importación como: pet-coke, fertilizantes, chatarra, arrabio de fierro, briqueta de fierro y ferrosilicomagnesio. En cuanto a la exportación, ha sido muy esporádica y los volúmenes no se consideran significativos. La carga de granel mineral es operada con un sistema convencional directo o indirecto; es directo cuando el producto es descargado en el camión para ser retirado del recinto e indirecto cuando la mercancía se traslada del muelle a patios o almacenes, para ello se utilizan grúas del buque con almejas o pulpos y la traslación se realiza por medio de camiones (Figura 2.15) (APIVER, 2013).



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**15. Descarga de granel mineral**

Fuente: Administración Portuaria Integral Lázaro Cárdenas, 2017.

En los *fluidos no petroleros*, se incluye principalmente la importación de diversos aceites vegetales y alquil benceno, fuera de ellos existen diferentes productos con volúmenes poco significativos. En el caso de la exportación se manejan volúmenes variados de melaza. Los productos incluidos en esta categoría son manipulados en su totalidad por medio de sistemas de bombeo de buque a tanque de almacenamiento y el traslado es realizado a través de tuberías (APIVER, 2013).

En el caso de *petróleo y derivados*, en la Terminal Marítima de PEMEX se realiza la recepción de los petrolíferos: Diésel y, gasolina regular y premium (Figura 2.16). Además, dentro de las instalaciones de APIVER se cuenta con el servicio de almacenamiento: el “Centro Embarcador Bajos la Gallega” (APIVER, 2013).



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**16. Buquetanque atracado en la Terminal Marítima del PEMEX, 2019**

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Identificación y caracterización de los peligros

3.1.1 Experiencias en desastres

A partir de experiencias en desastres de otros sitios, se realizó un análisis histórico de accidentes químicos asociados a peligros hidrometeorológicos, para determinar el peligro que lo origina y las condiciones de viento-oleaje que han causado afectaciones en tanques de almacenamiento similares a los del área de estudio, considerando las características del diseño de éstos.

Del periodo 1970 al 2018 se identificaron y compilaron datos de 100 accidentes en tanques de almacenamiento, que se presentaron con las condiciones de los eventos evaluados a nivel internacional. Esta información se obtuvo de bases de datos de accidentes, registros de accidentes e incidentes, referencias de artículos e información meteorológica y oceanográfica de la fecha del evento.

La información se clasificó en una tabla con once columnas, donde se capturó: el número de accidente, la fuente de donde se obtuvo la información, fecha, lugar del evento, las características del sistema afectado, la sustancia implicada en la emergencia, una breve descripción del suceso, el evento hidrometeorológico causante, las condiciones de peligro observadas, el o los accidentes provocados y observaciones.

Con la información anterior también fue posible determinar las principales emergencias originadas por peligro hidrometeorológico, lo cual se representó en forma gráfica.

3.1.2 Información de reanálisis

A partir de los datos de reanálisis de condiciones meteorológicas y oceanográficas históricas del lugar, registros in-situ e información hidrometeorológica del área de estudio, se estimó la probabilidad de ocurrencia de peligro hidrometeorológico en el Puerto de Veracruz.

La información de reanálisis obtenida del Wavewatch III, el cual es un **modelo de tercera generación** desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration / National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP). Este modelo resuelve la ecuación de balance de densidad de acción de fase espectral aleatoria, para un espectro completo de número de olas en determinada dirección. La suposición implícita de esta ecuación es que las propiedades del medio (profundidad del agua y corriente), así como el campo de la ola, varían en escalas de tiempo y espacio que son mucho más grandes que las escalas de variación de una sola ola (EMC, 2018).

El modelo Wavewatch III es ejecutado mensualmente por la Environmental Modelling Center (EMC) y cuenta con información histórica de 9 mallas globales y regionales del periodo de febrero del 2005 a mayo del 2019 (EMC, 2018). La malla empleada en el modelo

para obtener los datos de interés corresponde a la *NW Atlantic 10 min*, la cual cuenta con las características mencionadas en la Tabla 3.1 y fue desarrollada utilizando la batimetría **ETOPO-1**, junto con v1.10 de la Base de datos Global Self-Consistent Hierarchical High Resolution Shoreline (GSHHS).

Tabla 3.1. Características de la malla empleada para generar la información meteorológica y oceanográfica

<i>Nombre</i>	<i>ID</i>	<i>Nx</i>	<i>Ny</i>	<i>dx</i>	<i>dy</i>	<i>Lon0</i>	<i>Lat0</i>
NW Atlantic 10 min	At_10m	301	331	1/6	1/6	260	0.0

Fuente: EMC, 2018.

Donde:

Nx, *Ny*: Número de puntos en la malla tanto en la horizontal como en la vertical.

dx, *dy*: Distancia en grados (resolución) de punto a punto en la malla.

Lon, *Lat*: Coordenadas de referencia de la malla.

El mapa batimétrico de la malla NW Atlantic 10 min se muestra en la Figura 3.1, en donde la paleta de colores representa la profundidad del Atlántico noroeste en metros.

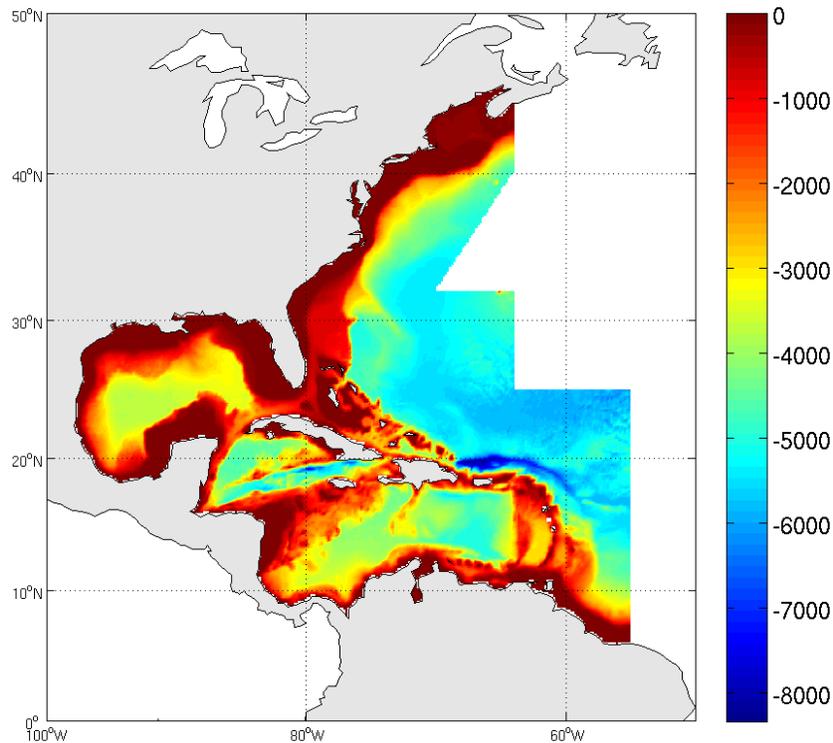


Figura 3.1. Mapa batimétrico de la malla NW Atlantic 10 min, profundidad en metros

Fuente: EMC, 2018.

En cuanto a la información de entrada del modelo, los datos de viento empleados son obtenidos del Global Forecast System (GFS). Los campos de viento utilizados son vientos a 10 metros con una resolución de 1/2 grado e intervalos de 3 horas. Por otra parte, las concentraciones de hielo se obtienen a partir de la concentración de hielo marino pasivo por microondas del Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) y del Special Sensor Microwave Imagers (SSM/I), utilizando el algoritmo de alta resolución NCEP basado en el Equipo2 de la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Los campos de hielo utilizados son diarios con una resolución de 1/12 grados.

Las salidas del modelo se presentan en archivos clasificados por año y mes en formato *.grb2, con datos cada tres horas. En la Tabla 3.2 se muestra los nombres de los archivos *.grb2 y la información contenida en cada uno de ellos.

Tabla 3.2. Archivos de salida del modelo Wavewatch III

<i>Nombre del archivo</i>	<i>Descripción</i>
multi_1.at_10m.wind.aaaamm.grb2	Componente U del viento de superficie, componente V del viento de entrada (m/s). El vector descrito por estas componentes muestra la dirección en que sopla el viento (convención oceanográfica).
multi_1.at_10m.hs.aaaamm.grb2	Altura significativa de las olas, combinación de las de viento y las de mar de fondo (m).
multi_1.at_10m.dp.aaaamm.grb2	Dirección de la onda primaria (grados verdaderos, es decir, 0 grados provenientes del norte; 90 grados provenientes del este).
multi_1.at_10m.tp.aaaamm.grb2	Periodo medio de onda primaria (s).

Fuente: EMC, 2018.

Donde:

aaaa: Simboliza el año al que pertenecen los datos del archivo.

mm: Simboliza el mes al que pertenecen los datos del archivo.

Para obtener la información meteorológica y oceanográfica de interés, se procedió a descargar los archivos *.grb2 del periodo disponible (febrero 2005 – mayo 2019) y a convertirlos en formato *.txt de la siguiente manera (Escudero-Castillo, 2019).

Se buscó la coordenada más cercana al sitio de estudio en la malla, para lo cual se descendieron en la carpeta donde se tenían los archivos *.grb2 el ejecutable *wgrib2.exe*, y los archivos *.dll

(cyggcc_s-1.dll, cyggfortran-3.dll, cyggomp-1.dll y cygwin1.dll) que se encuentran disponibles en la página web de la NOAA en el enlace:

https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd51we/wgrib2/Windows_7/

Posterior a ello, se ejecutó el programa *wgrib2.exe* en la ventana de comandos de Windows y se tecleó el comando que permite extraer las distintas mallas cada 3 h de la hipermatriz que contiene cada archivo por mes; por ejemplo, para el archivo *multi_1.at_10m.hs.200502.grb2*, se colocó el siguiente código:

```
wgrib2 multi_1.at_10m.hs.200502.grb2 -AAIG
```

Una vez realizado lo anterior, se abrió una de las mallas resultantes en el programa Surfer 15, para ubicar la coordenada más cercana al “Centro Embarcador Bajos la Gallega” en donde se tienen datos, siendo ésta a 19.1667 latitud Norte (N) y -96 longitud Oeste (O), la cual se ubica a 13.93 km del sitio (Figura 3.4). Con esta información se procedió a extraer solo los datos de la coordenada en particular; siguiendo el ejemplo anterior el comando empleado fue:

```
wgrib2 multi_1.at_10m.hs.200502.grb2 -s -undefine out-box -96:-96 19.1667:19.1667 -csv
hs_200502.txt
```

Como resultado se obtuvo un archivo en formato *.txt con el nombre *hs_200502.txt* que contenía la información de altura de ola significativa, correspondiente a febrero del año 2005, este último paso se automatizó creando un archivo de texto que incluía los comandos correspondientes para cada fecha (Figura 3.2), después se cambió la extensión a *.bat y se ejecutó en la ventana de comandos donde se tenían los archivos *.grb2.

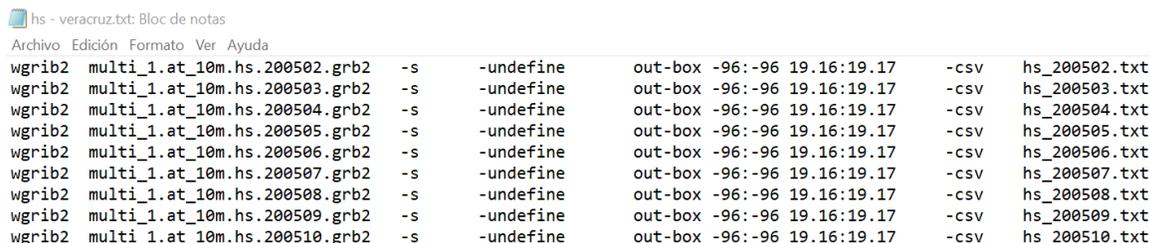


Figura 18. Archivo de texto empleado para extraer de forma automatizada la información de altura de ola de la coordenada de interés

Después de ello, se agruparon los archivos *.txt en uno solo, por medio de un ejecutable y un fichero que contenía el nombre de cada uno de ellos (Figura 3.3).

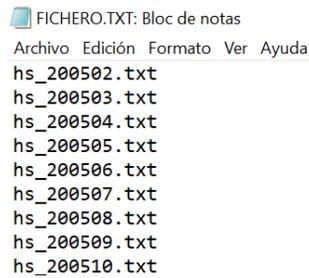


Figura 19. Fichero empelado para agrupar la información por variable

Se efectuaron los mismos pasos con cada una de las variables de interés (hs, dp, tp y wind) y para las variables de oleaje se procedió a verificar que se tuvieran las mismas fechas con datos, por medio de filtros en Excel.

Una vez corroborado lo anterior se obtuvo la información de oleaje (hs, dp y tp) en un solo archivo, a partir del cual se realizó un análisis de las condiciones del sitio, representado por un histograma de altura de ola significativa, rosas de oleaje y un gráfico de distribución de altura de ola significativa y periodo de ola con estimación de densidad de Kernel.

En cuanto a la información de viento, se calculó su magnitud y dirección por medio de ecuaciones, tal como indica Stull (2017); y se continuó con su análisis para la zona de estudio, a partir de estadísticos descriptivos, un análisis de frecuencias e histograma de magnitud de viento, además de rosas de viento general y mensuales correspondientes al periodo de febrero 2005 a mayo 2019.

Con la información de viento y oleaje del Puerto de Veracruz, se determinó la relación que tienen ambas variables en el sitio, por medio de un gráfico de dispersión.

Es importante resaltar que la EMC valida la información generada a través del modelo Wavewatch III con los datos obtenidos en boyas de la NOAA, por lo cual, en el **ANEXO I** apartado 1.1, se colocó un ejemplo de esta validación tomando como base los registros de la boya 42055 ubicada en la Bahía de Campeche.

3.1.3 Registros in-situ

Se identificaron las estaciones hidrometeorológicas cercanas al sitio en un radio de 10 km y se valoró la cantidad, calidad, acceso y cercanía de los datos registrados, de acuerdo con ello se decidió emplear la información recabada por la estación meteorológica APIVER-UNAM, la cual se encuentra ubicada en el área de estudio en las coordenadas: 19°12'53" latitud N y 96°09'43" longitud O (Figura 3.4).

Los datos meteorológicos de la estación APIVER-UNAM se exhiben y registran en la consola del equipo Davis Instrument Vantage Pro2 y se transmiten al software WeatherLink.

Los datos in-situ evaluados corresponden a las velocidades de viento máximas registradas (rachas de viento) durante periodos de 10 min, de mayo del 2017 a septiembre del 2019. Con los cuales se realizó un análisis de frecuencias e histograma, para caracterizar las condiciones extremas en el área de estudio.

Adicionalmente se consultó información hidrometeorológica en el Atlas de Riesgo Nacional y Estatal proporcionados por el CENAPRED, así como la información hidrometeorológica del área de estudio proporcionada por otras instituciones.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..20. **Datos hidrometeorológicos del Puerto de Veracruz**

Fuente: Google-Earth-Pro, 2019a.

3.2 Elementos expuestos y vulnerabilidad

Se realizaron dos visitas al “Centro Embarcador Bajos la Gallega” para recabar información técnica empleando la Lista de Verificación mostrada en el ANEXO III. Esto permitió conocer las operaciones que se realizan en el servicio de almacenamiento de combustibles y las características de los elementos expuestos, entendidos en este caso como los tanques ubicados en el sitio. Los datos relevantes en la caracterización de los tanques se muestran en la Figura 3.5.

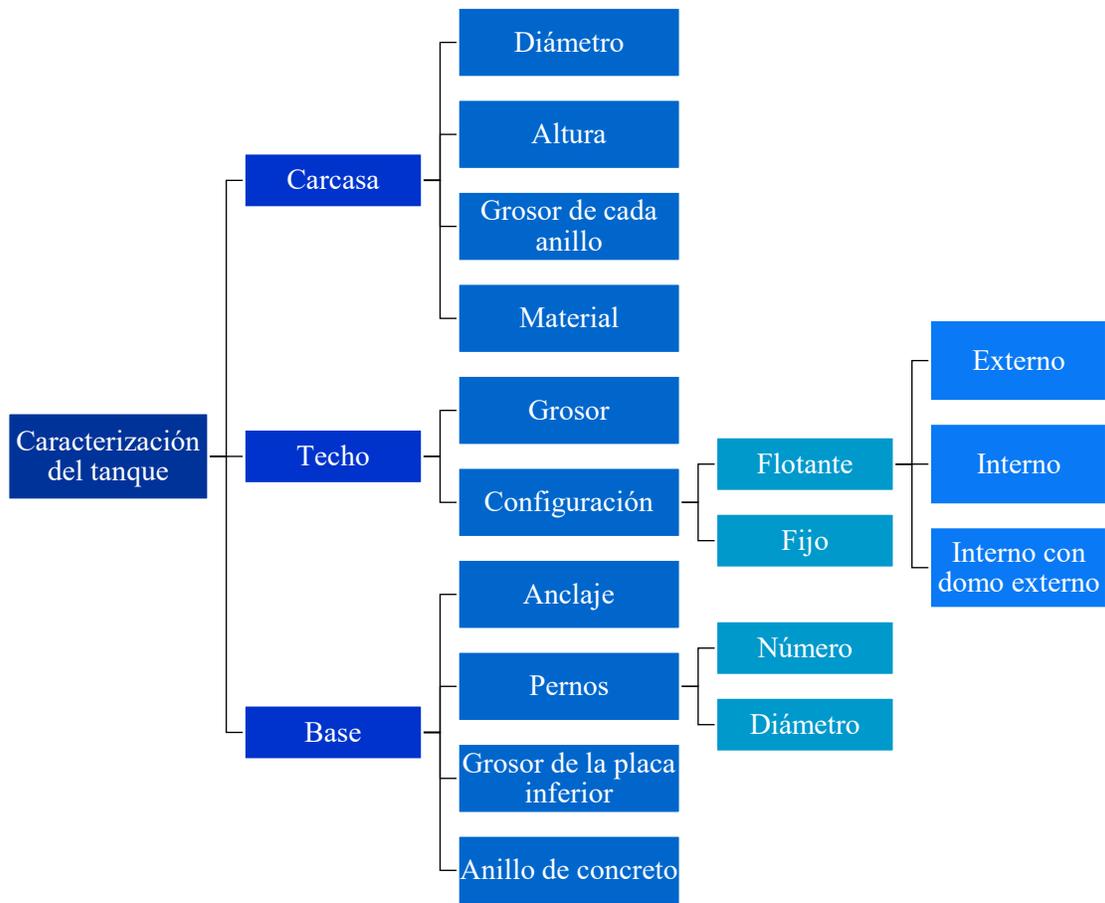


Figura 3.5. Caracterización de tanques

Fuente: Ramírez-Olivar, et al., 2020; 2019; Zuluaga-Mayorga, et al., 2019.

La información recabada se empleó para evaluar la vulnerabilidad de los tanques con almacenamiento de combustibles en caso de un evento hidrometeorológico extremo. Para ello, se consideró la vulnerabilidad en tres aspectos: vulnerabilidad estructural, funcional y química.

Debido a que no existen reglas generalmente acordadas para la construcción de factores de vulnerabilidad (Tate, 2012; Neri y Magaña, 2015), se calculó el Índice de Vulnerabilidad

(IV) con la ecuación del Índice de Vulnerabilidad Costero adaptando las variables de interés para este estudio, ya que este método permite calificar variables independientes de forma equiparable (Hammar-Klose y Thieler, 2001).

De acuerdo con lo anterior, el IV se calculó por medio de la raíz cuadrada del producto de los valores otorgados a los factores de vulnerabilidad entre el total de las variables evaluadas. Tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$IV = \sqrt{\frac{F1 * F2 * F3 * F4 * F5 * F6 * F7}{n}}$$

Donde:

IV= Índice de Vulnerabilidad.

F1= Factor de ubicación.

F2= Factor de capacidad resistiva.

F3= Factor de estado técnico.

F4= Factor de preparación y respuesta de emergencias.

F5= Factor físico.

F6= Factor salud.

F7= Factor medio ambiente.

n= número de variables.

Los factores 1, 2 y 3 representan a la vulnerabilidad estructural; el factor 4 a la funcional y los factores 5, 6 y 7 a la química. Para su valoración se seleccionaron las variables que los representaran, estas variables se eligieron por su relevancia en desastres tecnológicos causados por fenómenos hidrometeorológicos y se ponderaron en cinco categorías de vulnerabilidad: muy baja (1), baja (2), moderada (3), alta (4) y muy alta (5).

Los criterios empleados en la evaluación del IV son los siguientes y se complementan con la información de la Tabla 3.5.

3.2.1 Vulnerabilidad estructural

Se hizo referencia a las características físicas de los elementos expuestos (Grupo de Evaluación de Riesgo de la Agencia de Medio Ambiente, 2014), por lo que se analizó su ubicación (F1), capacidad resistiva (F2) y estado técnico (F3).

El *factor de ubicación (F1)* incluyó a las variables que permitieran describir las características costeras del entorno y se representó por la siguiente ecuación:

$$F1 = V1 * V2 * V3 * V4$$

- *Elevación (V1)*: se tomó la elevación de los elementos expuestos con respecto al nivel de mar, por medio de fotografías satelitales obtenidas de Google-Earth-Pro (Koroglu, et al., 2019; Mclaughlin y Cooper, 2010; Borges-Coelho, 2005; Gornitz, 1991).
- *Orientación (V2)*: se propusieron valores de acuerdo con las características del terreno, para ello se consideró el porcentaje del perímetro sin obstrucciones de viento-oleaje de una circunferencia de 1100 m con centro en las coordenadas 19°12'40.80" N y 96° 7'26.27" O.

Las obstrucciones de viento-oleaje se observaron mediante fotografías satelitales obtenidas de Google-Earth-Pro. Para su cálculo se empleó la siguiente ecuación:

$$V2 = \sum \text{Valor} * \% \text{ perimetro sin proteger}$$

- *Distancia de la línea de costa (V3)*: se consideró la distancia de la línea de costa con respecto a los elementos expuestos del área de estudio, la información se obtuvo de fotografías satelitales de Google Earth Pro (Borges-Coelho, 2005; Godoy, et al., 2014).
- *Geomorfología (V4)*: la energía de las olas está relacionada con la capacidad de erosión, donde el relieve y los movimientos verticales de la tierra se consideran indicadores de riesgo de inundación; por lo cual en esta variable se evaluó la geomorfología de la costa frente al “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, a través de la ponderación de diferentes geomorfologías costeras (Pantusa, et al., 2018; Koroglu, et al., 2019) y empleando la siguiente ecuación:

$$V4 = \sum \text{Valor} * \% \text{ longitud en la línea de costa}$$

En cuanto al *factor de capacidad resistiva (F2)*, se caracterizaron las variables de diseño y operación que hacen susceptibles estructuralmente a los tanques de almacenamiento frente a fenómenos hidrometeorológicos, mediante la siguiente ecuación:

$$F2 = V5 * V6 * V7 * V8 * V9$$

- *Anclaje (V5)*: los tanques con **anclaje** en sus cimientos son menos vulnerables que los que no cuentan con ello (Bernier y Padgett, 2019; Godoy, 2007).
- *Cantidad almacenada promedio (V6)*: los intervalos seleccionados para cada categoría de vulnerabilidad en esta variable, se basaron en información de escenarios históricos de accidentes en tanques de almacenamiento (ANEXO II), siendo más vulnerables aquellos con almacenamiento por debajo del 15% (Ramírez-Oliver, et al., 2020; 2019; Necci, Girgin y Krausmann, 2018; Antonioni, et al., 2015; Zhao, y Lin, 2014; Landucci, et al., 2014; 2012; Godoy, 2007; Base de datos ARIA, 2019).

- *Anillos de refuerzo (V7)*: los tanques con anillos de refuerzo resisten más la presión ejercida por el viento-oleaje en comparación con aquellos que carecen de esta característica (Aileni, Prasanna y Jain, 2017; Godoy, 2007).
- *Densidad de la sustancia almacenada (V8)*: se tomó como referencia la densidad de algunas sustancias, siendo más vulnerables aquellas con menor densidad (NOAA y EPA, 2018; Landucci, et al., 2012).
- *Presión crítica del tanque (V9)*: se refiere a la presión de resistencia máxima del material del tanque. Los intervalos seleccionados para cada categoría en esta variable, se basaron en los percentiles de los datos de la presión crítica de los tanques evaluados en el caso de estudio de Landucci, et al., 2012; en donde el percentil $\geq 95\%$ se clasificó como “muy baja”, $< 95\%$ a $\geq 75\%$ “baja”, $< 75\%$ a $\geq 50\%$ “moderada”, $< 50\%$ a $\geq 25\%$ “alta” y $< 25\%$ “muy alta”.

Para poder asignar la categoría de vulnerabilidad a los tanques evaluados en este estudio, se consideró la siguiente ecuación:

$$P_{cr} = \frac{2Et}{D} \left\{ \frac{1}{\left((n^2 - 1) \left[1 + \left(\frac{2nH}{\pi D} \right)^2 \right]^2 \right)} + \frac{t^2}{3(1 - \nu^2)D^2} \left[n^2 - 1 + \frac{2n^2 - 1 - \nu}{\left(\frac{2nH}{\pi D} \right)^2 - 1} \right] \right\}$$

Donde:

P_{cr} = Presión crítica, Pa.

E = Módulo elástico de acero de construcción, 2.1×10^{11} Pa.

t = Grosor de la envolvente o carcasa, m.

D = Diámetro del tanque, m.

n = Parámetro para minimizar el cálculo de la presión crítica, $n \geq \left(\frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{D}{H} \right)$, $n \geq 2$.

H = Altura del tanque, m.

ν = Relación de Poisson de acero para la construcción, 0.3.

Sin embargo, la ecuación anterior se puede simplificar por medio de una correlación lineal en función de la capacidad del tanque; esta ecuación a pesar de llegar a tener hasta un 40% de error en su cálculo en tanques pequeños ($< 5000 \text{ m}^3$), es viable emplearla ya que este porcentaje subestima el valor de P_{cr} , lo que lleva a una evaluación del lado seguro. Siendo así, para el cálculo de V9 se empleó la ecuación simplificada:

$$P_{cr} = k_1 C + k_2$$

Donde:

P_{cr} = Presión crítica, Pa.

$k_1 = -0.199$

$k_2 = 6950$

C = Capacidad del tanque, m^3 .

(Ramírez-Olivar, et al., 2020; Antonioni, et al., 2015; Landucci, et al., 2014; 2012).

Para el *factor de estado técnico (F3)* se consideraron los mecanismos de daño de tanques de almacenamiento, puesto que es importante inspeccionar si algún cambio ha ocurrido desde su condición física inicial (Al-Mithin, et al., 2011; API, 2003; 2005).

En este caso se tomó en cuenta el grado de **corrosión (V10)** en tanques pintados ya que se trata de un ambiente costero con características que lo promueven.

- *Grado de corrosión (V10)*: la evaluación se realizó de forma visual como se indica en el punto 8.1.3 de la NRF-053-PEMEX-2005 (PEMEX, 2006).

$$F3 = V10$$

3.2.2 Vulnerabilidad funcional

Se tomaron en cuenta los elementos que permiten el funcionamiento seguro de la instalación donde se encuentran los tanques de almacenamiento (Grupo de Evaluación de Riesgo de la Agencia de Medio Ambiente, 2014), sobre todo aquellos relacionados con la preparación y respuesta de emergencias (F4).

Para el cálculo del *factor de preparación y respuesta de emergencias (F4)* se consideró el cumplimiento de las siguientes variables:

$$F4 = V11 * V12 * V13 * V14 * V15 * V16 * V17 * V18 * V19$$

- *Sistemas de monitoreo y control (V11)*: se evaluó si la instalación cumple con los criterios descritos en el apartado 8.3.13 de la norma NOM-006-ASEA-2017 (DOF, 2018).
- *Alcantarillado (V12)*: esta variable se evaluó conforme a su cumplimiento con el apartado 8.3.3 de la norma NOM-006-ASEA-2017 (DOF, 2018).
- *Sistemas contra incendios (V13)*: se verificó el cumplimiento del apartado 8.3.15 de la norma NOM-006-ASEA-2017 (DOF, 2018).
- *Fuentes de alimentación eléctrica de emergencia (V14)*: se evaluó el cumplimiento con el apartado 8.7.1 y 8.13.1 de la NRF-048-PEMEX-2010 (PEMEX, 2014).
- *Sistemas de alerta hidrometeorológica (V15)*: se identificó si el servicio de almacenamiento “Centro Embarcador Bajos la Gallega” planea sus actividades contemplando el monitoreo y pronóstico de intensidad de viento y oleaje.

- *Capacitaciones al personal (VI6)*: se identificó si el personal cuenta con capacitación de emergencias tecnológicas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos.
- *Simulacros (VI7)*: se identificó si se realizan simulacros donde se contemplen emergencias tecnológicas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos.
- *Planes de emergencia (VI8)*: se identificó si el plan de atención a emergencias contempla aquellas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos.
- *Servicios de bomberos (VI9)*: se evaluó la accesibilidad a servicios de bomberos.

3.2.3 Vulnerabilidad química

Como se ha mostrado en múltiples evaluaciones de riesgo en zonas costeras una variable importante a considerar en los cálculos de vulnerabilidad es el uso de suelo (Karymbalis, et al., 2012; McLaughlin y Cooper, 2010), como este estudio se dirige especialmente a una instalación con manejo de sustancias peligrosas, es importante ponderar la vulnerabilidad que implicarán las sustancias almacenadas en los elementos expuestos (tanques) dependiendo de sus propiedades químicas y las consecuencias que se podrían tener ante fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Para esto se consideraron los siguientes factores: físico (F5), salud (F6) y medio ambiente (F7). Los criterios para evaluar estos factores son los indicados en el “Sistema Globalmente Armonizado (SGA) de clasificación y etiquetado de productos químicos” también llamado “Libro púrpura” (ONU, 2017; Antonioni, et al., 2015).

El *factor físico (F5)* se evaluó por medio de los criterios descritos en la *Parte 2* del “Libro púrpura” y se determinó que las sustancias almacenadas (gasolina y Diésel) son “*líquidos inflamables*”, ya que “*cuentan con un punto de inflamación no superior a los 93°C*” (ONU, 2017), por lo tanto, su cálculo quedó en función de su punto de inflamación.

$$F5 = V20$$

- *Líquidos inflamables (V20)*: de acuerdo con la ONU (2017) los criterios para clasificarlos son los mostrados en la Tabla 3.3, los cuales se adecuaron a las categorías de vulnerabilidad antes mencionadas: “muy baja”, “baja”, “moderada”, “alta” y “muy alta”.

Tabla 3.3. Criterios de clasificación para líquidos inflamables

<i>Categoría</i>	<i>Criterios</i>
1	Punto de inflamación < 23 °C y punto inicial de ebullición ≤ 35 °C
2	Punto de inflamación < 23 °C y punto inicial de ebullición > 35 °C
3	Punto de inflamación ≥ 23 °C y ≤ 60 °C
4	Punto de inflamación > 60 °C y ≤ 93°C

Fuente: ONU, 2017.

El *factor salud (F6)* se evaluó por medio de los criterios descritos en la *Parte 3* del “Libro púrpura” por lo que las variables evaluadas fueron: toxicidad aguda (V21), corrosión/irritación cutánea (V22), mutagenicidad en células germinales (V23), carcinogenicidad (V24), toxicidad para la reproducción (V25), toxicidad específica en organos diana por exposición única (STOT-SE) (V26), toxicidad específica en organos diana por exposiciones repetidas (STOT-RE) (V27) y peligro por aspiración (V28).

$$F6 = V21 * V22 * V23 * V24 * V25 * V26 * V27 * V28$$

- *Toxicidad aguda (V21)*: “se refiere a los efectos nocivos para la salud (es decir, letales) después de una exposición única o de corta duración a una sustancia o mezcla, por vía oral, cutánea o por inhalación” (ONU, 2017). Esta variable se evaluó mediante el promedio de los valores otorgados a la toxicidad aguda cutánea y a la toxicidad aguda por inhalación, los cuales se asignaron tomando en cuenta los criterios descritos en el capítulo 3.1 del “Libro púrpura”.
- *Corrosión/irritación cutánea (V22)*: “por corrosión cutánea se entiende la formación de una lesión irreversible de la piel tal como necrosis visible a través de la epidermis hasta la dermis, tras la exposición de una sustancia o mezcla” y por “irritación cutánea, la formación de una lesión reversible de la piel tras la exposición a una sustancia o mezcla” (ONU, 2017). La evaluación de esta variable consideró los criterios descritos en el capítulo 3.2 del “Libro púrpura”.
- *Mutagenicidad en células germinales (V23)*: se refiere a “las mutaciones genéticas hereditarias, incluidas las aberraciones cromosómicas estructurales y numéricas hereditarias en las células germinales que ocurren tras la exposición a una sustancia o mezcla” (ONU, 2017). Los criterios de evaluación fueron los descritos en el capítulo 3.5 del “Libro púrpura”.
- *Carcinogenicidad (V24)*: se entiende por “la inducción de cáncer o el aumento de su incidencia, tras la exposición a una sustancia o mezcla” (ONU, 2017). Para este caso los criterios que permitieron asignar la categoría de vulnerabilidad son los descritos en el capítulo 3.6 del “Libro púrpura”.
- *Toxicidad para la reproducción (V25)*: se entiende por “los efectos adversos sobre la función sexual y la fertilidad de los hombres y mujeres adultos, y los efectos adversos sobre el desarrollo de los descendientes, tras la exposición a una sustancia o mezcla” (ONU, 2017). Los criterios para clasificar esta variable se describen en el capítulo 3.7 del “Libro púrpura”.
- *Toxicidad específica en organos diana por exposición única (STOT-SE) (V26)*: se entiende por “los efectos tóxicos no letales y específicos de órganos diana que ocurren

tras una exposición única a una sustancia o mezcla” (ONU, 2017). Los criterios para clasificar STOT-SE se describen en el capítulo 3.8 del “Libro púrpura”.

- *Toxicidad específica en órganos diana por exposiciones repetidas (STOT-RE) (V27): “son los efectos tóxicos específicos de órganos diana que ocurren tras exposiciones repetidas a una sustancia o mezcla* (ONU, 2017). Los criterios considerados en esta variable son los del capítulo 3.9 del “Libro púrpura”.
- *Peligro por aspiración (V28): “son los efectos graves agudos, tales como neumonía química, lesiones pulmonares e incluso la muerte, que ocurren tras la aspiración de una sustancia o mezcla”* (ONU, 2017). Su evaluación se realizó mediante los criterios del capítulo 3.10 del “Libro púrpura”.

El factor medio ambiente (F7) se evaluó por medio de los criterios descritos en la Parte 4 del “Libro púrpura” considerando a la variable de toxicidad acuática crónica (V29).

- *Toxicidad acuática crónica (V29): “es la propiedad intrínseca de una sustancia de provocar efectos nocivos en los organismos acuáticos durante exposiciones en el medio acuático determinadas en relación con el ciclo de vida del organismo”* (ONU, 2017).

$$F7 = V29$$

Una vez se tuvieron los IV para cada elemento expuesto se calcularon las categorías de vulnerabilidad por medio de los percentiles 25%, 50% y 75% como indican Pantusa et al. (2018) y Koroglu et al. (2019), como se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Categorías de vulnerabilidad

<i>Categoría de vulnerabilidad</i>	<i>Intervalos de los percentiles IV</i>
Baja	$IV \leq 25\%$
Moderada	$25\% > IV \leq 50\%$
Alta	$50\% > IV \leq 75\%$
Muy alta	$IV > 75\%$

Finalmente se identificó a qué categoría de vulnerabilidad pertenece cada uno de los sistemas de almacenamiento evaluados.

Tabla 9. Criterios de evaluación de los factores de vulnerabilidad

Factor	Variable	Valor				
		Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
		1	2	3	4	5
F1: Ubicación	V1: Elevación (m)	> 30	> 20	> 10	> 5	≤ 5
			≤ 30	≤ 20	≤ 10	
	V2: Orientación (°)	≥ 225 SO	≥ 135 SE	—	≥ 315 NO	≥ 45 NE
		< 315 NO	< 225 SO		< 45 NE	< 135 SE
	V3: Distancia de la línea de costa (m)	> 1000	> 200	> 50	> 20	≤ 20
≤ 1000			≤ 200	≤ 50		
V4: Geomorfología	Rocas, costas con acantilados altos (≥ 40 m).	Acantilados medios (≥ 20 < 40 m), costas con muescas.	Acantilados bajos (≥ 10 < 20 m), llanuras aluviales.	Playas de adoquines, estuarios, lagunas.	Playas de barrera, playas de arena, salinas, marismas, deltas, arrecifes de coral.	
F2: Capacidad resistiva	V5: Anclaje	Con anclaje al suelo	—	—	—	Sin anclaje
	V6: Cantidad almacenada promedio (%)	≤ 75	≤ 25	≤ 15	≤ 10	≤ 5
		> 25	> 15	> 10	> 5	

	<i>V7: Anillos de refuerzo</i>	Con anillos de refuerzo	—	—	—	Sin anillos de refuerzo
	<i>V8: Densidad de la sustancia almacenada (g/cm³)</i>	Agua	Petróleo	Diésel	Gasolina	Solventes
		0.997	0.950	0.910	0.730	0.650
	<i>V9: Presión crítica del tanque (Pa)</i>	≥ 17276	< 17276	< 13370	< 10770	< 8159
≥ 13370			≥ 10770	≥ 8159		
<i>F3: Estado técnico</i>	<i>V10: Grado de corrosión</i>	—	E	F	G	H
		Sistema con pintura intacta.	Sistema con pintura casi intacta.	Sistema con pintura envejecida, mayor parte intacta.	Sistema con pintura fuertemente intemperizado, ampollado y decolorado, presencia de pequeñas escamas, pero limpia.	Sistema con pintura totalmente intemperizado, ampollado, decolorado y con desprendimiento de capas.
<i>F4: Preparación y respuesta de emergencias</i>	<i>V11: Sistemas de monitoreo y control</i>	Cumple con el apartado 8.3.13 de la NOM-006-ASEA-2017	—	—	—	No cumple con el apartado 8.3.13 de la NOM-006-ASEA-2017
	<i>V12: Alcantarillado</i>	Cumple con el apartado 8.3.3 de NOM-006-ASEA-2017	—	—	—	No cumple con el apartado 8.3.3 de NOM-006-ASEA-2017

	<i>V13: Sistemas contraincendios</i>	Cumple con el apartado 8.3.15 de la NOM-006-ASEA-2017	—	—	—	No cumple con el apartado 8.3.15 de la NOM-006-ASEA-2017
	<i>V14: Fuentes de alimentación eléctrica de emergencia</i>	Cumple con el apartado 8.7.1 y 8.13.1 de la NRF-048-PEMEX-2010	—	—	—	No cumple con el apartado 8.7.1 y 8.13.1 de la NRF-048-PEMEX-2010
	<i>V15: Sistemas de alerta hidrometeorológica</i>	Monitorean y consideran pronósticos	—	Consideran pronósticos	—	No hacen uso de ellos
	<i>V16: Capacitaciones al personal</i>	Sí realizan	—	—	—	No realizan
	<i>V17: Simulacros</i>	Sí realizan	—	—	—	No realizan
	<i>V18: Planes de emergencia</i>	Sí cuenta	—	—	—	No cuenta
	<i>V19: Servicio de bomberos</i>	Cuenta con su propio servicio además de uno de ayuda mutua	Cuenta con su propio servicio	Cuenta con servicio de ayuda mutua	Disponen del número telefónico de bomberos municipales	No cuenta
<i>F5: Físico</i>	<i>V20: Líquidos inflamables</i>	Categoría 4	Categoría 3	—	Categoría 2	Categoría 1
<i>F6: Salud</i>	<i>V21: Toxicidad aguda</i>	Categoría 5	Categoría 4	Categoría 3	Categoría 2	Categoría 1

	<i>Cutánea</i>					
	<i>V21: Toxicidad aguda Inhalación</i>	Categoría 5	Categoría 4	Categoría 3	Categoría 2	Categoría 1
	<i>V22: Corrosión/irritación cutánea</i>	Categoría 3	Categoría 2	Categoría 1C	Categoría 1B	Categoría 1A
	<i>V23: Mutagenicidad en células germinales</i>	Categoría 2	—	Categoría 1B	—	Categoría 1A
	<i>V24: Carcinogenicidad</i>	Categoría 2	—	Categoría 1B	—	Categoría 1A
	<i>V25: Toxicidad para la reproducción</i>	Categoría 2	—	Categoría 1B	—	Categoría 1A
	<i>V26: Toxicidad específica en organos diana, exposición única (STOT-SE)</i>	Categoría 3	—	Categoría 2	—	Categoría 1A Categoría 1B
	<i>V27: Toxicidad específica en organos diana, exposiciones repetidas (STOT-RE)</i>	Categoría 2	—	—	—	Categoría 1
	<i>V28: Peligro por aspiración</i>	Categoría 2	—	—	—	Categoría 1
<i>F7: Medio ambiente</i>	<i>V29: Toxicidad aguda para el medio ambiente acuático</i>	Crónico 4	Crónico 3	—	Crónico 2	Crónico 1

| CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

NE: Noreste, NO: Noroeste, SE: Sureste, SO: Suroeste.

3.3 Escenarios de riesgo

En esta sección se diseñaron escenarios de emergencias químicas tomando como base la información recabada en el análisis histórico de accidentes en tanques de almacenamiento por peligro hidrometeorológico, así como la información técnica del área de estudio, con la finalidad de ejemplificar las consecuencias químicas que se pueden generar por el efecto dominó, en la propia instalación, a los empleados, en inmediaciones al sitio y en el medio ambiente.

3.3.1 Escenario de emisión por evaporación de un derrame

Para este escenario se consideraron los sucesos descritos en el accidente No. 2 del ANEXO II, en donde el peligro de viento-oleaje provocado por el huracán Katrina hizo que se desplazaran de los tanques de almacenamiento ubicados en The Freeport Plant en Port Sulphur, Luisiana, Estados Unidos. Esto causó la ruptura de las tuberías de los tanques, lo cual conllevó a un derrame de la sustancia almacenada y en consecuencia por su evaporación a emisiones tóxicas.

El escenario se simuló en el programa de Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias (SCRI) Modelos versión 4, en la opción de emisión por evaporación de un derrame (Figura 3.6).



Figura 3.6. Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias

Fuente: Dinámica Heurística, 2020.

La información requerida para la simulación fue la siguiente:

1. Sustancia de interés.

1.1. *Título del modelo:* se asignó el título y la descripción del modelo, aquí se especificó el área del derrame, la temperatura ambiente y la fecha en la que se simuló la emergencia.

- 1.2. *Elección de la sustancia:* se eligió la sustancia a ser evaluada, en este caso el benceno ya que es un compuesto presente en la gasolina a una concentración hasta del 2% y está comprobada su toxicidad y carcinogenicidad en humanos (PEMEX, 2019; EPA, 2000).
- 1.3. *Propiedades químicas de la sustancia:* el programa integró a la modelación las siguientes propiedades: peso molecular, capacidad calorífica del vapor a presión constante, temperatura de ebullición, calor de vaporización a temperatura de ebullición, capacidad calorífica del líquido, densidad de líquido y constante de presión de saturación.
- 1.4. *Concentraciones de peligro:* se eligieron tres concentraciones que representaran diferentes niveles de peligro a la salud, por la exposición a la sustancia tóxica durante la emergencia, tomando como base una exposición de 30 min.

2. Parámetros de emisión.

El programa SCRI integra el modelo SLAB para el desarrollo de este apartado. SLAB es un modelo de computadora que simula la dispersión atmosférica de emisiones más densas que el aire (Garza-Ayala, 2015) y requiere de la siguiente información:

- 1.1. *Tipo de fuente.*
- 1.2. *Duración de la emisión.*
- 1.3. *Posición de la fuente.*
- 1.4. *Tasa de emisión de masa:* se refiere al flujo másico de la fuente en cualquier emisión continua (derrame en este caso). Este valor se calculó en una hoja de cálculo de excel a partir de la siguiente ecuación (Garza-Ayala, 2019):

$$E_{pool} = 6.94 \times 10^{-7} (1 + 0.0043(T_2 - 273.15)^2) U_r^{0.75} A_p M \frac{P_v}{P_{vh}}$$

Donde:

E_{pool} = Tasa de emisión del charco (kg/s)

U_r = Velocidad del viento (m/s)

A_p = Área del derrame (m²)

M = Peso molecular (kg/kmol)

T_2 = T_{rel} o T_a (K)

T_a = Temperatura ambiente (K)

P_{vh} = Presión de vapor de la hidracina a T_2 (Pa)

P_v = Presión de vapor del químico a T_2 (Pa)

1.5. *Área de la fuente*: como se trata de un derrame el área de la fuente es equivalente al área del derrame. Por lo cual, se consideró el 2% del área del dique, ya que el benceno se encuentra en esta concentración en la gasolina. Este valor fue calculado con la información obtenida de las fotografías satelitales de Google Earth Pro.

1.6. *Alturas de concentración*: Se eligieron cuatro alturas diferentes para representar cada escenario, ya que dependiendo de este valor varían las concentraciones de los vapores de benceno.

3. Escenario meteorológico.

Se capturaron los siguientes datos:

3.1. *Estabilidad atmosférica*: se simularon dos escenarios considerando diferente estabilidad atmosférica, ya que el programa tiene precargada la clasificación propuesta por Pasquill-Gifford, se seleccionó el escenario 1 con la “estabilidad atmosférica D” (atmósfera neutra) para representar condiciones de nubosidad diurnas o nocturnas, lo cual puede observarse después de algún fenómeno hidrometeorológico; para el escenario 2 se eligió una “estabilidad atmosférica F” (atmósfera estable), la cual representa vientos ligeros y estables, cielos nocturnos y niveles bajos de turbulencia.

3.2. *Temperatura ambiente*: en los dos escenarios se asignó la temperatura promedio máxima diaria del mes de junio 2018 de acuerdo con los datos proporcionados por la estación meteorológica APIVER-UNAM.

3.3. *Altura del anemómetro*.

3.4. *Velocidad del viento*: para el escenario 1 (estabilidad D) se seleccionó la velocidad de viento promedio que se tuvo en el mes de junio de acuerdo con los datos del reanálisis (2005 al 2018) del modelo Wavewatch III (Figura 4.11). Por otra parte, para el escenario 2 (estabilidad F) se asignó una velocidad de viento inferior ya que este escenario representaría un caso con baja dispersión de contaminantes.

3.4.1. *Humedad relativa*: para ambos escenarios se eligió la humedad relativa promedio del mes de junio del año 2018 registrada en la estación meteorológica APIVER-UNAM, ya que este mes se encuentra dentro de la temporada de huracanes en el Golfo de México, siendo esta una condición importante para los propósitos de este estudio.

3.5. *Rugosidad del terreno*: se seleccionó la rugosidad del terreno representativa de una zona industrial, esta información está integrada en la base de datos de SCRI.

3.6. *Dirección del viento*: se eligió la dirección predominante de viento en el mes de junio del Puerto de Veracruz obtenida con el modelo Wavewatch III con los datos históricos del 2005 al 2018 (Figura 4.11).

3.4 Modelo de riesgo

Se eligió un modelo de evaluación de riesgo semi-cuantitativo, representado por medio de la matriz de riesgo mostrada en la Tabla 3.6, la cual integró los siguientes criterios de aceptabilidad:

1. Peligro de viento extremo (P).

Se decidió evaluar el peligro en función de los vientos extremos, ya que estos afectan la generación de oleaje.

Este dato se evaluó utilizando diferentes períodos de retorno (P_r) de viento de 10, 50 y 100 años, puesto que los tanques de almacenamiento evaluados están diseñados conforme a la norma de la American Petroleum Institute (API) API 650 y en esta norma se consideran velocidades de viento de diseño para períodos de retorno de 50 años (API, 2012).

La probabilidad de ocurrencia de un peligro natural puede ser estimada por medio de los P_r mediante la siguiente ecuación (Ramírez-Olivar, et al., 2020; Lee, et al., 2017):

$$P = \frac{1}{P_r}$$

Conforme a esto, los intervalos de P se eligieron de la siguiente forma: “alto” para $P < 0.1$ ($P_r < 10$ años), “medio” para $0.1 \geq P < 0.02$ ($10 \text{ años} \geq P_r < 50 \text{ años}$), “bajo” para $0.02 \geq P < 0.01$ ($50 \text{ años} \geq P_r < 100 \text{ años}$) y “remoto” para $P \geq 0.01$ ($P_r \geq 100 \text{ años}$).

Para seleccionar el intervalo de P al cual están expuestos los tanques del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, se seleccionó el que correspondía a un P_r con velocidad de viento arriba de un umbral de 160 km/h, ya que en el análisis histórico de accidentes (ANEXO II) se encontró la presencia de daños a la estructura de los tanques a esta intensidad de viento, además de que los tanques evaluados en este estudio fueron diseñados para velocidades de viento arriba de 150 km/h (ANEXO III), por lo que las intensidades superiores ya implicarían impactos a su estructura conforme a su base de diseño.

2. El Índice de Vulnerabilidad (IV).

Se consideró el IV calculado en el capítulo 4.2 Elementos expuestos y vulnerabilidad, el cual integró en su evaluación criterios: estructurales, funcionales y químicos.

De acuerdo con lo anterior se determinó la categoría de riesgo químico en los tanques de almacenamiento evaluados asociado al peligro de viento extremo. En donde las categorías de riesgo son: “muy alto” representado en color rojo, “alto” en color naranja, “moderado” en color amarillo, “bajo” en color verde claro y “muy bajo” en color verde oscuro.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**10. Matriz de riesgo**

Peligro de viento extremo	Alto $P < 0.1$ ($P_r < 10$ años)				
	Medio $0.1 \geq P < 0.02$ ($10 \text{ años} \geq P_r < 50 \text{ años}$)				
	Bajo $0.02 \geq P < 0.01$ ($50 \text{ años} \geq P_r < 100 \text{ años}$)				
	Remoto $P \geq 0.01$ ($P_r \geq 100$ años)				
Categorías de riesgo					
Muy Alto	Baja ($IV \leq 25\%$)	Moderada ($25\% > IV \leq 50\%$)	Alta ($50\% > IV \leq 75\%$)	Muy alta ($IV > 75\%$)	
Alto					
Moderado	Vulnerabilidad de tanques (Percentiles de Índice de Vulnerabilidad)				
Bajo					
Muy bajo					

3.5 Propuestas de gestión

De acuerdo con el estudio de riesgo químico asociado a peligro de viento-oleaje, se realizaron observaciones y propuestas de gestión, con la finalidad de reducir las vulnerabilidades estructurales y funcionales detectadas en los tanques de almacenamiento del sitio de estudio y a su vez esto conlleva a la reducción del riesgo estimado.

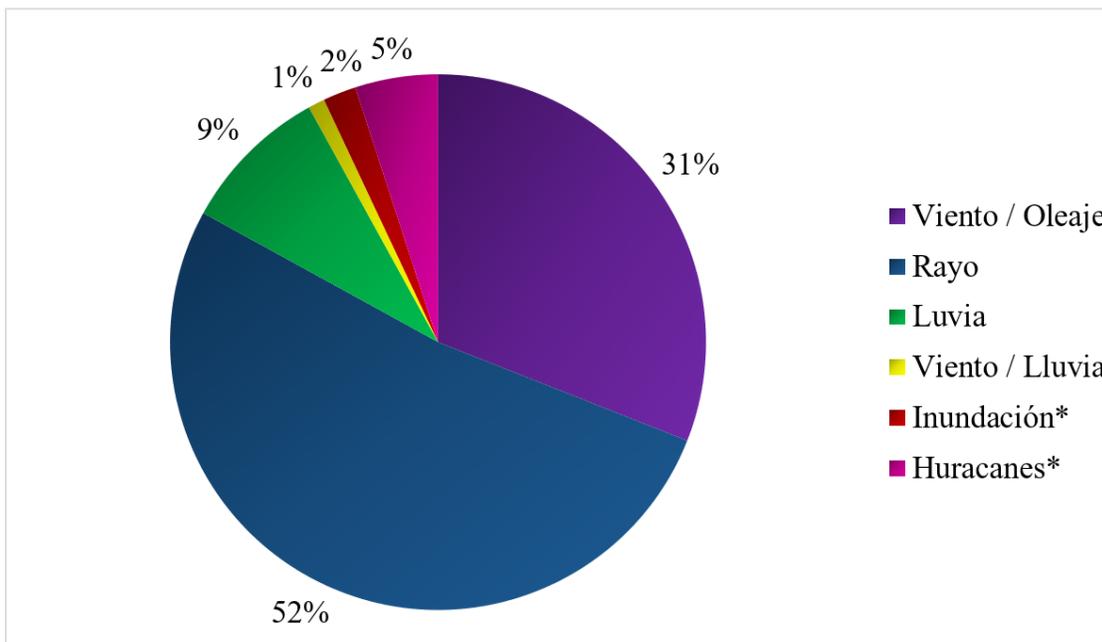
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Identificación y caracterización de los peligros

4.1.1 Experiencias en desastres

La información de los accidentes en tanques de almacenamiento asociados a peligros hidrometeorológicos se muestra en el ANEXO II. Es importante señalar que tal como afirman Cozzani et al. (2010) recabar este tipo de información de forma detallada es difícil, debido a que los datos reportados en las bases no siempre son homogéneos y las descripciones de los accidentes de fuentes confiables tienden a ser incompletas e imprecisas.

De acuerdo con el análisis histórico de accidentes en tanques de almacenamiento en el periodo de 1970 al 2018, se observa en la Figura 4.1 que los peligros hidrometeorológicos están integrados por: rayos (52%), viento / oleaje (31%), lluvia (9%), afectaciones de viento / lluvia de forma sinérgica (1%), inundaciones en donde no se especifica su origen (2%) y huracanes en donde no se especifica el peligro que provoca el accidente (5%). Se decidió asociar las afectaciones de viento y oleaje como uno mismo, puesto que el viento puede actuar como una fuerza generadora del oleaje.



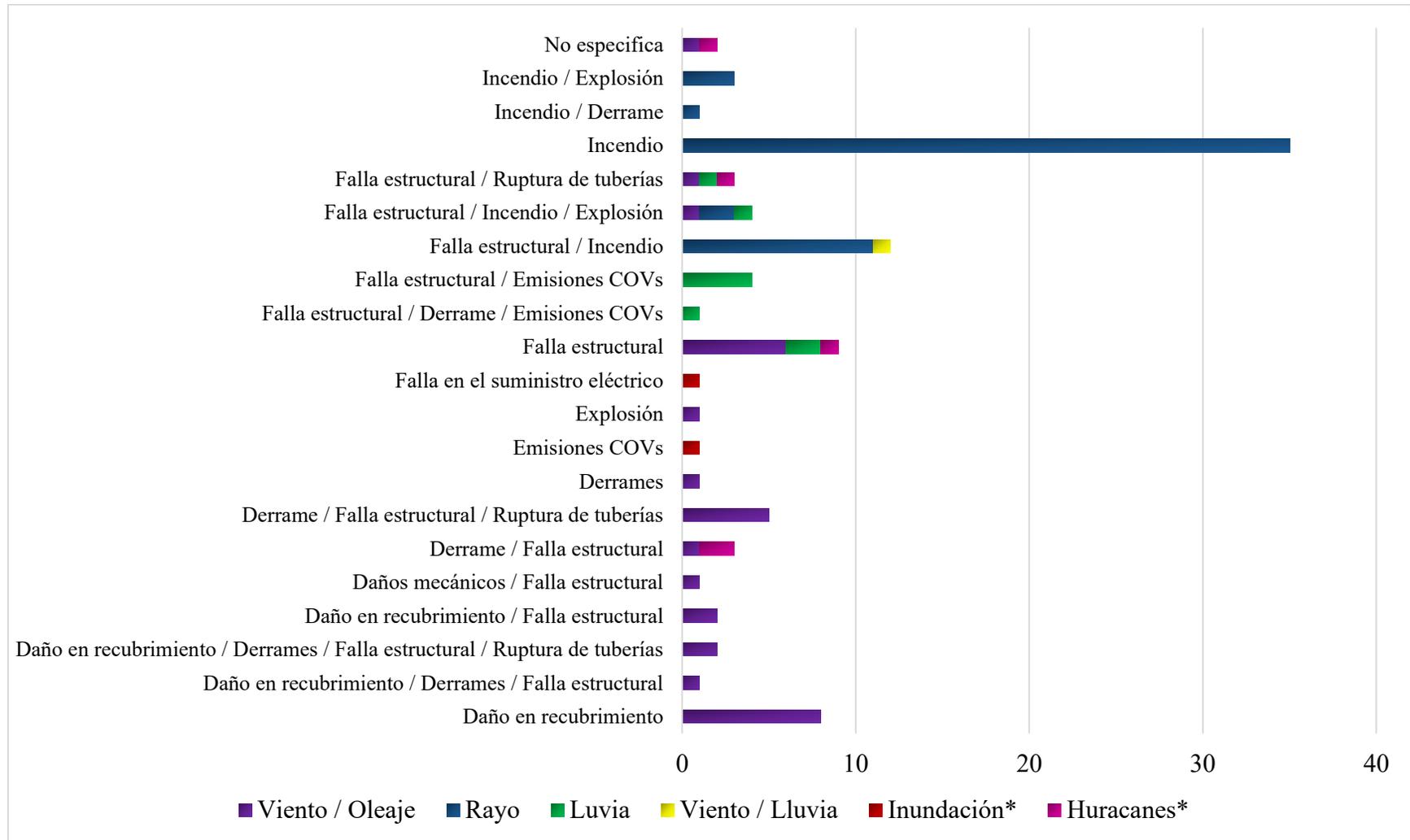
*No se especifica el peligro asociado al accidente.

Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..23. **Peligros hidrometeorológicos**

Por otra parte, en la Figura 4.2 se tiene la relación de los accidentes provocados por determinado peligro hidrometeorológico, resaltando entre ellos los incendios generados por

| CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

rayos, además de los daños al recubrimiento de los tanques y las fallas estructurales inducidas principalmente por las elevadas cargas de viento y oleaje.



*No se especifica el peligro asociado al accidente.

Figura 24. Accidentes asociados a peligros hidrometeorológicos

Las fallas estructurales pueden presentarse principalmente por *daños en el techo*, en dónde éste sale proyectado o hundido (13 casos por caída de rayos, 7 por las altas precipitaciones y 2 por fricción ocasionada por el viento), el *desplazamiento* de los tanques de sus cimientos (12 casos por los efectos del viento / oleaje y 2 por la lluvia), el *pandeo* por presión del viento o por el impacto de proyectiles (10 casos por efectos del viento / oleaje), el *volcamiento* de los tanques (2 casos por viento / oleaje y uno por lluvia), el *colapso* (4 casos por viento / oleaje) o su *agrietamiento* (un caso por caída de rayos). Ver Figura 4.3.



Figura 4.3. Fallas estructurales

Fuente: Godoy, 2019; Base de datos ARIA, 2019; NOAA, 2019b.

A su vez, las fallas estructurales tienden a provocar emergencias químicas a través de la liberación de las sustancias almacenadas, en forma de: derrames, emisiones atmosféricas (tóxicas o inflamables), incendios y/o explosiones.

Conforme a la información disponible de experiencias en escenarios catastróficos en otros sitios, se muestran en la Figura 4.4 los impactos en tanques de almacenamiento de combustibles que se han observado a velocidades de viento cercanas a los 160 km/h (44.44 m/s) y que la mayoría de los daños se han presentado a velocidades de viento superiores a los 190 km/h (52.78 m/s).

Lo anterior resulta lógico al considerar que gran parte de los tanques con almacenamiento de combustibles son diseñados utilizando las normas de la API, en donde se indica que la velocidad de viento de diseño puede ser cualquiera de las siguientes: 1) la velocidad de viento

de 190 km/h (52.78 m/s); 2) las rachas de viento de 3 segundos determinadas por la American Society for Civil Engineers 7 (ASCE 7: *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*) en la Figura 6-1; o bien, 3) las rachas de viento de 3 segundos especificadas por el comprador, en donde la velocidad del viento especificada será una racha de viento de 3 segundos basada en una probabilidad del 2% de excedencia anual (intervalo de recurrencia medio de 50 años) (API, 2012).

Es importante destacar que las afectaciones en los tanques también dependen del estado de éstos en el momento del evento hidrometeorológico, ya que en las descripciones de los accidentes se indican casos en los que los tanques se hayan prácticamente vacíos a menos del 15% de su capacidad, sin anclajes, o en condiciones estructurales que los vuelven más vulnerables (Ramírez-Olivar, et al., 2020; 2019; Zhao y Lin, 2014).

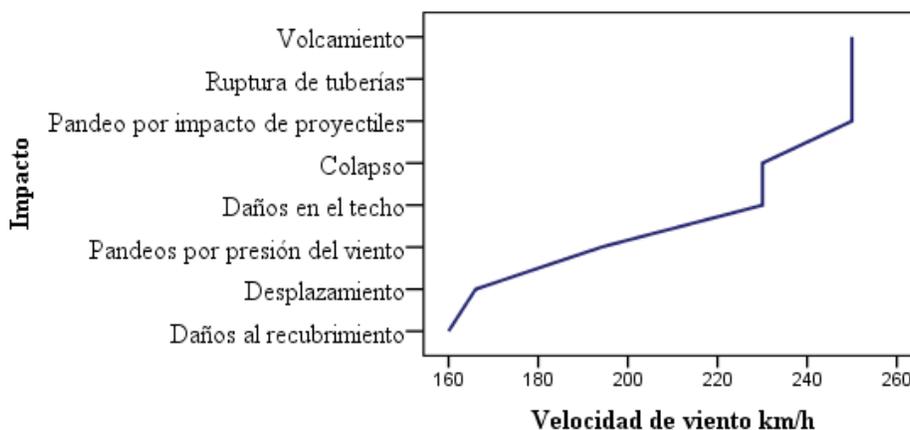


Figura 4.26. Impactos observados en tanques de almacenamiento de combustibles a diferentes velocidades de viento

4.1.2 Información de reanálisis

En la Figura 4.5 se muestra la distribución de los datos de reanálisis de oleaje obtenida del modelo Wavewatch III, en el periodo de febrero 2005 a mayo 2019.

La relación de la altura de ola significativa con su periodo asociado se observa en la Figura 4.6, en donde el rango más frecuente de altura significativa es de 0.5 – 1 m con periodos entre 4 – 7 s, sin embargo, en el sitio se pueden estar generando olas con altura significativa de hasta 4 m alrededor de dos veces al año, con periodos de 8 a 12 s.

En cuanto a la dirección del oleaje, en la Figura 4.7 se muestra la rosa de oleaje, en donde las olas predominantes conformadas por el 25% son del NE con altura significativa de 0.5 a 1 m. Mientras que en la Figura 4.8 se tienen las rosas de oleaje mensuales, en las cuales se aprecia que en los meses con presencia de nortes, principalmente de octubre a marzo, se perciben con mayor frecuencia las olas con altura significativa mayores a la media anual (0.76 m) con dirección hacia el suroeste y sur, especialmente en el mes de enero en donde aproximadamente el 10% del oleaje es superior a los 2 m.

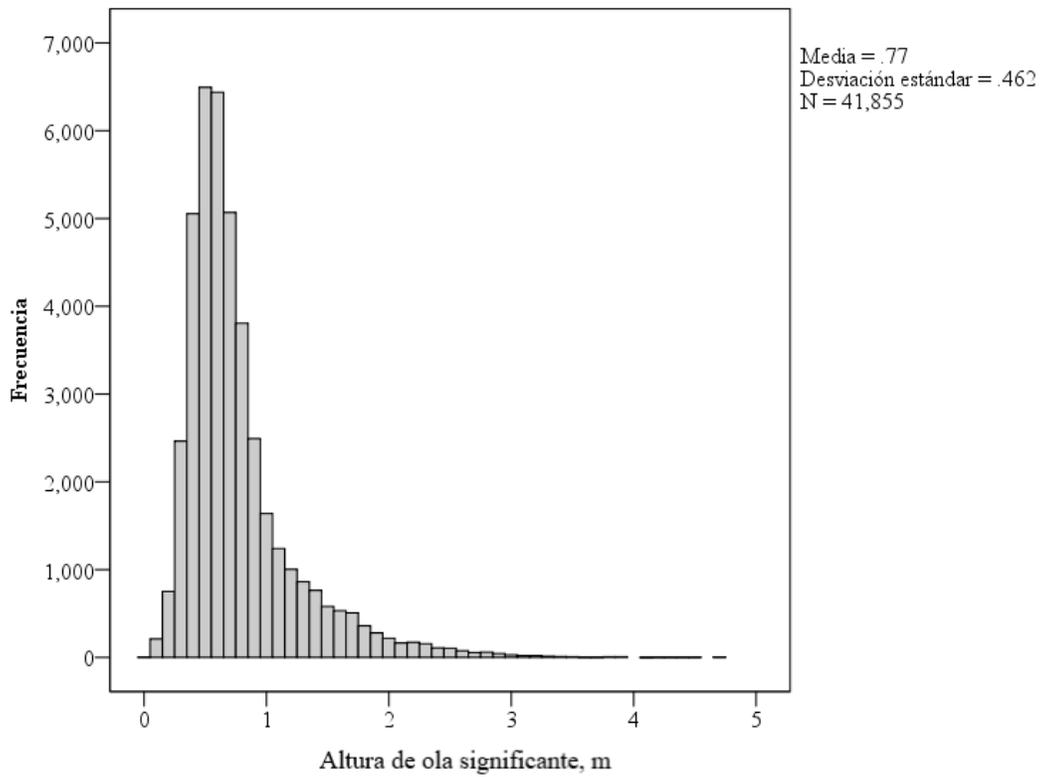


Figura 27. Histograma altura de ola significativa en metros, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 - mayo 2019

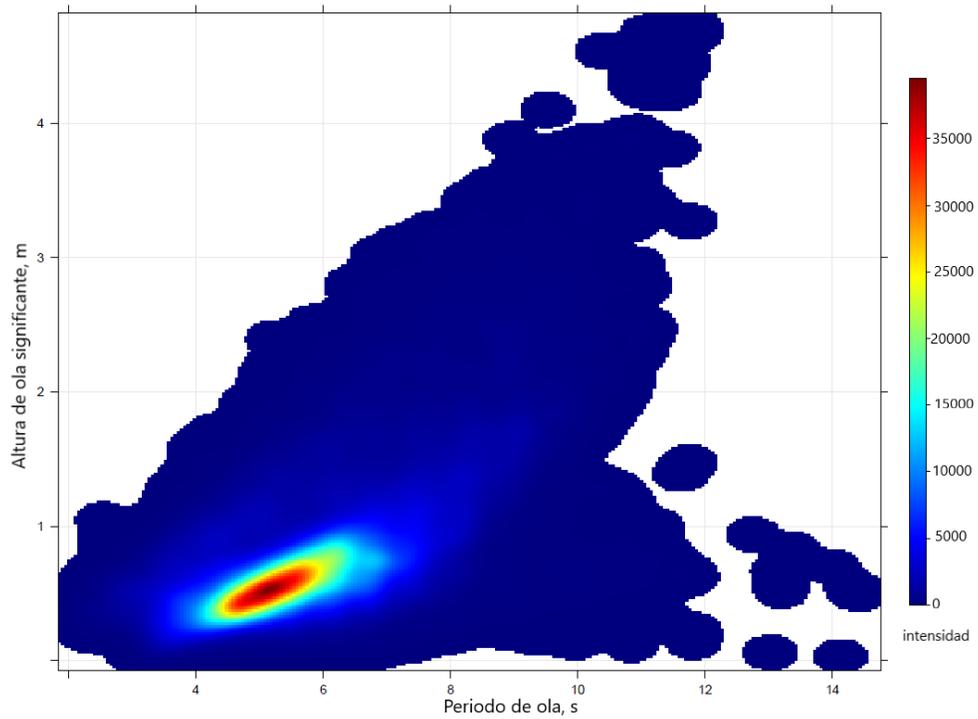


Figura 28. Relación de distribución de periodos de ola y altura de ola significativa

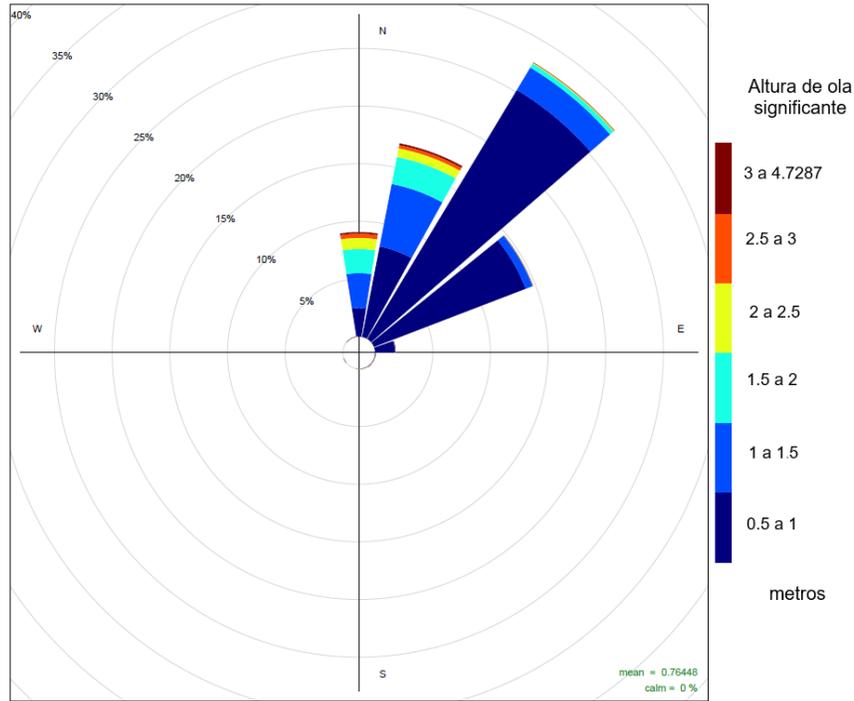


Figura 29. Rosa de oleaje Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019

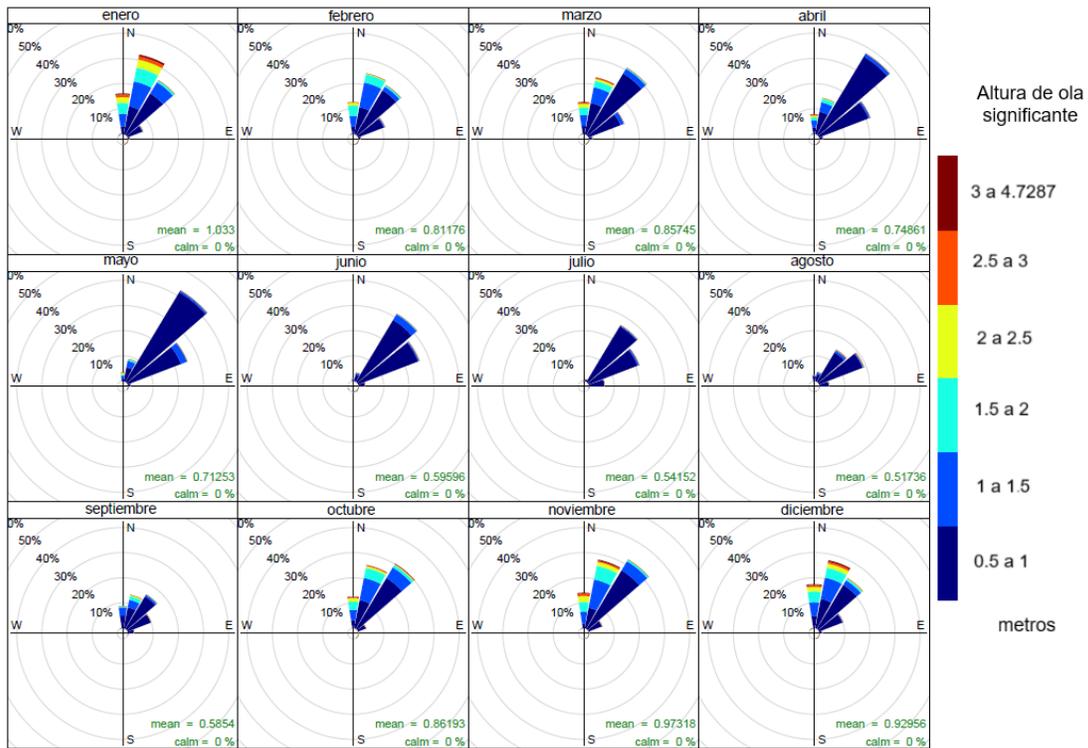


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**30. Rosas de oleaje mensuales Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019**

Por otra parte, en las Tablas 4.1 y 4.2, así como en el histograma en la Figura 4.9, se muestran los estadísticos descriptivos y el análisis de frecuencias de la magnitud del viento en metros por segundo obtenidos del modelo Wavewatch III.

En la Tabla 4.1 se muestra que el promedio de magnitud de viento es de 4.35 m/s (15.66 km/h) y que el máximo valor de viento sostenido detectado en el reanálisis es de 24 m/s (86.4 km/h). Esta velocidad de viento se produjo el 01 de diciembre del 2010 a causa del Frente Frio No. 11, la imagen satelital de este evento se muestra en el ANEXO I apartado 1.2.

De acuerdo con la Tabla 4.2. se puede determinar que al menos 1 vez al año se superan valores de viento de 20 m/s en el Puerto de Veracruz, lo cual equivale a 72 km/h, esto considerando el intervalo de datos de cada 3 h, ya que es la forma en que los genera el modelo Wavewatch III.

Es relevante destacar que los datos de reanálisis muestran que se tiene una probabilidad de 1.64% de que se presenten vientos sostenidos mayores o iguales a 50 km/h en el área de estudio, por lo cual se puede aseverar que APIVER suspende maniobras de buques con carga de hidrocarburos alrededor de 48 veces al año.

Las rosas de viento realizadas con los datos de reanálisis se muestran en la Figura 4.10 y 4.11, en donde se observa que la dirección de viento predominante en el periodo de 14 años (febrero 2005 a mayo 2019) proviene del nornoroeste (NNO) y que al igual que las condiciones de oleaje extremas percibidas en la zona, en los meses de octubre a marzo, se tiene mayor frecuencia de velocidades de viento por encima de la media anual (4.35 m/s o 15.66 km/h). En cuanto a los meses de abril a agosto, se observa en la Figura 4.11 que predominan los vientos alisios del NE, en los cuales se tiene una baja frecuencia de los mayores a 8 m/s (28.8 km/h).

Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..11. Estadísticos descriptivos, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019

<i>Velocidades de viento, m/s</i>		
N	41818	
Media	4.35	
Mediana	4.00	
Moda	3	
Máximo	24	
Percentiles	25	2.00
	50	4.00
	75	5.00
	95	10.00

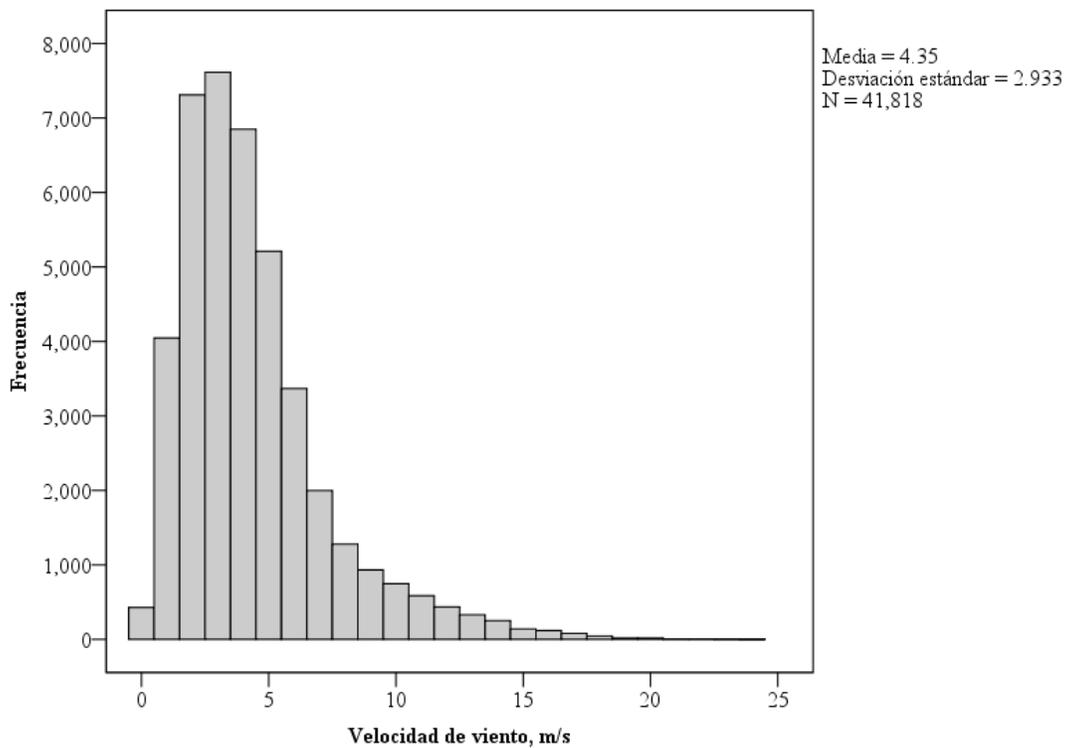


Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..31. Histograma velocidad de viento Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..12. **Frecuencia de las velocidades de viento en Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019**

<i>Velocidades de viento, m/s</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Porcentaje acumulado</i>	<i>Veces al año</i>
0	428	1.023	1.023	30
1	4046	9.675	10.699	282
2	7311	17.483	28.182	510
3	7613	18.205	46.387	531
4	6849	16.378	62.765	478
5	5210	12.459	75.224	363
6	3367	8.052	83.275	235
7	1998	4.778	88.053	139
8	1279	3.058	91.111	89
9	933	2.231	93.343	65
10	748	1.789	95.131	52
11	586	1.401	96.533	41
12	436	1.043	97.575	30
13	330	0.789	98.364	23
14	252	0.603	98.967	18
15	141	0.337	99.304	10
16	118	0.282	99.586	8
17	80	0.191	99.778	6
18	46	0.110	99.888	3
19	18	0.043	99.931	1
20	18	0.043	99.974	1
21	4	0.010	99.983	0
22	4	0.010	99.993	0
23	2	0.005	99.998	0
24	1	0.002	100	0
Total	41818	100		

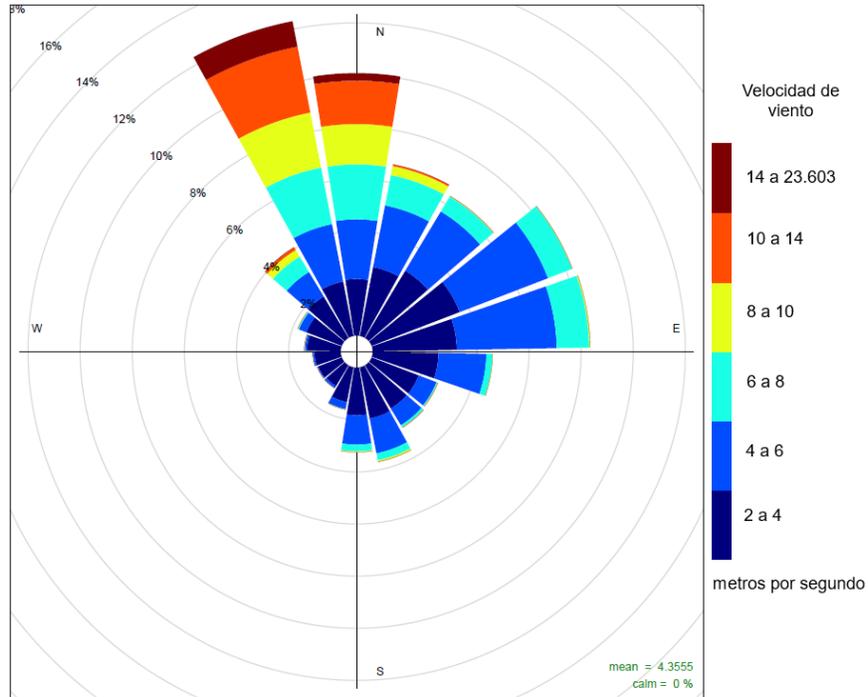


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..32. Rosa de viento Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019

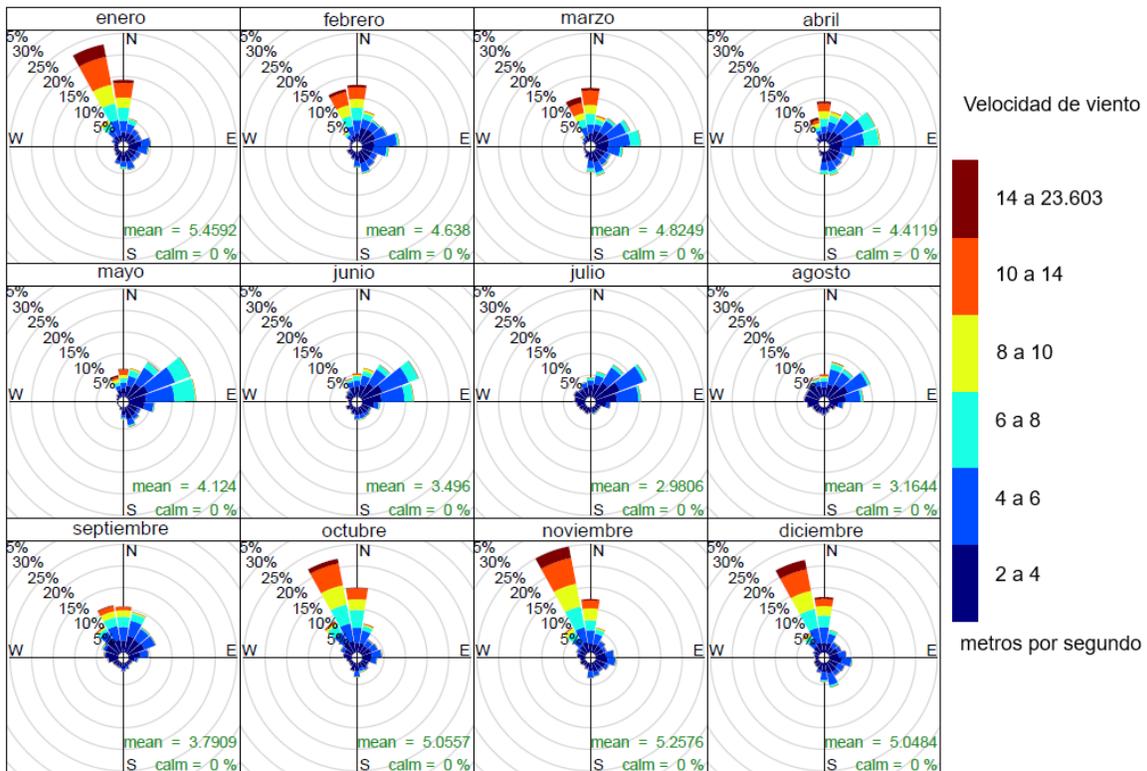


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..33. Rosas de viento mensuales Veracruz, con datos del modelo Wavewatch III, periodo febrero 2005 – mayo 2019

La relación de viento – oleaje en la zona de estudio se presenta en el gráfico de dispersión en la Figura 4.12, en el cual los puntos celestes representan los pares de datos x-y, la línea negra representa la tendencia suavizada (valores medios) y la línea azul oscuro la recta de regresión, ambas con un margen de confianza del 95%. Este gráfico refleja como la tendencia de altura de ola significativa se ve afectada por el viento, bajo las características del sitio, en donde los vientos mayores a 15 m/s (54 km/h) tienden a propiciar olas mayores o iguales a 2 m de altura. Es importante mencionar que parte del oleaje se genera por viento en altamar, por eso no se presenta una relación lineal.

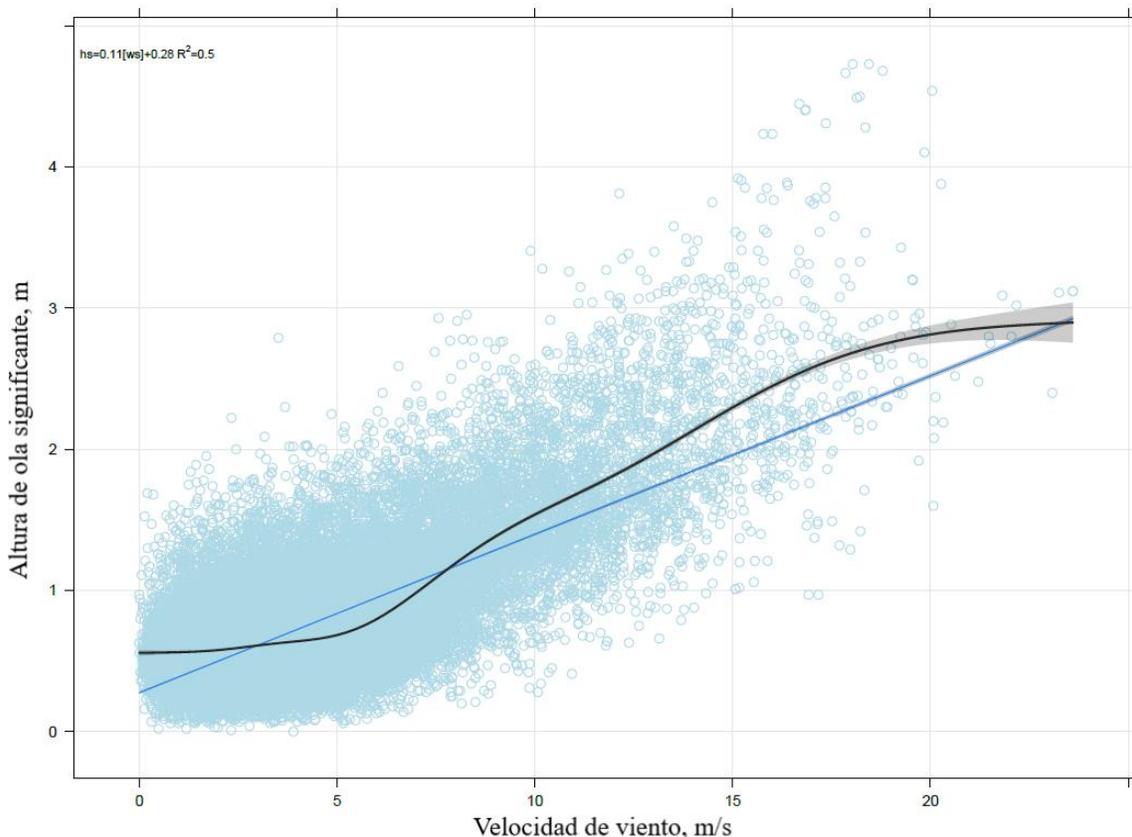


Figura 4.12. Relación viento - oleaje, con datos obtenidos con el modelo Wavewatch III periodo 2005 - 2019. Los círculos celestes muestran los pares de datos x-y, la línea negra representa la tendencia suavizada y la línea azul oscuro la recta de regresión ambas con un margen de confianza del 95%.

4.1.3 Información in-situ

Las estaciones hidrometeorológicas de las cuales se obtuvo información fueron las siguientes:

- *Estación meteorológica APIVER-UNAM:*
Periodo: mayo 2017 – septiembre 2019.

Ubicación: Distancia de 3.96 km al “Centro Embarcador Bajos la Gallega”. En las coordenadas: 19°12’53” latitud N y 96°09’43” longitud O.

- *Centro hidrometeorológico Veracruz-Boca del Río:*

Periodo: Promedios mensuales y anuales de enero 1981 – diciembre 2018.

Ubicación: Distancia de 7.77 km al “Centro Embarcador Bajos la Gallega”. En las coordenadas: 19°08’33” latitud N y 96°06’41” longitud O.

- *Estación meteorológica del Aeropuerto de Veracruz:*

Periodo: julio 2011 – diciembre 2018.

Ubicación: Distancia de 9.83 km al “Centro Embarcador Bajos la Gallega”. En las coordenadas: 19°08’45” latitud N y 96°11’14” longitud O.

- *Estación meteorológica de la Secretaría de Marina, Faro Venustiano Carranza:*

Periodos discontinuos debido a fallas técnicas: 9 de junio al 31 de diciembre del 2016, 1 al 9 de enero del 2017 y 12 de febrero al 31 de marzo del 2019.

Ubicación: Distancia de 1.48 km al “Centro Embarcador Bajos la Gallega”. En las coordenadas 19°12’06” latitud N y 96°08’00” longitud O.

- *Campañas oceanográficas de la Secretaría de Marina:*

Monitoreo de oleaje en periodos discontinuos de los siguientes sitios y temporalidades:

- Frente a Antón Lizardo del 22 de mayo al 16 de junio del 2007.
- Laguna Verde del 6 al 8 de agosto del 2018.
- Alvarado del 7 al 9 de mayo del 2018.

Los datos de oleaje monitoreados en las campañas de la Secretaría de Marina (SEMAR) no fueron considerados debido a que se han realizado en periodos cortos de tiempo en otras zonas de la región.

Se decidió emplear la información proporcionada de rachas de viento registradas en la estación meteorológica APIVER-UNAM (Tablas 4.3, 4.4 y Figura 4.13), ya que es de las más cercanas al “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, cuenta con un monitoreo continuo por más de dos años y su evaluación está a cargo del Grupo de Clima y Sociedad del Instituto de Geografía de la UNAM.

En los estadísticos descriptivos de la Tabla 4.3, se observa que la racha de viento más frecuente es 5 m/s (18 km/h) y la máxima en la base de datos de 29 m/s, que equivale a 104.4 km/h. Este dato se registró el 13 de noviembre del 2018 por el paso del frente frío No. 10.

En cuanto a la Rosa de vientos mostrada en la Figura 4.13 se aprecia que en el área de estudio se tienen vientos predominantes del norte.

Tabla 4.4. Estadísticos descriptivos de las rachas de viento de la estación de APIVER-UNAM, periodo mayo 2017 – septiembre 2019

<i>Velocidades de viento, m/s</i>		
N	117358	
Media	5.43	
Mediana	5.00	
Moda	5	
Máximo	29	
Percentiles	25	3.00
	50	5.00
	75	7.00
	95	13.00

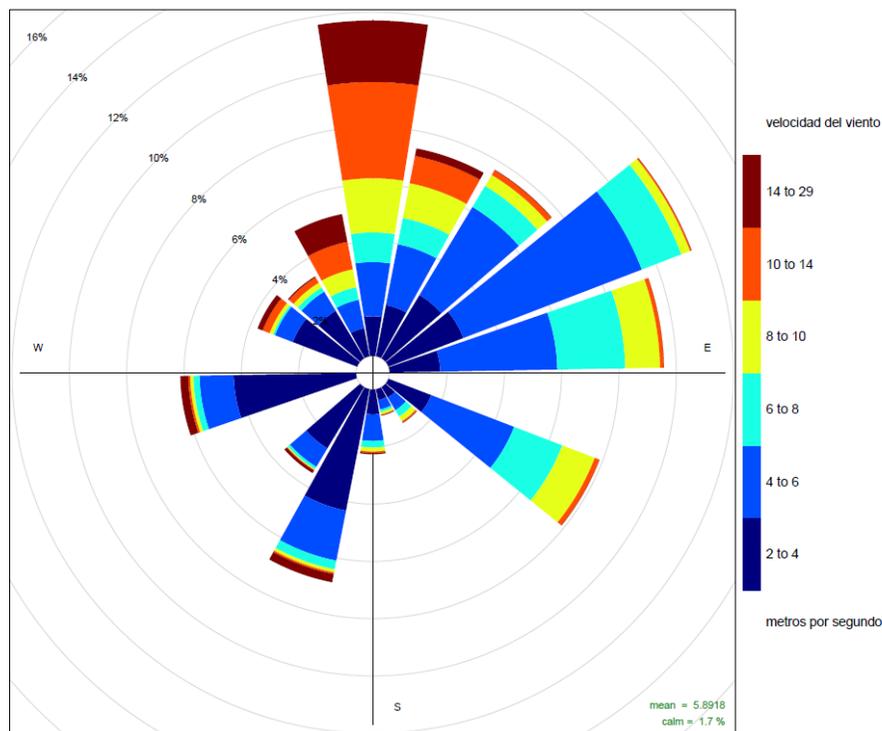


Figura 4.5. Rosa de viento de la estación meteorológica APIVER-UNAM mayo 2017 a septiembre 2019

En la Tabla 4.4, se observa en el análisis de frecuencias que al menos tres veces al año se pueden presentar vientos mayores a 100 km/h (27.8 m/s) en el Puerto de Veracruz y que la

máxima velocidad de viento registrada de 104.4 km/h (29 m/s) tiene una probabilidad de ocurrencia de 0.002%.

Tabla 14. Frecuencia de las rachas de viento en la estación APIVER-UNAM, periodo mayo 2017 – septiembre 2019

<i>Rachas de viento, m/s</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Porcentaje acumulado</i>	<i>Veces al año</i>
0	11129	9.483	9.483	4862
1	1789	1.524	11.007	782
2	8447	7.198	18.205	3690
3	16952	14.445	32.650	7405
4	15545	13.246	45.895	6791
5	20696	17.635	63.530	9041
6	11145	9.497	73.027	4869
7	8172	6.963	79.990	3570
8	3038	2.589	82.579	1327
9	6162	5.251	87.830	2692
10	2422	2.064	89.893	1058
11	1975	1.683	91.576	863
12	1759	1.499	93.075	768
13	2316	1.973	95.048	1012
14	1075	0.916	95.964	470
15	943	0.804	96.768	412
16	727	0.619	97.387	318
17	848	0.723	98.110	370
18	463	0.395	98.505	202
19	447	0.381	98.885	195
20	363	0.309	99.195	159
21	379	0.323	99.518	166
22	258	0.220	99.738	113
23	106	0.090	99.828	46
24	62	0.053	99.881	27

25	61	0.052	99.933	27
26	59	0.050	99.983	26
27	13	0.011	99.994	6
28	5	0.004	99.998	2
29	2	0.002	100.000	1
Total	117358	100.000		

Es de destacar que los estadísticos del reanálisis del modelo Wavewatch III y los registros de la estación APIVER-UNAM, muestran el mismo comportamiento puesto que en ambos casos las máximas velocidades de viento provienen del NNO y N.

En cuanto a otras fuentes de información hidrometeorológica del sitio, se tiene el Atlas Nacional de Riesgos del CENAPRED y el Atlas de Riesgo Estatal de Veracruz de Ignacio de la Llave, en donde se muestra que en el periodo de 1851 al 2017 en las cercanías del área de estudio se han presentado las siguientes trayectorias de ciclones tropicales (Figura 4.14).

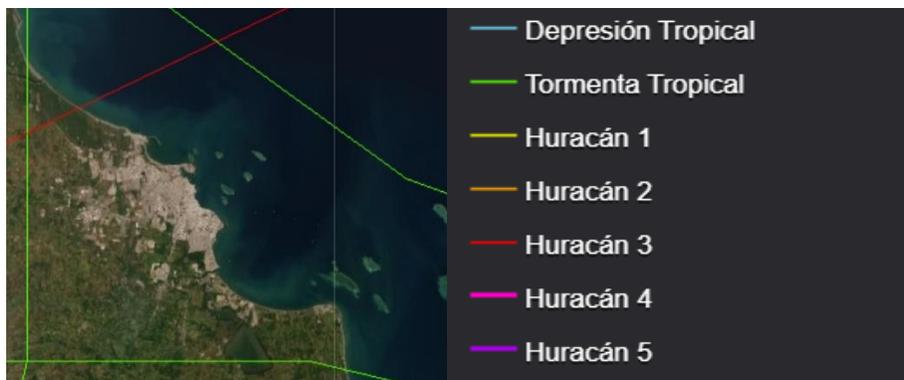


Figura 4.14. Trayectorias de ciclones tropicales en el periodo de 1851 – 2017

En la Figura 4.14 se destaca en color rojo la trayectoria del huracán de categoría 3 “Karl” en el 2010, por su proximidad al Puerto de Veracruz, el cual registró rachas de hasta 152 km/h (42.22 m/s) en este sitio (NHC, 2011). Aunado a lo anterior, estos atlas de riesgo clasifican el área de estudio como una zona de peligro medio por vientos generados por huracanes, los cuales incluyen vientos de 169 – 195 km/h (46.94 – 54.17 m/s) para periodos de retorno de 200 años (CENAPRED, 2020).

Por otra parte, la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) proporciona *Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones*, en donde en los lineamientos de *Seguridad Estructural* en el *V4-TOMO III Diseño por Viento*, se proporcionan periodos de retorno de las ciudades más importantes de la República Mexicana.

En la Tabla 4.5 se muestran los períodos de retorno de 10, 50, 100, 200 y 2000 años para Veracruz, Ver., en donde las velocidades de viento son asociadas a condiciones homogéneas que corresponden a una altura a 10 metros sobre la superficie del suelo, en terreno plano con ráfagas de 3 segundos tomando en cuenta la posibilidad de que se presenten vientos debidos a huracanes (CMIC, 2015).

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**15. Períodos de Retorno Veracruz, Ver.**

<i>Período de Retorno, años</i>	<i>Velocidad de viento, km/h</i>
10	150
50	175
100	185
200	194
2000	222

Fuente: CMIC, 2015.

4.2 Elementos expuestos y vulnerabilidad

En México, Petróleos Mexicanos es la empresa más grande e importante en materia de hidrocarburos, produce diariamente 1.6 millones de barriles de petróleo y sus actividades involucran toda la cadena productiva, desde la exploración, producción, transformación industrial, logística y comercialización (PEMEX, 2019).

La Terminal Marítima de PEMEX se ubica dentro de las instalaciones de la APIVER en las coordenadas 19°12'29" latitud N y 96°07'26" longitud O. Se encarga de la recepción de Diésel, gasolinas regular y premium a través de buquestanques provenientes de puntos nacionales, como las Terminales de Almacenamiento y Distribución (TAD) Madero (Tampico, Tamps.) y Pajaritos (Coatzacoalcos, Ver.) e internacionales; así como de su posterior despacho por medio de ductos a servicios de almacenamiento.

En las cercanías la Terminal colinda con las antiguas instalaciones de Internacional de Contenedores Asociados de Veracruz (ICAVE), Talleres Navales del Golfo, Cargill de México, la Secretaría de Marina y San Juan de Ulúa y, cuenta con los siguientes elementos (Gobierno de México, 2017; PEMEX, 2016; Salgado-Ávila, 2015):

- Dos posiciones de atraque, el Muelle de PEMEX oriente (282.32 m de longitud) y el Muelle de PEMEX poniente (395.69 m de longitud), ambos con calado de 9.14 m y **tonelaje de peso muerto (DTW)** de 40,000 ton.
- Seis brazos de carga marinos.
- Una subestación eléctrica.
- Tres patines de medición (uno para cada producto).
- Tres líneas de proceso.
- Una longitud de tuberías de 1.2 km.

Los servicios de almacenamiento a los cuales se dirigen los productos son: el “Centro Embarcador Bajos la Gallega” (19°12'42" latitud N y 96°07'27" longitud O) y el “Sardinero” (19°12'12" latitud N y 96°08'52" longitud O) los cuales se observan en la Figura 4.15.

Dentro de las instalaciones del “Centro Embarcador Bajos la Gallega” se encuentran seis tanques atmosféricos, tres que almacenan gasolina regular que son el TV-1, TV-2 y TV-3; dos que almacenan Diésel el TV-4 y TV-5; y uno que se haya fuera de servicio el TV-6, del cual no se conoce el motivo de su estado operativo (Figura 4.16). Cada uno tiene capacidad neta de almacenamiento de 30,000 barriles (4,769.62 m³) y diseño basado en las especificaciones de la norma API 650.



Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..37. Instalaciones de almacenamiento y distribución de PEMEX

Fuente: Google-Earth-Pro, 2019b.



Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..38. Ubicación de los tanques de almacenamiento de combustibles del "Centro Embarcador Bajos la Gallega"

Fuente: Google-Earth-Pro, 2020.

En la Tabla 4.6 se muestra la caracterización de los tanques de acuerdo con la Figura 3.8 y los datos obtenidos de la lista de verificación del ANEXO III.

Tabla 4.6. Características de los tanques de almacenamiento del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”

<i>Tanque atmosférico</i>	<i>Techo</i>	<i>Carcasa</i>	<i>Base</i>
TV-1	Configuración: Techo flotante interno	Diámetro: 22.352 m	Anclados y con anillo de concreto
TV-2		Altura: 12.192 m	
TV-3		Material: 2B2 (150 psi, acero al carbón)	
TV-4	Configuración: Techo fijo		
TV-5			
TV-6			

Fuente: Datos recabados en visita técnica.

Se continuó con el cálculo de los factores de la vulnerabilidad estructural, funcional y química.

4.2.1 Vulnerabilidad estructural

Se determinaron las variables de las cuales depende el *factor de ubicación (F1)* de cada uno de los tanques (elementos expuestos).

- *Elevación (V1)*: los seis tanques de almacenamiento ubicados en el “Centro Embarcador Bajos la Gallega” se encuentran en una elevación de 8 a 10 m sobre el nivel del mar por lo que el valor asignado a esta variable es **V1 = 4**.
- *Orientación (V2)*: el cálculo de esta variable se muestra a continuación:

$$V2 = \sum \text{Valor} * \% \text{perimetro sin proteger}$$

$$V2 = (1 * 0\%) + (2 * 6.25\%) + (4 * 25\%) + (5 * 25\%)$$

$$V2 = 2.375$$

Donde el “valor 1” (SO-NO) se multiplicó por 0% ya que en esta dirección no se tiene la incidencia de oleaje y existen obstrucciones de viento por la ubicación del asentamiento de la población, el “valor 2” se multiplico por 6.25% (25% ÷ 4) puesto que en tres cuartas

partes del perímetro de esta dirección (SE-SO = 25%) se tiene la presencia de los muelles de la Terminal Marítima de PEMEX y el rompeolas sureste, finalmente el “valor 4” (NO-NE) y el “valor 5” (NE-SE) se multiplicaron por 25% ya que no se tienen estructuras protectoras en estas direcciones.

En la Figura 4.17 se muestran las características de la línea de costa en la dirección NE-SE (“valor 5”), donde se observa que no se tiene una estructura de rompeolas definida. Mientras en la Figura 4.18 se observa que la barda de la instalación ubicada en la dirección NE-SE (“valor 5”) se encuentra en mal estado por el intemperismo en el material de construcción, debido a las condiciones ambientales del sitio y al escaso mantenimiento de ésta.



Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..39. **Línea de costa frente al área de almacenamiento, 2019**



Figura 4.40. Barda perimetral del Centro Embarcador Bajos la Gallega, 2019

- *Distancia de la línea de costa (V3)*: Esta medida varía entre los 68 y 124 m para los seis tanques de almacenamiento, por lo que el valor de la variable de acuerdo con los criterios antes establecidos es **V3= 3**.
- *Geomorfología (V4)*: La línea de costa frente al “Centro Embarcador Bajos la Gallega” tiene una extensión de 315 m y las características geomorfológicas en su totalidad corresponden al arrecife de coral “la Gallega” como se muestra en la Figura 4.19, por lo que el cálculo de esta variable es el siguiente:

$$V4 = \sum \text{Valor} * \% \text{ longitud en la línea de costa}$$

$$V4 = (1 * 0\%) + (2 * 0\%) + (4 * 0\%) + (5 * 100\%)$$

$$V4 = 5$$

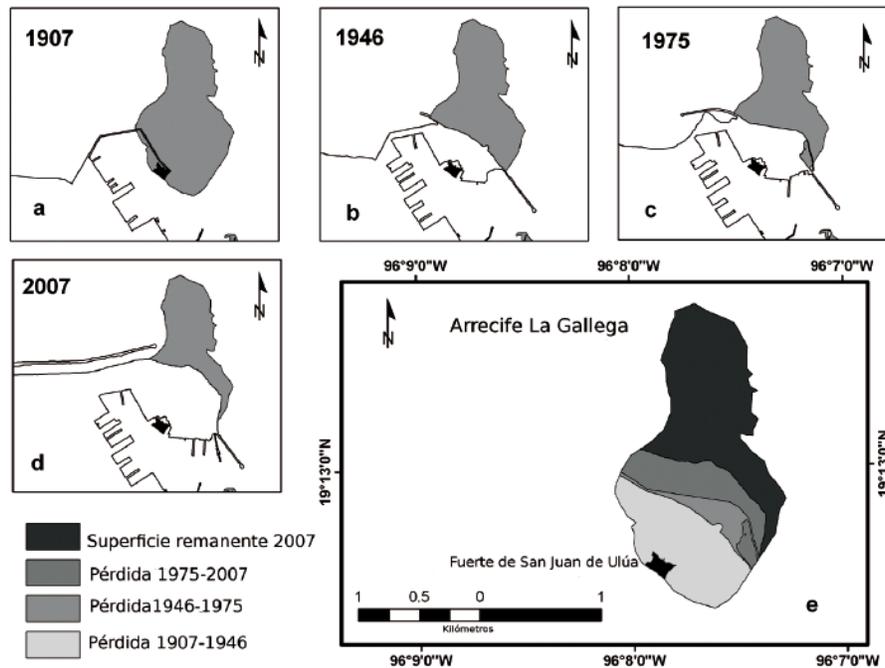


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..41. **Modificaciones al arrecife “la Gallega” y la línea de costa asociadas a la evolución de las obras de ampliación del Puerto de Veracruz**

Fuente: Ortiz-Lozano, Valadez y Hayasaka-Ramírez 2015.

Por lo tanto, el resultado del factor de ubicación (F1) para cada uno de los tanques (elementos expuestos) es igual, ya que al estar en el mismo sitio comparten las características de ubicación:

$$F1 = V1 * V2 * V3 * V4$$

$$F1 = 4 * 2.375 * 3 * 5$$

$$F1 = 142.5$$

En la determinación de las variables para el cálculo del *factor de capacidad resistiva (F2)* se tiene lo siguiente:

- *Anclaje (V5)*: los seis tanques cuentan con anclaje en sus cimientos, por lo que el valor de esta variable es $V5 = 1$.
- *Cantidad almacenada promedio (V6)*: durante la visita a las instalaciones del “Centro Embarcador Bajos la Gallega” el ingeniero a cargo comentó que los tanques se encuentran regularmente trabajando a su máxima capacidad a excepción del tanque TV-6, puesto que se encuentra fuera de servicio. Por lo cual, a los tanques TV-1 a TV-5 se les asignó el valor de $V6 = 1$ y al tanque TV-6 el valor $V6 = 5$.

- *Anillos de refuerzo (V7)*: los seis tanques de almacenamiento cuentan con anillos de refuerzo por lo que el valor asignado en este caso es de $V7 = 1$.
- *Densidad de la sustancia almacenada (V8)*: los tanques de almacenamiento TV-1 a TV-3 contienen gasolina por lo que se les asignó el valor de $V8 = 4$, mientras que los tanques TV-4 y TV-5 contienen Diésel por lo cual el valor de $V8 = 3$, en cuanto al TV-6 no se consideró esta variable, ya que no cuenta con alguna sustancia almacenada.
- *Presión crítica del tanque (V9)*: como los seis tanques cuentan con la misma capacidad de almacenamiento el cálculo de esta variable es la siguiente:

$$P_{cr} = k_1 C + k_2$$

$$P_{cr} = (-0.199) * (4769.62 \text{ m}^3) + 6950$$

$$P_{cr} = 6000.845 \text{ Pa}$$

$$\therefore V9 = 5$$

Los valores asignados a cada variable que componen el factor de capacidad resistiva (F2) es diferente para cada tanque del área de estudio. Los tanques TV-1 a TV-3 cuentan con $F2 = 20$, el TV-4 y TV-5 con $F2 = 15$ y el tanque TV-6 con $F2 = 125$, esto denota que por las características evaluadas en este factor el segundo grupo de tanques (TV-4 y TV-5) es el menos vulnerable, seguido por los TV-1 a TV-3 y que el TV-6 es el que cuenta con mayor vulnerabilidad.

En cuanto al cálculo del *factor de estado técnico (F3)*, se tiene la consideración de la siguiente variable.

- *Grado de corrosión (V10)*: el grado de corrosión observado en los tanques de almacenamiento en la visita al área de estudio fue igual para todos (Figura 4.20).



Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..42. Tanques de almacenamiento del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, 2019

Se les determinó a los tanques un grado de corrosión G (sistema con pintura fuertemente intemperizado, ampollado y decolorado, con presencia de pequeñas escamas, pero limpia), por lo que $F3 = V10 = 4$, lo cual indica una vulnerabilidad “alta”.

Es relevante destacar que el último mantenimiento en los tanques de almacenamiento había sido realizado en el año 2017 y el próximo se tiene programado para el año 2021, sin embargo, este debiera presentarse con mayor frecuencia por las condiciones corrosivas del ambiente marino.

4.2.2 Vulnerabilidad funcional

Para el cálculo del *factor de preparación y respuesta de emergencias (F4)* se determinaron los valores de las siguientes variables:

- *Sistemas de monitoreo y control (V11)*: se determinó el cumplimiento del apartado 8.3.13 de la norma NOM-006-ASEA-2017. Ya que en la visita al área de estudio se tuvo el acceso para corroborar que el sistema integra funciones de medición y control de las variables operativas de la instalación para la operación segura, preservando los siguientes puntos:
 - a. La instalación monitorea y controla (local y/o remotamente) las condiciones de operación y seguridad en el manejo de petrolíferos, notificando alarmas operativas/seguridad y eventos relevantes;
 - b. Para las interconexiones con sistemas de transporte por ducto e instalaciones marítimas dentro de la instalación, se disponen de medios de comunicación, monitoreo y consulta con las operaciones de almacenamiento;
 - c. Se realiza el paro ordenado de la operación de la instalación conforme a los protocolos establecidos;
 - d. Se monitorea la medición de las variables del proceso en la instalación;
 - e. Se realiza el control de operaciones de volumen de petrolíferos con seguridad;
 - f. Se cuentan con registros sobre las actividades de almacenamiento, recepción y entrega que se realizan en la instalación;
 - g. Se tiene el reporte de balance de petrolíferos manejados con objeto de preservar la contención y confinamiento de los petrolíferos;
 - h. Los tanques disponen de un indicador local y remoto de las variables operativas para control (se tuvo acceso a verificar el nivel de petrolíferos, en cuanto al nivel de agua y la temperatura, no se pudo corroborar si se están llevando a cabo) y,
 - i. De igual forma no se tuvo acceso a para garantizar la continuidad en el bombeo de petrolífero en caso de falla del sistema.

Por lo tanto, $V11 = 1$.

- *Alcantarillado (V12)*: no se tuvo el completo acceso para verificar el cumplimiento con el apartado 8.3.3 de la NOM-006-ASEA-2017, sin embargo, el personal afirmó estar cumpliendo con la normatividad predecesora de ésta: la NOM-EM-003-ASEA-2016 (DOF, 2016c; CONAMER, 2018). Por ello, se determina el cumplimiento del criterio evaluado, ya que en ambas se indica que la instalación debe contar con la captación de aguas en patios de maniobra, calles, áreas de recepción, almacenamiento, entrega, casa de bombas y áreas adyacentes, además de que las áreas de recepción, almacenamiento y entrega deben contar con drenajes independientes: pluvial y aceitoso. Por lo cual **V12 = 1**.
- *Sistemas contraincendios (V13)*: se tuvo la apertura para corroborar la mayor parte del cumplimiento con el apartado 8.3.15 de la NOM-006-ASEA-2017, puesto que se verificó que la instalación donde se encuentran los tanques de almacenamiento integra los siguientes sistemas contraincendios:
 - a. Suministro de agua,
 - b. Tanque de almacenamiento de agua contra incendio,
 - c. Red de agua contra incendio y equipos de aplicación, como anillos de enfriamiento periféricos, gabinetes de mangueras e hidrantes.
 - d. Equipo generador y de aplicación de espuma contra incendio (a base de líquido espumante Aqueous Film Foming Foam (AFFF)),
 - e. Extintores y
 - f. Sistema de protección contra incendios en cuartos cerrados.

Adicionalmente los tanques cuentan con detectores y arrestadores de fuego.

Por lo cual se determinó que el valor de esta variable sea **V13 = 1**.

- *Fuentes de alimentación eléctrica de emergencia (V14)*: no se contó con las herramientas suficientes para determinar el cumplimiento o incumplimiento con los apartados 8.7.1 y 8.13.1 de la NRF-048-PEMEX-2010, por lo que se decidió excluir esta variable del cálculo de vulnerabilidades.
- *Sistemas de alerta hidrometeorológica (V15)*: las instalaciones del “Centro Embarcador Bajos la Gallega” llevan un seguimiento a los pronósticos del estado del tiempo proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Por ello **V15 = 3**.
- *Capacitaciones al personal (V16)*: en la visita a las instalaciones de almacenamiento de combustibles el personal afirmó impartir y recibir capacitaciones, sin embargo, no se tuvo el acceso para evaluar qué tan dirigidas están a la capacitación de emergencias tecnológicas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos, por lo que se decide no considerar esta variable en el cálculo de vulnerabilidades.

- *Simulacros (V17)*: al igual que en la variable anterior, se decide excluir el cálculo de ésta por falta de información, puesto que a pesar de que el personal afirma realizar simulacros, no se sabe si hay dirigidos a emergencias tecnológicas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos.
- *Planes de emergencia (V18)*: no se tuvo el acceso para corroborar que el plan de atención a emergencias del “Centro Embarcador Bajos la Gallega” contemple accidentes químicos asociados a fenómenos hidrometeorológicos, por lo que también se decide excluir la variable V18 del cálculo de vulnerabilidades.
- *Servicios de bomberos (V19)*: la instalación cuenta con su propio equipo de bomberos para responder ante una emergencia y también con uno de ayuda mutua ubicado a 6 km dentro de las instalaciones de la APIVER, por lo que a esta variable se le asigna el valor de $V19 = 1$.

Como todos los tanques de almacenamiento se ubican en la misma instalación el valor del factor de preparación y respuesta de emergencias es $F4 = 3$. Es importante reafirmar que la exclusión de unas variables pertenecientes a la evaluación de este factor fue con la intención de no afirmar su existencia o inexistencia solo por no haber contado con información suficiente, ya que se estaría cayendo en un error en ponderar algo que no se pudo evidenciar por motivos de coordinación.

4.2.3 Vulnerabilidad química

Es importante señalar que a pesar de que la metodología considerada en esta sección está dirigida para clasificar peligros químicos, en este estudio se enfoca hacia la evaluación de vulnerabilidades, puesto que se están considerando los daños asociados a fenómenos hidrometeorológicos (peligro) y las características de las sustancias pueden hacer susceptibles a los sistemas evaluados (tanques) y generar consecuencias negativas.

El tanque TV-6 queda excluido en la evaluación de la vulnerabilidad química, ya que éste se encuentra vacío.

Para determinar el cálculo del *factor físico (F5)* se procedió primero a establecer la categoría de líquidos inflamables (V20) a la que pertenecen el Diésel y la gasolina.

- *Líquidos inflamables (V20)*: en la Tabla 4.7 se muestra la clasificación de la gasolina y el Diésel conforme a su punto de inflamación. Donde la gasolina contempla un peligro físico de categoría 2 que se refiere a “líquidos y vapores muy inflamables” y el Diésel pertenece a la categoría 3 “líquidos y vapores inflamables”.

Por lo tanto en los tanques TV-1 a TV-3 se les clasificó como $F5 = V20 = 4$, mientras que los tanques TV-4 y TV-5, $F5 = V20 = 3$.

En cuanto al *factor salud (F6)* al igual que en el factor físico (F7), primero se prosiguió a clasificar las mezclas de gasolina y Diésel como se describen en la *Parte 3* del “Libro púrpura”. Esta clasificación se muestra en la Tabla 4.8.

- *Toxicidad aguda (V21)*: para el caso de los tanques TV-1 a TV-3 el cálculo de la variable fue el promedio de los valores de vulnerabilidad asignados a la toxicidad aguda cutánea y por inhalación.

$$V21 = \frac{1 + 3}{2}$$

$$V21 = 2$$

Ya que la gasolina está clasificada con toxicidad aguda cutánea categoría 5 y toxicidad aguda por inhalación categoría 3.

Por otra parte, el Diésel cuenta con toxicidad aguda cutánea categoría 5 y toxicidad aguda por inhalación categoría 4. Por lo cual, el cálculo de la V21 en los tanques TV-4 y TV-5 es el siguiente:

$$V21 = \frac{1 + 2}{2}$$

$$V21 = 1.5$$

- *Corrosión/irritación cutánea (V22)*: tanto la gasolina y el Diésel están clasificados con categoría 2, por ello los tanques TV-1 a TV-5 cuentan con **V22 = 2**.
- *Mutagenicidad en células germinales (V23)*: esta variable solo se consideró en los tanques TV-1 a TV-3 porque la gasolina esta clasificada en la categoría 1B y no se encontró pruebas suficientes para clasificar al Diésel, por lo que en los tanques TV-1 a TV-3, **V23 = 3**.
- *Carcinogenicidad (V24)*: la gasolina se clasifica como carcinógeno de categoría 1A, mientras el Diésel como de categoría 2, por lo que los tanques TV-1 a TV-3 cuentan con **V24 = 5** y los TV-4 y TV-5 con **V24 = 3**.
- *Toxicidad para la reproducción (V25)*: esta variable sólo se consideró en los tanques con almacenamiento de gasolina la cual se clasifica con categoría 2, ya que no se cuenta con información suficiente para clasificar el Diésel. Por ello **V25 = 1** en los tanques TV-1 a TV-3.
- *Toxicidad específica en organos diana, exposición única (STOT-SE) (V26)*: la gasolina se clasifica con categoría 3, mientras el Diésel con categoría 1, por lo cual a los tanques TV-1 a TV-3 se les asigna **V26 = 2** y los TV-4 y TV-5, **V26 = 5**.
- *Toxicidad específica en organos diana, exposiciones repetidas (STOT-RE) (V27)*: en este caso solo se clasificó a los tanques con contenido de Diésel, ya que la gasolina no entra

en esta clasificación. El Diésel pertenece a la categoría 2 por lo que $V27 = 1$ en los tanques TV-4 y TV-5.

- *Peligro por aspiración (V28)*: ambas mezclas (gasolina y Diésel) pertenecen a la categoría 1, por ello los tanques del TV-1 al TV-5 cuentan con $V28 = 5$.

De acuerdo con los cálculos el factor salud (F6) en los tanques TV-1 a TV-3 es igual a $F6 = 600$, mientras en los tanques TV-4 y TV-5 a $F6 = 225$. Por lo cual se observa que los tanques que almacenan gasolina pueden provocar mayores consecuencias a la salud que los que contienen Diésel, en caso de presentarse una emergencia tecnológica.

Finalmente, para cálculo del *factor medio ambiente (F7)* se consideró la $V29$.

- *Toxicidad aguda para el medio ambiente acuático (V29)*: Esta variable se evaluó sólo en los tanques TV-1 a TV-3 puesto que tienen gasolina y está clasificada como crónico 2, mientras que para el Diésel hay insuficiencia de datos para clasificarlo (Tabla 4.9). Por ello para el primer grupo (tanques TV-1 a TV-3) $V29 = 4$.

De esta forma $F7 = 4$.

El resumen de los valores asignados a cada variable considerada para el cálculo del IV se muestra en la Tabla 4.10. En cuanto a los resultados del cálculo del IV para cada uno de los tanques se muestran en la Tabla 4.11, en donde se observan tres grupos diferenciados por la sustancia que almacenan.

Posterior a ello se calcularon las categorías de vulnerabilidad con los percentiles 25%, 50% y 75% de los IV, con lo que se determinó la categoría de vulnerabilidad de cada grupo. Donde en el “Grupo 1” se encuentran los tanques de almacenamiento de gasolina (TV-1, TV-2 y TV-3) con una vulnerabilidad “alta”, en el “Grupo 2” los de Diésel (TV-4 y TV-5) con “moderada” y en el “Grupo 3” el tanque TV-6 que se encuentra fuera de servicio con una “baja” vulnerabilidad (Tabla 4.12).

Tabla 17. Clasificación de peligro físico para la gasolina y Diésel

<i>Mezcla</i>	<i>Clase de peligro físico</i>	<i>Información</i>	<i>Categoría</i>	<i>Pictograma SGA</i>	<i>Palabra de advertencia</i>	<i>Indicación de peligro</i>	<i>Código de indicación de peligro</i>
Gasolina	Clase III*	Punto de inflamación: -37.78 °C Punto de ebullición: 60 a 198.89 °C	2		Peligro	Líquidos y vapores muy inflamables	H225
Diésel	Clase III*	Punto de inflamación: 51.66 °C	3		Atención	Líquidos y vapores inflamables	H226

*Líquidos inflamables.

Fuente: NOAA y EPA, 2018; ONU, 2017.

Tabla 18. Clasificación de peligro a la salud para la gasolina y el Diésel

<i>Mezcla</i>	<i>Peligro a la salud</i>	<i>Información</i>	<i>Clasificación</i>	<i>Pictograma SGA</i>	<i>Palabra de advertencia</i>	<i>Indicación de peligro</i>	<i>Código de indicación de peligro</i>
Gasolina	Toxicidad aguda	DL ₅₀ /oral/rata: > 5000 mg/kg	—	—	—	—	—
		DL ₅₀ /cutánea/conejo: > 2000 mg/kg	Categoría 5	—	Atención	Puede ser nocivo en contacto con la piel	H313
		CL ₅₀ /inhalación vapor/4h/rata: > 5.61 mg/l	Categoría 3		Peligro	Tóxico si se inhala	H331
	Corrosión/irritación cutánea	Irritante en piel Conejo	Categoría 2		Atención	Provoca irritación cutánea	H315
	Lesiones oculares graves/irritación ocular	No irritante para los ojos Conejo	—	—	—	—	—
	Sensibilización respiratoria o cutánea	No sensibilizante en piel Cobaya	—	—	—	—	—

Mutagenicidad en células germinales	Composición: Benceno $\geq 0.1\%$	Categoría 1B		Peligro	Puede provocar efectos genéticos por inhalación	H340
Carcinogenicidad	Composición: Benceno $\geq 0.1\%$	Categoría 1A		Peligro	Puede provocar cáncer por inhalación	H350
Toxicidad para la reproducción	Composición: Tolueno $\geq 3\%$ n-Hexano $\geq 3\%$	Categoría 2		Atención	Susceptible de perjudicar la fertilidad o dañar al feto	H361
Toxicidad específica en órganos diana, exposición única (STOT-SE)	Composición: Tolueno $\geq 3\%$ n-Hexano $\geq 3\%$	Categoría 3		Atención	Puede provocar somnolencia o vertigo	H336
Toxicidad sistemática específica de órganos diana, exposiciones repetidas (STOT-RE)	$> 1 \text{ mg/L/6 h/90 d}$ Inhalación/rata	—	—	—	—	—

| CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

	Peligro por aspiración	Viscosidad cinemática: < 7 mm ² /s a 40°C	Categoría 1		Peligro	Puede ser mortal en caso de ingestión y de penetración en las vías respiratorias	H304
Diésel	Toxicidad aguda	DL ₅₀ /oral/rata: 7600 mg/kg	—	—	—	—	—
		DL ₅₀ /cutánea/conejo: > 4300 mg/kg	Categoría 5	—	Atención	Puede ser nocivo en contacto con la piel	H313
		CL ₅₀ /inhalación polvos y nieblas/4h/rata: > 4.1 mg/l	Categoría 4		Atención	Nocivo si se inhala	H332
	Corrosión/irritación cutánea	Irritante en piel Conejo	Categoría 2		Atención	Provoca irritación cutánea	H315
	Lesiones oculares graves/irritación ocular	No irritante para los ojos Conejo	—	—	—	—	—
	Sensibilización respiratoria o cutánea	No sensibilizante en piel Cobaya	—	—	—	—	—
	Mutagenicidad en células germinales	Insuficiente	—	—	—	—	—

Carcinogenicidad	Susceptible de afectar a médula ósea.	Categoría 2		Atención	Susceptible de provocar cáncer	H351
Toxicidad para la reproducción	Insuficiente	—	—	—	—	—
Toxicidad específica en órganos diana, exposición única (STOT-SE)	> 5 mg/L/4 h <small>Inhalación/rata</small>	Categoría 1		Peligro	Puede provocar daños en los órganos	H370
Toxicidad sistemática específica de órganos diana, exposiciones repetidas (STOT-RE)	> 0.2 mg/L/6 h/90 d <small>Inhalación/rata</small>	Categoría 2		Atención	Puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas	H373
Peligro por aspiración	Viscosidad cinemática: < 2 – 4.5 mm ² /s a 40°C	Categoría 1		Peligro	Puede ser mortal en caso de ingestión y de penetración en las vías respiratorias	H304

Fuente: Bp, 2020a; 2020b; PEMEX, 2019; Mercuria Energy Trading, 2015a; 2015b; EPA, 2000; ILO, 2020.

Tabla 19. Clasificación de peligro al medio ambiente para la gasolina y el Diésel

<i>Mezcla</i>	<i>Peligro</i>	<i>Información</i>	<i>Clasificación</i>	<i>Pictograma SGA</i>	<i>Palabra de advertencia</i>	<i>Indicación de peligro</i>	<i>Código de indicación de peligro</i>
Gasolina	Peligro para el medio Ambiente acuático	Peligro a largo plazo (crónico) CE _{50/crustáceos/96 h} 7.6 mg/L	Crónico 2		—	Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos	H411
Diésel	Peligro para el medio Ambiente acuático	Peligro agudo (corto plazo) Insuficiente	—	—	—	—	—

Fuente: Mercuria Energy Trading, 2015a.

Tabla 20. Valores asignados a las variables consideradas para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad (IV)

<i>Vulnerabilidad</i>	<i>No. Variable o Factor</i>	<i>Nombre de Variable o Factor</i>	<i>Elemento expuesto</i>					
			<i>TV-1</i>	<i>TV-2</i>	<i>TV-3</i>	<i>TV-4</i>	<i>TV-5</i>	<i>TV-6</i>
Estructural	V1	Elevación	4	4	4	4	4	4
	V2	Orientación	2.375	2.375	2.375	2.375	2.375	2.375
	V3	Distancia de la línea de costa	3	3	3	3	3	3
	V4	Geomorfología	5	5	5	5	5	5
	F1	Ubicación	142.5	142.5	142.5	142.5	142.5	142.5
	V5	Anclaje	1	1	1	1	1	1
	V6	Cantidad almacenada promedio	1	1	1	1	1	5
	V7	Anillos de refuerzo	1	1	1	1	1	1
	V8	Densidad de la sustancia almacenada	4	4	4	3	3	—
	V9	Presión crítica	5	5	5	5	5	5
	F2	Capacidad resistiva	20	20	20	15	15	25
	V10	Grado de corrosión	4	4	4	4	4	4
	F3	Estado técnico	4	4	4	4	4	4
	Funcional	V11	Sistemas de monitoreo y control	1	1	1	1	1
V12		Alcantarillado	1	1	1	1	1	1
V13		Sistemas contra incendios	1	1	1	1	1	1
V14		Fuentes de alimentación eléctrica de emergencia	—	—	—	—	—	—

	V15	Sistemas de alerta hidrometeorológica	3	3	3	3	3	3
	V16	Capacitaciones al personal	—	—	—	—	—	—
	V17	Simulacros	—	—	—	—	—	—
	V18	Planes de emergencia	—	—	—	—	—	—
	V19	Servicios de bomberos	1	1	1	1	1	1
	F4	Preparación y respuesta de emergencias	3	3	3	3	3	3
Química	V20	Líquidos inflamables	4	4	4	3	3	—
	F5	Físico	4	4	4	3	3	—
	V21	Toxicidad aguda	2	2	2	1.5	1.5	—
	V22	Corrosión/Irritación	2	2	2	2	2	—
	V23	Mutagenicidad en células germinales	3	3	3	—	—	—
	V24	Carcinogenicidad	5	5	5	3	3	—
	V25	Tóxico para la reproducción	1	1	1	—	—	—
	V26	Toxicidad en órganos específica diana, exposición única	2	2	2	5	5	—
	V27	Toxicidad en órganos específica diana, exposiciones repetidas	—	—	—	1	1	—
	V28	Peligro por aspiración	5	5	5	5	5	—
	F6	Salud	600	600	600	225	225	—
	V29	Toxicidad aguda para el medio ambiente acuático	4	4	4	—	—	—
	F7	Medio ambiente	4	4	4	—	—	—

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**21. Cálculo del índice de vulnerabilidad (IV)**

<i>Elementos expuestos</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>n</i>	<i>IV</i>	<i>Grupo de tanque</i>
TV-1	142.5	20	4	3	4	600	4	24	3698.65	1
TV-2	142.5	20	4	3	4	600	4	24	3698.65	
TV-3	142.5	20	4	3	4	600	4	24	3698.65	
TV-4	142.5	15	4	3	3	225	—	22	887.12	2
TV-5	142.5	15	4	3	3	225	—	22	887.12	
TV-6	142.5	25	4	3	—	—	—	14	55.26	3

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**22. Categorías de vulnerabilidad**

<i>Categoría</i>	<i>Intervalos de IV</i>	<i>Grupo de tanque</i>
Baja	$IV < 679.16$	Grupo 3
Moderada	$679.16 > IV \leq 2292.89$	Grupo 2
Alta	$2292.89 > IV \leq 3698.65$	Grupo 1
Muy alta	$IV > 3698.65$	—

4.3 Escenarios de riesgo

4.3.1 Escenario de emisión por evaporación de un derrame

Como se indica en la metodología se generaron dos escenarios de este modelo, los cuales se observaron a cuatro diferentes alturas.

Los datos para generar los escenarios (1 y 2) se muestran en la Figura 4.21 y 4.22 y se describen a continuación:

DATOS DE LA SUSTANCIA					
Nombre	BENCENO (BENZENE)			Sinónimos	
No. CAS	71-43-2			BENZOL	
Nombre CAS	BENZENE			BENZOLENE	
Nombre IUPAC	BENZENE			BICARBURET OF HYDROGEN	
Familia	N-ALQUILBENCENOS (N-ALKYLBENZENES)			CARBON OIL	
Subfamilia	()			COAL NAPHTHA	
Fórmula	C6H6			CYCLOHEXATRIENE	
Estructura	-CHCHCHCHCHCH-			MINERAL NAPHTHA	
				MOTOR BENZOL	
				PHENYL HYDRIDE	
				PYROBENZOLE	
PROPIEDADES DEL GAS DE EMISIÓN			CARACTERÍSTICAS DE LA EMISIÓN		
Peso molecular del gas fuente (kg/mol)	wms	0.0781	Sustancia emitida	BENCENO	
Capacidad calorífica del vapor a presión constante (J/kg- K)	cps	1050.16	Tipo de emisión	Emisión por evaporación de un derrame	
Temperatura del gas fuente (K)	ts	0.0	Tasa de emisión de la masa fuente (kg/s)	qs	0.23
Densidad del gas fuente (kg/m3)	rhos	2.69	Duración de la fuente continua (s)	tsd	60000
Temperatura del punto de ebullición (K)	tbp	353.2	Masa de la fuente continua (kg)	qtcs	13800.00
Fracción de masa del líquido	cmado	0.00	Masa de la fuente instantánea (kg)	qtis	0.00
Capacidad calorífica del líquido (J/kg- K)	cpsl	1925.43	Área de la fuente (m2)	as	62.46000
Calor de vaporización (J/kg)	dhe	394352.84	Velocidad del vapor vertical (m/s)	ws	0.00
Densidad del líquido fuente (kg/m3)	rhosl	815.11	Ancho medio de la fuente (m)	bs	3.95
Constante de presión de saturación	spa	10.49	Altura de la fuente (m)	hs	0.00
Constante de presión de saturación	spb	- 1.00	Velocidad del vapor horizontal (m/s)	us	0.00
Constante de presión de saturación	spc	0.00			
PARÁMETROS DE CAMPO			PROPIEDADES METEOROLÓGICAS AMBIENTALES		
Tiempo promedio de concentración (s)	tav	1800	Peso molecular del aire ambiental (kg)	wmae	0.03
Altura de capa de mezclado (m)	hmx	1040.00	Capacidad calorífica del aire a presión constante (J/kg- K)	cpaa	1023.25
Distancia máxima viento abajo (m)	xffm	1000.00	Densidad del aire ambiental (kg/m3)	rhoa	1.16
	zp(1)	0.00	Altura de medición ambiental (m)	za	10.00
Altura de medida de concentración (m)	zp(2)	1.00	Presión atmosférica ambiental	pa	101325.00
	zp(3)	2.00	Velocidad del viento ambiental (m/s)	ua	3.50
	zp(4)	5.00	Temperatura ambiental (K)	ta	301.2
Parámetros Adicionales			Humedad relativa (%)	rh	83
Multiplicador de subpaso	ncalc	1	Velocidad de fricción ambiental (m/s)	ustr	0.57
Número de subpasos de cálculo	nssm	3	Valor de estabilidad atmosférica	stab	4
Aceleración de la gravedad (m/s2)	grav	9.81	Longitud inversa de Monin-Obukhov (1/m)	ala	0.000
Constante de los gases (j/mol- K)	rr	8.3143	Altura de rugosidad de superficie (m)	z0	0.80
Constante de Von Karman	xk	0.4100			

Figura 4.3. Datos ingresados al modelo emisión de un derrame en evaporación, escenario 1

DATOS DE LA SUSTANCIA					
Nombre	BENCENO (BENZENE)			Sinónimos	
No. CAS	71-43-2			BENZOL	
Nombre CAS	BENZENE			BENZOLENE	
Nombre IUPAC	BENZENE			BICARBURET OF HYDROGEN	
Familia	N-ALQUILBENCENOS (N-ALKYLBENZENES)			CARBON OIL	
Subfamilia	0			COAL NAPHTHA	
Fórmula	C6H6			CYCLOHEXATRIENE	
Estructura	-CHCHCHCHCHCH-			MINERAL NAPHTHA	
				MOTOR BENZOL	
				PHENYL HYDRIDE	
				PYROBENZOLE	
PROPIEDADES DEL GAS DE EMISIÓN			CARACTERÍSTICAS DE LA EMISIÓN		
Peso molecular del gas fuente (kg/mol)	wms	0.0781	Sustancia emitida	BENCENO	
Capacidad calorífica del vapor a presión constante (J/kg- K)	cps	1062.71	Tipo de emisión	Emisión por evaporación de un derrame	
Temperatura del gas fuente (K)	ts	0.0	Tasa de emisión de la masa fuente (kg/s)	qs	0.12
Densidad del gas fuente (kg/m3)	rhos	2.69	Duración de la fuente continua (s)	tsd	60000
Temperatura del punto de ebullición (K)	tbp	353.2	Masa de la fuente continua (kg)	qtcs	7200.00
Fracción de masa del líquido	cmado	0.00	Masa de la fuente instantánea (kg)	qtis	0.00
Capacidad calorífica del líquido (J/kg- K)	cpsl	1925.43	Area de la fuente (m2)	as	62.46000
Calor de vaporización (J/kg)	dhe	394352.84	Velocidad del vapor vertical (m/s)	ws	0.00
Densidad del liquido fuente (kg/m3)	rhosl	815.11	Ancho medio de la fuente (m)	bs	3.95
Constante de presión de saturación	spa	10.49	Altura de la fuente (m)	hs	0.00
Constante de presión de saturación	spb	- 1.00	Velocidad del vapor horizontal (m/s)	us	0.00
Constante de presión de saturación	spc	0.00			
PARÁMETROS DE CAMPO			PROPIEDADES METEOROLÓGICAS AMBIENTALES		
Tiempo promedio de concentración (s)	tav	1800	Peso molecular del aire ambiental (kg)	wmae	0.03
Altura de capa de mezclado (m)	hmx	260.00	Capacidad calorífica del aire a presión constante (J/kg- K)	cpaa	1023.25
Distancia máxima viento abajo (m)	xffm	1000.00	Densidad del aire ambiental (kg/m3)	rhoa	1.16
	zp(1)	0.00	Altura de medición ambiental (m)	za	10.00
Altura de medida de concentración (m)	zp(2)	1.00	Presión atmosférica ambiental	pa	101325.00
	zp(3)	2.00	Velocidad del viento ambiental (m/s)	ua	1.50
	zp(4)	5.00	Temperatura ambiental (K)	ta	301.2
Parámetros Adicionales			Humedad relativa (%)	rh	83
Multiplicador de subpaso	ncalc	1	Velocidad de fricción ambiental (m/s)	uastr	0.11
Número de subpasos de cálculo	nssm	3	Valor de estabilidad atmosférica	stab	6
Aceleración de la gravedad (m/s2)	grav	9.81	Longitud inversa de Monin-Obukhov (1/m)	ala	0.040
Constante de los gases (j/mol- K)	rr	8.3143	Altura de rugosidad de superficie (m)	z0	0.80
Constante de Von Karman	xk	0.4100			

Figura 4.44. Datos ingresados al modelo emisión de un derrame en evaporación, escenario 2

1. Sustancia de interés.

1.1. *Título del modelo:* se colocaron las principales características del derrame, donde se especificó como sustancia de interés al **benceno** (ver en 1.2 Elección de la sustancia), un área del derrame de **62.46 m²** (el cálculo se describe en el punto 2.5 Área de la fuente), la temperatura ambiente de **28°C** (se describe en el punto 3.2 Temperatura ambiente) y la fecha de simulación de la emergencia para el **17 de junio del 2020**.

- 1.2. *Elección de la sustancia:* a pesar de ser preferible la modelación de la mezcla de interés en su totalidad (ASEA, 2018), por falta de datos específicos de las propiedades de la gasolina, se eligió modelar el **benceno** por sus características tóxicas y carcinógenas (EPA, 2000) y por ser un compuesto presente en la gasolina en concentraciones de hasta el 2% (PEMEX, 2019).
- 1.3. *Propiedades químicas de la sustancia:* el programa SCRI contiene una base de datos que integra las propiedades de varias sustancias, entre ellas el benceno, por lo que no se requirió ingresar información adicional de éste (Figura 4.21 y 4.22).
- 1.4. *Concentraciones de peligro:* se seleccionaron los Niveles Guía de Exposición Aguda (Acute Exposure Guideline Levels AEGL) para benceno, ya que están considerados dentro de las mejores guías para evaluar la exposición de las personas durante eventos de corto plazo (Garza-Ayala, 2015).

Se eligió el **AEGL-3** (color rojo) como la concentración que implica mayores consecuencias a la salud, seguida del **AEGL-2** (color azul) y del **AEGL-1** (color verde) para periodos de exposición de 30 min.

Las concentraciones de AEGL para benceno se muestran en Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Concentraciones de AEGL para benceno

<i>AEGL</i>	<i>Concentración en 10 min, ppm</i>	<i>Concentración en 30 min, ppm</i>	<i>Concentración en 60 min, ppm</i>	<i>Concentración en 4 h, ppm</i>	<i>Concentración en 8 h, ppm</i>
1	130	73	52	18	9.0
2	2,000*	1,100	800	400	200
3	**	5,600*	4,000*	2,000*	990

Fuente: EPA, 2018.

LEL: 14,000 ppm

* = $\geq 10\%$ LEL; ** = 50% LEL

AEGL-3 10 min = ** 9,700 ppm

Para los valores indicados con * deben tenerse en cuenta el peligro de explosión.

Para los valores indicados como ** deben tenerse en cuenta condiciones extremas de peligro de explosión.

2. Parámetros de emisión.

2.1. *Tipo de fuente:* se seleccionó la opción de **emisión por evaporación de un derrame**.

2.2. *Duración de la emisión:* se seleccionó una **emisión continua**.

2.3. *Posición de la fuente:* como se trata de una fuente a nivel de piso, esta se encuentra localizada en las coordenadas $x = 0$, $y = 0$ y $z = 0$.

2.4. *Tasa de emisión:* se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$E_{pool} = 6.94 \times 10^{-7} (1 + 0.0043(T_2 - 273.15)^2) U r^{0.75} A_p M \frac{p_v}{p_{vh}}$$

Como se realizaron dos escenarios (como se describe en la metodología en el punto 3. Escenario meteorológico) con diferentes velocidades de viento, se procedió a calcular la tasa de emisión para cada uno en una hoja de cálculo de excel. Por lo cual $E_{pool1} = 0.23 \text{ kg/s}$ (velocidad de viento 3.5 m/s) y $E_{pool2} = 0.23 \text{ kg/s}$ (velocidad de viento 1.5 m/s).

2.5. *Área de la fuente:* el área del dique donde se encuentran los tanques de gasolina equivalen a 3,122.81 m² sin considerar el área ocupada por cada tanque, esta cantidad se multiplicó por el 2% para calcular el área que contemplaría la extensión del benceno en el derrame, por lo cual se determinó que el área de la fuente es de **62.46 m²**.

2.6. *Alturas de concentración:* las cuatro alturas seleccionadas fueron $z_1 = 0 \text{ m}$ ya que representa la altura a nivel de suelo, $z_2 = 1 \text{ m}$, $z_3 = 2 \text{ m}$, z_2 y z_3 se eligieron para determinar las concentraciones de exposición considerando la altura promedio de las personas y $z_4 = 5 \text{ m}$, este se eligió como un valor superior a la altura del muro perimetral del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”. Sin embargo, se decidió presentar los resultados de z_1 , z_2 y z_4 , por la similitud que tiene z_3 con z_1 y z_2 .

3. Escenario meteorológico.

3.1. *Estabilidad atmosférica:* como se menciona en la metodología para el escenario 1 se eligió una **estabilidad atmosférica D** y para el escenario 2 una **estabilidad atmosférica F**, esta condición es importante para identificar los niveles de concentración de contaminantes ya que de ello depende su dispersión, de acuerdo con los resultados en el escenario 2 los radios de afectación son más amplios en comparación con los del primer escenario, esto se da porque en el segundo se tiene presencia de inversiones térmicas, lo cual inhibe la mezcla vertical de los contaminantes y hace que se queden concentrados.

3.2. *Temperatura ambiente:* se ingresó una temperatura de **28°C**, que es la temperatura promedio máxima diaria monitoreada en el mes de junio 2018 en la estación meteorológica APIVER-UNAM.

3.3. *Altura del anemómetro:* la velocidad de viento corresponde a una altura de **10 m**.

3.4. *Velocidad de viento:* en el escenario 1 se ingresó el promedio de velocidad de viento del mes de junio de los datos históricos 2005 a 2018 proporcionados por el modelo

Wavewatch III mostrados en la Figura 4.11, la cual equivale a **3.5 m/s**. Mientras que para el escenario 2 se seleccionó una velocidad de **1.5 m/s**.

- 3.5. *Humedad relativa*: para ambos escenarios (1 y 2) se seleccionó la humedad relativa promedio del mes de junio del año 2018 monitoreada en la estación meteorológica APIVER-UNAM, la cual es de **83%**.
- 3.6. *Rugosidad del terreno*: se seleccionó la rugosidad del terreno que representa un área industrial, esta es de **0.8**.
- 3.7. *Dirección del viento*: para ambos escenarios se designó la dirección de viento con un ángulo de **240°** ya que de acuerdo con la Figura 4.11 los vientos dominantes provienen de un ángulo de **60°**.

En la Figuras 4.23 a 4.25 se muestran los resultados de la modelación del escenario 1 con exposiciones de benceno de 30 min, donde se observa lo siguiente:

- No se tienen diferencias significativas entre los radios de afectación de benceno en las alturas $z_1 = 0$ m y $z_2 = 1$ m.
- El máximo radio de afectación es de 118.7 m con altura $z_1 = 0$ m, esta área deja libre a las oficinas donde se encuentra regularmente el personal, al punto de reunión de emergencias y a la salida de la instalación. Este radio de afectación cuenta con una concentración de 73 ppm de benceno representado por el AEGL-1 en color verde, es decir una concentración que implica efectos transitorios y reversibles en la población una vez cesa la exposición.
- El máximo radio de afectación representado por el AEGL-2 en color azul es de 13.44 m en $z_1 = 0$ m y corresponde a 1,100 ppm de benceno, por lo que en esta área se pueden presentar efectos duraderos serios o irreversibles en la población o ver impedida su capacidad para escapar, sin embargo, no implica un alto riesgo a la salud del personal, ya que de acuerdo con la imagen satelital no es un área muy concurrida.
- No se llegan a percibir concentraciones letales de benceno equivalentes al AEGL-3 (5,600 ppm).
- La simulación con $z_4 = 5$ m de altura, en comparación con las simulaciones en $z_1 = 0$ m y $z_2 = 1$ m, muestra como al tratarse de emisiones de vapores más densos que el aire, al incrementarse la altura se disminuye la concentración del contaminante.



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..45. Escenario 1, $z_1 = 0$ m

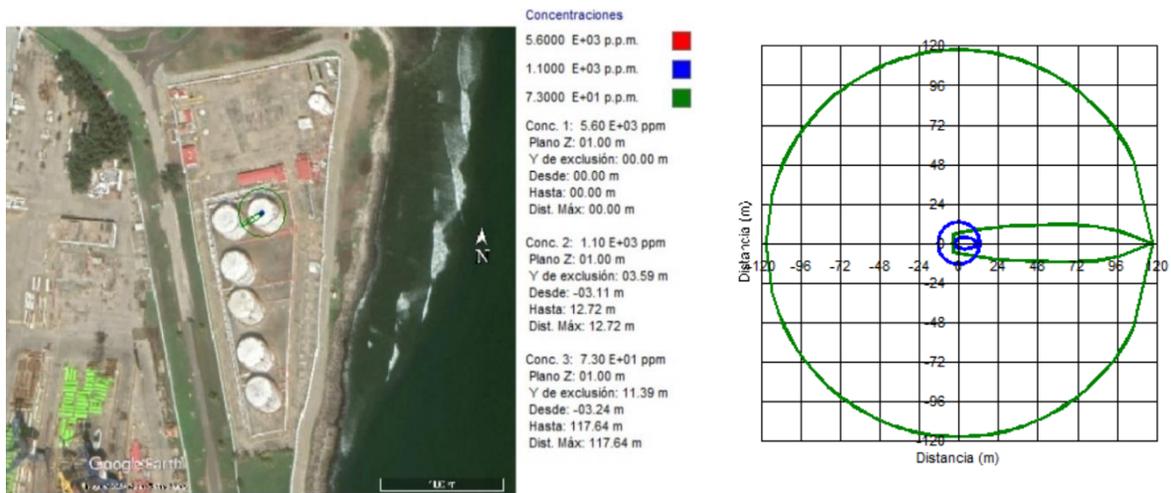


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..46. Escenario 1, $z_2 = 1$ m



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..47. Escenario 1, $z_4 = 5$ m

Por otra parte, las Figuras 4.26 a 4.28 muestran los resultados de la simulación del escenario 2 con exposición de benceno en 30 min, en donde se observa lo siguiente:

- Al igual que el escenario 1, no se tienen diferencias significativas en los radios de afectación de benceno en las alturas $z_1 = 0$ m y $z_2 = 1$ m.
- El máximo radio de afectación cuando se tiene una estabilidad atmosférica F que implica el caso más desfavorable para la dispersión del contaminante, llega a ser de hasta 323.35 m y se encuentra representada por el AEGL-1, con una concentración de benceno de 73 ppm, en $z_1 = 0$ m. Este radio es casi 3 veces más grande que el mayor radio de afectación obtenido con las condiciones del escenario 1 (118.7 m). Sin embargo, siguen estando fuera de este radio: el área de oficinas, el punto de reunión de emergencias y la salida de la instalación.
- En cuanto al AEGL-2 de benceno (1,100 ppm) mostrado en color azul, cuenta con un máximo radio de afectación de 27.76 m en $z_1 = 0$ m y al igual que en el escenario 1, tampoco se llegan a percibir radios con concentración equivalente al AEGL-3 de benceno (5,600 ppm).
- De la misma manera que en el escenario 1, la simulación con $z_4 = 5$ m de altura, muestra como al tratarse de emisiones de vapores más densos que el aire, al incrementarse la altura se disminuye la concentración del contaminante.

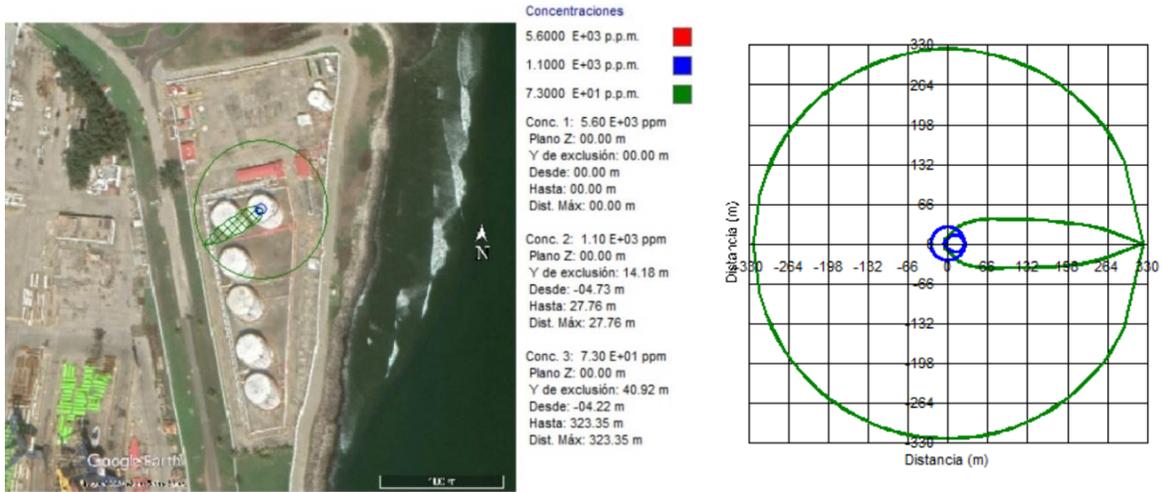


Figura 48. Escenario 2, $z_1 = 0$ m



Figura 49. Escenario 2, $z_2 = 1$ m



Figura 50. Escenario 2, $z_4 = 5$ m

4.4 Modelo de riesgo

De acuerdo con los criterios de aceptación de riesgo establecidos en la metodología se determinaron las categorías de riesgo químico asociado a peligro de viento extremo para los tanques de almacenamiento de combustibles del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, los resultados se muestran en la Tabla 4.14.

No se debe perder de vista que a pesar de mostrar resultados de peligro en función del viento, se ha decidido integrar de manera implícita el peligro de oleaje, por la escasas de su monitoreo en el sitio.

Tabla 4.14. Riesgo químico asociado a peligro de viento extremo en los tanques del "Centro Embarcador Bajos la Gallega"

<i>Elemento expuesto</i>		<i>Peligro</i>	<i>Vulnerabilidad</i>	<i>Riesgo</i>
<i>Tanque</i>	<i>Grupo</i>	<i>Peligro de viento extremo (P)</i>	<i>Vulnerabilidad de tanques</i>	<i>Categoría de Riesgo</i>
TV-1	1	Bajo	Alta	Moderado
TV-2				
TV-3				
TV-4	2		Moderada	Bajo
TV-5				
TV-6	3		Baja	Muy bajo

Lo anterior se debe a que los tanques TV-1, TV-2 y TV-3 (Grupo 1) que almacenan gasolina regular, están en P “bajo”, ya que de acuerdo con la Tabla 4.5 se observa que el Puerto de Veracruz tiene un P_r de 50 años para vientos de 175 km/h. Además de que en la Tabla 4.12 se les determinó una vulnerabilidad “alta”. Por lo que la intersección de la categoría de P (“bajo”) con la de la vulnerabilidad de los tanques del Grupo 1 (“alta”) indican en la matriz (Tabla 3.6) un riesgo químico “moderado” asociado a peligro de viento extremo.

Bajo este mismo esquema se determinó que los tanques TV-4 y TV-5 (Grupo 2) que almacenan Diésel están en riesgo químico “bajo” asociado a peligro de viento extremo, al mantener un P = “bajo” y vulnerabilidad = “moderada”.

Finalmente, el tanque TV-6 (Grupo 3), está en riesgo químico “muy bajo” asociado a peligro de viento extremo, puesto que presenta un P = “bajo” y vulnerabilidad = “baja”. Esto tiene lógica ya que no contienen alguna sustancia química, no obstante, no se considera un riesgo nulo, ya que no se debe perder de vista que su sola presencia representa un escenario de riesgo químico, al contar con la vulnerabilidad estructural más elevada del grupo de tanques evaluados, dominada por el factor de capacidad resistiva (F2).

Un ejemplo de escenario de riesgo químico en donde el tanque TV-6 puede tener lugar, es el accidente 4 mostrado en el ANEXO II, en donde un tanque se desplazó al ser vencida su capacidad resistiva por las cargas de viento y golpeó a otro cercano provocándole una abolladura (pandeo por impacto de proyectil) lo cual provocó su colapso.

Sin embargo, a pesar de que el uso de periodos de retorno se encuentra vigente en las normas de construcción de obras y de diseño de tanques (CMIC, 2015; USACE, 2015; DOF, 2018; API, 2012), se ha observado que cada vez es menos recomendable emplearlos para el cálculo de estimaciones de condiciones hidrometeorológicas extremas, ya que el clima no es estático y se puede caer en estimaciones erróneas al no actualizarse los datos (OMM, 2014; Young, et al., 2012).

Una alternativa a lo anterior, es realizar estimaciones empleando percentiles, donde se puede considerar como valores extremos a aquellos por arriba del percentil 90 de los datos observados. Por lo cual, tomando en cuenta los percentiles de las máximas velocidades de viento registradas en la estación meteorológica APIVER-UNAM mostrados en la Tabla 4.3, en el Puerto de Veracruz la intensidad del viento extremo está por arriba de los 13 m/s o 46.8 km /h (percentil 95) y la probabilidad de ocurrencia del máximo viento registrado (104.4 km/h o 29 m/s) es de 0.002%. Con lo que se puede determinar que el peligro de que ocurra un viento que provoque un impacto en los tanques de almacenamiento evaluados es remoto.

De acuerdo con la matriz de riesgo propuesta, los tanques comprendidos en el Grupo 1 (con almacenamiento de gasolina) estarían actualmente en “bajo” riesgo y los pertenecientes al Grupo 2 (con almacenamiento de Diésel) y 3 (fuera de operación) en riesgo “muy bajo”.

4.5 Propuestas de gestión

Las propuestas de gestión están referidas principalmente a las vulnerabilidades detectadas en los tanques de almacenamiento de combustibles ante peligros de **viento-oleaje**, ya que el peligro no puede ser reducido, sin embargo, sí se pueden adoptar herramientas que permitan estar mejor preparados en caso de su ocurrencia.

4.5.1 Vulnerabilidad estructural

En la evaluación de la vulnerabilidad estructural se analizaron tres factores: el factor de ubicación, de capacidad resistiva y de estado técnico. Estos factores integraron variables que pueden reducir su categoría de vulnerabilidad mediante algún cambio que no implica el rediseño de la instalación.

Una de estas variables es la cantidad almacenada promedio (V6), en donde la categoría de vulnerabilidad de esta variable puede reducirse significativamente para el tanque TV-6, ya que al encontrarse vacío es menos resistente ante el peligro de viento-oleaje. Por lo cual se recomienda se tome alguna de las siguientes acciones:

1. Habilitar el tanque y ponerlo nuevamente en operación.
2. Llenar el tanque con agua, tal como lo hacen algunas plantas en Estados Unidos previo a un pronóstico de viento-oleaje extremo, con la finalidad de que éste resista el evento (Godoy, 2007).
3. Desmantelar el tanque TV-6 de acuerdo con la ley.

La variable de grado de corrosión (V10) puede reducir su categoría de vulnerabilidad, si se establecen intervalos de tiempo más cortos en el mantenimiento al recubrimiento de los tanques, ya que la evidencia indica que en un periodo de tres años se observa en ellos un considerable grado de corrosión.

4.5.2 Vulnerabilidad funcional

En este caso existe una área de oportunidad para trabajos posteriores, ya que no se consiguió un acceso que permitiera evaluar con mayor precisión la preparación y respuesta ante emergencias del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, por lo que las variables excluidas en el cálculo de vulnerabilidad funcional pueden marcar una diferencia en los resultados obtenidos, principalmente aquellas que están dirigidas a la capacitación y concientización del personal en los efectos que se pueden presentar ante peligros hidrometeorológicos extremos.

Adicionalmente para la variable de sistemas de alerta hidrometeorológica (V15), se recomienda implementar sistemas de monitoreo de viento y oleaje in-situ, lo cual proporcionará las herramientas para una toma de decisiones oportuna en el área de trabajo.

Lo anterior puede resolverse de dos formas:

1. Contratar un servicio que proporcione los datos de monitoreo hidrometeorológico in-situ.
2. Instalar el sistema de monitorio hidrometeorológico operado por el mismo “Centro Embarcador Bajos la Gallega”.

Es importante señalar que la APIVER cuenta con un convenio con el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) que incluye el monitoreo meteorológico y de contaminantes atmosféricos in-situ, en donde los datos registrados están verificados por el Grupo Clima y Sociedad del Instituto de Geografía de la UNAM, además de que su mantenimiento en operación permite que se cuenten con bases de datos útiles en posteriores proyectos.

En la búsqueda de información de oleaje no se encontró una base de datos lo suficientemente larga de monitoreo in-situ, este tipo de monitoreo solo se ha realizado mediante campañas o periodos cortos de tiempo por la SEMAR, CFE y Protección Civil del estado de Veracruz, no obstante solo se consiguieron los datos obtenidos por la SEMAR, los cuales son importantes como una primera aproximación de las condiciones oceanográficas del sitio, sin embargo, esto no inhibe la necesidad de un monitoreo constante que registre eventos de diferentes magnitudes.

Estos hechos hacen hincapié en la oportunidad de generar bases de datos confiables que asistan en la evaluación de riesgos.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- De acuerdo con los resultados obtenidos, se aprueba la hipótesis de que el Puerto de Veracruz está en riesgo químico debido a las condiciones de vulnerabilidad de las zonas de almacenamiento de combustibles y a la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos (nortes y ciclones tropicales), que provocan vientos mayores a 160 km/h.
- Con base en el modelo de riesgo propuesto, los tanques de almacenamiento de gasolina ubicados en el “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, están en riesgo químico “moderado” asociado a peligro de viento-oleaje extremo, mientras los tanques con Diésel están en riesgo “bajo”.
- Conforme a los resultados, a pesar de que el área de estudio tiene un peligro “bajo” de condiciones de viento-oleaje extremo, las vulnerabilidades detectadas en la instalación del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, pueden reducirse mediante acciones que no implican el rediseño de la instalación, con la finalidad de disminuir su riesgo.
- Las condiciones de peligro de viento-oleaje dependen de las vulnerabilidades estructurales, funcionales y consecuencias químicas, en escenarios de emergencia de los tanques evaluados. Sin embargo, ya que estos se construyen, operan y mantienen bajo ciertas normas, se puede tener un rango aproximado de condiciones de viento-oleaje en donde se presentan las fallas.
- A partir de la información técnica del área de estudio y de las emergencias químicas en tanques de almacenamiento asociadas a condiciones de viento-oleaje, se determinaron los siguientes factores de vulnerabilidad: ubicación, capacidad resistiva, estado técnico, preparación y respuesta de emergencias, físico, salud y medio ambiente.
- De acuerdo con las simulaciones desarrolladas en el programa SCRI Modelos, en un escenario emisión de benceno a causa de un derrame de gasolina, no se tendrían radios de afectación que impliquen peligro de letalidad al personal que trabaja en la instalación del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, en periodos de exposición de 30 min. Puesto que, en este tiempo no se alcanzan concentraciones mayores a 5,600 ppm de benceno (AEGL-3).
- Con los resultados de las simulaciones en el programa SCRI Modelos, también se identifica que el riesgo a la salud del personal del “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, por exposición a benceno, es “baja”, porque las oficinas, el punto de reunión de emergencias y la salida de la instalación, están fuera de las áreas que cuentan con concentraciones de benceno iguales al AEGL-1-30 min (73 ppm) y al AEGL-2-30 min (1,100 ppm).

5.2 Recomendaciones

- Ejecutar una de las siguientes opciones para el tanque TV-6 que se encuentra actualmente fuera de operación en el “Centro Embarcador Bajos la Gallega”: 1) se rehabilite y ponga nuevamente en operación, 2) se llene con agua para incrementar su capacidad resistiva, o 3) se desmantele.
- Verificar y en caso necesario actualizar el plan de atención a emergencias para el “Centro Embarcador Bajos la Gallega”.
- Dar mayor importancia a la instalación y al mantenimiento de sitios de monitoreo hidrometeorológico, como boyas oceanográficas, debido a que el análisis del peligro hidrometeorológico en el Puerto de Veracruz, revela que existe una carencia de bases de datos representativas y de calidad.
- Se requiere de un esfuerzo multidisciplinario para mejorar los reportes de las bases de datos de accidentes de instalaciones que almacenan productos químicos, así como sus consecuencias, ya que las actuales omiten información específica del peligro cuando proviene de un fenómeno natural, como puede ser un fenómeno hidrometeorológico.
- Realizar escenarios de incendio y explosión en posteriores estudios de riesgo de este tipo en el “Centro Embarcador Bajos la Gallega”, para determinar los radios de afectación provocados por el efecto dominó del peligro de viento-oleaje extremo y las características químicas de las sustancias almacenadas.
- Considerar por parte de APIVER y las cesionarias responsables del manejo de combustibles, este estudio de riesgo en las instalaciones de almacenamiento de petrolíferos del Nuevo Recinto Portuario de Veracruz.
- Actualizar los criterios recomendados para la estimación de condiciones hidrometeorológicas extremas, en las normas de diseño y construcción, ya que se ha demostrado que el clima no se comporta de forma estática y que es posible que las industrias sensibles a las condiciones climáticas estén adoptando decisiones importantes sobre información que pueda haber quedado obsoleta.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

Acevedo-Rosas, F. y Luna-Díaz-Peón, A. 2006. Principales fenómenos meteorológicos que afectaron al Estado de Veracruz en el año 2005. En: L. Calatayud-Duhalt, ed. 2006. *Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz*. Xalapa: Universidad Veracruzana. pp 53-67.

Administración Portuaria Integral Lázaro Cárdenas, 2017. *Terminales portuarias del pacífico logra operación de carga fraccionada en el puerto Lázaro Cárdenas*. [fotografía electrónica]. Disponible en:

<<https://www.puertolazarocardenas.com.mx/plc25/noticias/790-2017-tpp-operacion>>

[Consultado 04 noviembre 2018]

Aileni, K., Prasanna, P. y Jain, P.C., 2017. Buckling Analysis of Ring Stiffened Circular Cylinders Using ANSYS. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 5 (x), pp. 2287-2296.

Al-Mithin, A., Sardesai, V., Al-Harbi, B., Srinivasa, H. y Sattar, A., 2011. Risk Base Inspection (RBI) of aboveground storage tanks to improve asset integrity. En: IPTC Programme Committee, *International Petroleum Technology Conference*. Bangkok, Thailand, 7-9 febrero 2012. Texas: IPTC.

Antonioni, G., Landucci, G., Necci, N., Gheorghiu D. y Cozzani, V., 2015. Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods. *Reliability Engineering and System Safety*. [revista electrónica]. 142 (0951-8320), pp. 334–345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2015.05.020>

API, 2003. API-RP-571, *Damage mechanisms affecting fixed equipment in the refining industry*. Washington: API Publishing Services.

API, 2005. API 653, *Inspección, Reparación, Alteración, y Reconstrucción de tanques*. Washington: API Publishing Services.

API, 2012. API 650, *Welded steel tanks for oil storage*. Washington: API Publishing Services.

APIVER, 2011. *Veracruz Port Handbook 2012-13*. Colchester: Land & Marine Publications Ltd. [pdf]. Disponible en:

<https://issuu.com/landmarine/docs/veracruz_port_handbook_2012-13> [Consultado 04 noviembre 2018]

APIVER, 2013. *Programa Maestro de Desarrollo Portuario de Veracruz 2011-2016*. [pdf]. Disponible en: <<http://www.puertodeveracruz.com.mx/apiver/archivos/PDMP/PMDP-2011-2016.mod.Dic-2012.pdf.resp>> [Consultado 03 mayo 2018]

APIVER, 2014. *Reglas de operación del Puerto de Veracruz 2014 - 2015*. [pdf]. Disponible en:

<<http://www.puertodeveracruz.com.mx/apiver/archivos/leyesYReglamentos/2014/Reglas-Operacion-2014-2015.pdf>> [Consultado 17 octubre 2018]

APIVER, 2017. *Programa Maestro de Desarrollo Portuario de Veracruz 2016-2021*. [pdf]. Disponible en: <<http://www.puertodeveracruz.com.mx/quienes-somos/programa-maestro-de-desarrollo-portuario-2016-2021/>> [Consultado 03 mayo 2018]

APIVER, 2018a. *Instalaciones de APIVER*. [en línea]. Disponible en: <<https://www.puertodeveracruz.com.mx/wordpress/infraestructura/mapa-de-instalaciones/>> [Consultado 24 noviembre 2018]

APIVER, 2018b. *Aviso urgente*. [fotografía electrónica]. Disponible en: <<https://www.puertodeveracruz.com.mx/wordpress/blog/2018/09/17/aviso/>> [Consultado 03 noviembre 2018]

Arcos-Serrano, M.E. e Izcapa-Treviño, C., 2003. *Identificación de peligros por almacenamiento de sustancias químicas en industrias de alto riesgo en México*. [pdf]. Ciudad de México: CENAPRED. Disponible en: <http://centro.paot.org.mx/documentos/cenapred/sustancias_quimicas.pdf> [Consultado 10 septiembre 2018]

Arcos-Serrano, M.E., Izcapa-Treviño, C., Bernabé-Espinoza, L., Rivera-Balboa, R.D. y Bravo-Medina, E. 2007. *Serie de fascículos: Riesgos químicos*. [pdf]. Ciudad de México: CENAPRED. Disponible en: <<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/133-FASCCULORIESGOSQUMICOS.PDF>> [Consultado 10 septiembre 2018]

Arcos-Serrano, M.E., Izcapa-Treviño, C., Bernabé-Espinoza, L., Rivera-Balboa, R.D. y Bravo-Medina, E. 2006. *Guía práctica sobre riesgos químicos*. [pdf]. Ciudad de México: CENAPRED. Disponible en: <<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/137-GUAPRCTICASOBRERIESGOSQUMICOS.PDF>> [Consultado 10 septiembre 2018]

ASEA, 2017. *Guía para la conformación del sistema de administración de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medio ambiente aplicable a las actividades de expendio al público de gas natural, gas licuado de petróleo y petrolíferos*. [pdf]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/264154/Gu_a_SASISOPA_VALIDAD_A_FINAL.pdf> [Consultado 28 octubre 2018]

ASEA, 2018. *Guía para la elaboración del análisis de Riesgo para el Sector Hidrocarburos*. [pdf]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/343905/GUIA_ANALISIS_DE_RIESGO.pdf> [Consultado 24 octubre 2018]

Base de datos ARIA, 2019., *Natech and climate risk*. [en línea]. Disponible en: <<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accidentologie/natech-and-climate-risks/?lang=en>> [Consultado 24 octubre 2019]

Bernier, C. y Padgett, J.E., 2019. Fragility and Risk Assessment of Aboveground Storage Tanks Subjected to Concurrent Surge, Wave, and Wind Loads. *Reliability Engineering and System Safety*, [revista electrónica]. 191 (106571), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106571>

Borges-Coelho, C.D., 2005. Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para diferentes Intervenções de Defesa Costeira. [pdf]. Disponible en: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Riscos-de-exposi%C3%A7%C3%A3o-de-frentes-urbanas-para-de-Coelho/dd5dd2cbe6741bb055eb586ded299274c3f661ff>> [Consultado 03 marzo 2020]

Bp, 2020a. *Ficha de datos de seguridad, gasolina*. [pdf]. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/es_es/spain/home/pdfs/fichas-seguridad/ssp2104.pdf> [Consultado 11 abril 2020]

Bp, 2020b. *Ficha de datos de seguridad, Diésel*. [pdf]. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/es_es/spain/home/pdfs/fichas-seguridad/ssp2280.pdf> [Consultado 11 abril 2020]

Bravo-Álvarez, H., Sosa-Echeverría, R., Sánchez-Álvarez, P. y Butron-Silva, A., 2006a. Riesgo químico asociado a fenómenos hidrometeorológicos en el estado de Veracruz. En: L. Calatayud-Duhalt, ed. 2006. *Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz*. Xalapa: Universidad Veracruzana. pp. 315-26.

Bravo-Álvarez, H., Sosa-Echeverría, R., Sánchez-Álvarez, P. y Butron-Silva, A., 2006b. *Riesgos químicos asociados a fenómenos hidrometeorológicos*. [en línea]. Disponible en: <<http://slideplayer.es/slide/1720808/>> [Consultado 08 mayo 2018]

Carranza, O., 2018. *Análisis de Puertos*. [pdf]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/323755/An_lisis3-5.pdf> [Consultado 02 noviembre 2018]

Cassiday, L., 2018. *Lessons learned from Hurricane Harvey*. [en línea]. Disponible: <<https://www.aocs.org/stay-informed/inform-magazine/featured-articles/lessons-learned-from-hurricane-harvey-march-2018>> [Consultado 30 octubre 2019]

CENAPRED, 2001. *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. [pdf]. Disponible en: <<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/36-DIAGNOSTICODEPELIGROSEIDENTIFICACINDERIESGOSDEDEDESASTRESENMXICO.PDF>> [Consultado 11 octubre 2018]

CENAPRED, 2020. *Atlas Estatales de Riesgos*. [en línea]. Disponible en: <<http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-estatales.html>> [Consultado 15 enero 2020]

Center for chemical process safety, 2010. *Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE and flash fire hazards*. 2a. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Centro hidrometeorológico Veracruz – Boca del Río, 2019. *Datos Veracruz periodo 1981-2018*. Boca del Río: SMN-CONAGUA.

Chang, J.I. y Lin, C.C., 2006. A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, [revista electrónica]. 19(1), pp. 51-59. Doi:10.1016/j.jlp.2005.05.015

CIIFEN, 2016. *Aproximación para el cálculo del riesgo*. [en línea]. Disponible en: <http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=84&Itemid=336&lang=es> [Consultado 12 abril 2019]

CMIC, 2015. *V4-TOMO III Diseño por Viento*. CDMX: CMIC.

CONAMER, 2018. *Comentarios del expediente 04/0109/311018*. Disponible en: <<http://187.191.71.192/expediente/22457/recibido/92917/B000184510>> [Consultado 20 mayo 2020]

Consultores en gestión política y planificación ambiental S.C., 2017. *MIA 30VE2017X0199 Terminal de Petrolíferos Veracruz*. [pdf]. Disponible en: <<http://consultaspublicas.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/ver/resumenes/2017/30VE2017X0199.pdf>> [Consultado 03 junio 2020]

Cozzani, V., Campedel, M., Renni, E. y Krausmann, E., 2010. Industrial accidents triggered by flood events: Analysis of past accidents. *Journal of Hazardous Materials*, [revista electrónica] 175 (1-3), pp. 501-509. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.10.033

Cruz, A. y Okada, N., 2008. Consideration of natural hazards in the design and risk management of industrial facilities. *Natural Hazards*, [revista electrónica] 44(2) pp. 213-227 DOI 10.1007/s11069-007-9118-1

Cruz, A., Steinberg, J.L y Luna, R., 2001. Identifying hurricane-induced hazardous material release scenarios in a petroleum refinery. *Natural Hazard Review*. [revista electrónica]. 2(4), pp. 203-210. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2001\)2:4\(203\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2001)2:4(203))

Cruz, A.M. y Krausmann, E., 2009. Hazardous-materials releases from offshore oil and gas facilities and emergency response following Hurricanes Katrina and Rita. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, [revista electrónica] 22(1), pp. 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.08.007>

Cruz, A.M., Steinberg, J.L., Vetere-Arellano, A.L., Nordvik, J.P. y Pisano, F., 2004. *State of the Art in Natech Risk Management*. [pdf]. Disponible en: <https://www.unisdr.org/files/2631_FinalNatechStateofthe20Artcorrected.pdf>

[Consultado 22 febrero 2019]

Dinámica Heurística, 2020. SCRI Modelos. (4). [programa de computadora]. Disponible en: <<http://www.dinamicaheuristica.com/software/scri%20modelos>> [Consultado 08 abril 2020]

DOF, 1993. *Ley de puertos*. Ciudad de México: DOF.

DOF, 2005. NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, *Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental*. Ciudad de México: DOF.

DOF, 2011. NOM-002-SCT/2011, *Listado de las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados*. Ciudad de México: DOF.

DOF, 2012. *Ley general de protección civil*. Ciudad de México: DOF.

DOF, 2016a. *Aviso de Pre-Registro para participar en cuatro concursos públicos para la adjudicación de contratos de cesión parcial de derechos en la ampliación del Puerto de Veracruz*. Veracruz: DOF.

DOF, 2016b. NOM-016-CRE-2016, *Especificaciones de calidad de los petrolíferos*. Ciudad de México: DOF.

DOF, 2016c. NOM-EM-003-ASEA-2016, *Especificaciones y criterios técnicos de Seguridad Industrial, Seguridad Operativa y Protección al Medio Ambiente para el Diseño, Construcción, Pre-Arranque, Operación y Mantenimiento de las instalaciones terrestres de Almacenamiento de Petrolíferos, excepto para Gas Licuado de Petróleo*. Ciudad de México: DOF.

DOF, 2018. NOM-006-ASEA-2017, *Especificaciones y criterios técnicos de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medio ambiente para el diseño, construcción, pre-arranque, operación, mantenimiento, cierre y desmantelamiento de las instalaciones terrestres de almacenamiento de petrolíferos y petróleo, excepto para gas licuado de petróleo*. Ciudad de México: DOF.

Duxbury, A.C., Duxbury, A.B. y Sverdrup, K.A., 2002. *Fundamentals of Oceanography*. 4ta. Ed. New York: McGrawHill.

EC, 2017. *Statistics*. [en línea]. Disponible en: <<https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/statistics/statistics>> [Consultado 25 abril 2019]

EC, 2019. *Fossil fuels*. [en línea]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Fossil_fuel> [Consultado 17 junio 2020]

EEA, 2008. 3.8. *Natural and technological hazards*. [pdf]. Disponible en: <<https://www.eea.europa.eu/publications/92-9157-202-0/3.8.pdf/view>> [Consultado 26 febrero 2019]

EESI, 2018. *Fossil fuels*. [en línea]. Disponible en: <<https://www.eesi.org/topics/fossil-fuels/description>> [Consultado 20 octubre 2018]

EMC, 2018. *NOAA Wavewatch III*. [en línea]. Disponible en: <<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/index.shtml?>> [Consultado 10 septiembre 2019]

Encyclopaedia Britannica, 2018. *Fossil fuel*. [en línea]. Disponible en: <<https://www.britannica.com/science/fossil-fuel>> [Consultado 20 octubre 2018]

Environmental Integrity Project, 2018. *Preparing for the Next Storm*. [pdf]. Disponible: <<https://www.environmentalintegrity.org/wp-content/uploads/2018/08/Hurricane-Harvey-Report-Final.pdf>> [Consultado 03 noviembre 2019]

EPA, 2000. *Cancer assessment Benzene*. [en línea]. Disponible en: <https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=276> [Consultado 15 abril 2020]

EPA, 2018. *Compiled AGEL Values*. [pdf]. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-08/documents/compiled_aegls_update_27jul2018.pdf> [Consultado 17 junio 2020]

Escudero-Castillo, M.C., 2019. *Procedimiento de extracción de datos WW3*, [procedimiento]. Ciudad de México: Costas y Puertos coordinación Hidráulica, Instituto de Ingeniería UNAM.

FAO, 2009. *Análisis de sistemas de gestión del riesgo de desastres: Una guía*. Roma: FAO.

FAO, 2010. *Definiciones*. [pdf]. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/i0625s/i0625s02a.pdf>> [Consultado 25 septiembre 2019]

FEMA, 2005. *Riesgos tecnológicos*. [pdf]. Disponible en: <https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1717-25045-2453/riesgos_tecnologicos.pdf> [Consultado 26 octubre 2018]

Flores, F.G. y L.A. Godoy, 1998. Buckling of short tanks due to hurricanes. *Engineering Structures*, [revista electrónica]. 20(8), pp. 752-760. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00109-0)

Garza-Ayala, S. 2015. *Análisis de riesgos/peligros en los procesos*. Monterrey: Dinámica Heurística.

Garza-Ayala, S., 2019. Curso de análisis de riesgos, *Taller de modelos y análisis de consecuencias*. Dinámica Heurística.

- Girgin y Krausmann, 2016. Historical analysis of U.S. onshore hazardous liquid pipeline accidents triggered by natural hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, [revista electrónica] 40, pp. 578-590. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.008>
- Gobierno de México, 2017. *Puertos en el estado de Veracruz*. [pdf]. Disponible en: <<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/196892/Veracruz.pdf>> [Consultado 20 septiembre 2019]
- Godoy, L.A. 2002. *A primer on buckling of tanks*. [pdf]. Disponible en: <<http://lef.uprm.edu/Failure%20of%20two%20Tanks/PDF%20files/What%20is%20buckling.pdf>> [Consultado 05 noviembre 2019]
- Godoy, L.A., 2007. Performance of Storage Tanks in Oil Facilities Damaged by Hurricanes Katrina and Rita. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, [revista electrónica]. 21(6), pp. 441-449. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2007)21:6(441)
- Godoy, L.A., 2019, *Learning from engineering failures*. Disponible en: <<http://lef.uprm.edu/Failure%20of%20two%20Tanks/Send%20your%20report.html>> [Consultado 28 octubre 2019]
- Godoy, L.A., Portela, G., Sosa, E.M., Suarez, L.E., Virella, J.C. y Zapata, R., 2014. *Damage due to buckling in aboveground storage tanks*. [pdf]. Disponible en: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.615.4659&rep=rep1&typ>> [Consultado 04 noviembre 2019]
- Google-Earth-Pro, 2018. *Recinto Portuario de Veracruz*. [jpg].
- Google-Earth-Pro, 2019a. *Información hidrometeorológica APIVER-UNAM. 19°11'28" N, 96°07'04" O, elevación 27.93 km.*
- Google-Earth-Pro, 2019b. *Instalaciones de almacenamiento y distribución de PEMEX. 19°12'21" N, 96°08'07" O, elevación 4.73 km.*
- Google-Earth-Pro, 2020. *Ubicación de los tanques de almacenamiento de combustibles del Centro Embarcador Bajos la Gallega. 19°12'39" N, 96°07'24" O, elevación 898 m.*
- Gornitz, V., 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. *Global and Planetary Change*, [revista electrónica]. 89 (4), pp. 379-398. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(91\)90118-G](https://doi.org/10.1016/0921-8181(91)90118-G)
- Grupo de Evaluación de Riesgo de la Agencia de Medio Ambiente, 2014. *Cuba metodologías para la determinación de riesgos de desastres a nivel territorial: Parte I*. [pdf]. Disponible en: <<http://dipecholac.net/docs/files/475-libro-metodologia-riesgo-ama.pdf>> [Consultado 13 febrero 2020]

Guinness World Records, 2019. *Largest fuel tank fire*. [en línea]. Disponible en: <<https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/largest-fuel-tank-fire>> [Consultado 29 octubre 2019]

Hammar-Klose, E.S. y Thielier, E.R., 2001. *Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: A Preliminary Database for the U.S. Atlantic, Pacific and Gulf of Mexico Coasts*. [en línea]. Disponible en: <<https://pubs.usgs.gov/dds/dds68/htmldocs/project.htm>> [Consultado 19 septiembre 2020]

Holton, J.R., 2004. *An introduction to dynamic meteorology*. 4ta ed. San Diego: Elsevier Academic Press.

ILO, 2020. *Fichas Internacionales de Seguridad Química*. [en línea]. Disponible en: <<https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.listCards3>> [Consultado 11 abril 2020]

INAFED, 2010. *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, Estado de Veracruz*. [en línea]. Disponible en: <<http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM30veracruz/index.html>> [Consultado el 01 noviembre 2018]

INEGI, 2009. *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Veracruz, Veracruz Ignacio de la Llave-Clave geoestadística 30193*. [pdf]. Disponible en: <http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30193.pdf> [Consultado 05 mayo 2019]

IPCC, 2018, *Anexo I Glosario. En Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf> [Consultado 10 septiembre 2020]

Karymbalis, E., Chalkias, C., Chalkias, G., Grigoropoulou, E., Manthos, G. y Ferentinou, M., 2012. Assessment of the Sensitivity of the Southern Coast of the Gulf of Corinth (Peloponnese, Greece) to Sea-level Rise. *Central European Journal of Geosciences*, [revista electrónica]. 4 (4), pp. 561-577. DOI: 10.2478/s13533-012-0101-3

Kirby, J., 2017. *The Environmental Fallout of Hurricane Harvey*. [en línea]. Disponible en: <<http://nymag.com/intelligencer/2017/09/the-environmental-fallout-of-hurricane-harvey.html>> [Consultado 5 noviembre 2019]

- Koroglu, A., Ranasinghe, R., Jiménez, J.A. y Dastgheib, A. 2019. Comparison of Coastal Vulnerability Index applications for Barcelona Province. *Ocean and Coastal Management*, [revista electrónica]. 178 (104799), pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.05.001>
- Landucci, G., Antonioni, G., Tugnoli, A. y Cozzani, V., 2012. Release of hazardous substances in flood events: Damage model for atmospheric storage tanks. *Reliability Engineering and System Safety*. [revista electrónica]. 106 (0951-8320), pp. 200–216. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2012.05.010>
- Landucci, G., Necci, A., Tugnoli, A., Antonioni, G., Cozzani, V., 2014. NaTech scenarios caused by flooding: evaluation of accident frequency by the use of Fragility Models. *Chemical Engineering Transactions*, [revista electrónica]. 36 (2283-9216), pp. 427-432. DOI: 10.3303/CET1436072
- Lee, J.K., Lee, K.H., Kim, S.I., Yook, D. y Ahn, S., 2017. Weibull parameter calculation and estimation of wind speeds for the return period: A case study in the Kori and Wolsong NPP areas. *Annals of Nuclear Energy*, [revista electrónica]. 108 (0306-4549), pp. 406-412. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2017.04.040>
- Lindell, M.K. y Perry, R.W., 1996. Addressing Gaps in Environmental Emergency Planning: Hazardous Materials Releases During Earthquakes. *Journal of Environmental Planning and Management*, [revista electrónica] 39 (4), pp. 529-544. DOI: 10.1080/09640569612363
- Magaña-Rueda, V.O., 1999. *Los impactos de El Niño en México*. México D.F.: UNAM, CONACYT e IAI.
- Marsh y Mclellan, 2018. *The 100 Largest Losses 1978-2017*. [pdf] Disponible en: <http://www.marshmercamedia.com/Reportes%20energy/18-0101_100%20largest%20losses_v8_print.pdf?fbclid=IwAR1Js4bJNvCSxq09XNkpQqo0D5vxC2eYpmBAdBG0QE3h_2pzFNz3cRbfFNs> [Consultado 12 julio 2019]
- Martín-Algarra, R.V., 2010. *Epónimos científicos*. [pdf]. Disponible en: <<https://blog.uchceu.es/eponimos-cientificos/wp-content/uploads/sites/24/2011/10/Eponimo-Diesel.pdf>> [Consultado 14 septiembre 2020]
- Mclaughlin, S. y Cooper, J.A.G., 2010. A multi-scale coastal vulnerability index: a tool for a coastal managers? *Environmental hazards human and policy dimension*, [revista electrónica]. 9 (1747-7891), pp. 233-248. doi:10.3763/ehaz.2010.0052
- Mercuria Energy Trading, 2015a. *Ficha de datos de seguridad, gasolina*. [pdf]. Disponible en: <http://www.mercuria.com/sites/default/files/ES_SDS_Gasoline_SDS%20SGS%20GHS%20%28Reach%20ANNEXII%29_201524_MERCURIA-24_NR%20%28CM%29__0.pdf> [Consultado 10 abril 2020]

Mercuria Energy Trading, 2015b. *Ficha de datos de seguridad, Gasoleo*. [pdf]. Disponible en:

<http://www.mercuria.com/sites/default/files/ES_SDS_Gasoleo%20VGO__SDS%20SGS%20GHS%20%28Reach%20ANNEXII%29_2015130_MERCURIA-01_NR__1.pdf> [Consultado 10 abril 2020]

Ministerio de defensa marina de guerra del Perú, 2013. *Normas técnicas hidrográficas N° 08*. [pdf]. Disponible en:

<<https://www.dhn.mil.pe/Archivos/Oceanografia/normastecnicas/NormasTecnicasHidrograficasN%C2%B008.pdf>> [Consultado el 17 junio 2020]

Montoya-Ramírez, R.D. y Osorio-Arias, A., 2007. Los modelos de generación de oleaje de viento: características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia. *Avances en recursos hidráulicos*. (0121-5701), pp. 47-74.

Morales, E. 2016. *Muere marino ucraniano en accidente en buque BLU TIDE*. [fotografía electrónica]. Disponible en: <<http://www.ptc.mx/2016/02/muere-marino-ucraniano-en-accidente-en-buque-blu-tide/>> [Consultado 03 noviembre 2018]

NCEI, 2017. *ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model*. [en línea]. Disponible en: <<https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.dem:316>> doi:10.7289/V5C8276M [Consultado 11 septiembre 2019]

Necci, A., Girgin, S., Krausmann, E., 2018. *Understanding Natech Risk Due to Storms*. [pdf]. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Disponible en: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC114176/storms_natech_analysis_final.pdf> [Consultado 28 octubre 2018]

Neri, C. y Magaña, V., 2016. Estimation of Vulnerability and Risk to Meteorological Drought in Mexico. *Weather, climate and society*, [revista electronica]. 8 (2), pp. 95-110. DOI: 10.1175/WCAS-D-15-0005.1

New Zealand Government, 2008. *Coastal Hazards and Climate Change. A Guidance Manual for Local Government in New Zealand*. 2da. Ed. Wellington: Ministry for the Environment Manatu Mo Te Taiao.

New Zealand Government, 2020. *Coastal erosion and inundation*. [imagen en línea]. Disponible en: <<https://ccc.govt.nz/environment/land/coast/coastalhazards/coastal-erosion-and-inundation-2>> [Consultado 25 enero 2020]

NHC, 2011. *Tropical Cyclone Report Hurricane Karl*. [pdf]. Disponible en: <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL132010_Karl.pdf> [Consultado 10 octubre 2019]

NHC, 2012. *Introduction to storm surge*. [pdf]. Disponible: <https://www.nhc.noaa.gov/surge/surge_intro.pdf> [Consultado 07 septiembre 2019]

- NHC, 2019. *Storm Surge Overview*. [en línea]. Disponible en: <<https://www.nhc.noaa.gov/surge/>> [Consultado 06 septiembre 2019]
- NOAA y EPA, 2018. CAMEO Chemicals. (2.7.1.). [programa de computadora] NOAA-EPA. Disponible en: <<https://www.epa.gov/cameo/cameo-chemicals-software>> [Consultado 08 abril 2020]
- NOAA, 2019a. *Costal Currents: waves*. [en línea]. Disponible en: <https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/03coastal1.html> [Consultado 07 septiembre 2019]
- NOAA, 2019b. *IncidentNews*. [en línea]. Disponible: <<https://incidentnews.noaa.gov/>> [Consultado 30 agosto 2019]
- OECD, 2003. *Emerging Systemic Risks, Emerging Risks in the 21st Century: An Agenda for Action*, OECD Publishing: Paris. Disponible en: <<https://doi.org/10.1787/9789264101227-3-en>> [Consultado 26 octubre 2018]
- OECD, 2011. *A workshop on natech risk management (natural-hazard triggered technological accidents)*. [pdf]. Disponible en: <<http://www.oecd.org/env/ehs/chemical-accidents/49967354.pdf>> [Consultado 13 marzo 2019]
- OIT, 1990. *Control de riesgos de accidentes mayores: manual práctico*. Ginebra: OIT-ILO.
- OMM, 2014. *Comunicado No. 997 Los científicos instan que se actualicen con más frecuencia los periodos de referencia climáticos de 30 años para ir a la par con la rápida evolución del cambio climático*. [en línea]. Disponible en: <<https://public.wmo.int/es/media/press-release/no-997-%E2%80%93-los-cient%C3%ADficos-instan-que-se-actualicen-con-m%C3%A1s-frecuencia-los>> [Consultado 25 septiembre 2020]
- ONU, 2017. *Sistema Globalmente Armonizado (SGA) de clasificación y etiquetado de productos químicos*. 7a ed. Nueva York y Ginebra: ONU
- Ortiz-Lozano, L., Valadez, V. y Hayasaka-Ramírez, S., 2015. *Influencia histórica de la ciudad y puerto de Veracruz sobre el Sistema Arrecifal Veracruzano*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche.
- Osorio-Tai, M.E., 2015. *Estudio de la intensificación de los vientos en el puerto de Veracruz mediante modelación numérica*. [pdf]. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/images/archivos_portal/tesis/tesisM_TAI.pdf> [Consultado 2 de octubre 2018]
- Pantusa, D., D'Alessandro, F., Riefolo, L., Principato, F. y Tomasicchio, G.R., 2018. Application of a Coastal Vulnerability Index. A Case Study along the Apulian Coastline, Italy. *Water*, [revista electrónica]. 10 (1218), pp. 1-16. doi:10.3390/w10091218

PEMEX, 2006. *NRF-053-PEMEX-2005, Sistemas de protección anticorrosiva a base de recubrimientos para instalaciones superficiales*. México DF: PEMEX.

PEMEX, 2008. *NRF-113-PEMEX-2007, Diseño de tanques atmosféricos*. México DF: PEMEX.

PEMEX, 2010a. *Términos usados en la Industria Petrolera*. [pdf]. Disponible en: <<http://www.ri.pemex.com/files/content/Glosario%2020101221.pdf>> [Consultado 19 octubre 2018]

PEMEX, 2010b. *Boletín meteorológico 570. 01/12/2010 8:00:00*. [en línea]. Disponible en: <<http://www3.pemex.com:6015/Logistica/v4/meteorologia/>> [Consultado 13 septiembre 2019]

PEMEX, 2014. *NRF-048-PEMEX-2014, Diseño de instalaciones eléctricas*. México DF: PEMEX.

PEMEX, 2016. *Infraestructura Portuaria*. [pdf]. Disponible en: <<https://www.pemex.com/nuestro-negocio/logistica/Generales%20del%20servicio/Infraestructura.pdf>> [Consultado 20 septiembre 2019]

PEMEX, 2018. Terminal Portuaria de Pemex en Veracruz, mantuvo altos niveles de seguridad en 2017. *Boletines regionales*, [en línea] 29 de enero. Disponible en: <http://www.pemex.com/saladeprensa/boletines_regionales/Paginas/2018-001-veracruz.aspx#.Wu9QwYgvzIU> [Consultado 06 mayo 2018]

PEMEX, 2019. *Página web Petróleos Mexicanos*. [en línea] Disponible en: <<https://www.pemex.com/Paginas/default.aspx>> [Consultado 14 julio 2020]

Persson, H. y Lönnermark, A., 2004. *Tank Fires Review of fire incidents 1951–2003*. [pdf]. Borås: SP Swedish National Testing and Research Institute. Disponible en: <<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A962266&dswid=9573>> [Consultado 10 julio 2019]

PROFEPA, 2015. *Análisis estadístico de emergencias químicas reportadas a la PROFEPA en el periodo 2000-2014*. [pdf]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/278102/ea_00_14_pag_internet_09042015.pdf> [Consultado el 10 septiembre 2018]

PROFEPA, 2017. *Informe de actividades 2017*. [pdf]. México: SEMARNAT/PROFEPA. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311596/Informe_de_actividades_profepa_2017.pdf> [Consultado 28 octubre 2018]

- Ramírez-Olivar, O.J., Mesa, A.M., Zuluaga, Muñoz, F., Sánchez-Silva, M. y Salzano, E., 2019. Fragility Curves of Storage Tanks Impacted by Strong Winds. *Chemical Engineering Transactions*, [revista electrónica]. 77 (2283-9216), pp. 91-96. DOI: 10.3303/CET1977016
- Ramírez-Olivar, O.J., Zuluaga-Mayorga, S., Muñoz-Giraldo, F., Sánchez-Silva, M., Pinelli, J.P. y Salzano, E., 2020. The effects of extreme winds on atmospheric storage tanks. *Reliability Engineering and System Safety*, [revista electrónica]. 195 (106686), pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106686>
- Rasmussen, K., 1995. Natural events and accidents with hazardous materials. *Journal of hazardous materials*, [revista electrónica]. 40 (1), pp. 43-54. [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(94\)00079-V](https://doi.org/10.1016/0304-3894(94)00079-V)
- Revie, R.W. y Uhlig, H.H., 2008. *Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. Wiley & Sons, Inc: Estados Unidos de América.
- Rosengaus-Moshinsky, M., Jiménez-Espinosa, M. y Vázquez-Conde, M.T., 2002. *Atlas climatológico de ciclones tropicales en México*. [pdf]. Disponible en: <<http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/375/1/images/acctm.pdf>> [Consultado 09 mayo 2019]
- Salgado-Ávila, G., 2015. *Análisis de riesgo en las áreas de almacenamiento para combustibles en el Recinto Portuario de Veracruz*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. [pdf]. Disponible en: <<http://132.248.9.195/ptd2015/abril/0728352/Index.html>> [Consultado 10 septiembre 2018]
- Santella, N., Steinberg, L.J. y Sengul, H., 2010. Petroleum and Hazardous Material Releases from Industrial Facilities Associated with Hurricane Katrina. *Risk Analysis*, [revista electrónica]. 30 (4), pp. 635-649. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2010.01390.x
- SEMAR, 2013. *Veracruz-Veracruz*. [pdf]. Disponible en: <<https://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioVeracruz.pdf>> [Consultado 01 noviembre 2018]
- SEMARNAT, 2013. *Guía para la presentación del estudio de riesgo modalidad análisis de riesgo*. [pdf]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/113618/Guia_para_la_Presentacion_del_Estudio_de_Riesgo.pdf> [Consultado 22 octubre 2018]
- Sengul, H., 2005. *Hazard characterization of joint natural and technological disasters (Natechs) in the United States using federal databases*. Tesis de maestría, Department of Civil and Environment Engineering, Tulane University.
- Showalter y Myers, 1994. *Natural Disasters in the United States as Release agents of Oil, Chemicals, or Radiological Materials Between 1980-1989: Analysis and Recommendations*.

Risk Analysis, [revista electrónica] 14 (2), pp. 169-182. DOI: 10.1016/0167-6687(96)82397-3

Shroder, J.F., Paron, P. y Di Baldassarre, G., 2015. *Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters*. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07025-4>

Silano, V., 1985. *Evaluación de riesgos para la salud pública asociados con accidentes causados por agentes químicos*. 2da. ed. Roma: Centro Panamericano de Ecología Huana y Salud, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. [pdf]. Disponible en: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/eco/016701.pdf>> [Consultado 8 octubre 2018]

SMN, 2020. *Frentes fríos*. [en línea]. Disponible en: <<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/frentes-frios>> [Consultado 17 junio 2020]

SPCV, 2017. *Calendario de temporadas y fenómenos hidrometeorológicos para el estado de Veracruz*. [pdf]. Disponible en: <<http://www.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/5/2017/05/CALENDARIO-2107.pdf>> [Consultado 05 abril 2019]

Storch-de-Gracia, J.M. y García-Martín, T., 2008. *SEGURIDAD INDUSTRIAL EN PLANTAS QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño*. España: Diaz de Santos.

Stull, R., 2017. *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*. Vancouver: University of British Columbia.

Sylves, R.T. y Waugh, W.L.J., 1990. *Cities and Disaster: North American Studies in Emergency Management*. Springfield: Charles C Thomas Publisher.

Tate, E., 2012. Social vulnerability indices: a comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis. *Natural Hazards*, [revista electrónica]. 63, pp. 325–347. DOI 10.1007/s11069-012-0152-2

Téllez, H.J., 2004. *Condiciones meteorológicas en la ciudad del Puerto de Veracruz, del siglo XVI al XXI*, Colección Historias de San Juan de Ulúa en la Historia. Volumen V. México D.F.: CONACULTA – INAH.

Truyols-Mateu, S., 2010. *Ingeniería, economía y logística portuaria. Teoría y práctica*. 2ª ed. Madrid: Delta publicaciones.

UNISDR, 2009. *Terminología sobre Reducción de Riesgo de Desastres*. [pdf]. Disponible en: <https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf> [Consultado 12 abril 2019]

UNISDR, 2016. *Informe del grupo de trabajo intergubernamental de expertos de composición abierta sobre los indicadores y la terminología relacionados con la reducción*

del riesgo de desastres. [pdf]. Disponible en: <https://www.preventionweb.net/files/50683_oiewgreportspanish.pdf> [Consultado 30 mayo 2019]

UNISDR, 2017. *Terminology*. [en línea]. Disponible en: <<https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>> [Consultado 01 junio 2019]

USACE, 2015. *EM 1110-2-1100: Coastal Engineering Manual – Part II*. Washington: Department of the army.

Vetere-Arellano, A.L., Cruz, A.M., Nordvik, J.P. y Pisano, F., 2004. *Analysis of Natech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters) Disaster Management*. [pdf]. Luxemburgo: European Comission. Disponible en: <https://www.preventionweb.net/files/1607_LBNA21054ENC002.pdf> [Consultado 22 febrero 2019]

Vinoth, J. y Young I.R. 2011. Global estimates of extreme wind speed and wave height. *Journal of climate*, [revista electrónica]. 24(6), pp.1647-1665. DOI: 10.1175/2010JCLI3680.1

Webb, P., 2020. Introduction to oceanography. [en línea]. Disponible en: <<https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/>> [Consultado 06 agosto 2020]

WHO, 2018a. *Chemical releases caused by natural hazard events and disasters*. [pdf]. Suiza: WHO. Disponible en: <<http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272390/9789241513395-eng.pdf?ua=1>> [Consultado 16 octubre 2018]

WHO, 2018b. *Chemical releases associated with cyclones*. [pdf]. Disponible en: <<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272393/WHO-CED-PHE-EPE-18.03-eng.pdf?ua=1>> [Consultado 15 enero 2020]

Young, I.R., Vinoth, J., Zieger, S. y Babanin, A.V., 2012. Investigation of trends in extreme value wave height and wind speed. *Journal of geophysical research*, [revista electrónica]. 117 (C11), pp. 1-13. DOI: 10.1029/2011JC007753

Zhao, Y. y Lin, Y. 2014. Buckling of cylindrical open-topped steel tank under wind load. *Thin-Walled Structures*, [revista electrónica]. 79 (0263-8231), pp. 83-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2014.02.010>

Zuluaga-Mayorga, S., Sánchez-Silva, M., Ramírez-Olivar, O.J. y Muñoz-Giraldo, F., 2019. Development of parametric fragility curves for storage tanks: A Natech approach. *Reliability Engineering and System Safety*, [revista electrónica]. 189 (0951-8320), pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.04.008>

CAPÍTULO 7. ANEXOS

ANEXO I. Condiciones hidrometeorológicas

1.1 Validación del modelo Wavewatch III.

La EMC realiza validaciones al modelo Wavewatch III (WW3), las cuales se encuentran disponibles en el siguiente enlace:

<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/validation/prod/>

Las validaciones se realizan comparando los valores obtenidos por medio del modelo WW3 con los monitoreados por las boyas de la NOAA.

Como ejemplo de lo anterior en la Figura 7.1 y 7.2, se observan los valores de altura de ola significativa, velocidad y dirección de viento, así como periodo de ola, correspondientes al mes de marzo del 2015, obtenidos en la modelación y comparados con los datos registrados en la boya 42055, que se encuentra ubicada en la Bahía de Campeche en las coordenadas de 22.203 latitud N y 94.000 longitud O.

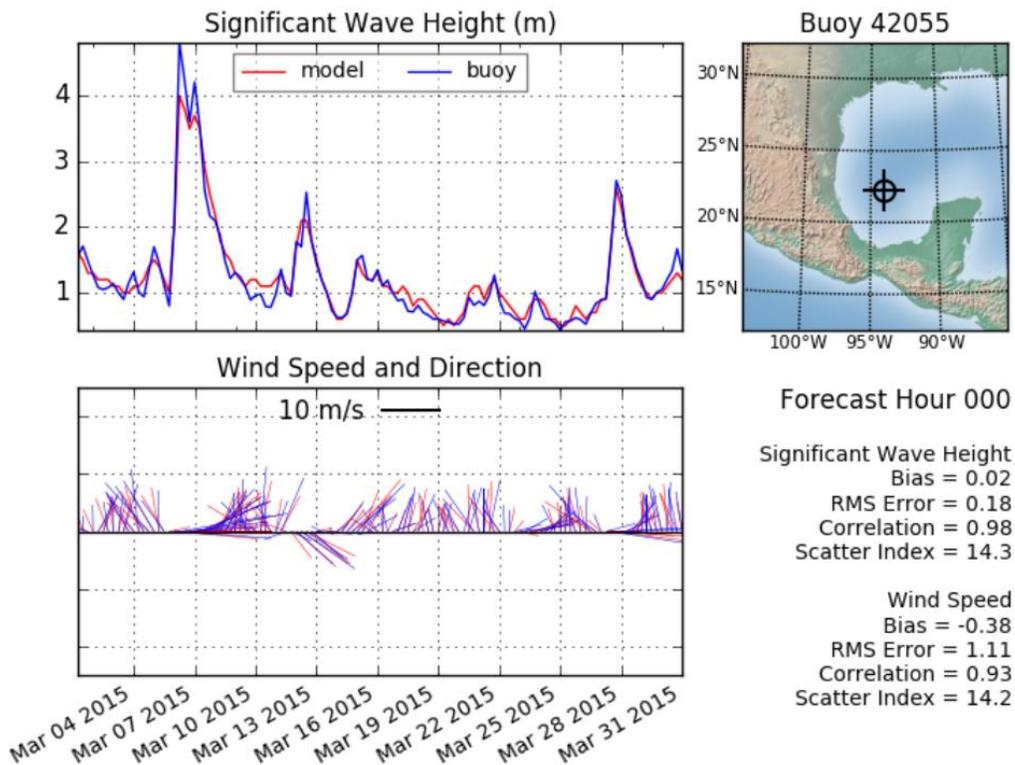


Figura 7.1 Validación de altura de ola significativa, además de velocidad y dirección de viento

Fuente: EMC, 2018.

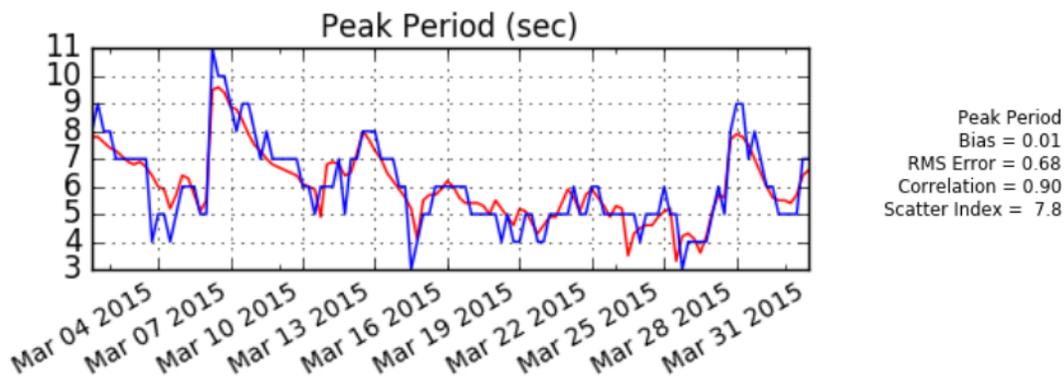


Figura 7.2 Validación de periodo de ola

Fuente: EMC, 2018.

Las herramientas empleadas para la validación se describen a continuación:

Bias o parcialidad: es la diferencia media entre el modelo y las observaciones, mide la tendencia del proceso del modelo a sobreestimar o subestimar el valor de un parámetro. Los valores de sesgo absoluto más pequeños indican una mejor concordancia entre los valores medidos y calculados. El sesgo positivo significa sobrepredicción y el negativo significa subpredicción.

$$\text{diff} = \text{model_data} - \text{buoy_data}$$

$$\text{bias} = \text{diff.mean}()$$

Root-Mean-Square Error o Error cuadrático medio (RMS Error): también llamada desviación cuadrática media, es una medida de las diferencias entre los valores observados y los pronosticados. Los valores RMSE más pequeños indican una mejor concordancia entre los valores medidos y calculados.

$$\text{rmse} = ((\text{diff}^2).mean())^{0.5}$$

Scatter Index o Índice de dispersión (SI): definido como la desviación estándar de la diferencia entre modelo y observaciones, normalizada por la media de las observaciones. Los valores más pequeños de SI indican una mejor concordancia entre el modelo y las observaciones. Tenga en cuenta que las alturas de olas bajas o las áreas donde dominan los mares de viento pueden dar lugar a altos valores de SI.

$$\text{scatter_index} = 100.0 * (((\text{diff}^2).mean())^{0.5} - \text{bias}^2) / \text{buoy_data.mean}()$$

De acuerdo con lo anterior, los resultados de la validación confirman la confiabilidad del modelo.

1.2 Imágenes satelitales y pronósticos del área de estudio.

En la Figura 7.3 y 7.4 se muestra la imagen satelital y pronóstico de oleaje para el día 01 de diciembre del 2010, en donde se observan las condiciones hidrometeorológicas causadas por el Frente frío No. 11.

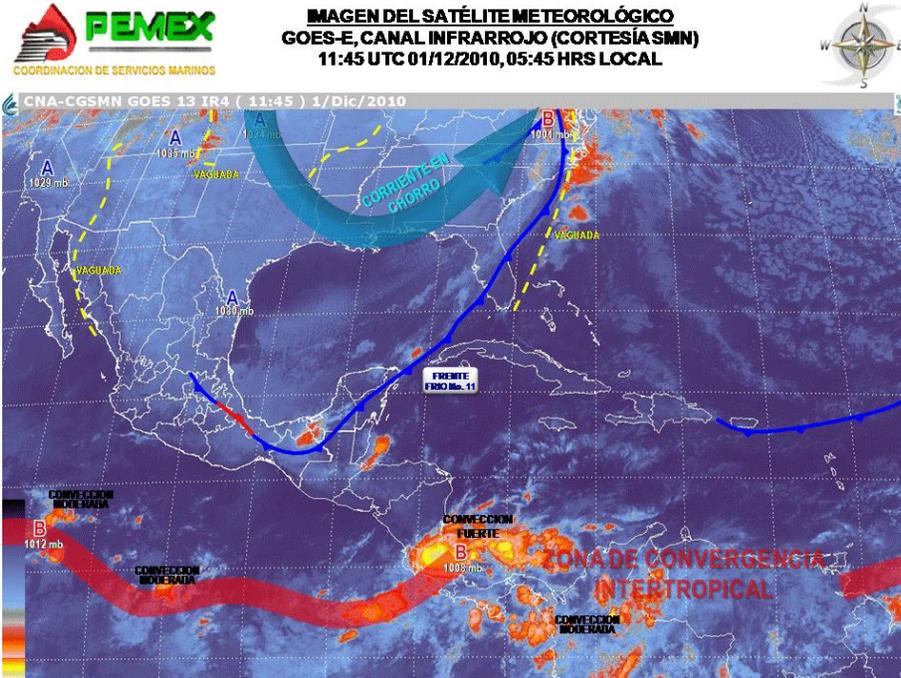


Figura 7.351. Imagen satelital Frente frío No. 11, 01 diciembre 2010

Fuente: PEMEX, 2010b.

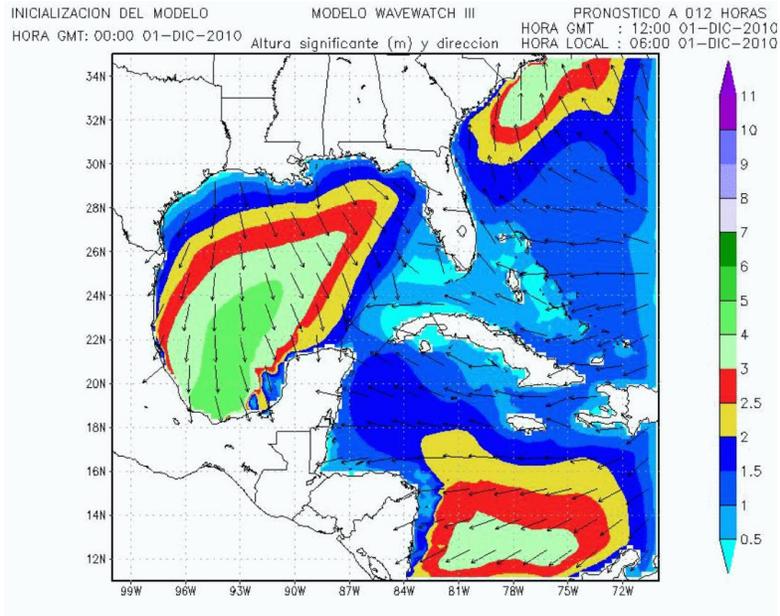


Figura 7.452. Pronóstico de oleaje con el modelo WW3, 01 diciembre 2010

Fuente: PEMEX, 2010b.

ANEXO II. Análisis histórico de accidentes

Tabla 7.1. Análisis histórico de accidentes 1970 - 2018

<i>No.</i>	<i>Fuente</i>	<i>Fecha</i>	<i>Lugar</i>	<i>Sistema</i>	<i>Sustancia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Evento</i>	<i>Condición de peligro</i>	<i>Accidente</i>	<i>Observaciones</i>
1	Godoy, 2007.	29.08.2005	The Freeport Plant, Port Sulphur, Plaquemines Parish, Luisiana, EUA	Diez tanques de techo cónico. DI: 30 m	Petróleo	1) Cuatro de los tanques no se alejaron de su ubicación original, pero se doblaron por la presión del viento provocando desviaciones en la parte cilíndrica y la placa base. 2) Algunos de los tanques no estaban anclados, por lo tanto, el pandeo se produjo en un modo que implicaba desplazamientos muy grandes localizados en la carcasa cilíndrica. 3) Se produjeron derrames de petróleo como resultado de la falla estructural de los tanques. 4) El aislamiento en todos los tanques se perdió en la carcasa cilíndrica y en partes del techo.	Huracán Katrina	Rachas de viento \geq 200 km/h	Daño en recubrimiento / Derrames / Pandeo / Desplazamiento	La falla estructural combina la fractura de la soldadura entre el cilindro y la placa base junto con el pandeo de la carcasa cilíndrica / Los tanques que se doblaron tenían desviaciones muy grandes en la parte cilíndrica y también en la placa base, con desviaciones del orden de 1 m que afectaban un área con un ángulo central de 15 a 30 °.

2	Godoy, 2007.	29.08.2005	The Freeport Plant, Port Sulphur, Plaquemines Parish, Luisiana, EUA	Tanques de techo tipo domo. DI: 21 m	Petróleo	1) Se perdió el aislamiento en la carcasa cilíndrica y en partes del techo del tanque. 2) Se produjo un derrame de petróleo por el desplazamiento del tanque provocado por inundación y la marejada, ya que al moverse ocurrió una ruptura en las tuberías.	Huracán Katrina	Rachas de viento \geq 200 km/h / Inundación / Marejada	Daño en recubrimiento / Derrames / Desplazamiento / Ruptura de tuberías	Falla fue provocada por el movimiento rígido del cuerpo, en el cual el tanque fue desplazado por unos 30 m.
3	Godoy, 2007.	29.08.2005	The Freeport Plant, Port Sulphur, Plaquemines Parish, Luisiana, EUA	Cinco tanques. DI: < 21 m	Petróleo	1) El aislamiento en todos los tanques se perdió en la carcasa cilíndrica y en partes del techo. 2) Se produjeron derrames de petróleo por el desplazamiento de los tanques ya que al moverse ocurrió una ruptura en las tuberías.	Huracán Katrina	Rachas de viento \geq 200 km/h / Marejada	Daño en recubrimiento / Colapso / Derrames / Desplazamiento / Ruptura de tuberías	--
4	Godoy, 2007.	29.08.2005	Fish Oil Plant, Port Sulphur, Plaquemines Parish, Luisiana, EUA	Tanque. DI: 15 m	Aceite de pescado	El tanque golpeó un tanque cercano más alto con un techo cónico y produjo una abolladura en la parte superior de la carcasa cilíndrica, lo cual provocó su colapso.	Huracán Katrina	Rachas de viento \geq 200 km/h	Pandeo por proyectil / Colapso	--

5	Godoy, 2007; United States Coast Guard Affairs, 2005.	--.08.2005	Bass Enterprises Facility in Cox Bay, Baton Rouge, Luisiana, EUA	Dos tanques. DI: 88 m, H: 5 m	Petróleo	Los tanques fueron forzados a salir de sus cimientos por la marejada, lo cual produjo la ruptura de tuberías y en consecuencia derrames.	Huracán Katrina	Inundación / Marejada	Daño en recubrimiento / Derrames / Desplazamiento / Ruptura de tuberías	--
6	Godoy, 2007.	--.08.2005	Dynegy Facility in Venice, LA, EUA	Ocho tanques	--	--	Huracán Katrina	Inundación / Marejada	Derrames	--
7	Godoy, 2007.	--.08.2005	Bass Enterprises North, Pontchartraine, LA, EUA	Tres tanques	Petróleo	Los tanques fueron forzados a salir de sus cimientos por la marejada, lo cual produjo la ruptura de tuberías y en consecuencia derrames.	Huracán Katrina	Inundación / Marejada	Derrames / Desplazamiento / Ruptura de tuberías	--

8	Godoy, 2007; Necci, Girgin y Krausmann, 2018; NOAA, 2019b.	30.08.2005	The Murphy Meraux Refinery, St. Bernard Parish, Luisiana, EUA	Dos tanques DI: 95 m. Tres tanques DI: 72 m. Todos de techo flotante	Petróleo	El derrame de petróleo ocurrió en el tanque 250-2, que tiene una capacidad de almacenamiento de 250,000 barriles, pero se llenó con solo 65,000 barriles de petróleo crudo, el 25% de su capacidad, por lo que el tanque se desplazó de su posición original y ocasionó la ruptura de tuberías. La mezcla de petróleo que flotaba en el agua se filtró en las áreas urbanas que rodean la instalación, con cientos de casas afectadas.	Huracán Katrina	Inundación de 3 a 5 m de altura / Marejada	Derrames / Desplazamiento / Ruptura de tuberías	Las carcasas tienen un refuerzo de anillo intermedio en la parte cilíndrica para evitar el pandeo y no parecen haberse doblado o fracturado debido al viento. Estos tanques tienen un estanque de retención capaz de almacenar el contenido de un tanque, pero no están diseñados para almacenar aguas de inundación entrantes desde el exterior de la instalación.
9	Godoy, 2007.	--.08.2005	Refinería The Chalmette, EUA	Tanques de techo flotante, cónico y plano	--	Algunos tanques sufrieron daños en el revestimiento	Huracán Katrina	Viento	Daño en recubrimiento	Los tanques no tienen refuerzos de anillo intermedios; sin embargo, no se

										identificaron signos de pandeo inducido por el viento.
10	Godoy, 2007.	--.08.2005	Munro Plant, Biloxi, Miss. EUA	Cuatro tanques	--	Algunos de los pequeños tanques flotaron y se alejaron de su ubicación original, lo cual provocó la ruptura de tuberías y la liberación parte de su contenido.	Huracán Katrina	Marejada	Derrames / Desplazamiento / Volcamiento / Ruptura de tuberías	--
11	Godoy, 2007.	--.09.2005	Citgo West Lake, LA. EUA	Tanques	--	1) Uno de los tanques presentó un pandeo local de la carcasa cilíndrica. 2) Varios tanques mostraban la pérdida del recubrimiento en la parte alta.	Huracán Rita	Viento	Daño en recubrimiento / Pandeo	Los daños al recubrimiento se observaron desde velocidades de 160 km/h o menos.
12	Godoy, 2007.	24.09.2005	Valero Plant, Port Arthur, EUA	Cuatro tanques	--	Pérdida del recubrimiento de aislamiento en la carcasa cilíndrica expuesta al viento	Huracán Rita	Viento 190.4 km/h	Daño en recubrimiento	Los daños al recubrimiento se observaron desde velocidades de 160 km/h o menos.

13	Godoy, 2007.	--.09.2005	Exxon Mobile Plant in Beaumont, Texas, EUA	Tanques	--	1) Cuatro tanques sufrieron pérdida del recubrimiento en varios niveles de algunos tanques. 2) Dos tanques presentaron daños en el techo.	Huracán Rita	Viento	Daño en recubrimiento / Colapso del techo	Otros tanques con un sistema de aislamiento más nuevo no sufrieron daños en la misma instalación.
14	Godoy, 2007.	--.09.2005	Motiva Plant at Port Neches, Texas, EUA	Tanque	--	Pérdida del recubrimiento en la parte alta de algunos tanques	Huracán Rita	Viento	Daño en recubrimiento	--
15	Godoy, 2007.	24.09.2005	Port Arthur, Texas, EUA	Tanques	--	Pérdida del recubrimiento en la parte baja de algunos tanques	Huracán Rita	Viento 190.4 km/h	Daño en recubrimiento	El tanque se localizaba en un terreno plano y sin obstrucciones.
16	Godoy, 2007.	--.09.2005	The Invicta/Dupont Plant, Sabine, Texas, EUA	Tanque	--	Daños en el recubrimiento de la inferior de un tanque	Huracán Rita	Viento	Daño en recubrimiento	--
17	Godoy, 2007.	24.09.2005	BASF-FINA Plant, Port	Tanque	--	El daño en el recubrimiento fue visto en la base de un tanque,	Huracán Rita	Viento 190.4 km/h	Daño en recubrimiento	--

			Arthur, Texas, EUA			posiblemente debido a efectos de vórtice.				
18	Godoy, 2007.	24.09.2005	Texaco Island, south of Port Arthur, Texas, EUA	Dos tanques de techo cónico. DI: 37 m, H: 11 m, Htecho: 1.8 m	--	Daños en el recubrimiento de aislamiento de los techos cónicos del tanque, el daño del techo se extiende entre la mitad y un cuarto de la superficie del techo.	Huracán Rita	Viento	Daño en recubrimiento	El daño a los techos de los tanques se asoció con la succión del viento en esa parte del tanque, y las presiones más altas se produjeron en el meridiano de barlovento en la unión con el cilindro y en el centro del techo.
19	TNO citado en: Rasmussen, 1995.	30.11.1982	Orange, California, EUA.	Tanque	Monómero de estireno	La tormenta de viento provocó un corte de energía que apagó la unidad de refrigeración y causó la explosión del tanque de almacenamiento de estireno	Tormenta	Viento	Explosión	--

20	Cruz, et al., 2004.	---.1999	Francia del norte	Tanque	Amoniaco	Amenaza a sistemas de enfriamiento del almacenamiento criogénico de amoniaco	--	Inundación	Falla de suministro eléctrico	--
21	Cruz, et al., 2004; Marsh y McLennan, 2018.	01.09.1998	Refinería Chevron en Pascagoula, Mississippi, EUA	Tanques de techo flotante	Petróleo / Aditivos de Gasolina	<p>1) La marea de tormenta superó los diques construidos para proteger la refinería inundándola. En total, unos 2,100 motores, 1,900 bombas, 8,000 componentes de instrumentos, 280 turbinas y 200 artículos de maquinaria miscelánea requirieron reemplazo o reconstrucción extensa. 2) Los nuevos edificios de control y las subestaciones eléctricas sufrieron poco o ningún daño, ya que se habían construido con sus plantas bajas elevadas aproximadamente cinco pies por encima del nivel. 3) El techo de un tanque de techo flotante se hundió y liberó petróleo. Además, el tanque con aditivos de gasolina peligrosos flotó sobre sus cimientos.</p>	Huracán Georges (Categoría 2)	Marejada / Inundación de más de 4 ft de altura (1.22 m)	Derrames / Desplazamiento	Toda la refinería se cerró durante tres meses después de ser golpeada por el huracán Georges. El huracán sometió a la refinería a 17 horas de fuertes vientos y lluvia.

22	Cruz, et al., 2004.	---.2001	Refinería en Luisiana, EUA	Tanque	Sustancias peligrosas	Cae rayo en un tanque de almacenamiento y se provoca un incendio.	--	Rayo	Incendio	--
23	Base de datos ARIA, 2019.	03.12.2003	Fábrica de papel, Tarascón, Francia	Tanques	Productos peligrosos (Oxígeno, el peróxido de hidrógeno y el dióxido de cloro, licor negro, aceite combustible, metanol y clorato)	El río Ródano se desbordó los tanques de almacenamiento, incluidos los no anclados, no se movieron debido a su contenido líquido. Sin embargo, el contenedor de almacenamiento de peróxido vacío se movió ligeramente durante la inundación, la subestación eléctrica también sufrió daños al inundarse.	--	Inundación	Desplazamiento	--
24	Marsh y McLennan, 1997, citado en Cruz, et al., 2001.	--	Indonesia	Tanque de techo flotante	Nafta	La caída de un rayo en uno de los tanques de almacenamiento de techo flotante de nafta provocó un incendio, el cual, provocó además la ignición de seis tanques de almacenamiento.	--	Rayo	Incendio	--

25	Cruz, et al., 2001; Guinness World Records, 2019; Personal communication Lavergne citado en: Persson y Lönnemark, 2004.	07.06.2001	Refinería Orion Corp. en Norco Lusiana, EUA	Taque de techo flotante. DI: 82.4 m, H: 9.8 m, A: 5,325 m ² , V: 51,675 m ³ (325,000 bbl)	Gasolina 89.7 octanos (sin aditivos)	El incidente comenzó el 7 de junio de 2001 cuando la tormenta tropical Allison hizo que el techo se hundiera parcialmente. El fuego comenzó a las 13:30 cuando un rayo golpeó el tanque que contenía gasolina. En el momento del incendio, el nivel del producto era de aproximadamente 8,5 m (28 pies). Hubo varios problemas prácticos que superar, ya que grandes áreas y el camino de acceso al tanque se inundaron debido a la tormenta.	Tormenta tropical Alison	Rayo	Techo hundido / Incendio	Hubo afectaciones a la población, los residentes permanecieron 18 h en áreas interiores. Es considerado el incendio más grande en tanques en todo el mundo.
26	Comunicación personal Baran-Baranski, citado en: Persson y Lönnemark, 2004.	26.06.1971	Refinería Czechowice-Dziedzic, Polonia	Cuatro tanques de techo cónico. DI: 33 m, H: 14.7 m, A: 854 m ² , V: 12,500 m ³	Petróleo crudo	Un rayo golpeó el tanque III provocando que el techo colapsara y se incendiara la superficie del petróleo, contuvieron el incendio con espuma, sin embargo, el fuego se reactivó al siguiente día lanzando petróleo hasta distancias de 250 m. La temperatura del sitio provocó que se incendiaran	--	Rayo	Colapso del techo / Incendio tipo boil-over	Para contener el incendio aplicaron espuma, agua y polvo químico seco, ese último no fue efectivo por las condiciones ventosas

						los vapores inflamables dentro del tanque I causando su explosión, la cual alcanzó a afectar a los demás tanques y a zonas de la refinería				
27	Fire Command, 1978 citado en: Persson y Lönnemark, 2004.	24.09.1977	Union Oil, Romeoville, Illinois, EUA	Tanques de techo cónico. tanque 413 DI: 58 m, H: 15.9 m, A: 2,640 m ² / tanque 115 DI: 33.5 m	Tanque 413: Diésel / Tanque 115: gasolina sin plomo	Un rayo incendió el tanque 413 y provocó que su techo se proyectara hacia el tanque 115 en consecuencia esta se dañó también se incendió	--	Rayo	Techo proyectado / Incendio	--
28	Lavergne y Regent comunicación personal citado en: Persson y Lönnemark	04.06.1996	Amoco Refinery, Texas City, EUA	Tanque de techo flotante externo. DI:41 m, H: 14.6 m, A: 1,330 m ²	Metil terbutil eter puro	Un rayo cayó en el tanque, lo cual provocó que el techo flotante se hundiera bajo el metil terbutil eter y dejara de funcionar el sello anular, por lo que al estar expuesto el producto se originó un incendio.	--	Rayo	Techo hundido / Incendio	El cambio en el viento complicó la aplicación de la espuma.

	ark, 2004.									
29	Avril, Haydon y Jaffe, 1999 citado en: Persson y Lönnerm ark, 2004.	11.06.1996	Shell oil, Woodbri dge, New Jersey, EUA	Tanque de techo flotante interno. DI: 42.7 m, H: 12.2 m, A: 1,430 m ² , V: 15,900 m ³	Gasolina	El incendio comenzó cuando un rayó golpeó el tanque lo que provocó que el techo externo fuese lanzado unos 46 m en el aire y volviera a caer sobre el borde del mismo, hundiendo el techo flotante hasta el fondo.	--	Rayo	Techo proyectado y hundido / Incendio	El tanque estaba en el centro de cinco tanques en un dique común y la distancia entre los tanques era de solo 23 m. Por lo tanto, se iniciaron las operaciones de enfriamiento de los tanques cercanos, se transfirió combustible a otros tanques y se evacuó a unos 200 vecinos. El cambio en el viento complicó

										la aplicación de la espuma.
30	Personal communication Hatfield, 1997 citado en: Persson y Lönnermark, 2004.	19.07.1996	Refinería Sunoco, Sarnia, Ontario, Canadá	Tanque de techo flotante externo. DI: 42.7 m, H: 15 m, A: 1,430 m ² , V: 19,000 m ³	Refinado (misma volatilidad que la gasolina)	Un rayo golpeó el tanque lo que provocó que aproximadamente el 50% del techo saliera expulsado y el resto se hundió en el fondo del tanque, por lo cual se inició un incendio en toda su superficie.	--	Rayo	Techo proyectado y hundido / Incendio	El enfriamiento a los tanques vecinos lo hicieron basado en el pronóstico del cambio en la dirección del viento.
31	Comunicación personal Baran-Baranski, citado en: Persson y Lönnermark, 2004.	05.05.2002	Refinería Trzebinia, Región de Malopolska, Polonia	Tanque de techo cónico con techo flotante interno. DI: 30 m aprox., A: 700 m ² aprox., V:	Petróleo crudo	Un rayo provocó que el techo cónico del tanque se desplazara y que el techo flotante interno se destruyera, lo que produjo una superficie totalmente incendiada.	--	Rayo	Colapso del techo / Incendio	--

				10,000 m ³ aprox.						
32	Chag y Lin, 2006.	--...1970	Corpus Christi, Texas, EUA	Treinta tanques	--	Dañados	Huracán Celia	Racha de viento 150 mph, (241.402 km/h)	--	--
33	Marsh y McLennan, 2018; Flores y Godoy, 1998.	18.09.1989	St. Croixs, Virgin Islands, EUA	Catorce tanques de techo flotante. V: 500,000 a 600,000 bbl	Gasolina No. 6	Los tanques sufrieron daños estructurales (pandeo y colapso) y las unidades de proceso que estaban inactivas en preparación para el huracán, tuvieron daños en el aislamiento de asbesto en las columnas y tuberías del proceso.	Huracán Hugo (categoría 5)	Rachas de viento 130 - 192 mph (209.215 - 308.994 km/h) / Marejada 3.6 m	Daños mecánicos / Pandeo / Colapso	No especifica qué tipo de daño mecánico sufrió el tanque, pero un especialista en tanques de almacenamiento o atmosférico tardó más de un año en reconstruir los 14 tanques, la velocidad de viento registrada fue la máxima de ese huracán antes

										de que se dañara el dispositivo de medición de velocidad de viento del aeropuerto de St. Croixs
34	Chag y Lin, 2006; Godoy, 2019; Necci, Girgin y Krausmann, 2018.	13.12.2002	Refinería Mobil, Cabras Island, Puerto Rico	Tanques de techo flotante interno	Gasolina / Turbosina	Un tanque explotó a causa de la fricción causada por los vientos extremadamente fuertes que atravesaban su sistema de ventilación, enviando su tapa al aire y extendiendo el fuego a otros tanques cercanos (cuatro). Otros tanques presentaron pandeos por el viento.	Huracán Pongsonan (categoría 4)	Viento rachas de 290 km/h	Incendio / Explosión / Pandeo / Techo proyectado	El incendio duró aproximadamente 6 días debido al suministro limitado de agua
35	Marsh y Mclennan, 2018; Base de datos ARIA, 2019.	25.11.2002	Refinería, Port of Mohammedia, Morocco	Tres unidades de producción y varios tanques	Petróleo residual	La presa de OUED MALEH se desbordó luego de continuas lluvias torrenciales que duraron varios días e inundaron las instalaciones de una refinería ubicada en el corazón del puerto de Mohammedia. La producción del sitio se detuvo alrededor de las 4:00 p.m. debido al nivel	Tormenta	Inundación 1 m	Techo hundido y agrietado / Incendio / Explosión	Dos muertos y cuatro lesionados, la parte afectada de la refinería estuvo fuera de operación durante un año.

						del agua que se elevó hasta 1 m en un sitio en la instalación. Se produjo un incendio violento, así como varias explosiones de tanques, equipos eléctricos (transformadores) y tuberías. De acuerdo con las investigaciones el techo de uno de los tanques se hundió y otro se agrietó, lo cual provocó el derrame del producto y posteriormente el incendio debido a los cortos circuitos provocados en la inundación.				
36	Persson y Lonnermark, 2004.	31.12.1989	Zambian Pipeline Company, Dar Es Salaam, Tanzania	Tanque de techo flotante. DI: 54.864 m	Petróleo crudo	Tanque fue alcanzado por un rayo en la víspera de Año Nuevo, se incendió del sello del borde de 360 grados y se quemó durante cinco días.	--	Rayo	Incendio	--
37	NOAA, 2019b; Necci, Girgin y Krausmann, 2018.	--.08.2005	Chevron's Empire terminal, Buras, EUA	Tanques	Petróleo crudo	Uno de los tanques quedó completamente destruido.	Huracán Katrina	--	Derrame / Colapso	--

38	NOAA, 2019b	09.09.2018	--	--	Gasolina / Diésel / Sustancias químicas	--	Huracán Florence	--	--	--
39	NOAA, 2019b.	--.08.2005	Shell, Pilot Town, LA., EUA	Tanques / Ducto F: 20 in	Petróleo Crudo dulce	Una torre de microondas que cayó y atravesó el tanque. También se rompió una tubería. El derrame ocurrió dentro de la berma de contención de la instalación. Es probable que gran parte del petróleo se haya perdido, liberado, dispersado durante el huracán. Se recuperaron aproximadamente 22,685 barriles.	Huracán Katrina	Marejada / Viento	Pandeo por proyectil / Derrame / Ruptura de tubería	Se recuperaron aproximadamente 22,685. Toda la instalación se trasladó a la Etapa 3 en 26.OCT.05.
40	NOAA, 2019b; Necci, Girgin y Krausmann, 2018.	--.08.2005	Sundown Energy East Facility, Potash, LA, Mississippi, EUA	Dos tanques / Ducto	Petróleo Crudo dulce	La marejada provocada por el huracán Katrina causó el desplazamiento de dos tanques de almacenamiento de petróleo, así como la ruptura de tuberías.	Huracán Katrina	Marejada	Desplazamiento / Derrame / Ruptura de tuberías	--
41	NOAA, 2019b.	--.08.2005	N de Pilot Town, EUA	Tanque	Petróleo	--	Huracán Katrina	--	Derrame / Desplazamiento	--

42	Godoy, et al., 2014.	--...1998	Pañuelas, Puerto Rico	Tanque de techo fijo. DI: 30.48 m, H: 12.192 m, R/t: 1700	--	El tanque se pandeó por las condiciones de viento generadas por el Huracán Georges ya que este se encontraba con un grupo de tanques cerca de la costa.	Huracán Georges	Viento 120 mph (193.121 km/h) y rachas de 150 mph (241.402 km/h)	Pandeo	--
43	Flores y Godoy, 1998.	--.09.1995	St. Thomas, Virgin Islands, EUA	Tanque. R/t: 1900	--	El tanque sufrió fallas estructurales a causa de las cargas de viento generadas por el huracán Marilyn.	Huracán Marilyn	Viento 183 km/h	Pandeo	--
44	Godoy, 2019.	--...1998	Yabucoa, Puerto Rico	Tanques	--	Tanques sufrieron pandeos por las cargas de viento generadas por el huracán Georges.	Huracán Georges	Viento 120 mph (193.121 km/h) y rachas de 150 mph (241.402 km/h)	Pandeo	--

45	Base de datos ARIA, 2019.	05.12.2013 y 06.12.2013	Inter Terminal , Riverside Terminal , Costa este de Reino Unido	Tanques	Químicas	La terminal está localizada en el banco norte del río Tees, debido a las intensas lluvias, el nivel del río (4.3 m) superó el dique de protección de 4.15 m de altura provocando que se alcanzara una inundación de 1.8 m de profundidad. Lo cual provocó que los tanques flotarán dañando tuberías y sus soportes.	Lluvia	Inundación 1.8 m	Desplazamiento / Ruptura de tuberías	<p>1) Los tanques de almacenamiento o que contienen pequeños inventarios deben llenarse parcialmente para evitar que floten cuando es rodeado de agua de inundación.</p> <p>2) Los objetos flotantes pueden causar daños significativos cuando son arrastrados por el agua de la inundación y chocan con otros Infraestructura fija. Cualquier objeto que pueda flotar debe asegurarse o retirarse del sitio como parte</p>
----	---------------------------	-------------------------	---	---------	----------	---	--------	------------------	--------------------------------------	---

										de una inundación.
46	Base de datos ARIA, 2019.	17.09.2011	Refinería , Feyzin, Francia	Tanque de techo fijo. V: 2,000 m ³	Hidrocarburo	Durante una tormenta un rayo golpeo dos puntos una bengala y el tanque de almacenamiento de hidrocarburos en cuestión, después del ataque, el tanque se incendió y se abrió a lo largo de la soldadura más débil, con el techo del tanque desprendiéndose y colgando del caparazón.	Tormenta	Rayo	Techo hundido / Colapso / Incendio	--
47	Base de datos ARIA, 2019.	18.07.2007	Refinería Petit-Couronne (Seine-Maritime), Francia	Tanque de techo flotante de doble pontón. V: 60,000 m ³ ,	Petróleo crudo	Una tormenta provocó la acumulación de agua en el techo del tanque lo cual dañó su estabilidad y en consecuencia se hundió dejando expuesto el hidrocarburo.	Tormenta	Lluvia	Techo hundido / Emisiones de COVs	--

				DI:70 m, H: 17 m						
48	Base de datos ARIA, 2019.	24.07.2000	Sugar factory/distillery, Villettesur-Aube, Francia	Tanque. V: 5,000 m ³	Etanol al 96%	Un rayo golpeó un tanque y se produjo una explosión, por lo que el techo del tanque se voló y cayó sobre el mismo tanque produciendo un incendio. La carcasa del tanque permaneció intacta y el fuego no se propagó a los otros tanques de almacenamiento. Sin embargo, la válvula en la base del tanque se agrietó como resultado del impacto.	Tormenta eléctrica	Rayo	Techo proyectado / Agrietamiento en base del tanque / Incendio / Explosión	--
49	Base de datos ARIA, 2019.	30.08.1983	Refinería, Milford Haven, Reino Unido	Tanque TO11 de techo flotante de cubierta simple. V: 94,110	Petróleo crudo ligero	Los vientos violentos causaron grietas en la membrana flotante del tanque, por lo que hubo una acumulación de vapores inflamables en esta área y se provocó un incendio, las grietas del tanque se abrieron y el	--	Viento / Lluvia	Techo hundido y agrietado / Incendio (boilover)	La grieta tenía una longitud de 28 cm, como medida preventiva se vaciaron los tanques adyacentes al del incendio.

				m ³ , DI: 78 m, H: 20 m		incendio empeoró, además de que una parte del techo se hundió por la acumulación del agua de lluvia, dejando expuesto al hidrocarburo.				
50	Necci, Girgin y Krausman, 2018.	--.09.2005	ASCO Facility in Cameron, LA. Texas Point, EUA	Tanque	Diésel	Muchos pequeños tanques de almacenamiento fueron desalojados y transportados por la marejada ciclónica, y algunos fueron encontrados hasta 10 millas tierra adentro. Un tanque de Diésel varado en el Refugio de Vida Silvestre de Texas Point aterrizó con el lado derecho hacia arriba mostrando evidencia de fugas.	Huracán Rita	Marejada	Desplazamiento / Pandeo / Volcamiento	--
51	Necci, Girgin y Krausman, 2018.	---.2008	Galveston, Houston, Texas, EUA.	Dos tanques	Petrolífero	Los tanques de almacenamiento fueron desplazados de su sitio por la marejada provocada por el Huracán Ike, los tanques se encontraban prácticamente vacíos en el momento en que azotó la tormenta, lo cual afectó su	Huracán Ike	Marejada	Desplazamiento / Colapso	Los tanques se encontraban prácticamente vacíos, lo que afectó su estabilidad ante la tormenta.

						estabilidad dejándolos prácticamente destrozados.				
52	Necci, Girgin y Krausmann, 2018.	---.2008	Chevron Lube Plant in Port Arthur, EUA	Tanque	Aceite lubricante	La marejada provocada por el huracán Katrina causó que los tanques de almacenamiento flotaran de sus cimientos, por lo que las tuberías se fracturaron y en consecuencia se tuvieron derrames.	Huracán Ike	Marejada	Desplazamiento / Ruptura de tuberías	--
53	Necci, Girgin y Krausmann, 2018.	---.2008	Área de almacenamiento Galveston, Huston, Texas, EUA.	Tanques	--	--	Huracán Ike	--	Colapso	--
54	Necci, Girgin y Krausmann, 2018; Base de datos	24.10.1995	Refinería Petramina, Cilacap, Indonesia	Tanque de techo fijo. V: 38,800 m ³	Keroseno	El rayo golpeo el techo del tanque lo cual hizo que una nube de vapor inflamable se incendiara y provocará una explosión que destruyó el techo del tanque, el incendio	--	Rayo	Techo proyectado / Incendio / Explosión	El incendio se extinguió después de tres días.

	ARIA, 2019.					ocasionado se extendió a otros seis tanques.				
55	Necci, Girgin y Krausmann, 2018.	--.08.2017	Refinería, Texas, EUA	Catorce tanques de techo flotante	--	El techo flotante de los tanques y hundió debido a la acumulación del agua de lluvia.	Huracán Harvey (categoría 4)	Lluvia	Techo hundido	--
56	Necci, Girgin y Krausmann, 2018.	--.08.2017	Texas, EUA	Cuatro tanques. V: 500 bbl c/u	--	Los tanques de desplazaron lo cual provocó la ruptura de tuberías y el volcamiento de los tanques.	Huracán Harvey (categoría 4)	--	Desplazamiento / Ruptura de tuberías / Volcamiento	--
57	Necci, Girgin y Krausmann, 2018.	--.08.2017	Terminal, Magellan Midstream Partners Galena Park, Texas, EUA	Dos tanques	Gasolina	Las inundaciones provocadas por el huracán Harvey provocaron que el tanque flotara.	Huracán Harvey (categoría 4)	Inundación	Emisiones COVs	--

58	Cassiday, 2018.	--.08.2017	Refinería ExxonMobil, Baytown, Texas, EUA	Tanque de techo flotante	Petróleo	Debido a la precipitación el techo flotante del tanque se hundió causando la liberación de compuestos orgánicos volátiles.	Huracán Harvey (categoría 4)	Lluvia	Techo hundido / Emisiones COVs	--
59	Cassiday, 2018; Environmental Integrity Project, 2018.	--.08.2017	Refinería Valero Energy Partners, Houston, Texas, EUA	Tanque de techo flotante	Petróleo crudo	Debido a la precipitación el techo flotante del tanque se volteó parcialmente causando la liberación de compuestos orgánicos volátiles.	Huracán Harvey (categoría 4)	Lluvia	Techo hundido / Emisiones COVs	Los tanques están diseñados con drenajes de cubierta para prevenir la acumulación de agua de 10 pulgadas en 24 horas.
60	Cassiday, 2018.	--.08.2017	Terminal Kinder Morgan, Pasadena, Texas, EUA	Tanque. V: 6.3 millones de gal	Gasolina	Debido a la precipitación un tanque de almacenamiento de gasolina se inclinó y provocó la liberación del producto en un dique de contención.	Huracán Harvey (categoría 4)	Inundación	Volcamiento / Derrame / Emisiones COVs	La mayor parte del derrame fue contenida por un dique.
61	Cassiday, 2018.	--.08.2017	Royal Dutch Shell en Deer Park,	Dos tanques de techo flotante	Componentes de gasolina	Los techos flotantes de los tanques de almacenamiento se hundieron después de que una fuerte lluvia excediera	Huracán Harvey (categoría 4)	Lluvia	Techo hundido / Emisiones COVs	--

			Texas, EUA			la capacidad del techo para drenar el agua.				
62	Base de datos ARIA, 2019; Persson y Lönnermark, 2004.	12.08.1989	Qingdao, China	Tanque	Petróleo crudo	Un rayo golpeo un tanque lo cual dio como resultado un incendio.	--	Rayo	Incendio	--
63	Kirby, 2017.	--.08.2017	Karbuhn Oil Company, el condado de Harris, EUA	Dos tanques	Petróleo crudo	Un rayo incendió dos tanques de almacenamiento de petróleo crudo en la Karbuhn Oil Company en el condado de Harris, que quemó dos tanques y derramó unos cinco barriles de petróleo crudo. El sitio está frente a un humedal protegido de 25,000 acres.	Huracán Harvey (categoría 4)	Rayo	Incendio / Derrame	--
64	Persson y Lönnermark, 2004.	04.06.2003	Refinería, Brisbane, Australia	Tanque de techo flotante	Petróleo crudo	Un rayo incendió la parte entre el techo flotante y la pared lateral de un tanque de petróleo crudo. No se reportaron heridos.	--	Rayo	Incendio	--

65	Persson y Lönnermark, 2004.	01.09.2002	Refugio, Texas EUA	Tanque. V: 10,000 gal	Aceite	Un tanque de aceite de 10000 galones golpeado por un rayo se incendió, propagando llamas a otros dos tanques y dos camiones cisterna.	--	Rayo	Incendio	--
66	Persson y Lönnermark, 2004.	11.08.2002	Forest Oil Corporation, Port a la Heche, LA, EUA	Tres tanques	Petróleo crudo	--	--	Rayo	Incendio	--
67	Persson y Lönnermark, 2004.	20.07.2002	Terminal Chevron-Texaco Escravos oil, Nigeria	Tanque de techo flotante. V: 180,000 bbl	Petróleo crudo	Este incidente comenzó con un incendio en el sello, sin embargo, por alguna razón, el departamento de bomberos no pudo extinguirlo.	--	Rayo	Incendio	--
68	Persson y Lönnermark, 2004.	21.08.2001	Florence, Kansas, EUA	Cinco tanques	Petróleo	--	--	Rayo	Incendio	--
69	Persson y Lönnermark, 2004.	08.08.2001	Planta de producción Oilfield, PanCana	Tanque. V: 20,000 bbl	Petróleo	Un rayo golpeó un tanque inactivo de 20000 barriles, de techo de fibra de vidrio. Solo había una cantidad mínima de combustible en	--	Rayo	Incendio	--

			dian, Weyburn , Canada			el tanque. Los tanques adyacentes se enfriaron hasta que el tanque se quemó para poder extinguirlo con espuma.				
70	Persson y Lönnermark, 2004.	29.05.2001	Oklahoma, EUA	Tanque	Petróleo	--	--	Rayo	Incendio	--
71	Persson y Lönnermark, 2004.	30.05.1999	Mount Zion, Jerusalén	Tanque	Petróleo	--	--	Rayo	Incendio	--
72	Persson y Lönnermark, 2004.	08.04.1998	South Claiborne e Parish, Louisiana, EUA	Dos tanques	Petróleo	Se incendiaron dos tanques a causa de un rayo. Los bomberos utilizaron una corriente de armas de diluvio y varias líneas de mano, incluido AFFF, para extinguir.	--	Rayo	Incendio	--
73	Persson y Lönnermark, 2004.	30.07.1997	Colonial Pipeline Co, Cobb County, EUA	Tanque	Gasolina	El incendio comenzó poco antes de las 18:00 durante una fuerte tormenta eléctrica. El tanque de 7 millones de gasolina contenía alrededor de 6.1 millones de galones. Los bomberos llegaron a la	Tormenta	Rayo	Incendio	--

						escena en 6 seis minutos y comenzaron a aplicar espuma.				
74	Persson y Lönnermark, 2004.	03.12.1996	Shell oil, Woodbridge, New Jersey, EUA	Tanque	Gasolina	Los bomberos trabajaron la noche derramando agua sobre el fuego y los tanques de almacenamiento cercanos; el plan era dejar que la gasolina se quemara sola y luego verter espuma en el tanque de almacenamiento.	--	Rayo	Incendio	--
75	Persson y Lönnermark, 2004.	--.---.1996	EUA	Tanque de techo flotante. DI: 43.3 m	Gasolina	Se produjo un pequeño incendio provocado por un rayo en la ventilación del techo de un tanque de gasolina con techo flotante. El fuego de ventilación de 6 pulgadas se quemó durante 30 minutos sin escalar y se extinguió con una línea de espuma manual.	--	Rayo	Incendio	--
76	Persson y Lönnermark, 2004.	--.---.1996	Italia	Tanque	Petróleo crudo	--	--	Rayo	Incendio	--

77	Persson y Lönnermark, 2004.	--...1996	Ciudad de México, México	Tanque de techo flotante interno con domo	--	Un rayo golpeó el domo del tanque, por lo que se hundió el techo y como consecuencia se produjo un incendio en la superficie completa.	--	Rayo	Techo hundido / Incendio	--
78	Persson y Lönnermark, 2004.	20.09.1995	Refinería, Houston, Texas, EUA	Tanque. V: 168,000 bbl	Petróleo crudo	El incendio comenzó cuando un rayo golpeó un tanque de crudo de 168,000 bbl. No hubo interrupción en la operación de la refinería.	--	Rayo	Incendio	--
79	Persson y Lönnermark, 2004.	22.08.1995	Kucove, Albania	Tanque. V: 400 ton	Petróleo crudo	Cuando el fuego parecía estar bajo control, un segundo tanque de crudo de 1000 toneladas explotó, matando a un bombero. El incendio se extinguió después de 33 horas y se destruyeron tres tanques con 1,600 toneladas de crudo.	--	Rayo	Incendio / Explosión	--
80	Persson y Lönnermark, 2004.	12.07.1995	Tampa, Florida, EUA	Tanque. V: 250,000 gal	Metanol	--	--	Rayo	Incendio	--

81	Persson y Lönnermark, 2004.	11.06.1995	Addington, Oklahoma, EUA	Tanque con techo de domo. V: 55,000 bbl	Petróleo crudo	Los rayos cayeron sobre el tanque y volaron por el techo durante la tarde. No hay intentos de combatir el fuego.	--	Rayo	Techo proyectado / Incendio	--
82	Persson y Lönnermark, 2004.	16.05.1995	Kansas, EUA	Tanque	Petróleo	--	--	Rayo	Incendio	--
83	Persson y Lönnermark, 2004.	26.04.1995	Refinería, Sri Racha, Tailandia	Tanque de techo flotante externo. V: 600,000 bbl	Petróleo crudo	Fue extinguido con espuma.	--	Rayo	Incendio	--
84	Persson y Lönnermark, 2004.	08.03.1995	Freeport, Grand Bahama Island	Tanque de techo flotante. V: 500,000 bbl	Diésel	Un rayo incendió el sello de borde del tanque, el incendio duró 56 horas.	--	Rayo	Incendio	--
85	Persson y Lönnermark, 2004.	--.10.1994	Refinería en Sudamérica	Tanque de techo flotante. DI: 67.056 m	Petróleo crudo	--	--	Rayo	Incendio	--

86	Persson y Lönnermark, 2004.	22.07.1994	Delaware, EUA	Dos tanques	Mezcla de petróleo y agua	Un rayo golpeó un tanque de combustible y el incendio posterior destruyó tanto el primer tanque como el segundo tanque que se incendió rápidamente.	--	Rayo	Incendio	--
87	Persson y Lönnermark, 2004.	24.07.1994	Reino Unido	Tanque de techo flotante. DI: 73.152 m	Petróleo crudo	--	--	Rayo	Incendio	--
88	Persson y Lönnermark, 2004.	13.07.1994	EUA	Tanque de techo flotante. DI: 34.9 m	Nafta	El incendio duró 3.5 horas y fue extinguido por ataque móvil desde el suelo.	--	Rayo	Incendio	--
89	Persson y Lönnermark, 2004.	13.07.1994	Chevron, Midland, Texas, EUA	Tanque de techo flotante. V: 80,000 bbl	Petróleo crudo	El rayo golpeó el tanque por lo que se incendió los 360° del sello del techo.	--	Rayo	Incendio	--
90	Persson y Lönnermark, 2004.	--.10.1993	Refinería, Sudamérica	Dos tanques de techo flotante.	Petróleo crudo	--	--	Rayo	Incendio	--

				DI: 67.056 m						
91	Persson y Lönnermark, 2004.	25.12.1992	Refinería , Castellon , España	Tanque de techo flotante. DI: 92.2 m, H: 21.8 m	Petróleo crudo	Se usó un sistema de espuma fijo, pero se bloquearon algunas cámaras de espuma y se logró la extinción final con extintores portátiles	--	Rayo	Incendio	--
92	Persson y Lönnermark, 2004.	11.07.1991	CTF of Mehsana (Gujarat) , India	Tanque de techo fijo. V: 10,000 m ³	Petróleo crudo	Un rayo golpeó un tanque de techo fijo de 10000 m ³ y el techo explotó y la carcasa del tanque sufrió graves daños. El tanque contenía 500 m ³ y se extinguió en 2,5 horas. Sin daños a humanos o tanques adyacentes.	--	Rayo	Techo proyectado / Incendio	--
93	Persson y Lönnermark, 2004.	29.05.1991	Refinería , HPCL, Visakh, India	Tanque de techo flotante	Nafta	Debido a un rayo en un tanque de nafta, se incendió el vapor inflamable en el área del sello del borde.	--	Rayo	Incendio	--

94	Persson y Lönnermark, 2004.	07.12.1990	Refinería, EUA	Tanque de techo flotante. DI: 105.156 m, V: 714,000 bbl	Petróleo crudo	--	--	Rayo	Incendio	--
95	Persson y Lönnermark, 2004.	27.04.1990	Compañía petroquímica, Houston Texas, EUA	Tanque de techo flotante. DI: 60.96 m	Gasolina	El fuego se extendió en el sello de techo del tanque.	--	Rayo	Incendio	--
96	Persson y Lönnermark, 2004.	22.03.1989	Sullom Voe, Shetland, Reino Unido	Tanque de techo flotante.	Petróleo crudo	Una tormenta eléctrica severa provocó un rayo que provocó un incendio en el tanque de crudo Ninian. Alarma a las 9:56 horas y el fuego extinguido por la brigada de bomberos de la terminal a las 10:17 horas.	Tormenta	Rayo	Incendio	--
97	Persson y Lönnermark, 2004.	08.07.1988	Refinería Phillips, Houston Texas, EUA	Tanque. V: 80,000 gal	Gasolina	--	--	Rayo	Incendio	--

98	Persson y Lönnermark, 2004.	24.05.1988	PEMEX, Chihuahua, México	Tanque de techo flotante.	Gasolina	Un rayo cayó sobre el tanque, que explotó. El incendio duró casi 7 horas y fue controlado por los bomberos.	--	Rayo	Incendio / Explosión	--
99	Persson y Lönnermark, 2004.	24.09.1987	Romeoville, Illinois, EUA	Tanque de techo de domo. DI: 57.912 m	Diésel	Un rayo cayó sobre el tanque. Los escombros golpearon tres tanques de gasolina cercanos. Por lo cual se tuvieron dos tanques destruidos, otros dos involucrados.	--	Rayo	Incendio	--
100	Persson y Lönnermark, 2004.	01.05.1987	Madero, México	Tanque	Gasóleo	El tanque de gasóleo explotó tras un rayo.	--	Rayo	Incendio / Explosión	--

DI: Diámetro.

H: Altura.

V: Volumen.

F: Fuga.

R/t: Radio/grosor.

ANEXO III. Lista de Verificación Terminal Marítima de PEMEX y Centro Embarcador Bajos la Gallega

Fecha del recorrido: 08/febrero/2020.

Líder de recorrido: Ing. Rafael Rueda Maldonado e Ing. José Alberto Chi Hernández.

Verificó: Ing. Guadalupe Isabel Lara Carvajal.

Tabla 7.2. Lista de verificación

<i>Pregunta</i>		<i>Respuesta</i>
1	¿Cuál es la fecha de inicio de operaciones?	Junio de 1976.
2	¿Cuáles son las características de la Terminal?	Cuenta con dos muelles, con peso muerto de 40 000 ton y calado de 30 pies, una subestación eléctrica, seis brazos de carga marinos, tres líneas de proceso, tres patines de medición (uno para cada producto) y una longitud de tubería de 1.2 km.
3	¿Cuáles son las actividades realizadas en la Terminal Marítima de PEMEX?	Se realiza la recepción de Diésel, gasolinas regular y premium a través de buquestanques provenientes de puntos nacionales como las Terminales de Almacenamiento y Distribución (TAD) Madero (Tampico, Tamps.) y Pajaritos (Coatzacoalcos, Ver.) e internacionales, así como su posterior despacho por medio de ductos a servicios de almacenamiento.
4	¿Cómo se lleva a cabo la descarga de los combustibles?	Se realiza a través de un poliducto, usando mangueras y brazos marinos en la conexión brida-brida del buque al poliducto de la Terminal, el transporte de los combustibles es mediante la caída de presión ejercida por bombas centrífugas que trabajan a 7 kg/cm ² y 26 °C.
5	¿En cuánto tiempo se realiza de descarga de combustible de un buquetanque?	Depende de la capacidad del buquetanque, pero se descargan 230 000 bbl en aproximadamente 36 h.
6	¿Se verifica la calidad del producto previo a ser descargado?	Sí, se realiza un muestreo en el buquetanque y en las instalaciones de almacenamiento del "Sardinero" se tiene un laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), en donde se realizan pruebas de destilación y análisis de azufre, en caso de gasolinas se verifica el índice de octano y en el del Diésel se hace una prueba de punto de inflamabilidad (flash point).

7	¿Con qué cesionarias colinda en las cercanías la Terminal Marítima de PEMEX?	Con las antiguas instalaciones de ICAVE, Talleres Navales del Golfo, Cargill de México, la Secretaría de Marina y San Juan de Ulúa.
8	¿Cuenta con alguna certificación la Terminal?	Sí, se tiene la certificación en ISO9001.
9	¿Con que sistemas de monitoreo cuentan los patines de medición?	Se tienen cinco detectores de mezclas explosivas, medidores ultrasónicos y sistemas de inyección de anticorrosivos.
10	¿Se tienen alarmas en caso de emergencia en la Terminal Marítima?	Sí, se cuenta con alarmas sonoras y visuales.
11	¿Hacia dónde se dirige el producto?	El producto se dirige por medio de ductos a los servicios de almacenamiento y despacho: Centro Embarcador Bajos la Gallega y al Sardinero.
12	¿Qué productos se almacenan en el Centro Embarcador Bajos la Gallega?	Gasolina regular y Diésel.
13	¿Con cuántos trabajadores cuenta el Centro Embarcador Bajos la Gallega?	Cuenta con tres trabajadores en turno y se tienen tres turnos al día.
14	¿Cuántos tanques de almacenamiento se tienen en el Centro Embarcador Bajos la Gallega y de que tipo son?	Se tienen seis tanques de almacenamiento de combustibles con capacidad de 30 000 bbl (4,769.62 m ³) cada uno, los cuales están equipados con válvulas de venteo, tres son de techo fijo y almacenan Diésel (TV-4, TV-5 y TV-6, este último se encuentra fuera de operación) mientras los otros tres son de techo flotante interno y almacenan gasolina regular (TV-1, TV-2 y TV-3).
15	¿Cuáles son los materiales de construcción de los tanques de almacenamiento?	El material de construcción es 2B2 (150 psi, acero al carbón), y las membranas internas flotantes son de aluminio con sellos de caucho.
16	¿Bajo cuál norma fueron diseñados los tanques de almacenamiento?	El diseño está basado en las especificaciones de norma de la American Petroleum Institute API 650.

17	¿Cuáles son las dimensiones de los tanques de almacenamiento?	D.I. = 22.352 m y Altura = 12.192 m.
18	¿Cuáles son las condiciones de viento empleadas en el diseño de los tanques?	Fueron diseñados para soportar vientos arriba de 150 km/h.
19	¿De qué color se encuentran pintados los tanques de almacenamiento?	Cuentan con un acabado color blanco.
20	¿Con qué tipo de recubrimiento cuentan los tanques de almacenamiento?	Los sistemas de protección anticorrosiva aplicadas a las superficies metálicas expuestas son para ambientes marinos.
21	¿Cuándo fue la última vez que se realizó el mantenimiento al recubrimiento de los tanques y cuando se tiene programado el siguiente?	En el 2017 se realizó el último mantenimiento al recubrimiento de los tanques y se tiene programado uno nuevo para el 2021.
22	¿Los tanques cuentan con algún grado de corrosión?	Sí, de acuerdo con la norma NRF-053-PEMEX-2006, la mayoría de los tanques cuenta con un Grado G de corrosión (Sistema de pintura aplicado sobre una superficie de acero con pequeñas escamas, pero limpia. Sistema fuertemente intemperizado, ampollado y decolorado).
23	¿Se tienen sistemas de monitoreo del producto en los tanques de almacenamiento?	Sí, se cuentan con tres medidores de monitoreo de las variables de flujo, presión y nivel (la desviación entre los equipos de nivel es de ± 3 mL), dos de ellos transmiten la información en el cuarto de control y uno se encuentra en el área de almacenamiento.
24	¿Las válvulas de seguridad son operadas vía remota o in-situ?	De ambas formas.
25	¿El techo del tanque cuenta con drenaje de cubierta?	Sí y se revisa periódicamente para asegurarse que no esté obstruido.
26	¿Cuentan con anclajes los tanques de almacenamiento?	Sí.

27	¿Cuentan con anillos de refuerzo los tanques de almacenamiento?	Sí.
28	¿Cuál es el nivel de actividad del Centro Embarcador Bajos la Gallega en términos del llenado de tanques?	Los tanques se vacían aproximadamente tres veces a la semana.
29	¿Qué tipos de simulacros se realizan y con qué frecuencia?	No se tuvo el acceso a esta información.
30	¿Cuentan con programas de capacitación a personal?	Sí.
31	¿Se tienen señalamiento de seguridad en las instalaciones?	Sí, cuentan con señalamientos de rutas de evacuación e identificación de productos peligrosos de acuerdo con la National Fire Protection Association (NFPA), sin embargo, no se observó la identificación de acuerdo con el Sistema Globalmente Armonizado conforme a la NOM-018-STPS-2015 y se ubicó una tubería mal identificada (con un producto inexistente en el sitio).
32	¿Se tienen vías de fácil acceso a las instalaciones de la Terminal Marítima de PEMEX y al Centro Embarcador Bajos la Gallega?	Sí, por la carretera hacia San Juan de Ulúa.
33	¿A qué distancia se tiene el servicio más cercano (médico y de bomberos)?	Se ubica dentro de las instalaciones de APIVER, aproximadamente a 6 km.
34	¿Tienen identificados los números de emergencia de servicios en caso de accidentes?	Sí.
35	En caso de precipitación ¿hay forma de retirar el agua de estos diques sin que se afecte la integridad de los tanques y la finalidad de los	Sí, en caso de precipitación se realizan las descargas al sistema pluvial y si se llega a presentar un derrame, el agua con hidrocarburos se dirige hacia otro tanque para su posterior tratamiento.

	diques para contener las sustancias en derrames?	
36	¿Cuentan con sistema de alcantarillado eficiente en el área de almacenamiento?	Sí cuentan con sistema de alcantarillado en el área de almacenamiento, a pesar de ello si han presentado escenarios de inundación debidos a precipitación, sin embargo, esto no ha provocado algún tipo de emergencia. Además, el personal aseguró cumplir con la NOM-EM-003-ASEA-2016, en donde se tienen las especificaciones del drenaje con el que debe de contar este tipo de instalación.
37	¿Con qué sistemas contraincendios se cuentan?	La Terminal Marítima de PEMEX cuenta con un tanque de agua de servicio de 3 000 bbl, hidrantes y equipo de bomberos, por otra parte, el Centro embarcador Bajos la Gallega tiene un tanque de agua contraincendios de 10 000 bbl, extintores portátiles de polvo químico seco, hidrantes y mangueras contraincendios y los tanques con almacenamiento de combustibles cuentan con sistemas de espuma AFFF, arrestadores de flama, detectores de fuego y anillos de enfriamiento.
38	¿Se hace uso de sistemas de alerta temprana para eventos hidrometeorológicos?	Sí, se realiza un seguimiento constante al Servicio Meteorológico Nacional.
39	¿En qué condiciones hidrometeorológicas se suspenden actividades?	En la Terminal Marítima de PEMEX se suspenden actividades a velocidades de viento de 35 nudos (64.82 km/h).
40	¿Con qué estructuras protectoras cuenta la Terminal Marítima de PEMEX y el Centro Embarcador Bajos la Gallega?	La Terminal Marítima se encuentra bardeada y cuenta con un rompeolas de 632 m de longitud. Por su parte, el Centro Embarcador Bajos la Gallega carece de una estructura de rompeolas en la línea de costa y la barda perimetral construida de ladrillos de aproximadamente 2.70 m de altura, tiene defectos estructurales (varillas expuestas y material de construcción intemperizado, principalmente se observan los daños en la parte del barlovento por lo que se pueden atribuir a las condiciones del sitio como: viento, oleaje y salinidad).
41	¿De acuerdo con la NRF-048-PEMEX-2014 la instalación cuenta con sistemas de pararrayos?	Sí, sin embargo, no se cuentan con terminales aéreas o puntas de pararrayo y por ende tampoco con cables que conecten las terminales aéreas a las terminales de tierra, lo cual no asegura su eficiencia.