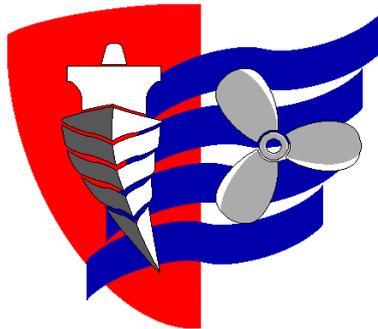


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



Trabajo Fin de Máster

**PREDICCIÓN DE EVOLUCIÓN DE UN
VERTIDO DE HIDROCARBUROS EN EL
PUERTO DE COZUMEL (MÉXICO)
MEDIANTE SOFTWARE GNOME**

**(PREDICTION OF THE EVOLUTION OF AN OIL SPILL
IN THE PORT OF COZUMEL (MEXICO) BY USING
THE SOFTWARE GNOME)**

**Para acceder al Título de Máster Universitario en:
Ingeniería Náutica y Gestión Marítima**

Autor: Victor Morris Gomez
Director: Jesús Miguel Oria Chaveli

octubre 2019

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

Trabajo Fin de Máster

**PREDICCIÓN DE EVOLUCIÓN DE UN
VERTIDO DE HIDROCARBUROS EN EL
PUERTO DE COZUMEL (MÉXICO)
MEDIANTE SOFTWARE GNOME**

**(PREDICTION OF THE EVOLUTION OF AN OIL SPILL
IN THE PORT OF COZUMEL (MEXICO) BY USING
THE SOFTWARE GNOME)**

**Para acceder al Título de Máster Universitario en:
Ingeniería Náutica y Gestión Marítima**

AVISO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Máster de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Máster, así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo.

AGRADECIMIENTOS:

Quisiera dedicar unas líneas a agradecer a todas aquellas personas que me han apoyado en esta larga y difícil tarea de cumplir el sueño de ser Capitán de la Marina Mercante, la cual culmina a través de este Trabajo de Final de Máster.

En especial, quisiera dedicar una sentida gratitud a mi madre Rosa, la cual ha sido y será la persona que más me ha inspirado y me ha apoyado en este sueño, que llevo persiguiendo desde los 5 años. Por todas esas veces, que, en momentos de dificultad, ha sabido escucharme y darme sabios consejos.

Agradezco de la misma forma, a mi padre, por haberme inculcado desde pequeño todo lo relacionado con la mar y la marina mercante.

A mi tío “Willy”, por haber estado siempre disponible a ayudarme durante mi carrera profesional, desde que empecé a navegar a los 20 años, siempre dispuesto a echarme un cabo en los momentos de necesidad.

Agradecer también a mis hermanos Álex y Paula, así como a todos mis familiares y amigos por haber tenido la inmensa paciencia de aguantar mi pasión, casi obsesiva por la mar y los barcos y los largos periodos de ausencia. Incluyo en este agradecimiento a mi familia política, por estar siempre apoyándome desde la distancia en Ciudad del Cabo.

Al director de este trabajo, por sus valiosas aportaciones y por su implicación en cada una de las partes que componen este trabajo

Y, por último, agradezco en especial a mi pareja Sonja, por ser la motivación para finalizar este trabajo con éxito y tener siempre fe en mí, incluso en aquellos momentos de flaqueza.

Índice

Tabla de contenido

Índice	III
Índice de Ilustraciones	VI
Resumen y Palabras clave	VIII
Abstract and Keywords	IX
I INTRODUCCIÓN	1
II MEMORIA DESCRIPTIVA.	3
II.1 Planteamiento del problema e hipótesis.	3
II.1.1 Planteamiento del problema.....	3
II.1.1.1 Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos (OPRC '90)	4
II.1.1.2 Plan Nacional de Contingencia para Derrames de Hidrocarburos y Sustancias Nocivas Potencialmente Peligrosas en las Zonas Marinas Mexicanas	6
II.1.1.2.1 Niveles del Plan Nacional de Contingencia.....	7
II.1.1.2.2 Regiones del Plan	8
II.1.2 Hipótesis de partida.....	9
II.1.2.1 Duración de la Simulación	9
II.1.2.2 Tipo de combustible.....	9
II.1.2.3 Localización.....	10
II.1.3 Hipótesis de resultado.....	11
II.1.3.1 Condiciones Meteorológicas.....	11
II.1.4 Herramientas de resolución:	12
II.1.4.1 Boyas "ODAS"	12
II.1.4.2 Software de predicción y modelado GNOME	14
II.1.4.3 Base de Datos GOODS.....	16

II.1.5	Descripción del sistema objeto de estudio.	17
II.1.5.1	Isla de Cozumel	17
II.1.5.2	Puerto de Cozumel	19
II.1.5.2.1	Fondeaderos	19
II.1.5.2.2	Muelles	19
II.1.5.3	Corrientes del Canal de Cozumel	23
II.1.6	Descripción del Contexto científico o técnico	24
II.1.6.1	Histogramas.....	24
II.1.6.2	Diagrama de Cajas y Bigotes	27
II.1.6.3	GNOME	28
II.2	Metodología.....	29
II.2.1	Guía para la obtención y tratamiento de los datos del viento... ..	29
II.2.1.1	Descarga de los datos del viento y exportación a Excel	29
II.2.1.2	Creación de Histograma de Frecuencias y Diagrama de Cajas y Bigotes	32
II.2.1.3	Importar perfil costero a GNOME	35
II.2.1.4	Importar datos de la corriente Oceánica.....	38
II.2.1.5	Realizar la simulación.....	39
III	APLICACIÓN PRÁCTICA.....	43
III.1.1	Obtención de los datos del viento	43
III.1.2	Definición de los diferentes supuestos	49
III.1.3	Análisis de los casos.....	49
III.1.3.1	Caso 1:	49
III.1.3.2	Caso 2:	50
III.1.3.3	Caso 3:	51
III.1.3.4	Caso 4:	51
III.1.3.5	Caso 5:	52
III.1.3.6	Caso 6:	52

III.1.3.7	Caso 7:	52
III.1.3.8	Caso 8:	52
III.1.3.9	Caso 9:	53
III.1.3.10	Caso Especial:	54
IV	CONCLUSIONES	57
	REFERENCIAS	60
	ANEXOS	63

Índice de Ilustraciones

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 - Convenio OPRC '90 - Fuente: Dominio Publico	5
Ilustración 2 - Cobertura geográfica del Plan – Fuente: SEMAR	8
Ilustración 3 - Región Naval 5 - Fuente: SEMAR	9
Ilustración 4 - Zona de Control de Emisiones - Fuente: www.gard.no	10
Ilustración 5 - Corrientes del Golfo de México - Fuente: NOAA	12
Ilustración 6 - Mapa con la localización de las boyas ODAS Fuente: NOAA	14
Ilustración 7 Imagen por Satélite de Cozumel y su entorno - Fuente: Google Maps	17
Ilustración 8 - Vista satélite de Puerta Maya - Fuente: Google Maps	21
Ilustración 9 - Vista satélite de la Terminal SSA México - Fuente: Google Maps	22
Ilustración 10 - Vista satélite de la Terminal SSA México - Fuente: Google Maps	23
Ilustración 11 - Batimetría del Canal de Cozumel - Fuente: Jose Luís Ochoa de la Torre	24
Ilustración 12 - Ejemplo de Histograma - Fuente: Elaboración propia	26
Ilustración 13 - Ejemplo de Histograma - Fuente: Elaboración propia	27
Ilustración 14 - Ejemplo de afectación de un valor atípico en la media aritmética - Fuente: Sanchez Diaz de la Campa.....	28
Ilustración 15 - Mapa de selección de boyas ODAS - Fuente: National Data Buoy Center	31
Ilustración 16 - Instrucciones para la descarga de datos históricos - Fuente: National Data Buoy Server	32
Ilustración 17 - Ejemplo de valor atípico - Fuente: Propia.....	33
Ilustración 18 - Diagrama después de eliminar valor atípico – Fuente: Propia	33

Ilustración 19 - Opción para modificar el ancho de rango - Fuente: Elaboración Propia	34
Ilustración 20 - Ejemplo de Diagrama Radial - Fuente: Elaboración Propia	35
Ilustración 21 - Pagina Web del GOODS para la creación del perfil de costa - Fuente: Elaboración Propia	36
Ilustración 22 Demostración del procedimiento para obtener perfil de la costa - Fuente: Elaboración Propia	37
Ilustración 23 - Paso para importar perfil de costa en GNOME - Fuente: Elaboración Propia.....	38
Ilustración 25 - Menú de configuración del vertido - Fuente: Propia	40
Ilustración 26 - Menú de configuración del Simulador - Fuente: Propia.....	42
Ilustración 27 Localización ODAS próxima a Cozumel - Fuente: National Data Buoy Center	43
Ilustración 28 - Tabla para la categorización de la dirección del viento – Fuente: Propia	45
Ilustración 29 - Diagrama radial de la dirección del viento - Fuente: Propia	46
Ilustración 30 - Histograma de la velocidad del viento - Fuente. Propia	47
Ilustración 31 - Diagrama de Cajas y Bigotes de la velocidad del viento - Fuente: Propia	47
Ilustración 32 - Índice de Asimetría por cuartiles – Fuente: Apuntes Asignatura M1477 - Tema VI	48
Ilustración 33 - Imagen de Punta Nizuc - Fuente: www.en-yucatan.com.mx	51
Ilustración 34 - Representación gráfica de la extensión del vertido - Fuente: Propia	53
Ilustración 35 - Playa de la zona hotelera de Cancún - Fuente: www.quintafuerza.mx	54
Ilustración 36 - Flujo de la corriente del Golfo de México – Fuente: Propia .	56

Resumen y Palabras clave

Resumen

El puerto de Cozumel, constituye uno de los puertos del mar Caribe con mayor tráfico de buques de Crucero. Debido a sus fuertes corrientes al Norte y su posición dentro del canal de Cozumel, un hipotético derrame accidental de hidrocarburo podría extenderse rápidamente a otras zonas del Golfo de México.

Con este trabajo de final de Máster, se pretende demostrar, mediante estudio estadístico y software específico de predicción de trayectorias de vertidos de hidrocarburos, que, bajo ciertas condiciones meteorológicas, un posible derrame de hidrocarburos, podría extenderse de forma rápida al Golfo de México y en especial al Norte de la Península del Yucatán e incluso a los Estados Unidos de América.

Este trabajo podría servir para el desarrollo de un Plan de Contingencia de vertidos de hidrocarburos para el puerto de Cozumel.

En definitiva, dicho trabajo, pretende predecir la evolución de un posible vertido, utilizando varias herramientas, siendo la principal, el software GNOME de la agencia gubernamental NOAA.

Palabras clave

Palabras clave: NOAA, Derrame de Hidrocarburo, Cozumel, Cruceros, GNOME, Predicción de Trayectoria

Abstract and Keywords

Abstract

The port of Cozumel is one of the busiest cruise ports in the Caribbean. Due to the strong northerly current and his location in the Cozumel Channel, a hypothetical oil spill incident may spread rapidly to other areas within the Gulf of Mexico.

The purpose of this Master's thesis is to prove that under certain meteorological circumstances, a possible oil spill may extend rapidly through the Gulf of Mexico and potentially affect other regions like the North of Yucatan Peninsula as well as the United States of America.

This thesis could be useful for the implementation of an Oil Spill Plan for the Port of Cozumel.

For this reason, during this thesis, I intend to prove this theory by using different tools like GNOME, which is a special software developed by the National Oceanographic and Atmospheric Agency of the United States of America.

Keywords

Palabras clave: NOAA, Oil Spill, Cozumel, Cruise ships, GNOME, Trajectory prediction

I INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la industria del crucero ha sufrido un notable crecimiento, incrementando tanto sus flotas, como las capacidades de los buques y el número de destinos a los que viajan. De hecho, según la Florida Caribbean Cruise Association (FCCA), en 10 años, la industria del sector del crucero, ha pasado de transportar en 2009, 17,8 millones de pasajeros a 25,8 millones en el año 2018. A modo de ejemplo, este sector contribuyó en 2016 con unos 128 billones de dólares a la economía mundial, dando trabajo a un millón de personas alrededor del globo, y aportando aproximadamente 41 billones de dólares en sueldos y remuneraciones.

Las cifras podrían parecer modestas, si tenemos en cuenta, que a España la visitaron 82,6 millones de turistas en 2018 (Press, s. f.). Además, conviene mirar atrás para entender el alcance real del crecimiento de esta industria, ya que en el año 1980 solo viajaron en crucero 1,8 millones de pasajeros y ya en 2018, se había alcanzado la cifra de 25,8 millones de cruceristas.

El caso que se va a tratar en este trabajo, va a estar enfocado a la isla caribeña de Cozumel, perteneciente a la República Federal de México. Uno de los factores por los cuales decidí escoger dicha isla, entre otras tantas, fue por la presencia de una corriente fuerte y constante a lo largo del año, en el canal que separa la Isla con la península del Yucatán.

Después de 12 años trabajando en la industria del crucero, y de arribar a dicho puerto una infinidad de veces, me planteé la duda de que pasaría en caso de que se produjese un derrame de hidrocarburos. Siempre teniendo en cuenta las corrientes de la isla, mi hipótesis no probada fue que el vertido seguramente seguiría una trayectoria hacia el norte, pudiéndose extender a otros territorios más lejanos.

Debido al gran número de buques de crucero que arriban al puerto de Cozumel cada día, es factible pensar en la posibilidad, por muy remota que sea, de producirse un vertido de combustible, ya sea por colisión durante las maniobras de atraque o desatraque, o bien por una varada voluntaria o involuntaria, entre otras situaciones.

Por ese motivo, como Oficial experimentado en esta zona del mundo, y a la vez como Primer Oficial en un buque de crucero de los que arriban cada mes a ese puerto, creo que este trabajo puede ser un estudio beneficioso para entender el alcanza de un vertido en el puerto de Cozumel, además de permitir preparar diferentes técnicas de contención y limpieza adecuadas, teniendo en cuenta la trayectoria del vertido.

Cabe destacar, que este trabajo originalmente estaba enfocado para la Isla privada que posee la naviera para la que trabajo en el archipiélago de Bahamas, pero por no recibir autorización por parte del presidente de la Compañía, decidí en su momento encontrar otro lugar interesante, como es el caso de la isla de Cozumel.

Por último, espero que este trabajo de Final de Máster, pueda ser de utilidad para el desarrollo en un futuro de un Plan de Contingencia por derrame de Hidrocarburos para el puerto de Cozumel y así poder estar preparados ante la amenaza de un vertido accidental en la zona.

II MEMORIA DESCRIPTIVA.

II.1 Planteamiento del problema e hipótesis.

II.1.1 Planteamiento del problema

El problema a resolver, es el estudio de un posible derrame de hidrocarburos en la isla mexicana de Cozumel. Se trata, por tanto, de suponer un hipotético vertido accidental en el puerto, y predecir la evolución de dicho vertido bajo distintas condiciones meteorológicas.

Como se ha mencionado anteriormente, la isla que será objeto de estudio, tiene unas características geomorfológicas y medioambientales muy particulares, en las que se incluyen las fuertes corrientes reinantes, así como la falta de elementos orográficos que den socaire a la isla. Debido a estas características especiales, hacen de este lugar una zona muy interesante de estudio.

Para seguir con el planteamiento del problema, nos interesa, antes de nada, conocer las condiciones meteorológicas predominantes en la zona de estudio, para así poder usar dichos datos para la posterior simulación que se llevará a cabo con el programa GNOME¹ de la agencia NOAA² de los Estados Unidos.

Para la obtención de dichos datos meteorológicos, se ha decidido extraerlos de la base de datos de las boyas de obtención de datos meteorológicos (ODAS³) de la agencia NOAA.

Una vez obtenidos dichos datos meteorológicos, nos interesará tratarlos, para poder analizarlos de manera estadísticas y asegurarnos que no existen valores atípicos que puedan perturbar la fiabilidad de dicha muestra. Para esta parte, se requerirán conocimientos fundamentales en estadística descriptiva, la cual he obtenido en la asignatura de Formación Investigadora (Sanchez Diaz de la Campa, 2019) del profesor Dr. Francisco Sánchez Diaz de la Campa.

¹ GNOME: General NOAA Operational Modeling Environment

² NOAA: National Oceanographic and Atmospheric Agency

³ ODAS: Ocean Data Acquisition Systems

El objetivo final de este trabajo de investigación, es la de demostrar que los vertidos de hidrocarburos en este canal angosto, pueden propagar la contaminación del producto más allá de la isla y sus inmediaciones. Como veremos en la aplicación práctica en el Tema III y en el Tema IV, el hecho de que existe esta corriente prácticamente constante a lo largo del año, hacia el norte, puede propagar los agentes contaminantes hacia el golfo de México, pudiendo alcanzar las costas de los Estados Unidos, así como las de otros estados. Además, se pretende demostrar, la influencia que tienen las corrientes y los vientos, en cuanto a la velocidad de propagación de un vertido.

II.1.1.1 Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos (OPRC '90)

Antes de continuar con el desarrollo del problema, es importante mencionar al Convenio Internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos de la OMI⁴. En dicho convenio, se afirma “el derecho del Estado ribereño a adoptar las medidas que puedan ser necesarias en alta mar para prevenir, mitigar o eliminar todo peligro contra su litoral o intereses conexos, debido a la contaminación o amenaza de contaminación por hidrocarburos, a raíz de un siniestro marítimo” («Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos», s. f.)

Dicho convenio fue adoptado por la IMO en el año 1990, entrando en vigor en el año 1995. Numerosos países en los cuales se incluyen España y México, han ratificado el convenio OPRC'90.

⁴ OMI: Organización Marítima Internacional

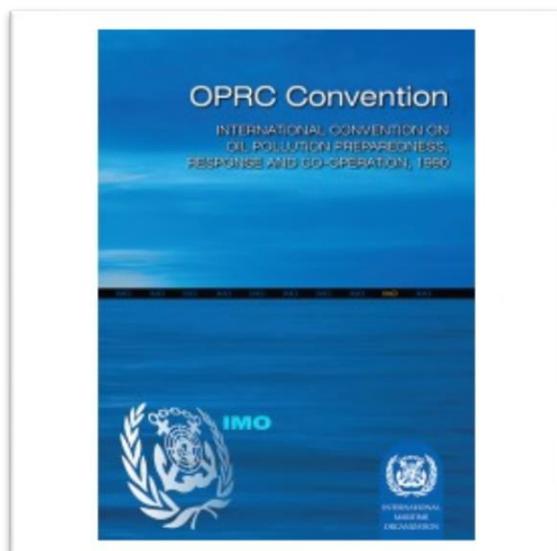


Ilustración 1 - Convenio OPRC '90 - Fuente: Dominio Publico

Este convenio internacional, surgió de la necesidad de adoptar un marco de cooperación entre buques y estados ribereños para la lucha contra la contaminación por hidrocarburos. En él, se estipulan diferentes medidas: («Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos», s. f.)

- La obligatoriedad de que los buques lleven un plan de emergencia en caso de contaminación por hidrocarburos.
- Dicha obligatoriedad también será extendida a todas aquellas empresas que exploten plataformas u otras unidades mar adentro.
- Obligación de notificar cualquier suceso de contaminación a las autoridades de los estados ribereños, especificando además todas las medidas a adoptar.
- Normas en cuanto al almacenamiento de equipo de lucha contra la contaminación
- Normas para la realización de ejercicios de lucha contra la contaminación.

La misión principal de este convenio es la de crear un marco cooperativo entre distintos países para así, dar lucha contra un posible vertido, de una manera eficaz y disminuyendo al máximo los efectos nocivos al medioambiente de un vertido de hidrocarburos.

Además, gracias al convenio OPRC '90 se establecen una serie de medidas de respuesta que se darán dependiendo de la situación.

Este convenio es el marco legal por el cual muchos países incluidos España y México, elaboran un Plan de Contingencia por Derrame de Hidrocarburos. El convenio OPRC '90, establece en su artículo 6 la obligatoriedad de establecer por los Estados Parte, un Sistema nacional de contingencia por derrames de hidrocarburos. En el caso de España, tenemos el “Sistema Nacional de Respuesta ante la contaminación marina” dispuesto en el Real Decreto 1695/2012 de 21 de diciembre, el cual establece una serie de procedimientos para actuar en caso de un vertido de hidrocarburos. Además, en los puertos españoles, todas las instalaciones que manejen, en el ámbito marítimo y portuario, hidrocarburos, deberán estar provistos de un Plan de Contingencia, por los cuales se deberán establecer medidas de prevención y lucha contra la contaminación durante las operaciones de carga, descarga y manipulación de hidrocarburos, en virtud al Real Decreto 253/2004 de 13 de febrero (Oria Chaveli, 2019).

En cuanto a México, le dedicaremos el siguiente apartado para definir su marco legal.

II.1.1.2 Plan Nacional de Contingencia para Derrames de Hidrocarburos y Sustancias Nocivas Potencialmente Peligrosas en las Zonas Marinas Mexicanas

Como se ha explicado anteriormente, el convenio OPRC '90 es el embrión para las normas de otros países en cuanto a la lucha contra la contaminación por hidrocarburos. Hemos visto como a raíz de dicho convenio, surge en España el RD 1695/2012 por el cual se establece el Sistema Nacional de Respuesta ante la contaminación marina. En el caso que nos interesa, México, existe una regla análoga a la española, que contempla una serie de normativas referentes a la respuesta que se ha de llevar a cabo frente a una amenaza de contaminación marina en aguas bajo jurisdicción mexicana. Este es conocido como el “Plan Nacional de contingencia para derrames de hidrocarburos y sustancias nocivas potencialmente peligrosas en las zonas marinas mexicanas”.

El marco jurídico en el que se basa este documento, es a base de varias normas y convenios internacionales entre los que se incluyen: UNCLOS⁵ 82 (Part, Sea, & Subsection, s. f.), OPRC⁶ 90 (IMO, 1991), MARPOL⁷ 73/78 (International Maritime Organization., 2017), CLC⁸ 69 (International convention on civil liability for oil pollution damage., Intergovernmental Maritime Consultative Organization., & International convention on civil liability for oil pollution damage., 1977), SOLAS⁹ (International Maritime Organization, s. f.) entre otros.

De acuerdo al artículo 103.1 de dicho plan, el objetivo General es el de "*Establecer las bases, líneas de acción y de coordinación general ante un incidente que resulte en contaminación del mar por Hidrocarburos en las zonas marítimas mexicanas*"

II.1.1.2.1 Niveles del Plan Nacional de Contingencia

Dicho plan incluye 3 niveles de respuesta los cuales dependerán de la gravedad del derrame y de la capacidad que tenga la administración encargada de lucha contra la contaminación. Los niveles son los siguientes:

Nivel 1: Se activa cuando el derrame accidental ocurra en o cerca de la instalación donde se realizaban las operaciones. En este nivel, el impacto del vertido es bajo y la capacidad de respuesta local debería ser suficiente para contener el derrame.

Nivel 2: Se activa ante derrames de carácter mediano y que ocurran en las cercanías de una instalación como resultado de una operación no rutinaria. En este nivel, los medios locales se pueden ver desbordados, y podrían hacer uso de medios regionales para dar una respuesta eficaz a la contención y eliminación del vertido.

Nivel 3: Se activará ante aquellos derrames que o bien estén lejos de la instalación o aquellos que requieran recursos y apoyos significativos de orden nacional o internacional.

⁵ UNCLOS: United Nations Convention on the Law of the Sea

⁶ OPRC: International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation

⁷ MARPOL: International Convention for the Prevention of Pollution from Ships

⁸ CLC: International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage

⁹ SOLAS: Safety of Life at Sea

Queda patente que los niveles de respuesta, estarán sujetos a varios elementos determinantes, como son la capacidad de gestión y respuesta de las autoridades locales, regionales y nacionales, además de la proximidad a la instalación y de la cantidad de hidrocarburo vertido. Es por ello, que puede ser factible comenzar en un nivel 1 y ante la falta de medios de la autoridad local, se pueda pasar a un nivel superior.

Este es un factor a tener en cuenta en nuestro trabajo, puesto que la isla de Cozumel, es relativamente pequeña y carece de muchos medios para la contención y lucha de la contaminación. Por eso es muy probable, que cualquier incidente que ocurra en el puerto de Cozumel, pueda pasar directamente a nivel 2 o 3.

II.1.1.2.2 Regiones del Plan

De acuerdo al artículo 105 del Plan¹⁰, la cobertura geográfica se establece a las Regiones Navales, las cuales están compuestas por 7 regiones y 14 sectores navales como muestra la ilustración 2.

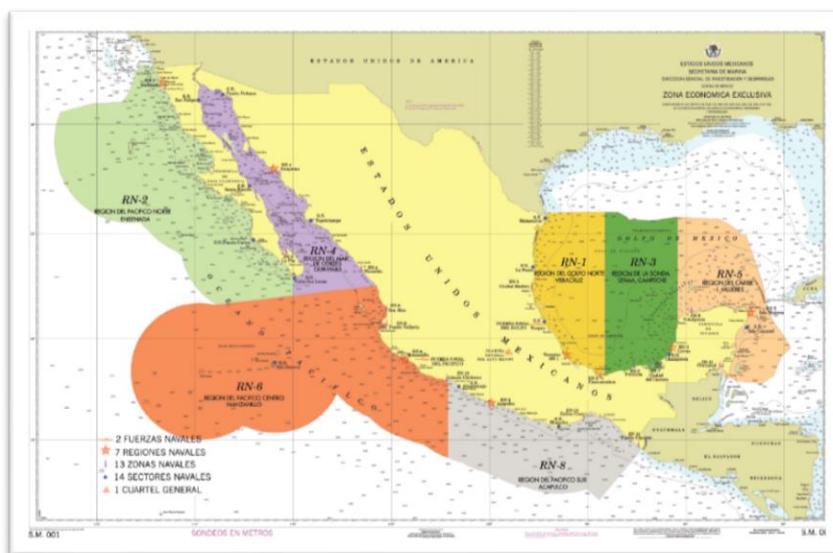


Ilustración 2 - Cobertura geográfica del Plan – Fuente: SEMAR

¹⁰ Plan se refiere al “Plan Nacional de Contingencia para Derrames de Hidrocarburos y Sustancias Nocivas Potencialmente Peligrosas en las Zonas Marinas Mexicanas”

En este caso, nos es de interés la Region Naval 5, la cual incluye la Península del Yucatán y la isla de Cozumel. En la misma isla de Cozumel, cabe destacar que se encuentra el Sector Naval de Cozumel.

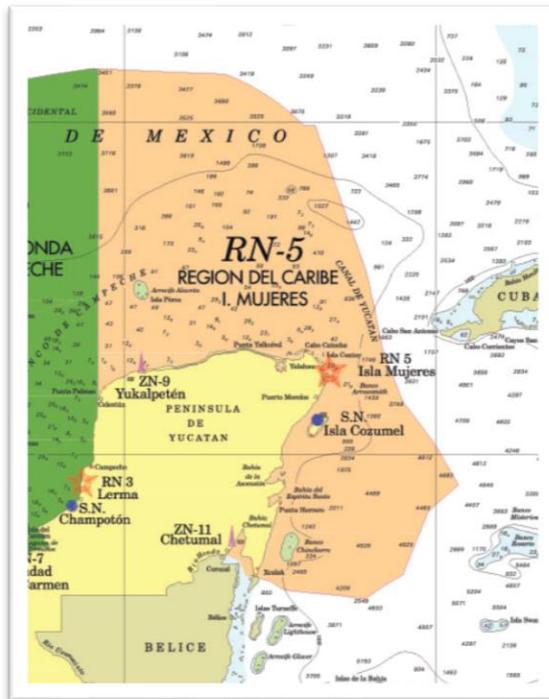


Ilustración 3 - Región Naval 5 - Fuente: SEMAR

II.1.2 Hipótesis de partida

II.1.2.1 Duración de la Simulación

Para los cálculos de la simulación, la duración estará establecida en 10 días, de tal forma podamos observar con detenimiento cual será el comportamiento del derrame. Esta duración ha sido fijada en el software de simulación para que todos los casos que se vayan a ver en la aplicación práctica, tengan la misma duración.

II.1.2.2 Tipo de combustible

Si bien la isla de Cozumel se encuentra fuera de la zona de control de emisiones de los Estados Unidos, muchos de los buques de crucero llevan a bordo ambos tipos de combustible: Diesel Oil y Fuel Oil. La razón por la que estos buques llevan estos dos tipos de combustible es que muchas de estas naves tienen escalas o puerto base en puertos americanos, los cuales están

dentro de las zonas de control de emisiones (ECA). Teniendo en cuenta, que la mayoría de estos buques de crucero transportan entre 1000 y 1500 toneladas de combustible, para este ejercicio utilizaremos 100 m³ como cifra de hidrocarburo vertido (10%), ya que la mayoría de tanques suelen rondar esa capacidad. En cuanto al tipo de combustible utilizaremos el tipo de Diesel Oil. Este tipo de combustible es un destilado de bajo contenido en Sulfuro, ya que muchos de estos cruceros deberán transitar en zonas de control de emisiones ECA y no deberían superar los 0.10% en contenido del mismo (IMO, 2011).



Ilustración 4 - Zona de Control de Emisiones - Fuente: www.gard.no

II.1.2.3 Localización

Como se explica más adelante en los apartados II.1.5.2.1 y II.1.5.2.2, la isla posee infraestructuras para distintos muelles de atraque y diferentes zonas de fondeo, dependiendo del tráfico. Para el tráfico de cruceros, existe una terminal en la zona noroeste de la Isla (Punta Langosta) y otro en la zona Suroeste de la ciudad (Puerta Maya y SSA. México).

Para este estudio consideraremos como localización inicial la posición del muelle de Punta Langosta, al estar este, situado en el extremo más septentrional de la Isla y por tanto ser el lugar más propicio para que el vertido evolucione hacia el canal de Yucatán, como se observará en la aplicación práctica en el apartado III. Sin embargo, por la acción de las corrientes, los muelles localizados al suroeste presentarán un comportamiento similar al de

Punta Langosta, con la única diferencia del tiempo en alcanzar el límite superior de la isla.

Posición del muelle Punta Langosta: Lat. 20° 30.5' N y Long. 086° 57.2 O

Por tanto, cualquier derrame ocurrido en las terminales del suroeste de la ciudad, nos proporcionara más tiempo de reacción que si ocurriera en la terminal más septentrional.

II.1.3 Hipótesis de resultado

II.1.3.1 Condiciones Meteorológicas

La teoría que se pretende comprobar en este Trabajo de Final de Master, es la hipotética trayectoria que seguiría el vertido de hidrocarburo hacia el Golfo de México, pudiéndose extender a otros países o regiones de la zona. Si bien, el vertido también podría eventualmente propagarse al sur del canal, considero en este estudio irrelevante cualquier condición meteorológica que pueda llevar el vertido hacia el sur. La razón primordial es debido a la fuerte corriente de entre 3 y 4 nudos que impera en la zona, ya que las probabilidades de que el vertido se propague hacia el sur son ínfimas.

Además, cualquier condición meteorológica que cause que el vertido se propague hacia ambas costas del canal de Cozumel, también las consideraremos irrelevantes a este estudio, puesto que no existiría ninguna otra región afectada más que la que está siendo objeto de estudio, y, por ende, no entra dentro del objetivo de este estudio, que sería demostrar la fuerza que tiene la corriente para propagar rápidamente el vertido a otras zonas remotas.

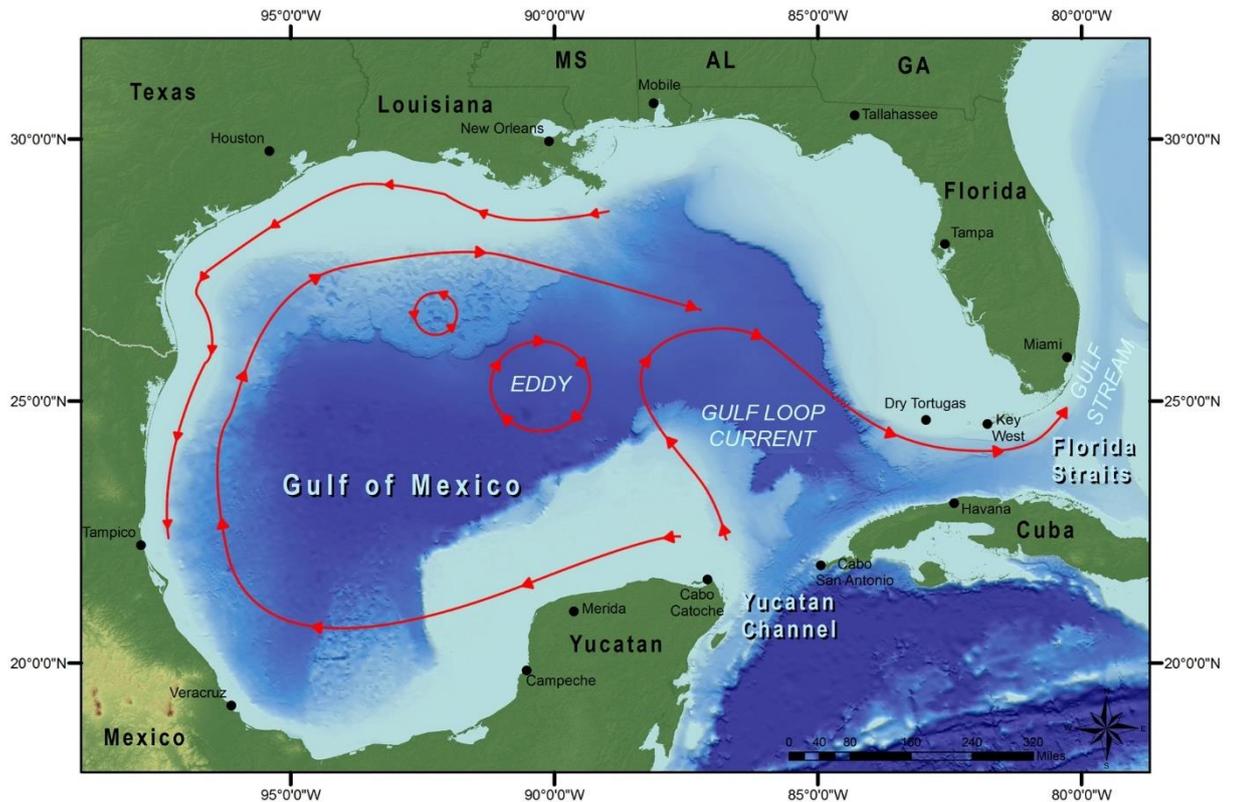


Ilustración 5 - Corrientes del Golfo de México - Fuente: NOAA

II.1.4 Herramientas de resolución:

II.1.4.1 Boyas “ODAS¹¹”

Uno de las herramientas fundamentales para la obtención de datos meteorológicos en la mar, son las conocidas como boyas ODAS. Son numerosos los países y las organizaciones tanto públicas como privadas, que disponen de boyas ODAS para la obtención automática de datos medioambientales y aquellos relacionados con el ámbito marino.

Dichas boyas pueden registrar una gran variedad de datos, tales como:

- ✓ Temperatura ambiental
- ✓ Temperatura de rocío
- ✓ Temperatura del mar
- ✓ Dirección, Altura y periodo de las olas

¹¹ ODAS: Ocean Data Acquisition System

- ✓ Presión atmosférica
- ✓ Velocidad y dirección del viento
- ✓ Velocidad y dirección de las corrientes marinas

Es por ello que estas boyas son participes activos en la confección y mejora de los modelos de predicción meteorológica, además de servir como alerta temprana de temporales y huracanes. Este sinfín de utilidades, nos aporta una muy rica y variada información que podemos obtener, en muchos casos, de manera gratuita.

En los Estados Unidos todas las boyas meteorológicas dependen de la NOAA¹², que es la agencia oceanográfica y atmosférica del gobierno de los Estados Unidos. Asimismo, dependiente de la NOAA, existe el “National Data Buoy Center” que es el organismo encargado de la recolección de los datos obtenidos por las boyas, así como el mantenimiento de las mismas.

A 11 de septiembre de 2019, de acuerdo a la página oficial del NDBC¹³, existían 1419 boyas repartidas alrededor de todo el mundo, de las cuales 1036 estaban recibiendo información.

Sabiendo esto, la propia web, nos visualiza en un mapa todas las estaciones ODAS en servicio, la cual nos ofrece los datos meteorológicos históricos de los recientes años, algunas llegando a abarcar datos de la década de los 80.

¹² NOAA: National Oceanographic & Atmospheric Agency

¹³ NDBC: National Data Buoy Center

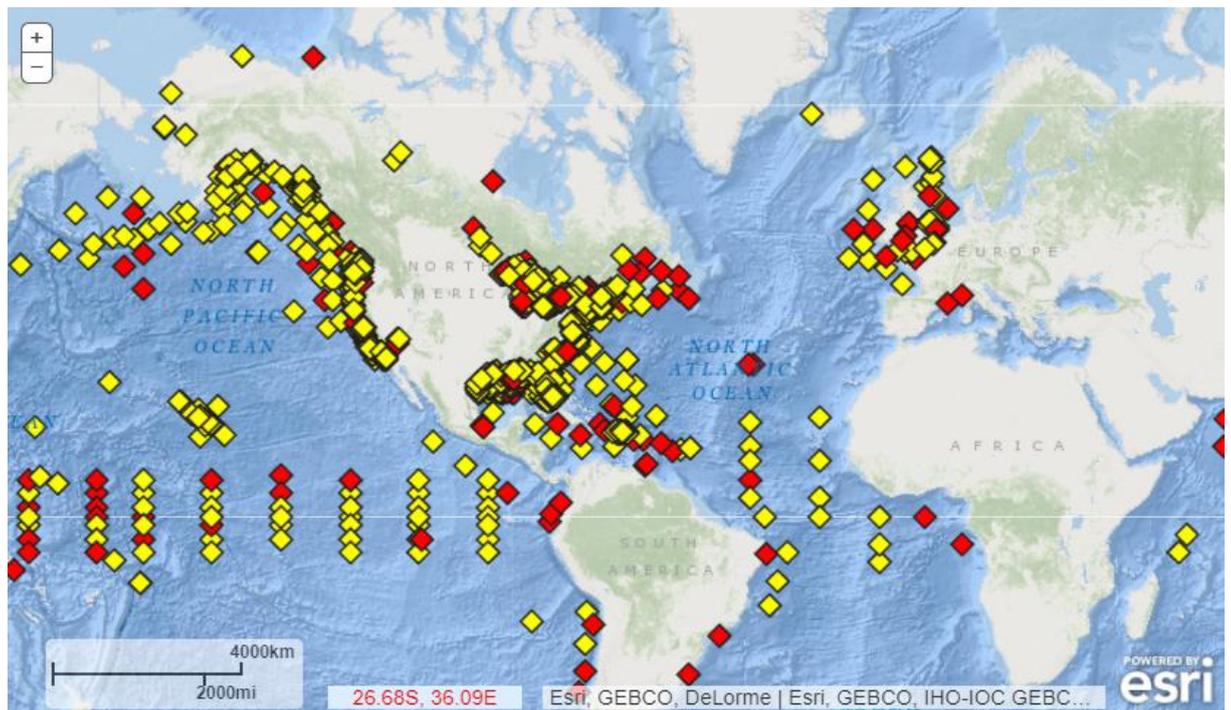


Ilustración 6 - Mapa con la localización de las boyas ODAS Fuente: NOAA

En caso de estar interesados en los datos de alguna boya ODAS, lo único que se debería hacer, es acercar el cursor a una de esas boyas y a partir de ahí, se pueden descargar los datos históricos por años. Es importante mencionar que los datos, se descargarán en formato .TXT, y por lo tanto deberán ser exportados de forma adecuada al formato que más interese, siendo en mi caso, el programa Excel. Mas adelante, en la Metodología y en la Aplicación práctica desarrollaremos más profundamente la forma de exportar dichos archivos.

II.1.4.2 Software de predicción y modelado GNOME¹⁴

El programa GNOME, es un software creado por la División de Emergencias de la NOAA como herramienta de modelado que facilita la predicción de la trayectoria de un contaminante en el medio marino (Seattle, 2012).

Según la página web de la NOAA, el GNOME, es capaz de:

- ✓ Predecir como el viento, las corrientes y otros procesos intervienen en la trayectoria y dispersión del contaminante en el medio marino.

¹⁴ GNOME: General NOAA Operational Modeling Environment

- ✓ Predecir los cambios químicos y físicos que experimentara el vertido dependiendo de las condiciones meteorológicas.

Para el uso de este software requeriremos de varios datos que nos serán necesarios para llevar a cabo la simulación de manera correcta.

Por un lado, se necesitará el perfil de la costa de la que vamos a trabajar, de tal manera que el propio software pueda detectar la costa y así poder realizar los cálculos correctamente. Uno de los inconvenientes que tiene el GNOME, es que por defecto la página web de la NOAA, solo ofrece contornos de la costa americana y de algunos puertos, sin embargo, si tenemos que utilizar otro perfil de costa de otro país u otra región no incluida, deberemos utilizar otra aplicación que se llama GOODS, de la cual hablaremos más adelante, en el apartado II.1.4.3. Dicha aplicación, como veremos en apartados posteriores, nos permite seleccionar en un mapa mundial, la región que nos interesa, y procede a realizar un extracto del mismo que nos permitirá luego exportarlo al software GNOME.

Además del contorno de la costa, el programa nos pedirá 2 datos vitales para el cálculo de la predicción de la trayectoria del vertido.

- ✓ **Datos del viento:** La dirección e intensidad del viento jugarán un rol muy importante al ser necesarios para el cálculo de la dispersión y trayectoria del derrame del producto. Estos datos, como hemos comentado anteriormente, los obtendremos directamente de las boyas ODAS. Sin embargo, a posteriori, deberemos realizar una estadística de los datos para así poder decidir qué dirección e intensidad de vientos son de interés para el estudio estadístico. Lo más normal, será entonces escoger como datos de trabajo, los vientos más predominantes en la zona. Desarrollaremos más adelante la forma de obtener y estudiar dichos datos.
- ✓ **Datos de la corriente:** De forma similar al viento, el software necesita de la corriente para los cálculos de trayectoria del vertido. Lógicamente podemos obtenerlos de distintos modos, dependiendo del tipo de corrientes que estemos analizando. Entre los distintos tipos de corrientes podemos encontrarnos con corrientes de marea, corrientes de densidad, corrientes por oleaje y corrientes por circulación oceánica.

Este último es el caso de la isla de Cozumel, ya que esta se encuentra en un canal angosto a merced de la corriente del Caribe que es parte a su vez de la corriente Ecuatorial del Norte. Las corrientes por circulación oceánica suelen ser constantes y poco variables durante el año.

Los datos de las corrientes se pueden obtener a través de la aplicación GOODS¹⁵ de la NOAA. Como se verá en el siguiente apartado II.1.4.3, GOODS es una base de datos online con infinidad de datos meteorológicos listos para ser importados a GNOME, en concreto dispone de una compilación de las corrientes marinas actualizada y que abarca la totalidad del mundo. Además, como punto interesante, la aplicación GOODS exporta dicho archivo de manera que es automáticamente reconocido por el software de predicción GNOME.

- ✓ **Datos del producto contaminante:** Por último, y como no podía ser de otra forma, el software necesita información del producto contaminante para que pueda calcular las características fisicoquímicas del mismo. Para facilitar dicha tarea, el propio software posee una base de datos de los hidrocarburos más comunes.

II.1.4.3 Base de Datos GOODS

GOODS es una aplicación creada por la NOAA por la cual se facilitan diferentes herramientas y complementos para el uso del software de modelado y simulación GNOME. Todas estas herramientas son fácilmente accesibles de manera gratuita y permiten un fácil exportación e integración con el programa GNOME.

A merced de esta base de datos, podremos obtener distintas herramientas para este estudio, como las corrientes, ya sean astronómicas como oceánicas, además de los perfiles de costa.

¹⁵ GOODS: GNOME Online Oceanographic Data Server

II.1.5 Descripción del sistema objeto de estudio.

II.1.5.1 Isla de Cozumel

La isla de Cozumel es una isla de roca caliza muy plana, a veinte kilómetros de la costa oriental de la península del Yucatán (Regionales, Turismo, La, & Cozumel, 2003), la cual pertenece a la República Federal de México. La isla es relativamente pequeña comparada con otras islas del mar caribe, pues mide 45 kilómetros de largo y 17 kilómetros en el punto más ancho, teniendo una superficie de 864 kilómetros cuadrados (Regionales et al., 2003). Cabe destacar que debido a la falta de promontorios hace que la isla este sometida a los vientos fuertes, en su mayoría de componente Este. Es por ello, que la parte oriental de la misma, se ve con frecuencia azotada por los elementos, mientras que la parte occidental, si bien puede ser ventosa, la mar no desarrolla altura debido a la poca distancia entre costas.

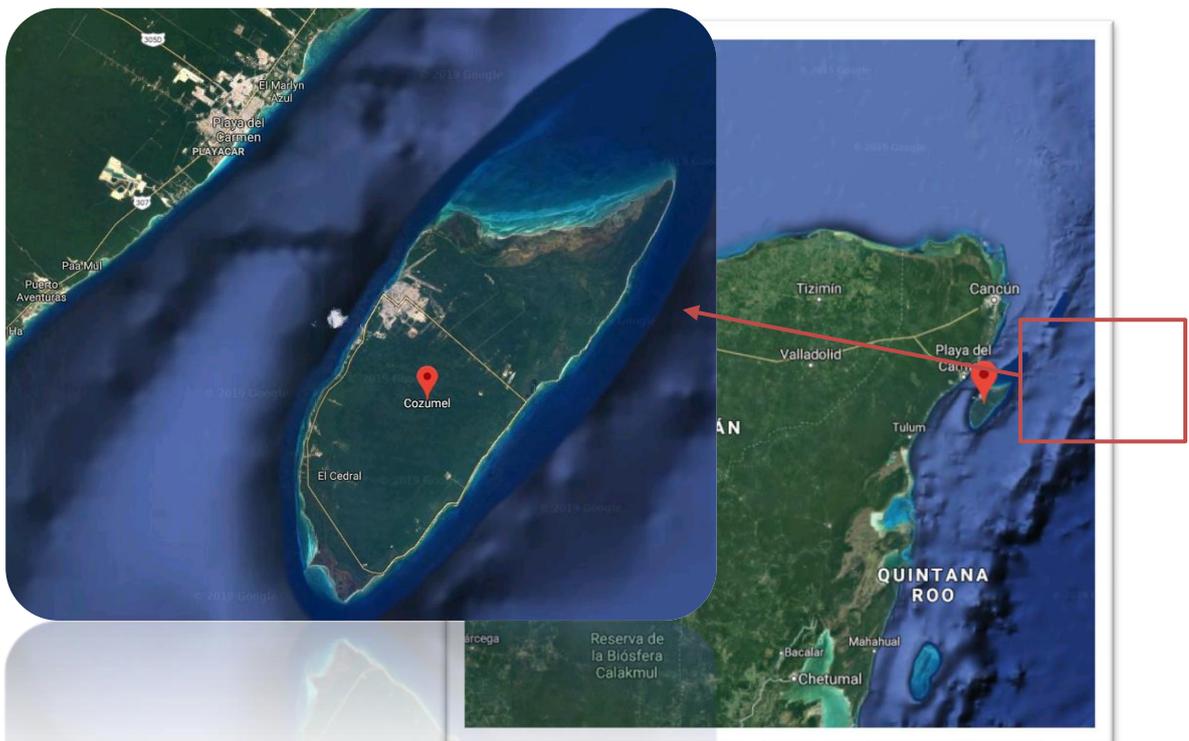


Ilustración 7 Imagen por Satélite de Cozumel y su entorno - Fuente: Google Maps

A modo de curiosidad, en el extremo sur de la isla podemos encontrarnos con Punta Celarain la cual está rodeada por arrecifes, y sumado a la claridad de sus aguas cristalinas, la Isla de Cozumel es un destino preferente para el submarinismo. La capital de la isla, es San Miguel de Cozumel, la cual se encuentra situada al Noroeste de la Isla, en concreto en Latitud: 20° 25' Norte y Longitud: 086° 55' Oeste.

La isla fue descubierta por el explorador español Juan de Grijalva el 3 de mayo de 1518 y al año siguiente desembarcó Hernán Cortes (Periplo Sustentable, Carlos Santander Martín Ramos Díaz, Carlos Santander, de Quintana Roo, & Ramos Díaz, s. f.). Anterior a la llegada de los españoles, la isla estuvo habitada por los Mayas, por considerar a la isla un centro de peregrinación religioso.

Cozumel por sí misma, nunca tuvo ningún interés ni comercial ni estratégico. Se conoce que en el año 1900 la isla era habitada por 971 personas. Sin embargo, estos datos tan desoladores, pronto cambiaría para la isla, ya que para finales del siglo XIX ya habitaban en ella más de 60.000 personas.

Es una vez terminada la 2ª Guerra Mundial cuando se empieza a ver a Cozumel como un destino turístico, en gran parte por los turistas estadounidenses.

De acuerdo al informe estadístico mensual de diciembre de 2018 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes del Gobierno de México, el puerto de Cozumel recibió durante todo el año en cuestión 1.297 cruceros, de los 2.668 cruceros que recibió México en el 2018. Este puerto solamente, recibe alrededor del 48% de todos los cruceros con destino México, trayendo 4.296.187 millones de pasajeros en el 2018 (Puertos, Mercante, Carga, & Pasajeros, 2010).

Esto significa, que el puerto recibe una media diaria de casi 4 buques al día. Si bien es cierto, que puede haber días que no atraquen buques, también es cierto que hay jornadas en las que pueden llegar a coincidir hasta 6 o 7 buques de crucero en la isla. Por último mencionar, que ya por el 2017 este puerto se encontraba en el 4 puesto mundial en cuanto a tráfico de cruceristas («The 10 Busiest Cruise Ports In The World - WorldAtlas.com», s. f.).

Por ese motivo, debido al alto número de buques de crucero que absorbe este puerto, considero relevante hacer un estudio de las consecuencias de un vertido de hidrocarburo en la zona.

II.1.5.2 Puerto de Cozumel

El puerto de Cozumel se localiza en la isla de la cual recibe su nombre, a 17,5 kilómetros de la costa de la Ciudad de Playa del Carmen, al Noreste de la Península del Yucatán (Dirección General Adjunta de Oceanografía, 2011). La isla por su localización geográfica está considerada la isla y el puerto más oriental de México.

Como se mencionó anteriormente, este puerto está considerado uno de los puertos de cruceros más importantes del mundo. Sin embargo, aparte de ser un puerto especializado en buques de crucero, alberga también muelles para transbordadores y para tráfico de buques de pesca.

II.1.5.2.1 Fondeaderos

La isla dispone de 6 fondeaderos, los cuales pueden ser usados por distintos tipos de buques (Dirección General Adjunta de Oceanografía, 2011). A pesar de ello, el uso de fondeaderos es irrelevante para este estudio, ya que, en muy contadas ocasiones, los buques de crucero hacen uso de estos.

II.1.5.2.2 Muelles

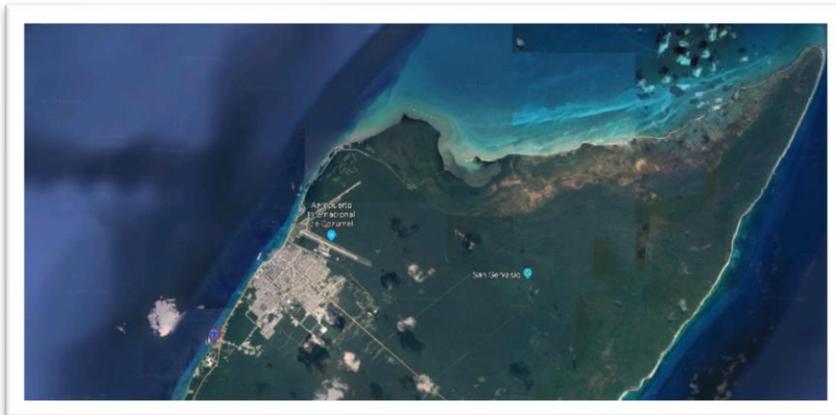
El puerto de Cozumel dispone de distintos muelles distribuidos a lo largo de la costa occidental de la Isla. Como se ha explicado en el apartado II.1.5.1 la isla empezó a definirse como destino turístico a mediados del siglo XX, al terminar la II Guerra Mundial. Es por este el motivo, por el cual, algunas de las instalaciones portuarias y edificios hoteleros, tienen una antigüedad considerable, siendo muchos de ellos construidos en la década de los 70 y 80. Sin embargo, en cuanto a las terminales de crucero, estas fueron construidas en la década de los 90 (Dirección General Adjunta de Oceanografía, 2011), para atender la gran demanda que vivió la isla (Periplo Sustentable et al., s. f.) y la industria del crucero.

A continuación, se hace un breve resumen de los distintos muelles que dan servicio a los buques de crucero:

- **Muelle de Puerta Maya:** Esta terminal de cruceros es de uso público y tiene una concesión de 20 años para construir, operar y explotar dicha terminal para el uso público de buques de crucero. Empezó a operar en 1997 (Dirección General Adjunta de Oceanografía, 2011). Esta terminal consta de dos pantalanes rematados al principio con dos duques de alba por pantalán.

El muelle más oriental tiene una longitud de aproximadamente 285 metros, mientras el otro muelle situado al lado occidental, tiene una longitud de 234 metros. Por lo tanto, ambos muelles pueden dar cabida a 4 buques de crucero de forma simultánea. La limitación de calado para las 4 posiciones de atraque es de 11 metros.

La posición de la terminal es: Latitud: 20° 28.6' N y Longitud: 086° 58,5' O



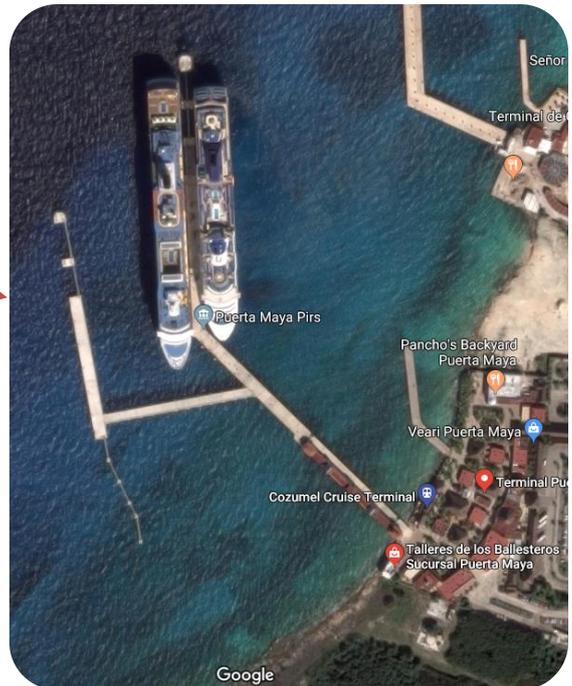


Ilustración 8 - Vista satélite de Puerta Maya - Fuente: Google Maps

- **Terminal SSA México:** Este muelle empezó a operar en el año 1996 y dispone de un solo pantalán con dos posiciones de atraque, el cual tiene una extensión aproximada, incluyendo los duques de Alba, de 414 metros. Por lo tanto, esta terminal puede acomodar a 2 buques de crucero con un calado máximo de 11 metros.

La posición de la terminal es: Latitud: 20° 28,8' N y Longitud: 086° 58,5' O

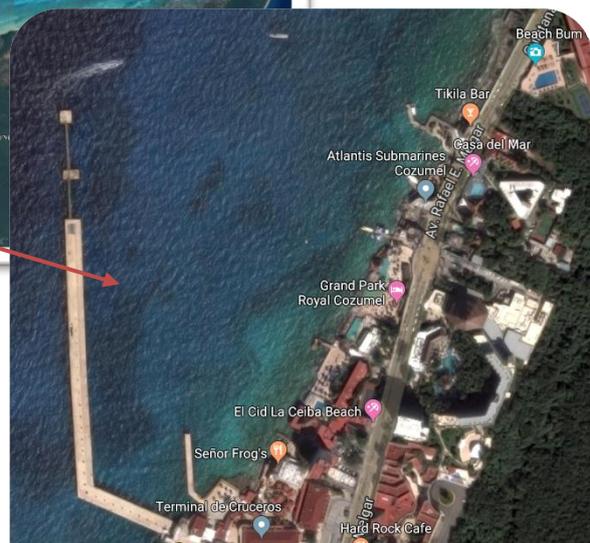
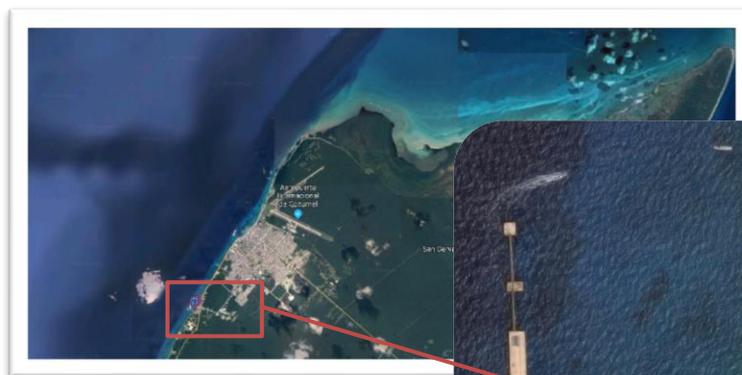


Ilustración 9 - Vista satélite de la Terminal SSA México - Fuente: Google Maps

- **Punta Langosta:** Esta es la terminal ubicada más al norte de la isla, y además es la terminal más céntrica a la ciudad, ya que se ubica al frente de San Miguel de Cozumel. Dicha terminal, dispone de un pantalán de características similares a las anteriores terminales, la única diferencia, recae en la ausencia de duques de Alba. La longitud del pantalán es de aproximadamente 288 metros y con un calado máximo de 11 metros.

Cabe destacar, que, en este tipo de muelles, es muy común que buques de mayor eslora atraquen, sobresaliendo la proa o popa del buque, como puede ser el caso del buque atracado en la ilustración 10.

La posición de la terminal es: Latitud 20° 30,5' N y Longitud: 086° 57,2' O

Dado que este es el muelle del cual vamos a realizar el estudio, tomaremos la posición anterior, como punto del vertido para el programa GNOME.



Ilustración 10 - Vista satélite de la Terminal SSA México - Fuente: Google Maps

II.1.5.3 Corrientes del Canal de Cozumel

Las corrientes marinas en esta zona son provenientes de la corriente ecuatorial del norte, la cual accede al mar Caribe a través de las islas de Barlovento, convirtiéndose así en la corriente del Caribe (Dirección General Adjunta de Oceanografía, 2011). Dicha corriente, cruza el mar caribe de Este a Oeste, llegando hasta el estrecho del Yucatán donde da origen a numerosos giros importantes en el Golfo de México.

En el centro del Canal de Cozumel, las corrientes oscilan entre velocidades de 3 a 4 nudos al Norte. Dichas velocidades, al ser una corriente de origen oceánico, suelen mantenerse estables a lo largo del año. Si es cierto, que, en ocasiones, debido al paso de tormentas tropicales o huracanes, las corrientes podrían variar de velocidad durante el paso de ese fenómeno, pero siempre manteniéndose en dirección Norte.

Cabe destacar, que estas fuertes corrientes vienen a ser el producto de la batimetría propia de la Isla. La isla se asienta sobre un arrecife escarpado donde las profundidades en el canal son superiores a los 400 metros de profundidad (Abascal, 2003). Debido a la línea de costa abrupta y a la

estrechez de este canal, se produce un efecto Venturi donde la velocidad de la corriente se incrementa.

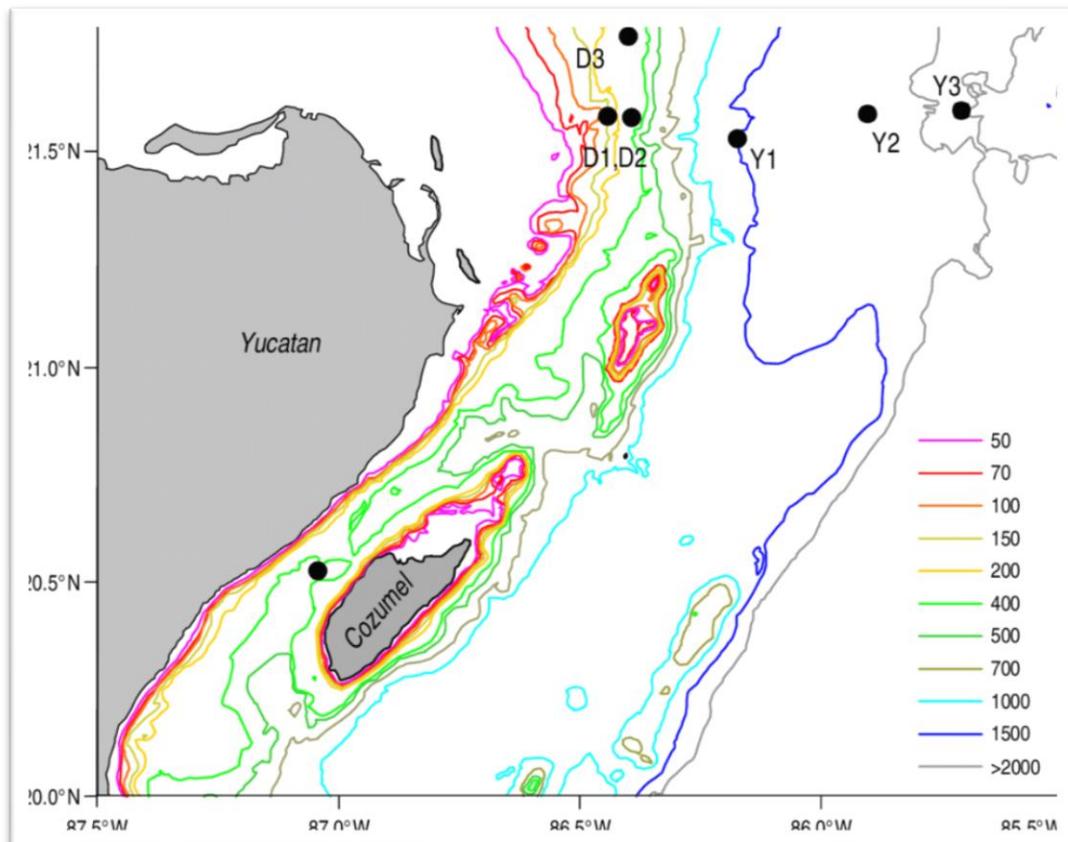


Ilustración 11 - Batimetría del Canal de Cozumel - Fuente: Jose Luís Ochoa de la Torre

II.1.6 Descripción del Contexto científico o técnico

II.1.6.1 Histogramas

Se ha descrito anteriormente que es primordial analizar los datos de la dirección y velocidad del viento para así decidir qué datos se van a incluir en la simulación con el software GNOME. Por ese motivo, dado que manejamos una muestra con una cantidad inmensa de observaciones, es muy útil el uso de histogramas para observar cuales son las condiciones predominantes en la zona.

En cuanto al uso de histogramas, es un conocimiento adquirido durante la asignatura de Formación Investigadora de esta misma universidad, impartida por el Profesor Dr. Francisco José Díaz de la Campa, a la cual voy a hacer referencia en este apartado.

Antes de hablar de histogramas, debemos de tener clara la diferencia entre Variables numéricas y categóricas. De acuerdo a los apuntes de la asignatura, Tema IV apartado 1.2 se define como una variable la “característica de la unidad de análisis que interesa registrar. En el momento de ser registrada, se transforma en un número o en una categoría”

Por ejemplo, una variable puede ser la velocidad del viento, la dirección del viento, la temperatura ambiental, etc.

En el apartado 1.3 se profundiza más en los distintos tipos de variables, las categóricas y las numéricas. Las variables numéricas son aquellas donde el resultado de la medición es un número y además permite realizar operaciones matemáticas. Este es el caso de los ejemplos anteriormente descritos. Sin embargo, nótese la diferencia entre tomar los datos de la dirección del viento en grados o en puntos cardinales.

En el caso de que transformáramos la dirección del viento en puntos cardinales, estas variables pasarían a ser automáticamente variables categóricas, ya que ni son números ni se pueden operar matemáticamente. Es por ese motivo por el cual deberemos de tratar de una manera diferente las variables categóricas, ya que estas no pueden ser representadas en un histograma verdadero.

Un histograma es la representación gráfica de la distribución de frecuencias de una variable numérica continua. Dicho de otra manera, es un diagrama de columnas, las cuales se encuentran adyacentes la una de la otra, la cual indica el número de veces que se ha observado dicha variable. Por ejemplo, si se han observado 5 veces olas de 1 metro, la altura de la columna será de 5, ya que representa la distribución de la frecuencia.

Es importante tener en cuenta que la apariencia de un histograma puede cambiar de forma radical dependiendo de dos factores:

- ✓ **El número de observaciones:** Si partimos de una muestra pobre, corremos el riesgo que algunas categorías tengan un déficit de observaciones, y por lo tanto la muestra no se adapta a la realidad.
- ✓ **Intervalo del eje de categorías:** En un histograma podemos cambiar el intervalo por el cual se agrupan los valores numéricos. Por ello, tal y como se indica en el Tema V apartado 2.1.2, si aumentamos las categorías, obtendremos un histograma con una información totalmente superflua y de difícil interpretación. Es por este motivo, por el cual se ha de valorar muy atentamente cual va a ser la distancia entre categorías. En las siguientes dos ilustraciones, podemos ver un ejemplo del siguiente fenómeno.

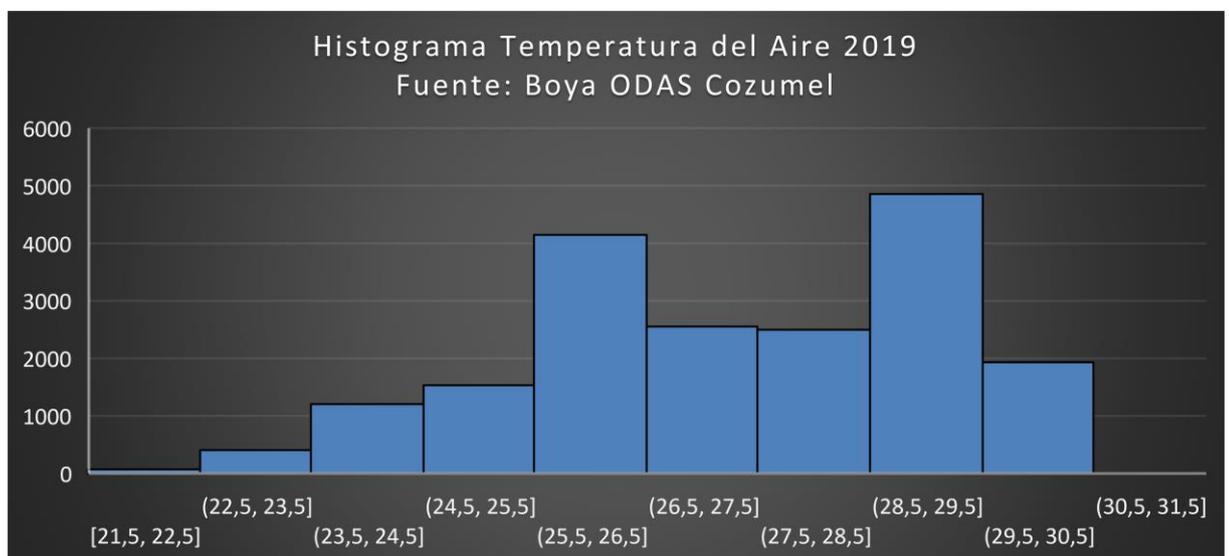


Ilustración 12 - Ejemplo de Histograma - Fuente: Elaboración propia

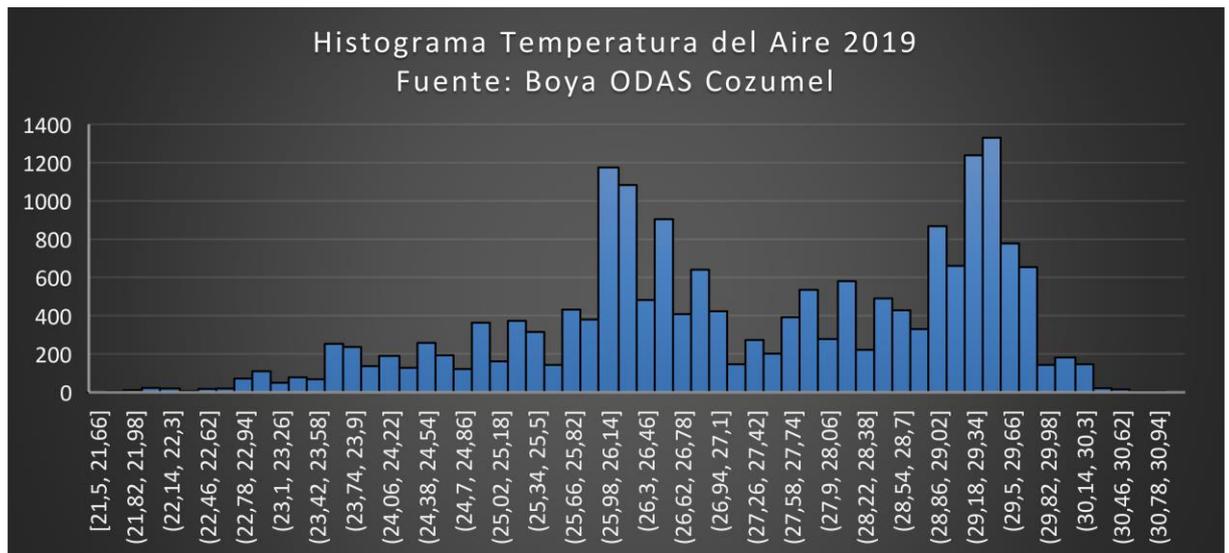


Ilustración 13 - Ejemplo de Histograma - Fuente: Elaboración propia

II.1.6.2 Diagrama de Cajas y Bigotes

Este gráfico es una acumulación de medidas resumen que permite localizar los datos atípicos (Sanchez Diaz de la Campa, 2001). Los datos atípicos¹⁶ pueden ser producto de un error humano, de lectura de los sensores o de otro tipo de error. A la hora de tratar grandes muestras, es de suma importancia, localizar y eliminar los datos atípicos, ya que algunas medidas de resumen pueden resultar alteradas.

Cabe destacar que algunas de las medidas de resumen, como puede ser la media aritmética, pueden verse sumamente afectadas por valores atípicos.

En la ilustración 14, se puede observar que la mayoría de datos se sitúan en x_1 y x_2 , sin embargo, el punto x_3 se sitúa muy alejado del centro, del cual se sitúan la mayoría de estas observaciones. Este punto x_3 , se consideraría un valor atípico, y por ello, la media aritmética se desviará del centro y se desplazará hacia el valor atípico. Por ese motivo, deberíamos eliminar el valor atípico para que, de esta forma, la media aritmética retorne al centro.

¹⁶ Un valor atípico es una observación que es numéricamente distante del resto de los datos. («Valor atípico - Wikipedia, la enciclopedia libre», s. f.)



Ilustración 14 - Ejemplo de afectación de un valor atípico en la media aritmética - Fuente: Sanchez Diaz de la Campa

Para la construcción de un gráfico de cajas y bigotes, no requeriremos más que ir a la sección de gráficos de Excel y seleccionar

II.1.6.3 GNOME¹⁷

A lo largo de la historia reciente hemos sufrido diferentes accidentes de contaminación marina por vertido de Hidrocarburos, siendo algunos de ellos muy mediáticos por las consecuencias medioambientales que causaron. Cuando hablamos de este tipo de accidentes, debemos mencionar el accidente del petrolero Exxon Valdez (Skinner & Reilly, 1989) el cual marcó un antes y después a la política medioambiental en el medio marino.

Recordemos que este buque, fue un petrolero que cobro relevancia tras varar en la bahía del Príncipe Guillermo causando un vertido de 40.900 m³ de petróleo en la costa de Alaska (Skinner & Reilly, 1989), el cual supuso la peor tragedia ecológica en la historia de Alaska.

Sin tener que irnos más lejos, otro de los accidentes que causó un gran revuelo social y mediático, fue el hundimiento del buque Prestige en aguas españolas. A las 15:15 del 13 de noviembre de 2002, este petrolero con bandera de Bahamas, se hundió cargado con 77.000 toneladas de fuel oíl pesado (Caballero, 2003), produciendo terribles daños medioambientales a lo largo de 2000 kilómetros de costa.

¹⁷ M1481 - Auditoría de Gestión y Diseño de Planes de Emergencia y Seguridad en Buques y Empresas del Sector Marítimo (Oria Chaveli, 2019)

Desafortunadamente, muchos de estos accidentes, como los que hemos mencionado, o como la plataforma Deep Water Horizon, se podrían haber evitado en parte, teniendo una buena planificación y unos medios suficientes para la contención y lucha de la contaminación. Uno de los factores primordiales que se debería de tener en cuenta ante un accidente marítimo, son las condiciones meteorológicas. Gracias a ellas, con un buen software de modelado y predicción, se puede predecir la trayectoria con un gran grado de fiabilidad (Seattle, 2012).

Es por este motivo, por el cual, la agencia NOAA de los Estados Unidos, creo el software GNOME como herramienta de predicción para futuros vertidos, de esta manera se pueden preparar planes de acción y contención para evitar la dispersión del vertido y, por consiguiente, reducir el impacto medioambiental.

El GNOME no es más que un software de predicción y modelado, por el cual hace uso de distintos datos para intentar predecir con el máximo rigor, la trayectoria de un vertido de hidrocarburos. En el tema II, apartado 1.6.3, se verá paso por paso la forma de realizar la simulación.

Cabe destacar, que la precisión por la cual se calcule dicha predicción, será siempre dependiendo de la fiabilidad de los datos que el usuario importe en el software. En otras palabras, este programa de simulación, nos aportará información útil, siempre y cuando, los datos meteorológicos necesarios para el cálculo, sean fiables. Por este motivo, es importante tratar los datos meteorológicos para asegurarnos que mantienen cierta consistencia y carecen de valores atípicos. Por otro lado, deberemos asegurarnos que, los datos meteorológicos sean una representación fidedigna de los que reinan en la zona de estudio, ya que, si difieren de la realidad, la simulación será muy imprecisa.

II.2 Metodología

II.2.1 Guía para la obtención y tratamiento de los datos del viento

II.2.1.1 Descarga de los datos del viento y exportación a Excel

Como se ha explicado anteriormente, uno de los datos que más nos interesa para la simulación, es una muestra suficientemente representativa de la

dirección y velocidad del viento que afecta a la zona en la que se va a llevar el estudio. Obviamente, estos datos se pueden obtener de distintas maneras, ya sea a través de agencias meteorológicas nacionales o privadas.

En este caso, tratándose de un trabajo de ámbito marino, se ha decidido la obtención de datos obtenidos directamente de una de las boyas ODAS de la agencia oceanográfica y atmosférica de los EEUU, la NOAA. Para la extracción de estos datos, deberemos primero seleccionar del mapa disponible, la boya que más nos convenga.

Para escoger la boya que más se ajuste a la zona de estudio, deberemos tener en cuenta los siguientes factores:

- **Conectividad de la Boya:** Este aspecto es importante tenerlo en cuenta, pues nos interesan aquellas boyas que están “on-line” con el servidor ya que así nos permitirá conseguir datos a tiempo real o cuasi real¹⁸.
- **Sensores de la Boya:** Dependiendo de qué tipo de trabajo de investigación queramos llevar a cabo, nos interesará que la boya disponga de los sensores necesarios para tomar aquellos datos que nos sea de utilidad. Pongamos el ejemplo de un estudio de corrientes marinas, en ese caso, deberíamos asegurarnos de que la boya candidata posea un sensor de corrientes marinas, ya que obviamente, sin ese sensor, no nos sería de utilidad. Para este estudio, consideramos una boya válida, a aquellas que posean anemómetro y veleta.
- **Edad de la base de datos:** La edad de la base de datos, no es más que la disponibilidad de la boya para ofrecernos datos históricos. Existen boyas que ofrecen datos de apenas unos meses atrás, mientras otras boyas nos ofrecen datos históricos de hasta 1987.
- **Proximidad al área de estudio:** Y, por último, otro factor a tener en cuenta, es la localización de dicha boya. Esta debe estar en una posición próxima a la zona de estudio.

¹⁸ En la página web de la NOAA, las boyas que figuran con un icono amarillo son aquellas que están conectadas. Las boyas marcadas con el icono rojo, se encuentran fuera de conexión.

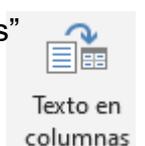


Ilustración 15 - Mapa de selección de boyas ODAS - Fuente: National Data Buoy Center

Una vez tengamos clara la selección de la boya de nuestro interés, procederemos a acceder a consultar todos los datos históricos disponibles en la misma página web (US Department of Commerce, s. f.). En este caso, como figura en la ilustración 15, deberemos pulsar en “View History”, para que nos lleve a la base de datos de esa boya en cuestión.

Una vez dentro de la base de datos de la boya, nos interesará acceder al archivo de las mediciones atmosféricas de distintos años, la cual viene mencionada en inglés como “Standard Meteorological Data”. A continuación, como se muestra en la ilustración 16, deberemos pulsar en el sobre el año para descargar los datos meteorológicos históricos.

Los datos meteorológicos van a ser solamente guardados en formato TXT, por lo que el siguiente punto importante, será la de exportar estos miles de datos a formato Excel mediante el uso del comando de “Texto en Columnas” del mismo programa.



Station 42056 ([LLNR 8U](#)) - Yucatan Basin - 120 NM ESE of Cozumel, MX

Owned and maintained by National Data Buoy Center
19.812 N 84.946 W (19°48'45" N 84°56'46" W)

Available historical data for station 42056 include:

- Quality controlled data for 2019 ([data descriptions](#))
 - Standard meteorological data: [Jun Jul](#)
 - Spectral wave density data: [Jun Jul](#)
 - Spectral wave (alpha1) direction data: [Jun Jul](#)
 - Spectral wave (alpha2) direction data: [Jun Jul](#)
 - Spectral wave (r1) direction data: [Jun Jul](#)
 - Spectral wave (r2) direction data: [Jun Jul](#)
 - Supplemental Measurements data: [Jun Jul](#)
- [Historical data](#) ([data descriptions](#))
 - Standard meteorological data: [2005](#) [2006](#) [2007](#) [2008](#) [2009](#) [2010](#) [2011](#) [2012](#) [2013](#) [2014](#) [2015](#) [2016](#) [2017](#) [2018](#)
 - Continuous winds data: [2005](#) [2006](#) [2007](#) [2008](#) [2009](#) [2010](#) [2011](#) [2012](#) [2013](#) [2014](#) [2015](#) [2016](#)

Presionar sobre el año para acceder a los datos

Ilustración 16 - Instrucciones para la descarga de datos históricos - Fuente: National Data Buoy Server

II.2.1.2 Creación de Histograma de Frecuencias y Diagrama de Cajas y Bigotes

Anteriormente, hemos descrito la importancia que tiene la creación de histogramas para analizar cuáles son los vientos más predominantes. Es por ese motivo, que una vez tenemos todos los datos importados de manera correcta en Excel, deberemos proceder a la creación de los histogramas y a su interpretación. Sin embargo, antes de nada, deberemos asegurarnos que la muestra que hemos obtenido de la boya, sea lo suficientemente representativa y que carezca de valores atípicos que puedan alterar los resultados de la misma.

La mejor herramienta para la detección de manera visual de valores atípicos es el diagrama de cajas y bigotes. Como hemos mencionado anteriormente en el apartado dedicado a estos tipos de gráficos, es que un valor erróneo o inusualmente alejado de la mediana, puede alterar el resultado estadístico de la muestra. En especial, cuando tratamos con una muestra compuesta por un gran número de observaciones, nos interesan localizar y descartar dichos valores atípicos.

A continuación, podemos observar en la ilustración 17 un ejemplo de valor atípico. En este ejemplo, se puede observar como la velocidad del viento de 194,4 nudos, es un valor que se sitúa por encima de la 1ª cota superior, por lo que consideramos a este un valor atípico, muy probablemente, producto de un error del anemómetro o de transferencia de datos. Por ese motivo, es muy importante, localizar dicho valor en la tabla de datos de Excel y eliminarlo para ajustar la fiabilidad de dicha muestra.

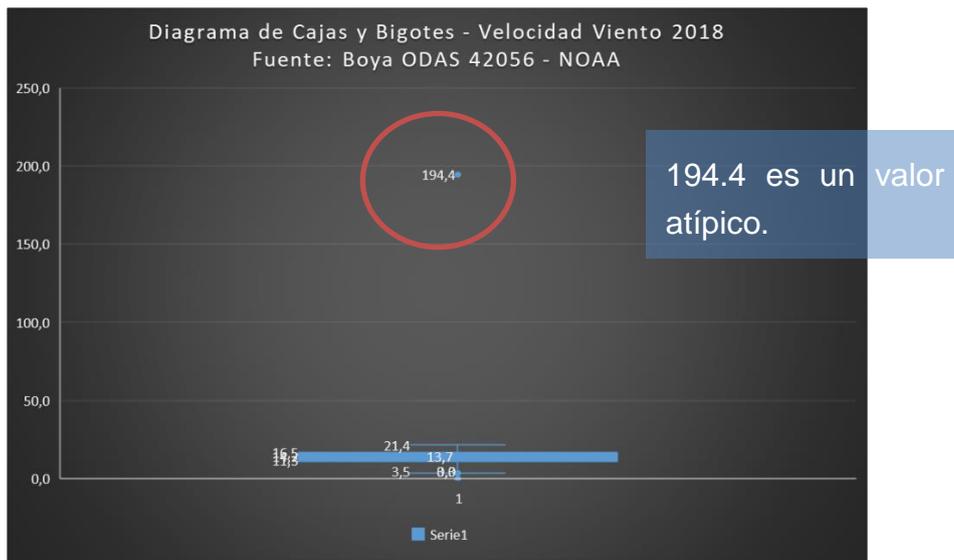


Ilustración 17 - Ejemplo de valor atípico - Fuente: Propia

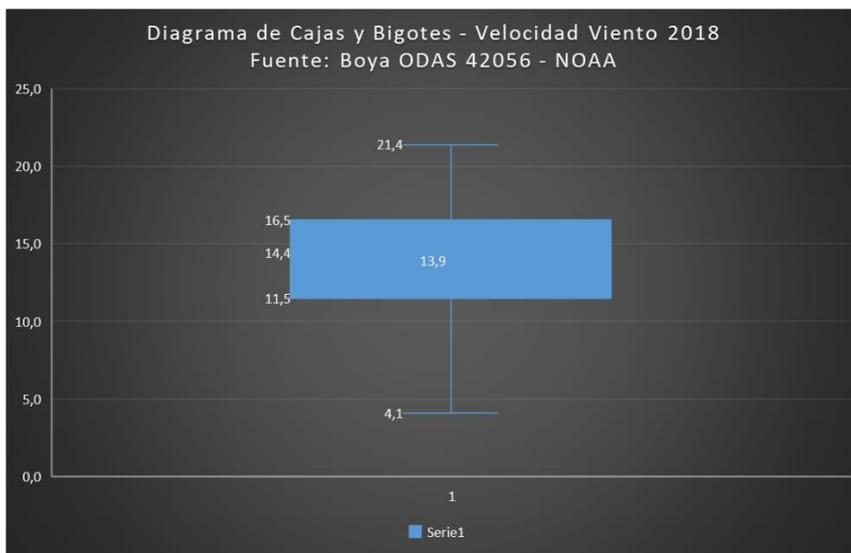


Ilustración 18 - Diagrama después de eliminar valor atípico – Fuente: Propia

Para la elaboración del diagrama de Cajas y Bigotes, simplemente tendremos que ir a la pestaña de “Insertar” y a continuación en “Gráficos Recomendados”, encontraremos la opción de “Diagrama de Cajas y Bigotes”

Una vez nos hemos asegurado que la muestra carece de valores atípicos, deberemos proceder a crear los histogramas de la velocidad y dirección del viento. Para ello, deberemos seleccionar la columna de velocidad del viento y automáticamente, mediante la opción crear ambos histogramas.

Al finalizar la construcción del histograma, deberemos asegurarnos que el ancho de rango por cada categoría, sea suficiente para que la información sea presentada de forma que nos pueda ser de utilidad. Recordemos en el apartado II.1.6.2, cuando decíamos que, si agrupábamos los números en anchos de rango muy pequeños, correríamos el riesgo de tener una representación con demasiadas modas y confusa. Por el contrario, si se agrupaba en anchos de rango muy grandes, obtendríamos un histograma sin valor informativo. En el caso de la velocidad del viento, por lo general bastaría con un ancho de rango de un nudo para obtener un diagrama representativo de la realidad.

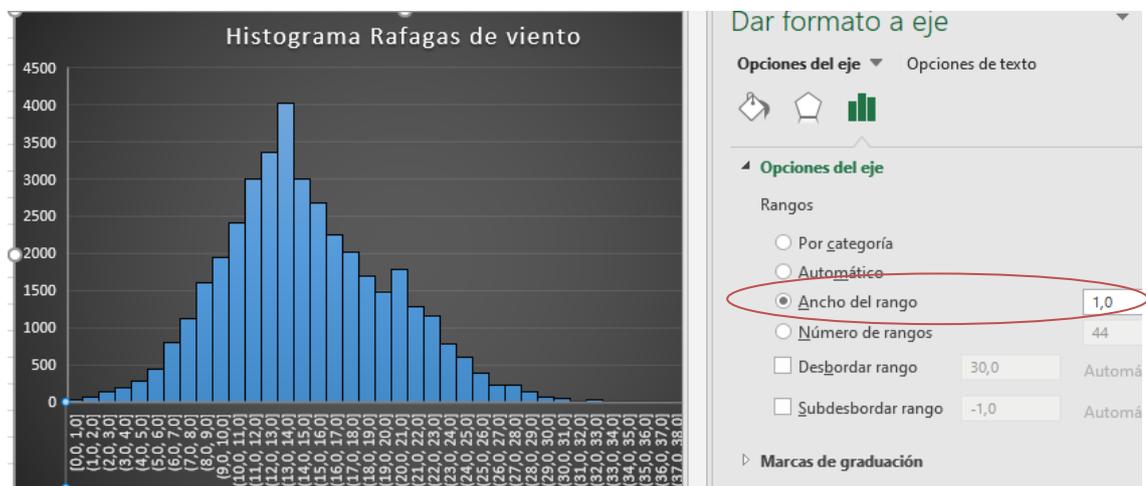


Ilustración 19 - Opción para modificar el ancho de rango - Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenida el histograma, procederemos a encontrar la Moda, siendo esta la categoría con mayor número de observaciones. Esta será entonces, la que nos indique el viento predominante. Si por ejemplo estamos ante una distribución unimodal, y la moda corresponde a la categoría de 10 – 11 nudos, entonces podemos afirmar con rotundidad que los vientos predominantes en

la zona, son vientos de esa magnitud. Podría ocurrir también que se presentaran 2 o más modas, entonces podríamos escoger diferentes velocidades del viento para la simulación, puesto que no existiría un viento predominante en esa área.

En cuanto a la creación de un histograma para la dirección del viento, las cosas se presentan un poco más complejas. Como recordamos en el apartado II.1.6.2, un histograma se utiliza para representar valores numéricos continuos y por lo tanto no podríamos utilizar un histograma para las direcciones del viento, ya que estos, no son valores numéricos continuos, al ser una variable categórica (N, NE, E, SE,).

Sin embargo, en Excel, existe una opción de representación gráfica llamada “Diagrama Radial”, la cual también nos muestra la frecuencia absoluta de cada valor en una representación circular, la cual nos viene perfecta para representar los cuadrantes del viento. En la ilustración 20, se puede observar perfectamente, como los vientos predominantes son Este, Este Noreste y Este Sudeste, en este mismo orden.

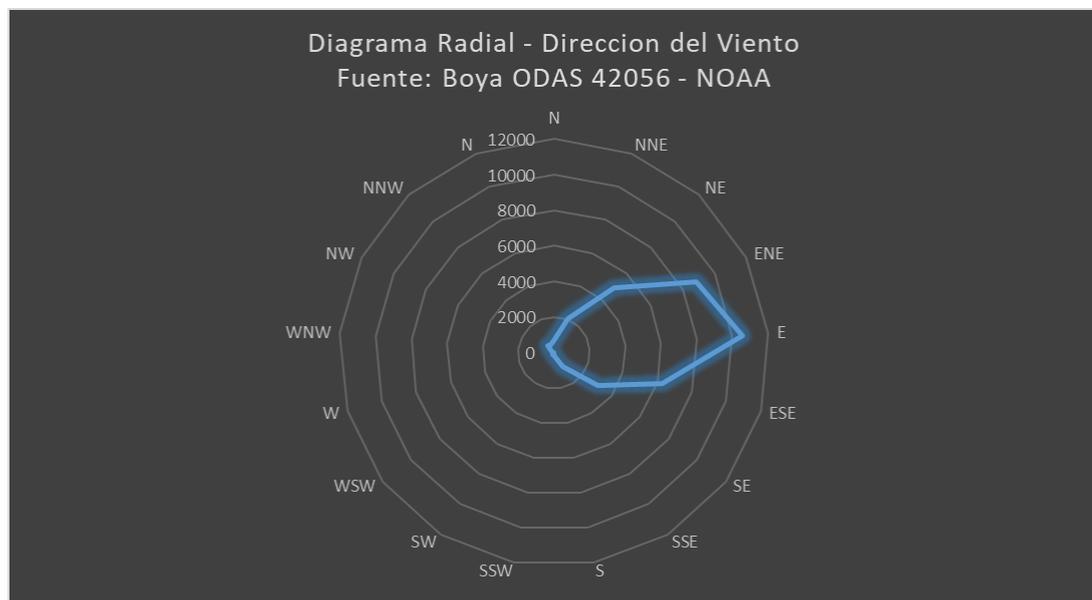


Ilustración 20 - Ejemplo de Diagrama Radial - Fuente: Elaboración Propia

II.2.1.3 Importar perfil costero a GNOME

Como se ha explicado anteriormente en la sección II.1.6.4 dedicada al GNOME, para que el software pueda reconocer y modelar las corrientes y la

trayectoria del vertido, este necesita reconocer el perfil de costa de la zona en la que se va a trabajar. El inconveniente en este caso, es que al ser un programa desarrollado por y para el gobierno de los Estados Unidos, solo hay perfiles de costa para aguas del país. Sin embargo, la misma administración del NOAA, ha creado una base de datos llamada GOODS¹⁹, por la cual se pueden encontrar un sinnúmero de complementos para el simulador GNOME.

Entre estos complementos, se encuentran base de datos de corrientes de diferentes regiones del mundo, como vientos, datos batimétricos y por supuesto los perfiles costeros que necesitamos. Para ello, necesitamos dirigirnos a la página de GOODS del NOAA, y acceder a la sección de “Global custom map generator”. Este enlace nos llevará a otra página en la cual nos aparecerá un mapa al estilo de Google Map, el cual nos dará la opción de seleccionar los límites que definirían el mapa del área que queremos trabajar. Estos límites se podrán seleccionar ya sea mediante coordenadas geográficas o mediante una herramienta de selección que viene incluida en el propio mapa.

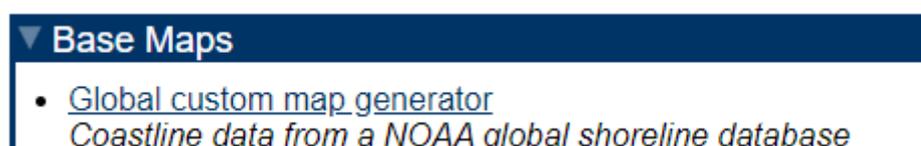


Ilustración 21 - Pagina Web del GOODS para la creación del perfil de costa - Fuente: Elaboración Propia

A continuación, a modo de ejemplo se procederá a extraer el perfil de la costa de la España peninsular. Procederemos entonces, de la siguiente forma:

1. Seleccionaremos el perímetro del área que nos interesa. Esta acción se puede llevar a cabo a través del mapa, mediante la herramienta señalada en la ilustración 22 con un rectángulo o mediante la inserción de posiciones geográficas en Grados.
2. Una vez seleccionado el perímetro, deberemos de darle al botón de “Get Map”.

¹⁹ GNOME Online Oceanographic Data Server

- Al darle al botón anterior, automáticamente la página web descargará un archivo en formato. BNA el cual servirá para importarlo directamente en GNOME.



Ilustración 22 Demostración del procedimiento para obtener perfil de la costa - Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenido el archivo con el perfil de costa, simplemente deberemos importarlo en GNOME mediante el panel izquierdo, presionando sobre "MAPS". A continuación, una pantalla emergerá, preguntándonos si deseamos crear el perfil o importarlo. En nuestro caso decidiremos importarlo, creando así el perfil de costa que nos interesa.

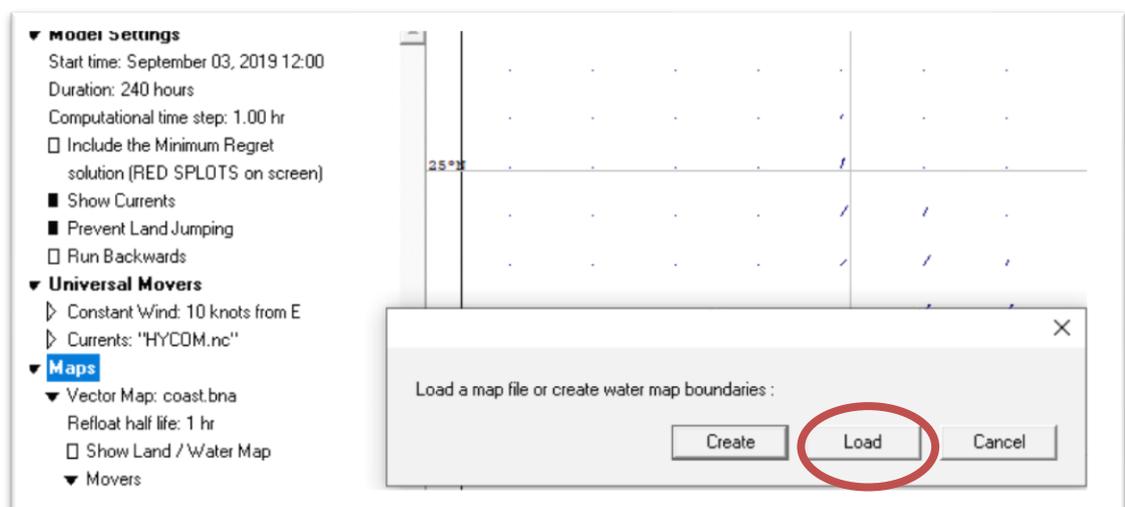


Ilustración 23 - Paso para importar perfil de costa en GNOME - Fuente: Elaboración Propia**II.2.1.4 Importar datos de la corriente Oceánica**

De un modo muy similar, vamos a proceder a obtener desde la base de datos GOODS, los datos de las corrientes, en este caso oceánicas. Los datos obtenidos a través de esta fuente, son muy fiables, ya que son obtenidos por distintas agencias oceanográficas del mundo.

Para importar los datos de corrientes, deberemos proceder de la siguiente manera:

1. Acceder a la página web de GOODS («GOODS», s. f.).
2. Acceder al link situado a mano izquierda, rotulado como “Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCON)”
3. Al acceder al link anterior, este nos redireccionara a otra página en la cual deberemos de darle al botón de “Submit”
4. A continuación, se nos mostrará un mapa del estilo de la ilustración 22, en el cual deberemos asignar un perímetro para la zona que queremos obtener los datos de corriente²⁰.
5. Y, para terminar, deberemos pulsar el botón “Get Data” de la misma forma que hicimos para obtener el perfil de costa. En este momento, debería empezar a descargarse el archivo de forma automática.

Una vez obtenido el archivo de las corrientes, deberemos proceder a importarlo al programa GNOME. La forma de proceder es muy parecida a la del apartado anterior. En este caso, pulsaremos en el panel izquierda sobre el texto “Universal Movers”, en ese instante se debería abrir otra ventana la cual nos da la oportunidad de cargar los datos de corriente.

Hay que tener en cuenta, que, en este punto, hay que comprobar que en “type” tenemos seleccionada la opción de corrientes “currents”, ya que podríamos correr el riesgo de cargar otro tipo de datos y afectar a la simulación.

²⁰ Como recomendación, lo ideal en este punto, sería utilizar las mismas coordenadas que se han usado para seleccionar el perfil de costa.

Una vez efectuado este paso, deberíamos poder ver las corrientes con el correspondiente mapa en GNOME.

II.2.1.5 Realizar la simulación

Una vez hemos importado al programa GNOME el perfil de la costa y los datos de las corrientes oceanográficas, ya estaremos en condiciones para empezar a configurar la simulación.

El primer punto que se nos va a solicitar, será la introducción de la posición en la que se ha producido el vertido. Para introducir los datos iniciales se puede hacer de dos formas, por un lado, dando doble click en el panel izquierda, encima de “Model Settings” o  presionando el icono dedicado a ello.

Una vez se realice dicha acción se nos mostrará una pantalla en la cual nos dará a escoger entre un solo punto de vertido o un derrame continuo. Para el caso que nos concierne, elegiremos la opción de un solo punto, ya que el buque se encuentra estático en puerto. En el caso de que el buque se encontrará navegando y fuera derramando hidrocarburo de forma intermitente, podríamos usar la opción “Spray Splots”.

Al confirmar que el tipo de vertido será de un punto o línea, este programa automáticamente, nos abrirá la pantalla de configuración del vertido. A continuación, vamos a explicar cada campo para su correcto cumplimiento.

- A. En el campo “Spill Name” podremos introducir, de forma opcional, el nombre que queramos dar al vertido.
- B. En esta lista, nos dará a escoger entre distintos tipos de contaminantes, en este caso, se ha escogido diesel.
- C. En el campo “Amount Release” se debe consignar la cantidad aproximada de combustible vertido, pudiendo utilizar varias unidades, como toneladas métricas, barriles, ...
- D. En campo “Age at Release” deberemos introducir el tiempo que ha transcurrido desde el inicio del vertido hasta que se ha finalizado. En nuestro caso, insertaremos 0, ya que consideramos un vertido único y rápido.

- E. En el apartado de “Release start”, se deberán de introducir, la posición geográfica, la fecha y el tiempo del inicio del vertido. Hay que tener en cuenta, que, para el tiempo, es indiferente si es en Hora de Reloj de Bitácora o Tiempo Universal Coordinado.
- F. En esta sección, siempre y cuando el vertido finalice en otra posición o tiempo, se deberán consignar dichos datos.
- G. Por último, tenemos la sección por la cual, nos permite la selección del formato deseado para la posición geográfica.

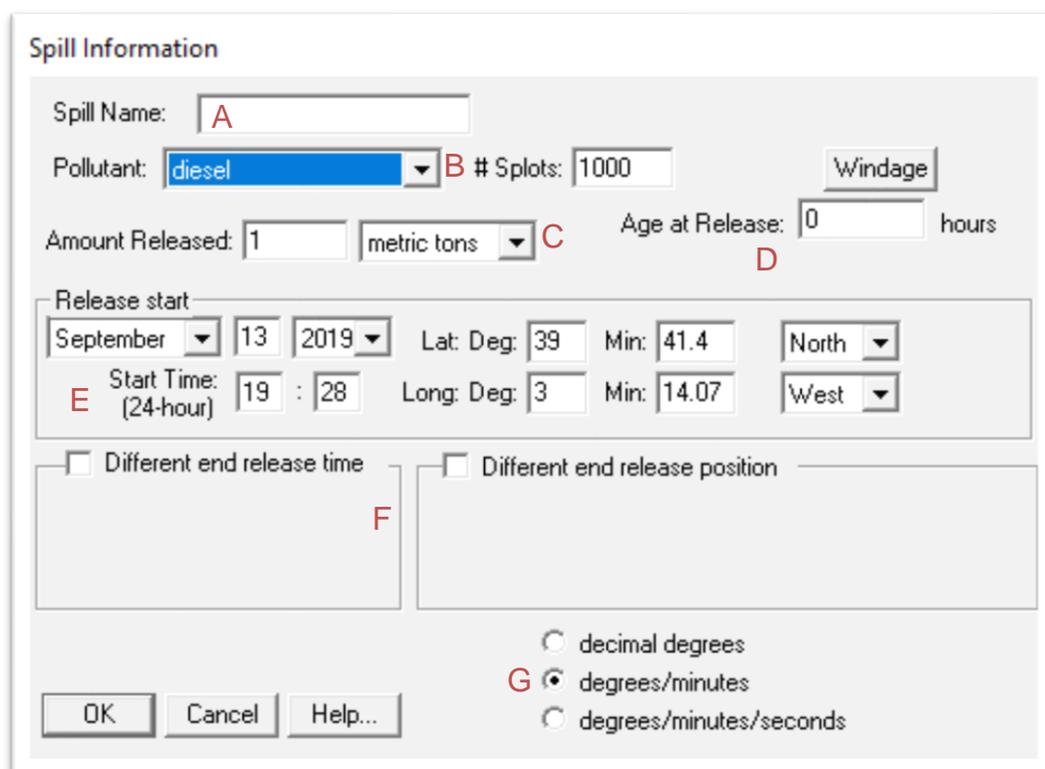


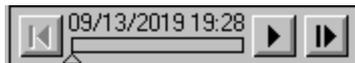
Ilustración 24 - Menú de configuración del vertido - Fuente: Propia

Una vez se ha configurado los parámetros del vertido, deberemos encargarnos de establecer las opciones de simulación, que más nos interese. Para ello, deberemos acceder mediante el panel izquierdo, presionando sobre “Model Settings”, el cual abrirá a una pantalla de configuración parecida al anterior.

Esta nueva pantalla, nos ofrece la posibilidad de configurar diferentes opciones de interés para la simulación, las cuales vamos a ver detalladamente en la ilustración 26.

- A. En este apartado, deberemos introducir la fecha y hora en la cual queremos que empiece la simulación. Esta, debería ser la misma que la del vertido.
- B. En este campo, deberemos introducir la duración que queremos simular con el programa GNOME. Si, por ejemplo, nos interesa ver la evolución a 5 días vista, entonces deberemos introducir “5 días”.
- C. En el caso de que estemos utilizando datos meteorológicos poco fiables, deberemos marcar esta casilla, ya que así el programa utilizara una solución con un error mínimo, que mostrará con puntos rojos, aquellos que considere que son inciertos y con puntos negros aquellos que considera muy probables.
- D. Si nos interesa que el programa nos muestre las corrientes, deberemos marcar esta casilla. A veces, en zonas de fuertes corrientes, es recomendable desactivar esta función, ya que los vectores de la corriente pueden dificultar la visión del vertido en el mapa.
- E. En este campo, le indicaremos al programa, cada cuanto tiempo queremos que realice la simulación. Por ejemplo, si decidimos hacer una simulación a 5 días vista y le pedimos que calcule cada 15 minutos (0,25 horas), el programa nos va a ejecutar 480 operaciones. En cambio, si decidimos que es suficiente para nosotros que lo calcule cada hora, el programa ejecutará 120 operaciones. Este es un paso a tener en cuenta, ya que, en ocasiones, dependiendo del ordenador, puede facilitar la fluidez del sistema.
- F. Esta casilla, deberá estar siempre activada, ya que se asegura que el sistema reconozca correctamente el perfil de costa y que el vertido no fluya a través de ella.
- G. Por último, tenemos esta casilla, si queremos que el sistema empiece a calcular el vertido del final hacia el principio del mismo.

Una vez hayamos configurado el programa correctamente, deberemos darle a “OK”, y ya debería estar todo listo para empezar la simulación. Para ello, nos deberemos dirigir a la barra de reproducción del centro superior de la pantalla y darle al botón de reproducción. Es, en ese preciso momento, cuando el programa empieza a simular, teniendo en cuanto el número de operaciones que hayamos definido en el apartado E de la ilustración 26.



Una vez hayamos visto la simulación, con el cuadro de reproducción, podremos movernos en la línea del tiempo. Además, si nos interesase, el programa, en la opción de imprimir “print”, nos permite pasarlo a archivo PDF, para adjuntarlo en los Anexos.

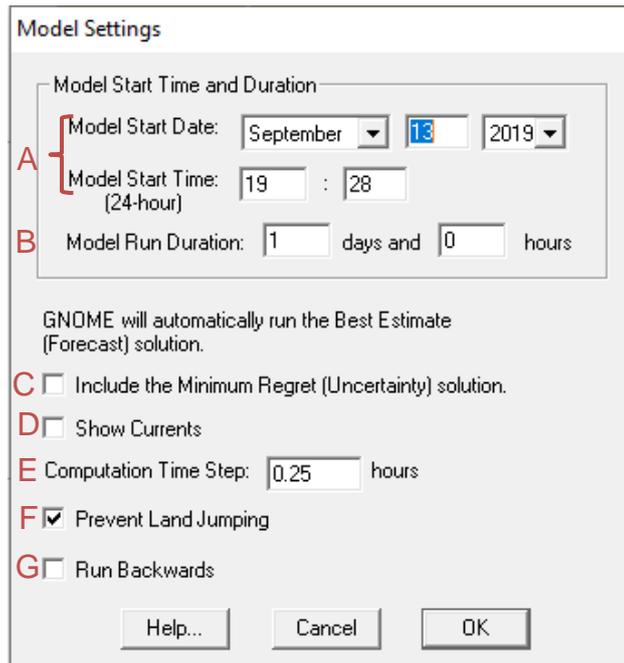


Ilustración 25 - Menú de configuración del Simulador - Fuente: Propia

III APLICACIÓN PRÁCTICA

III.1.1 Obtención de los datos del viento

En el apartado II.2.1 se ha detallado los pasos que se han de seguir para la obtención de los datos de dirección y velocidad del viento a través de la página web del NOAA.

Una vez se tuvo claro la fuente de dichos datos, se debió buscar una boya ODAS próxima a la Isla. Para realizar dicha tarea, simplemente se necesitó acceder a la página web del organismo y en el mapa dedicado a las boyas ODAS, buscar cuál de estas se encontraba más cerca de la zona de interés.

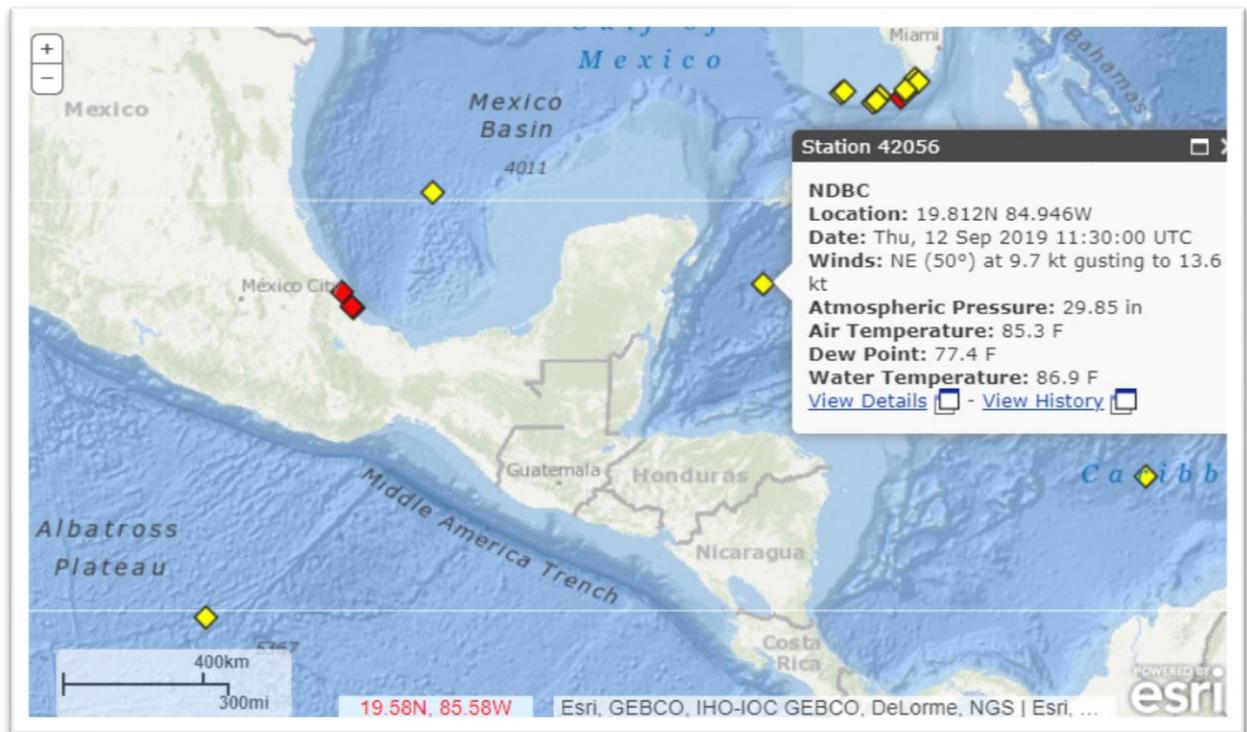


Ilustración 26 Localización ODAS próxima a Cozumel - Fuente: National Data Buoy Center

Una cuestión interesante antes de decidir el uso de dicha boya, es asegurarnos que esta se encuentre online y tenga los sensores suficientes a nuestro interés. En este caso, la estación ODAS 42056, se encontraba online y contaba tanto con registros desde el año 2005, así como de sensores suficientes para este estudio.

Una vez seleccionada la estación, se procedió a descargar los datos del año 2018 en formato TXT.

La muestra consistió en 39228 registros de los cuales, como veremos más adelante, se eliminó 1 ya que uno de los valores de ese registro se consideró un valor atípico, seguramente por un error de lectura del anemómetro. Los datos obtenidos de la muestra inicial se componían de 18 variables, de las cuales se consideraron útiles solo 12.

Las variables que se consideraron de interés fueron las siguientes:

- Año
- Mes
- Día
- Hora
- Minutos
- Dirección del Viento en Grados
- Velocidad del viento en m/s
- Velocidad de las ráfagas de viento en m/s
- Presión Atmosférica en hPa
- Temperatura del Aire en °C
- Temperatura de Rocio en °C
- Temperatura del Mar en °C

Una vez seleccionadas las variables que nos interesaba mantener, se procedió a la eliminación de las demás que eran irrelevantes a este estudio. El siguiente paso a seguir, fue el convertir los datos en m/s a nudos, así como convertir la dirección del viento de grados a puntos cardinales.

Para la conversión de los datos de m/s a nudos, se utilizó la siguiente función de Excel.

```
=CONVERTIR(H2,"m/sec","kn")
```

Para la conversión de la dirección del viento en grados a puntos cardinales, requeriría una clasificación de los datos, ya que estaríamos pasando de variables numéricas a variables categóricas. Para dicha clasificación se decidieron los siguientes Límites Superiores e Inferiores.

Categorías	Límite Inferior	Límite Superior	Marca de Clase	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa
N	0	11,25	360	665	2%
NNE	11,25	33,75	23	2065	5%
NE	33,75	56,25	45	4967	13%
ENE	56,25	78,75	68	8899	23%
E	78,75	101,25	90	10586	27%
ESE	101,25	123,75	113	6262	16%
SE	123,75	146,25	135	3044	8%
SSE	146,25	168,75	158	920	2%
S	168,75	191,25	180	216	1%
SSW	191,25	213,75	203	122	0%
SW	213,75	236,25	225	97	0%
WSW	236,25	258,75	248	75	0%
W	258,75	281,25	270	41	0%
WNW	281,25	303,75	293	50	0%
NW	303,75	326,25	315	163	0%
NNW	326,25	348,75	338	552	1%
N	348,75	360	354	503	1%

Ilustración 27 - Tabla para la categorización de la dirección del viento – Fuente: Propia

Se puede observar que en la Ilustración 28 aparece 2 veces la categoría norte, la razón de esto, es que Excel considera que estos, son valores numéricos continuos infinitos, sin embargo, al tratarse de grados, estos empiezan en 0 y acaban en 360. Al haber considerado Norte a todos aquellos valores que estén comprendidos entre $348,75^{\circ}$ a $11,25^{\circ}$, me he visto con la obligación de introducir 2 veces Norte, uno al principio para definir el límite de 0° a $11,25^{\circ}$ y otro al final para definir el límite entre $348,75^{\circ}$ y 360° .

Para ver de forma gráfica la frecuencia absoluta de la dirección del viento en puntos cardinales, se decide recurrir a un diagrama de tipo radial, como el que figura en la Ilustración 29. Se puede observar que los vientos de levante, en particular de componente Este, son los más predominantes con diferencia en esta zona. Es por ello, que para la simulación tomaremos el viento desde 3 direcciones:

1. Este

2. Este Noreste
3. Este Sureste

Cabe destacar, que utilizando estas 3 direcciones ya estamos abarcando el 66% de todas las observaciones, siendo una muestra más que representativa de las condiciones meteorológicas de un hipotético accidente.

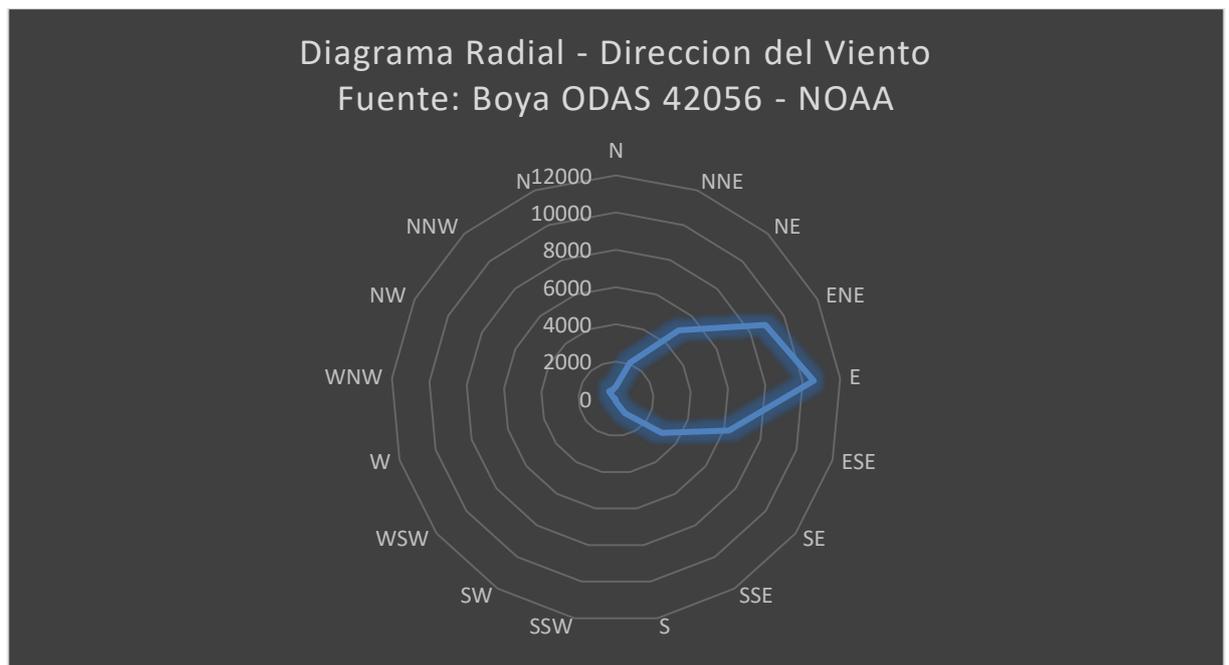


Ilustración 28 - Diagrama radial de la dirección del viento - Fuente: Propia

Una vez realizada la conversión de las unidades de la velocidad del viento, se procedió a realizar 2 histogramas, uno de ellos para la velocidad del viento y el segundo para la velocidad de las ráfagas de viento. Como podemos observar en la ilustración 30, se ha decidido un ancho de rango de 1 nudo, ya que, si utilizásemos un valor inferior, obtendríamos un histograma confuso con varias modas.

Se puede apreciar en el histograma, que estamos ante una distribución normal, con una sola moda, la cual pertenece a la del rango de 10 a 11 nudos, por lo tanto si cogemos los datos obtenidos tanto por la tabla de frecuencias de la dirección del viento como del histograma de la velocidad del viento, podemos asegurar con certeza que los vientos mayoritarios son de

componente Este y de una velocidad de 10 nudos como se puede observar tanto en el histograma como en la tabla de frecuencias.

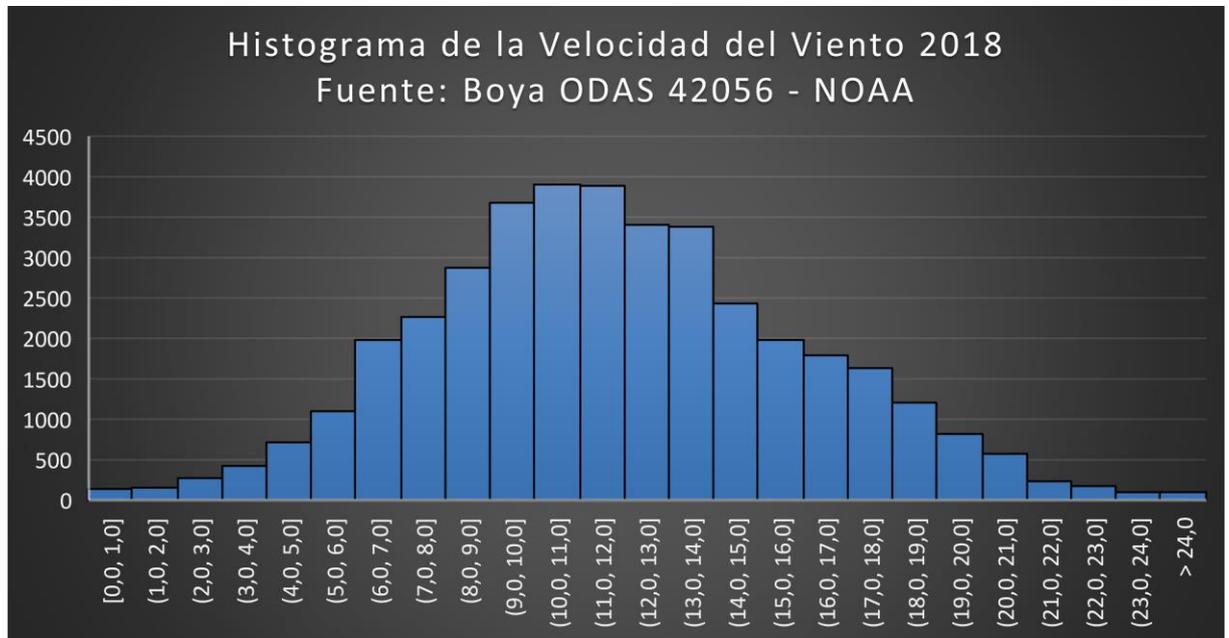


Ilustración 29 - Histograma de la velocidad del viento - Fuente. Propia

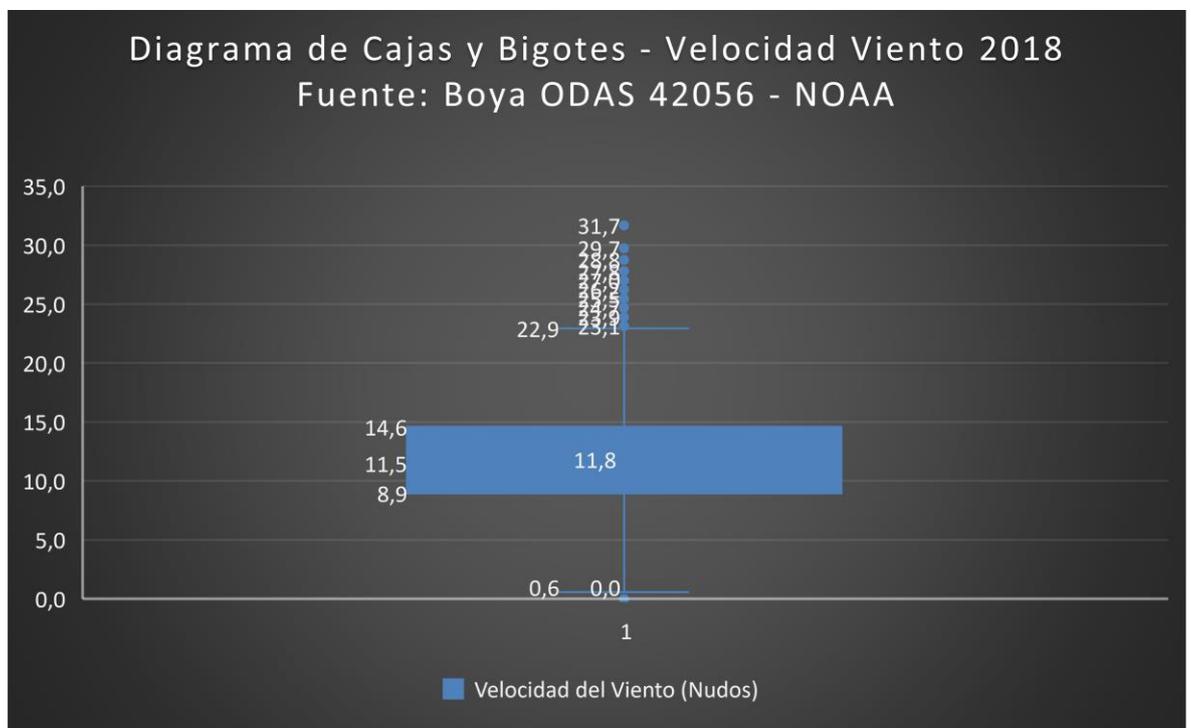


Ilustración 30 - Diagrama de Cajas y Bigotes de la velocidad del viento - Fuente: Propia

Como se puede observar en la ilustración 31, mediante el diagrama de cajas y bigotes, podemos observar que por encima de la primera cota superior (22,9 nudos) se encuentran varios valores considerados atípicos severos (en inglés: outliers severos).

Sin embargo, dichos datos no se han descartado ya que muy raramente se deba a un error del sensor o de transcripción, sino que se trate del paso de una tormenta, por ello estos deben de ser considerados en el estudio estadístico.

Por otro lado, podemos ver que la media aritmética se sitúa en 11,8 nudos y la mediana en 11,5 nudos, lo cual nos indica que esta muestra tiene un alto grado de simetría. Para confirmar el grado de simetría, se procedió a calcular el índice de asimetría por cuartiles de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$AS = \frac{(P_{75} - P_{50}) - (P_{50} - P_{25})}{P_{75} - P_{25}}$$

Ilustración 31 - Índice de Asimetría por cuartiles – Fuente: Apuntes Asignatura M1477 - Tema VI

Una vez desarrollada la fórmula en Excel, obtenemos un **índice de asimetría del 0,88**

Por lo tanto, para decidir los valores que vamos a tomar para la simulación, se han considerado 4:

1. Valor de la primera cota inferior: 0 nudos (Viento en calma)
2. Valor cercano a la velocidad mediana: Aunque la velocidad mediana es de 11,5 nudos, redondearemos a 10 nudos,
3. Valor cercano a la primera cota superior: La velocidad en la primera cota superior es de 22,9 nudos, sin embargo, redondearemos a 20 nudos
4. Valor del último atípico: El último valor atípico es de 31,7 nudos, por lo tanto, redondearemos a 30 nudos.

Cabe destacar, que se han obtenido los histogramas de la velocidad de ráfaga del viento, así como los diagramas de cajas y bigotes, de la misma forma que hemos explicado con la velocidad constante del viento. Aunque, las

velocidades de ráfaga no se considerarán en este estudio por no ser velocidades constantes. Los diagramas pertinentes a las ráfagas de viento, se pueden encontrar en el Anexo XIV de este trabajo.

III.1.2 Definición de los diferentes supuestos

Una vez analizados estadísticamente la dirección y la intensidad de los vientos, se proponen para la simulación, los siguientes supuestos, para el estudio del vertido de hidrocarburos:

1. Caso 1: Viento de componente Este – 10 Nudos
2. Caso 2: Viento de componente Este – 20 Nudos
3. Caso 3: Viento de componente Este – 30 Nudos
4. Caso 4: Viento en Calma
5. Caso 5: Viento de componente Este Sudeste – 10 Nudos
6. Caso 6: Viento de componente Este Sudeste – 20 Nudos
7. Caso 7: Viento de componente Este Sudeste – 30 Nudos
8. Caso 8: Viento de componente Este Noreste – 10 Nudos
9. Caso 9: Viento de componente Este Noreste – 20 Nudos
10. Caso Especial: Viento de componente Este – 10 Nudos rolando a Oeste a las 24 horas.

Posteriormente se procedió a realizar la simulación como viene detallada en la metodología²¹, en el apartado II.2.1.5.

III.1.3 Análisis de los casos

A continuación, se procederá a estudiar el resultado de cada supuesto de manera resumida, y de manera detallada para aquellos casos que así lo requieran.

III.1.3.1 Caso 1:

Como se especifica en el apartado III.1.2. el primer caso se inicia en el muelle de Punta Langosta con unas condiciones de viento constante de 10 Nudos y

²¹ Para facilitar la lectura del trabajo, se ha adjuntado las representaciones gráficas de la simulación de cada supuesto en el apartado de Anexos.

de componente Este. Recordemos que de acuerdo a las hipótesis de partida expuestas en el apartado II.1.2, la simulación del vertido tendrá origen en el muelle de Punta Langosta²² computando un periodo de simulación de 10 días y considerando un vertido de Diesel Oil de 100 m³.

Se puede observar entonces, que, al cabo de 10 días, la masa del vertido ha seguido la corriente del canal de Cozumel, uniéndose a la corriente del canal de Yucatán, y a la vez desplazándose esta hacia el Oeste.

En este caso, en las primeras horas del vertido, podemos asegurar que el principal actor protagonista es la corriente, ya que hace desplazar el vertido de la propia isla al Norte de la península del Yucatán en menos de 10 días. Cabe destacar, que como veremos en el caso 4, el viento empuja inicialmente el vertido hacia el centro del canal de Cozumel, donde se encuentra la intensidad más alta de la corriente.

Hay que destacar que, al cabo de 10 días, ninguna parte del vertido ha llegado a tocar tierra, y se ha logrado la evaporización de casi el 86 %, quedando 14 toneladas en flotación.

III.1.3.2 Caso 2:

En este supuesto, de acuerdo al apartado III.1.2, consideramos un viento constante de 20 nudos y de componente Este. Se trata de un caso muy parecido al anterior, sin embargo, la velocidad del viento es suficiente para que el vertido alcance la zona oriental de la península del Yucatán, en particular la zona colindante a Punta Nizuc.

Este sería un caso a tener en cuenta, ya que Punta Nizuc es considerado un destino turístico de importancia, en especial por sus arrecifes de coral y al albergar el hábitat natural de manatíes y tortugas. En este caso, el impacto podría ser catastrófico, si no se actúa rápidamente, puesto que el 14% del vertido acabara posado en tierra, con el consiguiente daño al medio marino.

²² Posición geográfica: Lat. 20° 30.5' N y Long. 086° 57.2 O



Ilustración 32 - Imagen de Punta Nizuc - Fuente: www.en-yucatan.com.mx

III.1.3.3 Caso 3:

Este supuesto es muy parecido al anterior, sin embargo, la velocidad de 30 nudos del viento restará influencia al efecto de la corriente, desplazando el vertido al Noroeste. Este acabará tocando tierra en la zona oriental de la península del Yucatán, sin embargo, lo hará mucho más al sur de Nizuc, en la cercanía de Playa del Carmen.

Obviamente, esta zona también es considerada de alto valor turístico y un gran motor de la economía local.

III.1.3.4 Caso 4:

Este caso en particular es a diferencia de los demás, un supuesto único. Como se puede observar en la representación gráfica del Anexo IV, la velocidad del viento en calma, no es suficiente para desplazar el vertido hacia la zona de influencia de la corriente, y en este caso, se desplaza a merced de las corrientes litorales hacia la proximidad del aeropuerto de Cozumel.

Una de las cosas que se han observado durante la simulación es el tamaño de extensión del vertido, y es que, al carecer de viento, el vertido no se dispersa y se mantiene compacto, lo que potencialmente facilitaría las labores de limpieza.

III.1.3.5 Caso 5:

Este supuesto, de acuerdo al apartado III.1.2, es con un viento del Este Sudeste a una velocidad de 10 nudos. Sorprendentemente, después de la simulación, podemos observar que este caso guarda una gran similitud con el caso 1, llevando el vertido al norte de la península del Yucatán a través de los subproductos de la corriente Ecuatorial del norte. Nótese que la extensión del vertido es de un tamaño considerable, de unas 7-8 millas de longitud.

III.1.3.6 Caso 6:

De la misma manera que en el caso 2, los vientos en este caso de componente Este Sudeste y una velocidad de 20 nudos, desplaza el vertido de hidrocarburo dirección a Punta Nizuc. De este modo, se puede considerar que, en ambos casos, potencialmente podrían producir graves daños medioambientales a la fauna y al medio marino.

III.1.3.7 Caso 7:

De acuerdo al resultado gráfico obtenido de la simulación²³ el caso 7 ha mostrado tener un comportamiento muy similar al del caso 3.

III.1.3.8 Caso 8:

En este supuesto, se ha procedido con un viento constante de 10 nudos de componente Este Noreste. Lo más llamativo del resultado de esta simulación es la extensión alargada que adquiere el vertido a 10 días vista, la cual llega a alcanzar una extensión de aproximadamente 15 millas náuticas, que, a modo de comparación, es la longitud aproximada que separa la Isla de Cozumel con la península del Yucatán.

Se puede observar, además, que la trayectoria seguida es parecida a la de los casos 1 y 5, aunque en este supuesto el vertido se encuentra más cerca del norte de la península.

²³ Anexo VII

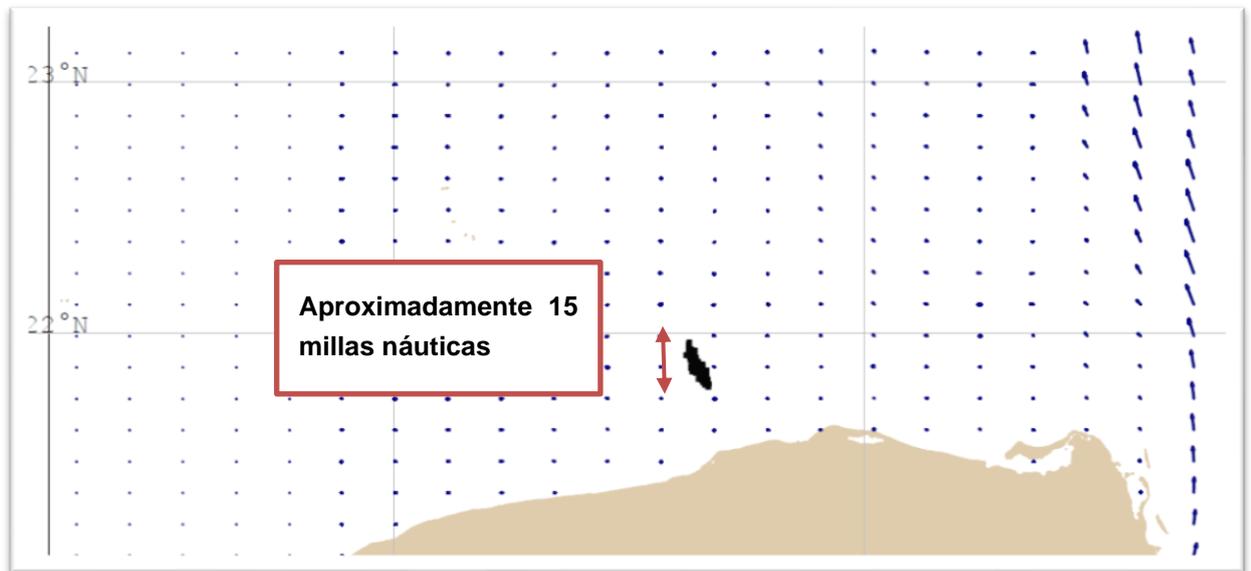


Ilustración 33 - Representación gráfica de la extensión del vertido - Fuente: Propia

III.1.3.9 Caso 9:

El caso 9 se simuló teniendo en cuenta un viento constante de 20 nudos de componente Este Noreste. La trayectoria seguida por el vertido es muy parecida a la de los casos 2 y 3, sin embargo, logra llegar a latitudes más septentrionales, llegando a alcanzar la punta noreste de la península del Yucatán, donde se sitúa el puerto de Cancún y la Isla de las mujeres.

De acuerdo a la simulación, la mayor parte del vertido iría a parar a la playa de la zona hotelera de Cancún, con el riesgo de afectar además el entorno de la Isla de las mujeres. Cancún, es considerado uno de los destinos turísticos más visitados del mundo, visitado cada año por casi 8 millones de personas (SEDETUR (Secretaría de Turismo), 2018). Por ello, este caso debería también tenerse en cuenta, ya que no solo se vería la zona afectada medioambientalmente, sino que el impacto económico en la zona, podría llegar a ser adverso.



Ilustración 34 - Playa de la zona hotelera de Cancún - Fuente: www.quintafuerza.mx

III.1.3.10 Caso Especial:

Este último caso, lo he querido dejar al final para demostrar que, debido a un pequeño cambio de las condiciones meteorológicas, puede ocasionar un cambio radical de la trayectoria del vertido.

Como se ha descrito anteriormente en los apartados II.1.3.1. y II.1.5.3., la corriente Ecuatorial del norte entra en el Mar Caribe a través de las islas de Barlovento, curvándose a medida que llegan al Oeste para así cruzar el canal de Yucatán. Esta corriente se divide en varias, de acuerdo a la ilustración número 5, entre las cuales se forma una corriente en forma de lazo que asciende hacia el interior del Golfo de México para luego voltear hacia el sur de forma paralela a la península de Florida y adentrarse en el canal de la Florida.

Por estas características especiales, he decidido comenzar la simulación con un viento de componente Este y una velocidad constante durante toda la simulación de 10 días. Se supone a continuación, que, a las 24 horas del vertido, el viento rola, por el efecto del paso de una borrasca, hacia el Oeste.

Como resultado, podemos observar en el anexo X, que, a las 24 horas, el vertido se encuentra entrando el canal del Yucatán. Se puede ver que el vertido se encuentra en la zona de mayor influencia de la corriente Ecuatorial del Norte, dirigiéndose rápidamente hacia el Norte.

En los anexos XI y XII, que representan 3 y 6 días de simulación, respectivamente, podemos observar que el vertido se encuentra totalmente bajo la influencia de la corriente en lazo del Golfo de México, siendo el viento totalmente un factor minoritario.

Por último, se puede observar en el anexo XIII que el vertido, sigue en la corriente en lazo del Golfo de México para reincorporarse a la corriente de Florida que es un subproducto a la vez de la corriente Ecuatorial del Norte.

Es llamativo el hecho de que la corriente, haya aproximadamente, viajado más de 800 millas náuticas en tan solo 10 días, extendiéndose una velocidad media de 3 a 3,5 nudos.

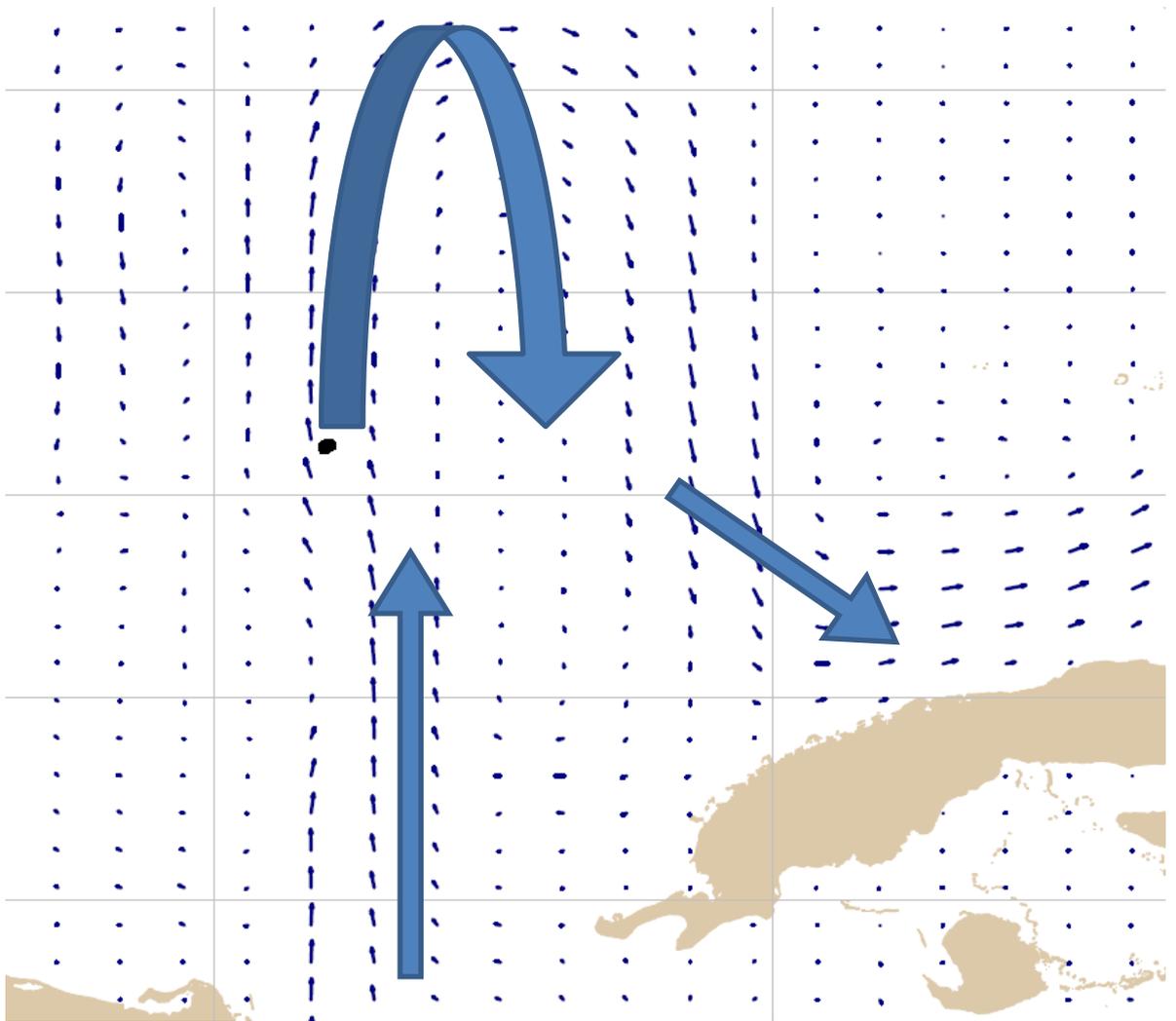


Ilustración 35 - Flujo de la corriente del Golfo de México – Fuente: Propia

IV CONCLUSIONES

Como se explicaba en los apartados I y II.1, este trabajo de final de Máster, perseguía el objetivo de demostrar científicamente, que un vertido accidental en el puerto de Cozumel, ayudado por las fuertes corrientes reinantes en la zona, podrían provocar la deriva de la masa de hidrocarburo a otras zonas del Golfo de México.

1. La primera conclusión que se ha obtenido mediante la investigación y redacción de este trabajo, es la gran influencia que tiene la corriente del Canal de Cozumel para dirigir el vertido hacia el norte. De acuerdo al apartado III.1.3, se ha podido observar que, en todos los casos simulados, el vertido, en mayor o menor medida, se ha desplazado hacia el norte del Canal.

2. De acuerdo al caso número 4, expuesto en el apartado en el apartado III.1.3.4, si el viento está en calma, el vertido permanecerá en las inmediaciones del lugar del derrame, ya que este, carece de empuje para acercarse a la masa del vertido a la zona de acción de la corriente. Por ese motivo, en condiciones de viento en calma, como en vientos de componente oeste, podemos asegurar que el vertido se depositará en la propia costa de la Isla de Cozumel, sin existir un peligro de que se traslade a otras zonas geográficas.

Es por ello, que, en condiciones de viento en calma, se aconsejaría dedicar el esfuerzo a las tareas de limpieza más que a las de contención.

3. Como se ha podido observar en los casos 2, 3, 6, 7 y 9 del apartado III.1.3, en condiciones en las cuales los vientos sean de componente Este o cuasi Este de más de 20 nudos, la masa del vertido, a pesar de verse afectada por el efecto de la corriente, describirá una trayectoria en diagonal a la corriente, desplazándose lentamente hacia el Noroeste, pudiéndose producir importantes daños medioambientales y económicos en la costa Este de la península del Yucatán.

Es por ello, que el uso de barreras de contención, deberán ser usadas con la máxima prontitud, para evitar el desplazamiento de la masa de hidrocarburos.

4. En relación al punto 3 de las conclusiones, hemos podido comprobar, que las zonas que potencialmente podrían verse afectadas, como son, Punta Nizuc, Zona Hotelera de Cancún y la costa norte de Playa del Carmen, tienen del turismo su principal fuente de ingresos. Es por ello, que cualquier vertido producido en el puerto de Cozumel, podría poner en peligro la llegada de más de 5 millones de turistas.
5. Además de la pérdida económica, como se ha mencionado en el apartado III.1.3.2, algunas de las zonas mencionadas en el punto 4 de este apartado IV, son hábitat natural de especies como los manatíes y las tortugas, las cuales sufrirían el impacto de un hipotético vertido en el puerto de Cozumel.
6. Como se han podido observar en los casos mostrados en los apartados III.1.3.2, III.1.3.5 y III.1.3.8, cuando los vientos de componente Este, Este Noreste y Este Sudeste son de aproximadamente 10 nudos, esta fuerza del viento, sería la suficiente para abatir el vertido hacia el centro del canal, a la zona de máxima corriente, pero sin tener la suficiente fuerza para trasladarla a la costa del Yucatán. Es, por ello, que, bajo estas condiciones meteorológicas, el vertido, permanecerá en la zona de influencia de la corriente, pudiendo acabar, como se han visto en las simulaciones, en el Golfo de México, al Norte de la Península del Yucatán.
7. También podemos llegar a la conclusión, que el manejo de los datos meteorológicos, deberán ser fiables y tratados estadísticamente, para eliminar cualquier dato que pudiera afectar a la fiabilidad de la muestra. Cuanto mayor sea la fiabilidad de los datos meteorológicos, mayor será la precisión con la que trabaje el simulador GNOME.
8. En este estudio, se ha trabajado con vientos estables de una sola dirección. Sin embargo, como hemos podido observar en el caso especial, dispuesto en el apartado III.1.3.10, el cambio de las condiciones meteorológicas, podrían suponer un escenario muy diferente al que se ha descrito en los anteriores casos. Es por ello, que, en el caso especial, al rolar el viento, produce que la masa de vertido, no se desvíe por la corriente del Yucatán, sino que lo haga a través de la corriente en lazo del Golfo de México, para después incorporarse a la corriente de la Florida. Este caso especial, podría

trasladar la masa de hidrocarburo hacia el sur de la Florida, Bahamas e inclusive la costa Este de los Estados Unidos.

9. Aunque se han mencionado de manera puntual, el uso de barreras de contención, el análisis de los distintos medios de contención y limpieza de hidrocarburos, queda fuera del objetivo principal de este trabajo.
10. Por último, después de toda esta investigación, podemos asegurar, que una contención rápida, dejaría a la masa de hidrocarburo fuera de la zona de influencia de la corriente, evitando pues, el traslado de dicha masa a otras regiones.

REFERENCIAS

- Abascal, A. J. (2003). Analysis of flow variability in the Yucatan Channel. *Journal of Geophysical Research*, 108(C12), 3381. <https://doi.org/10.1029/2003JC001922>
- Caballero, M. J. (2003). Protección a toda costa. *Greenpeace*.
- Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos. (s. f.). Recuperado 11 de septiembre de 2019, de [http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-on-Oil-Pollution-Preparedness,-Response-and-Co-operation-\(OPRC\).aspx](http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-on-Oil-Pollution-Preparedness,-Response-and-Co-operation-(OPRC).aspx)
- Dirección General Adjunta de Oceanografía, H. y M. (2011). *San miguel de Cozumel Quintana Roo. 2011(18° C)*, 29. Recuperado de <http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioCozumel.pdf>
- GOODS. (s. f.). Recuperado 12 de septiembre de 2019, de <https://gnome.orr.noaa.gov/goods>
- IMO. (1991). *OPRC Convention: International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation, 1990, including final act of the conference and attachment (resolutions 1 to 10)*. IMO.
- IMO. (2011). *RESOLUTION MEPC.190(60)*. 190(August), 1-9.
- International convention on civil liability for oil pollution damage., Intergovernmental Maritime Consultative Organization., & International convention on civil liability for oil pollution damage. (1977). *International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage (1969); and, Protocol to the International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage, 1969 (1976)*. Inter-Governmental Maritime Consultative Organization.
- International Maritime Organization. (2017). *MARPOL Consolidated edition 2017: articles, protocols, annexes and unified interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the 1978 and 1997 protocols, incorporating all amendments in force*.
- International Maritime Organization. (s. f.). *SOLAS, consolidated edition 2014: consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and its Protocol of 1988: articles, annexes and certificates*.
- Oria Chaveli, J. M. (2019). M1481 - Auditoría de Gestión y Diseño de Planes de Emergencia y Seguridad en Buques y Empresas del Sector Marítimo.

UNICAN, Tema I.

- Part, I., Sea, T., & Subsection, A. (s. f.). *United Nations Convention on the Law of the Sea (adopted 10 December 1982, entered into force 16 November 1994) 1833 UNTS 3 (UNCLOS). 7-208.*
- Periplo Sustentable, E., Carlos Santander Martín Ramos Díaz, L., Carlos Santander, L., de Quintana Roo, U., & Ramos Díaz, M. (s. f.). *Title: A new tourist destination in the Mexican Caribbean. Cozumel, from an abandonment island to a cruisers port Cozumel, from an abandonment island to a cruisers port.* Recuperado de www.psus.uaemex.mx
- Press, E. (s. f.). *España bate récord en 2018: 82,6 millones de turistas extranjeros y un 3,1% más de gasto.*
- Puertos, G. D. E., Mercante, Y. M., Carga, M. D. E., & Pasajeros, B. Y. (2010). *Informe estadístico mensual. 2009-2010.*
- Regionales, D., Turismo, D. E. L., La, E. N., & Cozumel, I. D. E. (2003). *En La Isla De Cozumel , México.* 169-180.
- Sanchez Diaz de la Campa, F. (2001). Tema IV. *Asignatura M1477 Formación Investigadora, 73-91.*
- Sanchez Diaz de la Campa, F. (2019). Tema V. *En Asignatura M1477 Formación Investigadora.*
- Seattle, W. (2012). General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation. *En NOAA Technical Memorandum NOS OR&R (Vol. 40).* Recuperado de http://response.restoration.noaa.gov/gnome_manual
- SEDETUR (Secretaría de Turismo). (2018). *Reporte Anual De Turismo. Quintana Roo 2017.* 1-35. Recuperado de [http://caribemexicano.travel/ARCHIVOS/REPORTE TURISMO 2017.pdf](http://caribemexicano.travel/ARCHIVOS/REPORTE_TURISMO_2017.pdf)
- Skinner, S. K., & Reilly, W. K. (1989). *Oil Spill.* (May).
- The 10 Busiest Cruise Ports In The World - WorldAtlas.com. (s. f.). Recuperado 11 de septiembre de 2019, de <https://www.worldatlas.com/articles/the-10-busiest-cruise-ports-in-the-world.html>
- US Department of Commerce, N. O. and A. A. N. W. S. N. D. B. C. (s. f.). *National Data Buoy Center.*
- Valor atípico - Wikipedia, la enciclopedia libre. (s. f.). Recuperado 12 de septiembre de 2019, de https://es.wikipedia.org/wiki/Valor_atípico

ANEXOS

Para evitar que la lectura del trabajo sea farragosa, se añadirán todos los casos de simulación en el apartado de Anexos por el siguiente orden.

ANEXO I	Caso 1	Viento de componente Este – 10 Nudos
ANEXO II	Caso 2	Viento de componente Este – 20 Nudos
ANEXO III	Caso 3	Viento de componente Este – 30 Nudos
ANEXO IV	Caso 4	Viento en Calma
ANEXO V	Caso 5	Viento de componente Este Sudeste – 10 Nudos
ANEXO VI	Caso 6	Viento de componente Este Sudeste – 20 Nudos
ANEXO VII	Caso 7	Viento de componente Este Sudeste – 30 Nudos
ANEXO VIII	Caso 8	Viento de componente Este Noreste – 10 Nudos
ANEXO IX	Caso 9	Viento de componente Este Noreste – 20 Nudos

ANEXO X	Caso Especial 24 horas	Viento de componente Este – 10 Nudos rolando a Oeste a las 24 horas.
ANEXO XI	Caso Especial 3 días	Viento de componente Este – 10 Nudos rolando a Oeste a las 24 horas.
ANEXO XII	Caso Especial 6 días	Viento de componente Este – 10 Nudos rolando a Oeste a las 24 horas.
ANEXO XIII	Caso Especial 10 días	Viento de componente Este – 10 Nudos rolando a Oeste a las 24 horas.
ANEXO XIV	Histograma y Diagrama de cajas y bigotes de la velocidad de ráfaga del viento	



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 12:00 09/13/19
Prepared: 12:35 09/12/19

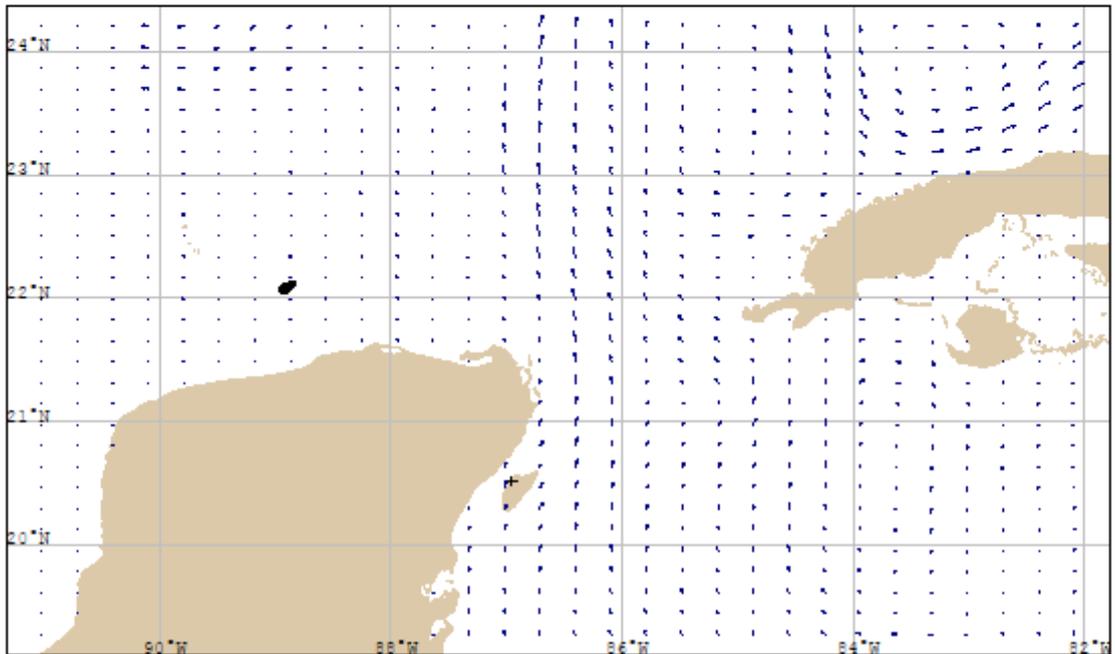
Scenario Name: Caso 1 - Viento E - 10 Nudos
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO 1 - Viento del E - 10 Nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Constant Wind: 10 knots from E
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	86 metric tons
Beached:	0 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	14 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 12:00 09/13/19
Prepared: 12:35 09/12/19

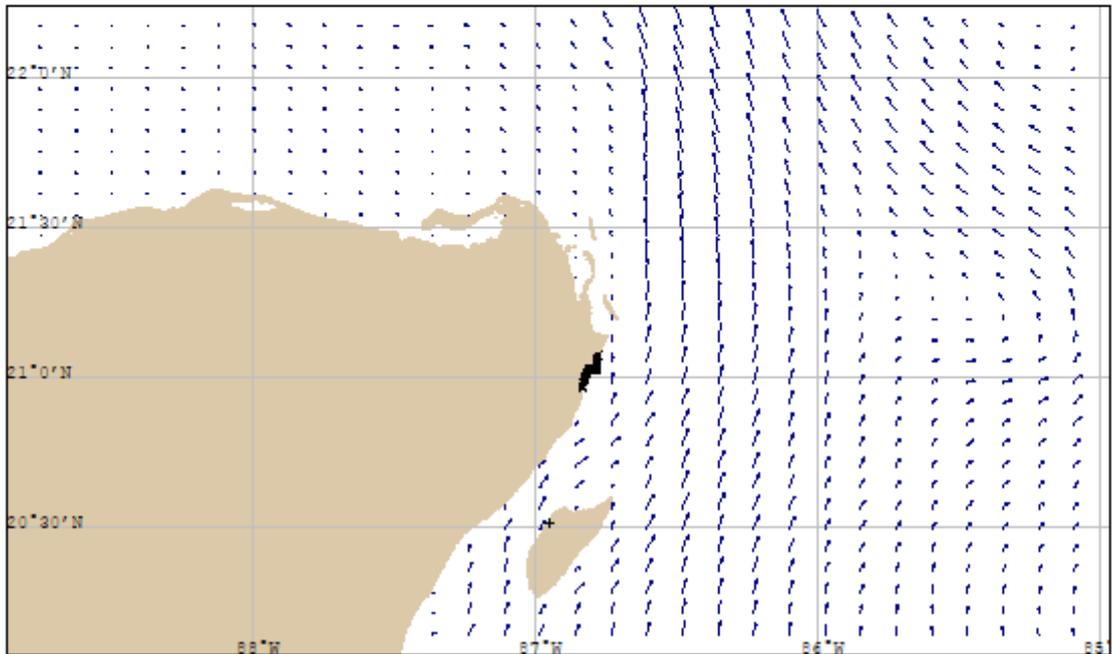
Scenario Name: Caso 2 - Viento E - 20 Nudos
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO 2 - Viento del E - 20 Nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Constant Wind: 20 knots from E
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	86 metric tons
Beached:	14 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	0 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 12:00 09/13/19
Prepared: 12:38 09/12/19

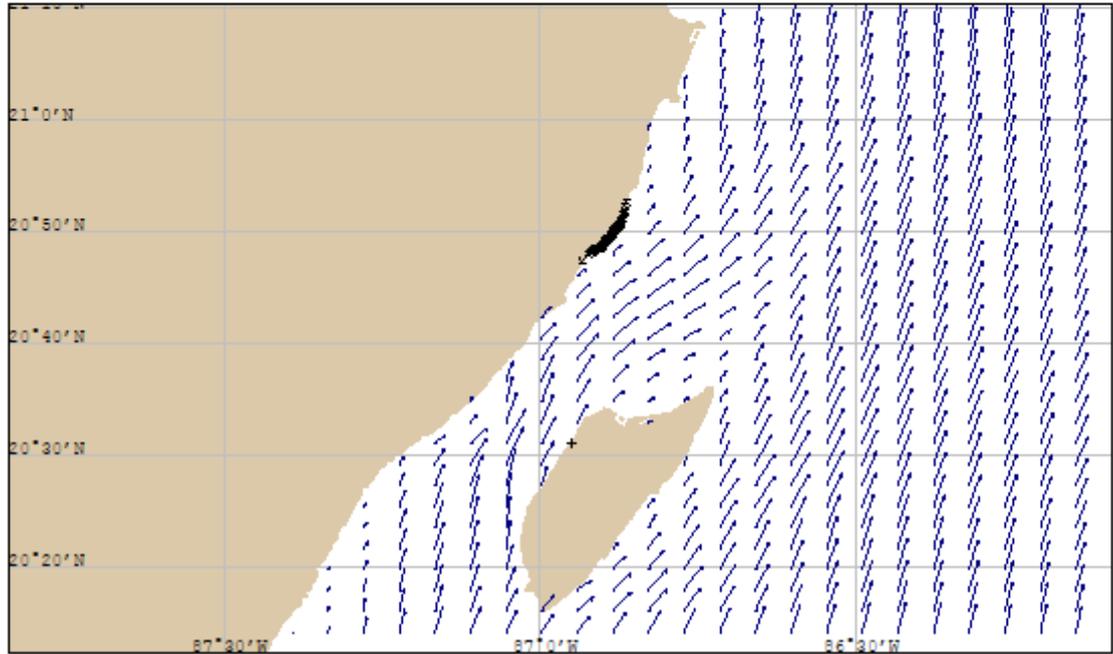
Scenario Name: Caso 3 - Viento E - 30 Nudos
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO 3 - Viento del E - 30 Nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Constant Wind: 30 knots from E
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	86 metric tons
Beached:	14 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	0 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 12:00 09/13/19
Prepared: 12:22 09/12/19

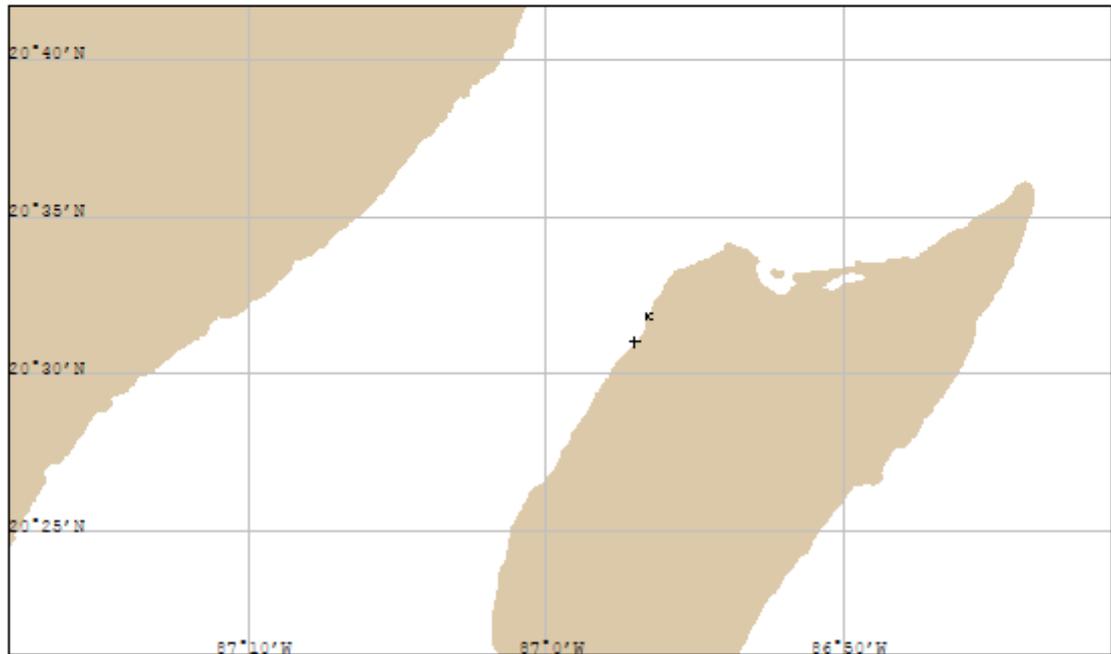
Scenario Name: Caso 4 - Diesel - Viento en Calma
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO 1 - Viento del Este - 30 Nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Constant Wind: 0 knots from S
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	86 metric tons
Beached:	14 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	0 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 12:00 09/13/19
Prepared: 12:37 09/12/19

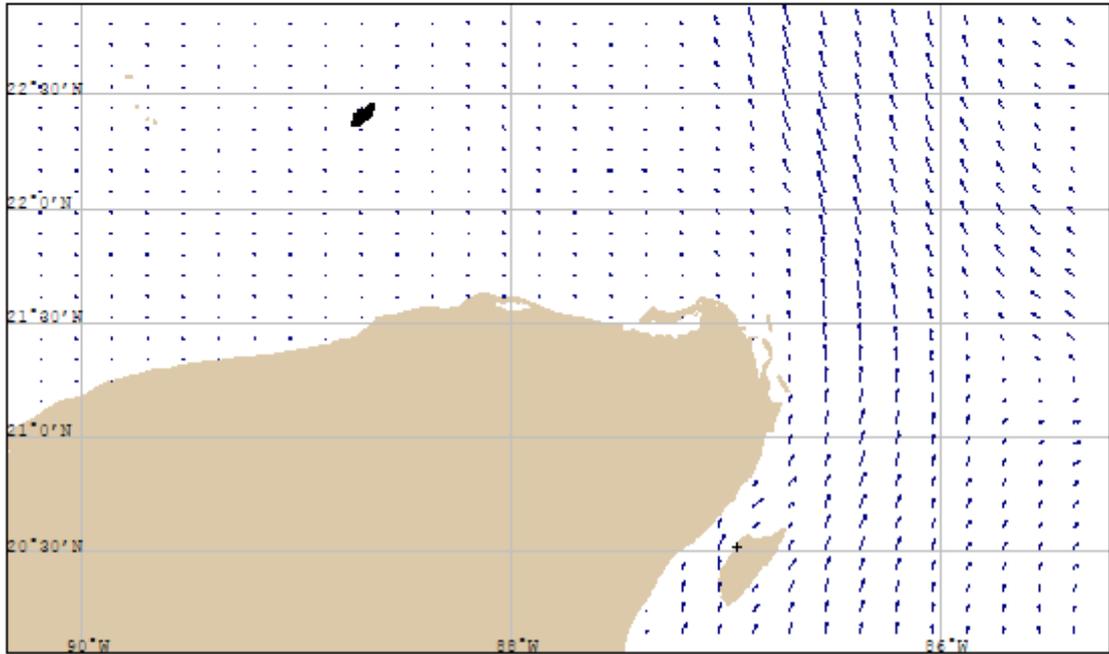
Scenario Name: Caso 5 - Viento ESE - 10 Nudos
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO 5 - Viento del ESE - 10 Nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Constant Wind: 10 knots from ESE
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	86 metric tons
Beached:	0 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	14 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 12:00 09/13/19
Prepared: 12:39 09/12/19

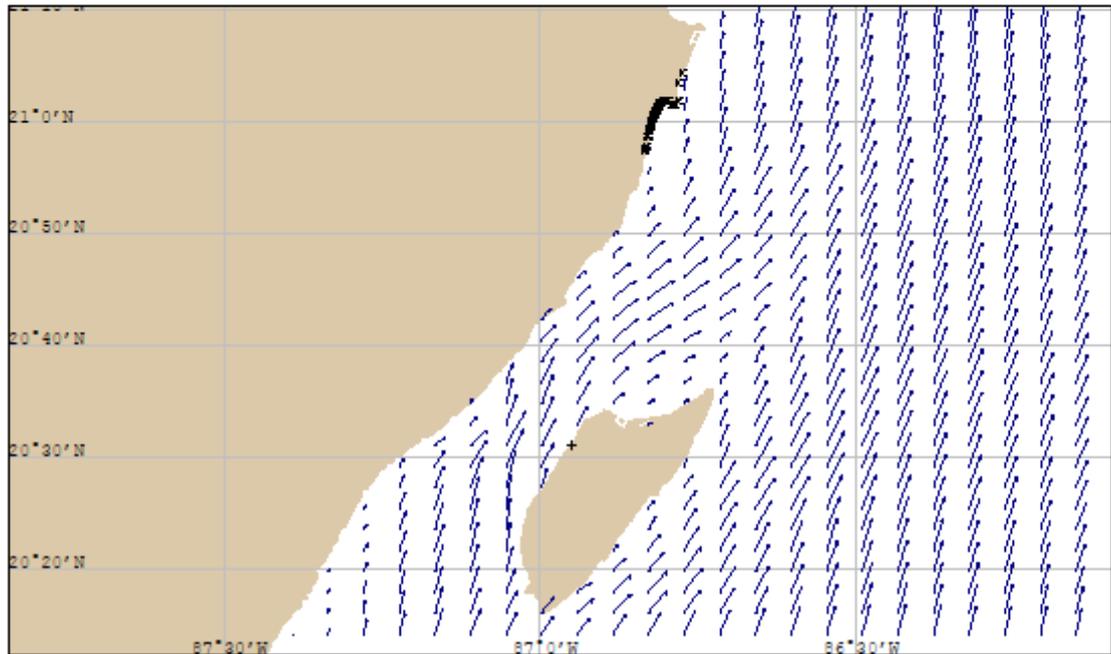
Scenario Name: Caso 6 - Viento ESE - 20 Nudos
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO 6 - Viento del ESE - 20 Nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Constant Wind: 20 knots from ESE
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	86 metric tons
Beached:	14 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	0 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 12:00 09/13/19
Prepared: 12:40 09/12/19

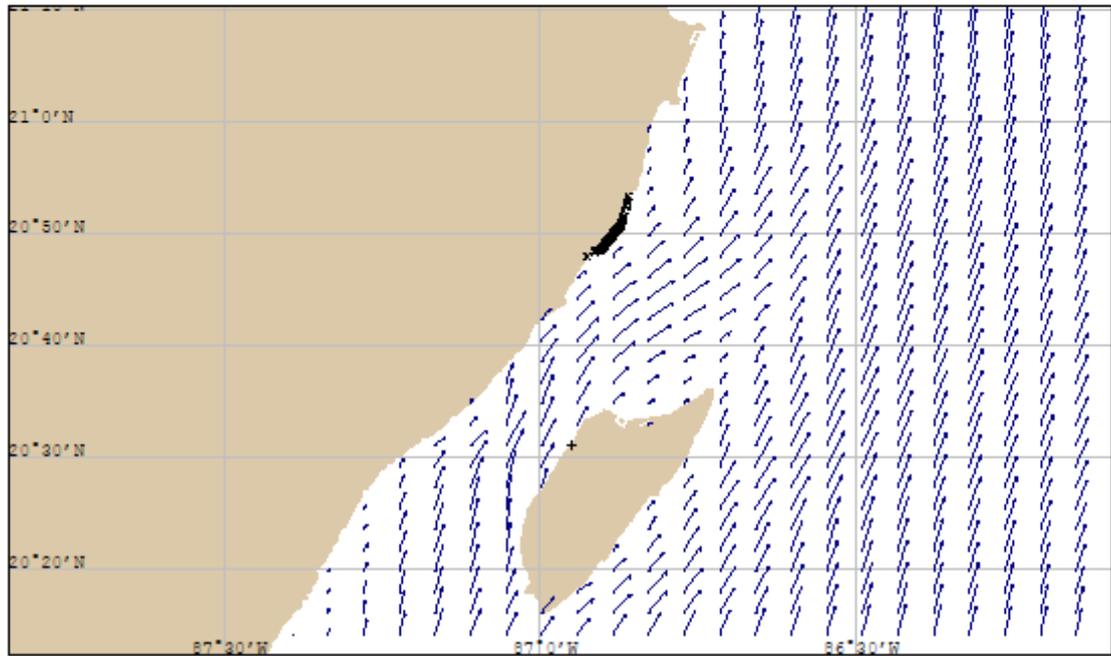
Scenario Name: Caso 7 - Viento ESE - 30 Nudos
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO 7 - Viento del ESE - 30 Nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Constant Wind: 30 knots from ESE
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	86 metric tons
Beached:	14 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	0 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 12:00 09/13/19
Prepared: 12:42 09/12/19

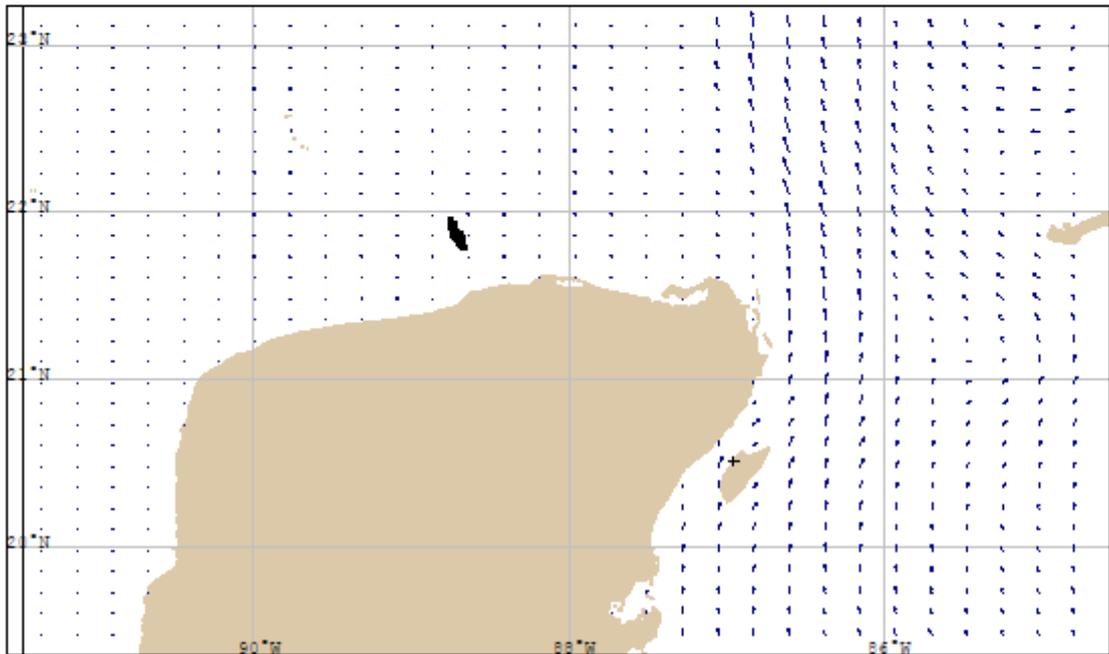
Scenario Name: Caso 8 - Viento ENE - 10 Nudos
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO 8 - Viento del ENE - 10 Nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Constant Wind: 10 knots from ENE
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	86 metric tons
Beached:	0 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	14 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 12:00 09/13/19
Prepared: 12:42 09/12/19

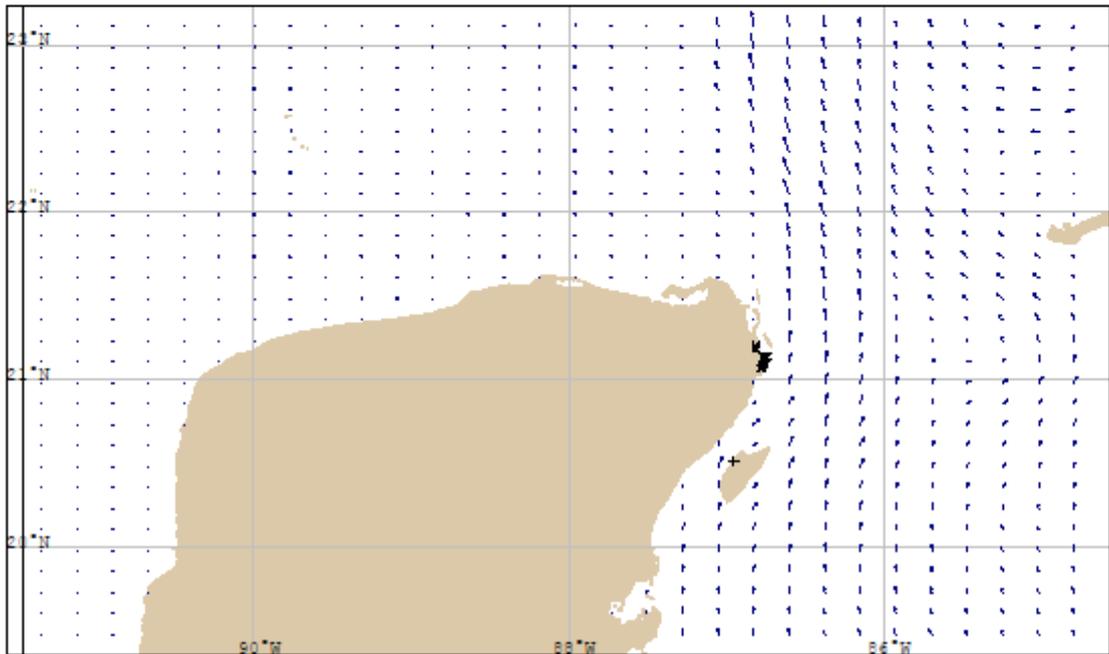
Scenario Name: Caso 9 - Viento ENE - 20 Nudos
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO 9 - Viento del ENE - 20 Nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Constant Wind: 20 knots from ENE
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	86 metric tons
Beached:	14 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	0 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 20:00 09/04/19
Prepared: 12:29 09/12/19

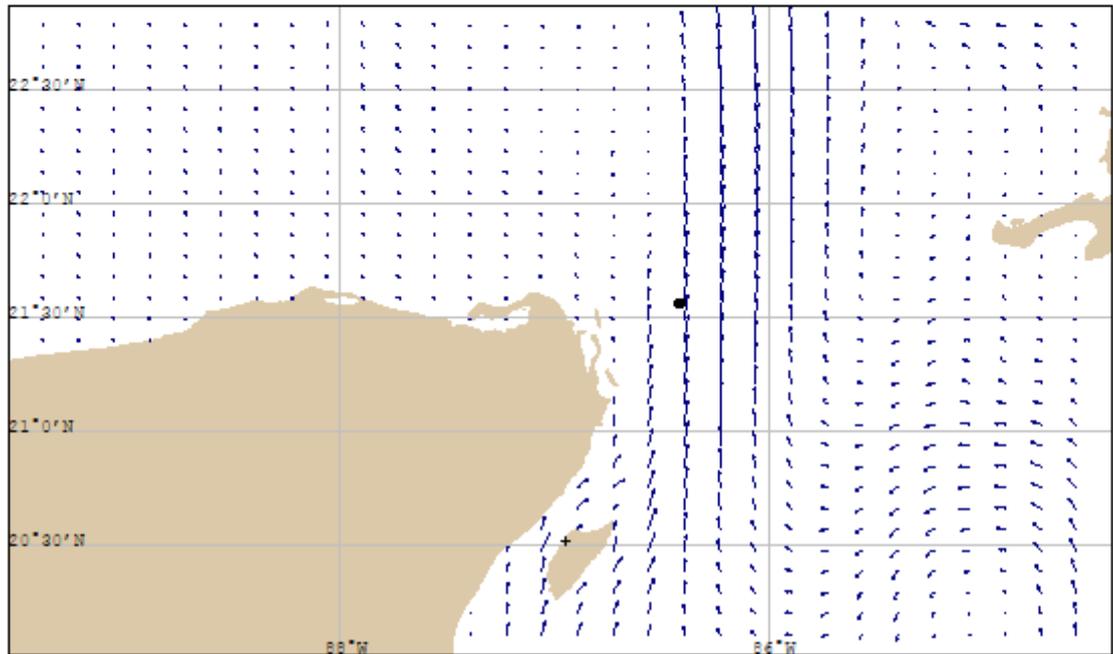
Scenario Name: Caso Especial - Viento E - 10 Nudos Rolando a Oeste 1
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO Especial - Viento del E - 10 Nudos rolando a Oeste 10 nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Variable Wind
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	44 metric tons
Beached:	0 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	56 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 20:00 09/06/19
Prepared: 12:31 09/12/19

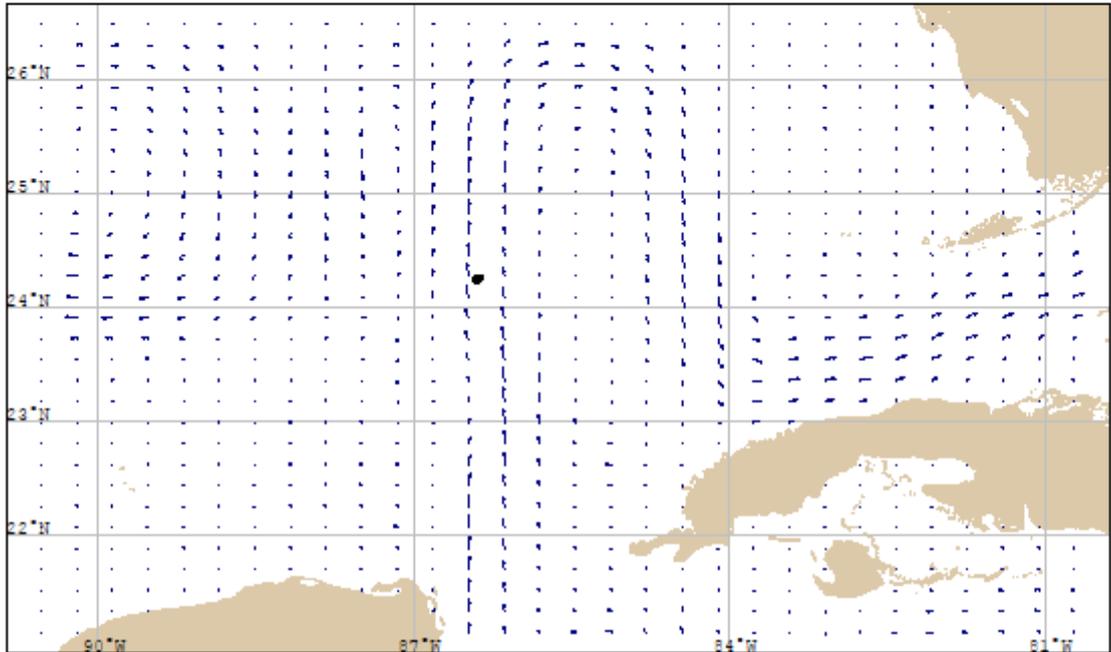
Scenario Name: Caso Especial - Viento E - 10 Nudos Rolando a Oeste 1
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO Especial - Viento del E - 10 Nudos rolando a Oeste 10 nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Variable Wind
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	65 metric tons
Beached:	0 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	35 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 20:00 09/09/19
Prepared: 12:32 09/12/19

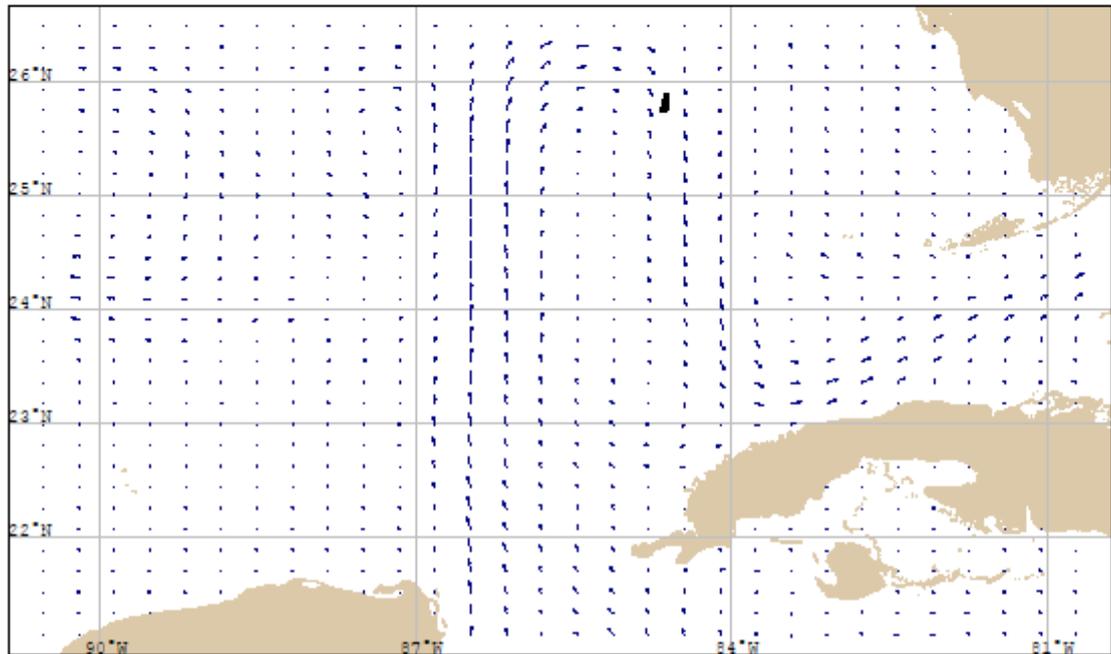
Scenario Name: Caso Especial - Viento E - 10 Nudos Rolando a Oeste 1
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO Especial - Viento del E - 10 Nudos rolando a Oeste 10 nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Variable Wind
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	80 metric tons
Beached:	0 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	20 metric tons



Model Mode: Diagnostic
Estimate for: 12:00 09/13/19
Prepared: 12:32 09/12/19

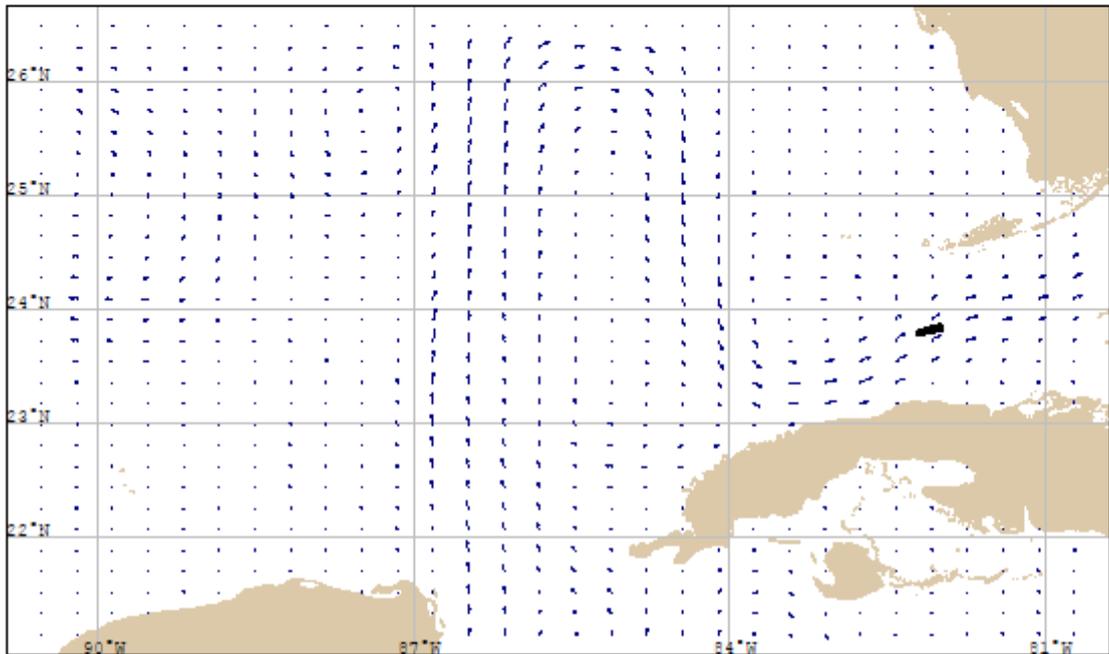
Scenario Name: Caso Especial - Viento E - 10 Nudos Rolando a Oeste 1
Prepared by: Victor Morris Gomez
Contact Phone:

This trajectory was produced by GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), and should be used for educational and planning purposes only--not for a real response.

CASO Especial - Viento del E - 10 Nudos rolando a Oeste 10 nudos

Tiempo de Simulación 10 Días

Posición Inicial del Vertido - Muelle Punta Langosta - Vertido de 100 m3 de Diesel



Variable Wind
Black Spots: Best Estimate

Spot Mass Balance Totals (Best estimate):

Released:	100 metric tons
Evaporated/Dispersed:	86 metric tons
Beached:	0 metric tons
Off Map:	0 metric tons
Floating:	14 metric tons

Histograma Rafagas de viento
Fuente: Boya ODAS 42056 - NOAA

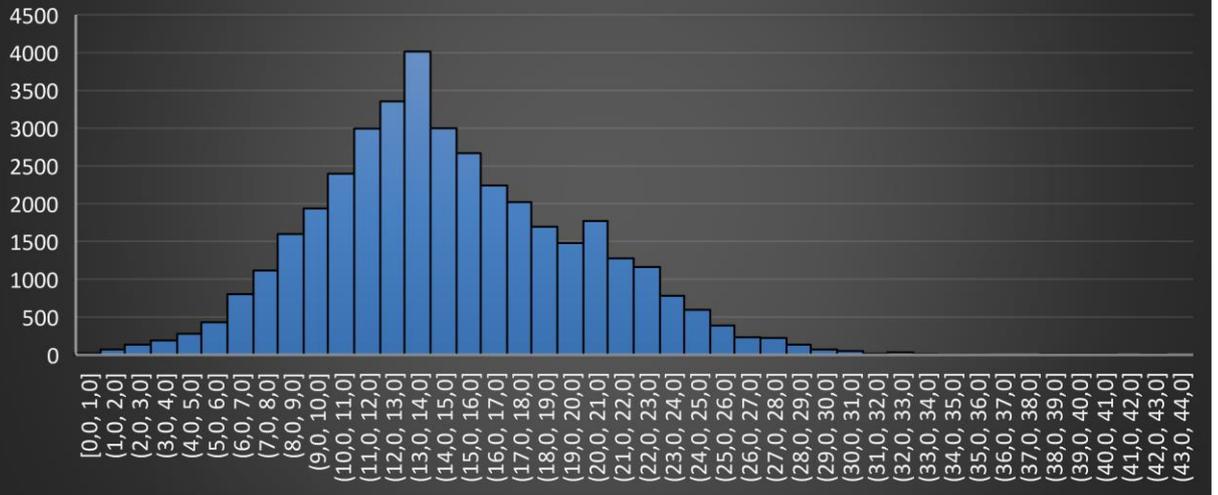


Diagrama de Cajas y Bigotes - Velocidad Ráfagas de Viento
Fuente: Boya ODAS 42056 - NOAA

