



**Universidad Juárez Autónoma de
Tabasco.**



**División Académica de Ciencias
Biológicas.**

*EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS CONCENTRACIONES DE
DIÓXIDO DE AZUFRE ESTIMADAS CON DATOS SATELITALES Y
DE INVENTARIOS DE EMISIONES.*

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias Ambientales

PRESENTA:

Cesar Manuel Zapata Aguilar.

ASESOR:

Dr. Arturo Valdés Manzanilla.

CO-ASESOR:

Dr. Raúl German Bautista Margulis.

29 de Enero de 2020

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **"EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE ESTIMADAS CON DATOS SATELITALES Y DE INVENTARIOS DE EMISIONES"**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro, autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica por las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 29 de Octubre de 2019.

AUTORIZO



CÉSAR MANUEL ZAPATA AGUILAR



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

OCTUBRE 29 DE 2019

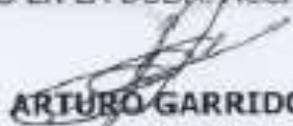
C. CÉSAR MANUEL ZAPATA AGUILAR
PAS. DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES
PRESENTE

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales titulado: **"EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE ESTIMADAS CON DATOS SATELITALES Y DE INVENTARIOS DE EMISIONES"**, asesorado por Dr. Arturo Valdés Manzanilla y Dr. Raúl German Bautista sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado integrado por, Dr. Raúl German Bautista, Dra. Ebelia del Ángel Meraz, Dr. Arturo Valdés Manzanilla, Dr. Gaspar López Ocaña y M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

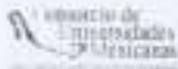

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p. - Expediente del Alumno.
C.c.p. - Archivo



KM. 0.5 CARRE. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (991) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, 337-9611, 337-9706, Fax (991) 354-8108 y 338-1879

Usar papel reciclado, mantener la energía, evitar contaminación y desahorro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo fue, sin duda, una colaboración entre muchos involucrados tanto de manera académica como personal.

Extiendo mi mas sincero y profundo agradecimiento a mi director el Dr. Arturo Valdés Manzanilla, por su paciencia y apoyo en todo momento de trabajo e incluso de manera personal. Es gracias a el que se me permitió la oportunidad de estar en este posgrado.

Igualmente agradezco a mi codirector el Dr. Raúl German Bautista Margulis y a la Dra. Ebelia del Ángel Meraz por siempre estar al tanto de la realización de este proyecto. Sus aportaciones fueron realmente importantes para llevar adelante esta investigación. Igualmente menciono a la Dra. Mercedes Andrade Velázquez del Centro de Cambio Global y la Sustentabilidad en Tabasco, por haber facilitado la realización de la estancia académica y por la realización de un excelente articulo que espero, rinda frutos.

Por supuesto, debo agradecer a mis familiares, en especial a mi madre, quien siempre estuvo allí para darme ánimos incluso en momentos difíciles. Para ella espero se motivo de orgullo ver este trabajo realizado. A mi padre, quien, a pesar de no estar ya físicamente, siempre mantuve viva su memoria mediante los consejos que me dejo.

Finalmente agradezco a mis amigos (tanto nuevos como viejos) por no dejarme caer en el estrés que conlleva un posgrado.

Finalmente, a las autoridades de la división (académicas y administrativas) que siempre estuvieron en la mejor disposición de ayudar durante toda la estadía en esta institución.

Contenido

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABLAS	2
RESUMEN.....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
ANTECEDENTES.....	7
JUSTIFICACION	10
OBJETIVOS	12
General.....	12
Específicos	12
CAPITULO 1. MARCO TEORICO.....	13
1.1. El dióxido de azufre: Generalidades	13
1.1.1. Fuentes.....	13
1.1.2. Efectos en la salud.....	14
1.1.3. Efectos en el ambiente.....	15
1.2. Descripción de los modelos utilizados.....	15
1.2.1.El modelo meteorológico WRF.....	15
1.2.2. Modelo de dispersión atmosférica CALPUFF.....	17
CAPITULO 2. METODOLOGÍA.....	20
2.1. Área de estudio	20
2.2. Búsqueda de información.....	22
2.2.1. Información Meteorológica	22
2.2.2. Información de emisión y concentración.....	23
2.3. Selección del modelo.....	24
2.4. Procesamiento de la información	25
2.5. Manejo de CalpuffView.....	25
2.5.1. Características generales de las corridas.....	26
2.5.2. Modificación al Calmet	27
2.5.3. Modificación al Calpuff.....	27
2.5.4. Modificación al Calpost	28
2.6. Análisis estadístico.....	28
CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30

3.1. Datos preliminares 30

3.2. Selección del periodo de simulación 32

3.3. Simulaciones obtenidas de CalpuffView 36

CAPITULO 4. CONCLUSIONES 43

4.1. Conclusiones 43

4.2. Observaciones 44

REFERENCIAS 46

ANEXO 50

ANEXO 1. 51

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dominio del modelo NAM para la predicción y obtención de información meteorológica.

Figura 2. Diagrama de flujo general de la metodología usada en este estudio.

Figura 3. Mapa delimitado del área de estudio.

Figura 4. Evolución de las emisiones anuales estimadas por OMI/Aura y los inventarios de Pemex para los CPGs de Cactus y Nuevo Pemex y para las instalaciones de plataformas en el Golfo de México

Figura 5. Rosas de viento para los días seleccionados.

Figura 6. Densidad de columna vertical de SO₂, en unidades Dobson, estimadas por el satélite Aura durante los días seleccionados.

Figura 7. Plumas de contaminantes generadas por el modelo Calpuff, en microgramos por metro cubico, para el día 1 de Febrero de 2013 a las 8 horas.

Figura 8. Comportamiento horario de la concentración de SO₂ medido en la ubicación de la estación de monitoreo del ITVH para los días seleccionados.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación y aportación de emisión de SO₂ para las fuentes ubicadas en los complejos de Cantarell y Ku-Maloob-Zaap.

Tabla 2. Ubicación de las estaciones de monitoreo encontrados dentro del área de estudio.

Tabla 3. Valores máximos de concentración observados para los tres días estudiados.

Tabla 4. Evaluación de las concentraciones medidas de SO₂ contra las concentraciones estimadas mediante el uso de datos del OMI/Aura y los inventarios de Pemex.

RESUMEN

Las emisiones de gases contaminantes y la necesidad de tener un control sobre estas han llevado a la creación de herramientas que estudian el comportamiento e impacto que genera al ambiente. El dióxido de azufre se monitorea de manera continua debido a sus posibles efectos. Existe una cantidad considerable de modelos que simulan el comportamiento de un contaminante como lo es el modelo de dispersión CALPUFF el cual permite observar el transporte y evolución de una pluma de contaminante. En el presente trabajo se compararon los resultados de las simulaciones generadas por CALPUFF usando como base los datos de emisión provistos por inventarios de la empresa Petróleos Mexicanos e información del instrumento OMI montado en el satélite Aura contra los datos medidos por un sensor en tierra ubicado en la ciudad de Villahermosa, Tabasco, México. Las emisiones usadas provinieron de las instalaciones de extracción de petróleo ubicadas en el Golfo de México y el periodo abarcado en el trabajo corresponde al mes de Febrero del 2013. El análisis estadístico de los resultados arrojó que los datos satelitales sobreestiman la cantidad de contaminante, mientras que los inventarios la subestiman, en base a los errores del conjunto de datos, cada una de estas situaciones puede atribuirse a diferentes factores. Los valores de concordancia mostraron que, de manera general, los datos de los inventarios fueron más consistentes en cuanto a su aproximación a lo medido en las estaciones, sin embargo, se encontraron valores cercanos a lo ideal en las concentraciones calculadas con el satélite.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica permanece como uno de los principales problemas de la sociedad moderna. En México y en muchas partes del mundo como un problema local, ya que se manifiesta principalmente en las grandes ciudades. Sin embargo, conforme se ha investigado más profundamente en el tema se han evidenciado los efectos de la contaminación del aire, que además de su impacto local tienen un efecto regional y global.

Los gases de la familia de los óxidos de azufre (SO_x), entre los que se encuentra el bióxido de azufre (SO₂), son incoloros y de olor irritante; se forman al quemar combustibles con azufre, y tienden a disolverse fácilmente en agua. La fuente primaria de emisiones de SO₂ es la quema de combustibles fósiles que contienen azufre, tales como combustóleo, diesel y carbón (Nowlan *et al.*, 2014).

Los modelos numéricos de predicción del tiempo son herramientas básicas cuando se quiere entender y predecir el comportamiento de la atmósfera y, dentro de los diferentes que existen actualmente, el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es el más usado a nivel mundial tanto para la predicción del tiempo en oficinas de pronóstico sino también en el área de la investigación (Arango y Ruiz, 2011). Es a partir de la información que estos modelos generan que es posible el estudio de la contaminación atmosférica mediante la modelación de la calidad del aire, buscando reducir las alteraciones que puedan derivar en daño a las personas o al ambiente (Hernández-Garcés *et al.*, (2016).

El uso de imágenes satelitales para el monitoreo de las cantidades de gases contaminantes, la determinación de concentraciones y el seguimiento del comportamiento de plumas son una de las herramientas de mayor uso en la toma de decisiones para el buen manejo de las actividades de los sectores públicos y privados (Duncan *et al.*, 2014). La generación de información que esta fuente provee

ha sido avalada por diversas instituciones. Uno de los gases monitoreados de forma remota es el dióxido de azufre (SO_2). Dentro de los equipos mayormente usados para el monitoreo de diversos contaminantes puede señalarse al OMI (Ozone Monitoring Instrument) lanzado por la NASA Julio de 2014 a bordo del satélite AURA el cual provee con datos diarios en su recorrido orbital Kharol *et al.*, (2017).

En México, el uso de los modelos de predicción del tiempo y el de aquellos que sirven para modelar el comportamiento de las emisiones cuentan con una base sólida pues han sido empleados de manera continua para distintos fines, por otra parte, el empleo de la información satelital para el monitoreo de las emisiones de gases contaminantes es un tema no tan abordado dado que es más común el uso de la información que se genera a través de las diferentes instancias tanto gubernamentales como privadas, siendo esta información proporcionada en la forma de inventarios de emisiones y otros productos. Fioletov *et al.*, (2016) notan la variación que existe entre los datos que se obtienen de instrumentos satelitales, como el OMI del satélite Aura, y aquellos reportados en los diferentes documentos en cuanto a emisiones de SO_2 , siendo el único país que presenta esta problemática, en base a lo cual se hace notoria la falta de estudios que puedan señalar que datos se están apegando más a lo que en la realidad se genera del contaminante en cuestión y que además permitan estimar las concentraciones que se encuentran presentes en las zonas del país donde las emisiones son mayoritarias.

En el presente trabajo tiene como objetivo realizar un estudio comparativo entre los datos de emisión de SO_2 generados por las instalaciones de la paraestatal PEMEX captados por el sensor satelital OMI del satélite Aura con aquellos datos provistos por los diferentes estudios e inventarios de emisiones que se tienen para la zona norte de Chiapas y el estado de Tabasco, con el fin de validar la información que proporcionan al medirlos contra los que las estaciones de monitoreo obtienen de las concentraciones del contaminante de interés.

El contenido de este documento se encuentra desglosado en una serie de capítulos en los que se abarcan puntos importantes para un pleno entendimiento de la problemática a tratar. En el Capítulo 1 se abarcan ciertos conceptos generales correspondientes al dióxido de azufre como es sus características, fuentes y efectos en la salud y el ambiente. También se menciona las características generales del modelo a usar a lo largo de la investigación, el modelo Calpuff. En el Capítulo 2 se explica en extenso la metodología usada, además que se menciona el área de estudio que se consideró en el estudio. Las ecuaciones usadas para el análisis estadístico a realizar también se definen en esta sección. En el Capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos y estos se comparan con información de estudios similares y se busca encontrar un patrón en el comportamiento de las concentraciones obtenidas. Finalmente, en el Capítulo 4 se mencionan las conclusiones que se obtuvieron tras el estudio, además que se recalcan algunos puntos clave que son áreas de oportunidad para trabajos futuros.

ANTECEDENTES.

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) ha sido ampliamente usado en diversas investigaciones enfocadas en la predicción de las condiciones atmosféricas que pueden tener un impacto al momento de interactuar con agentes contaminantes que se descargan desde diversas fuentes de emisión. La sensibilidad del modelo WRF ha sido probada por diferentes autores tales como Mohan y Bahti, (2011) realizaron estudios utilizando diferentes configuraciones del modelo en las cuales compararon datos observados contra datos calculados y, aplicando análisis estadístico para evaluar la eficiencia del modelo, obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a su rendimiento. Arango y Ruiz, (2011) realizaron la validación del modelo WRF para la sabana de Bogotá tomando especial interés en la influencia de la topografía de la región y con lo cual observaron una mejora en los resultados cuando la topografía se revisa exhaustivamente. Chaouch *et al.*, (2016) realizaron estudios en los cuales se usaba los datos de la Capa Limite de Mezcla Planetaria para verificar como se adaptaría el modelo WRF a estas condiciones.

Hernández (2013) uso el modelo para realizar un prediagnóstico de la calidad del aire en Cuba y hallo una buena relación entre los valores de temperatura generados por el modelo al compararlos con los obtenidos de estaciones meteorológicas, pero se mostraron diferencias marcadas en cuanto a velocidad y dirección del viento. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en conjunto con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), han usado el modelo WRF desde sus inicios para la generación de los boletines meteorológicos que se expiden para todo el México.

El concepto de usar instrumentos satelitales para la medición de contaminantes tales como el dióxido de azufre, monóxido de carbono, ozono, entre otros, había sido considerada mucho antes que se lanzaran los actuales satélites de monitoreo Fioletov *et al.*, (2016) realizaron un catálogo a nivel global de los principales puntos de emisión de SO₂ y en este México aparece como uno de los países considerados

como relevante en cuanto su generación de este contaminante. Hacen hincapié en la discrepancia que existe en cuanto a las emisiones que se generan en las costas del Golfo de México y las cuales no se consideran adecuadamente en los reportes de las instituciones mexicanas. He *et al.* (2016) usaron información diaria provista por la NASA a través del Goddard Earth Sciences Data and Information Service Center, la cual está generada en una cuadrícula con datos nivel 2 de SO₂. Encontraron que los datos obtenidos del instrumento OMI muestran un comportamiento consistente en cuanto a la reducción de emisiones de SO₂ derivados de plantas energía de un ~50%. Krotkov *et al.*, (2016) reportaron los cambios que las emisiones de NO₂ y SO₂ en diferentes zonas en las cuales la presencia de estos gases contaminantes era más notoria mediante el uso del instrumento OMI. Ellos observaron una reducción significativa de los niveles de contaminación a lo largo del periodo 2005-2015, para regiones en las cuales se llevan a cabo monitoreos continuos de los niveles de los contaminantes antes mencionados, corroborando la existencia de una concordancia entre los datos medidos y reportados en los sitios. McLinden *et al.*, (2016) utilizaron datos del instrumento OMI del satélite Aura de la NASA para rastrear las emisiones de SO₂ que no son convencionalmente tomadas en consideración en los inventarios de emisiones de diversas partes del mundo, de las llamadas “fuentes faltantes”, con el fin de aminorar la diferencia entre los inventarios, sin considerar divisiones geopolíticas y tipos de fuente.

La modelación de la contaminación atmosférica ha tomado gran importancia al ser apoyada con las herramientas de pronóstico del tiempo y de los sensores remotos. Casares-Long *et al.*, (2015) demostró que el modelo de dispersión atmosférica langrangiano CALPUFF es el más usado en diversos ámbitos de aplicación. El uso del modelo de pronóstico WRF y el modelo de dispersión CALPUFF de manera conjunta, ha generado importantes resultados en cuanto a la visión de las emisiones contaminantes a lo largo del planeta. Lee On *et al.*, (2014) estimaron las emisiones de dos contaminantes de importancia (PM₁₀ y SO₂) generados por complejos industriales mediante el uso combinado de los modelos WRF y CALPUFF para predecir de manera más exacta las condiciones meteorológicas medias y la

distribución de las concentraciones de los contaminantes de interés para el año 2012 en la ciudad de Ulsan, Corea y estos datos se compararon con las concentraciones marcadas por los estándares nacionales. Posteriormente, Hernández-Garcés *et al.*, (2015) evaluó un modelo diagnóstico que usaba datos anidados de CALMET en el modelo WRF en el que comparaba los datos de concentración de dióxido de azufre a nivel del suelo y en aire superior a lo largo de periodos específicos, además que el modelo CALPUFF se usó para simular la dispersión de dióxido de azufre. Holnicki *et al.*, (2015) aplicaron el modelo CALPUFF a una escala urbana con el fin de medir el desempeño de las predicciones que este genera de acuerdo a los horizontes de análisis de tiempo y la resolución espacial.

Asimismo, existen trabajos que han comparado los datos obtenidos de los instrumentos remotos con la información que se tiene de sensores a nivel del suelo. Ialongo *et al.*, (2015) uso los datos generados por el OMI y bases de datos de estaciones a nivel del suelo para evaluar el impacto de una erupción ocurrida en la fisura de Haluhraun en Islandia, encontrando una buena relación entre los conjuntos de datos; Fioletov *et al.*, (2017) compara distintos equipos satelitales (incluido OMI, OMPS, SchiamaChy) con datos recolectados por estaciones de monitoreo para un mismo periodo de tiempo, hallando que la mayoría de los datos satelitales producen errores pequeños en comparación a los datos de las estaciones.

En el caso de México, Valdés *et al.*, (2008) uso el modelo CALPUFF para simular las condiciones de dispersión del SO₂ que se emite en la región norte de Chiapas y Tabasco por las diferentes instalaciones de PEMEX que se encuentran en la zona. Villaseñor *et al.*, (2003) realizo un estudio donde evaluó como las instalaciones de extracción de petróleo en el Golfo en la llamada Sonda de Campeche estarían afectando a las poblaciones cercanas

JUSTIFICACION.

El dióxido de azufre es un contaminante atmosférico que es emitido de fuentes tanto naturales como antropogénicas. Es uno de los componentes principales de los aerosoles particulados y poseen un periodo de vida de aproximadamente 3 a 4 días. En presencia de humedad el dióxido de azufre forma ácidos en forma de aerosoles y se produce una parte importante del material particulado secundario o fino ($PM_{2.5}$). El SO_2 es el responsable de la lluvia ácida. Tanto la exposición a sulfatos como a los ácidos derivados del SO_2 , comportan graves riesgos para la salud ya que éstos pasan directamente al sistema circulatorio humano a través de las vías respiratorias. La principal fuente de emisión de dióxido de azufre a la atmósfera es la combustión de productos petrolíferos y la quema de carbón en centrales eléctricas y calefacciones centrales. Existen también algunas fuentes naturales, como es el caso de los volcanes.

En el Estado de Tabasco, las actividades de Pemex en sus diferentes instalaciones de condensamiento y endulzamiento de gas presentan una de las fuentes de mayor aporte en cuanto a la generación de dióxido de azufre en la región (Pemex, 2012). Por este motivo, han implementado tecnologías que les ayuden a la disminución de las cantidades de gases emitidos por sus procesos, además de poseer instalaciones para el monitoreo de las emisiones. Sin embargo, ha habido ciertas discrepancias en cuanto a los niveles de dióxido de azufre que se encuentran presentes en la atmósfera de acuerdo con estudios realizados con anterioridad en cuanto a sitios con mayores aportes de SO_2 en el mundo, en los que comparan los datos que se presentan de medio oficiales del país con aquellos que se obtienen mediante análisis de otras fuentes, muy especialmente la información generada por los sensores satelitales. Se resalta la importancia de poder analizar la información de ambas fuentes en base a las diferencias significativas que puedan existir al aplicar criterios que den acotaciones espaciales y temporales en común y de esta manera, discernir la variabilidad de los datos en un marco estadístico que nos muestre estas diferencias en razón de márgenes.

Poder analizar de manera más amplia el impacto que las emisiones pueden llegar a tener en la población de un área geográfica de tamaño considerable aún no ha sido abordado de manera amplia, por esta razón, el uso de imágenes satelitales para la evaluación de los niveles de SO₂ en la zona petrolera del noroeste de Chiapas y Tabasco toma relevancia, pues permitirá una visión más completa que permita corroborar cómo se comporta la presencia de este contaminante en la zona de análisis y abre un espectro de posibilidades en cuanto al uso de este tipo de información.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

OBJETIVOS

General

Comparar las concentraciones de SO₂ estimadas a partir de datos del sensor satelital OMI y las emisiones de SO₂ reportadas por inventarios de emisiones y otras fuentes en la región Norte de Chiapas y Tabasco con la información de concentración que se tiene de las estaciones de monitoreo de calidad del aire mediante la aplicación de modelos de dispersión.

Específicos.

- < Obtener información meteorológica de la zona de interés para el estudio mediante el uso de los análisis generados por el modelo WRF.
- < Recopilar la información de las emisiones de SO₂ del sensor OMI del satélite Aura de la NASA en cuanto a las emisiones de bióxido de azufre, así como la información de las emisiones de SO₂ del inventario de emisiones de Pemex.
- < Ejecutar el modelo CALPUFF para la obtención de las concentraciones de bióxido de azufre en el área de estudio usando las emisiones de SO₂ estimadas por el sensor satelital OMI y los reportes de emisiones de Pemex.
- < Comparar las concentraciones obtenidas para las 2 fuentes de información de la tasa de emisión.

CAPITULO 1. MARCO TEORICO.

1.1. El dióxido de azufre: Generalidades

Se conoce como dióxido de azufre (o anhídrido sulfuroso) al compuesto químico de fórmula SO_2 . Pertenecce al grupo de gases conocidos como óxidos de azufre (o NO_x) y es uno de los gases que más ha sido monitoreado dados los efectos que genera. Es un gas incoloro, de olor desagradable y asfixiante, altamente soluble en agua y de naturaleza ácida. El dióxido de azufre es un intermedio importante en la producción del ácido sulfúrico. Se forma en la combustión de azufre elemental o sulfuros (p. ej. la pirita FeS_2 , la wurzita o la blenda (ambos ZnS), la galena PbS , etc.).

Una vez emitido a la atmósfera, tiene un periodo de vida corto (de unos 2 a 4 días) debido a su alta reactividad lo que le permite transformarse en una amplia gama de nuevos compuestos siendo uno de estos cambios su oxidación a trióxido de azufre (SO_3), que puede ser transformado directamente en el ácido sulfúrico. La velocidad de esta reacción en condiciones normales es baja la cual la facilita la generación del SO_3 de manera continua (Greabver et al, 2012). También puede dar origen a aerosoles de sulfato y otros compuestos azufrados. El ácido sulfúrico es un precursor del fenómeno de lluvia ácida, tras combinarse este gas con el vapor de agua del aire. Dada esta característica de convertirse rápidamente en otra sustancia de mayor importancia, es que se le considera como un contaminante primario.

1.1.1. Fuentes

Los procesos naturales por los cuales este gas puede ser liberado a la atmósfera son muy específicos, siendo estos la actividad volcánica global y los afloramientos de aguas geotermales. Las erupciones volcánicas emiten importantes cantidades de este gas a la atmósfera, sin embargo, los volcanes en estado de reposo igual

presentan emanaciones de este gas. De acuerdo con Stoiber, et al 1987, los volcanes contribuyen con un 9% de la concentración mundial anual de SO_2 presente en la atmósfera. Las erupciones de mayores proporciones han provocado cambios en el clima global ya que liberan grandes cantidades de aerosoles de azufre que producen una disminución en la temperatura pues reflejan la luz solar entrantes y no permiten que el balance de calor de la Tierra se lleve en forma normal (NASA, 2016)

Por la parte de las emisiones antropogénicas, el origen fundamental del dióxido de azufre hay que buscarlo en los procesos de combustión de combustibles fósiles, principalmente carbón y derivados del petróleo. Estos combustibles presentan azufre en su composición. Este azufre se transforma en el proceso de combustión, combinándose con oxígeno, pasando de esta forma a la atmósfera. Los principales focos emisores son las centrales térmicas, las refinerías de petróleo, la industria del cobre, la del ácido sulfúrico y otras (EPA, 2016).

1.1.2. Efectos en la salud.

A pesar de que el dióxido de azufre no es detectado a simple vista, sus efectos han sido bien identificados. La exposición a este gas se da al respirar aire lo contenga e incluso puede ser absorbido por la piel cuando se dan las condiciones adecuadas. En el sistema respiratorio, puede inflamar las membranas mucosas de la nariz y garganta o provocar afecciones e insuficiencias pulmonares. Estas afecciones pueden aparecer en presencia de concentraciones tan bajas como de 8 ppm. Además de afectar el sistema respiratorio puede causar dolor de cabeza y ansiedad, cardiopatía y, en casos de estar expuestos a dosis importantes, puede generar alteración del metabolismo de las proteínas (EPA, 2016).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido valores de exposición a este gas de acuerdo con situaciones de exposición a diferentes tiempos, así la concentración media máxima en un periodo de 24 horas no debe sobrepasar 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, la concentración de SO_2 en periodos promedio de 10 minutos no debería superar los 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los estudios indican que un porcentaje de las

personas con asma experimenta cambios en la función pulmonar y síntomas respiratorios tras períodos de exposición al SO₂ de tan solo 10 minutos.

1.1.3. Efectos en el ambiente

El dióxido de azufre puede provocar impactos en la biodiversidad, el suelo, los sistemas acuáticos y terrestres, así como en la infraestructura a través de procesos de acidificación, los cuales se encuentran asociados a la forma más común en la cual el SO₂ regresa a la superficie mediante una serie de pasos que comprenden a la precipitación y deposición húmeda de sustancias ácidas disueltas en el agua: la lluvia ácida.

La lluvia ácida se encuentra estrechamente ligada a los procesos en los cuales se consumen combustibles fósiles que liberan sustancias, como el dióxido de azufre, a la atmósfera y que sirven de materia prima para la formación de ácidos que regresaran a la superficie en forma de líquidos o aerosoles (Giraldo, 2004).

1.2. Descripción de los modelos utilizados.

1.2.1. El modelo meteorológico WRF

El modelo WRF un sistema numérico de mesoescala para la predicción del tiempo diseñado para aplicaciones tanto de investigación atmosférica como de pronóstico operacional. El modelo funciona para aplicaciones meteorológicas de una amplia cantidad de escalas que van desde cientos de metros hasta miles de kilómetros (Affum *et al.*, 2016) Los esfuerzos para la creación de este modelo se iniciaron a finales de los años 90's y se tuvo el trabajo conjunto del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR por sus siglas en inglés), la Administración Atmosférica y Oceánica Nacional, la entonces Agencia del Tiempo de la Fuerza Aérea (AFWA por sus siglas en inglés), la Universidad de Oklahoma y la Administración Federal de Aviación (FAA por sus siglas en inglés), todas estas son organizaciones de los Estados Unidos de América.

La creación de esta herramienta tuvo como uno de sus fines el consolidar un sistema que diera a los investigadores la facilidad de generar simulaciones con las condiciones atmosféricas que existen en el momento de realizar el estudio o producir escenarios idealizados con especificaciones muy puntuales. Generalmente la información que se usa en el modelo proviene de observaciones y análisis hechos con anterioridad. Además, el modelo tiene un amplio marco de parametrizaciones físicas que muestran diferentes aspectos tales como aspectos microfísicos, la radiación atmosférica, la capa límite planetaria y los procesos en el suelo. Estas parametrizaciones pueden ser desde muy simples hasta más complejas que necesitan ser mejoradas continuamente.

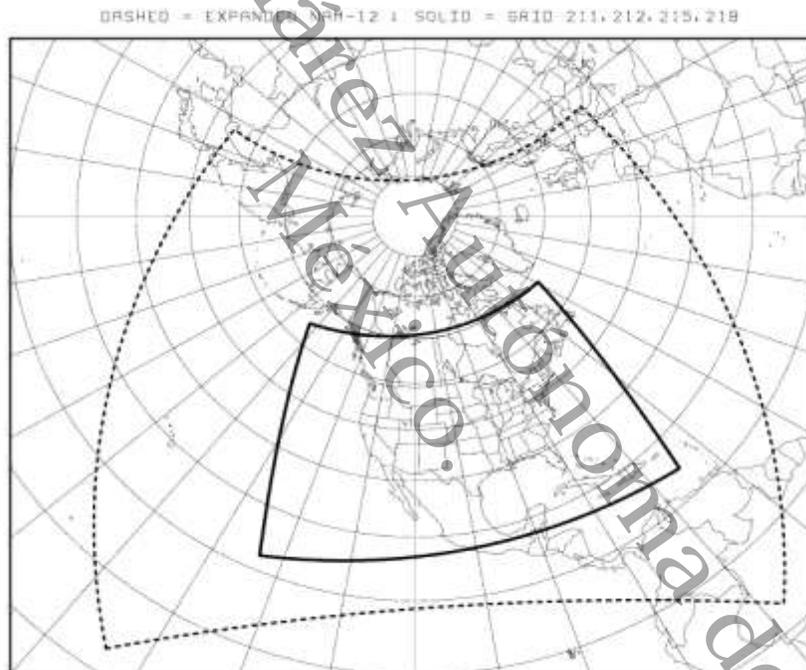


Figura 1. Dominio del modelo NAM para la predicción y obtención de información meteorológica.

Este modelo se mantiene vigente hasta la fecha y es usado por una comunidad alrededor del mundo de unos 39,000 usuarios en 160 países y es usado en diferentes niveles en los diversos centros de investigación de la atmósfera (NCAR, 2016).

Para los fines de este trabajo se obtuvieron datos ya procesados del modelo con fuente en el North American Mesoscale Forecast System, (NAM) un modelo implementado por los Centros Ambientales de Predicción Ambiental (NCEP por sus siglas en inglés). Estas ventanas de predicción se realizan sobre áreas específicas y en ellas se consideran todos los eventos meteorológicos más relevantes de estas zonas. Al obtener pronósticos para un área en periodos de tiempo largos, también han generado análisis de datos históricos, los cuales son altamente refinados para su uso. En la Figura 1 se muestra el dominio que el NAM abarca.

1.2.2. Modelo de dispersión atmosférica CALPUFF.

El modelo de dispersión atmosférica CALPUFF, es un modelo tipo Puff, Gaussiano – Lagrangiano de estado no estacionario capaz de trabajar con capas múltiples, diseñado para la modelación de la dispersión de partículas y gases usando variación de los factores meteorológicos en el tiempo y el espacio, basado en ecuaciones de similitud, turbulencia, emisiones, transformación, manejo de terreno complejo y remoción húmeda o seca.

Los modelos tipo puff representan a una pluma continua de contaminantes como una serie de paquetes o nubes discretizados de material. Cada puff se encuentra “congelado” a cierto intervalo de tiempo (llamados “paso de muestreo”), y es en este momento que se obtiene un dato de concentración para ese paquete. Una vez se ha tomado la muestra, al puff se le permite moverse, momento en el que evoluciona en tamaño, fuerza, etc, hasta que se alcanza el siguiente punto de muestreo. La concentración total en un receptor es la sumatoria de todos los puff cercanos en todos los puntos de muestreo en el tiempo total.

El modelo se integra por un total de tres módulos que se ocupan de diferentes procesos que son esenciales para el correcto funcionamiento del modelo como un todo: un procesador meteorológico **Calmet**, donde se manejan los archivos de entrada con información meteorológica para ser alimentada al **Calpuff** y un post •

procesador denominado **Calpost**, que toma los datos de concentración resultantes del Calpuff y los convierte en archivos manejables en programas topográficos como el Surfer (Scire et al, 2005)

Componente Calmet

Calmet es un modelo meteorológico que genera campos horarios de temperatura y viento en un mallado tridimensional definido por el usuario y que están asociadas a campos bidimensionales como la altura de mezcla, características de la superficie y propiedades de dispersión. Incluye un generador de campos de viento que se basa en un análisis objetivo y paramétrico que permite tratar las caídas o variaciones del flujo, los efectos cinemáticos y de bloqueo por el terreno. También incluye un procedimiento para minimización de divergencia y un modelo micro meteorológico para la capa límite sobre la componente de la interfase tierra y agua.

Componente Calpuff.

Además, supone que las emisiones dadas en un periodo de tiempo Δt introduce en la atmósfera cierta cantidad de contaminante contenida en el centro de la nube o puff, siendo transportada por viento que varía con el tiempo; de tal forma que, si a un tiempo t el centro del puff se localiza en otro determinado punto del espacio, entonces el aporte a la concentración en ese lugar está dado por las siguientes expresiones:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g \exp\left[-d_a^2/(2\sigma_x^2)\right] \exp\left[-d_c^2/(2\sigma_y^2)\right]$$

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-(H_e + 2nh)^2/(2\sigma_z^2)\right]$$

Donde C es la concentración a nivel del suelo, g/m³; Q es la masa del contaminante del puff, g; σ_x es la desviación estándar en metros de la distribución gaussiana en dirección del viento; σ_y es la desviación estándar en metros de la distribución

gaussiana perpendicular a la dirección del viento; σ_z corresponde a la desviación estándar en metros de la distribución gaussiana en la dirección vertical; d_a es distancia en metros desde el centro del puff al receptor, en dirección del viento; d_c es la distancia en metros desde el centro del puff al receptor, perpendicular a la dirección del viento; g es un término de la vertical de la ecuación gaussiana; H indica la altura efectiva en metros sobre el suelo del centro del puff y finalmente h indica la altura de la capa de mezcla en metros.

Componente Calpost

Una vez se ha completado la corrida en el componente Calpuff, el post-procesador Calpost toma el archivo conc.dat, para crear archivos que pueden visualizarse en programas de mapeo como es el caso del Surfer, el usuario establece el promedio del periodo a graficar, que puede ser de 1 hora, 3 horas, 24 horas o el total de la corrida, también establece las tablas y las unidades de concentración en que quiere los resultados. En el archivo *.list* se adjuntan los valores máximos, los valores promedio ocurridos durante la corrida, en los periodos establecidos por el usuario.

CAPITULO 2. METODOLOGÍA.

Para el cumplimiento de los objetivos que se plantearon en este trabajo se realizaron una serie de actividades que se muestran en secuencia en la Figura 2.

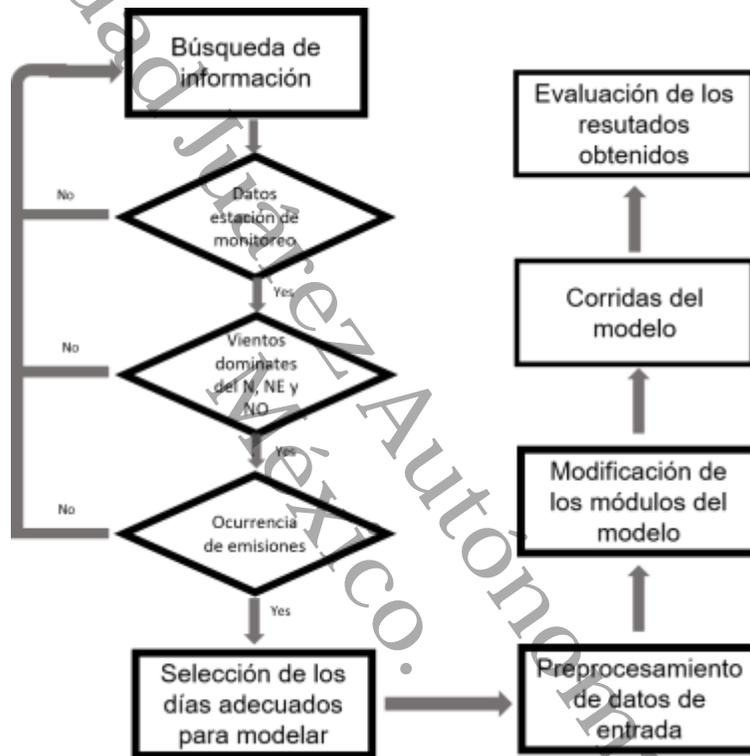


Figura 2. Diagrama de flujo general de la metodología usada en este estudio.

2.1. Área de estudio

La región de estudio comprende el territorio del estado mexicano de Tabasco, México, así como su zona costera adyacente en el Golfo de México. La mayor parte del estado de Tabasco se encuentra situado es una planicie de origen aluvial, que se extiende, sin obstáculo alguno, desde de la zona costera hasta la Sierra del Norte de Chiapas, lo que permite que los vientos provenientes desde el Golfo de México se desplacen sin interrupción por distancias considerables.

En las aguas del Golfo de México existen numerosas plataformas petroleras frente a las costas de los estados mexicanos de Tabasco y Campeche, donde se extraen cantidades importantes de materia prima para la generación de derivados de este producto. El potencial de esta zona para la producción de gas y petróleo conlleva un importante foco para la emisión de contaminantes que, bajo ciertas condiciones meteorológicas, pueden impactar a las poblaciones en los estados cercanos.

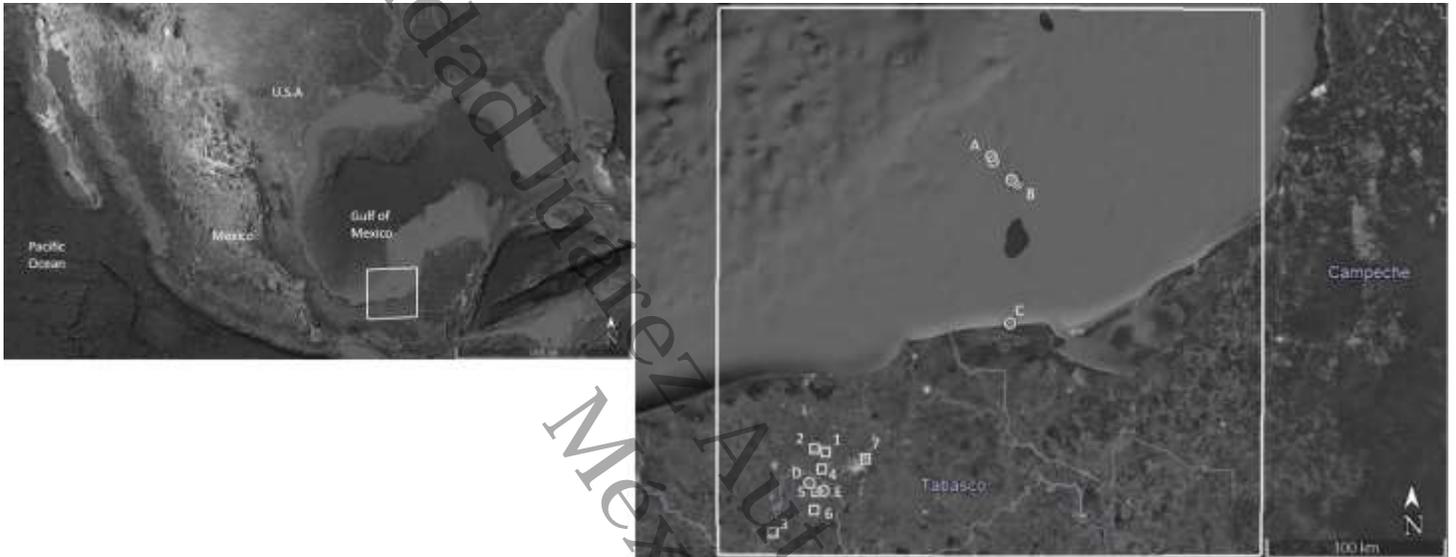


Figura 3. El mapa del lado derecho muestra la posición del área de estudio dentro del territorio mexicano. El mapa de la izquierda muestra el área de estudio de acuerdo con las fronteras marcadas para este trabajo. Se encuentran con símbolos de círculos las fuentes de emisión y con cuadrados los receptores.

La Figura 3 muestra la extensión del área considerada para el estudio, la localización de los sitios de interés y de las fuentes de emisiones de SO_2 . El vértice inferior izquierdo se encuentra en las coordenadas 429000 N, 1940000 O en la UTM 15 Q y crean un cuadro que se extiende 300 kilómetros hacia el Norte y al Este. Los símbolos de cruz de color rojo marcan los sitios de las fuentes de emisión, siendo estos las instalaciones de extracción en el Golfo de México, Cantarell y Ku-Maloob-Zaap (A y B) en los cuales se tiene un total de 18 quemadores, cuyas coordenadas exactas se muestran en la Tabla 1; las instalaciones de Atasta en Campeche (C) y los complejos procesadores Cactus (D) y Nuevo Pemex (E). Los símbolos en forma de círculo muestran las estaciones de monitoreo La Ceiba (1), UJAT (2), ITVH (4), La Isla (4), Reforma (5), Artesa (6) y San Manuel (7)

Tabla1. Ubicación y aportación de emisión (Mendoza y Graniel, 2006) de SO₂ para las fuentes ubicadas en los complejos de Cantarell y Ku-Maloob-Zap.

Fuente puntual	Coordenadas UTM		% de Emisión
	Este	Norte	
Pak-c1	591429	2144087	4.04
Pak-c2	591429	2144087	15.22
Pak-c3	591429	2144087	4.69
Pak-c4	591429	2144087	5.10
Pak-j1	589986	2145442	2.11
Pak-j2	589986	2145442	4.55
Pak-j3	589986	2145442	6.61
Pak-j4	589986	2145442	1.93
Pnh-n1	590631	2145812	6.99
Pnh-a1	592729	2143090	15.19
Pnh-a2	592728	2143090	9.91
Pk-a1	579869	2155500	19.07
Pk-h1	578923	2158075	3.45
Pcb-101	589517	2067240	0.22
Pcb-102 ^a	589517	2067240	0.56
Pcb-103b	589517	2067240	0.36
TCac	479515	1979236	50
TNvoP	487299	1975158	50

2.2. Búsqueda de información.

2.2.1. Información Meteorológica.

Mucha de la información necesaria para la realización de este estudio se obtuvo de fuentes especializadas en diversas áreas. Para realizar la simulación de la concentración del SO₂ fue necesaria información específica, la cual se encontraba disponible en diversas fuentes especializadas. La información meteorológica se obtuvo de los datos de reanálisis del Modelo Norteamericano a Mesoescala (NAM) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de Estados Unidos, obtenida de la base de datos NOMAD, donde se usó la malla #218, que cuenta con tamaño de 614 x 428 puntos y con un tamaño de malla de 12.19 kilómetros y con 45 niveles en la vertical. La información contenida dentro de los archivos del NAM

nos permite obtener información meteorológica tri-horaria de la región de estudio, la cual se genera en base de una serie de muestras tomadas de una gran cantidad de estaciones meteorológicas recopiladas y tratadas para su fácil interpretación. El uso de esta información nos permitiría generar la información meteorológica de entrada necesaria para la aplicación del modelo de simulación.

2.2.2. Información de emisión y concentración.

La información de las emisiones provenientes de fuentes importantes de SO_2 esta se obtuvo del estudio que Fioletov *et al.*, (2013) realizo, donde recopiló un catálogo global de las principales fuentes emisoras de SO_2 en diferentes países en donde las reporta en valores anuales para un periodo que va del año 2005 al 2014. Para este trabajo, los autores del estudio usaron la información del instrumento OMI del satélite Aura y con los cuales corroboraron que México, en especial la zona de actividad petrolera en el Golfo, es una de las que presenta mayor aportación de dióxido de azufre, así también se tiene información de algunos de los complejos de procesamiento de Pemex en tierra, como son las instalaciones ubicadas cercanas al municipio de Reforma, en Chiapas. Con esta información se podrían seleccionar los puntos de interés para el presente estudio.

Otra fuente de información de las emisiones provino de la empresa Pemex, mediante sus llamados Reportes de Responsabilidad Social en los cuales se presentan los valores de toneladas anuales de emisiones de diversas instalaciones de la empresa, incluidas las mismas que se tenían de los datos satelitales. Cabe mencionar que la metodología usada para la realización de los cálculos para la obtención de estos datos no se encuentra presente en los reportes, por lo cual no es posible discernir si estos se obtuvieron de cálculos con el uso de factores de emisión o mediante los instrumentos de medición que se encuentren instalados en estos sitios.

En la Figura 3 se pueden encontrar marcado los sitios mencionados anteriormente, usando como referencia las coordenadas geográficas usadas por Fioletov *et al* (2013) para las fuentes emisoras. En estos puntos se extiende un área de aproximadamente 30 kilómetros a su alrededor que son el área de influencia en la

cual se realizaban los cálculos de emisión por parte del satélite, con lo cual podremos obtener datos anuales para las mismas fuentes en diversos años.

Finalmente, se obtuvieron las mediciones realizadas por diversas estaciones de monitoreo ubicadas en diferentes puntos en el área de estudio las cuales servirán como base para las comparaciones que serán realizadas. Dentro de las instalaciones que fueron usadas para la búsqueda de información podremos nombrar a las estaciones de La Ceiba, Ujat, La Isla, Artesa, Reforma y San Manuel, las cuales se encuentran próximas a los Complejos Procesadores de Gas (CPGs) de Cactus y Nuevo Pemex; otra estación considerada como prioritaria es la ubicada en el Instituto Tecnológico de Villahermosa (ITVH). Estos puntos se encuentran marcados de igual manera en la Figura 3 y en se ubican en las coordenadas provistas en la Tabla 2.

Tabla 2. Ubicación de las estaciones de monitoreo encontrados dentro del área de estudio, de acuerdo con la Figura 3.

Estación de monitoreo de calidad del aire	Coordenadas UTM	
	Este	Norte
La Ceiba	488300	1996500
UJAT	482200	1998250
ITVH	510203	1992743
La Isla	486200	1987150
Reforma	483397	1974552
Artesa	481950	1964600
Giraldas	459219	1952109

2.3. Selección del modelo.

La información básica del funcionamiento del modelo CALPUFF se mencionó en la sección 1.2.2, sin embargo, se debe hacer notar que la manera en la que se usó el modelo fue mediante el uso de su versión Calpuff 7 y además mediante el manejo de la interfaz Calpuffview en su versión 8.5 (Lakes Environmental, 2018) la cual representa un serie de ventajas operacionales que fueron de gran ayuda en la realización del presente trabajo al permitirnos un manejo excepcional de los tres

componentes primordiales del modelo. Asimismo, presento una gran ventaja al momento de usar diversas formas de datos de entrada para cada una de las secciones en los cuales estos fueran necesarios.

2.4. Procesamiento de la información

Una vez obtenida la información que se requiere para realizar las corridas del modelo seleccionado, se procedió a filtrarla con el fin de que esta presentara las características idóneas en las que nuestra simulación fuera lo más fiel posible a condiciones reales. Con tal motivo, se realizaron tres filtros a los grupos de datos obtenidos: información meteorológica de la zona, presentando especial atención a lo relacionado con la velocidad y dirección del viento buscando que estas favorecieran que la pluma modelada de las concentraciones llegue a los posibles receptores en tierra; a las mediciones registradas por las estaciones de calidad del aire y finalmente, a poder probar que existe presencia de emisión de SO₂ en la zona de estudio mediante el uso de herramientas satelitales. Estos puntos se muestran en la Figura 2, donde se remarca su importancia para que la investigación pueda tener la mayor cantidad de datos posibles.

Una vez identificado el periodo en el que se modelaría se procedió a realizar un pre-procesamiento de los datos meteorológicos, con el cual se busca adecuar la base de datos, originalmente en formato *.grb, para que estos puedan ser usados por el módulo Calmet del modelo CALPUFF. Para este fin se usará el programa Caleta, que nos permitirá convertir los archivos originales del NAM en archivos de tipo .m3d.

2.5. Manejo de CalpuffView.

La interfaz por usarse para el procedimiento de modelación corresponde a una versión que provee una elevada facilidad para el usuario de modificar las condiciones en las cuales se quieren obtener un trazado de las concentraciones •

generadas por una fuente reconocida. Se necesitará trabajar de manera individual con cuatro aspectos fundamentales del modelo para obtener los resultados necesarios que nos permitirán realizar un post procesamiento más completo de los datos que se obtengan de las corridas.

2.5.1. Características generales de las corridas.

Dentro de estas se deben mencionar que se usó una malla de 300 kilómetros que se generó gracias a la interfaz geográfica del modelo. Este espacio conto con una división en celdas de 1 kilómetro de área y cuyo centro se encontraría en las coordenadas 429,000 N, 1,940,000 E en la UTM 15Q, del datum WGS-84.

En esta malla se tomaría como base horaria de la simulación un intervalo de tiempo de 3600 segundos por cada día y periodos de 4 días para simular de manera más exactas las condiciones de los días seleccionados como adecuados, teniendo los valores de dos días anteriores y uno posterior al día de interés todo con el fin de examinar de manera detallada el comportamiento de las plumas.

También se introdujeron los datos necesarios para que el software geofísico del modelo tuviese el sustento referente al uso de suelo y topografía, donde se usaron como datos de entrada los archivos `nausgs2_0l.img` en formato GLCC y el archivo `W100N40.DEM` en formato STRM30, respectivamente. Ambos archivos cuentan con una resolución aproximada de 1 kilómetro y son generados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y fueron obtenidos de la base de datos de www.webgis.com.

Estas condiciones permanecieron constantes para cada simulación que se realizó, tanto de datos satelitales como de los inventarios. Se generarían duplicados de todos los días que resultaron seleccionados con el fin de obtener los datos que serían comparados contra la información correspondiente a una de las estaciones de monitoreo, teniendo en cuenta que esta tuviera la cantidad mínima de información necesaria para ser elegida.

2.5.2. Modificación al Calmet

En esta sección del modelado se decidió mantener la mayoría de las condiciones establecidas y recomendadas por la EPA, las cuales se encuentran ya programadas dentro de la interfaz. Los únicos valores que fueron alterados fueron las opciones de campo de viento, donde se usó un valor de intervalo de tiempo de 10800 segundos y de TERRAD donde se cambió el valor a 10 kilómetros.

2.5.3. Modificación al Calpuff

Es importante mencionar que el modelo admite solo el uso de chimeneas como el tipo de fuente puntual a usar, por lo que se consideró realizar la metodología de chimenea equivalente, sin embargo de acuerdo a lo encontrado por Berneo (2010) se observa que al realizar esta conversión con los quemadores presentes en algunas de las instalaciones (especialmente en las ubicadas en las plataformas) esto genera una exageración en cuanto a las medidas de altura y diámetro de las chimeneas resultantes, lo que se traduciría en errores en el cálculo las concentraciones y las plumas de la misma. Por tal motivo, se tomó la decisión de usar las características descritas de los quemadores, en los casos en que fuese necesario, como chimeneas dentro del apartado de las fuentes en el Calpuff.

Los porcentajes de emisión reportados en la Tabla 1 se obtuvieron del estudio que Mendoza y Graniel (2006) realizaron para estas fuentes. A partir de cálculos estacionales permiten conocer el aporte aproximado que tiene cada una de estas estructuras y que nos será de utilidad dentro del componente Calpuff al describir las características de la fuente.

Bajo estas consideraciones se realizaron las corridas para el mismo periodo que en Calmet. En la simulación no se consideraron las transformaciones químicas del SO₂ y se dejaron la mayor parte de las opciones predeterminadas para este componente. Para realizar los cálculos correspondientes, se agregaron las fuentes fijas que se muestran en la Tabla 1 y los receptores que estarían involucrados en la simulación. Se realizaron dos corridas, una en la que se usaron los datos estimados por OMI y otra donde se usaron los valores de los inventarios de Pemex, los cuales se convirtieron en unidades de microgramos por metro cubico.

En cuanto a los receptores, estos se ubicaron de acuerdo con la disponibilidad de información de concentración de SO₂ de las estaciones de monitoreo en los puntos donde estas estaciones están ubicadas, por lo que permanecieron constantes en las diferentes corridas realizadas.

2.5.4. Modificación al Calpost

Se procesaron los datos de salida del Calpuff, donde se realizaron los cálculos de concentración. Se obtuvieron los resultados horarios de concentración, en unidades microgramo por metro cúbico, correspondientes a los receptores ubicados en los sitios de las estaciones de monitoreo para los días seleccionados.

2.6. Análisis estadístico.

Para realizar la revisión del ajuste que los datos obtenidos de las dos fuentes de emisión tendrían en relación con los datos de las estaciones de monitoreo, se consideró usar el método propuesto por Willmott (2013) con el cual se pueden realizar evaluaciones más acertadas en relación con valores predichos y observados de un fenómeno, especialmente en aquellos asociados con mediciones con sensores remotos.

Poder analizar la evaluar la manera en que el modelo imitara las condiciones reales del sistema estudiado es de suma importancia al tomar decisiones y presentar de manera confiable los resultados obtenidos, para este fin se usan diferentes índices de error, así como el índice de concordancia, que se describe como una medida de como la variable observada es predicha por las simulaciones en un entorno de condiciones similares, donde este índice toma valores que van de 0 a 1.

Este nuevo índice surge por la necesidad de evitar errores en los que se incurre al usar otras medidas de ajuste, como R y R^2 . La Ecuación 1 presenta la forma típica en que el valor d es calculado, siendo P el valor obtenido en la simulación, O el valor observado o medido, $P' = P - \bar{O}$ y $O' = O - \bar{O}$.

$$d = 1 \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N [(|P'_i| + |O'_i|)^2]} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Otros índices como el error medio (Ecuación 2), el error cuadrático (Ecuación 3) y el error medio absoluto (Ecuación 4) son valores que complementan la información proporcionada por el índice d , y fueron usados para describir el comportamiento de los datos predichos respecto a su similitud con la información de las estaciones de monitoreo.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad \text{Ecuación 2.}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=0}^n |P_i - O_i|}{N} \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (P_i - O_i)^2}{(N - 1)}} \quad \text{Ecuación 4.}$$

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En esta sección se presentan los datos obtenidos tras la simulación, con los cuales fue posible establecer las áreas impactadas por las plumas de las fuentes emisoras consideradas, así como los valores máximos en el periodo de tiempo que se estableció para el estudio.

3.1. Datos preliminares.

Al realizar un primer acercamiento a la información proveniente del monitoreo realizado por el instrumento OMI, así como de la información que los Reportes de Responsabilidad de la institución Pemex presenta en cuanto a sus emisiones de dióxido de azufre en diferentes instalaciones se pudo notar el comportamiento presentado en la Figura 4. Nos muestra el comportamiento anual, del 2006 al 2013, de SO₂ para fuentes puntuales terrestres que corresponden a los Complejos Procesadores de Gas (CPGs) de Cactus y Nuevo Pemex, ambos ubicados en el territorio del estado de Chiapas, muy próximos al límite con Tabasco (Figura 4a); y a las instalaciones en el Golfo de México de Cantarell y Ku-Maloob-Zaap (Figura 4b).

Es posible notar una diferencia significativa en cuanto al comportamiento de la emisión en los CPGs, donde el margen entre los dos tipos de fuente de información para las emisiones producidas en estos se fluctúa con el tiempo de manera errática. Una posible explicación al comportamiento observado para este conjunto de datos puede ser que la puesta en marcha de estaciones de energía eléctrica dentro del complejo de Nuevo Pemex, la cual comenzó operaciones en el año 2009 y que se ve reflejado en el alza del valor de las emisiones graficadas en el Figura 4a.

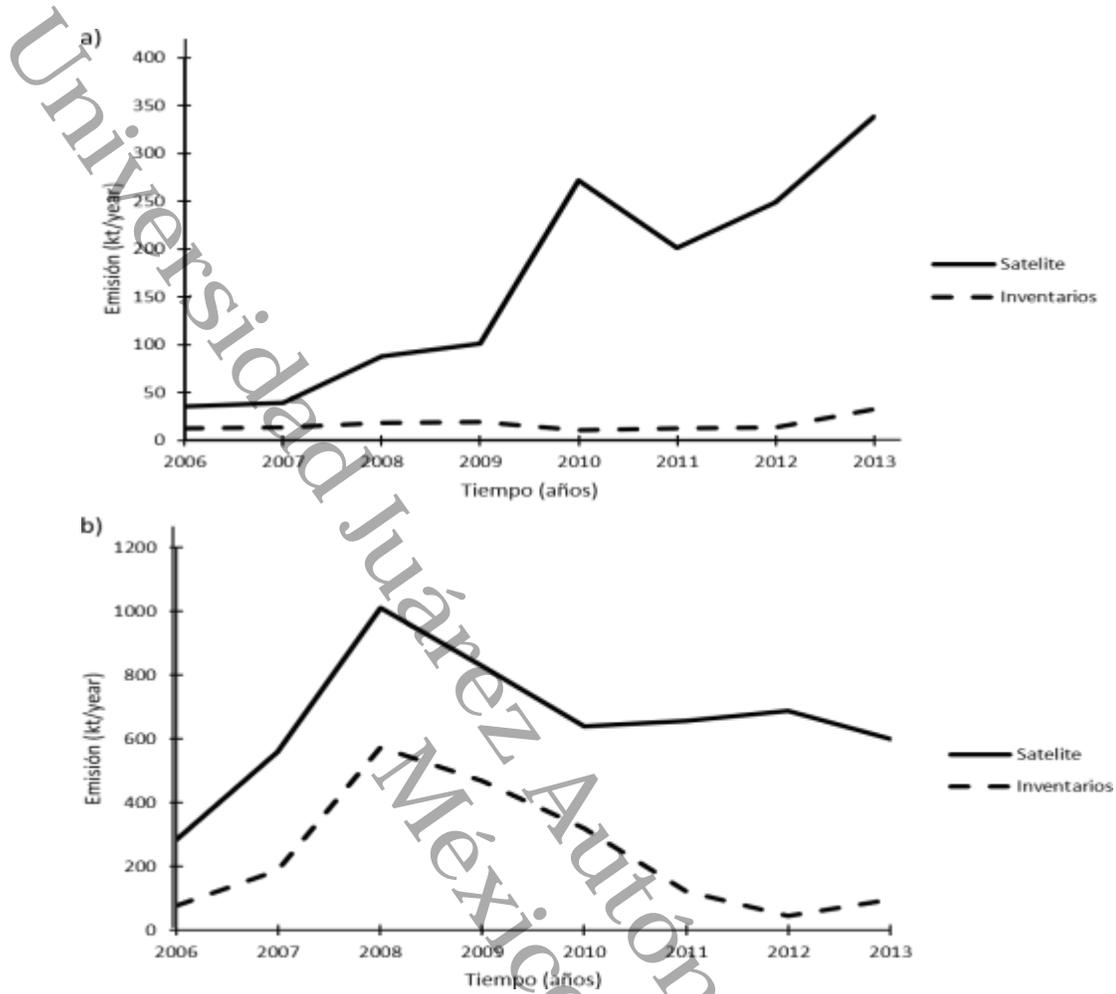


Figura 4. Evolución de las emisiones anuales estimadas por OMI/Aura y los inventarios de Pemex para a) los CPGs de Cactus y Nuevo Pemex y b) para las instalaciones de plataformas en el Golfo de México

Por otro lado, en el caso de las instalaciones marinas, la tendencia entre los valores de emisión se mantiene relativamente constante entre las medidas tanto por OMI como por los inventarios de emisión de Pemex para estas instalaciones, siendo uno de los momentos más importantes la importante disminución que en el año 2008 existe, la cual puede ser atribuida al momento en el cual se comenzó con la recirculación de una parte del SO_2 para ser inyectado a los pozos con el fin de ayudar a una mejor extracción de material a una mayor profundidad en los depósitos del mismo.

La Figura 4b nos muestra que el comportamiento similar de los datos se detiene a mediados del año 2010, punto en el cual las emisiones de satélite muestran un aumento en las emisiones que se comienzan a generar para disminuir de nuevo en el año 2012; mientras que los datos de Pemex muestran un comportamiento opuesto, con una disminución continua en la emisión de SO_2 que cambia para el año 2012, en el cual se presenta un ligero aumento similar al ocurrido en el 2010 según los datos satelitales. Este singular comportamiento puede estar influenciado debido al tipo de material crudo que se comienza a extraer en el año 2012, el cual puede contener una mayor cantidad de compuestos de azufre lo cual estaría generando un problema relacionado con la forma en que se calcularon los valores por parte de Pemex, si es que estos no consideraban los cambios necesarios en sus ecuaciones de balance masa y en los factores de emisión del nuevo tipo de material que se estaba analizando lo cual, de acuerdo a lo sugerido por Fioletov *et al.*, (2013), puede ser lo que genera el margen de error que se presenta en los conjuntos de datos.

Fioletov *et al.*, (2016) mediante la elaboración de un catálogo global de emisiones de SO_2 , hace hincapié en la forma en la que se reportan en el país las emisiones, pues nota una diferencia importante entre lo captado por el satélite y los datos recabados en sitios de monitoreo, siendo su teoría que esto se debe a que no se incluyen de manera precisa la información de todas las fuentes de emisión aunado esto a los puntos presentados anteriormente. También mostraron, además, que México es de los pocos países en el que los valores obtenidos del OMI presentan una mayor desviación a los datos de instituciones propias de estos.

3.2. Selección del periodo de simulación.

Tras realizar un exhaustivo recopilado de información, así como la valoración de esta con la metodología establecida para la selección del periodo de acuerdo a la Figura 2, se encontraron una cantidad de días que poseían las características apropiadas, especialmente en cuanto a la cantidad de datos provenientes de las

fuentes de emisión y de las estaciones de monitoreo a nivel de suelo, las cuales demostraron ser de las limitantes más importantes debido a la calidad de la información que muchas de estas contienen.

Tras revisar la información de las estaciones marcadas en la Figura 3, se determinó en usar los datos de emisión de las instalaciones fuera de costa, es decir, de las plataformas ubicadas en la zona marina frente a las costas de Campeche y Tabasco. Las fuentes corresponden a los 18 quemadores considerados en la Tabla 1, para los que se tomaron algunas características generales como son una altura de 53.5 metros, un diámetro de 3 metros, una velocidad de salida de los gases de 20 m/s con una temperatura de salida de 273 °K. Además, que se usaría como punto receptor principal la estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en las instalaciones del ITVH en la ciudad de Villahermosa.

Con la finalidad de asegurar que los días seleccionados contaran con las condiciones meteorológicas adecuadas, se usó la información proveniente del Air Resources Laboratory de la NOAA, con la cual fue posible detectar los días que, dentro del periodo establecido de acuerdo con los datos de monitoreo, contaban con vientos dominantes provenientes del Norte-Noreste, como se muestra en la Figura 5.

Con esta sección de la verificación realizada, se comenzaron a discernir claramente los días que tenían buen potencial para ser usados, siendo estos:

- 1 de Febrero de 2013
- 24 de Febrero de 2013
- 25 de Febrero de 2013

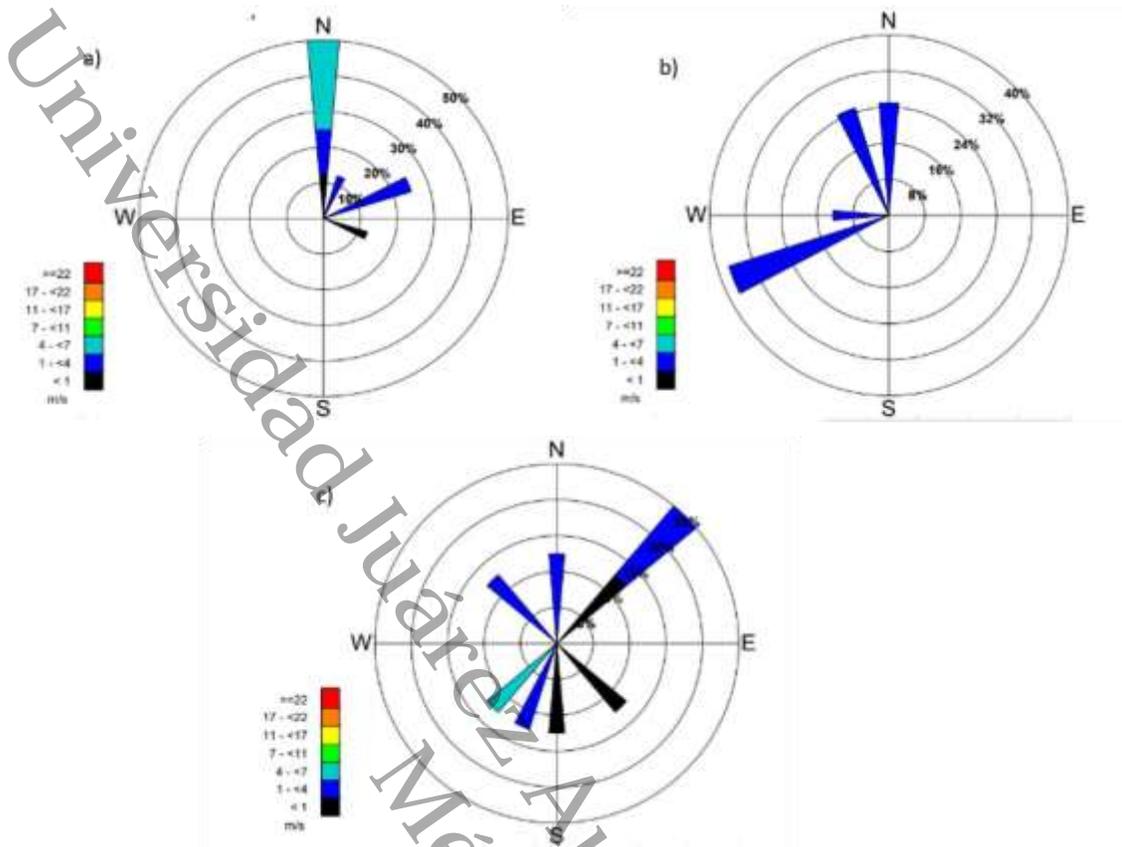


Figura 5. Rosas de viento para los días a) 1 de Febrero, b) 24 de Febrero y c) 25 de Febrero del año 2013.

Para el día 1 de Febrero la dirección dominante provenía del Norte, con velocidades que oscilaban entre 4 y 7 m/s, mientras que para los días 24 y 25 de Febrero se notan velocidades bajas de viento provenientes de esa misma dirección, además que existen variaciones más marcadas de las direcciones dominantes a largo de esos días.

Con esta selección, se procedió a realizar la revisión de la presencia de emisiones en las instalaciones de las plataformas, conforme a los que las mediciones de densidad de columna vertical (VCD por sus siglas en ingles) de SO₂ provenientes del instrumento OMI mostraban y cuyos archivos de imagen se obtuvieron del Goddard Space Flight Center de la NASA.

La Figura 6 muestra que para los días previamente establecidos es posible notar una presencia importante de dióxido de azufre en la zona cercana a las costas del sureste mexicano, siendo particularmente notorio en el día 1 de Febrero una alta concentración de este gas, mientras que para los días 24 y 25 de Febrero las lecturas mostraron una VCD menor pero notoria en el área cercana a las instalaciones.

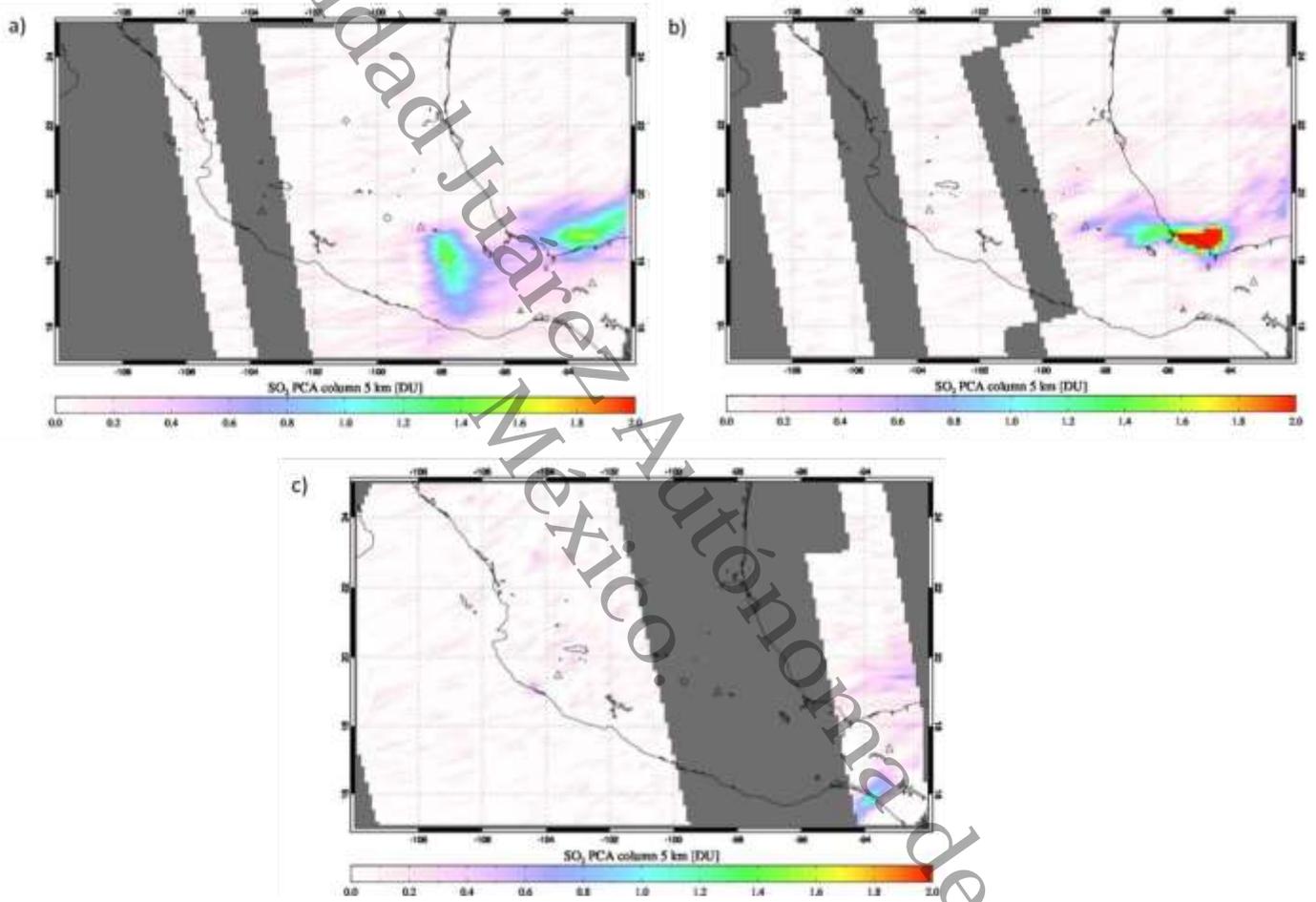


Figura 6. Densidad de columna vertical de SO₂, en unidades Dobson, estimadas por el satélite Aura durante los días: a) 1 de Febrero, b) 24 de Febrero y c) 25 de Febrero del año 2003. Fuente: Monitoreo global de dióxido de azufre de la NASA Goddard Space Flight Center

3.3. Simulaciones obtenidas de CalpuffView

Las simulaciones realizadas en la interfaz CalpuffView nos dejaron observar el modo en el cual la pluma del contaminante estudiado se comportaría a lo largo del área y en los tiempos elegidos. Ejemplo de esto lo podemos observar en las Figuras 7a y 7b, donde podemos observar como en las condiciones dadas al modelo este generó las trayectorias y concentraciones a lo largo de la malla. En el Anexo A se pueden consultar el resto de las imágenes horarias para los tres días analizados

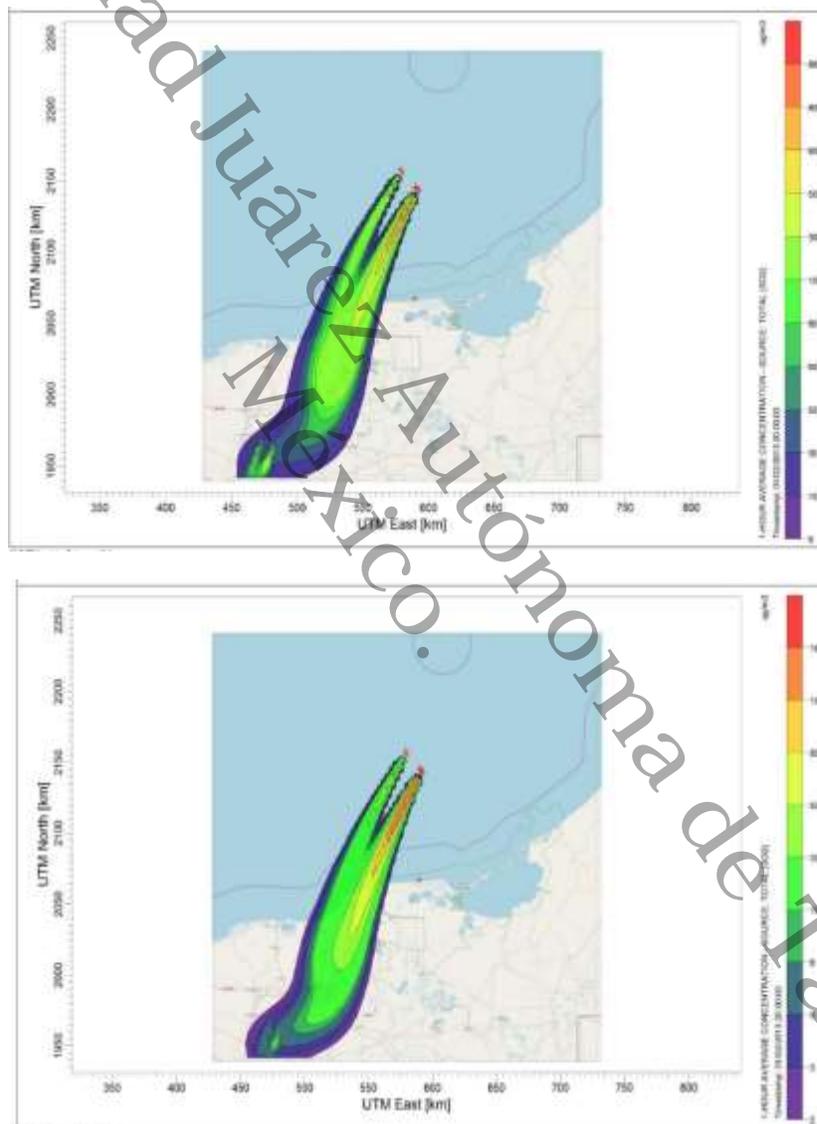


Figura 7. Plumas de contaminantes generadas por el modelo Calpuff, en microgramos por metro cubico, para el día 1 de Febrero de 2013 a las 8 horas. La imagen superior corresponde a la pluma obtenida del uso de los datos del satélite Aura mientras que la inferior es de los datos de los inventarios de Pemex.

En las Figuras 8a, 8b y 8c se muestran los valores horarios de concentración para los días 1 de Febrero, 24 de Febrero y 25 de Febrero respectivamente, para los datos de los inventarios de emisión de Pemex y los datos del instrumento Aura/OMI. Es posible observar cómo se comportan las concentraciones calculadas de SO₂ mediante el modelo matemático, comparándolas con el valor que fue registrado por la estación del ITVH, siendo notorio como existen picos de concentración durante las horas nocturnas.

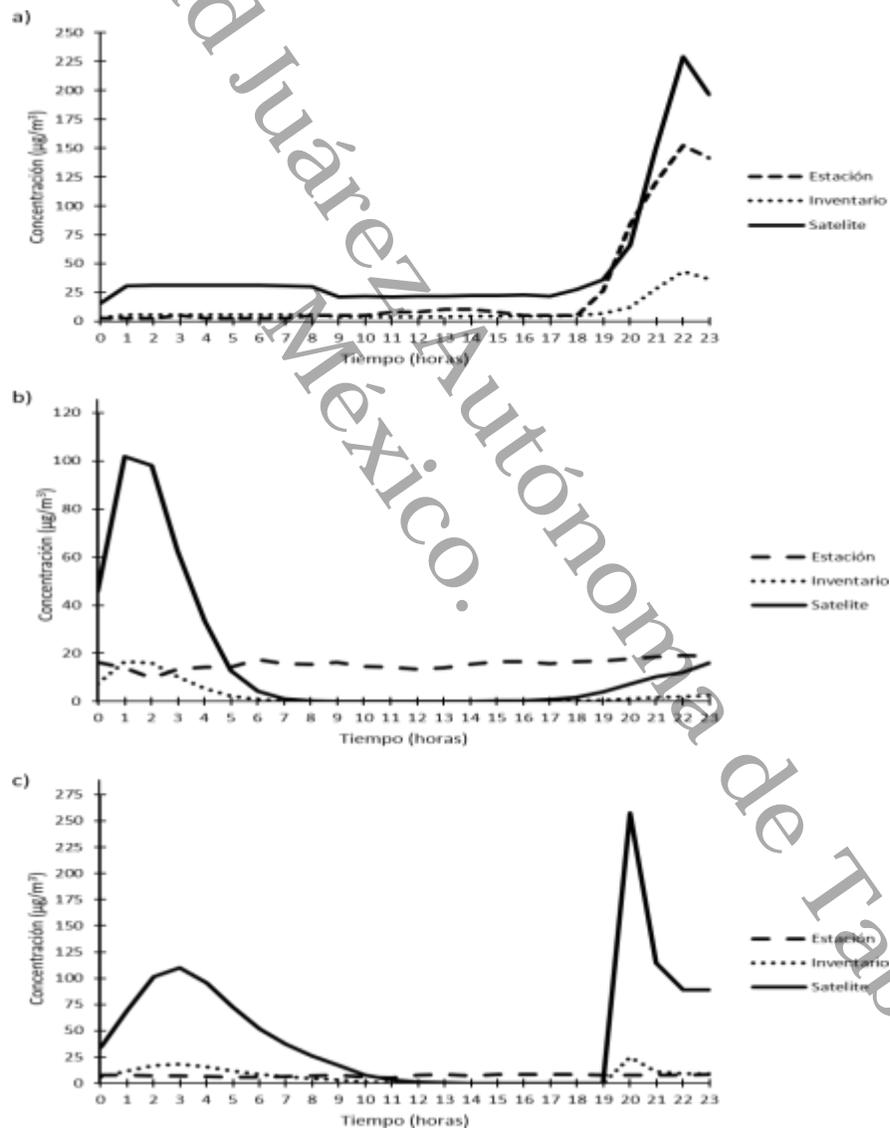


Figura 8. Comportamiento horario de la concentración de SO₂ medido en la ubicación de la estación de monitoreo del ITVH para el día a) 1 de Febrero, b) 24 de Febrero y c) 25 de Febrero de 2013. Se comparan las mediciones de la estación (línea sesgada), los inventarios (línea punteada y el satélite (línea continua).

Este comportamiento puede estar influenciado por la elevación de la capa límite de mezcla, la cual se encuentra a menor altura durante estas horas y dada la época del año en la cual se encuentran los días elegidos nos mostraría una mayor lectura de dióxido de azufre durante estos momentos. De acuerdo con la Figura 8a, correspondiente al día 1 de Febrero, este comportamiento se demuestra para los tres tipos de datos graficados, donde se observan alzas importantes en las concentraciones entre la 01 y las 08 horas, para luego encontrar este mismo patrón cerca de las 18 horas del mismo día. Para los otros dos días estudiados se puede notar que el comportamiento no se mantiene de la misma manera, siendo similar especialmente en las líneas correspondientes a los datos simulados, los que nos indicaría que la estación podría no haber capturado con la misma eficacia los valores de SO₂, pudiendo ser esto debido a lo mencionado en la sección 2.2 de este documento, donde se señala que los días 24 y 25 de Febrero hubo variaciones marcadas en la dirección del viento, al no provenir el mayor porcentaje de estos de la dirección Norte, así mismo, nos encontramos con velocidades ligeramente menores para estos días con lo que es posible suponer el cambio en el comportamiento diurno.

En la Tabla 3 se nos muestran los valores máximos alcanzados por las concentraciones de SO₂ durante los tres días simulados. Se remarca un amplio margen de diferencia entre los valores los grupos de datos, siendo especialmente notoria la diferencia entre los valores estimados mediante el uso de los recursos del OMI comparados con lo que muestran las estaciones de monitoreo.

Tabla 3. Valores máximos de concentración observados para los tres días estudiados. El valor limite establecido por la NOM-022-SSA1-2010 para un periodo de 24 horas es de 524 ug/m³.

Fecha	C (ug/m ³) Satélite	C (ug/m ³) Pemex	C (ug/m ³) Estación del ITVH
1 de Febrero	229.2	42.84	151.96
24 de Febrero	101.68	16.65	13.89
25 de Febrero	257.47	24.99	19.65

La excepción a este comportamiento se observa en los valores obtenidos para el día 1 de Febrero, donde vemos como el margen entre los datos satelitales y los de la estación es mucho menor, esto debido posiblemente a que en este periodo se dieron condiciones en las cuales el contaminante llegó de manera más sencilla hasta el receptor, pudiéndose atribuir a la dirección dominante del viento como a las velocidades que prevalecieron en este día dicho efecto. Caso contrario para los días en que el viento no parecía favorecer completamente el transporte del SO₂ vemos como los márgenes entre el dato del satélite y de la estación es bastante mayor, no así entre la estación y los datos de los inventarios de Pemex, cuyos valores se asemejan en los días 24 y 25. Un dato importante a resaltar es el que los valores máximos alcanzados por los tres días del estudio no sobrepasan el umbral límite que establece la NOM-022-SSA1-2010 para una exposición a dióxido de azufre en un periodo de 24 horas el cual tiene como valor de concentración 524 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto, sin embargo, no quiere decir que la población de los centros urbanos que son alcanzados por la pluma no pueda verse afectada a largo plazo.

Otro aspecto importante y que ha sido analizado anteriormente por trabajos como los llevados a cabo por Mendoza y Graniel (2007), Bermeo (2010) y Villaseñor *et al.*, (2003) y que surge del análisis de los valores máximos registrados es el hecho de notar que estos no sobrepasan los límites establecidos por la NOM-022-SSA1-2010 (SSA,2010), lo cual nos indica que no existe, por el momento un riesgo para las poblaciones que se encuentran dentro del área de influencia de la pluma de contaminante.

3.4. Análisis estadístico.

Al aplicar la metodología de Wilmott (1981) obtuvimos los datos presentados en la Tabla 4, con lo cual se puede realizar el análisis estadístico de los datos observados de SO₂ calculados mediante la información del instrumento OMI y los datos de Pemex contrastando con aquellos de la estación del ITVH.

Se observan importantes diferencias entre los valores obtenidos, siendo un referente el comportamiento del índice d para el día 1 de Febrero en el cual este valor toma valores que muestran una concordancia muy buena entre los datos del satélite y los de las estaciones de monitoreo, este nivel de acercamiento se ve reflejado de igual manera en un nivel alto de r^2 . La manera en que esto puede ser explicado es debido a las condiciones meteorológicas óptimas que se presentaron en este día.

Tabla 4. Evaluación de las concentraciones medidas de SO₂ contra las concentraciones estimadas mediante el uso de datos del OMI/Aura y los inventarios de Pemex.

Tipo de emisión	Fecha	\bar{O}	P	N	MAE	RMSE	D	MBE	r^2
Satélite OMI/AURA	01-feb-13	25.982	48.456	24	23.992	28.112	0.927	22.475	0.934
	24-feb-13	15.589	17.170	24	21.240	30.575	0.022	1.581	0.279
	25-feb-13	18.744	48.909	24	45.405	66.892	0.032	30.165	0.001
	General	20.105	38.178	72	30.212	45.459	0.642	18.074	0.377
Inventarios de Pemex	01-feb-13	25.982	9.058	24	18.605	39.329	0.562	-16.924	0.934
	24-feb-13	15.589	2.811	24	13.538	14.185	0.617	-12.778	0.280
	25-feb-13	18.744	6.483	24	12.717	14.526	0.193	-12.261	0.033
	General	20.105	6.117	72	14.954	25.554	0.513	-13.988	0.547

Por otro lado, en el mismo día, pero realizando las comparaciones en base a los datos de los inventarios, se puede observar un valor de R^2 bastante bueno, sin embargo, se nota una concordancia menor al estimar el valor d , lo cual nos mostraría que para este día los datos satelitales están siguiendo de mejor manera el comportamiento de las concentraciones medido por la estación de monitoreo.

Para los días 24 y 25 de Febrero los valores del índice d presentan escalas muy pequeñas tanto en la comparación satélite/estación como en la de inventarios/estación, pero se mantienen más altos para el segundo caso, esto nos estaría diciendo que los datos de los inventarios se mantienen como más próximos a lo real. Al comparar los valores promedio del valor d para los conjuntos de datos, siendo este de 0.513 para la concentración de los inventarios, en comparación con

0.642 obtenido de los datos del OMI. Aunque se podría considerar que el valor provisto por el satélite lo haría idóneo se debe notar que este solo mantiene un valor alto debido a la alta concordancia del primer día, para luego tener valores muy bajos en el resto. Los datos de los inventarios se mantienen constantes, que lo harían más fácil de tomar como buenos.

Otro índice que nos muestra cómo interpretar los datos obtenidos es el de MBE de los datos comparados. De manera general se pueden observar que la comparación entre el satélite y los datos base tienen valores positivos, los cuales nos estarían indicando de una sobreestimación por parte del modelo cuando usa estos datos de emisión para realizar sus cálculos. Este hecho puede atribuirse a la incertidumbre que se puede generar por el uso de los valores anuales del OMI/Aura la cual tendría un valor de 7.3% de acuerdo con Fioletov *et al.*, (2013). El uso de estimaciones diarias se cree ideal para la estimación de concentración, sin embargo, Duncan *et al.* (2014) menciona que las mediciones anuales son mejores al momento de realizar los cálculos, en especial si se tiene la incertidumbre de estos datos.

En la Tabla 4, en la sección de los datos del inventario provisto por Pemex, se nota que los valores del MBE presenta valores negativos, lo que nos indica una subestimación de las concentraciones del SO₂ por parte de los datos de estos documentos. Este comportamiento ya había sido reportado por Villaseñor *et al.*, (2003) donde encontró una subestimación de concentración al comparar los datos registrados del complejo Dos Bocas y los calculados en sus proyecciones, siendo su hipótesis que esta situación se daba debido a que no se consideraban las emisiones de fuentes cercanas al sitio cuando se corría el modelo Calpuff, sin embargo, de acuerdo con los resultados encontrados en este trabajo, no es posible encontrar fuentes que impacten a la par de lo generado por los quemadores a los mismo receptores, debido a que las condiciones del entorno dificultan este proceso, por lo que asumir que la subestimación de estos valores es enteramente debida a una falta de cuantificación de las fuentes no es del todo acertada.

Una de las explicaciones alternativas de este comportamiento puede ser la manera en la cual se llevan a cabo estos inventarios, pues es posible que la metodología

aplicada para la obtención de los datos de emisión no esté utilizando factores de emisión adecuados para el tipo de material que está extrayéndose ni para el contenido de azufre que esté presente. De tal manera se asume la metodología no se encuentra actualizada teniendo en cuenta el tiempo de operación que los campos Cantarell y Ku-Maloob-Zaap tienen, se esté realizando el trabajo con datos que no reflejan de manera acertada el tipo de material que se extraía en el periodo simulado y por lo tanto se genera un error que afecta los cálculos que se realizan para la obtención de los valores de concentración emitidos por los quemadores de las instalaciones en los campos petroleros. Además, existe la noción de que los quemadores puedan no ser los más adecuados debido a condiciones de operabilidad y meteorológicas de acuerdo con lo sugerido por Mendoza y Graniel (2007) lo cual haría difícil calcular de manera precisa las emisiones que realmente se generan en el área,

Al revisar los otros índices estadísticos recomendados por Wilmott, podemos señalar que los valores de MAE son, en promedio, menores en los datos que comparan los datos de los inventarios con los de las estaciones, indicando que estos presentan un margen de error menor a los que se tienen de los datos satelitales. Este queda en evidencia al revisar como los valores observados y predichos son similares para el caso de los inventarios. El valor del RMSE no muestra que la variación del error que existe entre los conjuntos de datos es ligeramente menor en el caso de las concentraciones obtenidas a partir de los inventarios, al comparar este valor con los del MAE. Aunque estos índices pueden ser usados uno en reemplazo del otro, el cálculo de ambos permite observar desde distintas perspectivas cómo se comporta el error presente e intrínseco de cada grupo de datos.

CAPITULO 4. CONCLUSIONES.

4.1. Conclusiones.

En el presente trabajo se realizó una de las primeras aproximaciones al uso de recursos satelitales correspondientes al monitoreo de concentraciones de SO₂ para el Estado de Tabasco, además de ser la primera comparación de datos de emisión con aquellos de los inventarios de Pemex en la región.

De acuerdo con los resultados encontrados se pudo determinar cómo las emisiones provenientes de instalaciones ubicadas a una distancia considerable de las costas del Estado (unos 200 kilómetros) pueden impactar mediante transporte advectivo a diferentes puntos importantes del estado de Tabasco. Se observó como las concentraciones que son detectadas por los equipos de medición de las estaciones de monitoreo varían basadas en la hora en la cual llegan, siendo las horas de la noche y la madrugada las que presentan mayores niveles de SO₂ detectado, lo que los convierte en los momentos en que la población se puede encontrar en mayor exposición a este contaminante considerando que existan las condiciones que hagan posible el arrastre del gas de manera efectiva.

Se debe recalcar que, aunque las mediciones obtenidas aun en los momentos de mayor concentración medida no sobrepasen lo que la legislación mexicana vigente marca como el umbral de exposición que es perjudicial a la salud humana, es posible detectar la presencia de dióxido de azufre proveniente de fuentes fuera de la costa y a la larga estas pueden representar un riesgo para aquellos sectores en los cuales, aunado a la aportación de las fuentes analizadas en este trabajo, presenten otras fuentes que aporten cantidades del contaminante. De acuerdo a la simulación de las plumas se observa como estas no solo afectan importantes centros de población (Villahermosa, Paraíso, etc) sino que además podrían afectar áreas naturales como lo es la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla.

El análisis estadístico de los resultados mostro que, bajo las condiciones adecuadas, la información del satélite demuestra poseer una mejor concordancia al simular las condiciones reales del entorno, sin embargo, los datos de los inventarios no tienen un nivel tan bajo de congruencia. Conforme lo planteado en este estudio, se pudo observar que las simulaciones generadas tanto con los datos del satélite como las obtenidas de los inventarios presentan diferencias estadísticas al compararlas con os datos de la estación de monitoreo del ITVH lo que nos lleva a considerar que es necesario ahondar en estudios que permitan tener información en mayor cantidad para así emitir un juicio sobre el peso del uso que una u otra de las fuentes de información posee al momento de elegirla como aquellas que nos mostrara fielmente como sucede el fenómeno de dispersión en la realidad.

4.2. Observaciones.

- Una las limitantes más importantes encontradas fue la poca información que se tiene de las estaciones de monitoreo de calidad del aire. Esto resultado evidente pues solo pudo ser usada una de las estaciones del total que se habían contemplado en un principio, pues era la que poseía la mayor cantidad de información continua y este hecho fue el principal referente para la elección de los días simulados por lo que vigilar que se exista una mejora en el manejo de dichas instalaciones, pues se puede deber a un mal manejo de estas que no se están registrando las mediciones.
- No se pueden obviar el error que los cálculos conllevan, pues esta cobra importancia al analizar estadísticamente los resultados de las simulaciones. Aunque los datos satelitales del OMI nos presentan esta incertidumbre, los que provienen de los informes presentados por Pemex no mencionan este tipo de información, además que se no se discierne la forma de calcular su flujo de emisión.

- Otro aspecto que considerar es que para la realización de los cálculos se usaron valores anuales, los cuales fueron ajustados para que fuesen representativos de las fuentes emisoras. La manera ideal en que estos datos debieran ser medidos es en un promedio diario o, de ser posible, horario, lo cual aumentaría la exactitud del estudio. A pesar de que autores como Duncan et al. (2014) mencionan de las ventajas que el uso de datos anuales es necesario contar con los valores incertidumbre para cada caso y que así esta idea sea correcta.
- No se puede dejar de mencionar la importancia que tiene el aprovechar todas las herramientas posibles para entender de mejor manera como se ve afectada la calidad del aire en la región sureste de México, pues la actividad petrolera continúa siendo una, si no la mas importante, actividad productiva de la zona. Con trabajos similares al aquí descrito se espera que se puedan hacer tomas de decisión importante que salvaguarden el bienestar de la población del área, así como se busque evitar impactos altamente negativos en los sistemas naturales tan ricos que existen.

REFERENCIAS

Affum H, Akaho E, Niemela J, Armenio V, Danso K (2016) Validating the California Puff (CALPUFF) Modelling System Using an Industrial Area in Accra, Ghana as a Case Study. *Open J Air Pollut*, 05: 27-36. <http://dx.doi.org/10.4236/ojap.2016.51003>.

Arango C.& Ruiz J. F. (2011). Implementación del modelo WRF para la sabana de Bogotá, 16. Recuperado de http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21132/Modelo_WRF_Bogota.pdf/f1d34638-e9f8-4689-b5f4-31957c231c46

Bermeo G (2010) Simulación de la calidad del aire originada por la emisión de contaminantes en la región sur del golfo de México (in spanish). Master's degree thesis. UNAM, 116 pp.

Casares-long J. J & Torres-Valle A. (2016). Aplicaciones del modelo lagrangiano de dispersión atmosférica CALPUFF. *Cien Tie Espac*: 17(1), 32–44.

Chaouch N, Temimi M, Weston M, Ghedira H (2016) Sensitivity of the meteorological model WRF-ARW to planetary boundary layer schemes during fog conditions in a coastal arid region. *Atmos Res*, 187: 106-127. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.12.0>.

Duncan B. N, Prados A. I, Lamsal N, Liu Yang, Streets David, Gupta Pawan, Hilsenrath Ernest, Kahn R. A, Nielsen J. E, Beyersdorf J, Burton S. P, Fiore A. M, Fishman Jack, Henze D. K, Hostetler C. A, Krotkov N, Lee L, Pawson S (2014) Satellite data of atmospheric pollution for U.S. air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid. *Atmos Environ*, 94: 647-662. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.061>.

Fioletov V, McLinden C, Krotkov N, Yang K, Loyola D. G, Valks P, Theys N, Van Roozendaal M, Nowlan C. R, Chance K, Liu X, Lee C, Martin R. V (2013) Application of OMI, SCIAMACHY, and GOME-2 satellite SO₂ retrievals for detection of large emission sources, *J Geophys Res-Atmos*, 118: 11399–11418, <https://doi:10.1002/jgrd.50826>.

Fioletov V, McLinden C, Krotkov N, Li C, Joiner J, Theys, N (2016) A global catalogue of large SO₂ sources and emissions derived from the Ozone Monitoring Instrument. *Atmos Chem Phys*, 16: 11497-11519. <https://doi.org/10.5194/acp-16-11497-2016>.

Fioletov V, McLinden C, Kharol S, Krotkov N, Li C, Joiner J, Visschedijk Antoon J.H, Moran M. D, Vet R, Denier Van Der Gon, H (2017) Multi-source SO₂ emission retrievals and consistency of satellite and surface measurements with reported emissions. *Atmos Chem Phys*, 17:1 2597-12616. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12597-2017>.

Greaver T, Sullivan T, Herrick J, Barber M, Baron J, Cosby B, Novak K (2012) Ecological effects of nitrogen and sulfur air pollution in the US: What do we know? *Front Ecol Environ*, 10: 365-372. <http://dx.doi.org/10.1890/110049>.

Hernández-Garces A, Souto J, Rodríguez Á, Saavedra S, Casares J (2016) Validation of CALMET/CALPUFF models simulations around a large power plant stack. *Física de la Tierra*, 27: 35-55. http://dx.doi.org/10.5209/rev_FITE.2015.v27.51192.

Hernandez M. F. (2013). Estudio Del Impacto En La Calidad Del Aire De Las Fuentes Puntuales En La Ciudad De Pinar Del Río. *Rev Brasil Meteo*, 1–12. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000100001>

He H, Vinnikov K. Y, Li C, Krotkov N. A, Jongeward A. R & Li Z. (2016). Earth 's Future Response of SO₂ and particulate air pollution to local and regional emission controls : A case study in Maryland. *Earth 's Future*. <https://doi.org/10.1002/2015EF000330>.Abstract

Holnicki P, Kałuszko A, Trapp W (2015) An urban scale application and validation of the CALPUFF model. *Atmos Pollut Res*, 7: 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.016>.

Ialongo I, Hakkarainen J, Kivi R, Anttila P, Krotkov N, Yang K, Li C, Tukiainen S, Hassinen S (2015) Comparison of operational satellite SO₂ products with ground-based observations in northern Finland during the Icelandic Holuhraun fissure eruption. *Atmos Meas Tech*. 8: 2279-2289. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-8-2279-2015>.

Kharol S, McLinden C, Sioris C, Shephard M, Fioletov V, Donkelaar A, Philip Sajeew, Martin R (2016) OMI Satellite Observations of decadal changes in Ground-Level Sulfur Dioxide over North America. *Atmos Chem Phys Discuss*, December: 1-17. <http://dx.doi.org/10.5194/acp.2016-1070>, 2016.

Krotkov N, McLinden C, Li C, Lamsal L, Celarier E, Marchenko S, Streets D et al (2016) Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015. *Atmos Chem Phys* 16: 4605-4629. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-16-4605-2016>.

Lakes Environmental (2018) CalpuffView. Release notes. https://www.weblakes.com/products/calpuff/resources/lakes_calpuff_view_release_notes.pdf. Accessed 7 May 2019.

Lee On H, Yoo Oo J, Kang Ink M., Kang Is J, Jung J, Oh K (2014) Evaluation of concentrations and source contribution of PM₁₀ and SO₂ emitted from industrial complexes in Ulsan, Korea: Interfacing of the WRF-CALPUFF modeling tools. *Atmos Pollut Res*, 5: 664-676. <http://dx.doi.org/10.5094/APR.2014.076>.

Lelieveld J, Evans J, Fnais M, Giannadaki D, Pozzer A (2015) The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525: 367-71. <http://dx.doi.org/10.1038/nature15371>.

Li, S., & Xie, S (2016) Spatial distribution and source analysis of SO₂ concentration in Urumqi. *Int J Hydrogen Energ*, 41: 15899-15908. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.142>.

Liu F, Choi S, Li C, Fioletov V, McLinden C, Joiner J, Da Silva A et al (2018) A new global anthropogenic SO₂ emission inventory for the last decade: A mosaic of satellite-derived and bottom-up emissions. *Atmos Chem Phys*, 18: 16571-16586. <https://doi.org/10.5194/acp-18-16571-2018>.

McLinden C, Fioletov V, Shephard M, Krotkov N, Li C, Martin R, Moran M. D, Joiner J (2016) Space-based detection of missing sulfur dioxide sources of global air pollution. *Nat Geosci Lett*, May: 1-7. <http://dx.doi.org/10.1038/NGEO2724>.

Mendoza A & Graniel M (2006) Estimación de emisiones a la atmósfera provenientes de quemadores elevados de instalaciones petroleras en la Sonda de Campeche. *Ing Invest Tecnol*, 7: 165-173. <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2006.07n3.013>.

Mendoza A. & Graniel M (2007) Evaluación exploratoria de la dispersión de contaminantes emitidos por operaciones de quema de gas amargo en la sonda de campeche. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 23: 99-113.

Mohan M & Bhati S (2011) Analysis of WRF Model Performance over Subtropical Region of Delhi, India. *Adv Meteorol*, 2011: 1-13. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/621235>

Nowlan C. R, Martin R. V, Philip S, Lamsal L. N, Krotkov N. A, Marais E. A, Zhang Q. (2014). Global dry deposition of nitrogen dioxide and sulfur dioxide inferred from space-based measurements. *Glob Biogeochem Cycl*, 28, 1025–1043. <https://doi.org/10.1002/2014GB004805>

Pemex (2012) Proyecto de Cogeneración Nuevo Pemex <http://www.pemex.com/transparencia/Documents/2012-lb/PGPB04.pdf>. Accessed 7 May 2019.

SSA (2010) Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

Scire J.S, Strimaitis D.G & Robe F.R (2005) Evaluation of Enhancements to the CALPUFF Model for Offshore and Coastal Applications. Proceedings of the 10th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. Sissi (Malia), Crete, Greece. 17-20 October 2005.

Stoiber R. E, Tm S. N. W & Barry R. T. (1987). ANNUAL CONTRIBUTION OF SULFUR DIOXIDE TO THE ATMOSPHERE BY VOLCANOES. *J Volc Geot Res*: 1–8.

Streets D, Canty T, Carmichael G, De Foy B, Dickerson R, Duncan B, Wecht K et al (2013) Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current capability. *Atmos Environ*, 77: 1011-1042. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.051> Review.

Villasenor R, Magdaleno M, Quintanar A, Gallardo J, López M, Jurado R, Miranda A, Aguilar M, Melgarejo L. A, Barchet W et al (2003) An air quality emission inventory of offshore operations for the exploration and production of petroleum by the Mexican oil industry. *Atmos Environ*, 37: 3713-3729. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00445-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00445-X).

Willmott, C (1981) On the validation of models. *Phys Geogr*, 2: 184-194. <http://dx.doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>.

Yaseen S, Skinder B.M & Khoiyangbam R.S (2014) Temporal variation of SO₂ and NO₂ concentrations around Parichha Thermal Power Plant, India. *J Environ Chem Ecotox*, 6: 6-12. <http://dx.doi.org/10.5897/JECE2014.0313>.

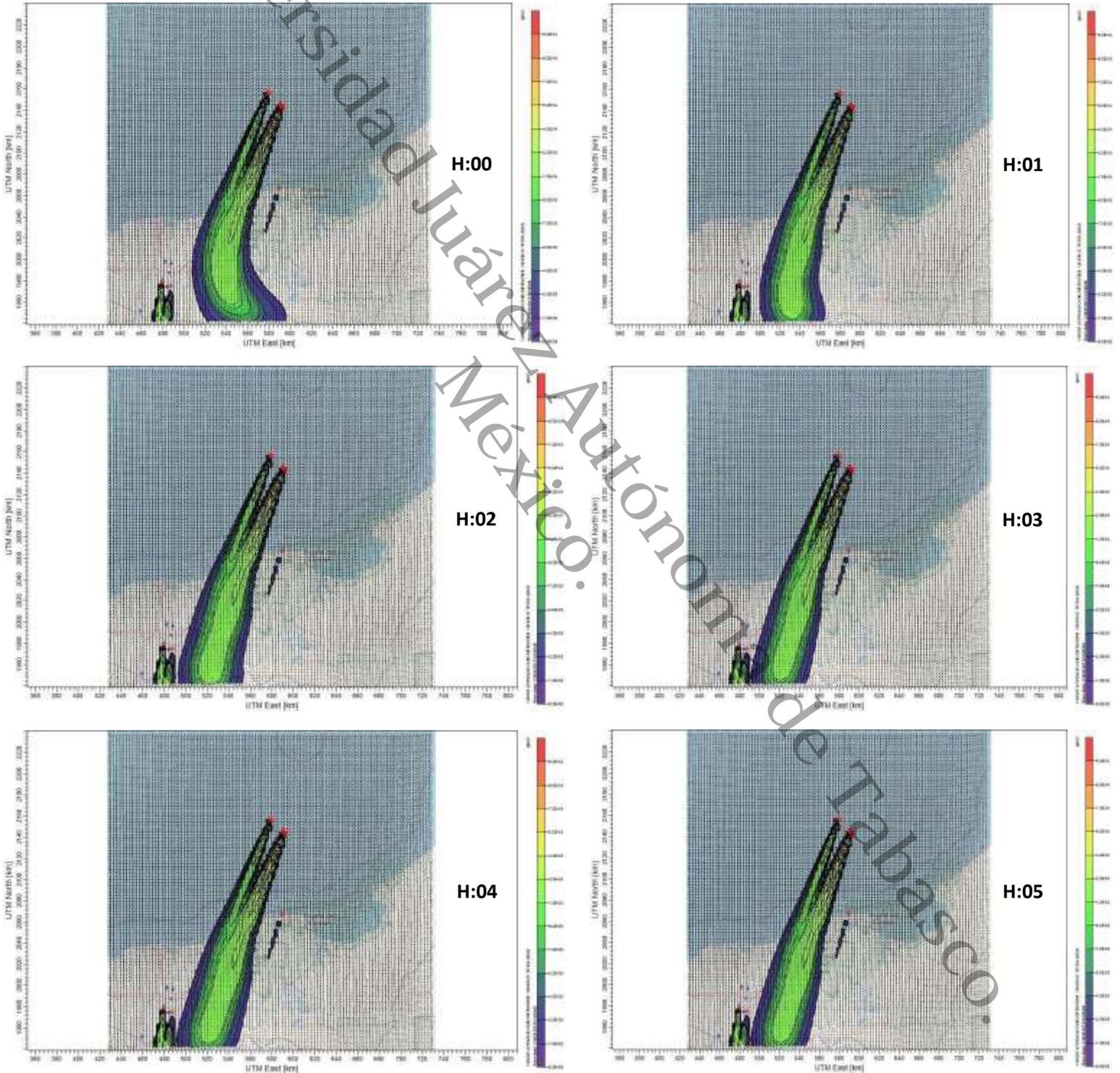
ANEXO.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

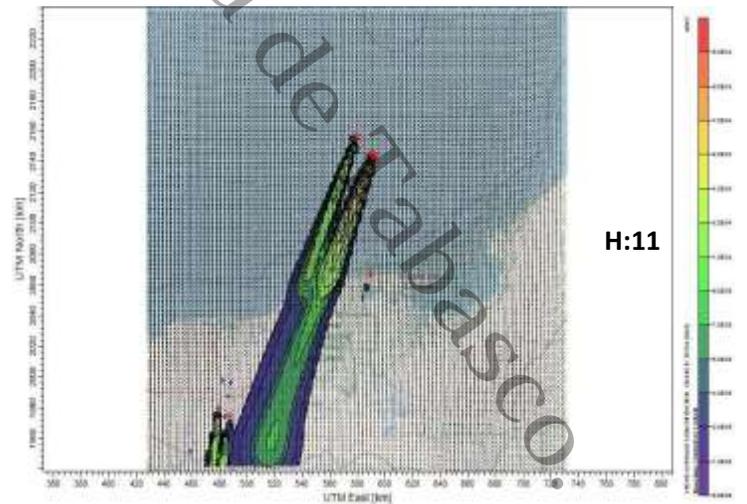
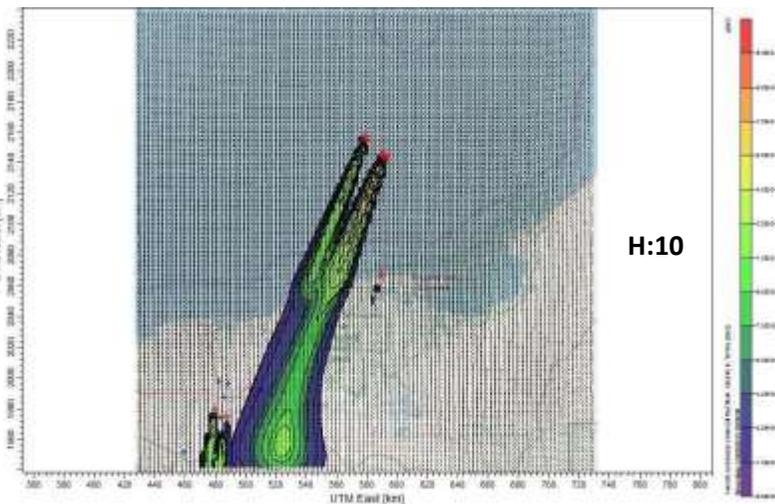
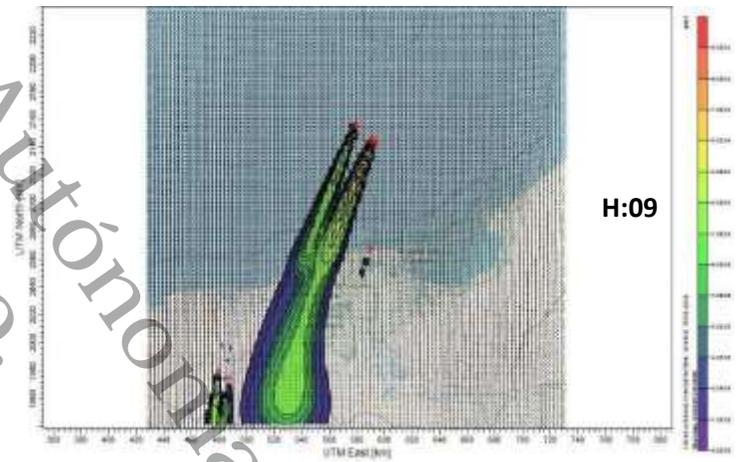
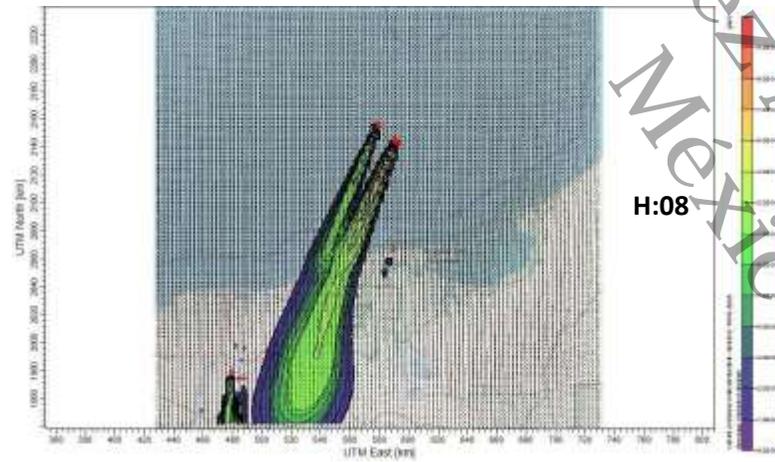
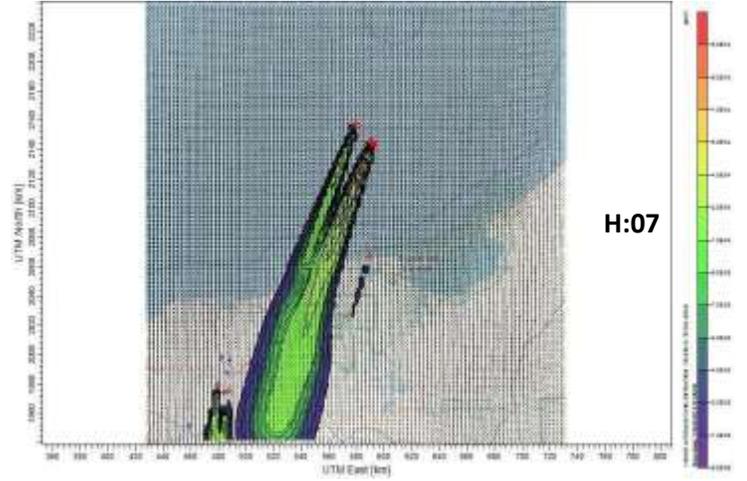
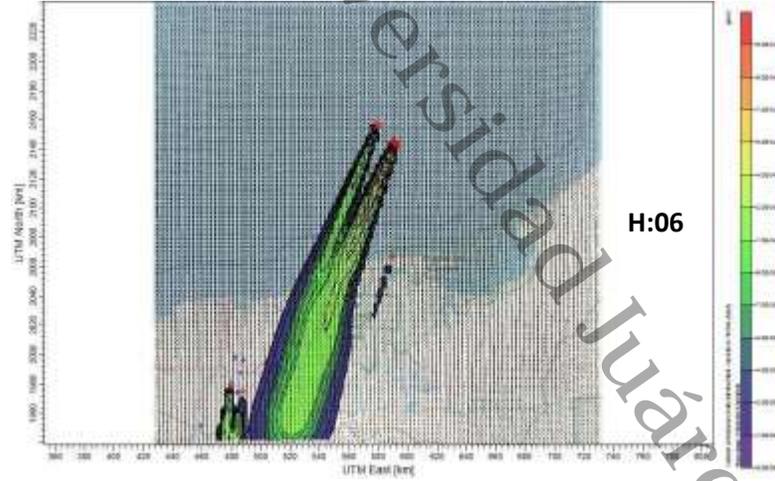
ANEXO 1.

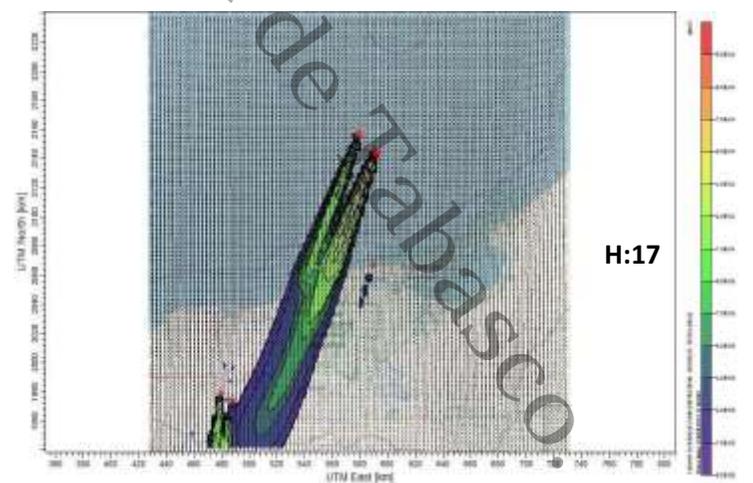
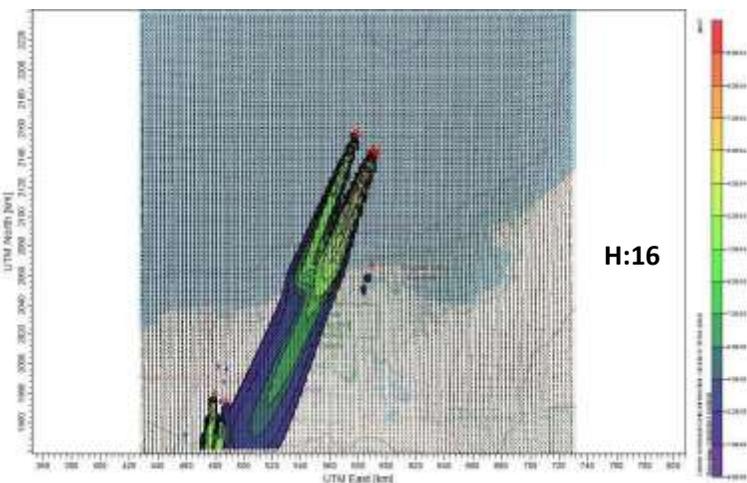
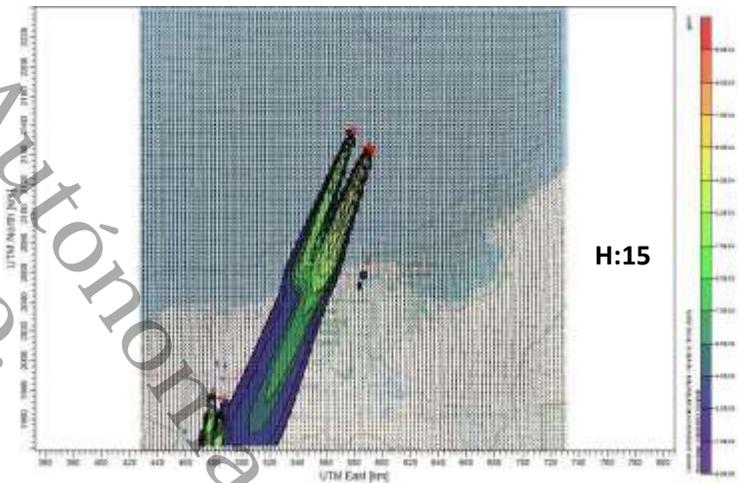
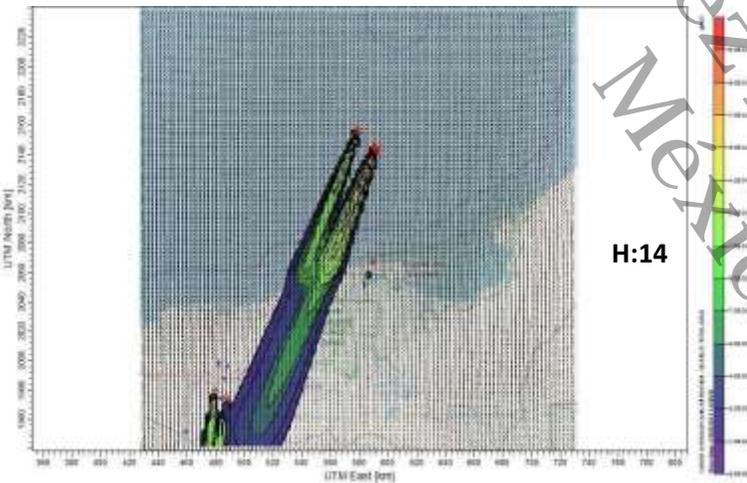
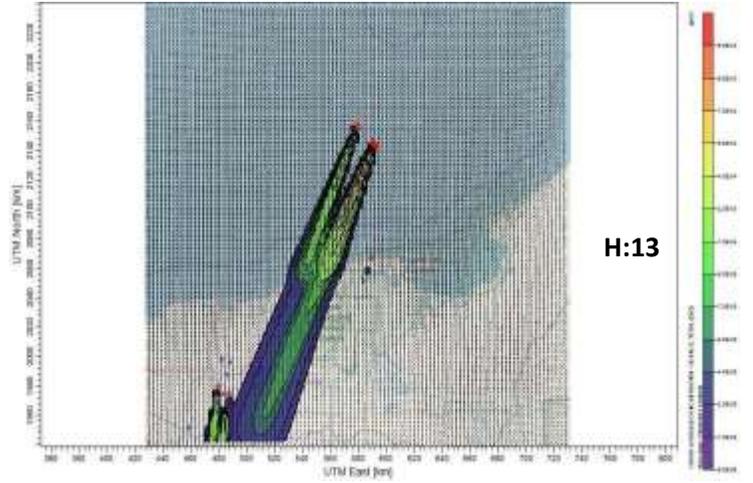
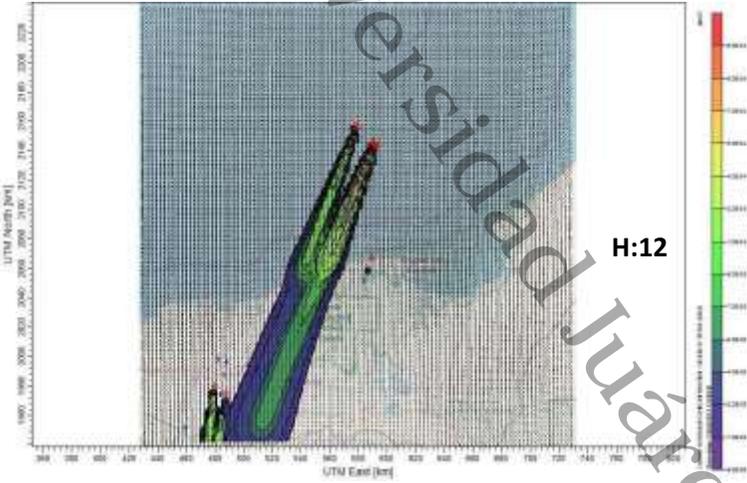
Plumas generadas mediante el uso del CalpuffView para los tres días analizados en base a los datos satelitales en gramos por metro cubico.

1 de Febrero de 2013

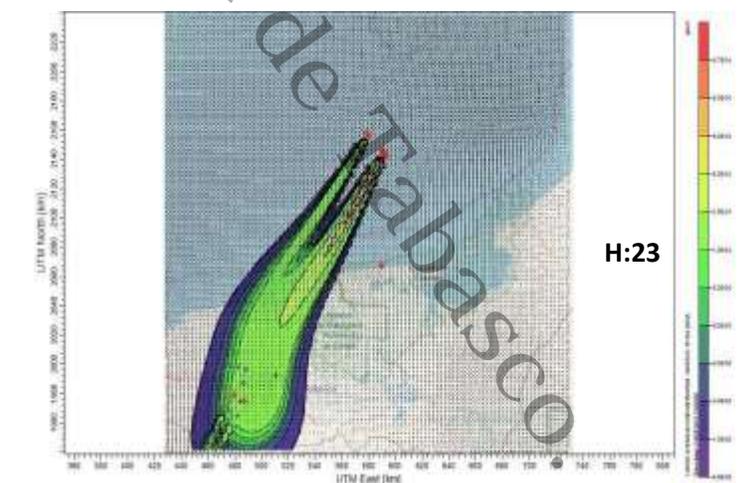
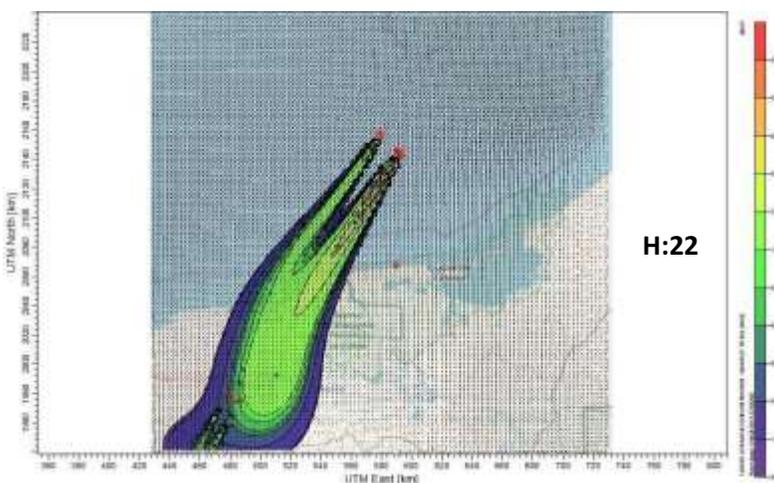
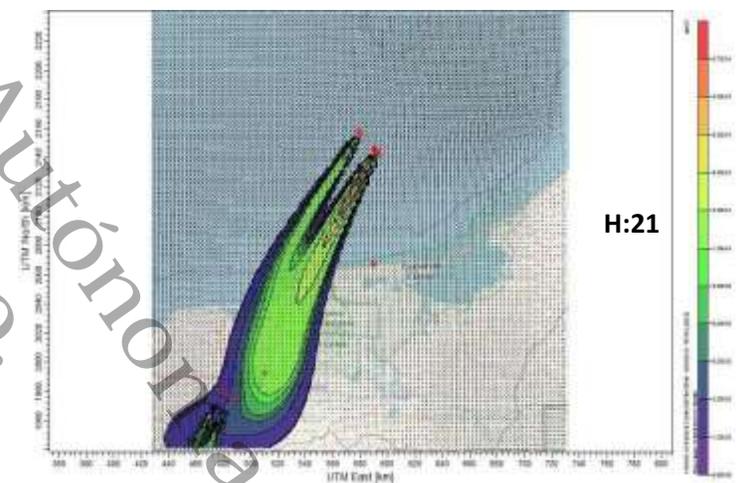
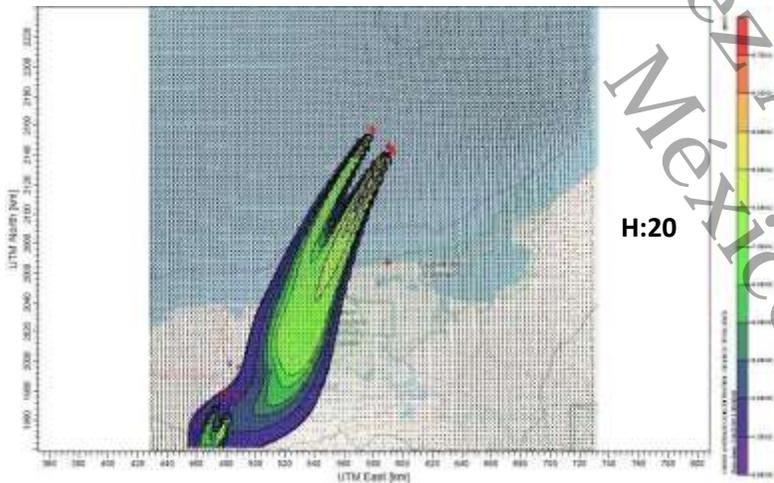
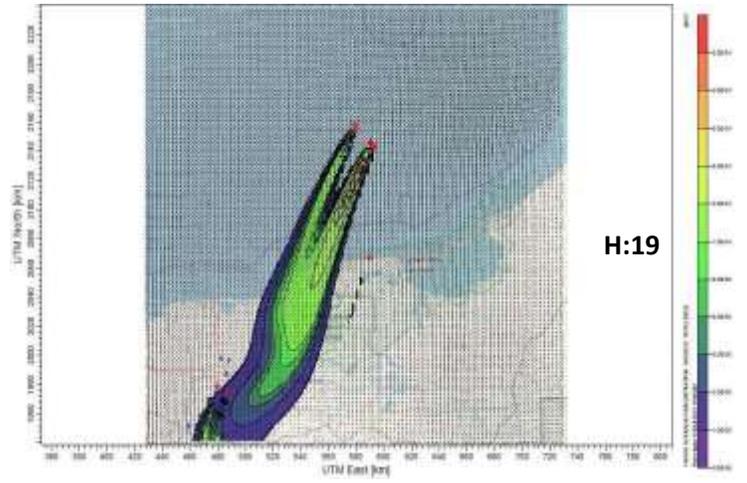
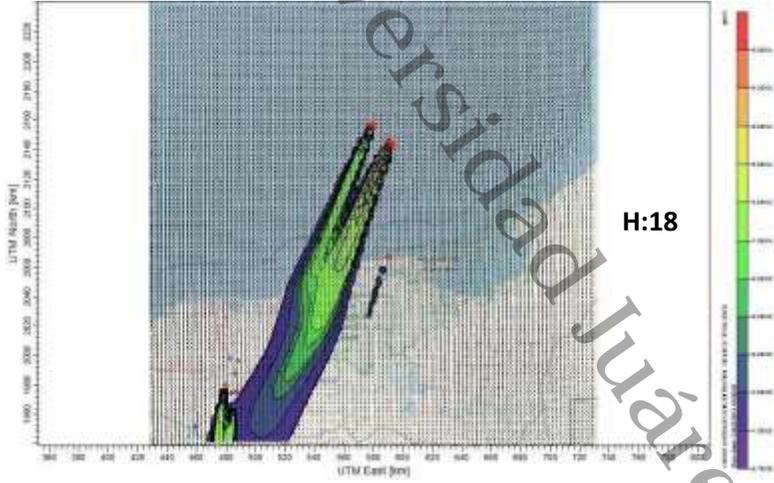


Universidad Juárez Autónoma de México.
de Tabasco

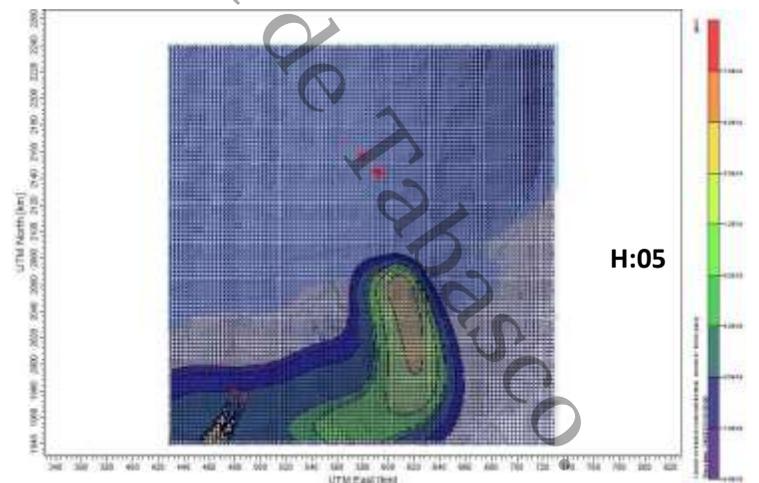
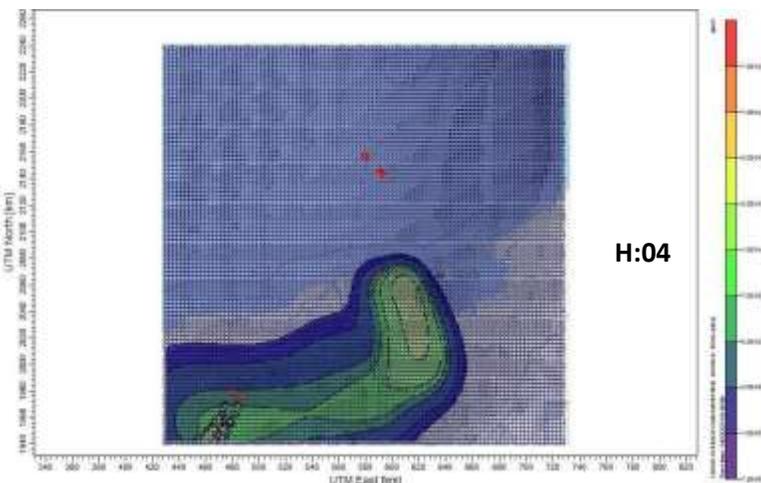
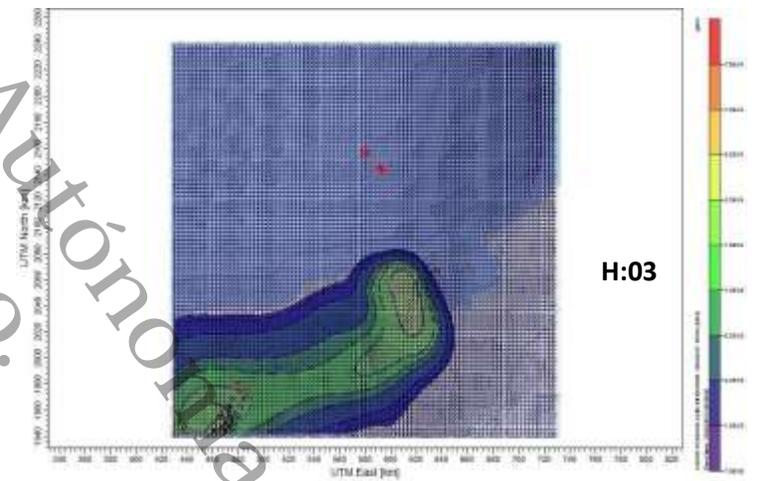
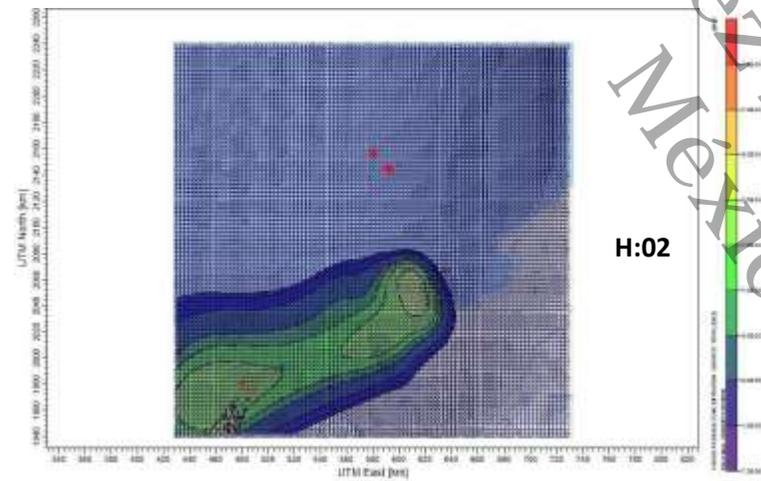
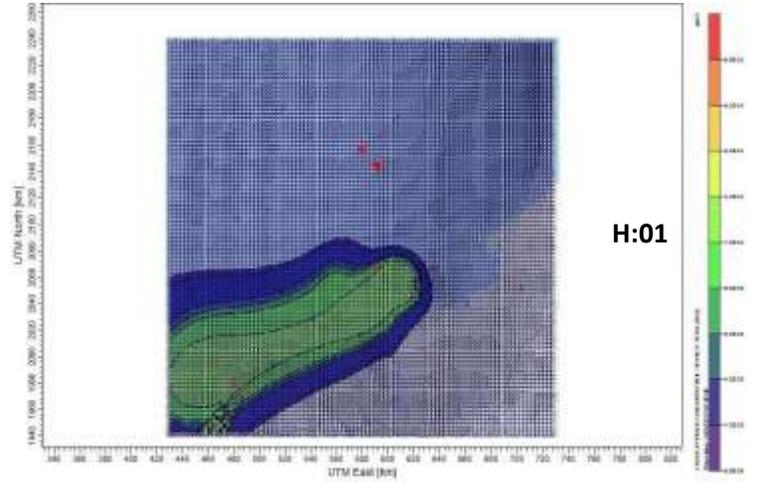
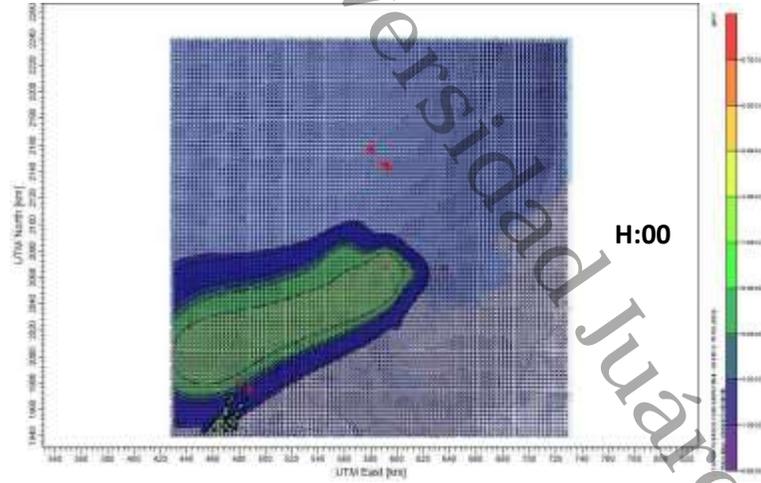




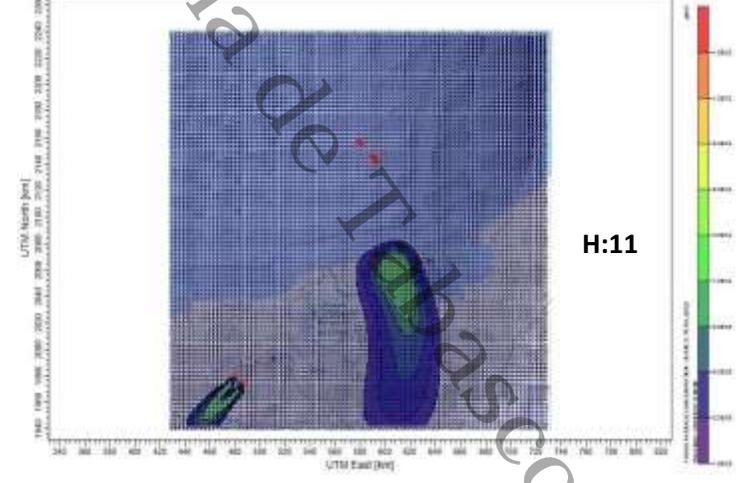
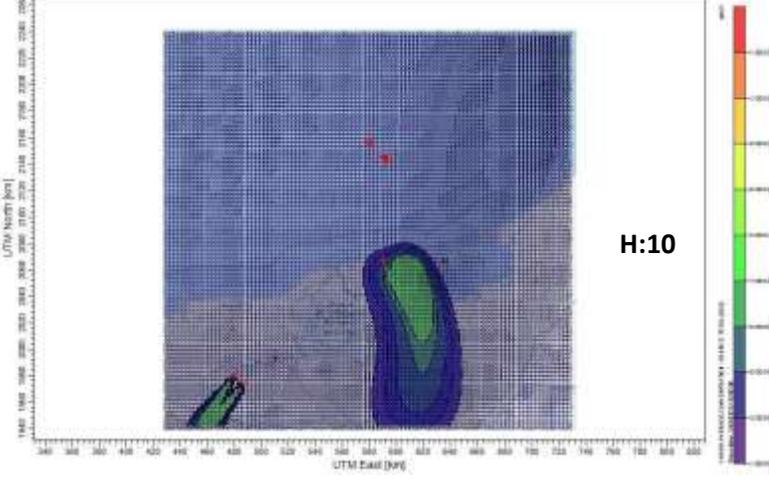
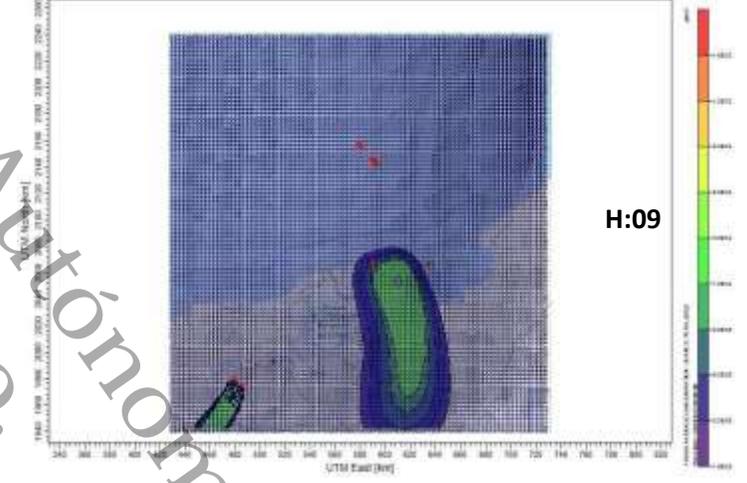
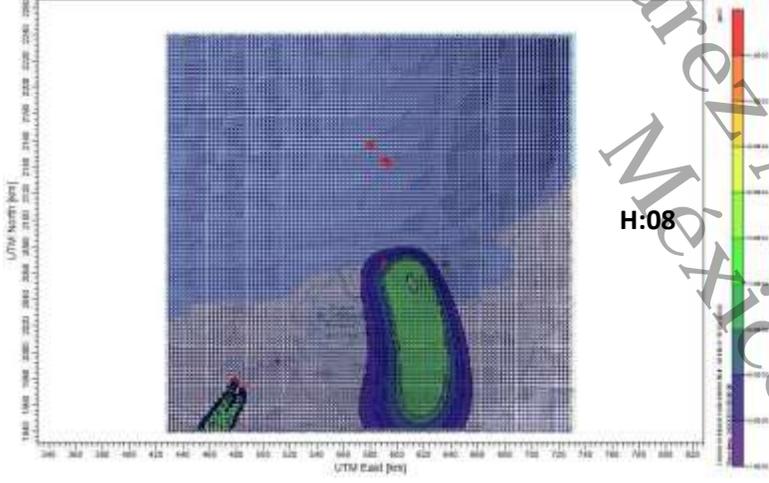
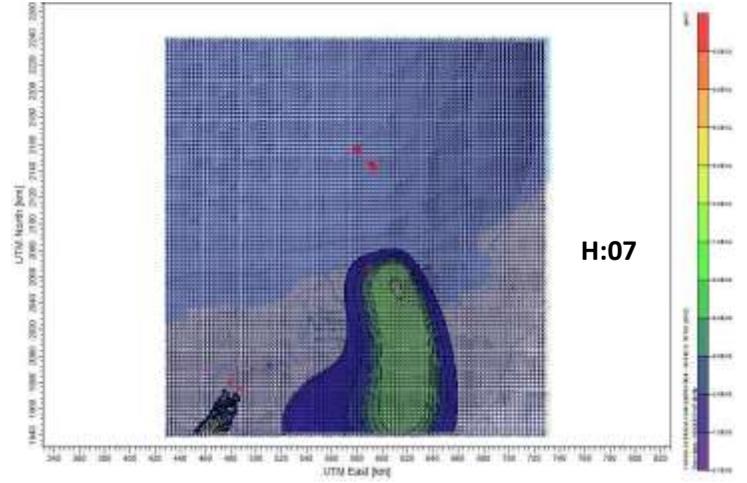
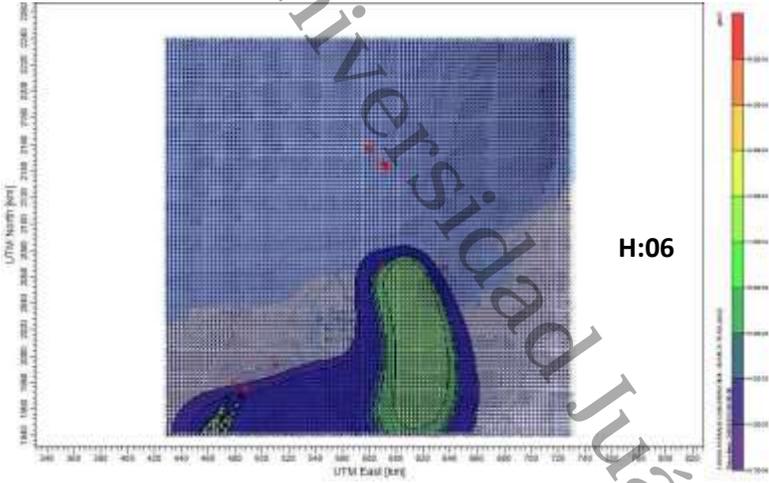
Universidad Juárez Autónoma de México.
de Tabasco



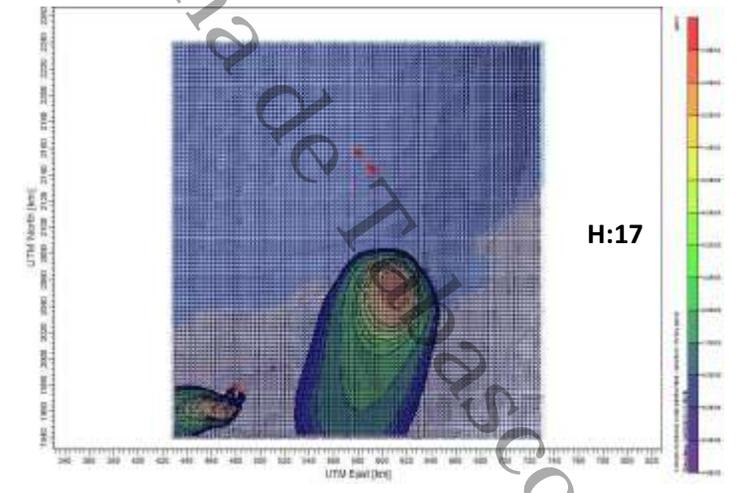
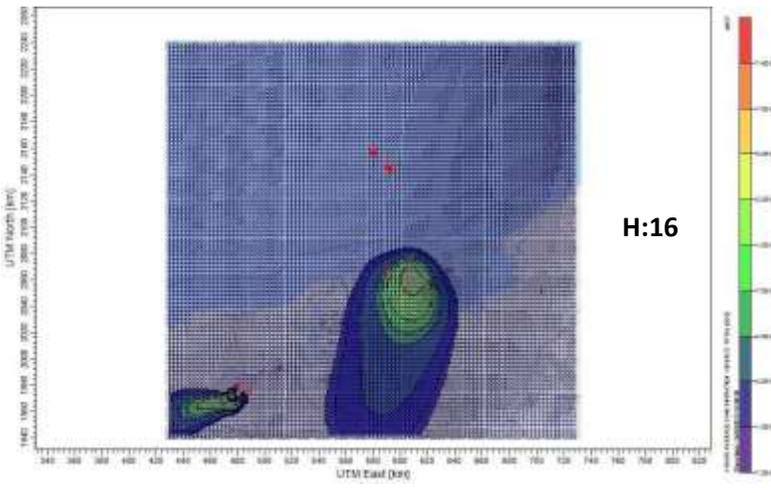
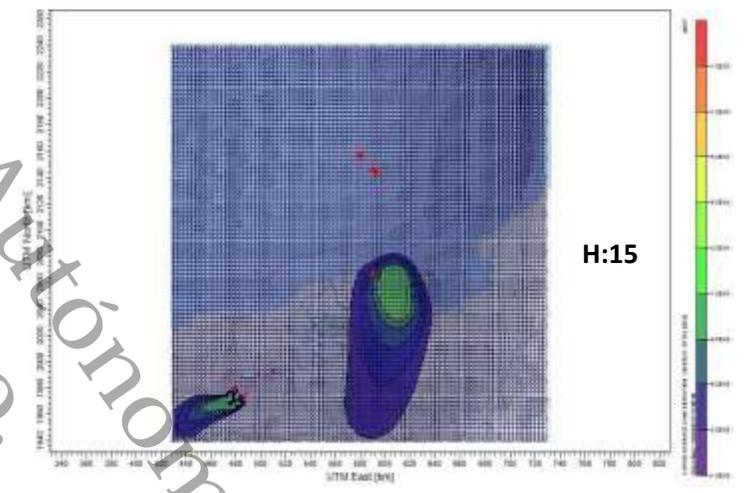
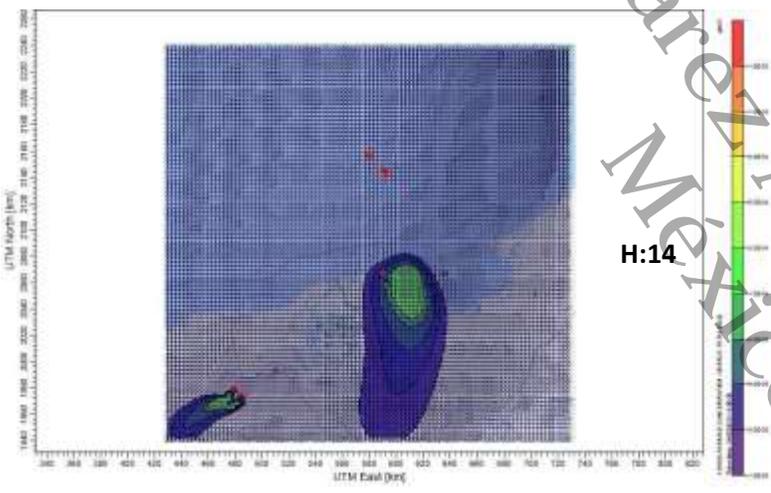
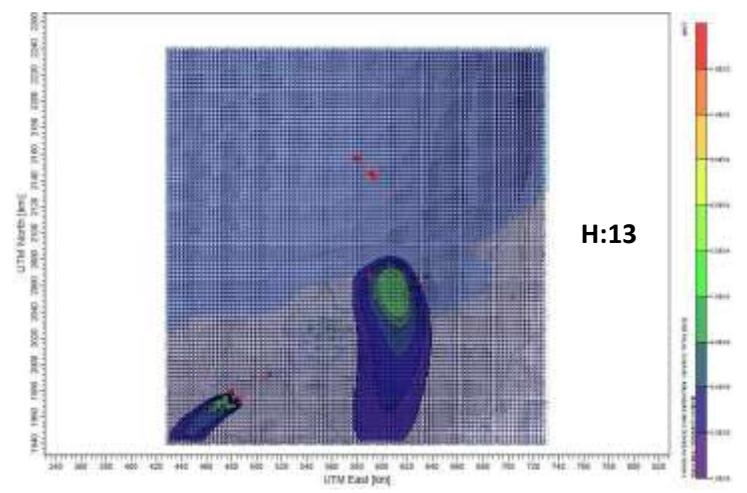
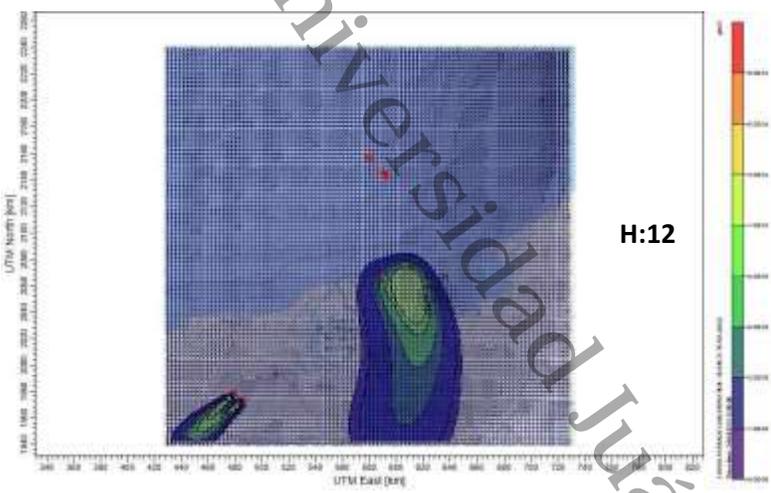
24 de Febrero de 2013

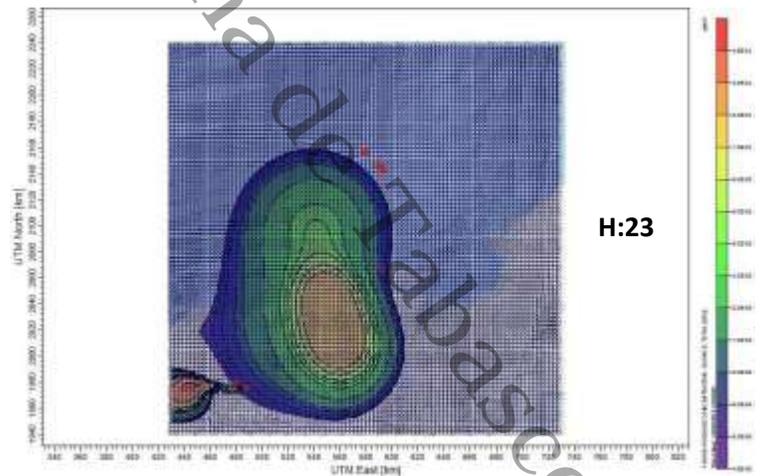
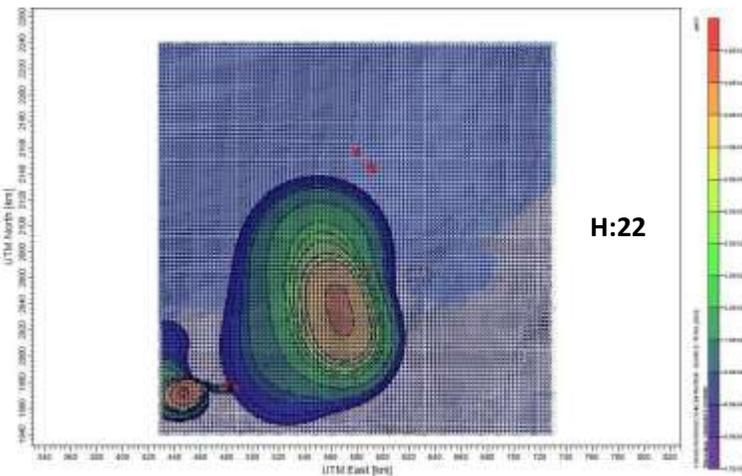
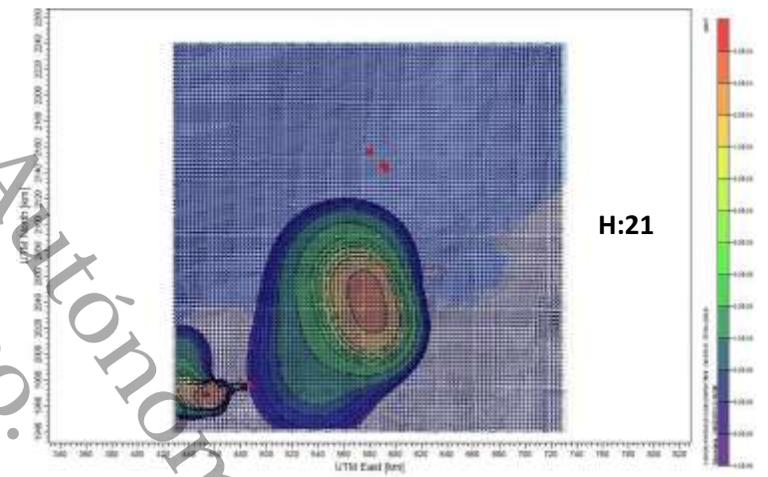
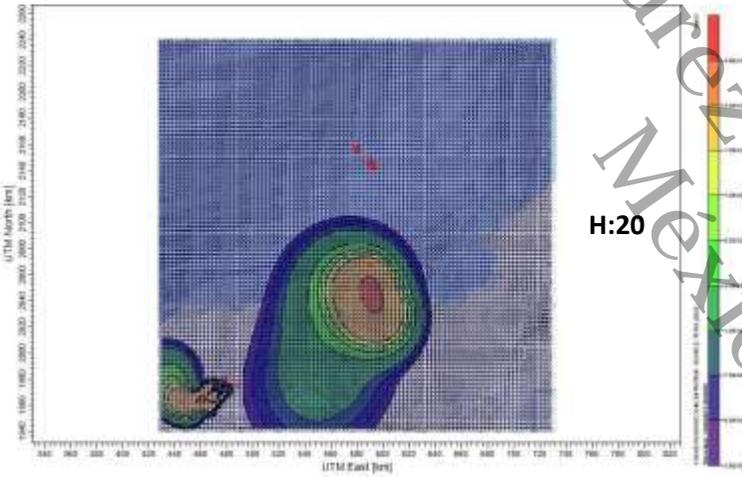
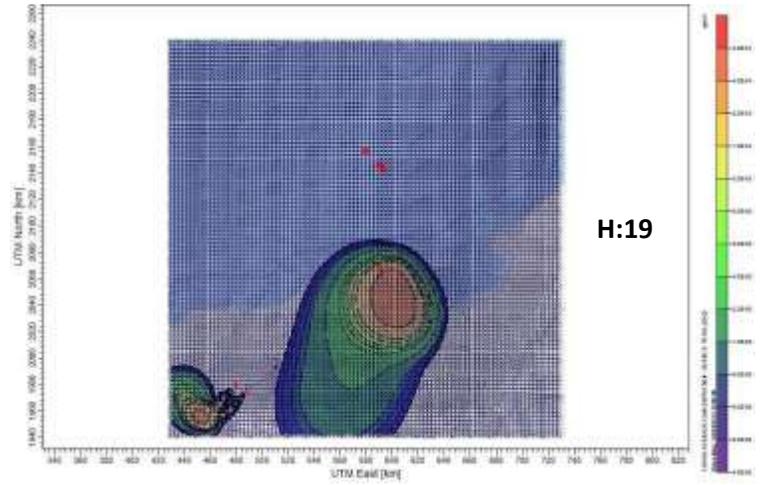
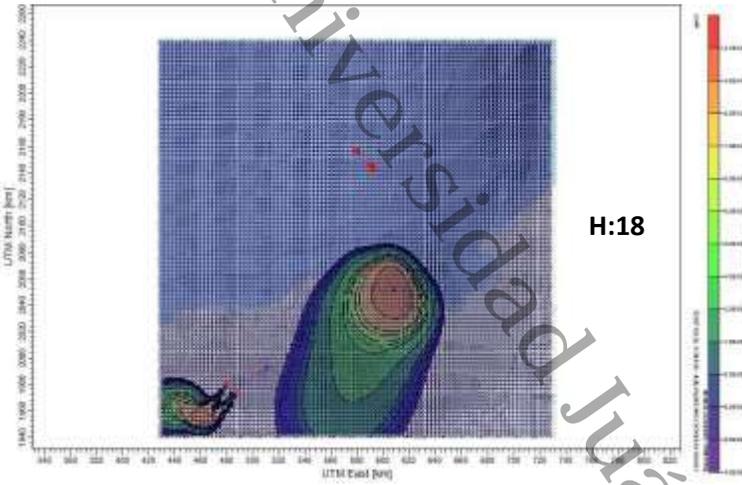


Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

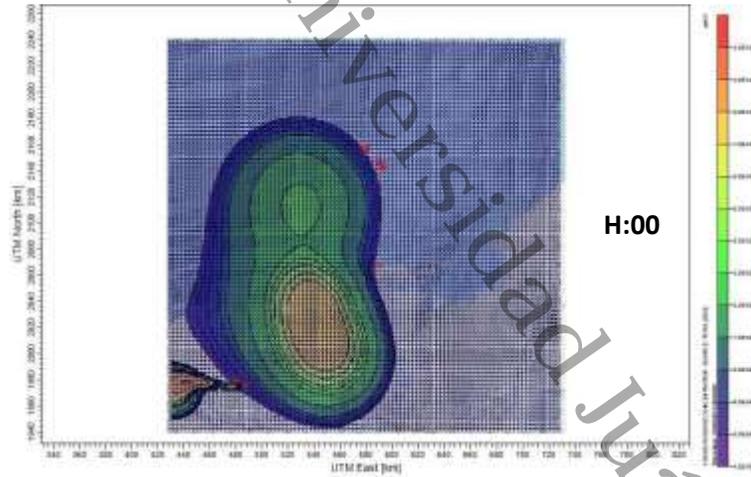


Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

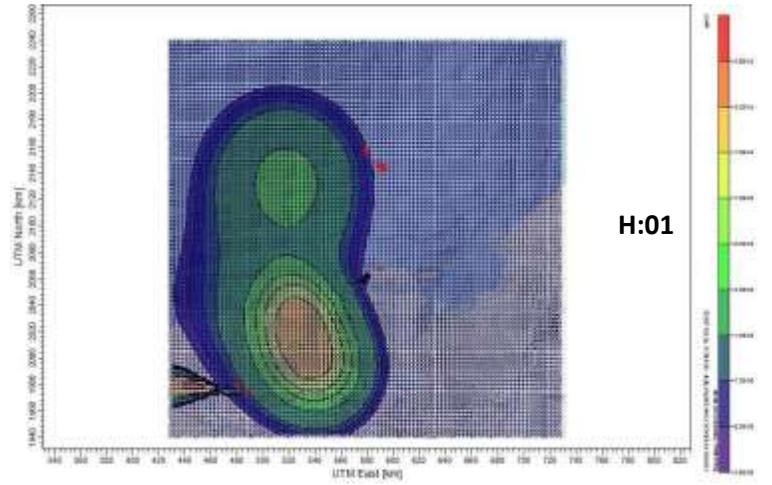




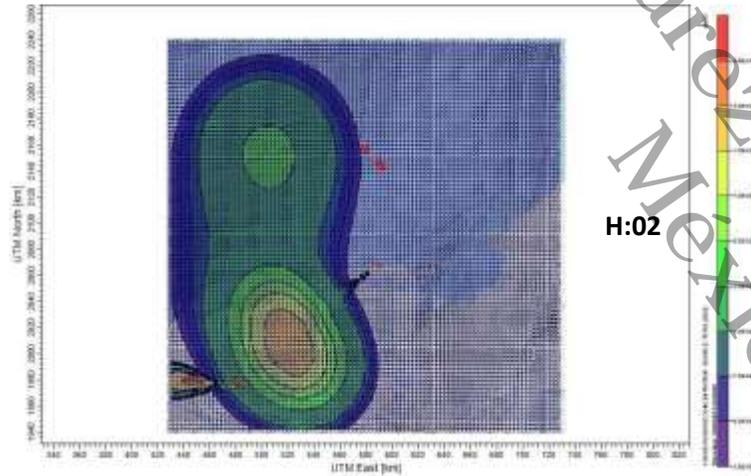
25 de Febrero de 2013



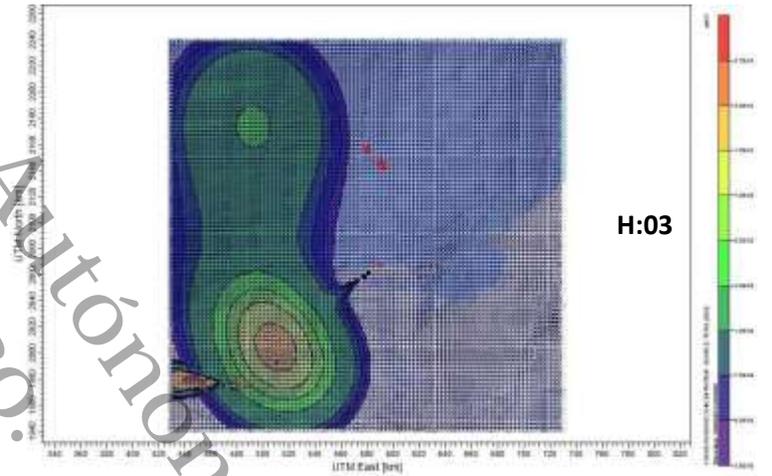
H:00



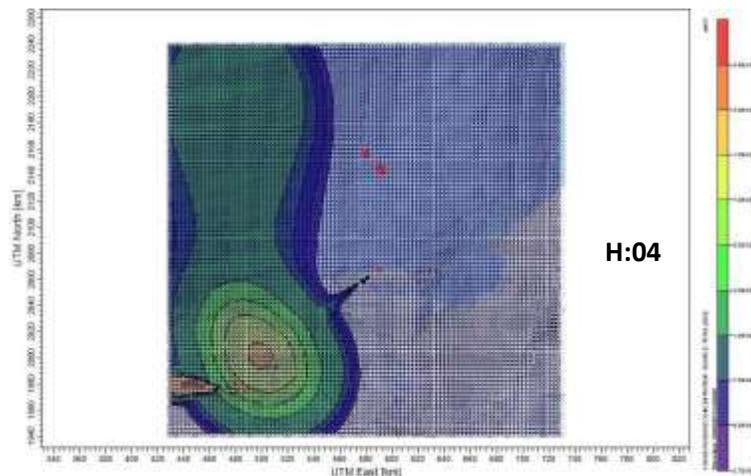
H:01



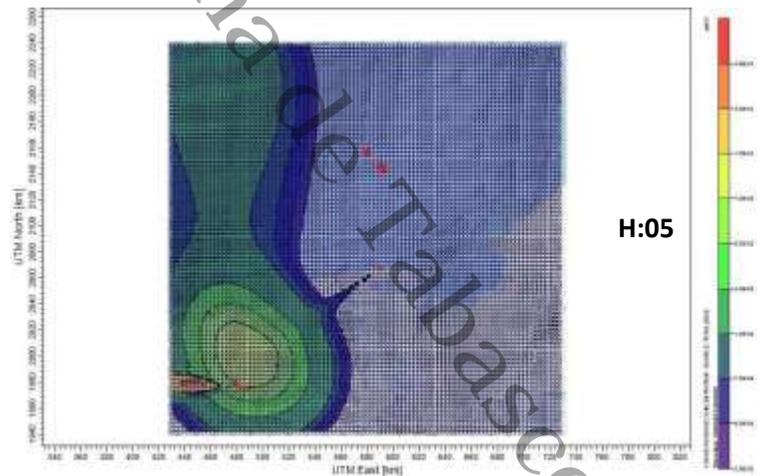
H:02



H:03

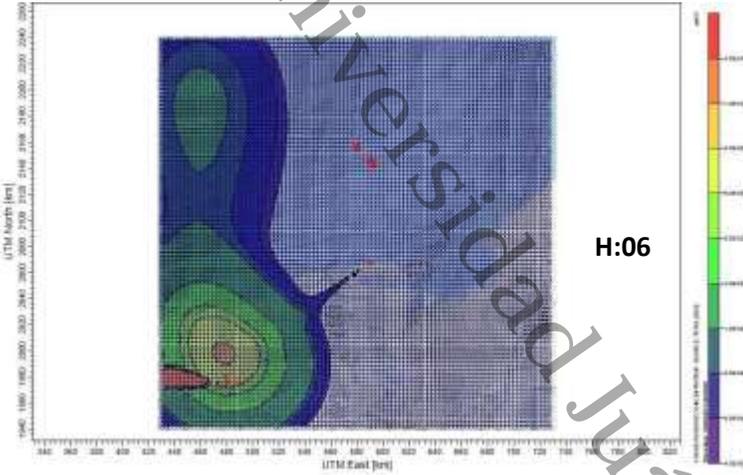


H:04

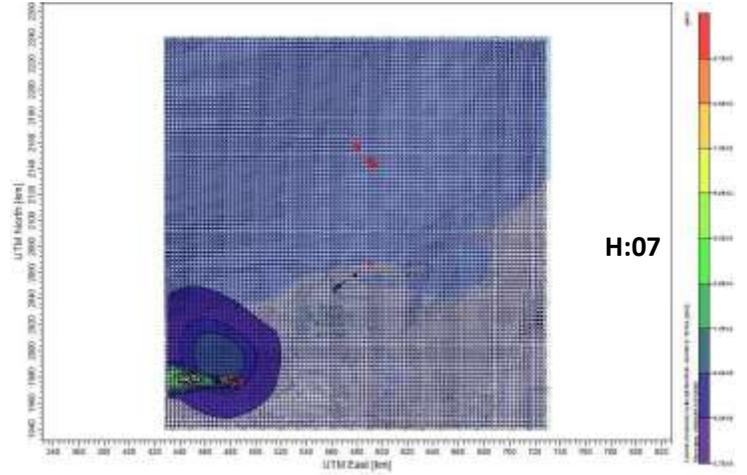


H:05

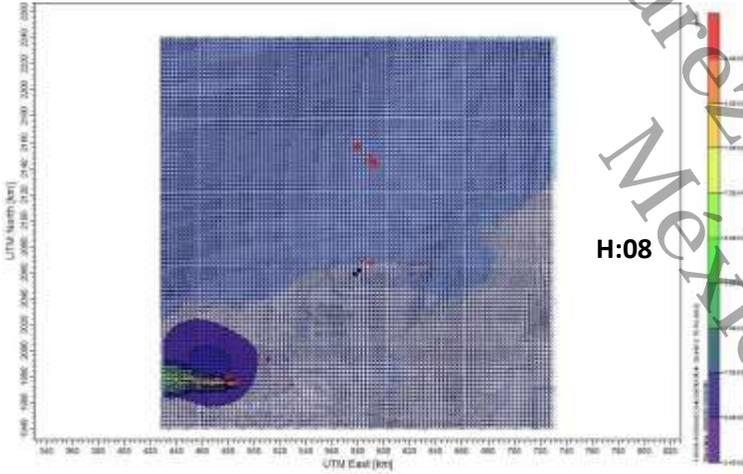
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco México



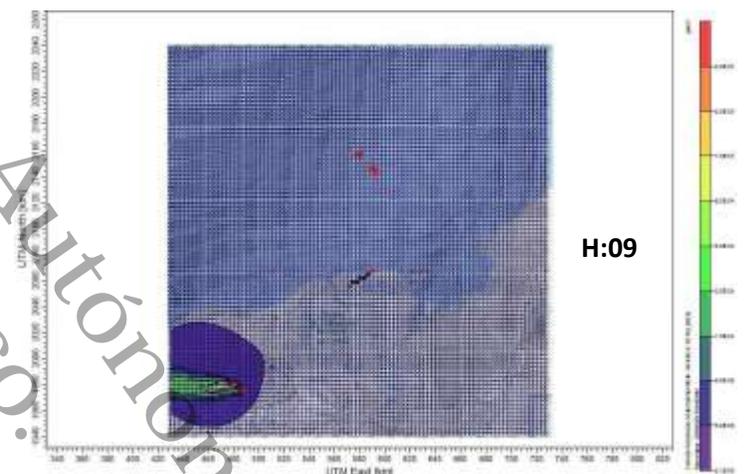
H:06



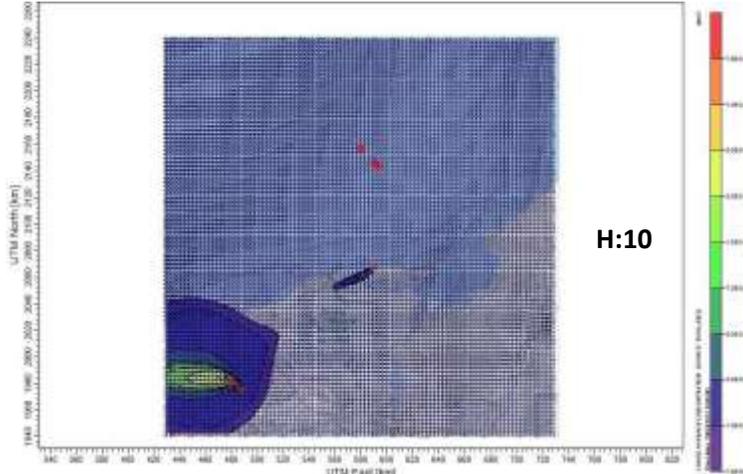
H:07



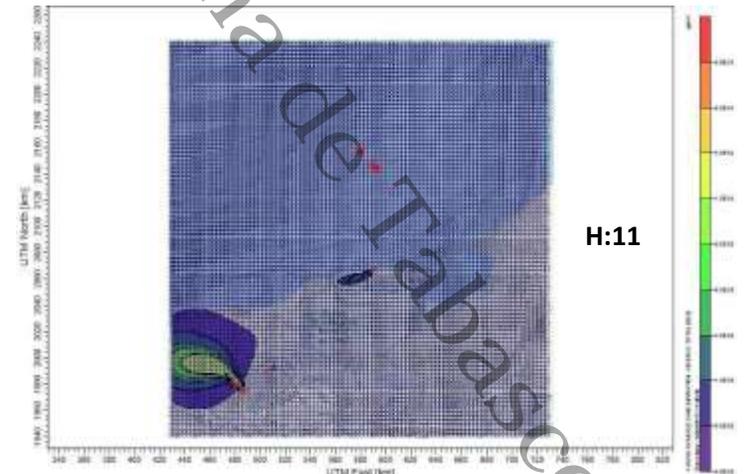
H:08



H:09

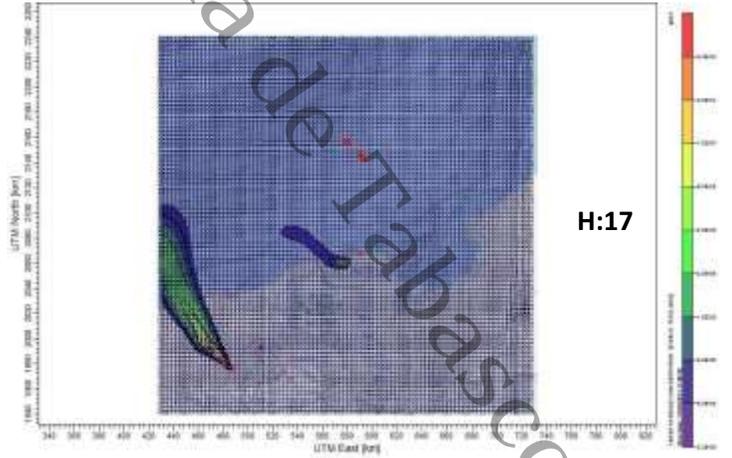
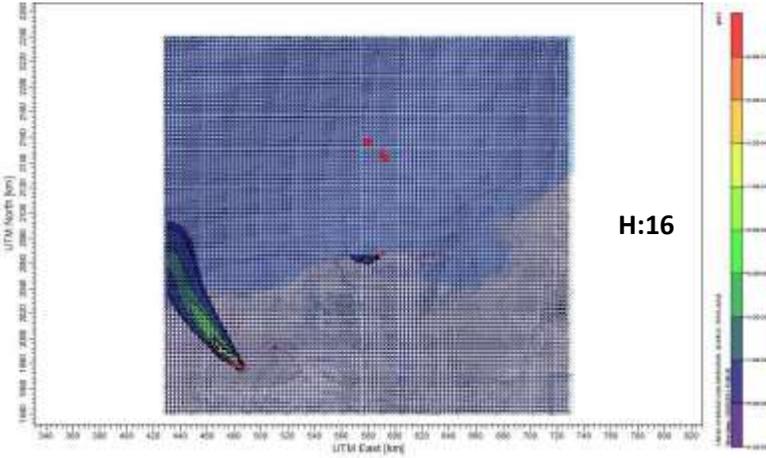
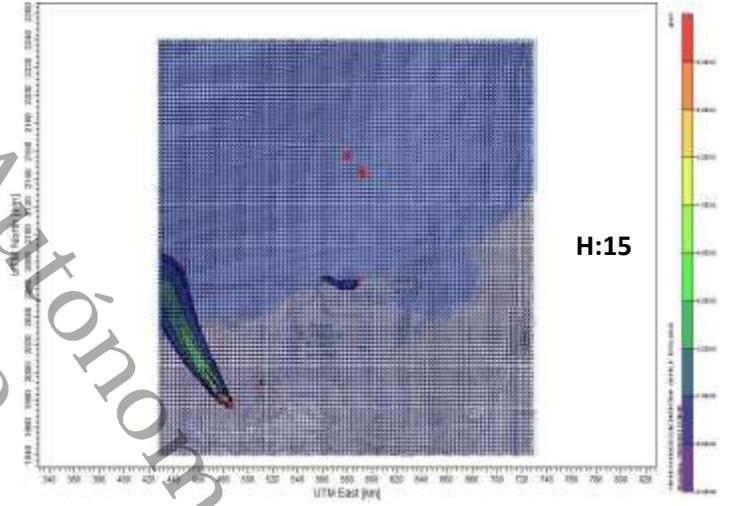
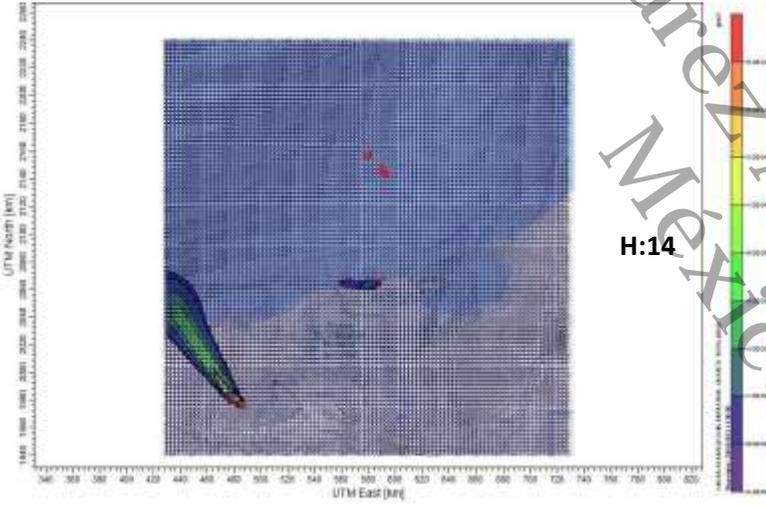
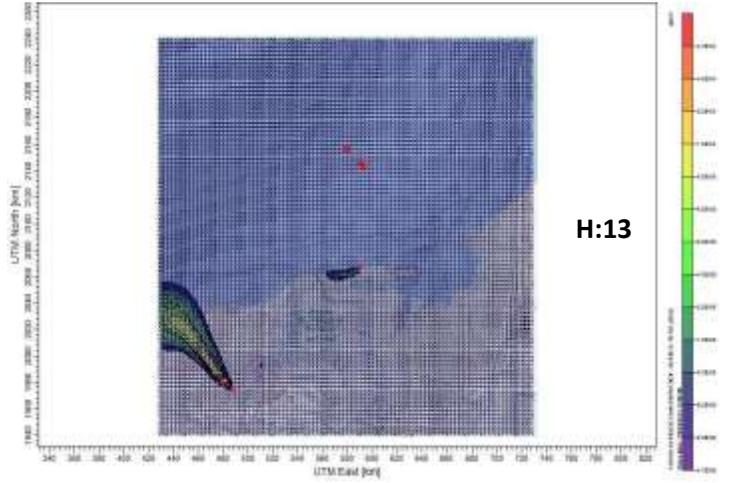
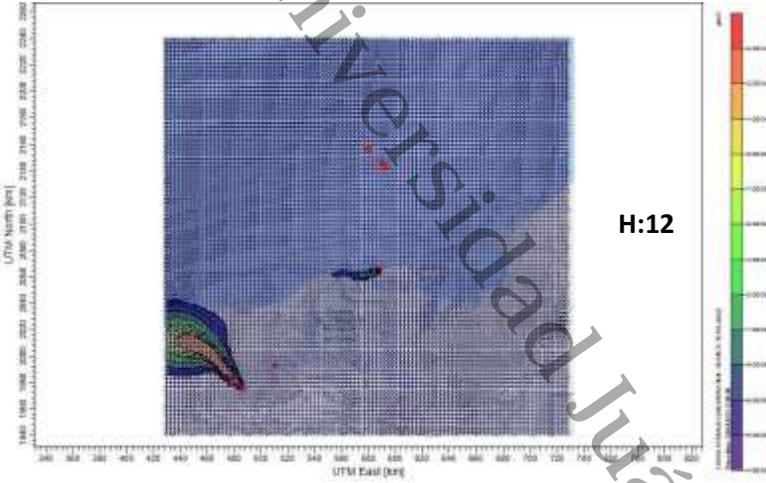


H:10

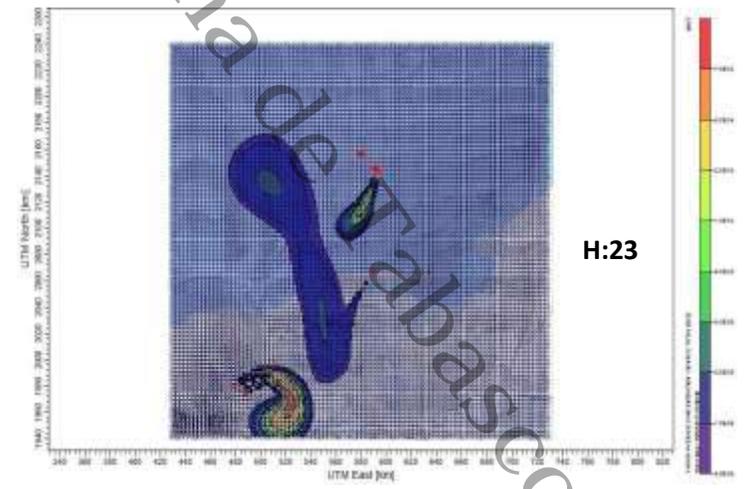
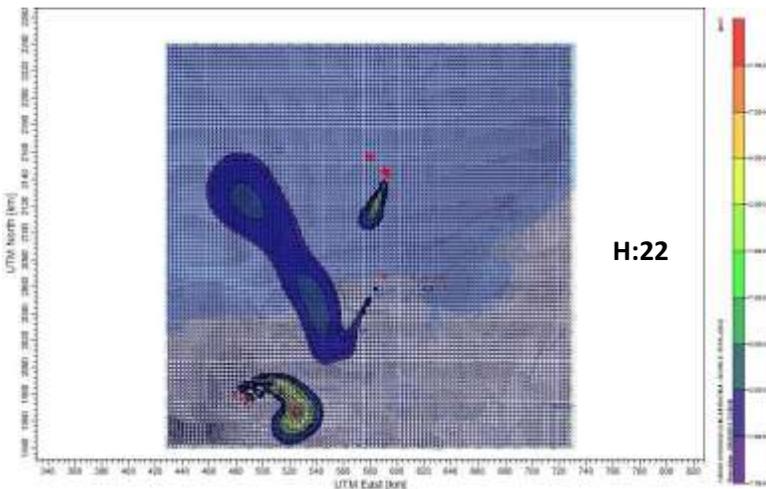
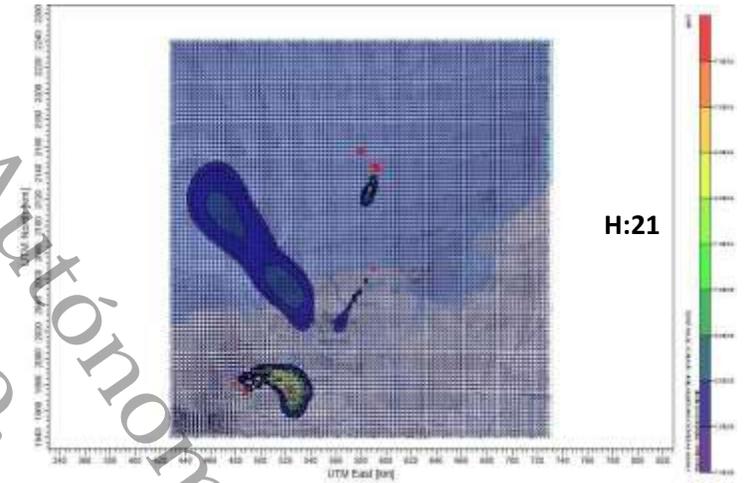
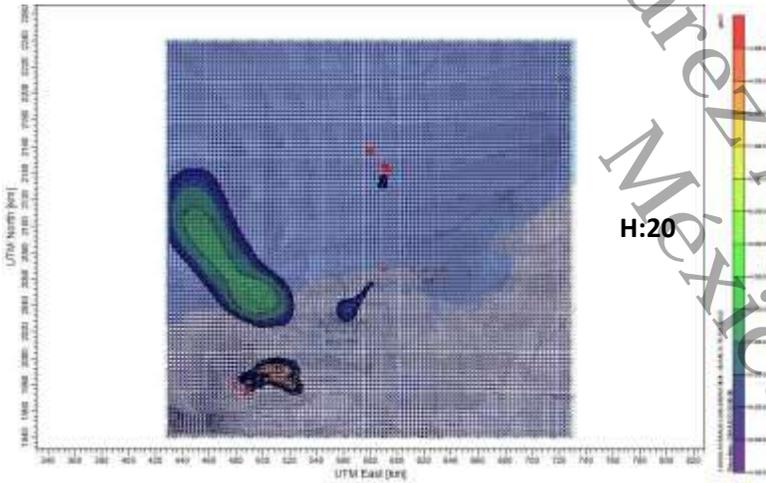
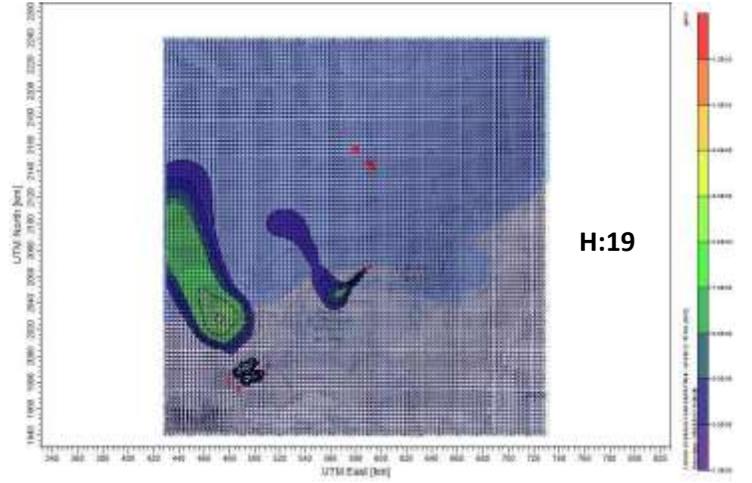
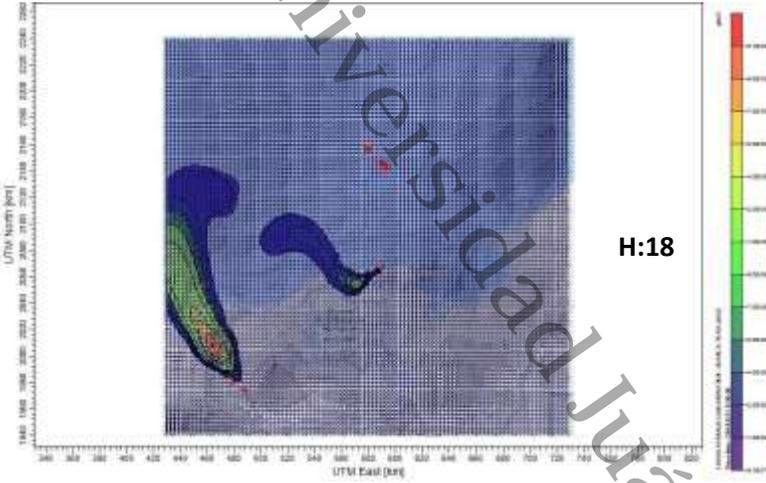


H:11

Universidad Juárez Autónoma de México.
Maestría en Ciencias Ambientales de Tabasco.

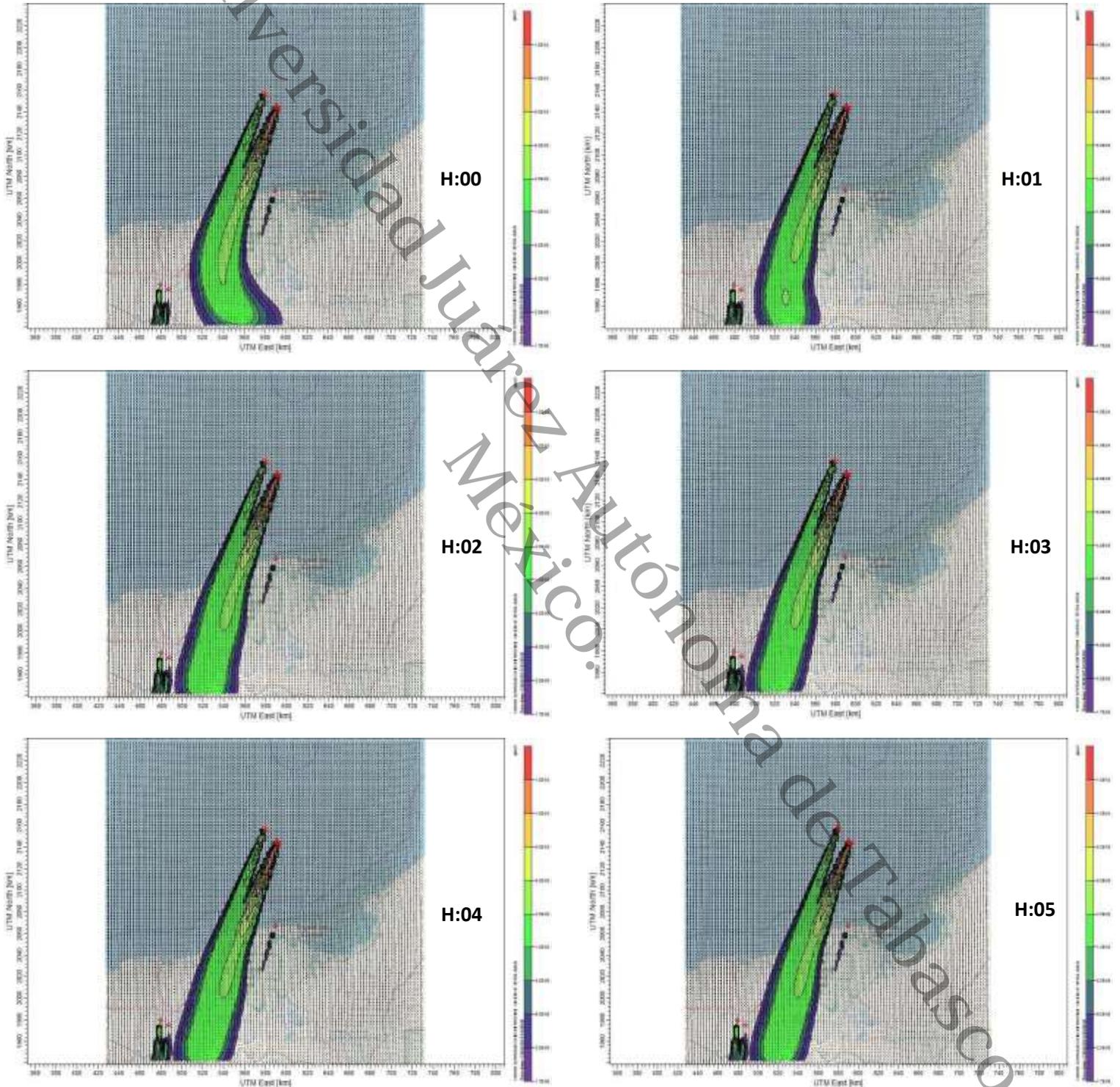


Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México
de Tabasco

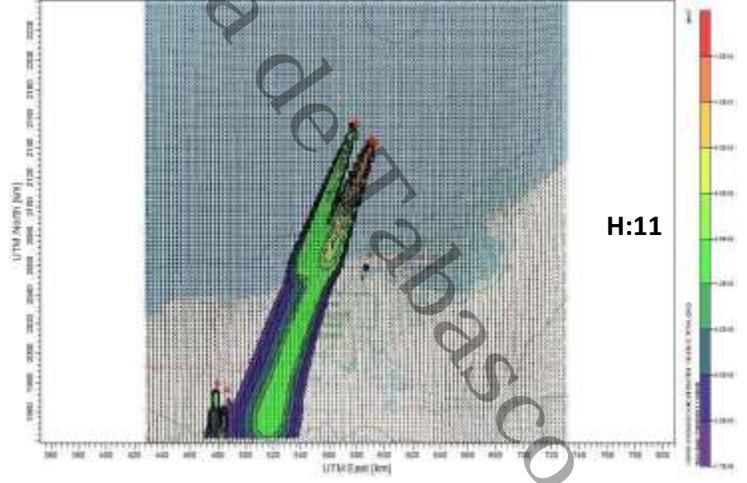
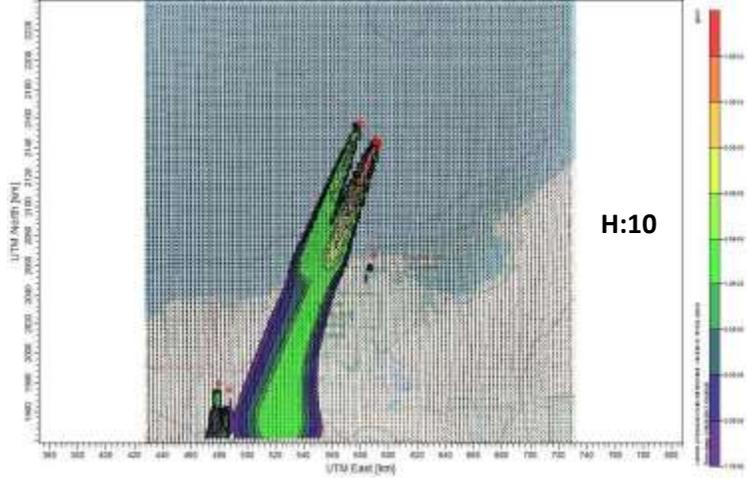
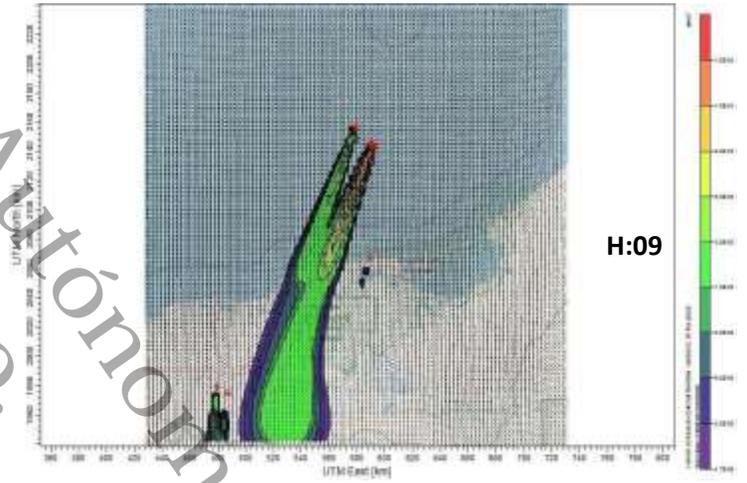
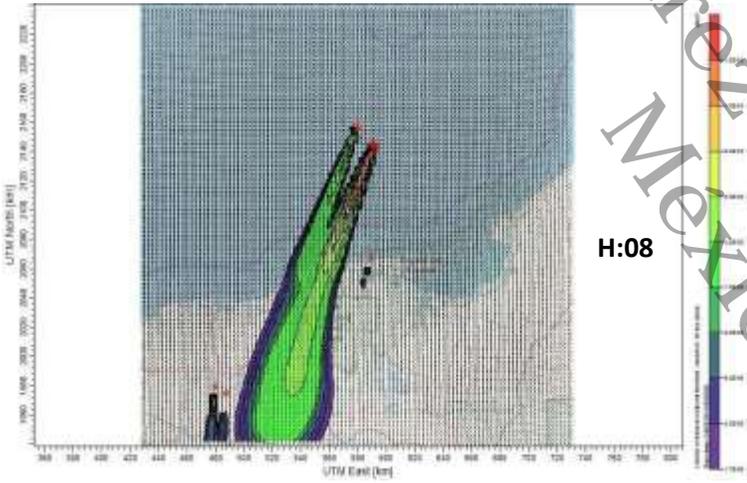
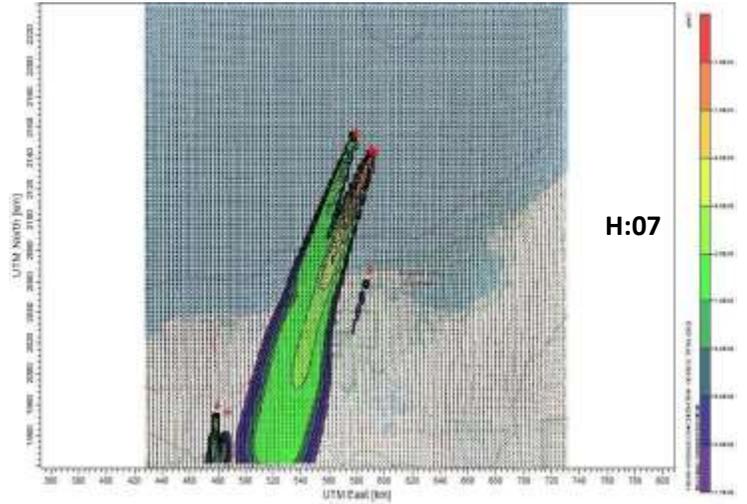
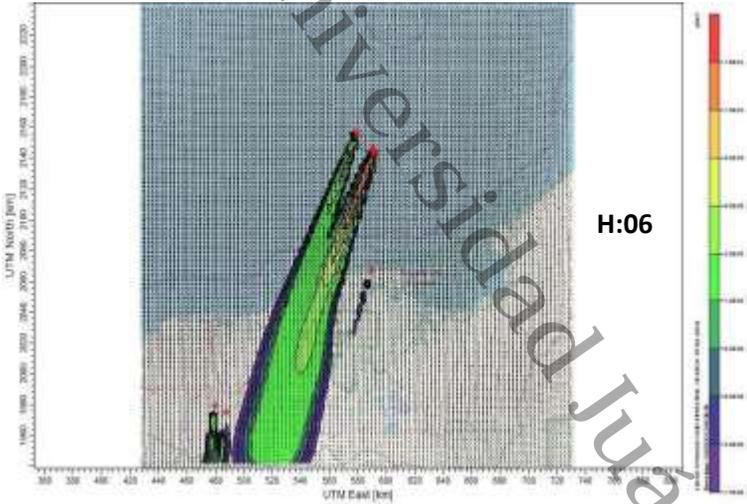


Plumas generadas mediante el uso del CalpuffView para los tres días analizados en base a los inventarios de emisión de Pemex en gramos por metro cubico.

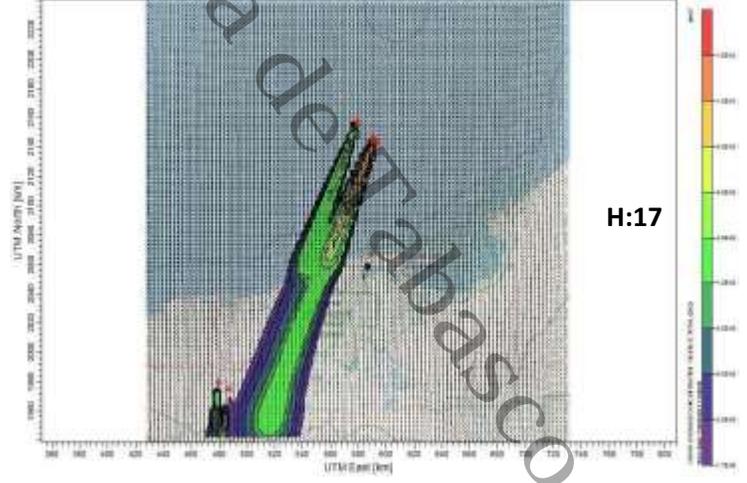
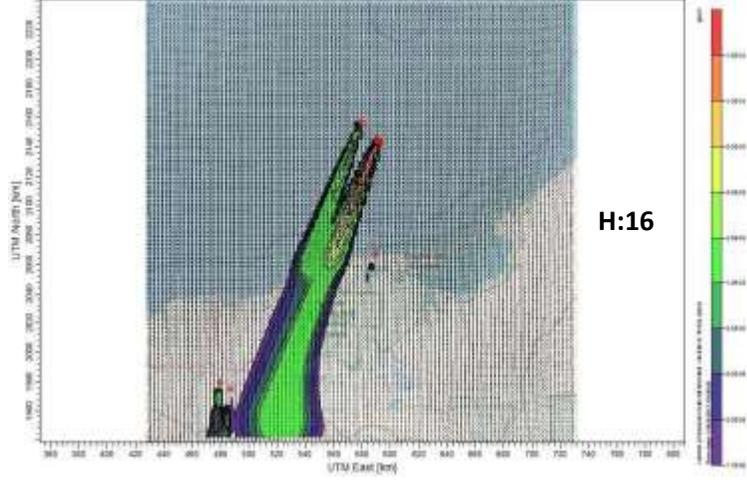
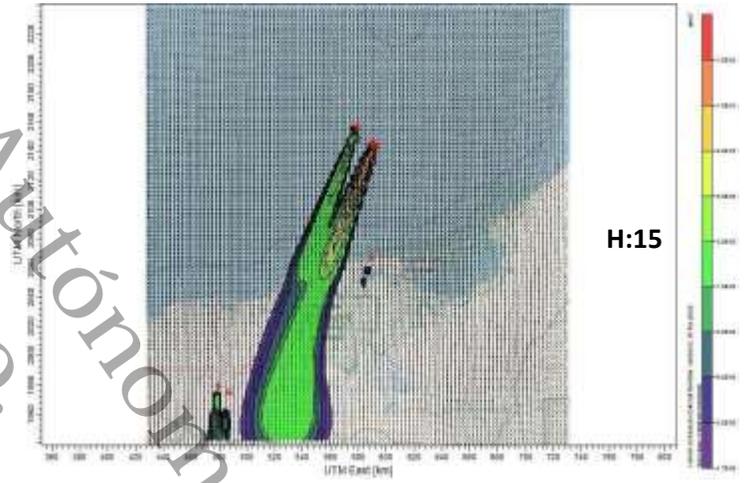
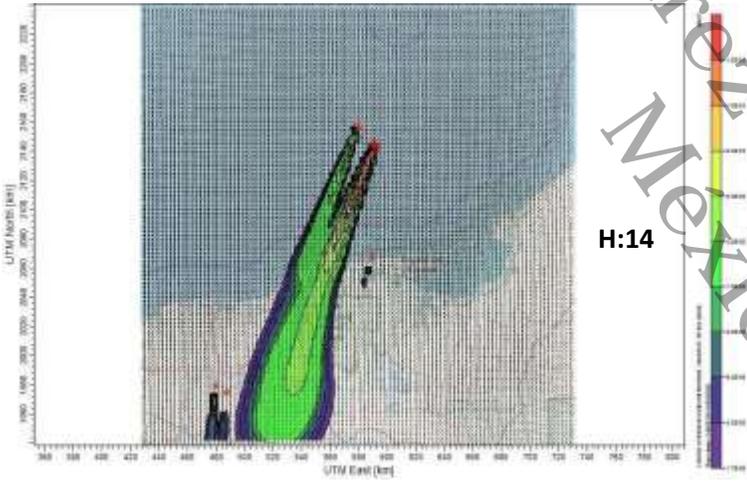
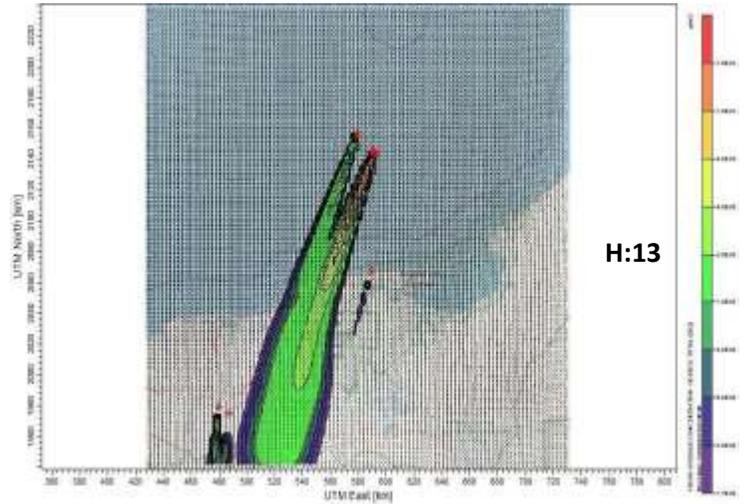
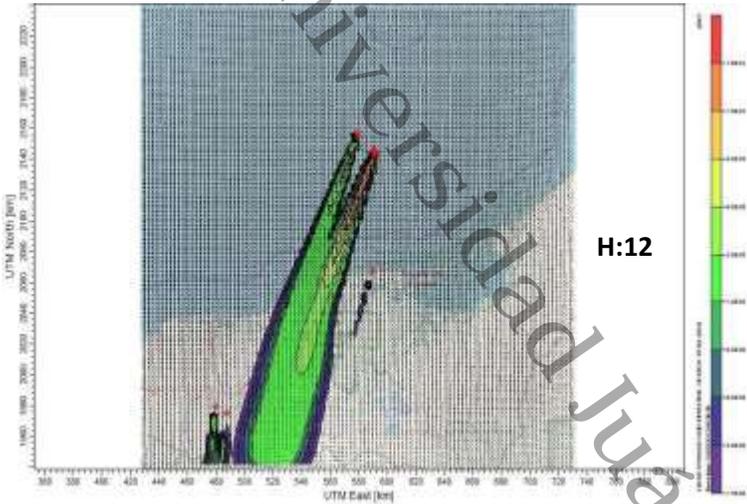
1 de Febrero de 2013.

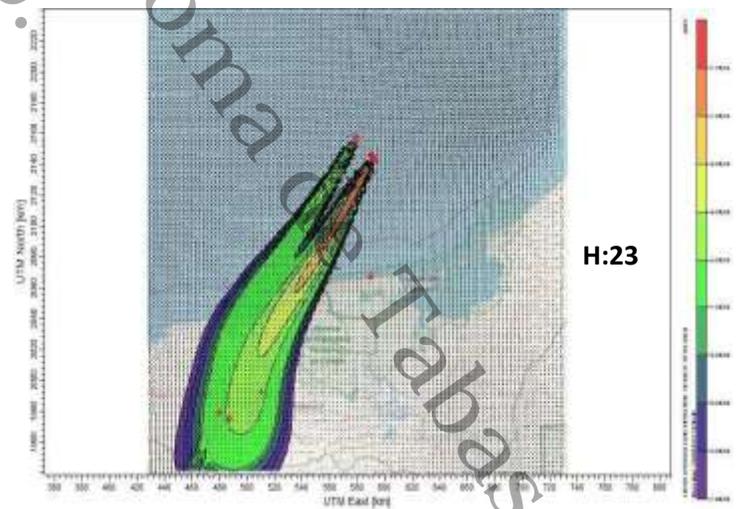
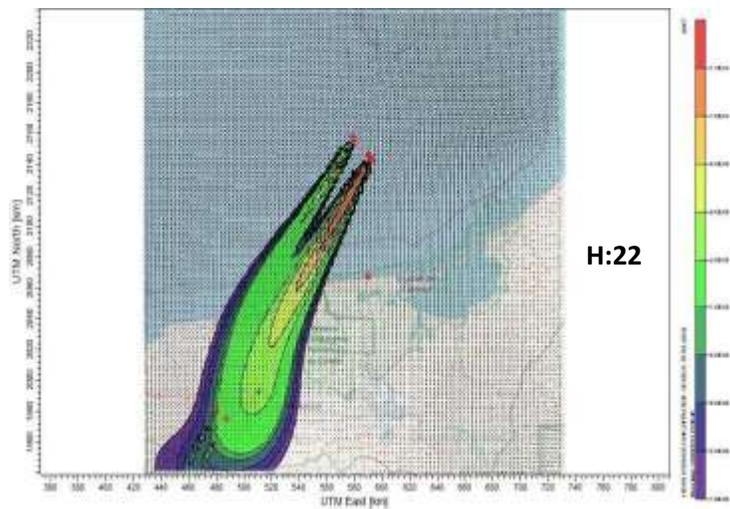
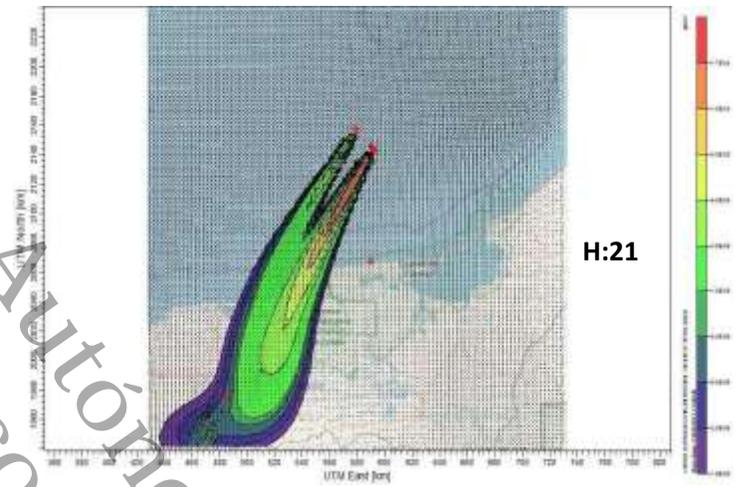
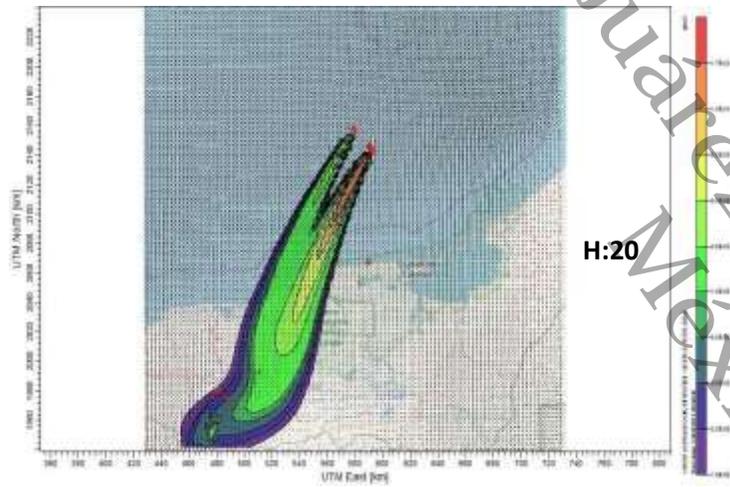
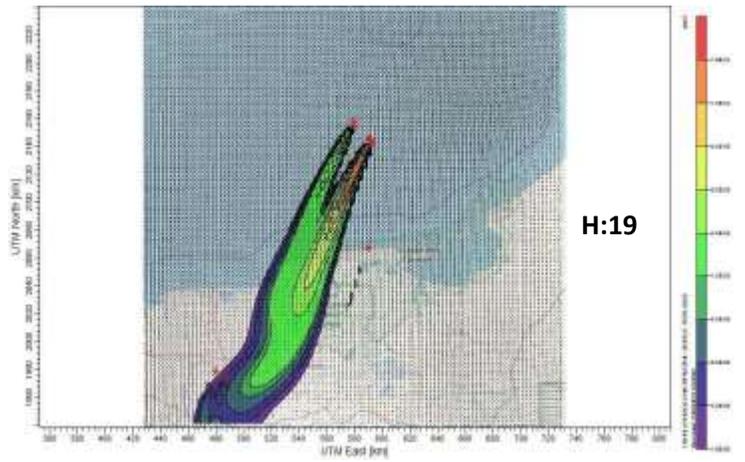
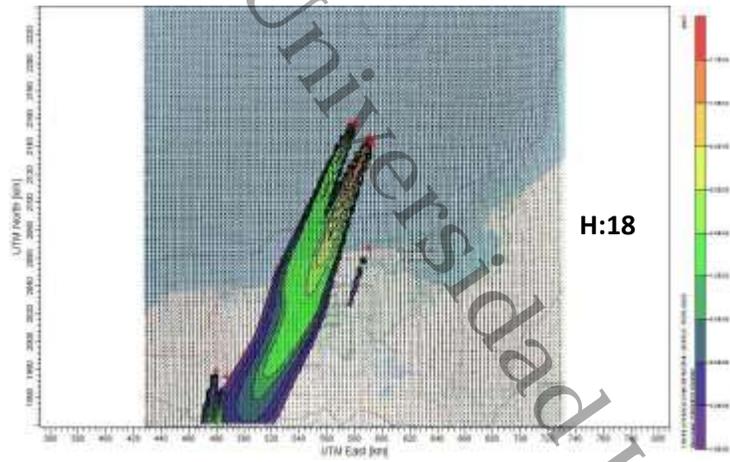


Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México.
Autónoma de Tabasco.

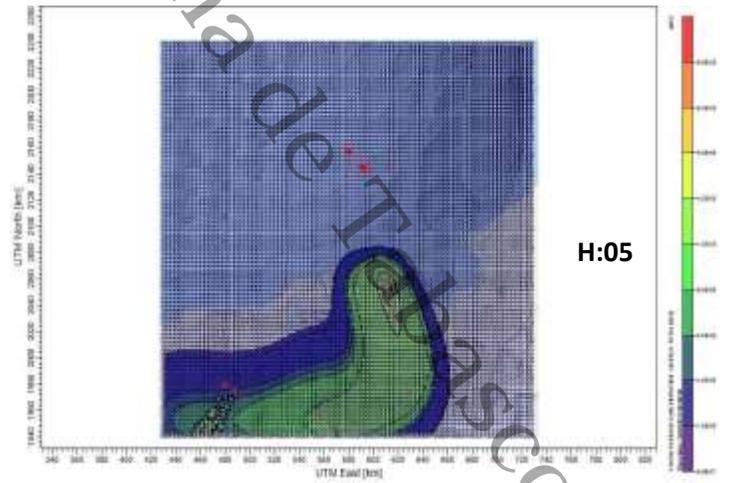
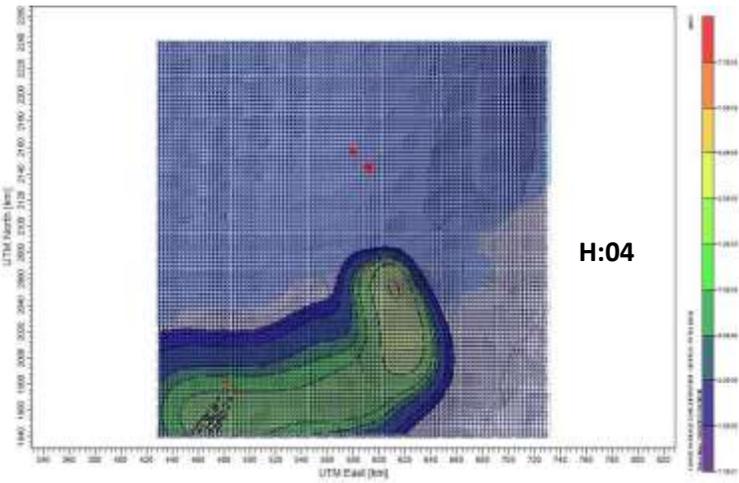
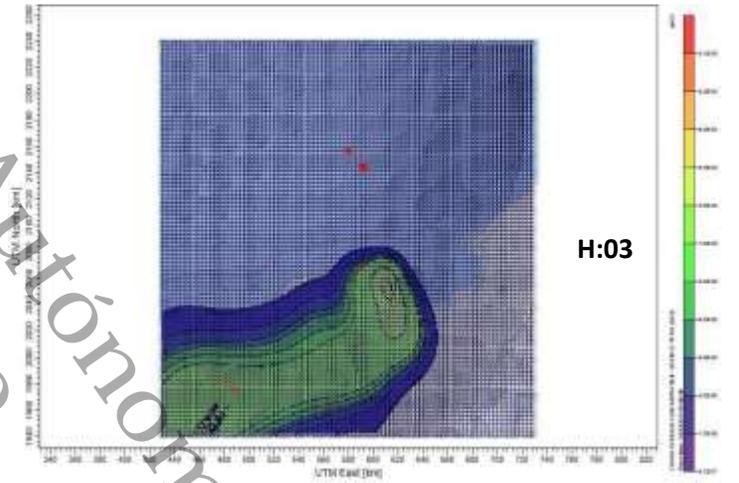
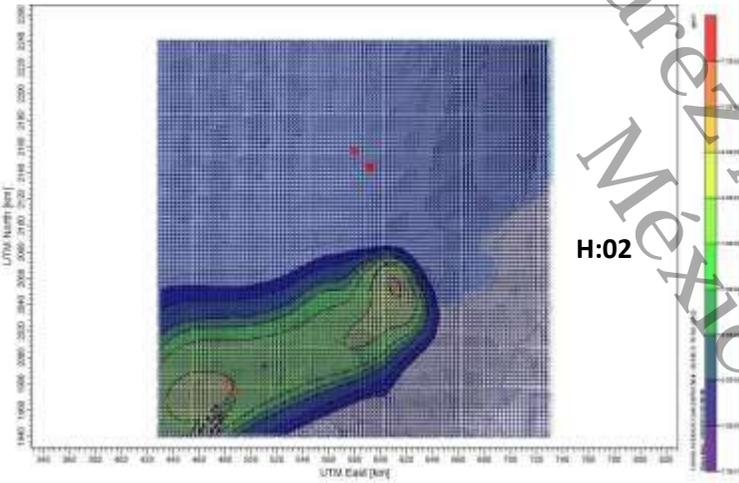
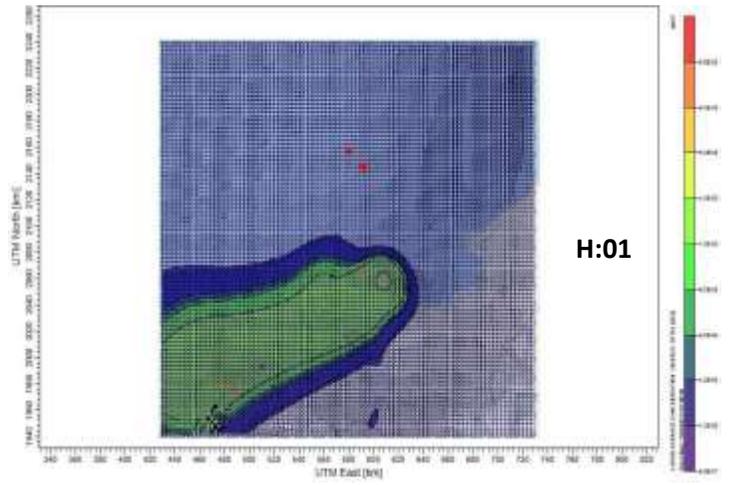
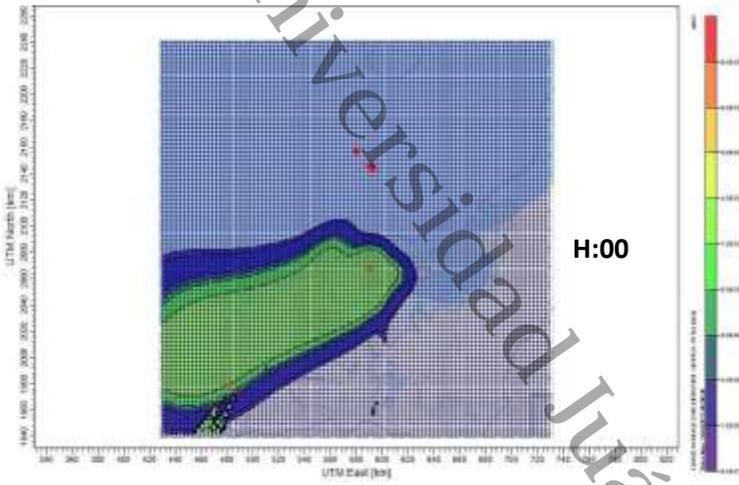


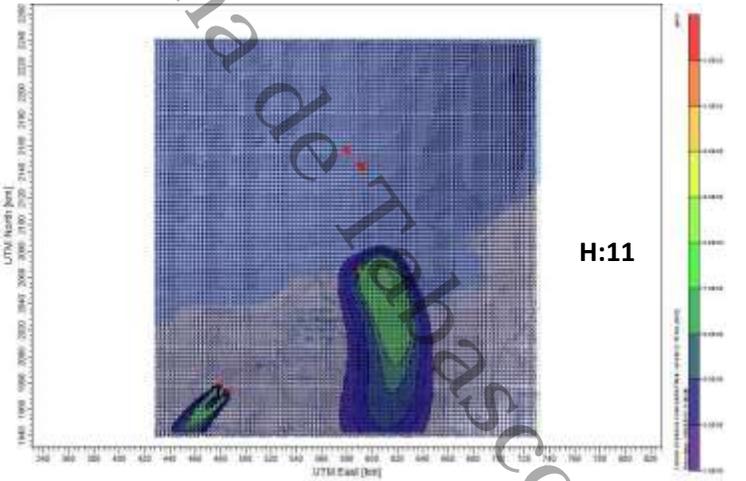
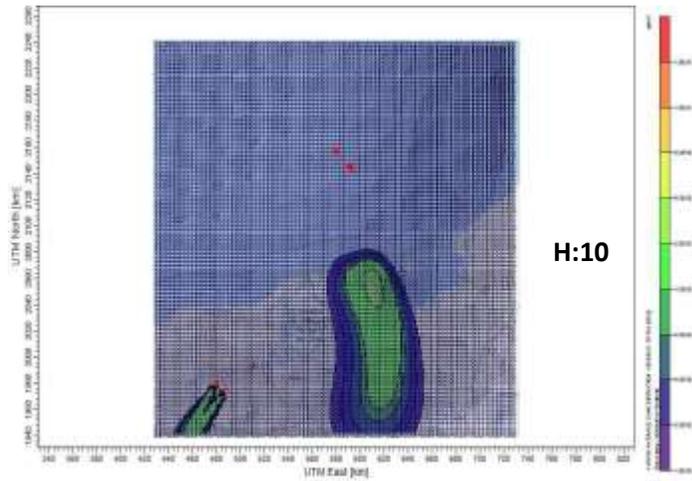
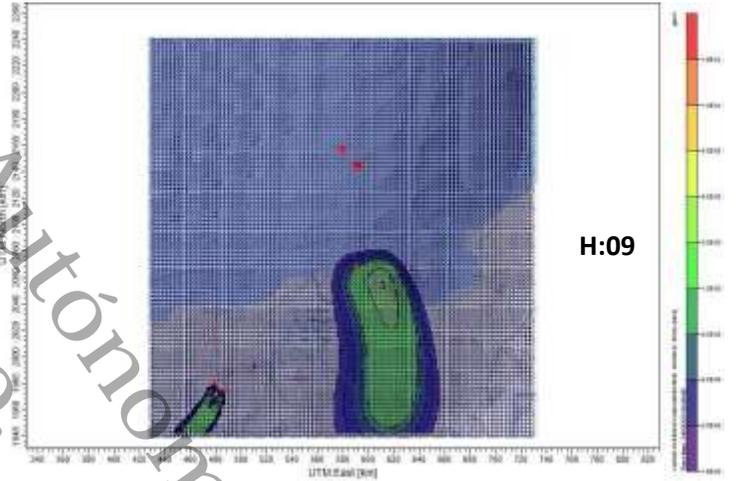
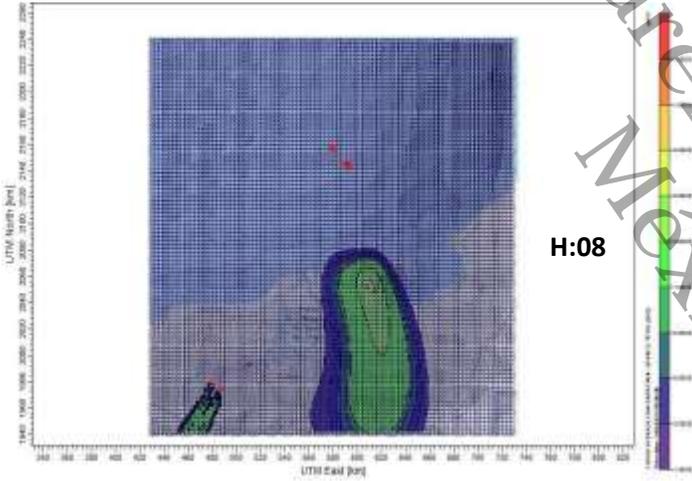
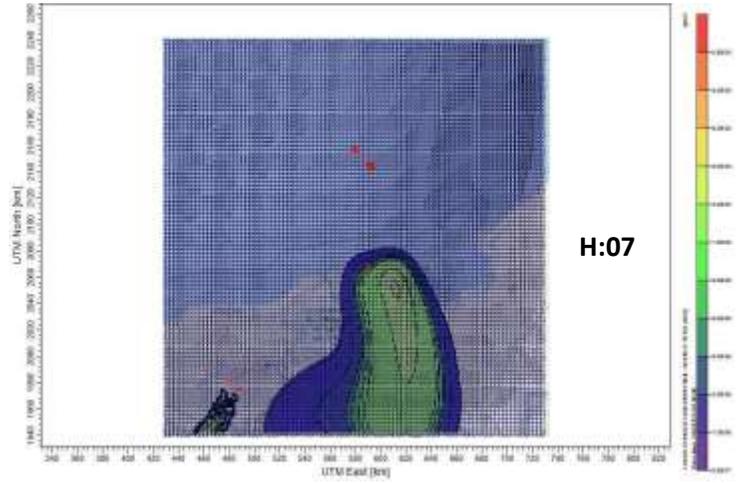
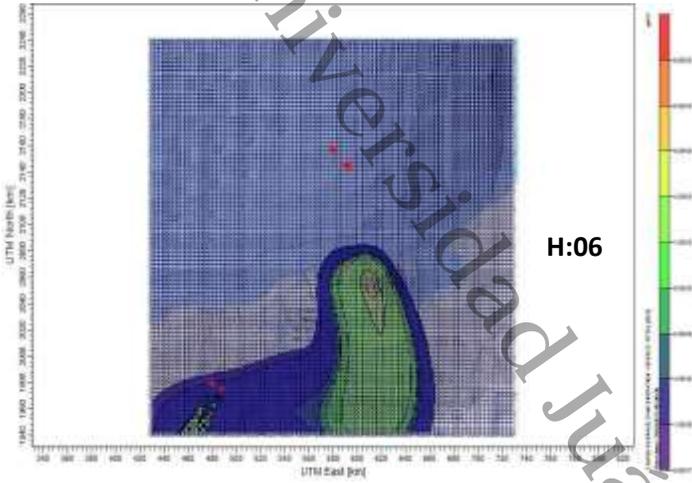
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Mexico.
Autónoma de Tabasco.

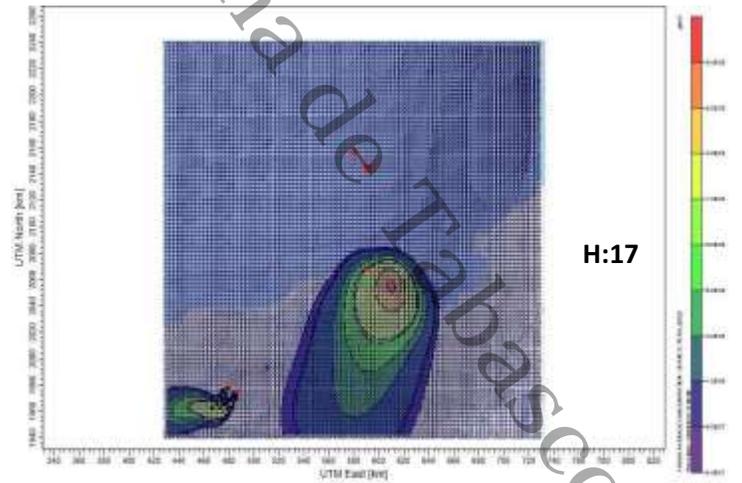
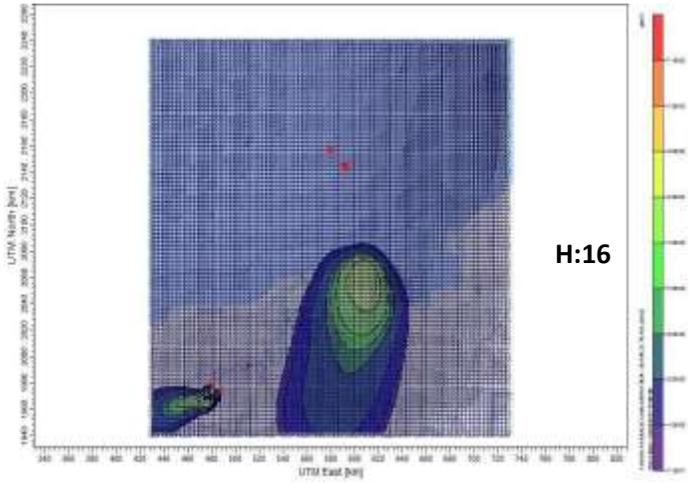
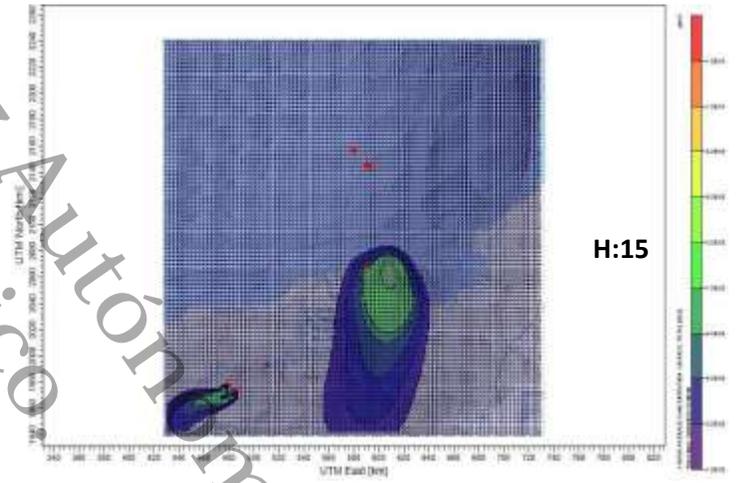
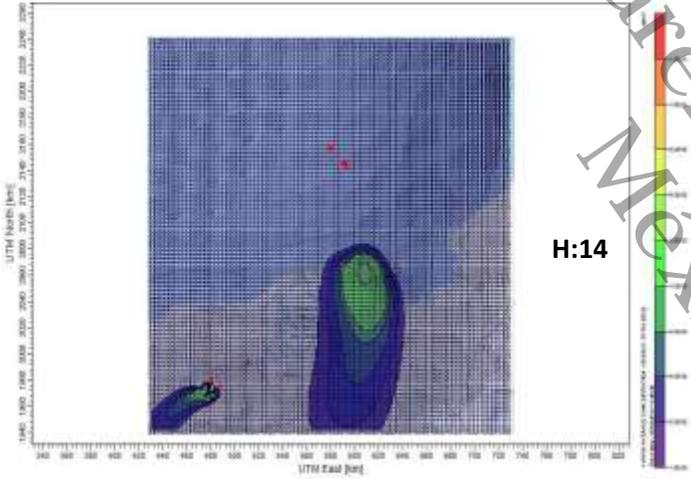
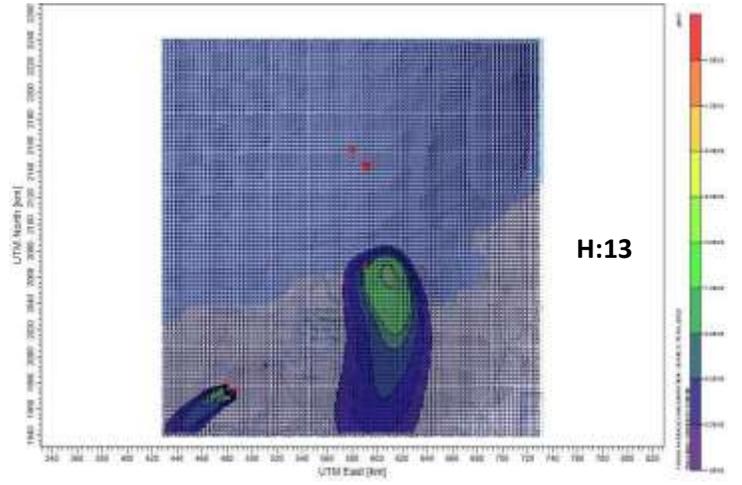
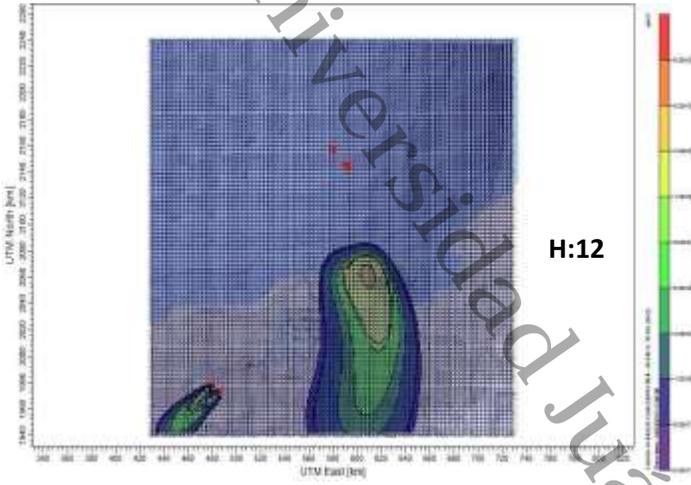


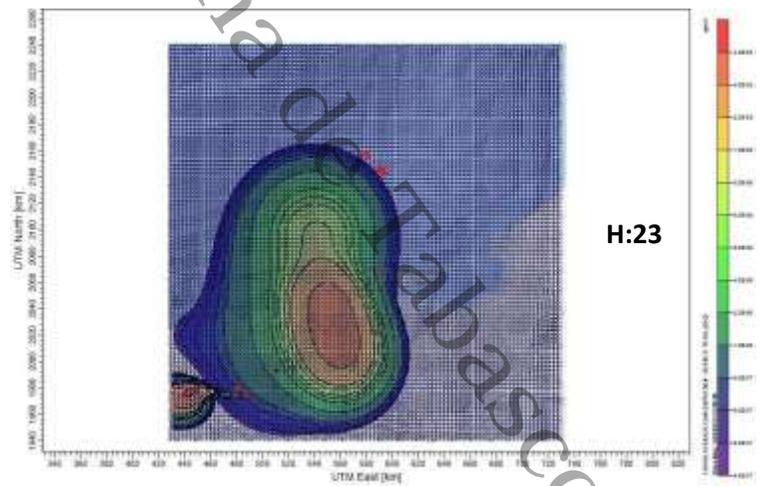
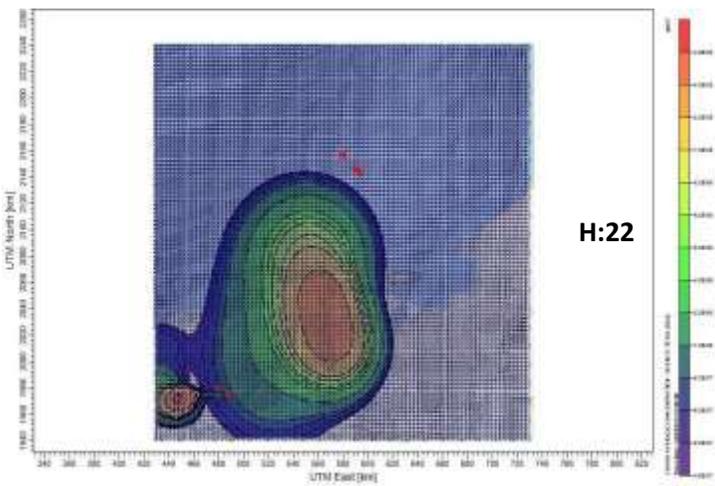
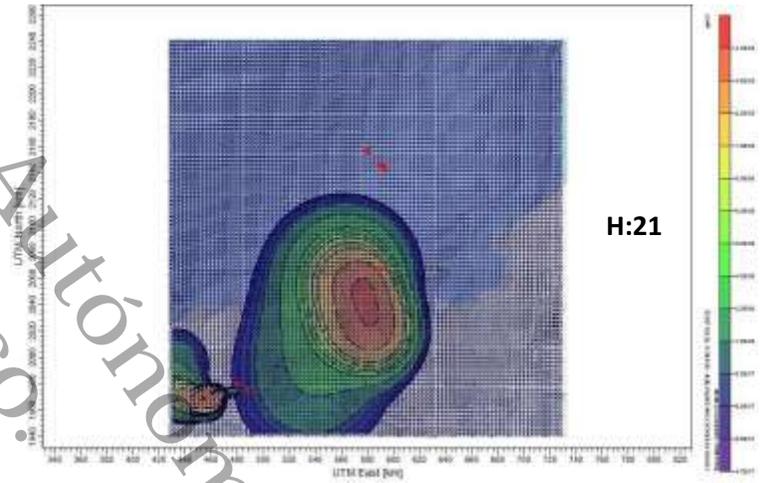
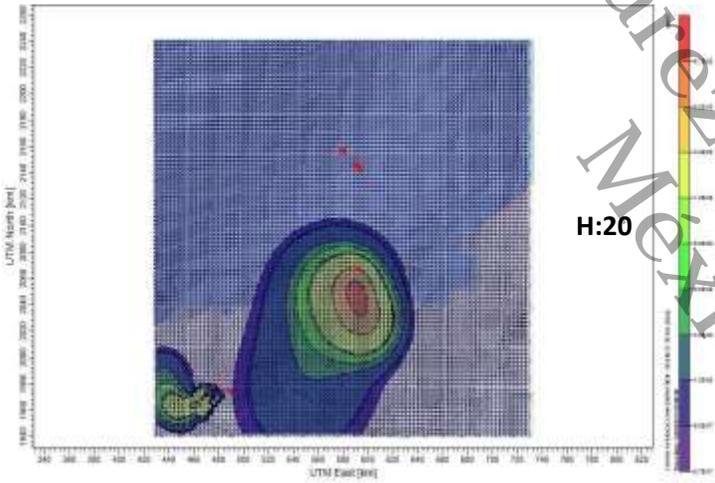
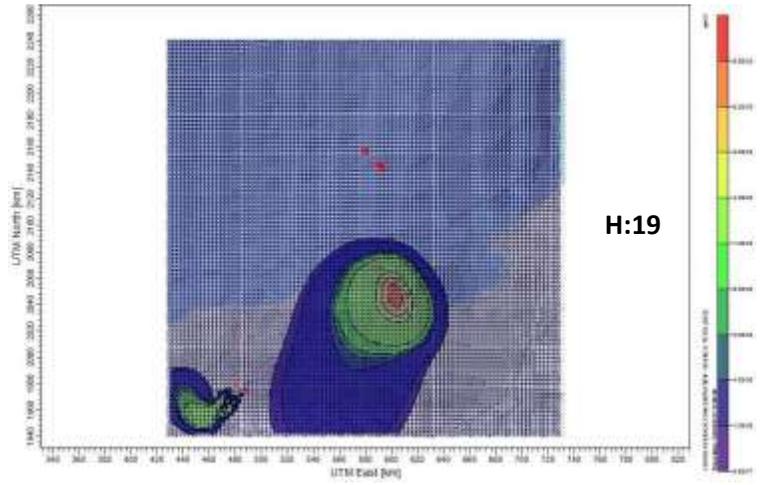
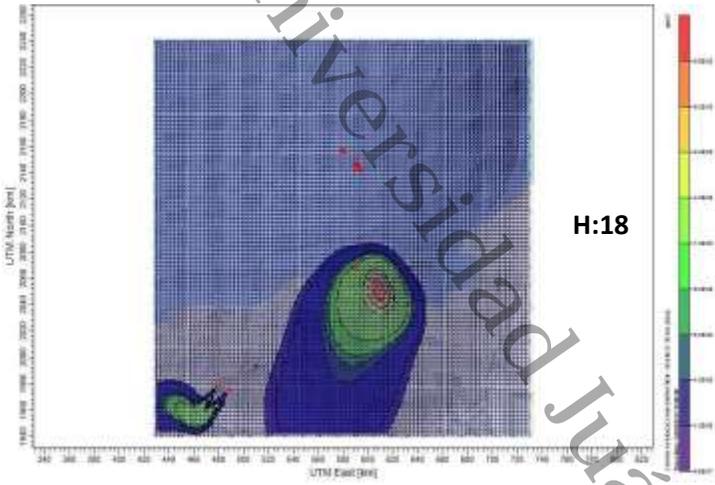


24 de Febrero de 2013

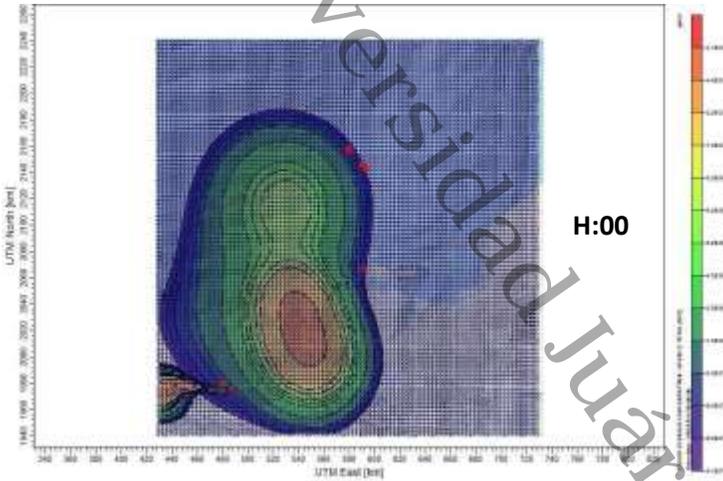




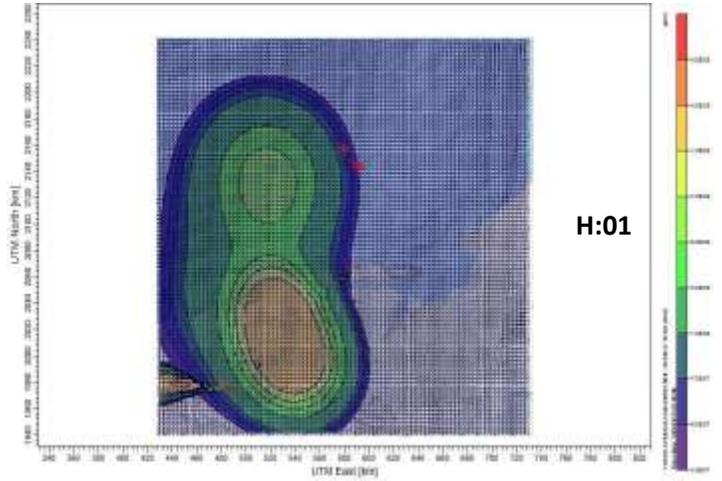




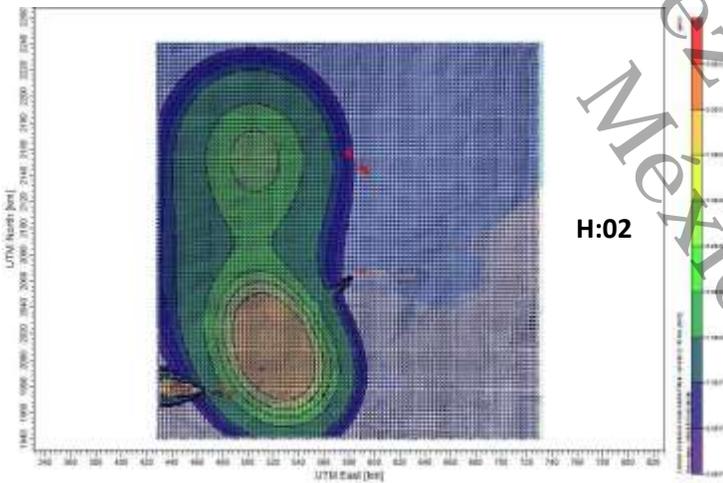
25 de Febrero de 2013



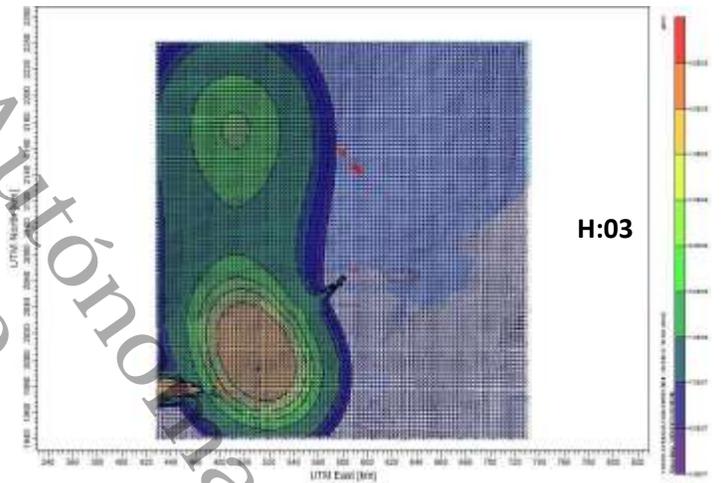
H:00



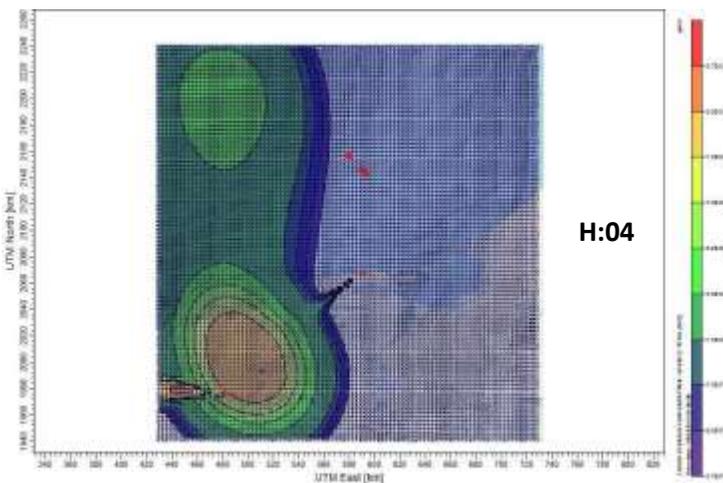
H:01



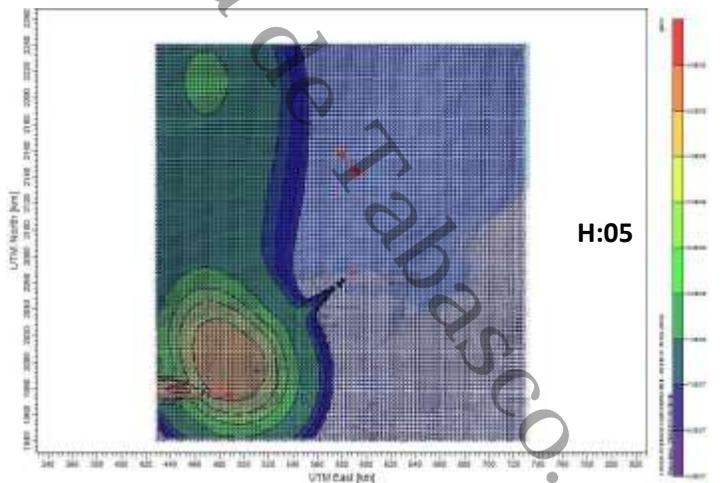
H:02



H:03



H:04



H:05

