



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE  
ORIGINADA  
POR LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES  
EN LA REGIÓN SUR DEL GOLFO DE  
MÉXICO

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL - AIRE

P R E S E N T A :

ING. GILDARDO BERMEO YOSSA



TUTOR:

M.C. VICENTE FUENTES GEA

Junio de 2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA  
Secretario: Dr. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO  
Vocal: M.C. VICENTE FUENTES GEA  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. ARMANDO AGUILAR MÁRQUEZ  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ

Lugar donde se realizó la tesis:

EDIFICIO DE POSGRADO FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

---

M. C. VICENTE FUENTES GEA

*A Dios mismo y la siempre virgen Santa María de Guadalupe.*

*A mi familia que fue mi motivo, paciencia, sacrificio y  
lucha ante las adversidades en este nuevo escalón.*

*A este país que me dio la oportunidad de estudiar y aspiro  
haberle retribuido una parte de lo mucho que me aportó.*

## AGRADECIMIENTOS

Al M.C. Vicente Fuentes Gea, por su orientación, paciencia, consejos y apoyo en el desarrollo de este proyecto y frente a las diversas situaciones enfrentadas en este país.

A los miembros de mi comité tutorial, Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, Dr. Armando Aguilar Márquez, Dr. Enrique César Valdez, que aportaron y enriquecieron este documento, así mismo, contribuyeron al desarrollo del pensamiento crítico y científico para mi desarrollo profesional.

Al Dr. José Agustín García Reynoso por la información dada, orientación, paciencia, amabilidad y por compartir su experiencia durante el desarrollo de este trabajo.

A los doctores Víctor Orlando Magaña Rueda y Ernesto Dos Santos Caetano Neto, por su orientación en el desarrollo del componente meteorológico.

A Diego y Cata, Camilo, Juan, Melissa, Carvajal, Jimmy, Alexa, Maribel y mi otra gente Colombiana, que sin su compañía, apoyo, afecto y solidaridad hubiese sido difícil mi estancia.

A mis amigas Mexicanas, Dianita, Yunuen, Flor y compañeros que me ayudaron a vivir esta nueva experiencia en México lindo.

A mis amigos en Colombia, Peña y Anderson, mi gente de la Secretaria de Salud del Huila por su apoyo, amistad y contacto permanente. Así mismo a Carmen por lo que posiblemente significó mi estancia lejos de Colombia.

Al CONACYT por el apoyo económico otorgado para la realización de esta investigación brindándome la posibilidad de crecer más, al estudiar en México.

# CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE ECUACIONES.....	7
LISTA DE TABLAS.....	8
RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
OBJETIVOS.....	11
Objetivo principal.....	11
Objetivos específicos.....	11
CAPITULO 1 ZONA DE ESTUDIO.....	12
1.1 BREVE HISTORIA DE LA EXPLORACION Y PRODUCCION DE PETROLEO EN EL GOLFO DE MÉXICO.....	13
1.2 PLATAFORMAS EN EL GOLFO DE MÉXICO.....	15
1.2.1 Plataformas de perforación.....	15
1.2.2 Plataforma de producción.....	15
1.2.3 Plataforma de enlace.....	15
1.2.4 Plataforma habitacional.....	16
1.2.5 Plataforma de rebombeo.....	16
1.2.6 Plataforma de almacenamiento de diesel.....	16
1.2.7 Plataformas de compresión de gas.....	16
1.2.8 Plataforma de separación y quemador.....	16
1.3 CARACTERÍSTICAS SOCIO AMBIENTALES.....	17
1.3.1 Población.....	17
1.3.2 Industria.....	17
1.3.3. Zonas naturales.....	18
1.3.4. Emisiones atmosféricas por la producción y explotación de Hidrocarburos.....	22
1.3.5. Calidad del aire.....	23

CAPITULO 2. ANTECEDENTES.....	25
2.1 ESTUDIOS AMBIENTALES REALIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	25
2.2 USO DE MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	26
2.3 USO DEL MODELO CALPUFF EN MÉXICO Y EN OTROS PAÍSES.....	27
CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS EMPLEADOS.....	28
3.1 TIPOS DE MODELOS DE CALIDAD DEL AIRE.....	28
3.1.1. Grado de complejidad.....	28
3.1.2. Aplicación.....	30
3.2 MODELO DE DISPERSIÓN ATMOSFERICA CALPUFF .....	30
3.2.1. Componente Calmet.....	32
3.2.2. Componente Calpuff.....	34
3.2.3. Componente Calpost.....	38
3.3 MODELO METEOROLÓGICO MM5.....	38
CAPITULO 4. METODOLOGÍA.....	41
4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....	42
4.2 SELECCIÓN Y CONOCIMIENTO DEL MODELO DE DISPERSIÓN.....	43
4.3 CORRIDA DE PRUEBA .....	43
4.4 DETERMINACIÓN DEL USO DEL MODELO METEOROLÓGICO PARA DATOS DE ENTRADA DEL COMPONENTE CALMET .....	45
4.5 SELECCIÓN DEL PERIODO DE SIMULACIÓN.....	46
4.5.1. Identificación y evaluación de las estaciones meteorológicas.....	46
4.5.2. Selección de eventos propicios para determinar el grado de contaminación de la costa por las emisiones provenientes de la zona de quemadores.....	47
4.6 USO Y TOMA DE DATOS DE SALIDA DEL MODELO METEOROLÓGICO MM5 .....	48
4.7 MODIFICACIÓN Y USO DEL COMPONENTE CALPUFF.....	48
4.7.1. Simular quemador como si fuera chimenea equivalente .....	49
4.7.2. Modificación del código fuente. ....	50
4.8 EMISIONES .....	50
4.9 LINEAS DE ISO - CONCENTRACIÓN.....	51

4.10 GRÁFICOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	51
CAPITULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	52
5.1 PERIODO DE SIMULACIÓN .....	52
5.2 CHIMENEA EQUIVALENTE, MODIFICACIÓN AL CODIGO FORTRAN DISEÑADO PARA EL CALPUFF .....	55
5.3 EMISIONES ATMOSFÉRICAS .....	56
5.4 NIVELES DE CONTAMINACIÓN Y ÁREA DE INFLUENCIA DE LAS EMISIONES DE LOS QUEMADORES.....	58
5.4.1 Distribución de concentraciones.....	58
5.4.2 Concentraciones a distancias entre 85 y 90 km de la zona de quemadores y radio de afectación .....	60
5.4.3 Valores máximos de concentración.....	64
5.5 LIMITACIONES Y ÁREA DE OPORTUNIDAD .....	67
5.5.1 Emisiones atmosféricas.....	67
5.5.2 Condiciones meteorológicas .....	68
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
6.1 CONCLUSIONES.....	69
6.2 RECOMENDACIONES .....	70
BIBLIOGRAFÍA .....	71
ANEXOS .....	77
ANEXO A .....	78
ANEXO B. ....	82
ANEXO C .....	84
ANEXO D .....	99
ANEXO E .....	101
ANEXO F.....	113
GLOSARIO.....	115



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Delimitación de la zona de estudio.	12
Figura 1.2. Ubicación de los diferentes campos de exploración y producción de Petróleo Sonda de Campeche.	14
Figura 1.3. Ubicación de las áreas naturales protegidas de la Sonda de Campeche.	19
Figura 1.4. Imagen de Los Pantanos de Centla.	20
Figura 1.5. Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos.	21
Figura 1.6. Fotografía aérea de la reserva de la biosfera Los Petenes.	21
Figura 1.7. Quema de gases de exceso en un plataforma ubicada en la Sonda de Campeche	23
Figura 3.1. Esquema de un modelo de dispersión.	29
Figura 3.2. Esquema principal del modelo de dispersión Calpuff.	31
Figura 3.3. Pantalla principal de acceso al Calpuff.	31
Figura 3.4. Esquema principal Calmet y archivos de entrada y salida empleados.	34
Figura 3.5. Esquema principal Calpuff y archivos de entrada y salida empleados.	34
Figura 3.6. Esquema principal Calpost y archivos de entrada y salida empleados.	38
Figura 3.7. Anidamiento, a un modelo global y a un modelo de área limitada.	39
Figura 4.1. Diagrama de flujo de las actividades principales de este proyecto.	42
Figura 4.2. Modificación del archivo de entrada geo.dat.	44
Figura 4.3. Modificación al archivo de entrada surf.dat.	44

Figura 4.4. Campo de viento resultante de la prueba.	44
Figura 4.5. Dispersión de SO <sub>2</sub> resultante de la prueba.	44
Figura 4.6. Dominio de la zona de estudio dados al MM5	46
Figura 4.7. Comparación de un quemador con una chimenea equivalente.	49
Figura 5.1 Trayectoria de los vientos que llegan a la costa y pasan por la zona de emisiones.	53
Figura 5.2 Trayectoria de los vientos que no llegan a la costa de la zona de estudio	53
Figura 5.3 Altura de la capa límite planetaria de la zona de estudio para diciembre de 2004.	54
Figura 5.4 Altura de la capa límite planetaria de la zona de estudio para julio de 2004.	55
Figura 5.5. Penetración de la pluma contaminante simulada para PM <sub>10</sub>	58
Figura 5.6. Penetración de la pluma contaminante simulada para PM <sub>10</sub> , en Ciudad del Carmen.	58
Figura 5.7. Penetración de la pluma contaminante simulada para SO <sub>2</sub> .	59
Figura 5.8. Penetración de la pluma contaminante simulada para SO <sub>2</sub> , en la Ciudad de Carmen.	59
Figura 5.9. Área de posible influencia de las emisiones contaminantes de PM <sub>10</sub> , de los quemadores de la Sonda de Campeche	60
Figura 5.10. Área de posible influencia de las emisiones contaminantes de SO <sub>2</sub> , de los quemadores de la Sonda de Campeche.	60
Figura 5.11. Concentraciones máximas promedio de 24 horas de PM <sub>10</sub> a una distancia de 85 a 90 km desde el máximo valor encontrado en la zona de quemadores	61
Figura 5.12. Concentración máxima promedio de SO <sub>2</sub> en 24 horas entre 85 y 90 Km desde el máximo valor encontrado en la zona de quemadores y concentraciones medidas en Atasta	62
Figura 5.13. Radio de afectación de las emisiones de PM <sub>10</sub> de los quemadores de gases de exceso en la Sonda de Campeche.	63
Figura 5.14. Radio de afectación de las emisiones de SO <sub>2</sub> de los quemadores de gases de exceso en la Sonda de Campeche	64

Figura 5.15. Valores máximos de concentración de $PM_{10}$ en un periodo de 24 horas	65
Figura 5.16. Valores máximos de concentración de $SO_2$ en un periodo de 24 horas	65
Figura 5.17. Trayectoria de la pluma contaminante de $SO_2$ el 21 de diciembre de 2004.	66
Figura 5.18. Trayectoria del viento el 21 de Diciembre de 2004	66
Figura 5.19. Altura de la capa límite planetaria del 10 al 30 de diciembre de 2004	66
Figura 5.20. Altura de capa límite planetaria del 20 al 22 de diciembre de 2004	66

## LISTA DE ECUACIONES

	Pag.
Ecuación 3.1. Concentración estimada por acción del Puff	37
Ecuación 3.2. Componente vertical gaussiana.	37
Ecuación 3.3. Concentración estimada en un modelo Gaussiano.	37
Ecuación 4.1. Fuerza de boyancia en un quemador.	49
Ecuación 4.2. Diámetro equivalente	50
Ecuación 4.3. Altura de chimenea.	50
Ecuación 4.4. Altura de flama.	50
Ecuación 5.1. Cálculo de emisiones de partículas suspendidas.	56
Ecuación 5.2. Cálculo de emisiones de SO <sub>2</sub>	57

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
Tabla 1.1. Población total de los estados que abarcan la zona de estudio,	17
Tabla 1.2 Emisiones de partículas y óxidos de azufre estimados por área de producción en miles de toneladas al año.	22
Tabla 1.3. Concentraciones de dióxido de azufre en las redes de monitoreo atmosférico de Dos Bocas y Atasta.	24
Tabla 3.1. Opciones generales de entrada en el componente Calpuff.	35
Tabla 4.1. Factores de emisión de PM <sub>10</sub> y SO <sub>2</sub> emitidos por quemadores.	50
Tabla 5.1 Resultados de la aplicación de la metodología de chimenea equivalente para diferentes tamaños de quemador.	56

## RESUMEN

---

El empleo de modelos de simulación para evaluar las dispersiones de los contaminantes atmosféricos permite conocer de manera general, el impacto que dichas emisiones ocasionan en la calidad del aire de una zona determinada. El presente trabajo presenta las actividades desarrolladas mediante el uso del modelo de dispersión atmosférica denominado Calpuff, en la región sur del Golfo de México, donde se concentra la mayor actividad de exploración y producción de hidrocarburos que se encuentra en México, en la denominada Sonda de Campeche. La aplicación de este modelo se centro en la simulación de la dispersión las emisiones de  $PM_{10}$  y  $SO_2$ , proveniente de los quemadores de gases de exceso de esta zona.

Aunque ya se habían realizado trabajos de este tipo en la zona mencionada, el presente se diferencia de los otros, en que prioriza eventos críticos de contaminación debido a condiciones atmosféricas adversas para una buena dispersión de contaminantes y que además, la pluma contaminante se dirigía hacia la costa producto de los fenómenos meteorológicos, donde se encuentran ciudades de importancia y ecosistemas sensibles, que pudiesen ser impactados al llegar la pluma contaminante.

Los escenarios objeto de las simulaciones corresponden al mes de diciembre de 2004, 1 de abril de 2007, 3 de septiembre de 2004 y 17 de junio de 2006.

Como resultado de las simulaciones de la dispersión de contaminantes provenientes de la quema de gases de exceso en la sonda de Campeche, se encontró que existe un posible aporte de contaminantes atmosféricos, en cuanto a dióxido de azufre y  $PM_{10}$ , en centros poblacionales y áreas naturales de importancia, sin exceder en ningún momento las Normas de Calidad del Aire Vigentes.

## INTRODUCCIÓN

---

Al ser la exploración y producción de petróleo y sus derivados una rama importante en la economía de México, junto con el turismo y las actividades agropecuarias, relevantes los estudios y actividades que permitan una mejora en los procesos productivos y las interacciones de éstos con el ambiente, ya que esta industria genera impactos en todos los factores ambientales, como lo es el aire, el suelo, el agua, el componente humano y el biótico.

La contaminación atmosférica se caracteriza por presentar fenómenos asociados que impactan no sólo de manera puntual cerca de los sitios de emisión, sino, que el impacto puede llegar a cientos o miles de kilómetros debido a la acción de los vientos.

En el este documento se presenta el resultado de las simulaciones efectuadas para evaluar el impacto en la calidad del aire, en cuanto a dióxido de azufre y partículas menores a 10 micras, ocasionado por la quema de gases de exceso de las actividades de exploración y producción en la Sonda de Campeche, ubicada frente a los litorales de los estados de Tabasco y Campeche en el Sur del Golfo de México. Para esto se empleó el Modelo Calpuff aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, que contiene algoritmos capaces de considerar las variaciones espacio temporales de la meteorología y emisiones de múltiples contaminantes.

El modelo también permite simular las interacciones océano – litoral, que influyen en el transporte de contaminantes en regiones como la mencionada. Además, se realizaron modificaciones al modelo, de tal manera que permitiera tomar en cuenta las emanaciones que caracterizan a los quemadores elevados, situados en la Sonda de Campeche.

Los diferentes resultados fueron plasmados en mapas de iso concentración que permiten observar los niveles probables de concentración y su distribución en el espacio. Así mismo, se realizó la comparación de los resultados con las trayectorias de los vientos y altura de la capa límite planetaria, reportados en la página web de la North American Regional Reanalysis Homepage y algunos datos de concentraciones de dióxido de azufre disponibles por Pemex.

El presente documento se distribuye en seis capítulos, que comprenden la descripción de la zona de estudio en el Capítulo 1, los antecedentes de estudios ambientales y similares

hechos en la zona seleccionada, son descritos en el Capítulo 2. Lo que concierne a las características de los modelos de simulación empleados, se pueden observar en el Capítulo 3. En el Capítulo 4 se describe la metodología empleada para el desarrollo de este trabajo y los resultados obtenidos con su respectivo análisis se encuentran en el Capítulo 5. Las conclusiones y recomendaciones se consignan en el Capítulo 6.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo principal**

Determinar los impactos en la calidad del aire que ocasionan las emisiones a la atmósfera de dióxido de azufre y partículas menores de 10 micras en periodos de 24 horas, provenientes del conjunto de quemadores que operan en la región sur del Golfo de México en la denominada Sonda de Campeche.

### **Objetivos específicos**

Estimar mediante el empleo de factores de emisión apropiados, las emisiones generadas en la Sonda de Campeche como consecuencia de la quema de gases que se realiza en las plataformas de explotación que operan en dicha región.

Determinar las concentraciones de óxidos de azufre y partículas menores de 10 micras y su distribución espacial en la zona Sur del Golfo de México, mediante el uso de un modelo de simulación de la dispersión de contaminantes.

Evaluar la magnitud de los niveles de contaminación aportada por la actividad de explotación de petróleo en el área de estudio, con base a las normas de calidad del aire.



## CAPITULO 1 ZONA DE ESTUDIO

---

La zona de estudio está delimitada por una malla cuadrada de 455 km (207025 km<sup>2</sup>), e integra territorio de seis estados, Yucatán, Campeche, Tabasco, Oaxaca, Chiapas y Veracruz. En ella se encuentran ciudades importantes como, Campeche, Villahermosa y Ciudad del Carmen (Figura 1.1).



Figura 1.1 Delimitación de la zona de estudio (Google Earth, 2009).

## 1.1 BREVE HISTORIA DE LA EXPLORACION Y PRODUCCION DE PETROLEO EN EL GOLFO DE MÉXICO

Después de la proclamación de la ley de expropiación Petrolera durante el periodo presidencial de Lázaro Cárdenas, México comenzó su carrera en la industria del petróleo con una mayor libertad, llegando a producir en 1938 un promedio de 106 mil barriles de petróleo diario. Para el año de 1948, la producción llegaba a los 163 mil barriles diarios y en los años sesenta la producción alcanzó los 331 mil barriles por día. Sin embargo, sólo se suplía la demanda interna y en los años 70 el país se convirtió en importador de combustibles porque la demanda superó la oferta existente.

La mayor parte de la plataforma continental de la península de Yucatán, de aproximadamente 170 mil kilómetros cuadrados, ha sido explorada sísmológicamente desde finales de los años setenta y como consecuencia de estas exploraciones se llevó a cabo el desarrollo de importantes campos de producción como es el caso de Cantarell, denominado así en honor al pescador Rudesindo Cantarell, quien dio aviso de la presencia de una mancha negra en aguas del golfo en 1971.

El primer pozo perforado fue llamado CHAC en honor al dios maya de la lluvia y el primer pozo productivo fue el Cantarell 3, comenzando de esta manera la industria del petróleo costa afuera por parte de México (Figura 1.2).

Para 1982 se contaba con 86 pozos productores y cerca de 72 plataformas, para una producción promedio de 1.9 millones de barriles de crudo al día y 700 millones de pies cúbicos de gas. (Pemex, 1983).

El complejo Cantarell está conformado por alrededor de 162 km<sup>2</sup> con los campos Nohoch, Chac, Akal, Kutz y Sihil. Este complejo está ubicado en la Sonda de Campeche, a aproximadamente 85 km de Ciudad del Carmen en el estado de Campeche, México (Wikipedia, 2009). La producción de esta zona llegó a ser las dos terceras partes de lo producido en todo México en el año 2004 con 2136.4 miles de barriles diarios (Pemex, 2009). El complejo Cantarell cuenta con 190 pozos y 207 plataformas, entre ellas, plataformas satélite, plataformas habitacionales y complejos de producción (Pemex, 2002).

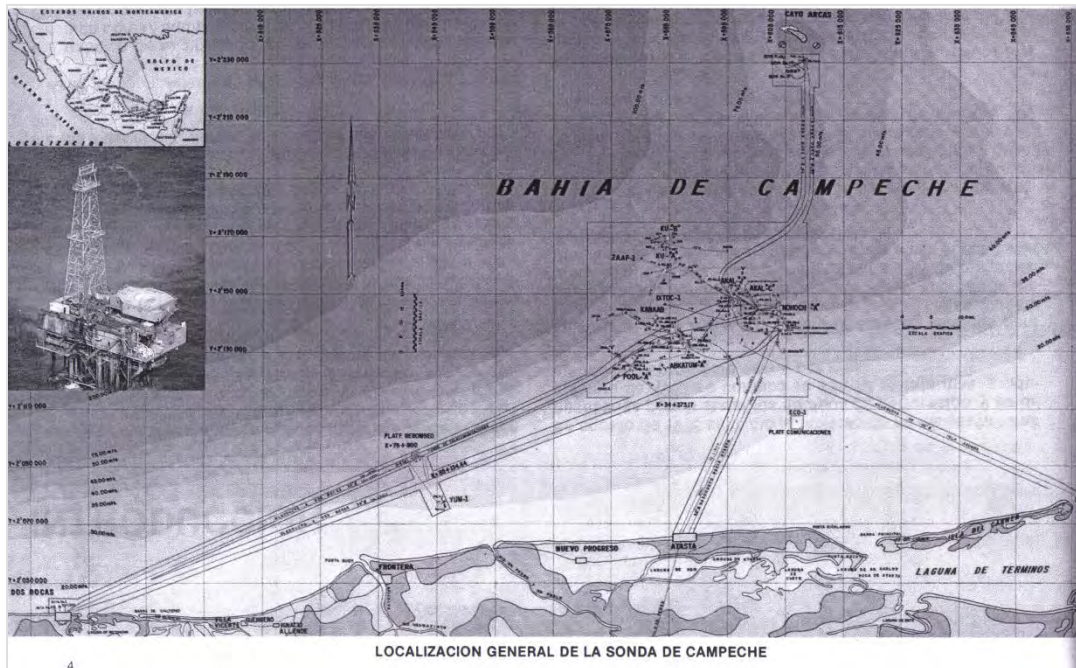


Figura 1.2. Ubicación de los diferentes campos de exploración y producción de petróleo Sonda de Campeche. (Pemex, 1983).

La región Marina Noroeste con 166000 km<sup>2</sup>, la conforman el complejo Cantarell y el complejo Ku-Maloob-Zaap localizado frente a las costas de Tabasco y Campeche, a 105 kilómetros al noreste de Ciudad del Carmen, Campeche. Su historia comenzó con el descubrimiento del campo Ku en 1980 por el Pozo Ha-1A que dio inicio a su producción en marzo de 1981. Posteriormente, se descubrieron los campos Maloob en el año 1984 y Zaap en el año 1991, se extiende en un área de 149.5 kilómetros cuadrados conformado por los campos Ku, Maloob, Zaap, Bacab y Lum, los cuales toman su nombre en honor a la cultura maya; Ku Maloob Zaap cuenta en la actualidad con 28 plataformas marinas de las cuales 2 son plataformas de enlace, 5 habitacionales, 16 de perforación, 4 de producción y 1 de telecomunicaciones. Ku Maloob Zaap cerró el año 2008 con 130 pozos operando (Pemex, 2009).

Para aumentar el margen de producción en el año 2000 se comenzó a inyectar nitrógeno en los pozos construyéndose la planta de producción de nitrógeno. En la actualidad, esta actividad permite sostener la productividad en el área de Cantarell, que ya se encuentra en declive.

Además de estos dos complejos también se encuentra la región Marina Suroeste con los complejos Abkatún – Pol- Chuc y el Litoral tabasco, comprende los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche; siendo manejados desde Ciudad del Carmen. (Pemex, 2002).

## 1.2 PLATAFORMAS EN EL GOLFO DE MÉXICO

Para la ejecución de las diferentes actividades de exploración y producción, se cuenta con un conjunto de más de 200 plataformas instaladas que incluyen plataformas de perforación, producción, enlace, habitacionales, rebombeo y compresión de gas.

### 1.2.1 Plataformas de perforación

La función principal de estas plataformas es alojar el equipo con el que se perfora el pozo y colocar la tubería que permitirá la explotación del mismo, junto con el cabezal donde se instalará posteriormente la plataforma de producción (Pemex, 1983). También contiene los paquetes de motores para subir y bajar el equipo de perforación, los contenedores de combustibles para accionarlos, sistemas de acondicionamiento de lodo de perforación y depósito de agua (León, 2001).

### 1.2.2 Plataforma de producción

En este tipo de plataforma, se separa el gas del crudo para ser bombeado a tierra; generalmente van los quemadores objeto del presente estudio (Pemex, 1983). Para realizar la separación, la plataforma cuenta con dos etapas dependiendo del destino final del crudo, siendo la primera el envío de la mezcla a la primera etapa de separación, a 689 KPa; el líquido obtenido se expande y se alimenta en una segunda etapa cuya presión va de 172 a 69 KPa, en este proceso se inyectan sustancias químicas para evitar la formación de espuma y corrosión. Por la naturaleza tóxica y corrosiva de los gases obtenidos que pudieran desprenderse, el crudo es mantenido a una presión de 69 a 83 KPa por debajo de la atmosférica, que evita la liberación de gases; el gas obtenido puede ser enviado por compresores y tuberías a una plataforma de compresión o hacia **quemadores**. También existen equipos de mantenimiento y limpieza de tuberías (León, 2001).

### 1.2.3 Plataforma de enlace

Estas permiten manejar la producción de las diferentes plataformas, ya que llegan las líneas que recolectan el crudo con gas de las plataformas de perforación y lo distribuyen a las plataformas de producción para su procesamiento; además, unen las líneas que recolectan el crudo con los oleoductos que los transportan a tierra. A bordo de estas plataformas se cuenta con instalaciones para lanzar y recibir “tapones” que permiten limpiar las tuberías (Pemex, 1983).

#### **1.2.4 Plataforma habitacional**

Como su nombre lo indica, sirve de complejo habitacional y cuenta con helipuerto, sistemas de comunicación, sistema contra incendio, potabilización de agua, tratamiento de aguas residuales, cocina, comedores, salas de recreación, biblioteca, plantas generadoras de energía entre otras secciones y servicios requeridos por los que allí permanecen (Pemex, 1983).

#### **1.2.5 Plataforma de rebombeo**

Se instalan entre las plataformas de enlace y de tierra para aumentar la presión y capacidad de transporte del crudo (Pemex, 1983). Se encuentra equipada con diferentes tipos de bombas, motores y generadores de energía eléctrica (León, 2001).

#### **1.2.6 Plataforma de almacenamiento de diesel**

Se encuentra anexa a la plataforma de rebombeo, su función es suministrar el combustible para el funcionamiento de las turbomáquinas (Pemex, 1983). Están formadas generalmente por 5 tanques de almacenamiento de 2,500,000 litros de diesel (León, 2001).

#### **1.2.7 Plataformas de compresión de gas**

Estas plataformas suministran la presión necesaria al gas para su transporte, así como su acondicionamiento (Pemex, 1983). Están constituidas por módulos de compresión que elevan la presión del gas amargo a valores aproximados de 8.27 MPa. También cuentan con equipos de deshidratación con dietilenglicol o trietilenglicol y endulzador de gas a base de dietanolamina al 30%, para reducir el contenido de ácido sulfhídrico y dióxido de carbono (León, 2001).

#### **1.2.8 Plataforma de separación y quemador**

Se construyen cuando no existe la infraestructura para el tratamiento de gas obtenido y su función es eliminar rápidamente el gas para evitar accidentes. La eliminación del gas se hace por medio de quemadores que son estructuras cónicas metálicas, localizadas lo más separado posible de las plataformas de perforación y producción por razones de seguridad.

## 1.3 CARACTERÍSTICAS SOCIO AMBIENTALES

### 1.3.1 Población

En la zona de estudio se presenta diversidad étnica y cultural, desde grupos indígenas con sus propios dialectos; población blanca y mestiza propia de la zona y población flotante constituida por turistas y trabajadores. El conteo poblacional de 2005 proporcionó la información que se presenta en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Población total de los estados que abarcan la zona de estudio

Estado	Población total	Población Masculina	Población Femenina
Campeche	754730	373457	381273
Yucatán	1818948	896562	922386
Tabasco	1989969	977785	1012184
Veracruz	7110214	3423379	3686835
Chiapas	4293459	2108830	2184629
Oaxaca	3506821	1674855	1831966

Fuente: INEGI Censo de Población y Vivienda 2005

### 1.3.2 Industria

- **Petróleo**

La mayor parte de la industria que se desarrolla en el Golfo de México está ligada a la extracción, procesamiento, transporte y aprovechamiento de petróleo, lo que ocasiona conflictos con las áreas de protección ambiental, pesca, entre otras existentes en el Golfo.

Estos conflictos son ocasionados, por ejemplo, por los derrames de petróleo ocurridos durante la producción, transporte, embarque, almacenamiento, lavado de buques-tanques, descargas directas, accidentes en operaciones y la subsecuente llegada a las playas por efecto de las mareas. Se han registrado valores de breas y alquitranes en concentraciones entre 0 y 210 gramos por metro cuadrado. (Restrepo, 1995)

- **Petroquímica**

Esta rama es la encargada de obtener productos industriales intermedios y finales a partir de derivados del petróleo como es el caso de fertilizantes; acrilonitrilo, paraxileno y ciclohexano que son bases para fibras sintéticas en la industria textil; resinas sintéticas, azufre resultado del endulzamiento de gas, plaguicidas, plastificantes; catalizadores;

entre otras sustancias de carácter importante para el desarrollo industrial. (Restrepo, 1995)

- **Agropecuaria**

Junto a la actividad relacionada con la industria del petróleo, en la región también se llevan a cabo actividades agrícolas como el cultivo de plátano, caña de azúcar, cacao, arroz, maíz y frutales; la ganadería de la zona es enfocada a la bovina y porcina principalmente, seguida de la avicultura. La pesca en el litoral hace parte de una fuente de trabajo al capturar especies tales como mero, guachinango, sardina, mojarra, robalo, cazón, sierra, langosta, camarón, ostión, pulpo y cangrejo (Restrepo, 1995). No obstante siguiendo políticas de seguridad por parte de Pemex, se han realizado restricciones a la pesca en el área de la Sonda de Campeche, disminuyendo las zonas y área disponible para las personas y empresas dedicadas a esta labor generando conflictos entre la empresa y la comunidad vecina (Rodríguez y Guzmán, 2009 ).

- **Turismo**

El turismo es otra fuente importante de ingresos en los estados pertenecientes a la zona de estudio, ya que la belleza natural y arqueológica es notoria gracias a vestigios de la cultura maya, calidad y cantidad de playas, fuentes hídricas de peso económico e importancia hidráulica, selvas y pantanos de características únicas como es el caso de los Pantanos de Centla y la Laguna de Términos.

### **1.3.3. Zonas naturales**

El clima es cálido-húmedo, con precipitación anual de entre 1500 y 2500 msnm, bajo la clasificación Köppen modificada para México (García, 1988), se encuentra en las zonas definidas como Af-A(fm), Am-Am(w)-Am(f) y Aw2-Aw2(w)-Aw2(x'). Esta región comprende los principales sistemas deltáicos y estuarinos de la costa del golfo, y tiene una influencia determinante en la zona marina adyacente debido al significativo aporte de agua dulce y sedimentos continentales, lo cual representa una fuente importante de nutrientes y tierras que son transportados en suspensión por las corrientes costeras y dispersarse por la plataforma continental. Las Áreas Naturales más sobresalientes son Los Pantanos de Centla, Laguna de Términos, Los Petenes y Celestún, que se observan en la Figura 1.3.

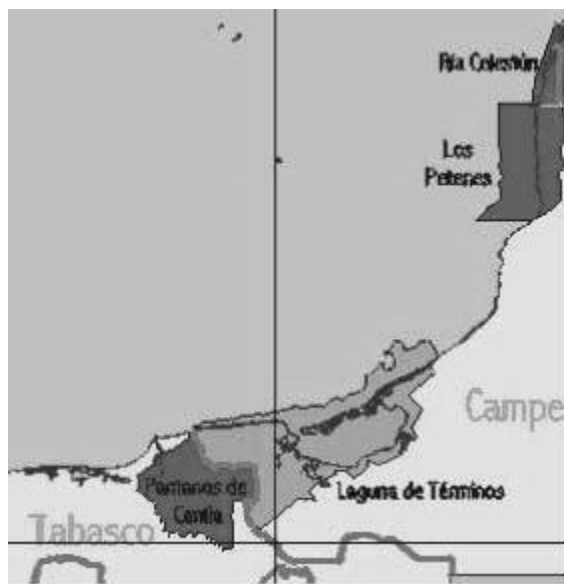


Figura 1.3. Ubicación de las áreas naturales protegidas en la Sonda de Campeche. (parkswatch, 2010).

### 1.3.3.1 Estado de Tabasco

Es un estado donde predominan ecosistemas acuáticos y semiacuáticos, sin embargo, las especies se han visto disminuidas por la caza y el comercio ilegal. La pesca no es realizada a gran escala como en Veracruz, debido a la baja tradición y el deterioro mismo de los ecosistemas, ocasionado por las agroindustrias que fomentan el monocultivo y arrasan la selva.

- ***Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla***

Esta reserva de la Biosfera creada en 1992, bajo decreto presidencial de Carlo Salinas de Gortary, representa un área total de 302,706 hectáreas en el estado de Tabasco con una diversidad florística de aproximadamente 260 especies y 170 de vertebrados. Hace parte del delta del río Usamacinta considerado el segundo de importancia por su nivel de descarga al Norte y Centro América, formando parte del sistema de humedales de los estados de Veracruz y Campeche. Además del Usamacinta, también se encuentran los ríos San Pedro y San Pablo, diversas lagunas como El Viento, San Pedrito, Pajalar Primero, Pajalar Segundo, entre otros sistemas lagunares. Presenta lomeríos aislados y suelos pantanosos con vegetación tipo acuática y subacuática, como es el mangle en sus tres especies (Blanco, Negro y Rojo), mucalera, tulas, popal, selva baja perennifolia, selva mediana subperennifolia y palmar (Figura 1.4). En cuanto a fauna se destacan especies de peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos, siendo las más representativas las garzas, el halcón peregrino, águila pescadora, tucán, cocodrilo de pantano, tortuga blanca, tapir, manatí, jaguar y ocelote, entre otros. (CONABIO, 1995).





Figura 1.4. Imagen de Los Pantanos de Centla (El clima, 2010).

### **1.3.3.2 Estado de Veracruz**

Posee la mayor riqueza biótica del Golfo de México gracias a las características ecológicas del litoral situándolo como el principal estado pesquero, de allí que sea en donde se desarrolle la mayor cantidad de puertos, muelles, congeladoras e infraestructura necesaria para el procesamiento de peces.

### **1.3.3.3 Estado de Campeche**

En este estado no se presentan especies endémicas como en Veracruz, no obstante, presenta una riqueza pesquera importante en su litoral evidenciada por la presencia de flotas pesquera y diversidad de capturas. La Sonda de Campeche es relativamente rica en camarón y en la Laguna de Términos se extrae ostión y almejas. En este estado sobresalen las comunidades de aves y vegetación acuática; actualmente amenazadas por la caza y comercio ilegal.

- ***Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos***

Se encuentra ubicada en los municipios del Carmen, Palizada, Champoton, Isla Aguada, Puerto Rico, Progreso, San Antonio Cárdenas, Atasta y Nuevo Campechito. Creada en 1994 como área de protección de flora y fauna con una extensión de 705,016 hectáreas, representa el mayor sistema estuarino del país por su proporción y volumen, pues es conformado por la plataforma marina adyacente, la isla del Carmen, los espejos de agua dulce, salobre y estuario-marinos, pastos sumergibles; sistemas fluvio deltaicos asociados; bosques de mangles y los pantanos de la rama oriental del río Usumascinta. La Laguna de Términos es conocida por su importancia en la extracción de camarones, siendo de las más importantes de México, conformada por los sistemas fluvio – lagunares de Palizada del este, Chumpón, Balchacah, Candelaria –Pandelau; Pom-Atasta - Puerto Rico- Los Negros, El Cote. Junto con los Pantanos de Centla conforman una Unidad ecológica regional y estatal.

El biotopo es de carácter cálido húmedo donde predomina la vegetación tipo manglar, pastizales, bosque tropical perennifolio, bosque espinoso y vegetación acuática (Figura 1.5). La fauna representativa incluye al tigrillo, ocelote, tejón chicosolo, venado de cola blanca, manatí, además es zona de nidación y refugio de la cigüeña jabirú; boa constrictor; iguana verde; tortuga pochiloque, chiquigua, verde, entre otros (CONABIO, 1995).

- **Reserva de la biosfera de Los Petenes**

Fue decretada como reserva de la biosfera en 1999 y ocupa una extensión de 282,857 hectáreas, es una franja costera con porción terrestre y marina. Localizada en la zona costera norte del estado de Campeche, en el sureste del Golfo de México en los municipios de Calkini, Hecelchakán, Tenabo y Campeche. Está conformada por hábitats complejos en formas de islas donde crecen especies arbóreas de chechén, caoba, higuera, palma y manglares de diferentes especies (Figura 1.6). La fauna representativa son cocodrilos de río, el caimán, la garza cándida, ibis blanco y el pato de alas blancas, el flamenco común, el pelicano blanco y pardo, conejos, venado de cola blanca, jabalí entre otros (Gobierno de Campeche, 2010).



Figura 1.5. Área de protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (Conanp, 2010).

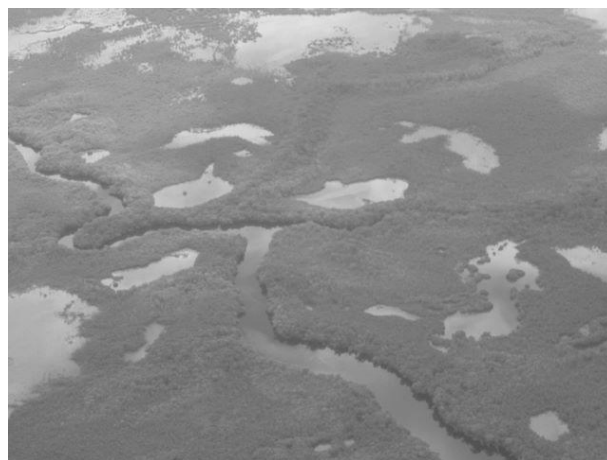


Figura 1.6. Fotografía aérea de la reserva de la biosfera Los Petenes. (Ecosur, 20010)

#### 1.3.3.4 Estado de Yucatán

Las características del suelo calcáreo, mares transparentes y escasos escurrimientos superficiales hacen que sea una región biótica especial. Los humedales costeros son de vital importancia para las aves acuáticas y especies en vía de extinción. Los ecosistemas de esta región son fácilmente alterables y su recuperación muy difícil. La pesca no es bien desarrollada y las actividades son principalmente de tipo agropecuaria. Los

ecosistemas litorales tales como manglares y arrecifes coralinos son susceptibles de impactos por el paso continuo de buques cargados de petróleo hacia otros países.

### 1.3.4. Emisiones atmosféricas por la producción y explotación de hidrocarburos

Las diferentes actividades de la industria del petróleo provocan un impacto negativo sobre los factores ambientales; agua, suelo, aire, biótico y humano debido al vertimiento y manejo de residuos peligrosos y no peligrosos, emisiones atmosféricas y migración de especies endémicas y únicas. En lo que se refiere a la calidad del aire, en la Sonda de Campeche se han realizado estimaciones de las emisiones atmosféricas por parte de Pemex, respecto a dióxido de azufre, partículas suspendidas, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono.

La región Marina Noreste es la que más aporta emisiones a la zona, con 564 mil toneladas al año, excluyendo los gases efecto de invernadero, representando un 86 % del global de emisiones; le sigue la región Marina Sur Oeste con 82 mil toneladas al año que representan el 12 % del global de emisiones; el tercer lugar le corresponde al tráfico marino con 13 mil toneladas y por último las actividades de perforación, con el 0.055 % del global. Respecto a la región Marina Noreste, el complejo Cantarell con 462 mil toneladas al año descarga a la atmosfera el 70% del total de emisiones de esta región, seguido de EKBALAN con 76 mil toneladas al año, que equivalen al 12 % de emisiones en la Región Noreste (Soto y González, 2009).

Respecto a partículas y óxidos de azufre, en la Tabla 1.2 se describen las emisiones estimadas por área de producción.

Tabla 1.2 Emisiones de partículas y óxidos de azufre estimados por área de producción en miles de toneladas al año. (Tomado de Neft *et al*, 2009)

AREA DE PRODUCCIÓN	SOx	Partículas
CANTAREL	138.7	8.9
EK BALAM	25.7	1.4
KUM - ZAAP	0	0
CTD	1.5	1
POOL – CHUC	7	0.8
DOS BOCAS	0.8	0.5
ABKATUN	2.4	1.5
TRANSPORTE MARÍTIMO	4.9	0.3

#### 1.3.4.1 Quemadores de gases de exceso en el proceso de producción y exploración de petróleo

El gas natural que se extrae asociado al crudo es separado, para posteriormente enviar el petróleo crudo a las terminales marítimas de Cayo Arcas y Dos Bocas. Respecto al gas, que también es conocido como gas amargo por contener ácido sulfhídrico y dióxido de carbono, es comprimido y enviado al centro de proceso y transporte de gas en la península de Atasta en el estado de Campeche (Domínguez y Graniel, 2006). En la zona de producción, las estaciones disponen de sistemas de escape a la atmósfera de las corrientes gaseosas, con la finalidad de evitar la sobrepresión en el sistema de compresión, pero no son enviadas directamente a la atmósfera por la presencia de hidrocarburos explosivos y ácido sulfhídrico, que representan un riesgo al personal que labora en las diferentes locaciones, por consiguiente, el gas amargo es llevado a quemadores elevados tipo antorcha, tal como se observa en la Figura 1.7.

Producto de la quema del gas amargo se emite dióxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas, monóxido de carbono, compuestos orgánicos no quemados y ácido sulfhídrico no oxidado. Se estima que las emisiones globales anuales de los quemadores son de 583 mil toneladas, lo que representa un 82 % de las emisiones de la Sonda de Campeche (Soto y González, 2009).

Figura 1.7. Quema de Gases de exceso en una plataforma ubicada en Sonda de Campeche



#### 1.3.5. Calidad del aire.

Respecto a las concentraciones de contaminantes en el Golfo de México no se encuentra disponible información de manera continua, o es resguardada en estudios privados de Pemex, sin embargo, la empresa paraestatal ha publicado valores de  $\text{SO}_2$  de dos redes de monitoreo atmosférico que posee en la zona de estudio, siendo estas Atasta y Dos

Bocas. En la Tabla 1.3., se presentan algunos valores obtenidos de dióxido de azufre correspondientes a diferentes fechas, en las dos redes de monitoreo atmosférico mencionadas.

Tabla 1.3. Concentraciones de SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) en las redes de monitoreo atmosférico de Dos Bocas y Atasta (Soto y González, 2009).

ATASTA		DOS BOCAS TABASCO	
FECHA Y LUGAR	CONCENTRACIÓN Promedio diario	FECHA Y LUGAR	CONCENTRACIÓN Promedio diario
Agosto de 1997, Estudio de la UNAM	42.968	Octubre de 1996, estudio del INE, en 24 horas, zona habitacional PEMEX.	15.72
Mayo de 2001	39.3	Octubre de 1999	15.72
Julio de 1996,	36.68*	Octubre de 2000	7.86
Julio de 1999	26.2		
Zona de quemadores 1996.	41.92		

\*Promedio 1 hora

Con relación a partículas suspendidas totales, la sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera ha participado desde 1986 en diferentes cruceros a través del Golfo de México, para determinar la calidad del aire de esta zona, efectuando mediciones durante el día y la noche. Los valores promedio más altos registrados de partículas suspendidas totales en estos cruceros fueron de  $34.6 \pm 7.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante el día y de  $38.9 \pm 8.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante la noche, en el periodo de mayo a junio de 2004 (Sosa *et al*, 2007).

## CAPITULO 2. ANTECEDENTES

---

Debido a la importancia económica, ambiental e histórica para la República Mexicana, la Sonda de Campeche ha sido objeto de múltiples estudios que han permitido identificar algunos impactos ocasionados por la industria del petróleo presente desde los años setenta. A continuación se mencionan algunos estudios de carácter ambiental, atmosférico y específicos en el manejo de modelos de dispersión de contaminantes en la atmósfera; efectuados en la zona de estudio, México y en el mundo, considerados relevantes para el desarrollo del presente estudio.

### 2.1 ESTUDIOS AMBIENTALES REALIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Para el Golfo de México, el primer interés para establecer el impacto de la industria petrolera en el ecosistema adyacente, fue la vigilancia respecto de los hidrocarburos en los sistemas costeros y las áreas vecinas (Botello y Villanueva S., 1985).

En el año de 1986 se realizaron los primeros estudios de química atmosférica y lluvia ácida en la costa del Golfo de México, llevados a cabo por personal del SCA-C.C.A UNAM, el Laboratorio Oceanográfico en Veracruz de la Secretaría de Marina y la National Oceanic and Atmospheric Administration (US-NOA). La finalidad de estos estudios fue identificar los principales contaminantes atmosféricos, su dispersión, transformación y ocurrencia en la zona. Sumado a lo anterior, se han llevado a cabo mediciones de pH de la precipitación en zonas costeras del Golfo (Bravo *et al*, 2003; Herrera, 2007; Sosa, 2008) y los efectos que ocasionan lugares de importancia arquitectónica e histórica como lo es el Tajín (Bravo, 2005).

En el año de 1998 se realizó el diseño de la red de monitoreo atmosférico automática para la terminal marítima Dos Bocas, teniendo en cuenta las emisiones generadas y la información meteorológica disponible, como tesis de maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM (Guzmán, 1998).

Con el fin de determinar las emisiones atmosféricas de las actividades petroleras en la Sonda de Campeche se realizó un caso de estudio en una de las plataformas de

compresión presentes en la zona, como parte de la tesis de licenciatura de Ingeniería Química de la UNAM en el 2001 (León, 2001).

En cuanto a evaluaciones de la calidad del aire reportadas se presentan estudios realizados para determinar compuestos orgánicos volátiles en el buque Justo Sierra de la UNAM y reportados en la tesis de licenciatura de ingeniería química de esta Universidad (Santacruz, 2006; Sosa, 2005).

Las emisiones que se generan en la Sonda de Campeche en las etapas del proceso petrolero como lo es el de exploración, explotación, producción, transporte, distribución; fueron estimadas de manera global empleando factores de emisión de la EPA y ARPEL (Villaseñor *et al.* 2003b). Respecto a los quemadores de los gases de exceso en las plataformas de producción y exploración, se realizó un estudio independiente de estimación de emisiones de la quema del gas amargo, teniendo en cuenta la eficiencia de combustión y velocidad del viento de la zona (Domínguez y Graniel, 2006)

Así mismo, el componente meteorológico de vientos, como factor importante en la dispersión de contaminantes ha sido objeto de análisis en la zona sur del Golfo de México (Taylor, 2009).

Recientemente, hacia el año 2009 se realizó la evaluación de concentraciones de dióxido de carbono en el sur del Golfo de México. (Velázquez, 2009).

## **2.2 USO DE MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ZONA DE ESTUDIO**

Después de realizar un inventario de emisiones se aplicó el modelo Calpuff para simular la dispersión de contaminantes respecto a NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub> el día 3 de febrero del año 1999 apoyado por radio sondeos hechos en la zona y la aplicación del modelo meteorológico RAMS (Villaseñor *et al.* 2003b). También se hicieron estimaciones de la dispersión de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO y partículas suspendidas provenientes de los quemadores de la Sonda de Campeche, empleando el modelo de dispersión California/Carnegie Institute of Technology conocido como CIT (Domínguez y Graniel, 2007).

En el año 2008 se simuló la dispersión de SO<sub>2</sub> en el norte de Chiapas y centro de Tabasco en el complejo industrial Nuevo Pemex y Ciudad Pemex, usando el modelo de dispersión Calpuff en el periodo comprendido en el año 2003 (Valdés *et al.* , 2008).

## 2.3 USO DEL MODELO CALPUFF EN MÉXICO Y EN OTROS PAÍSES

En México el modelo de Dispersión Calpuff ha sido empleado para estudiar el impacto ocasionado por diferentes fuentes como es el caso de centrales termoeléctricas (López *et al.* 2005), contaminación por PM<sub>10</sub> en la Ciudad de México (Villaseñor *et al.*, 2003a) y otros procesos asociados a la industria del petróleo (Villaseñor *et al.* 2003b) (Valdés *et al.*, 2008).

En otros países se ha empleado para la determinación de la dispersión de contaminantes procedentes de plantas termoeléctricas (Song *et al.* , 2006), (Hao *et al.* , 2007); determinación de la dispersión de olores (Yua *et al.* , 2009), (Wanga *et al.* , 2006); la influencia en la dispersión atmosférica provocada por la interacción de cuerpos de agua y tierra (Indumati *et al.* , 2008); así mismo, determinación de la dispersión de metil bromuros (Honaganahalli y Seiber, 2000) y por último, en estudios de calidad de aire urbana en Estados Unidos (Greco *et al.* , 2007), (Holmes *et al.* , 2006), Argentina (Pineda y Venegas, 2009) y Turquía (Elbir, 2003).



## **CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS EMPLEADOS**

---

En este capítulo, se presentan las características de los modelos de dispersión atmosférica, los requerimientos de información y los posibles usos; así mismo, se presenta una descripción de las cualidades, componentes e información requerida por el modelo CALPUFF empleado en el desarrollo del presente trabajo. Con relación al modelo meteorológico MM5, se describe brevemente ya que no fue usado de manera directa en el desarrollo de este trabajo, sino que se emplearon los archivos de salida correspondiente a diferentes periodos.

### **3.1 TIPOS DE MODELOS DE CALIDAD DEL AIRE**

Los modelos de calidad del aire usan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos químicos y físicos que intervienen en la dispersión y reacción de los contaminantes en la atmósfera, con grados de incertidumbre que dependen de la calidad de los datos de entrada y de las características del modelo (EPA, 2008). En la Figura 3.1 se presentan de manera esquematizada, los requisitos de datos de entrada y la información que proporciona un modelo de dispersión.

#### **3.1.1. Grado de complejidad**

Según el grado de complejidad se denominan exploratorios y los refinados:

- **Exploratorios:** Son aquellos que mediante datos básicos de meteorología, uso del suelo y topografía, estabilidad, información de la fuente(s) de emisión, información sobre el (los) receptor(es), determinan valores de calidad de aire en condiciones adversas, que de permanecer por debajo de lo normado, no justifican el uso de modelos más refinados. Si los resultados obtenidos sobrepasan lo establecido en la normatividad después de su aplicación, se hace necesario el uso

de modelos más refinados. Los resultados de salida pueden ser en forma de graficas y/o tablas.

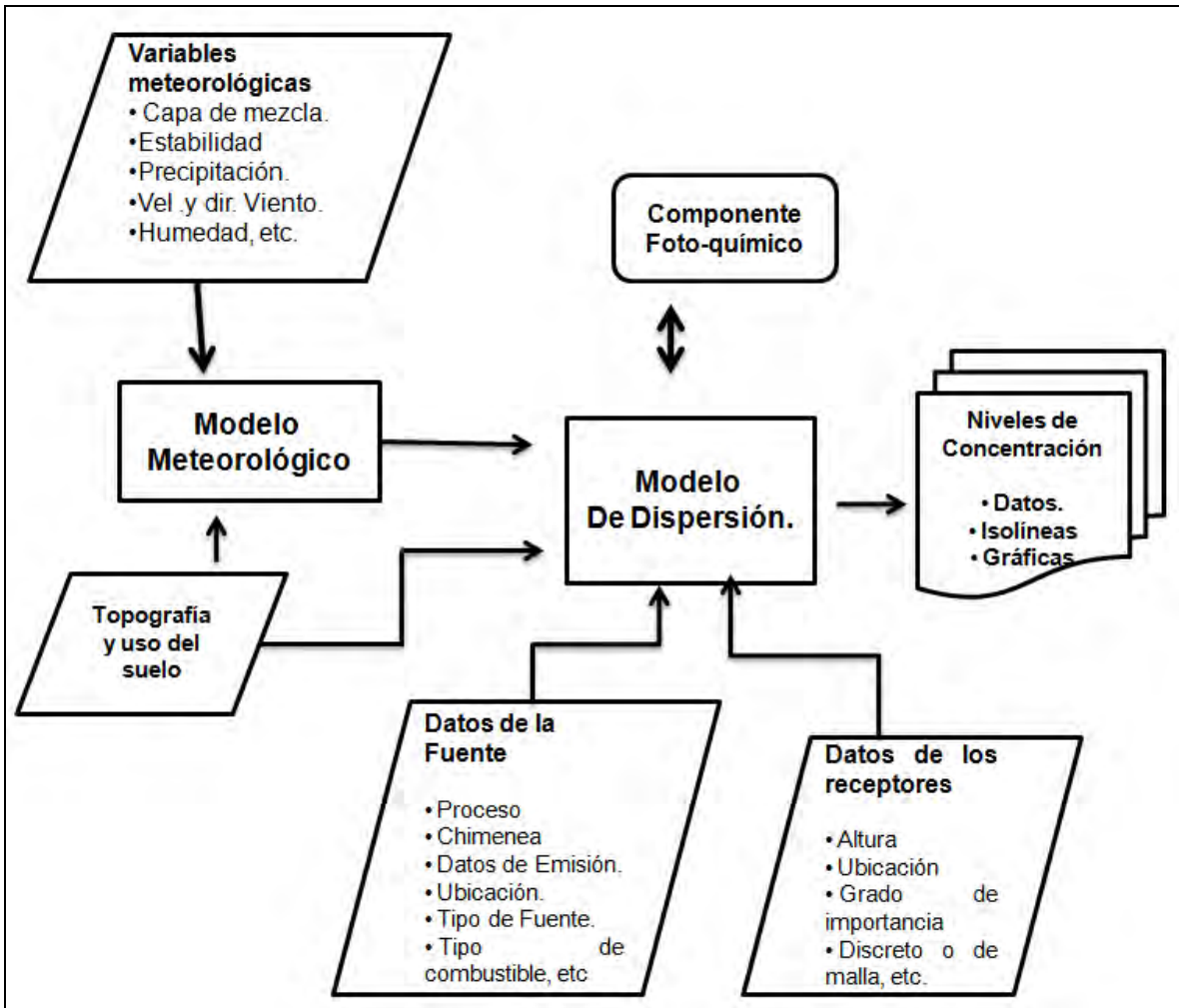


Figura 3.1. Esquema de un modelo de dispersión.

- **Refinados:** Son aquellos modelos que emplean algoritmos y métodos matemáticos y numéricos complejos para establecer características de transporte, reacción y dispersión de contaminantes, empleando trayectorias definidas por formulaciones Gaussianas, Lagrangianas y Eulerianas pero requieren de buena información de entrada.

### 3.1.2. Aplicación

Según la aplicación se catalogan en:

- **Dispersión:** Estos modelos estiman concentraciones de contaminantes a alturas definidas en receptores a los alrededores de las fuentes de emisión.
- **Fotoquímicos:** Empleados para establecer regulaciones y evaluar medidas de control, aplican una selección de ecuaciones matemáticas que caracterizan los procesos físicos y químicos, de los contaminantes atmosféricos.
- **De receptores:** Éstos emplean técnicas observacionales que usan características físicas y químicas de gases y partículas medidas en receptores y fuentes para identificar en ambos la presencia y cantidad de contribuciones de las fuentes en cada receptor.

## 3.2 MODELO DE DISPERSIÓN ATMOSFERICA CALPUFF

El modelo de dispersión atmosférica CALPUFF, es un modelo tipo *Puff*<sup>1</sup> Gaussiano – Lagrangiano de estado no estacionario de capas múltiples, diseñado para la dispersión de partículas y gases usando variación de la meteorología en el tiempo y el espacio, basado en ecuaciones de similitud, turbulencia, emisiones, transformación, manejo de terreno complejo y remoción húmeda o seca (Holmes *et al.*, 2006). Esta versión se encuentra disponible en la web<sup>2</sup> de manera gratuita y es aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos en su versión 5.8.

Esta versión del modelo, presenta un módulo que integra principalmente 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; este proceso es presentado en la Figura 3.2. Sumado a lo anterior, esta versión posee herramientas para un mejor manejo de la información y archivos necesarios para el modelo como se observa en la ventana principal presentada en la Figura 3.3.

Este modelo presenta ventajas frente a otros modelos de tipo estacionario, porque es capaz de procesar las variaciones en el tiempo y el espacio de las condiciones meteorológicas y de emisiones, en intervalos definidos por el usuario.

---

<sup>1</sup> Referido a emisión contaminante en forma de nube, soplido o bocanada.

<sup>2</sup> <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>

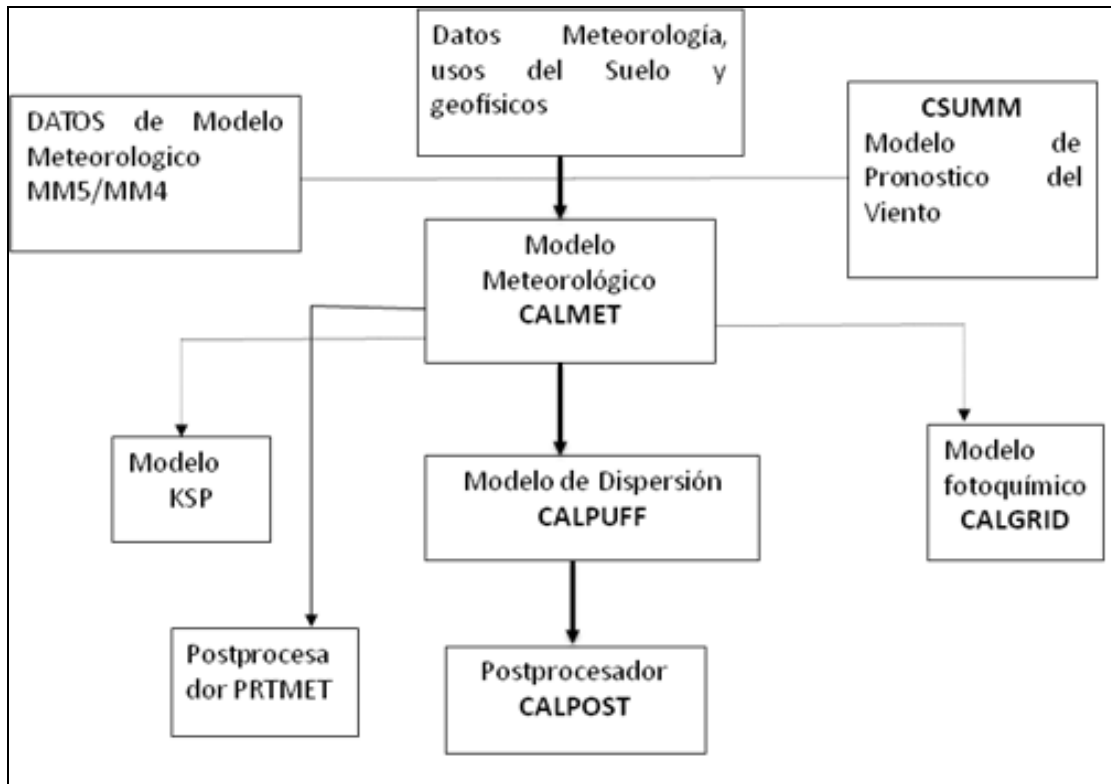


Figura 3.2. Esquema principal del modelo de dispersión Calpuff.

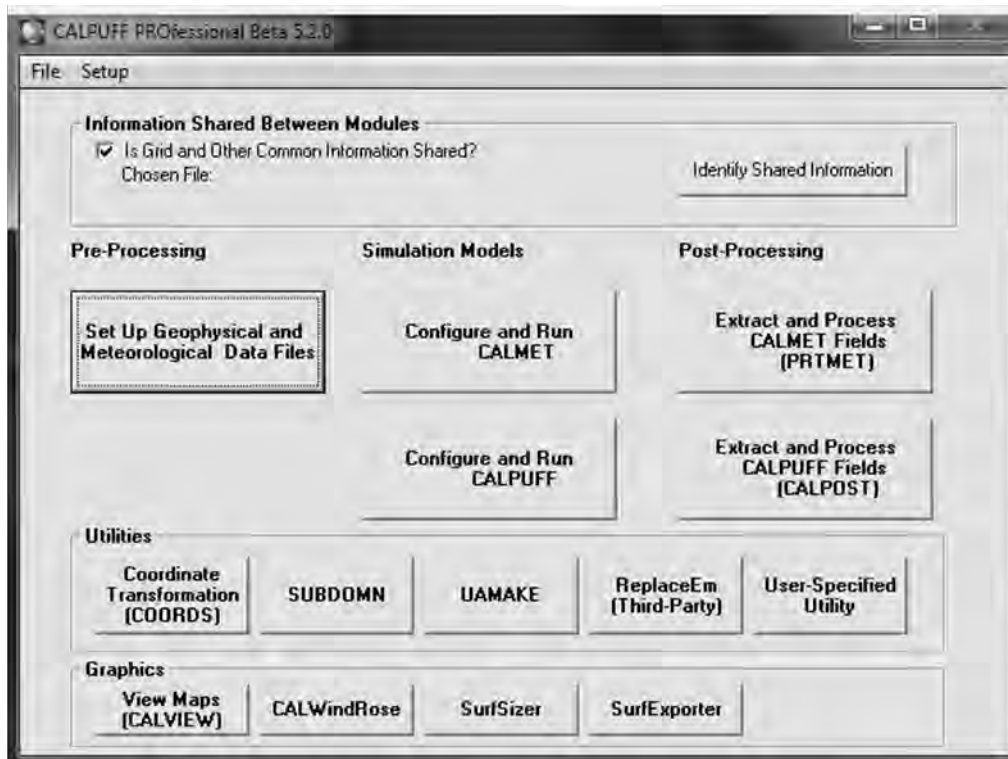


Figura 3.3. Pantalla principal de acceso al Calpuff.

### 3.2.1. Componente Calmet

Calmet es un modelo meteorológico que desarrolla campos horarios de temperatura y viento en una malla tridimensional definida 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 inter fase tierra y agua (Scire *et al.*, 2000a).

Los datos requeridos en el modelo Calmet son:

- Observaciones horarias de:
  - Velocidad del viento
  - Dirección del viento
  - Temperatura
  - Grado de cobertura de nubes
  - Altura de mezcla
  - Presión atmosférica
  - Humedad relativa
- Datos de precipitación Horaria
  - Intensidad
  - Tipo de precipitación
- Datos de radio sondeos
  - Datos observados dos veces al día.
    - Velocidad del viento
    - Dirección del viento
    - Presión atmosférica
    - Altura de la medición
  - Campos de vientos en mallas (Opcional)
    - Datos de salida modelo meteorológico MM4/MM5<sup>3</sup>
    - Datos de salida modelo meteorológico CSUMM
- Datos observaciones sobre agua ( Opcional)
  - Diferencia de temperatura entre aire y agua
  - Humedad relativa
  - Altura de mezcla sobre el agua.
  - Velocidad del viento
  - Dirección del viento
  - Gradiente de temperatura sobre el agua a través de la altura de mezcla.

---

<sup>3</sup> Opción empleada durante para el desarrollo del presente trabajo.

- Datos geofísicos en mallas:
  - Elevaciones del terreno
  - Categoría de uso del suelo
  - Altura de rugosidad (Opcional).
  - Albedo (Opcional).
  - Índice de cobertura foliar (Opcional).
  - Relación Bowen (Opcional).
  - Constante de flujo de calor del suelo (Opcional).
  - Flujo de calor antropogénico (Opcional).

Todos estos requerimientos, archivos de entrada y opciones de modelado tales como el tamaño y espaciado de la malla, punto de origen, periodo de simulación, zona geográfica, datos horarios de observaciones de estaciones meteorológicas automáticas o los obtenidos de un modelo meteorológico previo, junto con otras opciones establecidas por el usuario; son registrados en el archivo de control de extensión **.inp** para permitir sea ejecutado por el Calmet.

Los registros de datos de entrada y los posibles errores son almacenados en el archivo de salida **.list** mientras que los datos a procesar por Calpuff son almacenados en el archivo **.dat**. La información de entrada requerida, respecto al uso del suelo y topografía, son de dominio público en la web<sup>4</sup>, para ser procesados por el **CTGPROC** y el **TERREL**, respectivamente. Por otra parte, los archivos resultantes del modelo meteorológico MM5 deben ser procesados con la herramienta **Calmm5**, todos estos preprocesadores son encontrados en la página web de los creadores del programa<sup>5</sup>.

En la Figura 3.4. se observa un diagrama de flujo con los datos de entrada y pre procesadores necesarios para el funcionamiento del componente Calmet, así como los archivos resultantes.

---

<sup>4</sup> [http://www.src.com/datasets/datasets\\_main.html](http://www.src.com/datasets/datasets_main.html)

<sup>5</sup> <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>

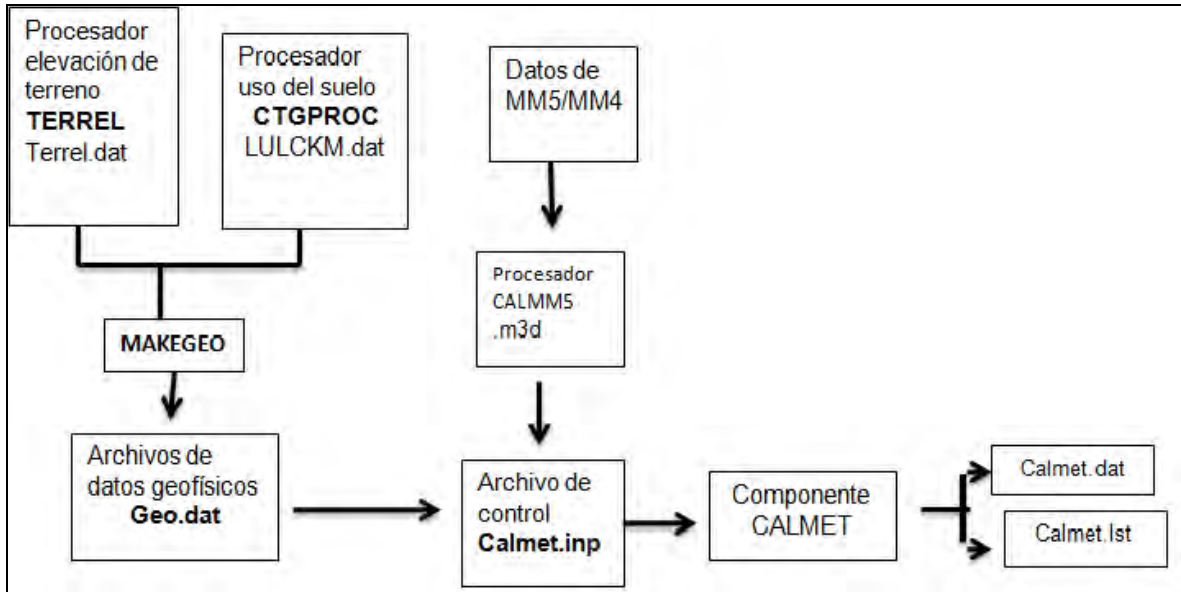


Figura 3.4. Esquema principal Calmet y archivos de entrada y salida utilizados.

### 3.2.2. Componente Calpuff

El Calpuff es un modelo de dispersión atmosférico de estado no estacionario tipo Puff multicapa, que acepta varias especies contaminantes y puede simular las variaciones en las condiciones meteorológicas sobre el transporte, transformación y remoción de los contaminantes, teniendo en cuenta a su vez, variaciones en espacio y tiempo. Puede utilizar campos meteorológicos tridimensionales desarrollados por Calmet como se observa en la Figura 3.5, o una sencilla estación de vientos en los formatos de archivos usados para manejar ISCT3, AUSPLUME CDTMPLUS, modelos gaussianos de estado estacionario, no obstante, si es utilizada esta opción, no se aprovecharía en su totalidad las diferentes características que presenta el Calpuff.

El Calpuff contiene algoritmos que permiten evaluar los efectos cercanos a las fuentes de emisión, tales como el de arrastre de contaminantes hacia abajo debido a obstáculos cercanos, transición de la elevación de la pluma, penetración parcial de la pluma en una capa de inversión elevada y una submalla de terreno. También posee algoritmos para simular fenómenos a grandes distancias como es el caso de deposición seca y húmeda, transformación química, gradiente vertical del viento y efectos de transporte agua y tierra, que son descritos con mayor detalle en la Tabla 3.1.

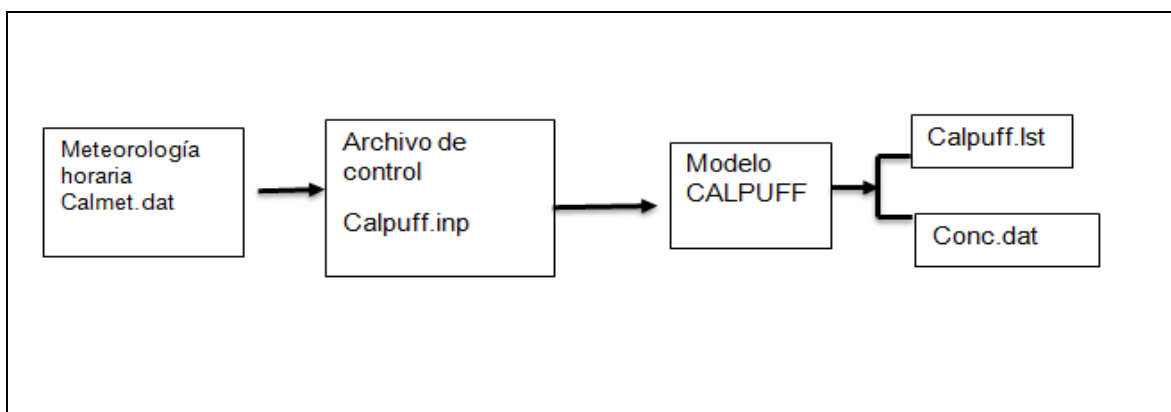


Figura 3.5. Esquema principal Calpuff y archivos de entrada y salida utilizados.

Tabla 3.1. Opciones generales de entrada en el componente Calpuff. (Scire *et al.*, 2000b).

CRITERIO	OPCIONES
<b>Tipo de Fuente con emisión constante o variable:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puntual    - Lineal</li> <li>- Volumen    - Área</li> </ul>
<b>Estado no estacionario para emisiones y condiciones meteorológicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Malla de campos tridimensionales para variables meteorológicas como vientos y temperatura.</li> <li>- Campos de variación espacial de altura de mezcla, velocidad de fricción, velocidad de escala convectiva, Longitud Monin Obukhov, intensidad de precipitación.</li> <li>- Datos de emisión de la fuente dependiendo del tiempo</li> <li>- Variación de la turbulencia vertical y horizontal junto con las velocidades de dispersión</li> </ul>
<b>Uso de funciones de eficiencias de muestreo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formulación Puff integrada</li> <li>- Formulación de Puff alargado (slug)</li> </ul>
<b>Coefficientes de dispersión <math>\sigma_y</math>, <math>\sigma_z</math></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mediciones directas</li> <li>- Estimación basada en la teoría de Similiaridad.</li> <li>- Coeficientes de Pasquill. Gifford (Área rural)</li> <li>- Coeficientes McElroy – Pooler (Área urbana)</li> <li>- Coeficientes CTDM (Neutral y estable)</li> </ul>
<b>Corte vertical del viento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- División de Puff</li> <li>- Dispersión por advección diferencial</li> </ul>



Continuación Tabla 3.1.

CRITERIO	OPCIONES
<b>Ascenso de pluma</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penetración parcial de la pluma en la capa de inversión elevada.</li> <li>- Elevación por impulso o flotación</li> <li>- Efecto de la cima de la chimenea</li> <li>- Esfuerzo cortante vertical del viento.</li> <li>- Efecto de lavado hacia abajo de la pluma.</li> </ul>
<b>Efecto de lavado hacia abajo de la pluma (building downwash)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método de Huber y Snyder</li> <li>- Método Schulman – Scire</li> </ul>
<b>Sub malla de terreno Complejo</b>	<p>División de las líneas de corriente Hd:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hacia arriba; los flujos de Puff sobre los cerros y las velocidades de difusión pueden ser modificadas por la experiencia.</li> <li>- Hacia abajo: Los Puff giran alrededor de las colinas, se dividen y envuelven el cerro.</li> </ul>
<b>Interface para el modelo de producción de Emisiones (EPM)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emisiones y flujos de calor variante de quemas controladas e incendios.</li> </ul>
<b>Deposición seca</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gases y partículas.</li> </ul> <p>Tres Opciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- tratamiento completo de las variaciones en espacio y tiempo de la deposición con un modelo de resistencia.</li> <li>- Especificación por el usuario de los ciclos diurnos de cada contaminante.</li> <li>- Sin deposición.</li> </ul>
<b>Efectos de la interacción del agua y costa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Parámetros de la capa límite sobre el agua.</li> <li>- Cambio Abrupto de las condiciones meteorológicas.</li> </ul> <p>Dispersión de la pluma en el límite de la costa.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fumigación.</li> <li>- Introducción de la submalla de capas límites de termales internas en las celdas de la malla costera.</li> </ul>
<b>Opciones de transformaciones químicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mecanismo químico de pseudo primer orden para <math>SO_2</math>, <math>SO_4^-</math>, <math>HNO_3</math> y <math>NO_3^-</math></li> <li>- Especificado por el usuario</li> <li>- Sin reacción química</li> </ul>
<b>Remoción húmeda</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aproximación de los coeficientes de lavado</li> <li>- Tasa de remoción en función de la intensidad de la precipitación.</li> </ul>
<b>Interfaz gráfica con el usuario</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apuntar y click sobre el modelo y archivos de entrada.</li> <li>- Revisar errores en el archivo de entrada del modelo</li> <li>- Archivos de ayuda en internet</li> </ul>

Este modelo tipo Puff se basa en la representación de la pluma continua de emisiones como un conjunto discreto de nubes de contaminante que son empujados y desplazados por las condiciones atmosféricas de ese momento, permitiendo simular las trayectorias variables de la pluma contaminante. Además, supone que las emisiones dadas en un periodo de tiempo  $\Delta t$  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:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g \exp\left[-\frac{d_a^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{d_c^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(H_e + 2nh)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Siendo:

C: Concentración a nivel del suelo,  $\text{g/m}^3$ .

Q: Masa del contaminante del Puff, g.

$\sigma_x$ : Desviación estándar en metros de la distribución gaussiana en dirección del viento.

$\sigma_y$ : Desviación estándar en metros de la distribución gaussiana perpendicular a la dirección del viento.

$\sigma_z$ : Desviación estándar en metros de la distribución gaussiana en la dirección vertical.

$d_a$ : Distancia en metros desde el centro del Puff al receptor, en dirección del viento.

$d_c$ : Distancia en metros desde el centro del Puff al receptor, perpendicular a la dirección del viento.

G: Término de la vertical de la ecuación gaussiana.

H: Altura efectiva en metros sobre el suelo del centro del puff.

h: Altura de la capa de mezcla en metros.

La ecuación general de dispersión gaussiana está dada por la siguiente expresión:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_z \delta_y} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad \text{Ecuación 3.3}$$

La diferencia principal entre la ecuación aplicada a puff (ecuación 3.1) y la gaussiana (ecuación 3.3), es la inclusión del término de difusión vertical  $\exp\left[-\frac{d_a^2}{2\sigma_x^2}\right]$ , que sustituye al término de transporte en la ecuación gaussiana, con la desaparición del término de velocidad del viento  $u$ .

### 3.2.3. Componente Calpost

Una vez se ha corrido 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. En la Figura 3.6, se puede observar el diagrama de flujo de los archivos de entrada y salida en el uso del componente Calpost.

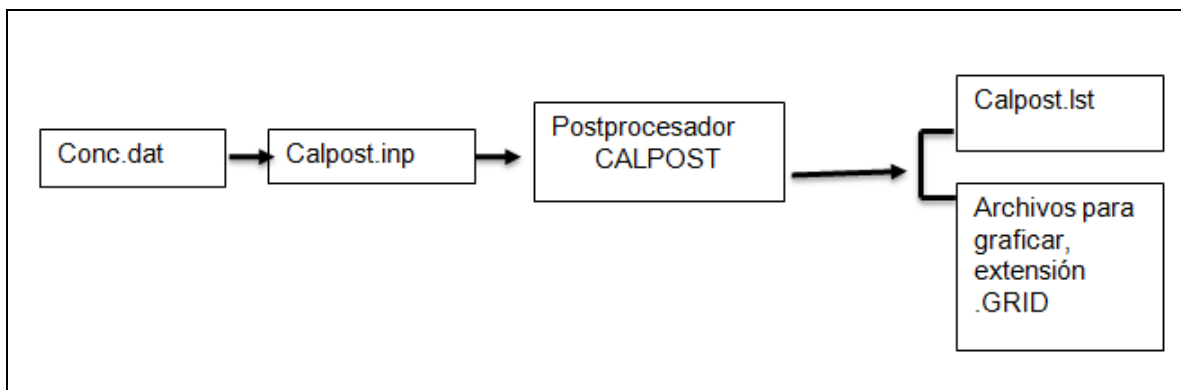


Figura 3.6. Esquema principal Calpost y archivos de entrada y salida utilizados.

## 3.3 MODELO METEOROLÓGICO MM5

El modelo MM5 es el resultado de un modelo de mesoescala desarrollado hacia los años 70 en la Universidad del estado de Pensilvania. Se considera un modelo meteorológico de área límite (Montávez, 2010), que se diferencian de los meteorológicos o climáticos de circulación general, en que estos últimos requieren de condiciones iniciales o de contorno periódicas, mientras que los modelos de área limitada necesitan de condiciones de contorno durante todo el periodo de integración, de allí que se toman las condiciones iniciales y de contorno a partir de salidas de los modelos que cubren un área mayor que pueden ser otros modelos de área limitada o globales. Esta propiedad o característica de un modelo de área limitada, respecto a la selección de áreas a partir de una mayor o anidamiento, es observada en la Figura 3.7. Los datos e información disponibles, se tienen gracias a la ayuda y soporte técnico del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de estados Unidos NCAR, por sus siglas en inglés.

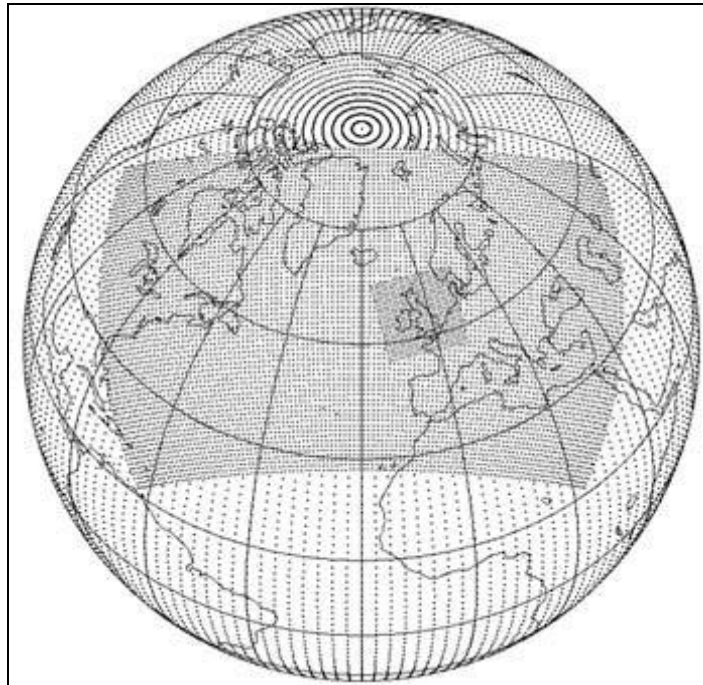


Figura 3.7. Anidamiento, a un modelo global y a un modelo de área limitada. (Montávez, 2010)

Las características más relevantes del modelo MM5 son:

- Capacidad de anidamiento múltiple con interacción en dos direcciones y en una dirección entre los dominios, lo que facilita el estudio de fenómenos atmosféricos bajo distintas escalas espaciales y el diseño de predicciones a muy alta resolución.
- Formulación de una dinámica no hidrostática, permitiendo que el modelo sea empleado de manera eficaz para representar fenómenos con dimensiones de muy pocos kilómetros, como vórtices a sotavento de relieves orográficos, formación de nubes de desarrollo, tornados, entre otros.
- Adaptación informática para múltiples plataformas y para su ejecución en modo multitarea sobre computadoras de memoria compartida o distribuida.
- Inicialización automática con diferentes fuentes de análisis meteorológicos y observaciones, incluyendo su capacidad de asimilación dimensional de datos.
- Asimilación variable de datos convencionales y de satélite durante la predicción.
- Incorporación de esquemas de parametrización de los procesos físicos relacionados con radiación atmosférica, microfísica de nubes y precipitación, convección por cúmulos, turbulencia, y flujos de energía y momento sobre la superficie terrestre.

- El código es totalmente libre, está bien documentado y soportado por la NCAR (National Center for Atmospheric Research).

Las aplicaciones de este modelo abarcan: la predicción del tiempo, predicción del viento a alta resolución para parques eólicos, el origen y evolución de eventos extremos como lluvias torrenciales, olas de calor y frío, acoplamiento con modelos de dispersión de contaminantes, acoplamiento con otros modelos meteorológicos e hidrológicos (ITER, 2005).

## **CAPITULO 4. METODOLOGÍA**

---

Para el cumplimiento de los objetivos planteados en este trabajo se realizaron las siguientes actividades:

- a. Recopilación de información de la zona de estudio, respecto a investigaciones y estudios realizados, datos de producción y exploración de la industria del petróleo.
- b. Selección, conocimiento y manejo del modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos a emplear.
- c. Corrida prueba del modelo de dispersión con datos de entrada hipotéticos de la zona de estudio.
- d. Determinación de la necesidad de emplear un modelo Meteorológico.
- e. Selección del periodo de simulación.
- f. Captura de los datos de salida del modelo meteorológico, para alimentar el componente Calmet.
- g. Modificación del código de programación para emplear el Calpuff con características del quemador y uso del Modelo.
- h. Diagramación de las líneas de iso concentración
- i. Gráficas y análisis de datos resultantes.

A continuación se describen cada una de las actividades desarrolladas de manera más detallada, siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 4.1.

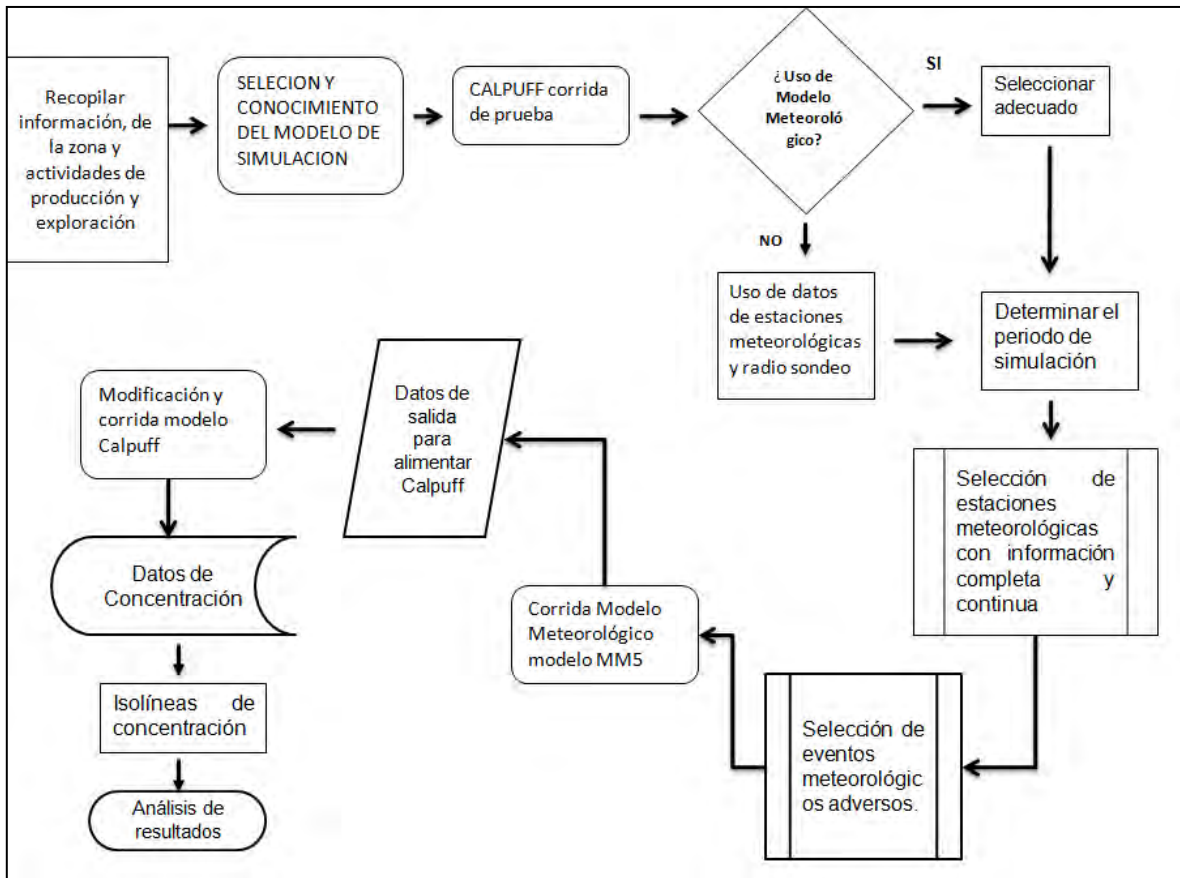


Figura 4.1. Diagrama de flujo de las actividades principales de este proyecto.

## 4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En este punto se llevó a cabo la indagación, búsqueda, selección y análisis de la información disponible de la zona de estudio, referente a las características físicas, bióticas, orográficas, históricas, la demografía, la meteorología, las actividades socio económicas y de producción de hidrocarburos, teniendo en cuenta artículos, libros y tesis al respecto.

## 4.2 SELECCIÓN Y CONOCIMIENTO DEL MODELO DE DISPERSIÓN

El modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos seleccionado es el denominado como Calpuff descrito en el numeral 3.2, por ser un modelo de estado no estacionario que permite analizar las variaciones en espacio y tiempo de las condiciones meteorológicas, así como la interacción agua y tierra que influye en la capa de mezcla y dispersión de contaminantes atmosféricos. Este modelo se empleó por las características descritas y porque se adapta a las condiciones de la zona de estudio, habiendo sido ya utilizado en estudios anteriores con diferentes escenarios y resultados (Villaseñor *et al.* 2003b), (Valdés *et al.* , 2008).

## 4.3 CORRIDA DE PRUEBA

El modelo Calpuff presenta dificultad para su uso en diferentes sistemas operativos del tipo Windows, es por eso que se decidió trabajar el modelo por medio de sus componentes en sistema operativo por disco denominado D.O.S. Para conocer sus requerimientos y funcionamiento se realizaron modificaciones a los archivos de entrada que vienen incluidos como ejemplos, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Modificación de los datos de entrada referente a usos del suelo y topografía del archivo de entrada **geo.dat**, en el componente meteorológico Calmet, de la siguiente manera:
  - La malla poseía un solo tipo de suelo.
  - La topografía se consideró totalmente plana.
  - Se colocaron las coordenadas iniciales y finales de la zona de estudio en UTM (Golfo de México)

En la Figura 4.2 se observa la pantalla del archivo **geo.dat** con una numeración repetitiva correspondiente a la categoría de uso del suelo establecida como 20 y elevación igual a 0.

- Modificación de la información meteorológica:
  - Se asumió un comportamiento meteorológico uniforme durante un periodo de 24 horas, con la misma velocidad y dirección del viento, la temperatura variaba durante el día, esta modificación se puede observar en la Figura 4.3.
  - Uso de solo un radio sondeo (**Up.dat**).
  - No se empleó información meteorológica sobre el mar (**sea.dat**)
- Para el uso del componente Calpuff se tomó en cuenta una sola fuente de emisión, la cual se situaba en el centro de la zona de estudio.





#### 4.4 DETERMINACIÓN DEL USO DEL MODELO METEOROLÓGICO PARA DATOS DE ENTRADA DEL COMPONENTE CALMET

Después de establecer las necesidades de información meteorológica para el funcionamiento del modelo se observó dentro de las opciones de éste se podía entre otras, aplicar solo los datos de salida del modelo MM5 y no era necesario emplear datos de estaciones meteorológicas, radio sondeos o de observaciones en el mar; siendo esto una ventaja, ya que para el desarrollo del presente trabajo no se contaba con la disponibilidad de información resultante de radio sondeos, además de información de pocas estaciones meteorológicas automáticas en la zona de estudio. Por lo descrito anteriormente, se determinó el uso solamente de la información dada por las corridas del modelo MM5 descrito en el numeral 3.3, en las condiciones de frontera establecidas en este proyecto. Esta capacidad también es descrita en el manual del usuario del modelo Calpuff, componente Calmet (Scire *et al.*, 2000a). El modelo meteorológico MM5 requiere datos de entrada, como lo son de elevaciones de terreno y usos del suelo que se encuentran disponibles en la página web del Servicio de Geología y Suelos de Estados Unidos (USGS)<sup>6</sup>, los campos de vientos, datos de observaciones en superficie y radio sondeos, se pueden obtener de la página del Centro Nacional de predicción Ambiental (NCEP) adscrita a la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA) o bien del Centro nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR) de Estados Unidos<sup>7</sup> (Dudhia *et al.*, 2005).

Para la ejecución del modelo meteorológico mesoescala MM5, se requiere establecer un dominio geográfico, con elevaciones de terreno y uso del suelo que puedan afectar el comportamiento meteorológico de la zona. En el Anexo A se detalla la numeración según el uso de suelo referido por el Modelo MM5, así mismo los planos con las elevaciones de terreno y uso de suelo y vegetación empleadas por el MM5. En la Figura 4.6 se pueden apreciar los límites de la malla empleada en la región de color blanco, que representa la zona de estudio y que corresponde a las coordenadas 17.00°N, -93.95°E; 20.77°N, -89.92 °E, con una extensión de 91x 91 celdas de 5 km de ancho.

---

<sup>6</sup> <http://eros.usgs.gov/#/Guides/dem>

<sup>7</sup> <http://www.cisl.ucar.edu/dss/>

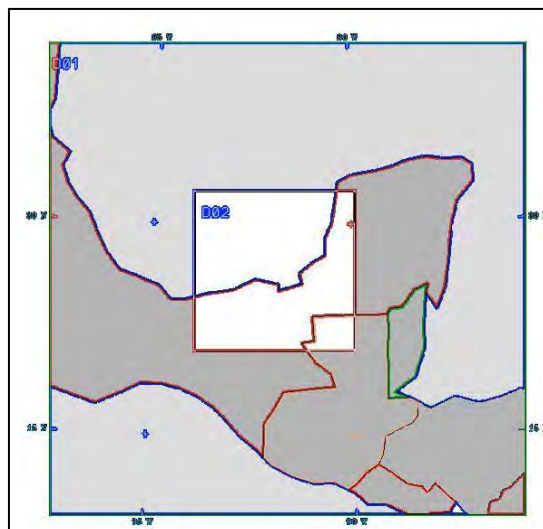


Figura 4.6. Dominio de la zona de estudio dados al MM5 (C.C.A<sup>8</sup>, 2009)

## 4.5 SELECCIÓN DEL PERIODO DE SIMULACIÓN.

### 4.5.1. Identificación y evaluación de las estaciones meteorológicas

Una vez conocido el funcionamiento y requerimientos del modelo Calpuff, se procedió a revisar los datos de estaciones meteorológicas automáticas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional, en la zona de estudio siendo estas:

- Acayucán - Veracruz.
- Paraíso -Tabasco.
- Ciudad del Carmen - Campeche.
- Campeche - Campeche.
- Escárcega - Campeche.
- Yohaltum - Campeche
- La Cangrejera - Veracruz
- Mérida – Mérida.

Se verificó que los datos fueran uniformes en todas las estaciones durante todos los años, encontrándose que en el periodo comprendido entre los años 2000 y 2007 no todas las estaciones presentaban datos de manera continua. Las estaciones Paraíso, Ciudad del Carmen, La Cangrejera y Campeche, presentaban un funcionamiento continuo durante el periodo analizado. Posteriormente se descartó Paraíso por presentar incoherencias en los datos, como es el de tener meses con 60 días.

<sup>8</sup> Comunicación personal con el Grupo de Físicoquímica Atmosférica, del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

#### **4.5.2. Selección de eventos propicios para determinar el grado de contaminación de la costa por las emisiones provenientes de la zona de quemadores**

Una vez que se contó con la información del periodo comprendido desde el mes de mayo del año 2000 hasta diciembre de 2007, se aplicó el siguiente criterio de selección de casos críticos que permitirían que la pluma contaminante alcanzara la costa en el sector Suroeste del Golfo de México en la zona establecida:

- Velocidad del viento entre 1.8 y 10 km/h, el primer valor corresponde al valor de calmas procesado por el Calmet.
- Precipitación nula.
- Dirección del viento hacia las ciudades costeras de interés, como la ciudad de Campeche, Ciudad del Carmen y Coatzacoalcos. Tomando como 0° el valor correspondiente a la dirección del viento proveniente del Norte y siguiendo en sentido horario a las manecillas del reloj, para la estación de Campeche se seleccionó la dirección del viento comprendida entre los 230° y 250° de azimut; para la estación meteorológica La Cangrejera las direcciones de viento seleccionadas estaban entre 60° y 80° de azimut y finalmente para la estación meteorológica de Ciudad del Carmen las direcciones del viento de 290° a 50°.

Para establecer los días que cumplieran con los criterios anteriores, se desarrolló el siguiente proceso:

- a) Como los datos suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional presentan valores para un periodo de 10 minutos de las variables de dirección del viento promedio, dirección del viento racha, velocidad promedio del viento, velocidad del viento máximo, temperatura promedio, humedad relativa, presión barométrica promedio, lluvia acumulada, irradiancia promedio, batería y panel solar en voltios; se desarrolló un programa de computadora que tomara los datos de las estaciones meteorológicas. Este programa selecciona las variables correspondientes a fecha, hora, dirección del viento, humedad relativa, temperatura, presión barométrica radiación solar y precipitación, para que posteriormente efectuara un promedio horario de estas variables, excepto fecha, hora y precipitación, que permitiera un mejor análisis y así mismo fuera acorde al periodo horario manejado por el Calmet.
- b) Realización de la rosa de vientos de cada periodo y verificación de la existencia de vientos provenientes de la zona de quemadores o plataformas marinas en dirección a

la costa, según lo establecido para las estaciones meteorológicas de Campeche, Ciudad del Carmen y La Cangrejera.

- c) Cuando la rosa de los vientos describían vientos con la dirección del inciso anterior, se procedió a pasar los datos a una hoja de Excel donde se aplicaban los filtros enunciados anteriormente, respecto a velocidad y dirección del viento, precipitación, para establecer qué días cumplían con esta condición.
- d) Comprobación de los campos de vientos de los días seleccionados como soporte a lo encontrado, extrayéndolos de la página web de North American Regional Reanalysis<sup>9</sup>.
- e) Sumado a lo anterior, se tuvo en cuenta lo encontrado en el estudio de cuencas atmosféricas realizado por investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera (Magaña y Caetano, 2007) para el Instituto Nacional de Ecología. En este estudio se estableció a los meses de enero, mayo, octubre y diciembre como los periodos en donde existe la mayor probabilidad de ocurrencia de altos niveles de contaminación. Por lo anterior, se tomó la información meteorológica del mes de diciembre del año 2004, porque este año no estuvo influenciado por fenómenos climáticos de escala global como el fenómeno de El Niño y en este mes la altura de la capa de mezcla estaría baja, disminuyendo la posibilidad de dispersión y dilución de los contaminantes en la atmósfera.

## **4.6 USO Y TOMA DE DATOS DE SALIDA DEL MODELO METEOROLÓGICO MM5**

Una vez que se determinaron los periodos de simulación adecuados, se corrió el modelo MM5 con el apoyo de personal del grupo de Físico Química Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmósfera y se alimentó el archivo de salida del modelo MM5 al componente Calmet para una resolución de 5 km y una maya de 91 x 91 celdas.

## **4.7 MODIFICACIÓN Y USO DEL COMPONENTE CALPUFF**

El modelo Calpuff está diseñado para simular entre otras fuentes, las de tipo puntual, sin embargo, no presenta la opción de simular quemadores como los que son objeto de este estudio. Para suplir esta deficiencia se consideraron dos alternativas, la primera es manejar los quemadores como una chimenea equivalente según los pasos establecidos por la Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 1992), o por otro lado,

---

<sup>9</sup> <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rrean/>

modificar el código fortran presente en el modelo para adaptarlo a las necesidades de este estudio.

Las dos alternativas se discuten con mayor detalle en los siguientes numerales.

#### 4.7.1. Simular quemador como si fuera chimenea equivalente

Existen procedimientos y ecuaciones establecidos por la EPA que permiten la posibilidad de manejar a un quemador como una chimenea equivalente (EPA, 1992) y (Zelensky y Eng, 2001). Para esto se requiere calcular la fuerza de boyancia establecida para un quemador y un diámetro equivalente que se calcula con base a una temperatura y velocidad de emisión fija recomendada. La similitud entre un quemador y una chimenea es presentada en la Figura 4.7.

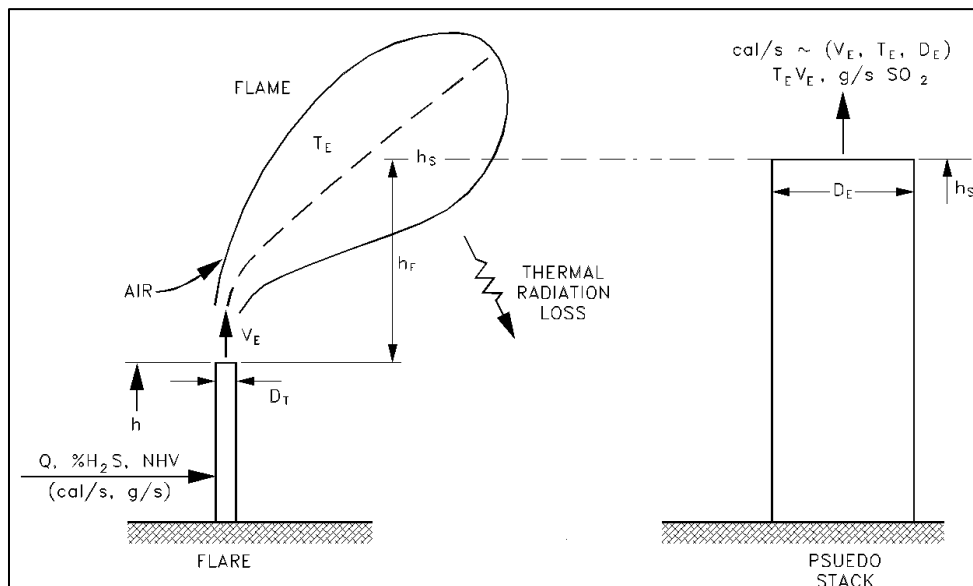


Figura 4.7. Comparación de un quemador con una chimenea equivalente (Zelensky y Eng, 2001)

La fuerza de boyancia se calcula teniendo en cuenta el calor total liberado por el quemador, que depende del tipo de combustible, en este caso gases de exceso provenientes del proceso de exploración y producción de petróleo tal como sigue:

$$FB = 0.0000166 \times Qt$$

Ecuación 4.1

Siendo  $Qt$  el calor total liberado en (Cal/s)

Después se halla el diámetro equivalente (DE) teniendo en cuenta la fuerza de boyancia calculada anteriormente, la temperatura de chimenea ( $T_s$ ) recomendada de  $1000^\circ\text{C}$  (Ruggeri, 2004), la velocidad de salida recomendada ( $V_s$ ) de 20 m/s (Ruggeri, 2004) y la temperatura ambiente ( $T_a$ ).

$$DE = \sqrt{\frac{(4 \times FB \times Ts)}{(9.906 \times Vs \times (Ts - Ta))}} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Posteriormente, para obtener la altura de la chimenea equivalente es necesario realizar la sumatoria como sigue:

$$hse = hs + hf. \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde hf es la altura de la flama y hs la altura del quemador. La altura de la flama se calcula de la siguiente ecuación:

$$hf = 4.56 \times 10^{-3} \times Qt^{0.478} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

#### 4.7.2. Modificación del código fuente.

El cambio en el código fuente del Modelo Calpuff implica hacer las correcciones respectivas a la formulación de fuerza boyante de la ecuación 4.1 y mantener una altura fija de flama de 10 m para la altura efectiva (Leahey y Schroeder, 1986), (Leahey y Davies, 1983); en el código en lenguaje fortran con que se diseñó el modelo y compilarlo nuevamente, para poder ejecutar los datos con las condiciones de un quemador.

### 4.8 EMISIONES

Para el cálculo de la emisión se presentan dos opciones, los generados por la EPA en el AP42 (EPA, 1995) y los establecidos por la Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe ARPEL (Franklin y Leahey, 1998), tal como se observa en La Tabla 4.1

Tabla 4.1. Factores de emisión de PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub> emitidos por quemadores.

	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>
<b>EPA</b>	Valores en unidades de concentración: Sin humo 0 µg/L; Humo ligero 40 µg/L; <u>Humo promedio 177 µg/L</u> ; Humo pesado 274 µg/L.	Balance de materiales y estequiometria
<b>ARPEL</b>	0.0021 Kg /m <sup>3</sup> gas quemado	

Se tomaron valores de humo promedio debido a la fluctuación que puede presentar la producción de hidrocarburos y la ausencia de información directa de las fuentes de emisión.

En cuanto a la emisión de  $\text{SO}_2$  se consideró que el  $\text{H}_2\text{S}$  presente en el gas quemado tenía una conversión del 100% a  $\text{SO}_2$ , siguiendo los pasos encontrados en la bibliografía (León, 2001), para la estimación de emisiones teniendo en cuenta balance de materiales y estequiometría.

Respecto a las características de flujo de emisiones, dimensiones de quemadores, ubicación y cantidades de uso de combustibles se recurrió a los datos suministrados tanto en trabajos de tesis (León, 2001) y estudios efectuados en la Sonda de Campeche sur del Golfo de México (Domínguez y Graniel, 2006), así como datos técnicos de quemadores que se encontraron en la literatura (Zelensky y Eng, 2001).

## **4.9 LINEAS DE ISO - CONCENTRACIÓN**

Para observar el grado de impacto que tienen las emisiones de los quemadores sobre la zona de estudio, se emplearon mapas donde se grafican las concentraciones dadas en las corridas y su distribución espacial, permitiendo conocer los valores y los lugares donde llega la pluma contaminante y el grado de aporte a los niveles de contaminación del aire. Estos mapas con líneas de iso concentración, son como el observado en la Figura 4.5, en el numeral 4.3 donde se describió la corrida de prueba efectuada.

## **4.10 GRÁFICOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los valores máximos de concentración por cada simulación y los encontrados cerca de la costa, se graficaron en diagramas de barras y de líneas, con el fin de establecer su comportamiento en los periodos simulados, además de su comparación con valores máximos permitidos en la normatividad ambiental vigente y los encontrados en estudios de calidad de aire realizados con anterioridad en la zona de estudio.



## CAPITULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

En este capítulo se presentan los resultados más relevantes en cuanto a la trayectoria que siguen las emisiones, los valores de concentración de contaminantes generados por éstas, las zonas que impactan; así como la trayectoria de los vientos y alturas de capa límite planetaria asociados a estos resultados. Para complementar este capítulo, los datos de concentraciones máximas, así como los mapas de iso líneas de todas las simulaciones y los periodos seleccionados se encuentran disponibles a partir del Anexo E.

### 5.1 PERIODO DE SIMULACIÓN

Una vez que se llevó a cabo el procedimiento descrito en el inciso 4.5.2, respecto a la selección de eventos críticos, donde la pluma contaminante proveniente de los quemadores de la Sonda de Campeche se aproxima a la costa, se encontró un conjunto de días que cumplían con los criterios establecidos en dicho procedimiento, los cuales se enuncian a continuación:

- 31 de octubre de 2001.
- 20 de noviembre de 2001.
- 21 de mayo de 2002.
- 29 de mayo de 2002.
- 30 de mayo de 2002.
- 31 de mayo de 2002.
- 5 de julio de 2004.
- 3, 4 y 5 de septiembre de 2004
- 13 de diciembre de 2004.
- 19 de diciembre de 2004.
- 9 de noviembre de 2006.

Con la finalidad de conocer los niveles de contaminación originados en momentos cuando la pluma se dirige mar adentro, se tomaron 2 días que no coincidían con las condiciones descritas en el procedimiento mencionado, siendo estos:

- 1 de abril de 2007.
- 17 de junio de 2006

En el Anexo B se presenta la lista de verificación utilizada para la determinación de los periodos de simulación. En el anexo C se incluyen las rosas de los vientos de los diferentes periodos, comprendidos desde el mes de mayo del año 2000 hasta el mes de diciembre del año 2007.

Con la finalidad de comprobar que en los días seleccionados la trayectoria de los vientos se dirigiese a la costa, se consultaron los datos de vientos de las fechas mencionadas con anterioridad, de la página web de la North American Regional Reanalysis (NARR, 2009). Una muestra que ilustra el comportamiento de los vientos extraídos de dicha página, se presenta en las figuras 5.1 y 5.2, los demás comportamientos de los vientos de las fechas encontradas, se incluyen en el anexo D.

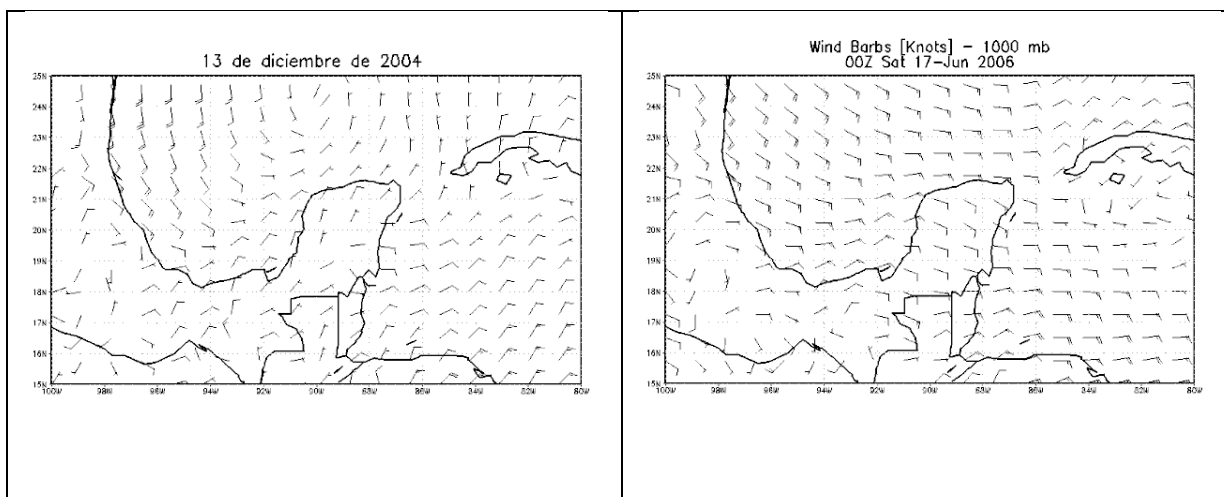


Figura 5.1 Trayectoria de los vientos que llegan a la costa y pasan por la zona de emisiones. (NARR, 2009)

Figura 5.2 Trayectoria de los vientos que no llegan a la costa de la zona de estudio (NARR, 2009)

Es interesante observar en la Figura 5.1, cómo la trayectoria de los vientos entre 1000 y 975 milibares, para el 13 de diciembre de 2004, establece que estos pasan por la zona de emisiones donde se encuentran los quemadores y llegan a la costa cercana de Ciudad del Carmen. Con respecto al día 17 de junio de 2006 (Figura 5.2), la trayectoria de los vientos es paralela a la costa, situación que no permitiría que la emisión de contaminantes atmosféricos, originados en la Sonda de Campeche llegase hasta la costa de la zona de estudio, aunque sí se dirigen hacia un sector de Veracruz, no incluido en el presente

trabajo. Lo anterior, apoya el método empleado para la selección de los periodos de eventos críticos de contaminación atmosférica, para la zona de estudio.

A fin de descartar los días que no tuviesen disponibilidad de información, se compararon estas fechas con la información ya manejada en el C.C.A, en lo que respecta al modelo MM5, con lo cual se pudo determinar que en los meses de diciembre de 2004, abril de 2007, junio de 2006 y septiembre de 2004, existía información suficiente para realizar las simulaciones. Con base en lo anterior, se escogieron las fechas encontradas, que coincidían con estos periodos para realizar la simulación.

Respecto a diciembre de 2004, siguiendo las indicaciones del estudio de Cuencas Atmosféricas (Magaña y Caetano, 2007) e investigadores del C.C.A., se procedió a investigar la altura de la capa límite planetaria en las coordenadas que demarcan la zona de estudio y registradas en la misma página de North American Regional Reanalysis y compararla con un mes del periodo de verano, de acuerdo como se explicó en la metodología presentada en el capítulo 4.

Para diciembre de 2004, se observa que la altura de la capa límite representada en la Figura 5.3, es aproximadamente la mitad con respecto al mes del periodo de verano representado en la Figura 5.4, de lo que se deduce que las condiciones de la altura de la capa límite planetaria para diciembre no permiten en buena medida la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos desde la Sonda de Campeche. Por tal motivo, este periodo es apropiado para simular el comportamiento de las emisiones y cómo impactan estas en la zona adyacente y costera, que es objeto de este estudio.

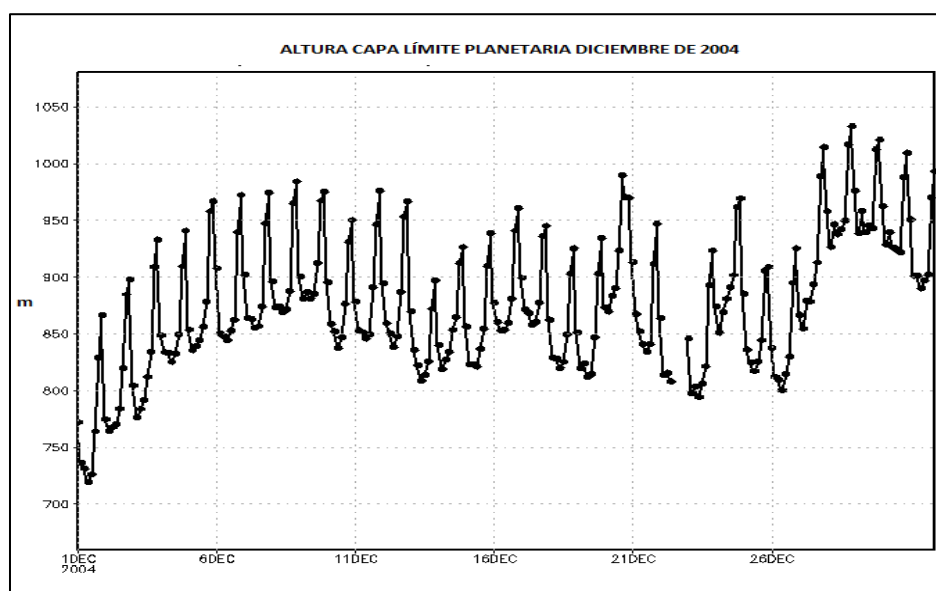


Figura 5.3 Altura de la capa límite planetaria de la zona de estudio para diciembre de 2004. (NARR, 2009)

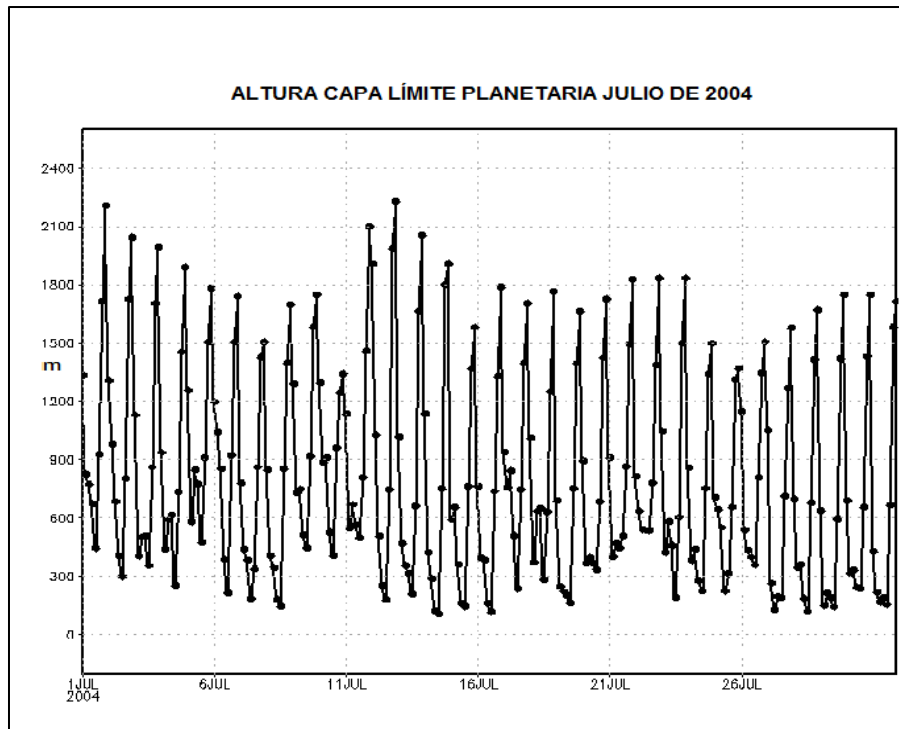


Figura 5.4 Altura de la capa límite planetaria en la zona de estudio para julio de 2004. (NARR, 2009)

## 5.2 CHIMENEA EQUIVALENTE, MODIFICACIÓN AL CODIGO FORTRAN DISEÑADO PARA EL CALPUFF

Se hicieron los cálculos y consideraciones respectivas descritas en el numeral 4.7.1, para establecer los quemadores como chimeneas equivalentes. Estos cálculos mostraron valores de diámetro equivalente hasta de 7 metros, con alturas de flama de hasta 31 metros y una altura total de chimenea de 86 metros (Véase la Tabla 5.1). Según lo obtenido, los diámetros son mayores que los diámetros de las chimeneas de las centrales termoeléctricas existentes en México (SEMARNAT, 2004). Respecto a los valores de altura de flama, se obtuvieron alturas tres veces mayores a los valores que se reportan en la bibliografía referente a estudios en quemadores, donde dichas alturas de flama alcanzan cuando mucho los 10 metros (Leahey y Schroeder, 1986) (Leahey y Davies, 1983). En cuanto a las alturas efectivas los valores se encontraban entre los 150 y 700 metros de altura aproximadamente.

Tabla 5.1 Resultados de la aplicación de la metodología de chimenea equivalente para diferentes tamaños de quemador.

QUEMADOR		Altura de Flama Calculada	CHIMENEA EQUIVALENTE	
DIAMETRO	ALTURA		DIAMETRO	ALTURA
0.5	55	32	7	87
0.9	31	30	7	61
0.75	45	7	1.5	52

Por la dimensión de los resultados obtenidos respecto a la altura de flama y el diámetro de chimeneas, que fueron mayores a lo descrito en la bibliografía, se tomó la decisión de no tener en cuenta esta metodología para fines de este estudio y se decidió modificar el código fuente del modelo Calpuff, de modo que pudiera simular directamente el comportamiento de quemadores y no de chimeneas, como originalmente fue diseñado.

Se realizó el cambio al código fortran con que se diseñó el modelo Calpuff, teniendo en cuenta el comportamiento de quemadores y una altura de flama fija de 10 metros, esto requirió recompilar el modelo y cerciorarse de que los resultados siguiesen el comportamiento de corridas anteriores. A manera de revisión se corrieron los archivos que vienen como ejemplo, encontrándose un comportamiento similar de la pluma contaminante a la generada por el modelo con el código original.

### 5.3 EMISIONES ATMOSFÉRICAS

Empleando los factores de emisión de la EPA registrados en la Tabla 4.1, se calcularon las emisiones para un total de 20 quemadores. La metodología de la EPA para el uso de factores de emisión (EPA, 2009), contemplan la relación de cantidad de contaminante emitido con respecto a la cantidad, volumen y características del combustible empleado, según la siguiente expresión:

$$E = A \times EF \times (1-ER/100) \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

- E = Emisiones (masa /tiempo)
- A = tasa de la actividad
- EF = factor de emisión. (177 µg /L)
- ER =Eficiencia de remoción, % (0)

Lo anterior aplica a partículas, cuyos valores estaban en el orden de 10 a 130 g/s. Para la emisión de dióxido de azufre se hizo necesario la realización de un balance de materia (León, 2001) de la siguiente manera:

$$E_{SO_2} = Q \times Y_s \times (1/C) \times M_{SO_2} \times MW_{SO_2} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Donde:

$E_{SO_2}$  : Emisiones de  $SO_2$ . (g/s)

Q : Flujo Volumétrico. (Lt/s)

$Y_s$  : Fracción mol de azufre en el gas. (mol S/ moles totales)

C : Volumen molar del gas a 15°C y 1 atmosfera de presión. (23.64 L /g-mol)

$M_{SO_2}$  : Conversión de S a  $SO_2$ . (mol de  $SO_2$ /mol S)

$MW_{SO_2}$ : Peso molecular del  $SO_2$ . (64 g/g-mol)

A manera de ejemplo se presenta el siguiente cálculo:

$$E_{SO_2} = 400 \frac{L}{s} \times \frac{1.69 \text{ gmol S}}{100 \text{ gmol gas}} \times \frac{\text{gmol}}{23.64 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ gmol } SO_2}{1 \text{ gmol S}} \times \frac{64 \text{ g } SO_2}{1 \text{ gmol } SO_2} = 18.3 \frac{g \text{ } SO_2}{s}$$

Asumiendo una conversión del 100% de S a  $SO_2$ , como condición crítica, se obtuvieron valores de emisiones que van desde 25 a 400 g/s en los diferentes quemadores. La emisión total calculada de  $SO_2$  fue de 486.5 ton/día. Es interesante observar, que este valor es muy similar a lo reportado en un estudio anterior (Villaseñor *et al.* 2003b) en donde reportan emisiones de 471 ton/día de  $SO_x$ . Las cantidades anteriores permiten establecer que el volumen de quema de gases asumido en el presente estudio es similar usado en el trabajo arriba mencionado.

En cuanto las emisiones de partículas menores de 10 micras, la suma total de las descargas calculadas fue del orden de 174 ton/día. Por otra parte, en el estudio referido anteriormente se estimaron emisiones del orden de 34 ton/día, las cuales difieren considerablemente con las primeras, debido al uso de factores de emisión diferentes, ya que en este trabajo se emplearon los factores publicados por la EPA, mientras que en el estudio mencionado se emplearon factores de emisión establecidos por la ARPEL. Este resultado sugiere que sería conveniente la realización de un estudio que permita medir directamente, las emisiones de partículas que se originan en los quemadores de la Sonda de Campeche.

Las emisiones obtenidas fueron consideradas para todos los escenarios simulados, por ende, también los consumos de gas quemado, con un promedio de 6153 L / s.

## 5.4 NIVELES DE CONTAMINACIÓN Y ÁREA DE INFLUENCIA DE LAS EMISIONES DE LOS QUEMADORES

Los niveles de contaminación generados por las emisiones consideradas en este trabajo se encuentran consignados en el Anexo E. A continuación se presentan los resultados más relevantes en términos de mapas de iso concentración, que muestran las zonas de influencia de las emisiones, así como los valores máximos obtenidos y su comparación con la normatividad ambiental vigente, que para el caso de  $\text{SO}_2$  es la NOM-022-SSA1-1993, donde se establece que no se puede exceder de  $341 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{SO}_2$  en 24 horas una vez al año, mientras que para partículas es la Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, donde establece que no se debe exceder de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas para  $\text{PM}_{10}$ . Se incluye una comparación entre los resultados de las simulaciones con algunos valores de concentración publicados y obtenidos de monitoreos previos.

### 5.4.1 Distribución de concentraciones

Las simulaciones realizadas en los periodos ya mencionados, correspondientes a las emisiones de  $\text{PM}_{10}$  y dióxido de azufre, tal como se observa en las Figuras 5.5 y 5.7, presentan en algunos casos, una trayectoria hacia el sur que penetra a la costa por los estados de Tabasco y Campeche, pasando por el área natural de Los Pantanos de Centla, siguiendo por la ciudad de Villahermosa en el estado de Tabasco, hasta penetrar un poco la Sierra de Chiapas, en donde se registran valores de hasta  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$  y  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{SO}_2$ . Estos escenarios corresponden al 11 de diciembre de 2004.

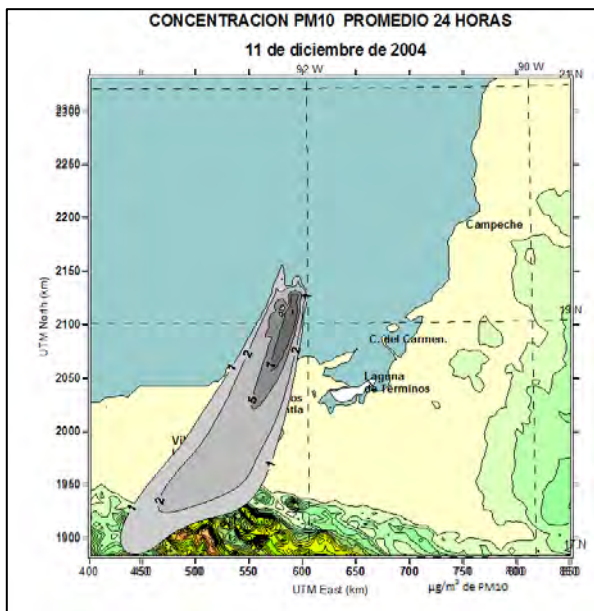


Figura 5.5. Penetración de la pluma contaminante simulada para  $\text{PM}_{10}$ .

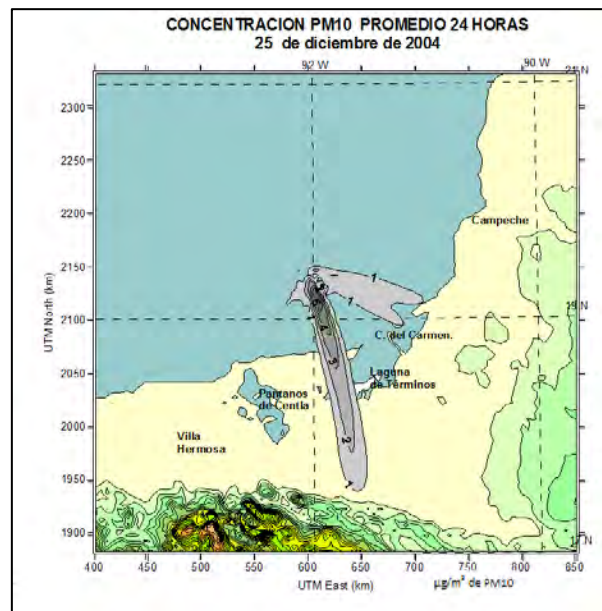


Figura 5.6. Penetración de la pluma contaminante simulada para  $\text{PM}_{10}$ , en Ciudad del Carmen.

Como se puede observar en las Figuras 5.6 y 5.8, el 25 de diciembre de 2004 existieron las condiciones apropiadas para que la pluma contaminante, proveniente de la zona de quemadores, impactara Ciudad del Carmen. Los valores máximos obtenidos se encuentran alrededor de  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en cuanto a  $\text{PM}_{10}$  y de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respecto a  $\text{SO}_2$ . Es interesante notar que estos valores son relativamente pequeños y que se presentaron con vientos de hasta  $6.7 \text{ m/s}$ .

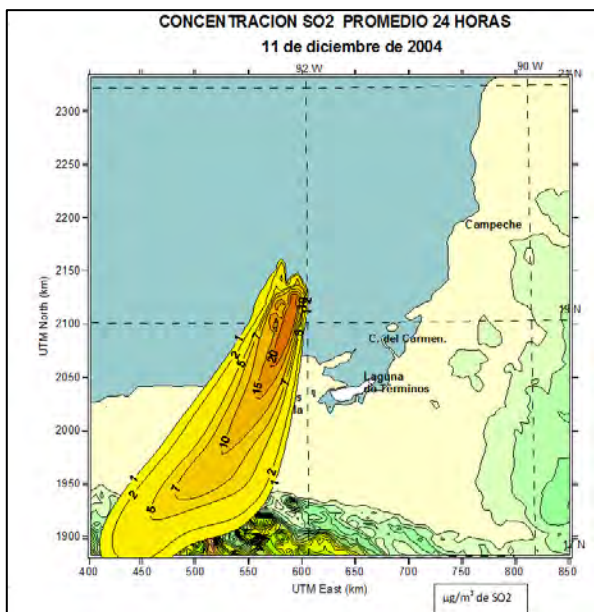


Figura 5.7. Penetración de la pluma contaminante simulada para  $\text{SO}_2$ .

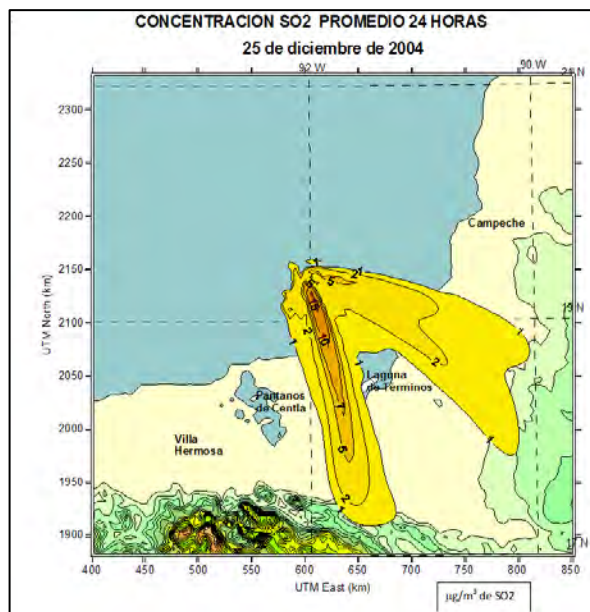


Figura 5.8. Penetración de la pluma contaminante simulada para  $\text{SO}_2$ , en Ciudad de Carmen.

Así mismo, se puede apreciar que en ningún caso en estas figuras ni en las que se presentan en el anexo E, se exceden las normas de calidad de aire de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{SO}_2$  (Secretaría de Salud de México, 1993 y 2005).

Por otra parte, durante el periodo correspondiente a diciembre de 2004, la pluma contaminante emitida desde los quemadores alcanzó la costa en 13 de los 30 días simulados, lo que correspondió al 43 % de los días. Se puede apreciar en las Figuras 5.9 y 5.10 que el área de influencia por las emisiones, con concentraciones mayores a  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , puede llegar a ser la mitad de la zona de estudio aproximadamente y que corresponde a una extensión de  $103,512 \text{ km}^2$ .

El área de influencia cuando la pluma contaminante alcanza a la costa, incluye a ciudades de importancia como Villa Hermosa en Tabasco y Ciudad del Carmen en Campeche, con una concentración demográfica importante que puede resultar expuesta a los contaminantes atmosféricos de la Sonda de Campeche. Además de lo anterior, presenta fragilidad en su ecosistema, ya que se encuentran dos áreas naturales de interés nacional como lo son la reserva de la biosfera Los Pantanos de Centla y el área de protección de flora y fauna Laguna de Términos. Estos lugares tienen valor económico



implícito, al explotar los recursos allí existentes en actividades primarias como la pesca y por su belleza natural de atractivo turístico

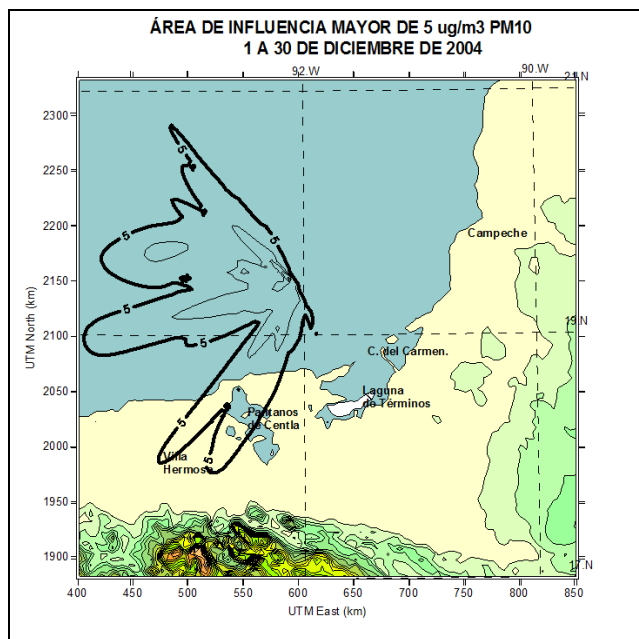


Figura 5.9. Área de posible influencia de las emisiones contaminantes de PM<sub>10</sub>, de los quemadores de la Sonda de Campeche.

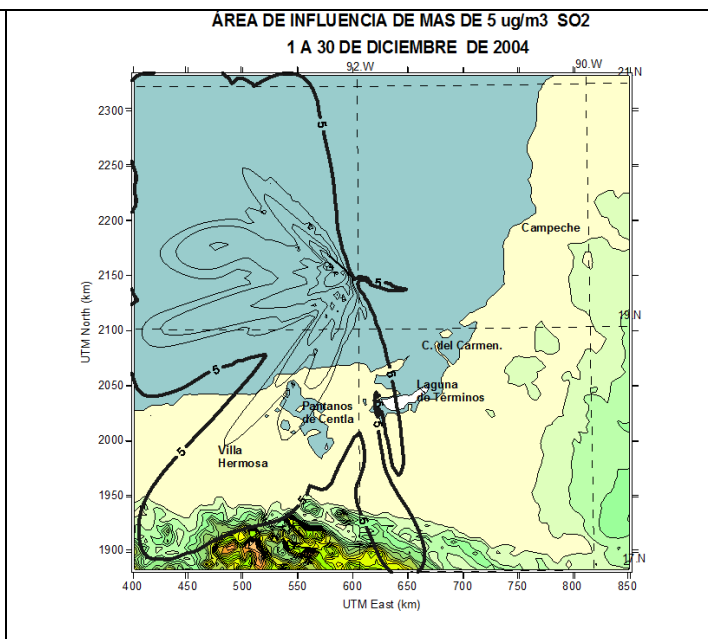


Figura 5.10. Área de posible influencia de las emisiones contaminantes de SO<sub>2</sub>, de los quemadores de la Sonda de Campeche.

Esta área de influencia, permite establecer la necesidad de implementar una red de monitoreo atmosférico que tenga un dominio principalmente hacia el suroeste de Ciudad del Carmen, evaluando los contaminantes estimados como resultado final de un inventario de emisiones.

#### 5.4.2 Concentraciones a distancias entre 85 y 90 km de la zona de quemadores y radio de afectación

A fin de establecer los niveles de contaminación que impactan en ciudad del Carmen y sus alrededores, se encontró el valor máximo de concentración promedio de 24 horas en cada corrida, con los datos contenidos en los archivos de salida de cada uno de los periodos de simulación y a una distancia entre 85 y 90 km desde la zona de quemadores, distancia aproximada que separa a la Sonda de Campeche de Ciudad del Carmen. Esta condición tomó en cuenta todas las direcciones hacia donde se dirigía la pluma contaminante, es decir, también se consideraron los casos en los que la pluma se adentraba en el mar.

Las concentraciones encontradas a las distancias mencionadas, oscilan en el intervalo de 9.0 a 1.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$  (Figura 5.11), con un promedio aritmético de 4.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Durante los días 3 de septiembre, 10, 18, 23 y 24 de diciembre del año 2004, los valores de concentración obtenidos alrededor de los quemadores a las distancias referidas anteriormente, no excedieron el microgramo por metro cúbico de  $\text{PM}_{10}$ .

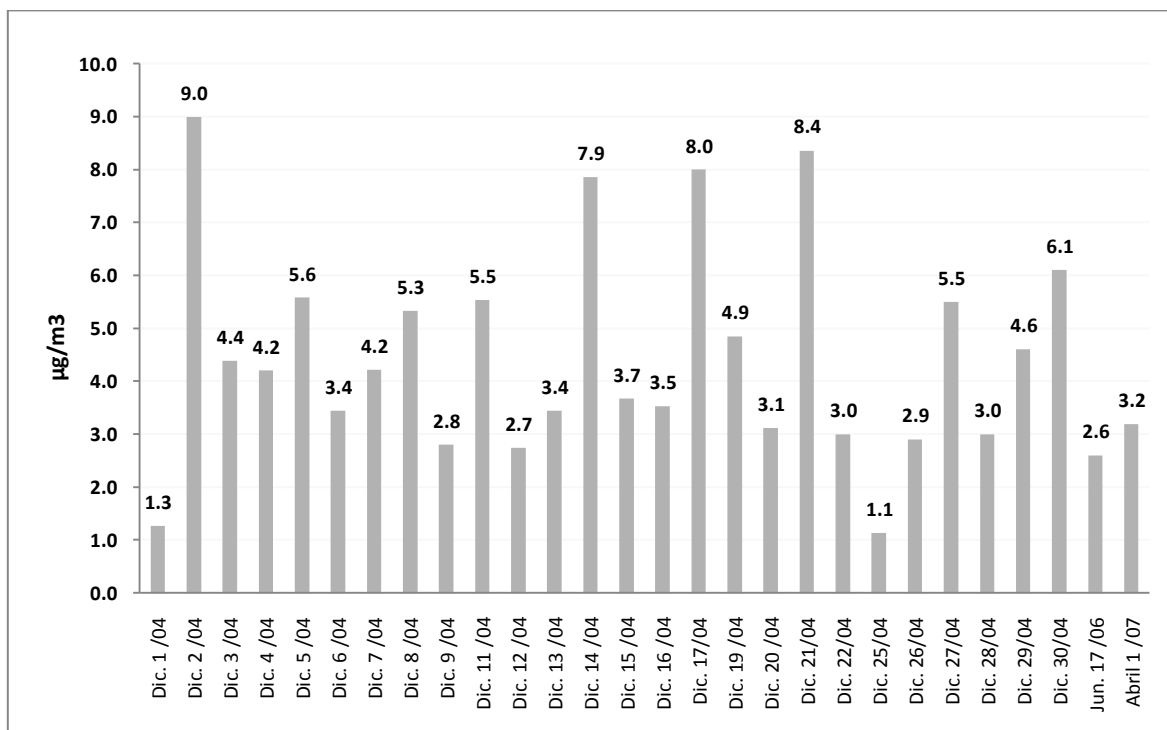


Figura 5.11. Concentraciones máximas promedio de 24 horas de  $\text{PM}_{10}$  a una distancia de 85 a 90 km desde el máximo valor encontrado en la zona de quemadores.

Respecto a dióxido de azufre, los valores de concentración obtenidos en las simulaciones a estas mismas distancias, oscilaron entre 23.9 y 1.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , tal como se observa en la Figura 5.12, con un promedio de 10.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para el día 3 de septiembre de 2004, los valores de concentración de  $\text{SO}_2$  no superaron el microgramo por metro cúbico a las distancias mencionadas.

Teniendo en cuenta los datos de concentración de dióxido de azufre obtenidos por la red de monitoreo atmosférico de Atasta, que se presentan en la Tabla 1.3, cuyos valores oscilan entre 26.2 y 42.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , se compararon dichos valores con los resultados de las simulaciones realizadas los días 11, 14, 18, 19, 25 y 26 de diciembre de 2004, cuando la pluma contaminante se dirigió hacia la población de Atasta. Estos valores se representan en las primeras ocho barras de la Figura 5.12.

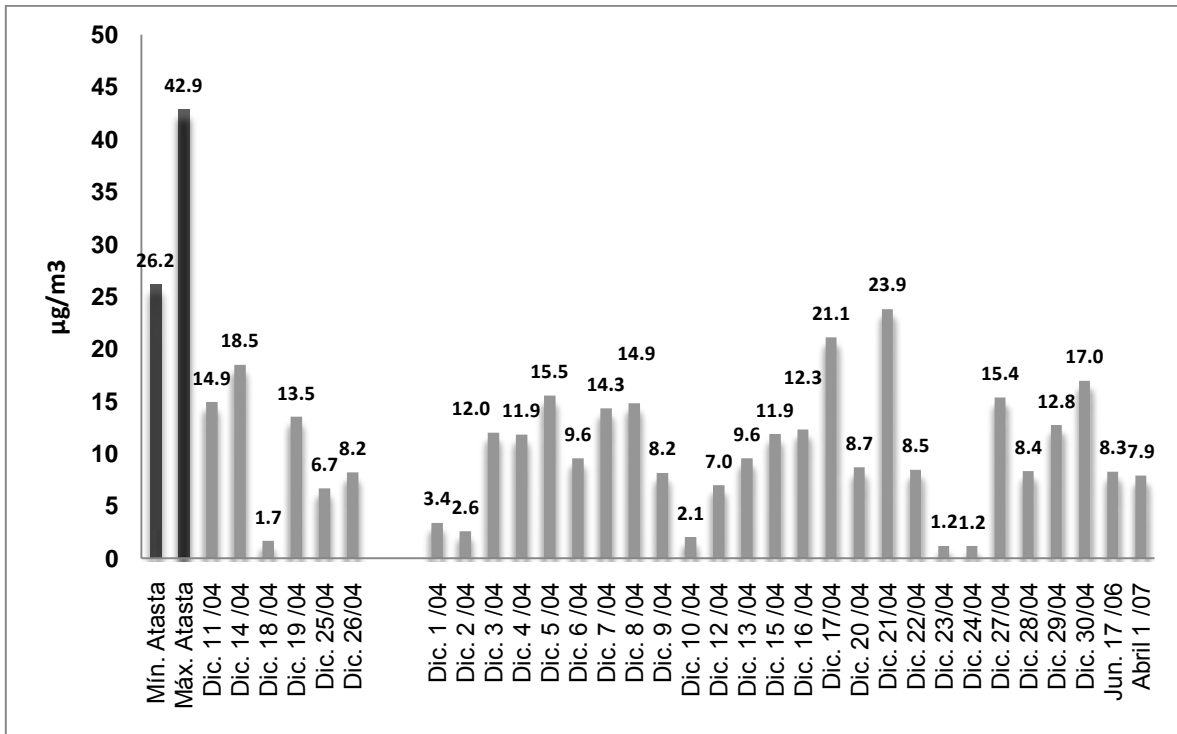


Figura 5.12. Concentración máxima promedio de SO<sub>2</sub> en 24 horas entre 85 y 90 Km desde el máximo valor encontrado en la zona de quemadores y concentraciones medidas en Atasta (El autor, 2010).

De los días anteriormente mencionados, el 14 de diciembre se presentó el valor más alto de concentración con un valor 18.5 µg/m<sup>3</sup>. Si se compara este valor con los medidos en Atasta de la Tabla 1.3, se observa que está por debajo de lo registrado difiriendo hasta en un 30%.

Por otra parte, cuando la trayectoria de la pluma contaminante se dirigió con una trayectoria diferente a Atasta, se alcanzó un valor máximo de 23.9 µg/m<sup>3</sup> promedio diario, el 21 de diciembre de 2004. El valor anterior está por debajo de lo registrado, difiriendo hasta en un 9% de los valores referidos.

Las comparaciones anteriores se encuentran dentro del rango de aceptación de un modelo de dispersión atmosférica, ya que se afirma que este rango está en un factor entre 0.5 y 2, asumiendo la relación: Concentración Observada / Concentración Predicha (Gratt, 1996)

Es importante aclarar que de todos los valores máximos obtenidos de las simulaciones, ninguno excedió los valores registrados en Atasta. Así mismo, los valores obtenidos en la red de monitoreo atmosférico no corresponden ni a las fechas ni a las condiciones meteorológicas con las que se realizaron las simulaciones. También es necesario hacer notar que los valores registrados en Atasta se encuentran también influenciados por fuentes diferentes a las situadas en la Sonda de Campeche. Esta situación explica por

qué las concentraciones obtenidas de las simulaciones son inferiores a los valores registrados en esta localidad, no obstante, representan cantidades relativamente similares en orden de magnitud a lo medido en Atasta.

A fin de establecer los gradientes de concentración que se presentan desde la zona de quemadores hasta la costa, se tomaron los valores máximos promedio diarios de los archivos de salida del modelo, de cada una de las corridas a 10, 20, 40, 60 y 80 kilómetros de distancia desde de la zona de quemadores.

Los valores representados en las Figuras 5.13 y 5.14, se hallaron después de realizar un barrido en cada uno de los días simulados y tomando el valor máximo de concentración encontrado en todas las direcciones a las distancias establecidas.

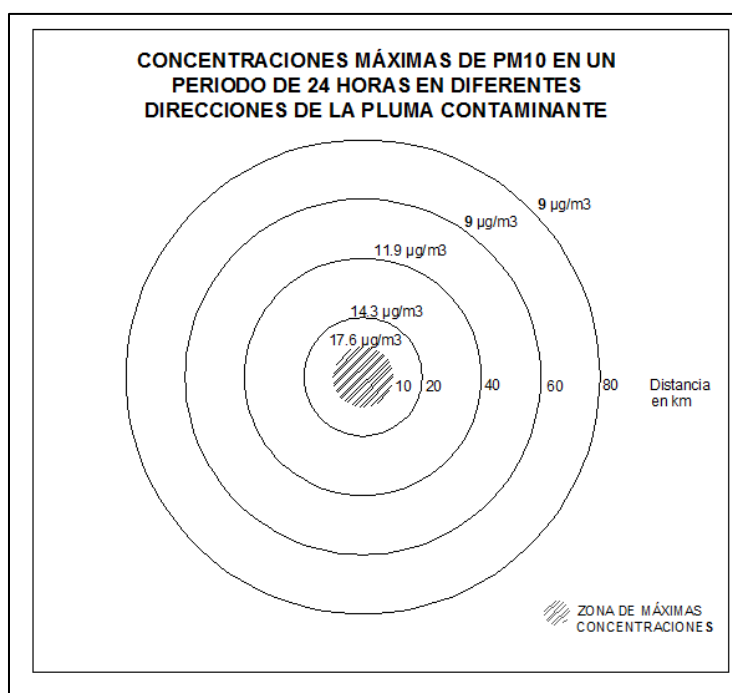


Figura 5.13. Radio de afectación de las emisiones de PM<sub>10</sub> de los quemadores de gases de exceso en la Sonda de Campeche.

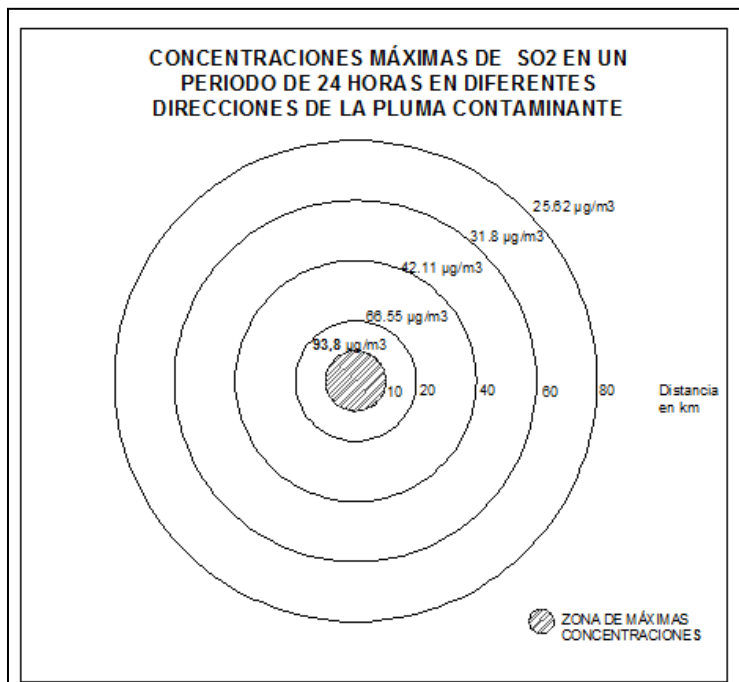


Figura 5.14. Radio de afectación de las emisiones de SO<sub>2</sub> de los quemadores de gases de exceso en la Sonda de Campeche

### 5.4.3 Valores máximos de concentración

Una de las funciones para datos de salida del modelo Calpuff, es la determinación de los valores máximos encontrados durante la simulación, su ubicación, su fecha y hora cuando se presentan. Para mayor información, en el Anexo F se presenta una tabla con los primeros 10 valores máximos promedio de concentración en 24 horas, tanto para partículas menores de 10 micras como para dióxido de azufre en los diferentes periodos simulados.

En todos los eventos simulados, los valores máximos de concentración promedio de 24 horas, tanto para PM<sub>10</sub> como para SO<sub>2</sub>, se ubicaron en lugares próximos a la zona de quemadores.

En las Figuras 5.15 y 5.16 se grafican los valores máximos promedio de concentración en 24 horas, hallados en las simulaciones con el modelo CALPUFF en todos los periodos simulados, tanto para partículas menores de 10 micras como para dióxido de azufre.

Es de notar que en dichas graficas para el 21 de diciembre de 2004 se presentaron los valores picos más altos para los dos contaminantes, con 51.9 µg/m<sup>3</sup> para partículas y 144.6 µg/m<sup>3</sup> para dióxido de azufre, valores que en ningún momento exceden las normas

de calidad del aire<sup>10</sup>. Revisando las trayectorias de las plumas contaminantes dadas en los mapas de líneas de iso concentración para este día, se pudo observar que la pluma contaminante y vientos se dirigieron mar adentro y no tocaron la costa, tal como se observa en las Figuras 5.17 y 5.18.

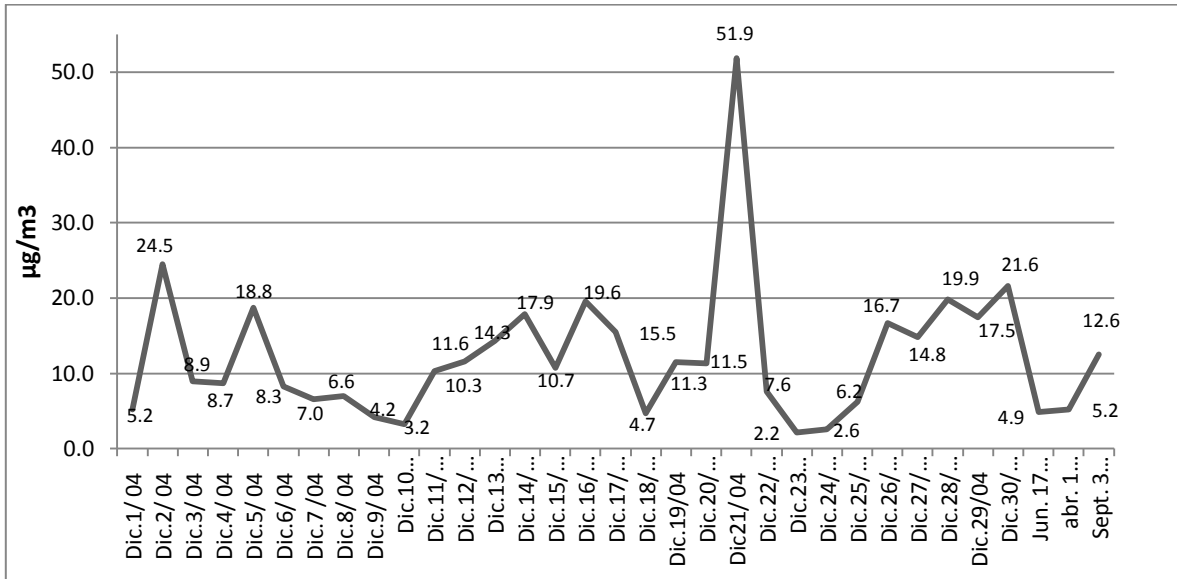


Figura 5.15. Valores máximos de concentración de PM<sub>10</sub> en un periodo de 24 horas.

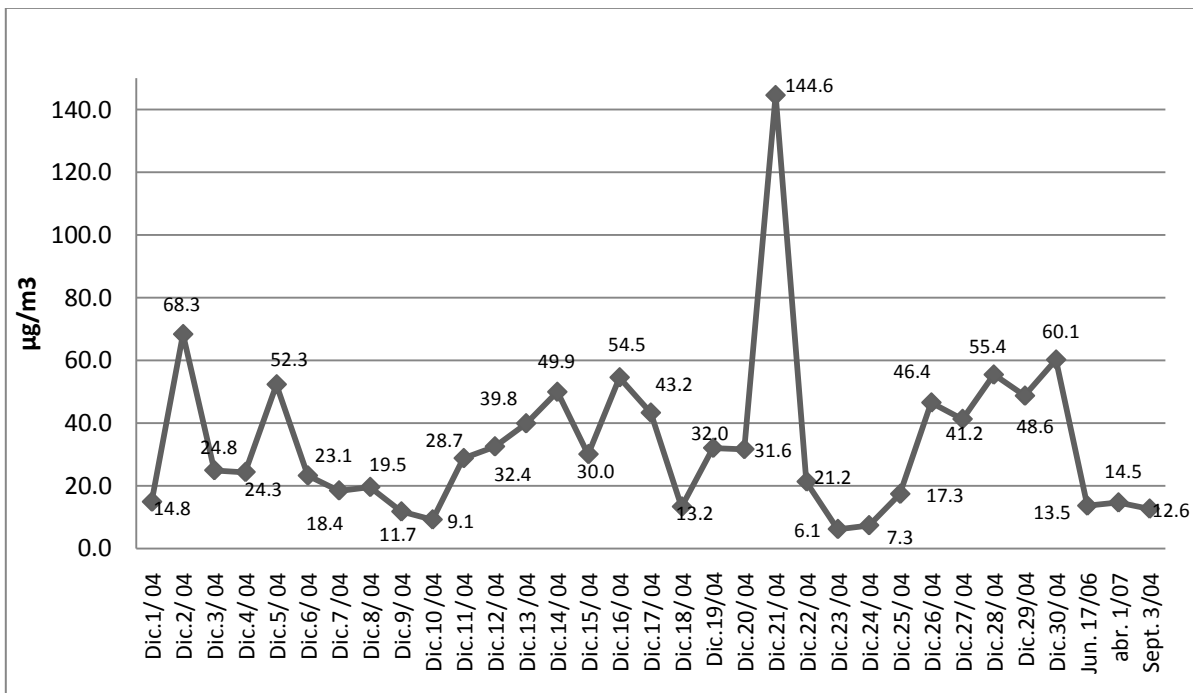


Figura 5.16. Valores Máximos de concentración de SO<sub>2</sub> en un periodo de 24 horas.

<sup>10</sup> 120 µg/m<sup>3</sup> promedio de 24 horas para PM<sub>10</sub> y 341 µg/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub> en 24 horas una vez al año.

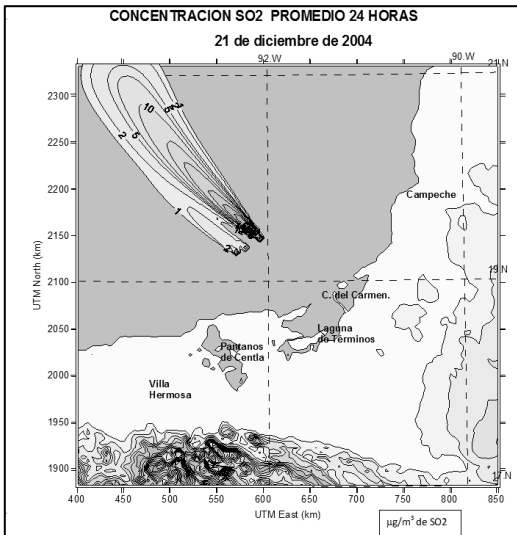


Figura 5.17. Trayectoria de la pluma contaminante de SO<sub>2</sub> el 21 de diciembre de 2004.

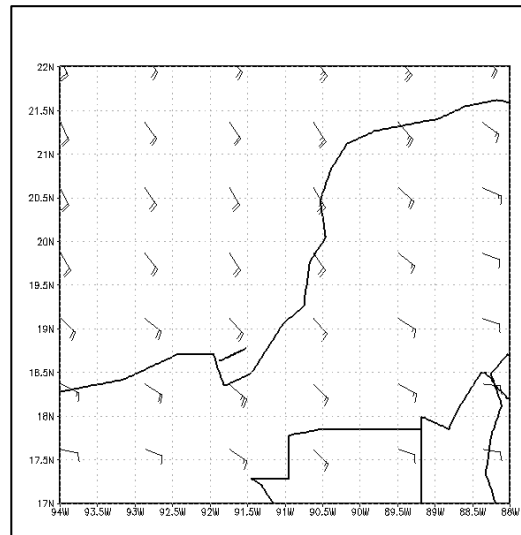


Figura 5.18. Trayectoria del viento el 21 de diciembre de 2004.

Revisando las características meteorológicas de este día, se consultaron las alturas de la capa límite planetaria de la página de la NARR, encontrándose que presenta una de las alturas más bajas y por tal motivo, se puede presentar un evento de máximas concentraciones de contaminantes atmosféricos, al no permitir una adecuada dispersión de los mismos, en la zona de estudio. En las Figuras 5.19 y 5.20, en el recuadro se demarcan el día 21 de diciembre con relación a los otros días del mes, para una mejor visualización.

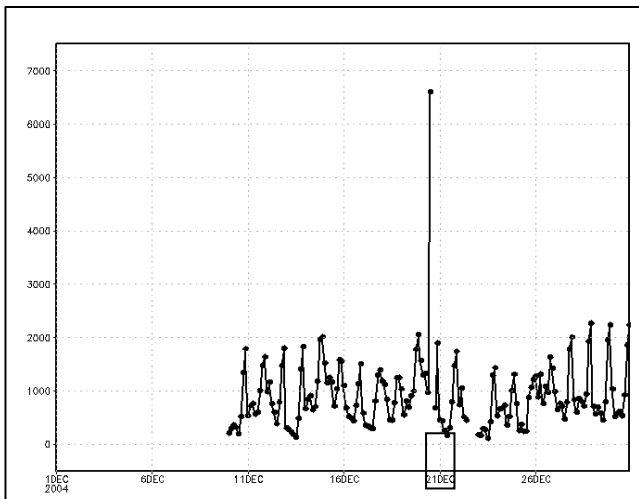


Figura 5.19. Altura de la capa límite planetaria del 10 al 30 de diciembre de 2004 (NARR, 2009)

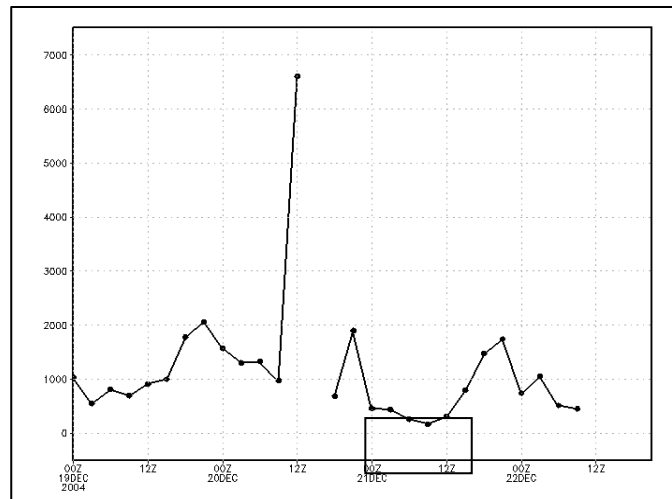


Figura 5.20. Altura de capa límite planetaria del 20 al 22 de diciembre de 2004 ( NARR, 2009)

En un estudio similar desarrollado en el 2006 (Domínguez y Graniel, 2007), se determinaron valores máximos de concentración de SO<sub>2</sub> en un periodo de 24 horas de hasta 175 µg/m<sup>3</sup>, en el periodo denominado invierno 1 que abarcaba del 21 de diciembre del 2000 al 6 de enero de 2001. Este valor es un poco mayor al encontrado de 144.6 µg/m<sup>3</sup>, sin embargo, atiende a condiciones meteorológicas y herramientas computacionales diferentes a las del presente estudio, pero constituyen niveles de contaminación relativamente similares.

## **5.5 LIMITACIONES Y ÁREA DE OPORTUNIDAD**

Considerando las limitaciones e incertidumbre, que genera el uso de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos y debido a las consideraciones desarrolladas para la aplicación del modelo CALPUFF en el presente trabajo, se hace necesario estimar las posibles mejoras que pueden llevarse a cabo en un futuro y sobre todo en la aplicación de los datos de entrada requeridos por el modelo.

### **5.5.1 Emisiones atmosféricas**

En este punto que es importante en la alimentación de un modelo de dispersión, la ausencia de datos medidos directamente en campo, generan dificultad para poder validar totalmente los resultados, siendo necesario el uso de factores de emisión estimados bajo condiciones de trabajo y operación, totalmente diferentes a las encontradas en la Sonda de Campeche en el Golfo de México. Lo anterior, lleva a la necesidad de realizar mediciones exhaustivas en campo de las emisiones generadas durante la quema de gases de exceso, considerando diferentes variaciones de producción y operación durante al menos un año.

Al considerar una simulación que incluya otras fuentes de emisión y la ubicación exacta de todas y cada una de ellas, junto con los valores de concentración de fondo característicos de la zona y que no fueron incluidos en este trabajo, permitiría una aproximación de los valores concentraciones estimadas con respecto a los medidos por estudios de campo.

El estudio de evaluación de emisiones mencionado deberá ir de la mano con un estudio de calidad del aire en la zona cercana a la costa, de tal manera que permita validar el modelo de simulación.

La inclusión de fenómenos tales como las reacciones y transformaciones químicas, junto con la remoción seca y húmeda de contaminantes, permite disminuir la incertidumbre propia que manejan los modelos de simulación, respecto a la dispersión de contaminantes



en la atmósfera. Por lo anterior, estas consideraciones deberán tenerse en cuenta en estudios futuros, según la naturaleza del contaminante emitido.

### **5.5.2 Condiciones meteorológicas**

Con relación a las condiciones meteorológicas evaluadas, se limitaron a periodos donde se presentaran eventos adversos de dispersión de contaminantes atmosféricos y que además se dirigiera a la costa. Lo anterior lleva a la necesidad de realizar simulaciones de al menos un año completo considerando la información obtenida por estaciones meteorológicas privadas y de la Secretaria de Marina, o la instalación de estaciones meteorológicas adecuadas en la zona de estudio, en un estudio futuro.

## **CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

### **6.1 CONCLUSIONES**

- Con base en factores de emisión encontrados en la literatura, particularmente los publicados por la EPA. y mediante el uso del modelo de dispersión CALPUFF, se logró estimar las emisiones de partículas menores a 10 micras y de dióxido de azufre que producen el conjunto de quemadores que operan en la Sonda de Campeche, así como el impacto a la calidad del aire que generan, en una zona que comprende parte los territorios de los estados de Campeche, Tabasco, Chiapas, Yucatán y Veracruz.
  
- Los valores de concentración obtenidos tanto para SO<sub>2</sub> como para PM<sub>10</sub>, en las diferentes simulaciones con el modelo CALPUFF, bajo los escenarios considerados en este trabajo, no sobrepasaron en ningún momento los valores establecidos por la normatividad ambiental vigente. Sin embargo, esto no significa que en la zona no se estén presentando niveles de contaminación superiores, originadas por la contribución de otras fuentes allí existentes y que no fueron consideradas en este trabajo.
  
- El área de influencia de las emisiones, producto de las simulaciones de la quema de gases en las actividades de producción de petróleo en la Sonda de Campeche, incluye a poblaciones importantes como es el caso de Ciudad del Carmen en el estado de Campeche y Villa Hermosa en Tabasco, comprendiendo además, territorios de los estados de Campeche, Tabasco y Chiapas y un amplio sector mar adentro que cubre principalmente el sur oeste del Golfo de México. La superficie puede llegar a alcanzar una extensión de 103,512 km<sup>2</sup>.
  
- La zona posiblemente afectada por las emisiones estudiadas, contiene además de numerosos centros de población, dos áreas naturales con una alta sensibilidad ecológica, como lo son Los Pantanos de Centla y la Laguna de Términos.
  
- En momentos en que la pluma contaminante se dirija a la Ciudad del Carmen, que es la población más importante y cercana a la zona de emisiones, el modelo predice

aportaciones máximas de hasta  $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en los valores promedio de 24 horas para el dióxido de azufre. Estos resultados sugieren que las emisiones de los quemadores de la Sonda de Campeche, pueden representar una afectación en la calidad del aire de alrededor de la mitad de lo reportado en lugares cercanos a esta localidad.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Teniendo como base estudios previos en donde se estiman que las emisiones de los quemadores representan hasta un 82% de lo emitido, por las actividades de producción y exploración en la zona, sería conveniente considerar todas las emisiones, incluyendo emisiones sobre tierra, en una simulación futura empleando criterios de selección de días similares a los realizados en el presente trabajo; así mismo posibles variaciones del gas quemado según el gas quemado. Esto permitirá comparar los resultados de simulaciones con los niveles de calidad del aire monitoreados en las redes ya instaladas en la zona.
- Se recomienda realizar un estudio que permita estimar, mediante mediciones directas, las emisiones que caracterizan a los quemadores presentes en la Sonda de Campeche, a fin de evitar el empleo de factores de emisión publicados en otros países bajo condiciones y tecnologías diferentes. Así mismo, la posterior simulación de otros contaminantes no considerados en este estudio
- Las trayectorias de las emisiones obtenidas mediante la simulación, sugieren la necesidad de implementar una red de monitoreo que se extienda desde Ciudad del Carmen hacia el sur oeste llegando al estado de Tabasco.
- El aprovechamiento de los gases de exceso que en la actualidad son quemados en las actividades de exploración y producción, disminuiría las consecuentes pérdidas económicas y el impacto ocasionado a la atmósfera por las emisiones de contaminantes.

## BIBLIOGRAFÍA

---

API. 1977. Manual On Disposal Of refinery Wastes, Volume On Atmospheric Emissions. API Publication 931.

ARPEL. (1982). Guía para el Quemador de gas residual en Instalaciones de Exploración y producción. Ed. Montevideo Uruguay Asociación de Asistencia Reciproca Petrolera E. Latinoamericana.

Bravo H., Sosa R., kahl J., Sánchez P., Alarcón A., Soto R. (2003). Acid Deposition Events during The Autumn of 2003 in a research cruise over the Gulf of México. Paper AWMA-06A-430. A&WMA 99<sup>th</sup>, Annual Conference & exhibition. June 20-23 de 2006.

Bravo H., Sosa R., Sánchez P., Alarcón A., kahl J., Ruíz J. (2005). Efect of acid rain on building of the El Tajín Archeological zone in Veracruz, México. Environmental Pollution, Volume 144 no. 2 November 2006.

Botello A. V., Villanueva S. (1985). Vigilancia de los hidrocarburos fósiles en sistemas costeros del Golfo de México y áreas adyacentes. I. Sonda de Campeche. Anales del instituto de Ciencias del mar y limnología *Trabajo recibido el 12 de agosto de 1985 y aceptado para su publicación el 5 de diciembre de.*, UNAM. México.

C.C.A (2009). Imágenes de las Zonas de corrida del Modelo MM5, comunicación personal con el grupo de Físicoquímica Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmosfera, 2009.

CONABIO (1995). Reservas de la Biosfera y otras áreas naturales de México. SEMARNAT- INE – CONABIO, 1995.

Conap (2010). Imagen Área de protección de flora y fauna laguna de Términos. Comisión Nacional de Aéreas Protegidas. Disponible en [www.conanp.gob.mx](http://www.conanp.gob.mx), 2010

De Nevers N. (1995). Ingeniería de control de la contaminación del aire., McGRAW-HILL. México, 1995.

Domínguez A. M., Graniel M. (2006). Estimación de emisiones a la atmosfera provenientes de quemadores elevados de instalaciones petroleras en la Sonda de Campeche. Ingeniería. Investigación y Tecnología, julio – septiembre, Vol. VII, No. 003. Universidad Nacional Autónoma de México. México

Domínguez A. M., Graniel M. (2007) Evaluación exploratoria de la dispersión de contaminantes emitidos por operaciones de quema de gas amargo en la Sonda de Campeche Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Vol. 23, No. 003, pp. 99 -113. UNAM. México.

Dudhia J., Gill D., Manning K., Wang W., Bruyere C. (2005), PSU/NCAR Mesoscale Modeling System, Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3. Mesoscale and Microscale Meteorology Division. National Center for Atmospheric Research. Enero de 2005.

Ecosur (2010). Fotografía aérea reserve de la Biosfera Los Petenes. El Colegio de la Frontera Sur. Disponible en Ecosur 2010.

Elbir T. (2003). Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey. Atmospheric Environment 37, 2149–2157.

El clima (2010). Imagen de los Pantanos de Centla. Disponible en [www.elclima.com.mx](http://www.elclima.com.mx)

EPA. (1992). Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources, Revised. Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, North Carolina 27711. United States.

EPA. (1995). Emission factor AP.42. Chapter 13. Industrial Flare. <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>. October 15 de 2009 .

EPA. (2000). Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications. Office of Air and Radiation Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, February.

EPA, (2008). Air Quality Models. Disponible en <http://www.epa.gov/SCRAM001/aqmindex.htm>

EPA (2009). *Emissions Factors & AP 42*, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Disponible en <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>

Estrada A. (2001) Alternativa de Solución en un marco de desarrollo Sustentable al Impacto Ambiental Producido Por Quemadores Elevados en la Industria del Petróleo. Tesis para Obtener el grado de Maestro en ciencias con especialidad en Ing. Ambiental. IPN. México.

European Environmental Agency. (2009). Guidebook 2009, Combustion in energy and transformation industries. Flaring in oil refinery Flaring in gas and oil extraction.

Franklin N., Leahey D. (1998). Atmospheric Emissions Inventories methodologies in the Petroleum Industry. ARPEL Guidelines. 1998.

García (1988). Modificación al Sistema de Clasificación Köppen. Enriqueta García Amaro. Instituto de geografía UNAM. 1988. <http://132.248.9.33:8991/mapIG/climas.pdf>

Gobierno de Campeche. (2010) Reserva de la Biosfera Los Petenes <http://www.ecologia.campeche.gob.mx/temas.php>

Gómez C. A. (2000). Plataformas marinas, infraestructura para la explotación de hidrocarburos en la Sonda de Campeche, México. Tesis Licenciatura (Ingeniero Mecánico Electricista)-UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan. México.

- Gratt L. (1996). Toxic Risk Assessment and Management. Ed. Van Nostrand Reinhold, 1996.
- Greco S. L., Wilson A. M., Spengler J. D., Levy J. I. (2007). Spatial patterns of mobile source particulate matter emissions-to-exposure relationships across the United States. *Atmospheric Environment* 41, 1011–1025.
- Guzmán, C. A. (1998) Diseño de una red automática de monitoreo atmosférico para la Terminal Marítima Dos Bocas, Tabasco, México. Tesis Maestría (Maestría en Ingeniería Ambiental)-UNAM, Facultad de Ingeniería. México
- Hao J., Wang L., Shen M., Li L., Hu J. (2007) Air quality impacts of power plant emissions in Beijing. *Environmental Pollution* 147, 401-408.
- Herrera Ch. A.( 2007), Evaluación de la deposición húmeda en la Costa del Golfo de México para el periodo 2003-2005. Tesis Licenciatura (Químico)-UNAM, Facultad de Química México.
- Holmes N.S., Morawska L. (2006). A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment* 40, 5902–5928.
- Honaganahalli P. S., Seiber J. N., (2000) Measured and predicted airshed concentrations of methyl bromide in an agricultural valley and applications to exposure assessment. *Atmospheric Environment* 34, 3511- 3523.
- Indumati S., Oza R.B., Mayya Y.S., Puranik V.D., Kushwaha. H.S. (2009). Dispersion of pollutants over land–water–land interface: Study using CALPUFF model. *Atmospheric Environment* 43 473–478.
- Iter (2005). MM5 Modelo numérico de predicción atmosférica. Boletín Informativo del Instituto Tecnológico y de Energías Renovables. Número 8, marzo de 2005.
- Joseph D., Lee J., Mckinnon C., Payne R., Phohl J. (1984). Evaluation of the Efficiency of Industrial Flares: Background – Experimental Design- Facility. EPA Industrial Environmental Research Laboratory. United States
- Kreider J.F. 2001. Handbook of heating Ventilation, and AIR Conditioning. The mechanical engineering Handbook Series. CRC PRES.
- Leahey D., Davies J. (1983). Observation of Plume Rise from Sour Gas Flares. *Atmospheric Environment*, Vol. 18, No. 5, 917-922.
- Leahey D., Schroeder M., (1987). Observations of jet Diffusion Flame Behavior. *Atmospheric environment*, Vol21, No. 4, 777-784.
- León G. L. (2001). Inventario de las emisiones atmosféricas de las actividades petroleras en la Sonda de Campeche, Estudio de caso: plataformas de compresión. Tesis Licenciatura (Ingeniero Químico)-UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan. México, 2001.
- Lopez M.T., Zuk M., Garibay V., Tzintzun G., Iniestra R., Fernandez A. Health impacts from power plant emissions in Mexico. *Atmospheric Environment* 39 (2005) 1199–1209. Received 19 April 2004; accepted 6 October 2004.

Magaña V., Caetano E. (2007). Identificación de cuencas atmosféricas en México. Grupo de Meteorología Tropical Centro de Ciencias de la Atmósfera Universidad Nacional Autónoma de México Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional (DGICUR) Instituto Nacional de Ecología Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Montávez P. (2010) El modelo meteorológico MM5. Universidad de Murcia, Ministerio del poder popular para la defensa, Gobierno Bolivariano de Venezuela. Disponible en [http://www.meteorologia.mil.ve/siafavm/frontend/static\\_files/climatologia/modelo-MM5.pdf](http://www.meteorologia.mil.ve/siafavm/frontend/static_files/climatologia/modelo-MM5.pdf)

Mori Y. (1987). Methods for Estimating the mean and the standard deviation of Wind direction. *Journal of climate and applied Meteorology*. Vol 26, 1282-1284.

NARR (2009). North American Regional Reanalysis Daily Dataset. Disponible en la dirección [http://nomads.ncdc.noaa.gov/cgi-bin/ncdc-ui/define-collection.pl?model\\_sys=narr&model\\_name=narr](http://nomads.ncdc.noaa.gov/cgi-bin/ncdc-ui/define-collection.pl?model_sys=narr&model_name=narr)

Neft J., Brand C., Ward F., Gonzalez M. C., Pelley M., Nino J., Pinera N. (2009). Normas Ambientales capítulo 3, PEMEX y la Salud Ambiental de la Sonda de Campeche México. Batelle, IMP, UAM, UNAM, PEMEX. 2009.

Parkswatch (2010). ParksWatch, Strengthening Parks to Safeguard Biodiversity. <http://www.parkswatch.org/>

Pemex (2002). Video: Treinta Aniversario de la Sonda de Campeche. PemexTV. <http://tv.pemex.com/index.cfm>, consultado el 19 de Noviembre de 2009.

Pemex (2009). Ku Maloob Zaap <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionID=145&catID=12683> consultado el 22 de noviembre de 2009.

Pemex. (1983) Plataformas Marinas en la Sonda de Campeche. Subdirección de Construcción de Obras.

Pemex. (2009). Anuario estadístico. Gerencia de Integración de Información Institucional. <http://www.ri.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionID=134&catID=12202>. Noviembre 20 de 2009. México.

Pineda L. F. (2009). Regionalización climática y propiedades de superficie en la modelación de la dispersión de material particulado atmosférico. Tesis para obtener el grado de doctor en Ciencias en la especialidad de Ciencia Aplicadas. Instituto potosino de investigación Científica y tecnológica, A.C.

Pineda R. A. L., Venegas L., (2009) Atmospheric deposition of nitrogen emitted in the Metropolitan Area of Buenos Aires to coastal waters of de la Plata River. *Atmospheric Environment* 43 1339–1348.

Ramírez M., Arreguín F., Lluch D. (2006). Efecto de la temperatura superficial y la salinidad en el reclutamiento del camarón rosado *Farfantepenaeus duorarum* (Decapoda: Penaeidae), en la Sonda de Campeche, Golfo de México. *Rev. Biología Tropical* Vol. 54 (4): 1241-1245, December. Costa Rica.

Restrepo I. (1995). Desarrollo sustentable en el Golfo y Caribe de México. Ed. México y Desarrollo, 250 p.

Rodríguez J. M, Guzmán H. I. (2009). Pesca y petróleo en el Golfo de México. Asociación Ecológica Santo Tomás A.C. 2009. Villahermosa Tabasco, México.

Ruggeri D. (2004). Technical Basis for Flare Parameters. Texas Commission On Environmental Quality. Texas, United Estates.

Santacruz J. D.(2006). Evaluación de compuestos orgánicos volátiles (COVs) en el Golfo de México. Tesis Licenciatura (Ingeniero Químico)-UNAM, Facultad de Química, 125 p. México.

Scire J., Robe F., Fernau M., Yamartino R. (2000a). CALMET User's Guide, Version 5. Earth Tech. Inc.

Scire J., Strimaitis, Yamartino R. (2000b). CALPUFF User's Guide, version 5. Earth Tech. Inc.

Secretaria de Salud de México (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993. Salud Ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

Secretaria de Salud de México (2005). Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental respecto a material particulado, 26 de septiembre de 2005.

Seinfeld, J.H. (1986). Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. Ed John Wiley & Sons, New York.

SEMARNAT, (2004). Evaluación de las externalidades Ambientales, de la Generación termoeléctrica en México. SEMARNAT, CEPAL ONU, 22 de noviembre de 2004.

Servicio Meteorológico Nacional (2009). Ubicación de estaciones meteorológicas automáticas. Disponible en la página <http://smn.cna.gob.mx/productos/emas>.

Song Y., Zhang M., Cai. X. (2006). PM10 modeling of Beijing in the Winter. Atmospheric Environment 40 4126–4136. Received 28 November 2005; accepted 7 March 2006.

Sosa R. Bravo H., Sánchez P., Santacruz J. (2005). Volatile Organic Compounds Air Quality over the Gulf of México. Paper #: 05-1306- AWMA, A&WMA'S 98<sup>st</sup>, Annual Conference & exhibition. June 21-24, 2005, Minneapolis Minnesota.

Sosa R., Bravo H., Sánchez P., Soto R., Alarcón A., Kahl J. (2007). Determinación de partículas Totales durante cinco cruceros de investigación en la plataforma continental del Golfo de México. Ingeniería Investigación y Tecnología VIII. 2, 71 – 83, 2007.

Sosa R. Bravo H., Sánchez P., Alarcón A., Herrera Ch. (2008). Acid wet deposition evaluation in the Coast of the Gulf of México. Paper # 759, A&WMA'S 101<sup>st</sup>, Annual Conference & exhibition. June 24-28 2008, Portland Oregon.



Soto L. A, González M. C, (2009). Pemex y la Salud Ambiental Sonda de Campeche México. Battelle, IMP, UAM y UNAM, 2009.

Stunder M, Sethu S.(1986). A Statistical Evaluation And Comparison of Coastal Point Source Dispersion Models. Atmospheric Environment Vol 20, No.2, 301 – 315.

Stroscher M. (1996). Investigations of Flare gas emissions in Alberta. Ed. Calgary, Alberta, Canadian Association of Petroleum Producers.

Taylor N. E. (2009). Análisis y visualización de la componente diurna de los vientos en el Sur del Golfo de México. Tesis Licenciatura (Físico)-UNAM, Facultad de Ciencias, México.

Valdés A., Fernández G., Ramos H. S.; Bautista R., (2008). Simulación de la concentración de SO<sub>2</sub> emitido por fuentes fijas mayores Durante 2003 en el noroeste de Chiapas y centro de tabasco, México. Rev. Int. Contam. Ambient. 24 (2) 71-77, 2008.

Velásquez (2009). Evaluación de concentraciones de CO<sub>2</sub> del sur del Golfo de México. Tesis para Obtener el título de Química Farmaco Bióloga. Cecilia Velázquez. UNAM FES Cuautitlan. 2009

Villaseñor R, López M.T., Eidels S., Quintanar A., Gallardo J.C. (2003a). A mesoscale modeling study of wind blown dust on the Mexico City Basin. Atmospheric Environment 37, 2451–2462.

Villaseñor R., Magdaleno M., Quintanar A., Gallardo J.C., Lopez M.T., Jurado R., Miranda A., Aguilar M., Melgarejo L.A., Palmerlin E., Vallejo C.J., Barchet W.R. (2003b) An air quality emission inventory of offshore operations for the exploration and production of petroleum by the Mexican oil industry. Atmospheric Environment 37 (2003) 3713–3729 Received 4 April 2002; accepted 5 March 2003

Wanga L., Parker D. B., Parnell C. B., Lacey R. E., Shaw B. W. (2006). Comparison of CALPUFF and ISCST3 models for predicting downwind odor and source emission rates. Atmospheric Environment 40, 4663–4669.

Wikipedia. (2009). Cantarell. [http://es.wikipedia.org/wiki/Complejo\\_Cantarell](http://es.wikipedia.org/wiki/Complejo_Cantarell), búsqueda noviembre 18 de 2009.

Yua Z., Guob H., Xingc Y., Lague C. ( 2009 ) . Setting acceptable odour criteria using steady-state and annual hourly weather data. Bio systems engineering 103, 3 2 9 – 3 3 7.

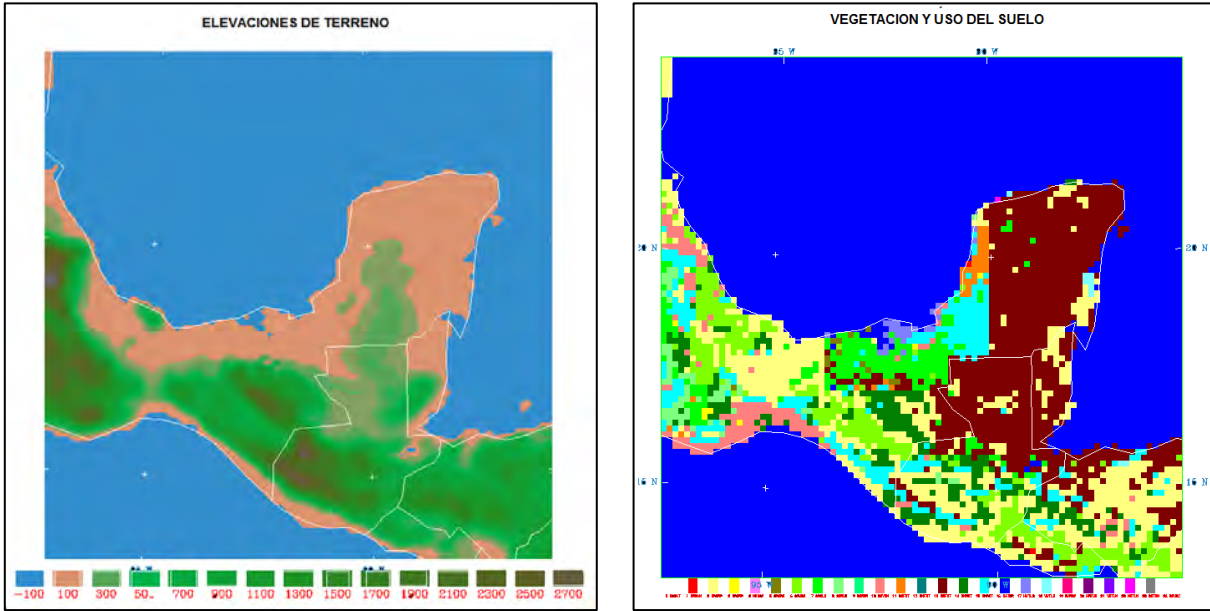
Zelensky M. J., Eng M.. (2001) Sour well test flaring permit application process and dispersion modelling nomographs. Canadian Association of Petroleum Producers Well Test Flaring Sub-Committee And Alberta Energy and Utilities Board. Canada. Metodolohisa de emission.

## **ANEXOS**

---

# ANEXO A

## INFORMACIÓN RESPECTO A ELEVACION DE TERRENO Y USO DE SUELO Y VEGETACIÓN SOLICITADA POR EL MODELO MM5.



### 4.2.5 Lists of Landuse/Vegetation and Soil Categories

**Table 4.2a Description of 13-category (PSU/NCAR) land-use categories and physical parameters for N.H. summer (15 April - 15 October) and winter (15 October - 15 April).**

Landuse Integer Identification	Landuse Description	Albedo(%)		Moisture Avail. (%)		Emissivity (% at 9 μ m)		Roughness Length (cm)		Thermal Inertia (cal cm <sup>-2</sup> k <sup>-1</sup> s <sup>-1/2</sup> )	
		Sum	Win	Sum	Win	Sum	Win	Sum	Win	Sum	Win
1	Urban land	18	18	5	10	88	88	50	50	0.03	0.03
2	Agriculture	17	23	30	60	92	92	15	5	0.04	0.04
3	Range-grassland	19	23	15	30	92	92	12	10	0.03	0.04
4	Deciduous forest	16	17	30	60	93	93	50	50	0.04	0.05
5	Coniferous forest	12	12	30	60	95	95	50	50	0.04	0.05
6	Mixed forest and wet land	14	14	35	70	95	95	40	40	0.05	0.06
7	Water	8	8	100	100	98	98	.01	.01	0.06	0.06
8	Marsh or wet land	14	14	50	75	95	95	20	20	0.06	0.06
9	Desert	25	25	2	5	85	85	10	10	0.02	0.02
10	Tundra	15	70	50	90	92	92	10	10	0.05	0.05
11	Permanent ice	80	82	95	95	95	95	0.01	0.01	0.05	0.05
12	Tropical or sub tropical forest	12	12	50	50	95	95	50	50	0.05	0.05
13	Savannah	20	20	15	15	92	92	15	15	0.03	0.03

**Table 4.2b Description of 17-category (SiB) vegetation categories and physical parameters for N.H. summer (15 April - 15 October) and winter (15 October - 15 April).**

Vegetation Integer Identification	Vegetation Description	Albedo(%)		Moisture Avail. (%)		Emissivity (% at 9 $\mu$ m)		Roughness Length (cm)		Thermal Inertia (cal cm <sup>-2</sup> k <sup>-1</sup> s <sup>-1/2</sup> )	
		Sum	Win	Sum	Win	Sum	Win	Sum	Win	Sum	Win
1	Evergrn. Broadlf.	12	12	50	50	95	95	50	50	0.05	0.05
2	Broadlf. Decids.	16	17	30	60	93	93	50	50	0.04	0.05
3	Decids. Evergrn.	14	14	35	70	95	95	40	40	0.05	0.06
4	Evergrn. Needlf.	12	12	30	60	95	95	50	50	0.04	0.05
5	Decids. Needlf.	16	17	30	60	93	93	50	50	0.04	0.05
6	Grnd. Tree Shrb.	20	20	15	15	92	92	15	15	0.03	0.03
7	Ground only	19	23	15	30	92	92	12	10	0.03	0.04
8	Broadlf. Shrb.P.G.	19	23	15	30	92	92	12	10	0.03	0.04
9	Broadlf. Shrb.B.S.	19	23	15	30	92	92	12	10	0.03	0.04
10	Grndevr. DT. Shrb	15	70	50	90	92	92	10	10	0.05	0.05
11	Bare Soil	25	25	2	5	85	85	10	10	0.02	0.02
12	Agricltr. or C3 Grs	17	23	30	60	92	92	15	5	0.04	0.04
13	Perst. Wetland	14	14	50	75	95	95	20	20	0.06	0.06
14	Dry Coast Cmplx	19	23	15	30	92	92	12	10	0.03	0.04
15	Water	8	8	100	100	98	98	.01	.01	0.06	0.06
16	Ice cap & Glacier	80	82	95	95	95	95	5	5	0.05	0.05
17	No data										

**Table 4.2d Description of 17-category Soil categories and physical parameters**

Soil Integer Identification	Soil Description	Max moisture content	Reference soil moisture	Wilting point soil moisture	Air dry moist content limits	Saturation soil potential	Saturation Soil conductivity (10 <sup>-6</sup> )	B parameter	Saturation soil diffusivity (10 <sup>-6</sup> )	Soil diffu./condu. coef.
1	Sand	0.339	0.236	0.010	0.010	0.069	1.07	2.79	0.608	- 0.472
2	Loamy Sand	0.421	0.283	0.028	0.028	0.036	14.10	4.26	5.14	- 1.044
3	Sandy Loam	0.434	0.312	0.047	0.047	0.141	5.23	4.74	8.05	- 0.569
4	Silt Loam	0.476	0.360	0.084	0.084	0.759	2.81	5.33	23.9	0.162
5	Silt	0.476	0.360	0.084	0.084	0.759	2.81	5.33	23.9	0.162
6	Loam	0.439	0.329	0.066	0.066	0.355	3.38	5.25	14.3	- 0.327
7	Sandy Clay Loam	0.404	0.314	0.067	0.067	0.135	4.45	6.66	9.90	- 1.491
8	Silty Clay Loam	0.464	0.387	0.120	0.120	0.617	2.04	8.72	23.7	- 1.118
9	Clay Loam	0.465	0.382	0.103	0.103	0.263	2.45	8.17	11.3	- 1.297
10	Sandy Clay	0.406	0.338	0.100	0.100	0.098	7.22	10.73	18.7	- 3.209
11	Silty Clay	0.468	0.404	0.126	0.126	0.324	1.34	10.39	9.64	- 1.916
12	Clay	0.468	0.412	0.138	0.138	0.468	0.974	11.55	11.2	- 2.138
13	Organic Materials	0.439	0.329	0.066	0.066	0.355	3.38	5.25	14.3	- 0.327
14	Water	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	Bedrock	0.200	0.108	0.006	0.006	0.069	141.0	2.79	136.0	- 1.111
16	Other	0.421	0.283	0.028	0.028	0.036	14.10	4.26	5.14	- 1.044
17	No data									

**Table 4.2c Description of 25-category (USGS) vegetation categories and physical parameters for N.H. summer (15 April - 15 October) and winter (15 October - 15 April).**

Vegetation Integer Identification	Vegetation Description	Albedo(%)		Moisture Avail. (%)		Emissivity (% at 9 μ m)		Roughness Length (cm)		Thermal Inertia (cal cm <sup>-2</sup> k <sup>-1</sup> s <sup>-1/2</sup> )	
		Sum	Win	Sum	Win	Sum	Win	Sum	Win	Sum	Win
1	Urban	15	15	10	10	88	88	80	80	0.03	0.03
2	DryIrr Crop. Past.	17	23	30	60	98.5	92	15	5	0.04	0.04
3	Irrg. Crop. Past.	18	23	50	50	98.5	92	15	5	0.04	0.04
4	Mix. Dry/Irrg.C.P.	18	23	25	50	98.5	92	15	5	0.04	0.04
5	Crop./Grs. Mosaic	18	23	25	40	99	92	14	5	0.04	0.04
6	Crop./Wood Mosaic	16	20	35	60	98.5	93	20	20	0.04	0.04
7	Grassland	19	23	15	30	98.5	92	12	10	0.03	0.04
8	Shrubland	22	25	10	20	88	88	10	10	0.03	0.04
9	Mix Shrb./Grs.	20	24	15	25	90	90	11	10	0.03	0.04
10	Savanna	20	20	15	15	92	92	15	15	0.03	0.03
11	Decids. Broadlf.	16	17	30	60	93	93	50	50	0.04	0.05
12	Decids. Needlf.	14	15	30	60	94	93	50	50	0.04	0.05
13	Evergrn. Broadlf.	12	12	50	50	95	95	50	50	0.05	0.05
14	Evergrn. Needlf.	12	12	30	60	95	95	50	50	0.04	0.05
15	Mixed Forest	13	14	30	60	94	94	50	50	0.04	0.06
16	Water Bodies	8	8	100	100	98	98	.01	.01	0.06	0.06
17	Herb. Wetland	14	14	60	75	95	95	20	20	0.06	0.06
18	Wooded wetland	14	14	35	70	95	95	40	40	0.05	0.06
19	Bar. Sparse Veg.	25	25	2	5	85	85	10	10	0.02	0.02
20	Herb. Tundra	15	60	50	90	92	92	10	10	0.05	0.05
21	Wooden Tundra	15	50	50	90	93	93	30	30	0.05	0.05
22	Mixed Tundra	15	55	50	90	92	92	15	15	0.05	0.05
23	Bare Grnd. Tundra	25	70	2	95	85	95	10	5	0.02	0.05
24	Snow or Ice	55	70	95	95	95	95	5	5	0.05	0.05
25	No data										

## ANEXO B.

### ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA PARA LA SELECCIÓN DE EVENTOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA COSTA FRENTE A LA SONDA DE CAMPECHE

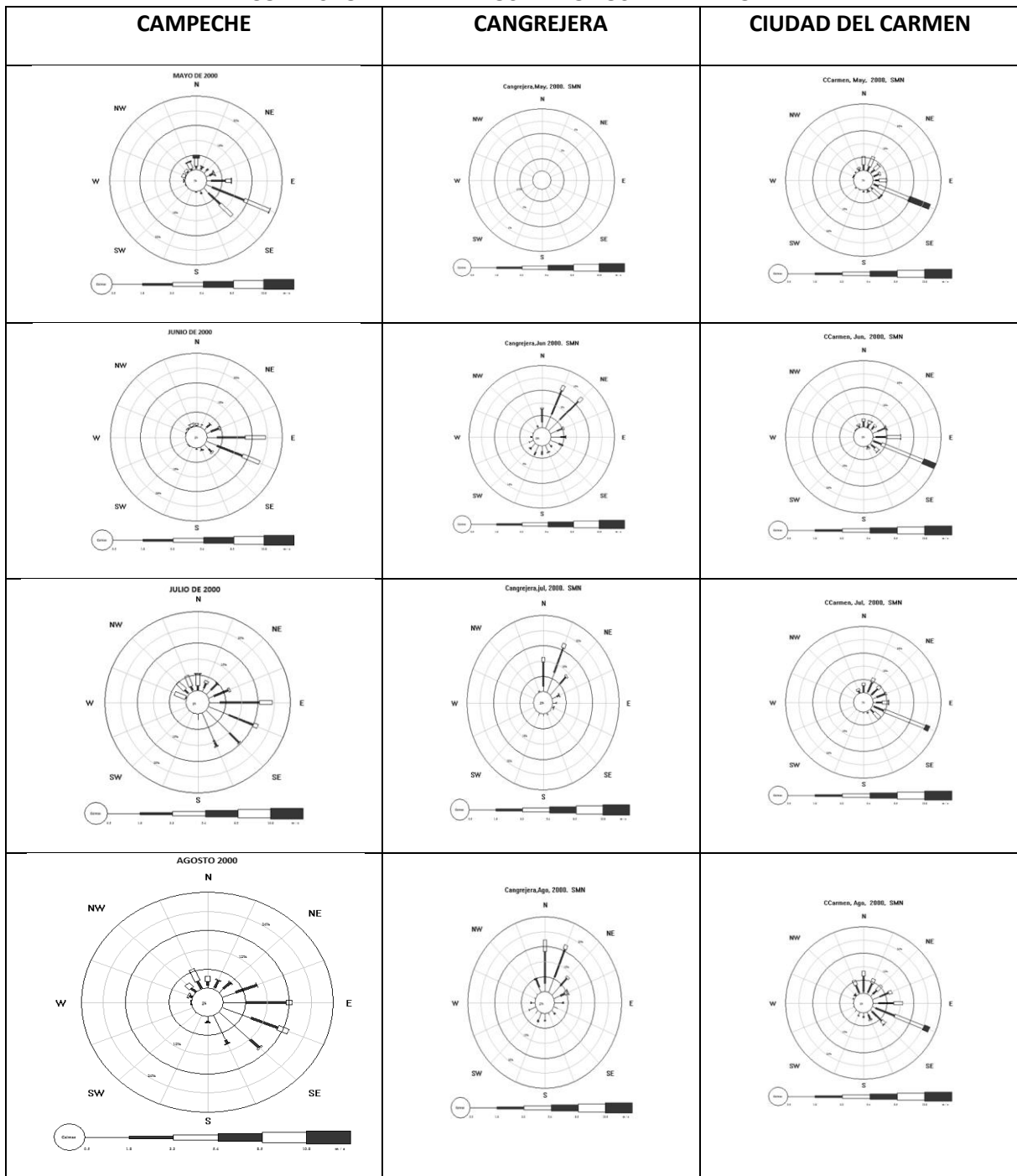
AÑO	PERIODO	CAMPECHE				CIUDAD DEL CARMEN				CANGREJERA			
		ROSA DE VIENTOS		CUMPLE DIR, VEL, PRECIPI.		ROSA DE VIENTOS		CUMPLE DIR, VEL, PRECIPI.		ROSA DE VIENTOS		CUMPLE DIR, VEL, PRECIPI.	
		CUMPLE DIRECCION				CUMPLE DIRECCION				CUMPLE DIRECCION			
		SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO
2000	Ma.		x			x					x		
	Jun.		x			x				x		x	
	Jul.		x			x					x		
	Ago.		x			x					x		
	Sep		x			x					x		
	Oct.		x			x				x		x	
	Nov.	x			X	x				x		x	
	Dic.		x			x					x		
2001	Ene.		x			x					x		
	Feb.		x			x					x		
	Mar.	x			X	x					x		
	Abr.		x			x		X			x		
	May.	x			X	x		X			x		
	Jun.	x			X	x					x		
	Jul.		x			x					x		
	Ago.		x			x				x		x	
	Sept.		x			x					x		
	Oct.		x			x		X			x		
	Nov.		x			x		x			x		
	dic.		x			x					x		
2002	Ene.		x			x					x		
	Feb.	x			X	x					x		
	Mar.	x			x	x					x		
	Abr.-Jun.		x			x		X			x		
	Jul.-Sept.	x			x	x				x			
	Oct. - Dic.		x			x					x		
2003	Ene.-mar.		x				x				x		
	Abr.		x				x				x		
	May.		x				x			x		x	
	Jun.		x				x				x		
	Jul.		x				x			x		x	
	Ago.		x				x				x		
	Sep.		x				x				x		
	Oct.		x				x				x		
	Nov.		x				x				x		
	Dic.		x				x				x		
2004	Ene. - Feb.		x				x				x		
	Mar.-Abr.		x				x				x		
	May. -Jun.		x			x					x		
	Jul.- Ago.		x			x					x		
	Sep.-Oct.	x			x	x					x		
	Nov.-Dic.		x			x					x		

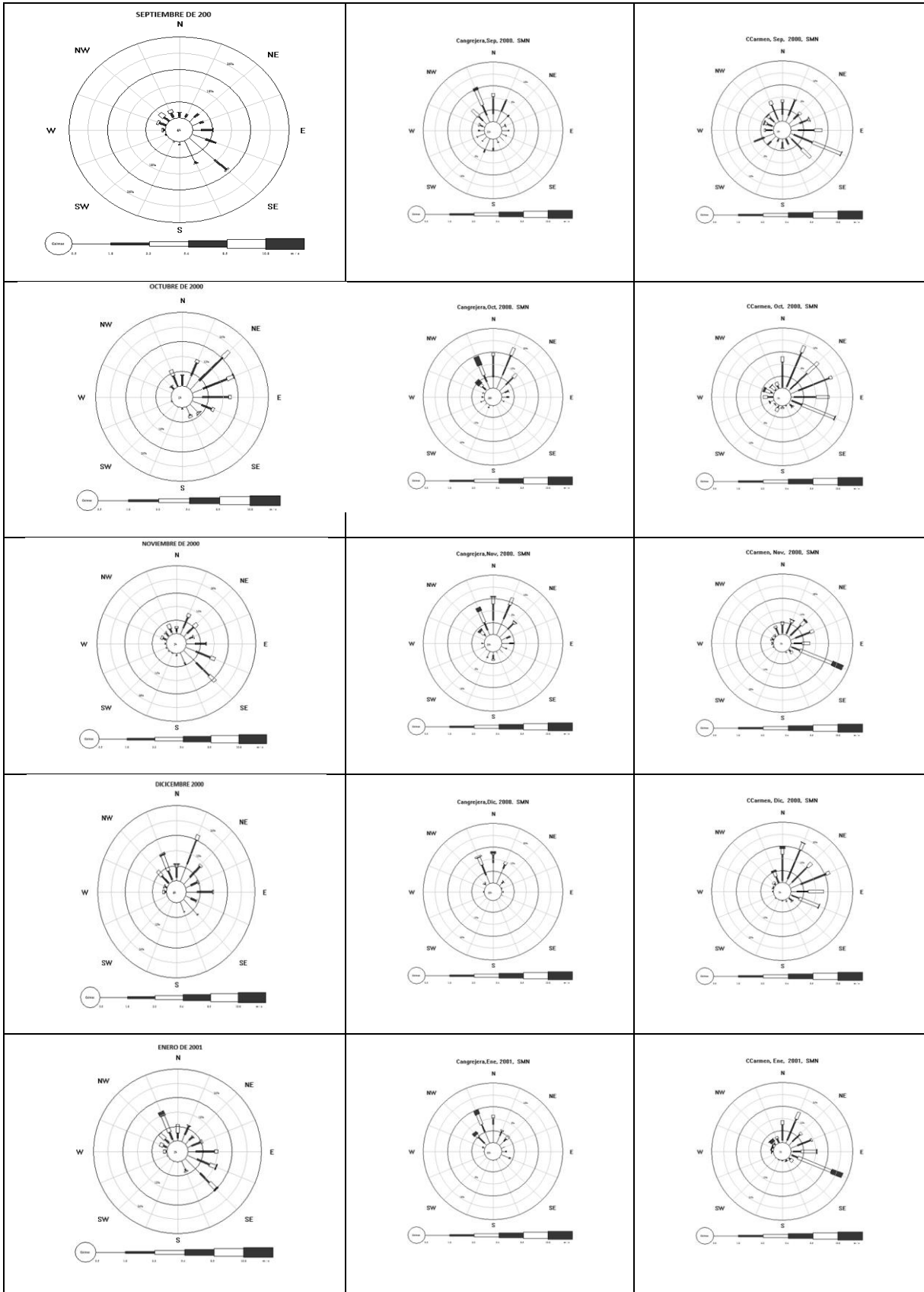
AÑO	PERIODO	CAMPECHE				CIUDAD DEL CARMEN				CANGREJERA			
		ROSA DE VIENTOS		CUMPLE DIR, VEL, PRECIP.		ROSA DE VIENTOS		CUMPLE DIR, VEL, PRECIP.		ROSA DE VIENTOS		CUMPLE DIR, VEL, PRECIP.	
		CUMPLE DIRECCION				CUMPLE DIRECCION				CUMPLE DIRECCION			
		SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO
2005	Ene.-Feb.	x			x	x						x	
	Mar.-Abr.	x		x		x						x	
	May.	x			x	x		X				x	
	Jun.	x			x	x						x	
	Jul.	x		x		x						x	
	Ago.	x			x	x						x	
	Sep.	x		x		x						x	
	Oct.		X			x						x	
	Nov.	x			x	x						x	
	Dic.		x			x						x	
2006	Ene.	x		x		x						x	
	feb.		x			x						x	
	Mar.		x			x						x	
	Abr.	x				x						x	
	May.		x			x						x	
	Jun.		x			x		X				x	
	Jul.		x			x						x	
	Ago.		x			x						x	
	Sep.		x			x						x	
	Oct.- dic.		x			x					x		x
2007	Ene.		x			x						x	
	Feb.		x			x				x			x
	Mar.	x		x		x		X			x		
	Abr.	x			x	x		X		x			x
	May.		x			x				x			x
	Jun.		x			x				x			x
	Jul.		x			x					x		
	Ago.		x			x				x			x
	Sep.		x			x		X			x		
	Oct.	x		x		x		X			x		
	Nov.		x			x		X				x	
Dic.		x			x				x			x	

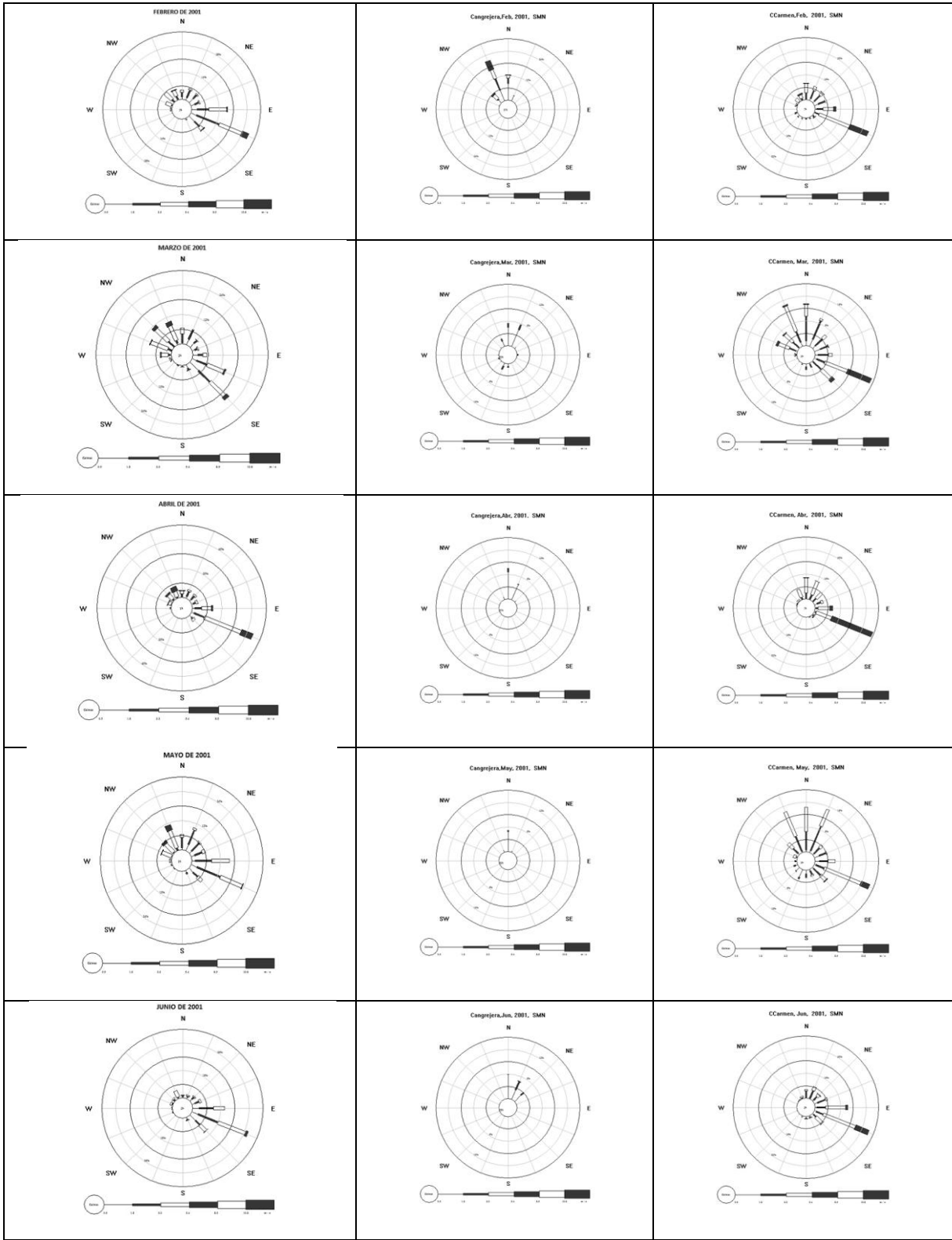


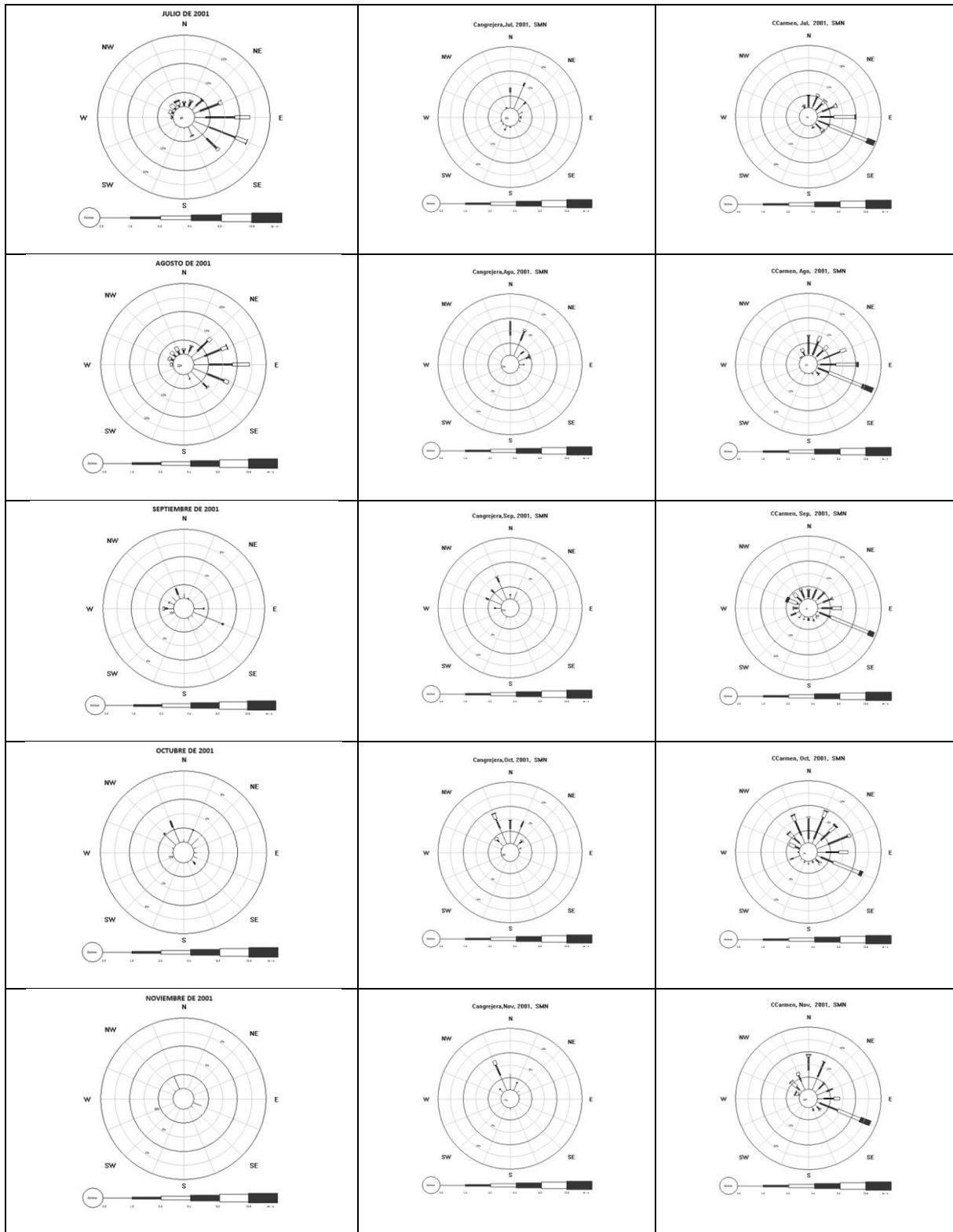
# ANEXO C

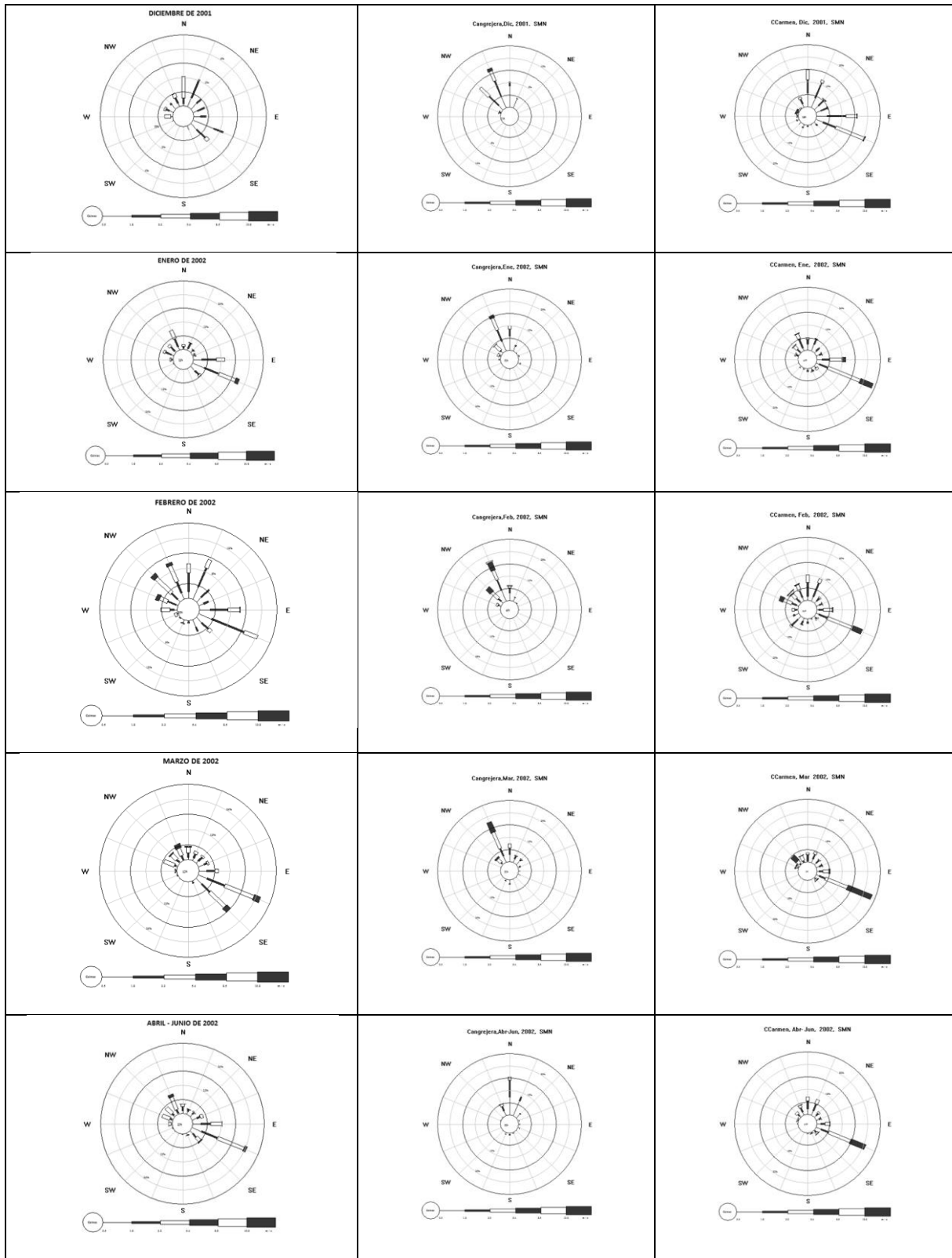
## ROSA DE LOS VIENTOS PERIODOS INFORMACIÓN DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL CORRESPONDIENTE A LOS PERIODOS DEL ANEXO A

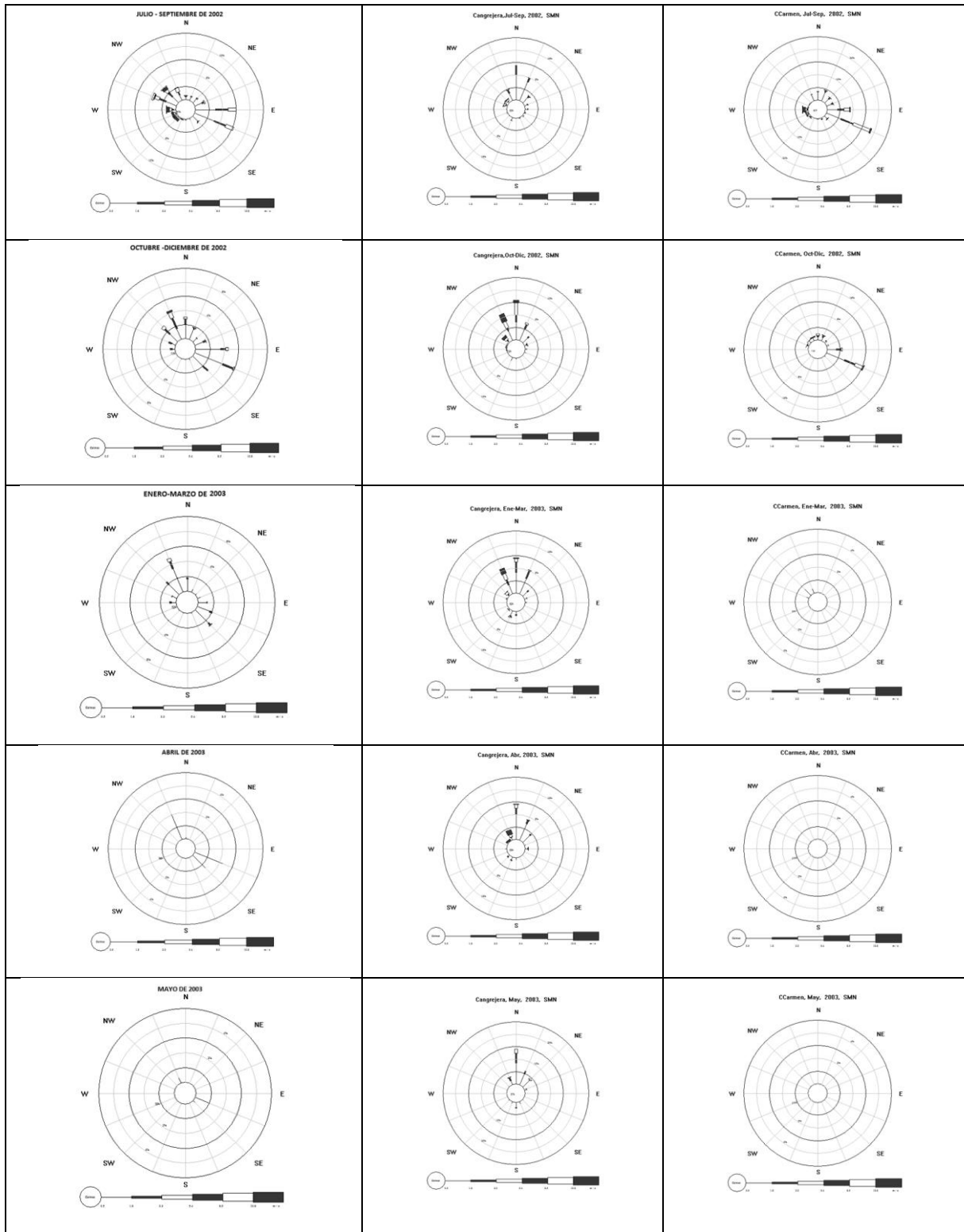


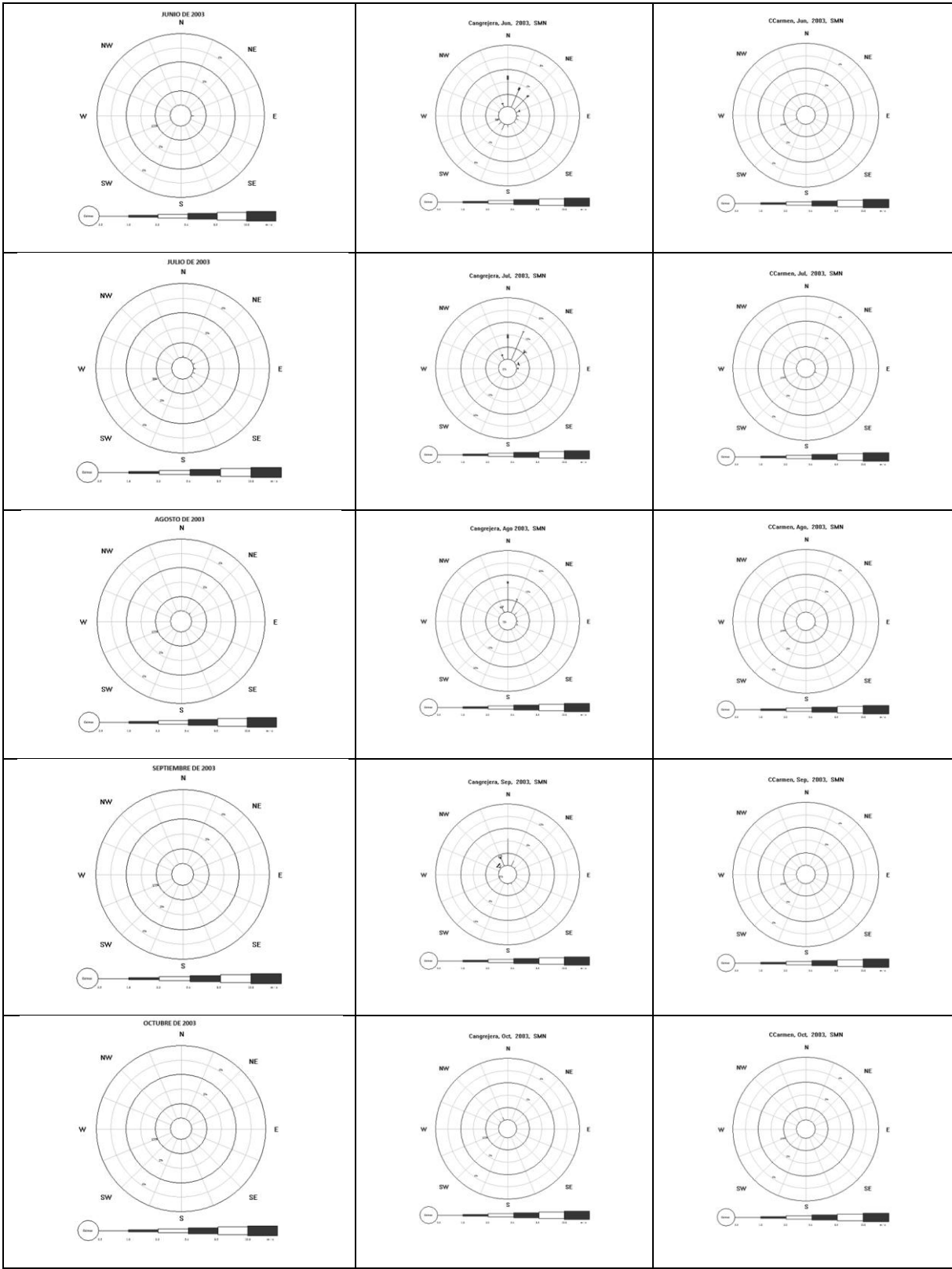


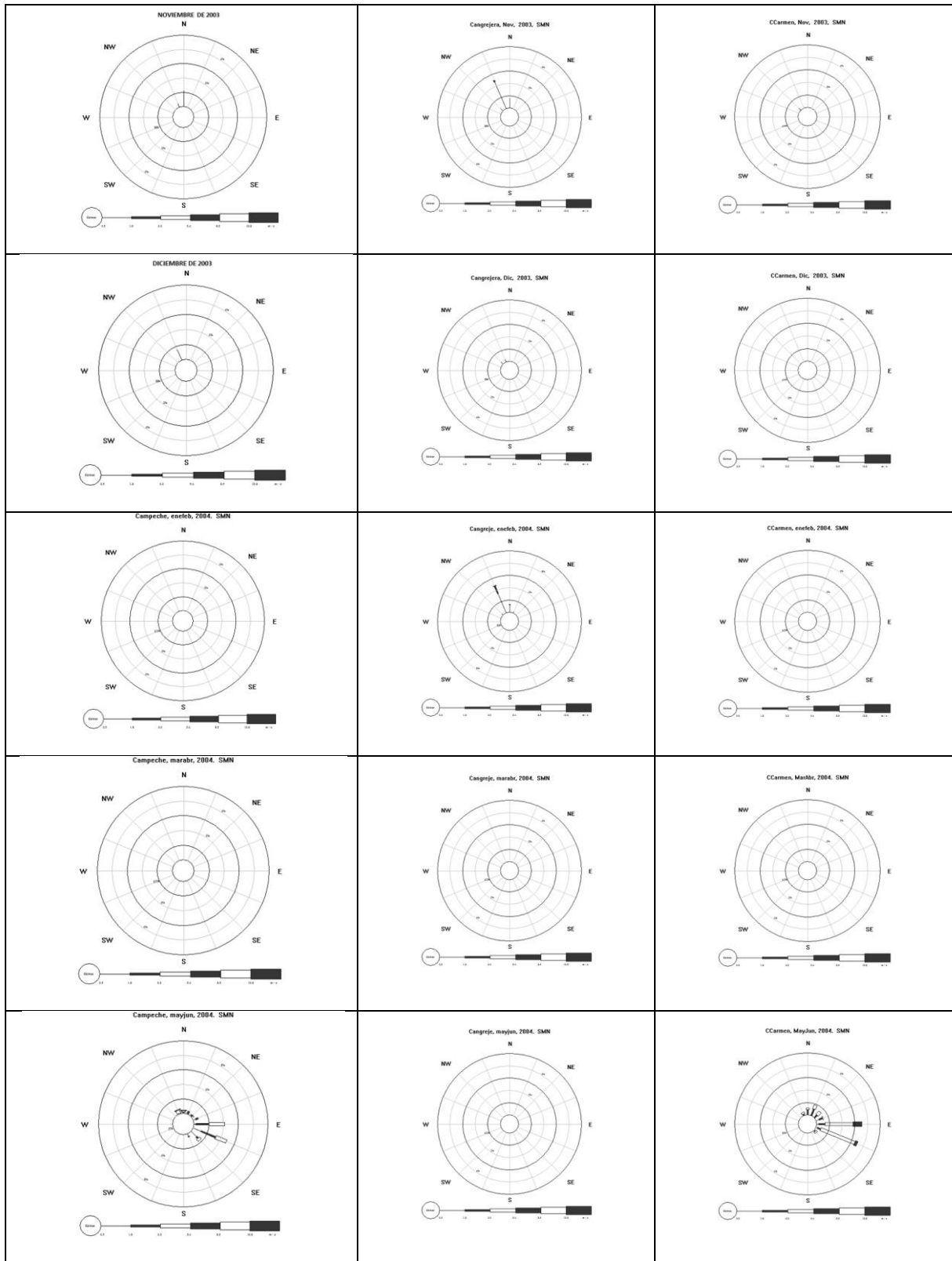




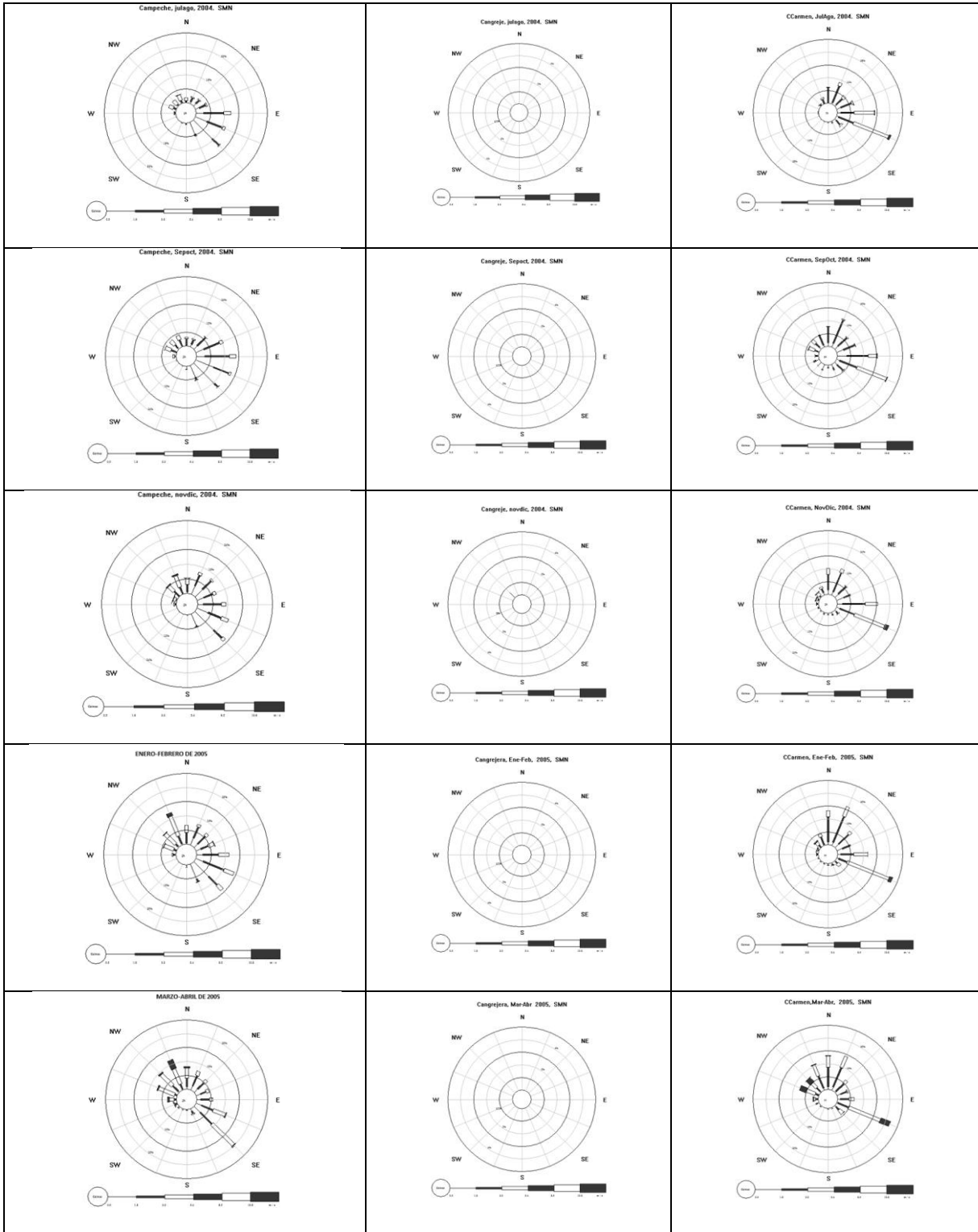


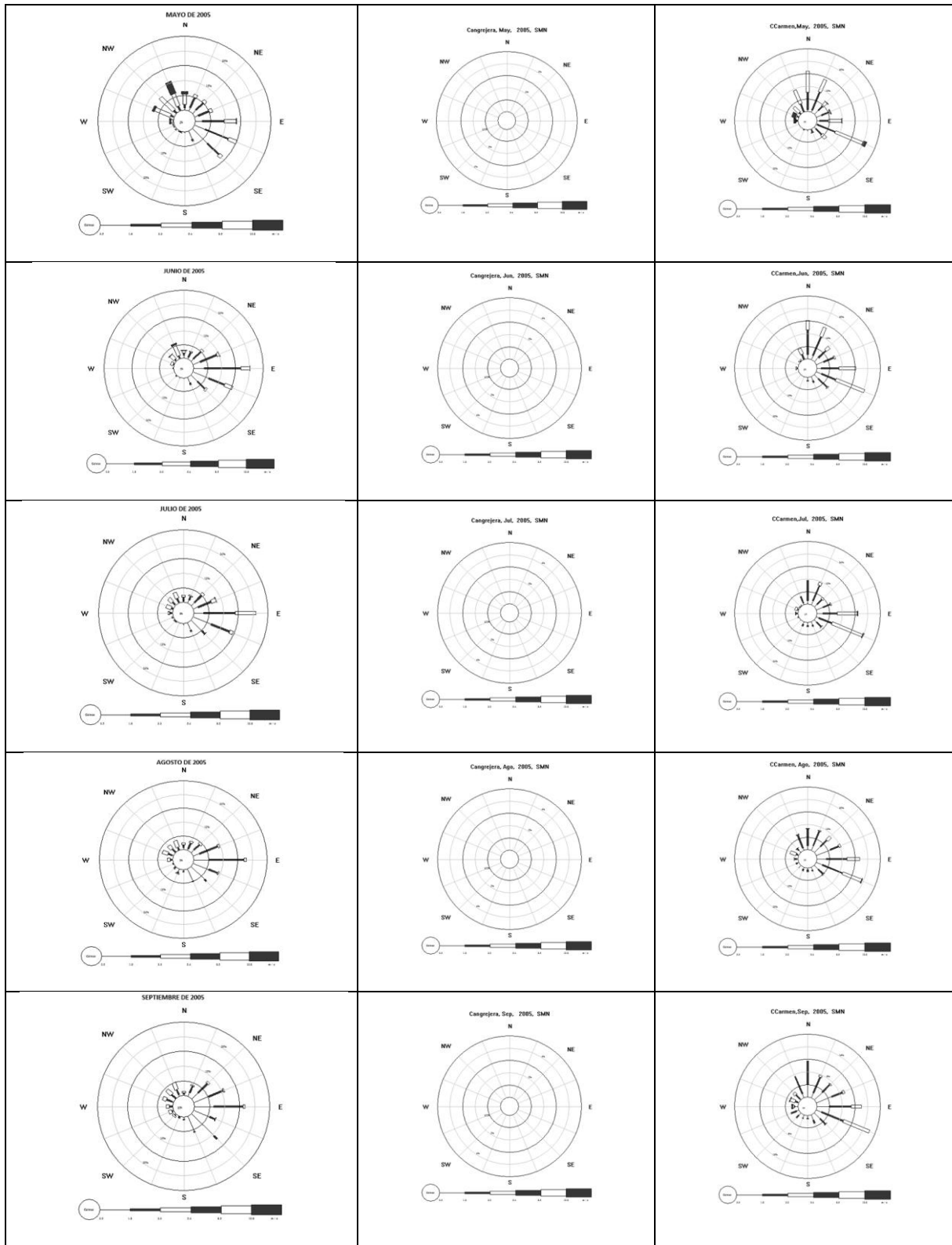


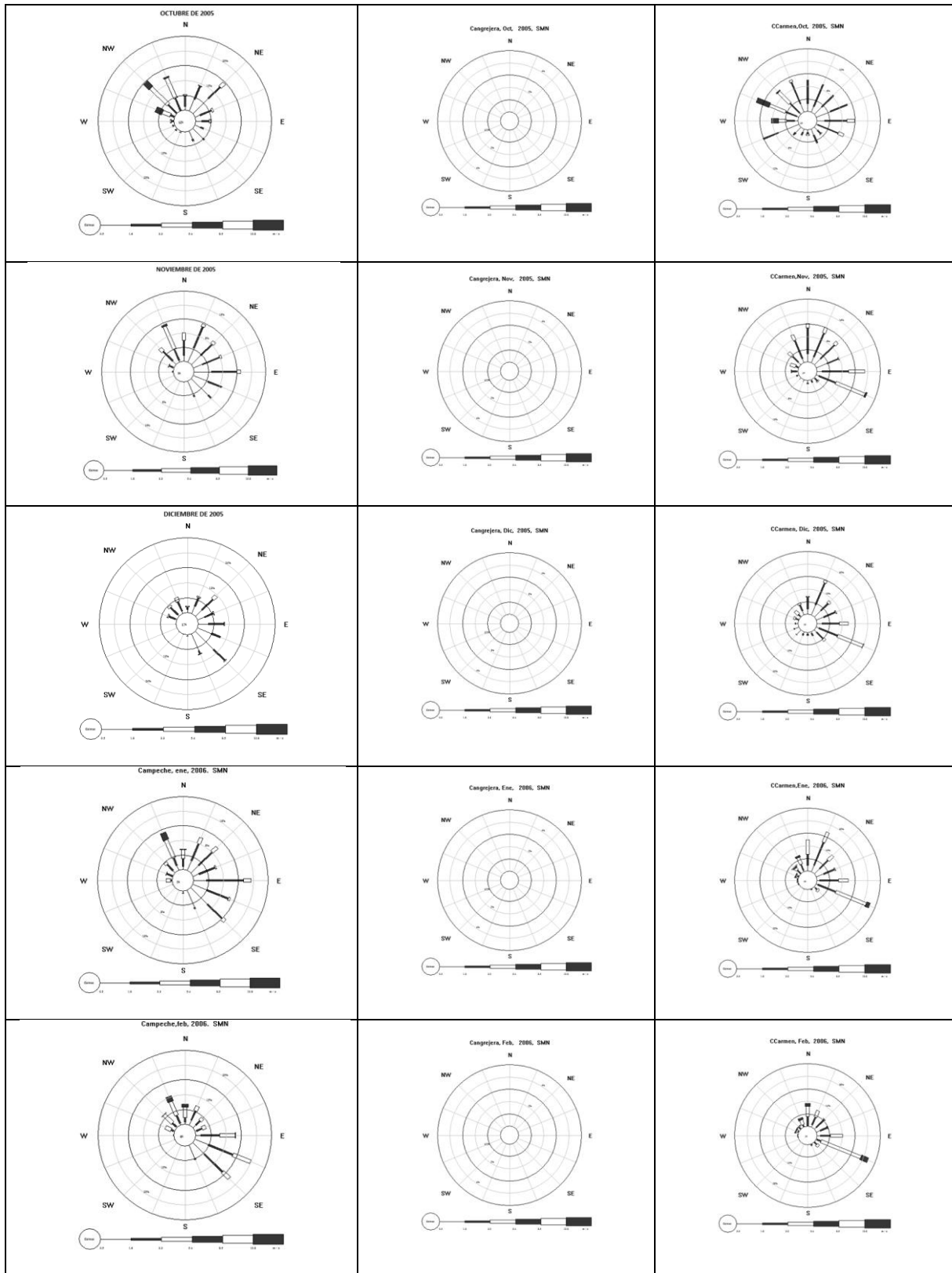


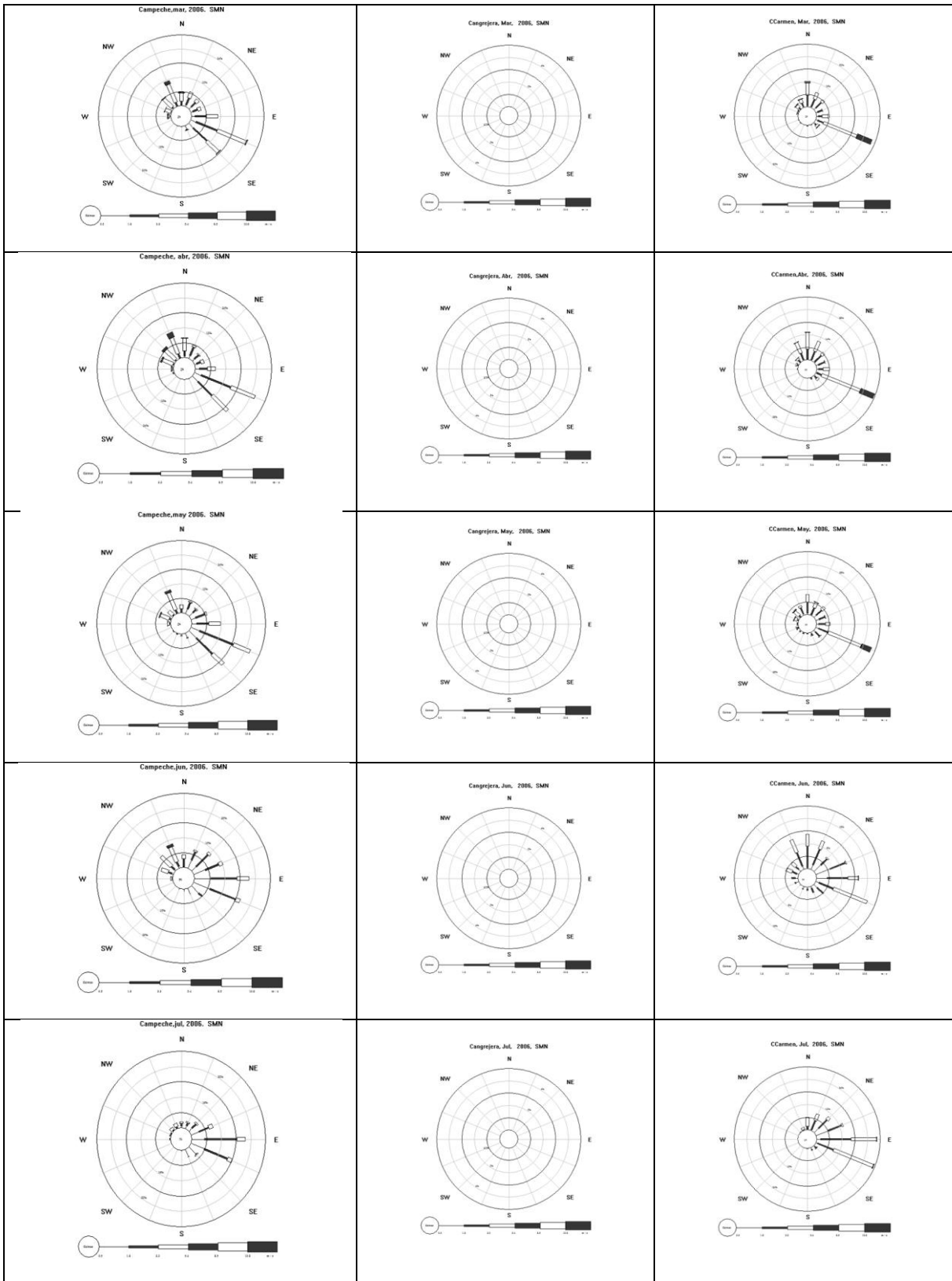


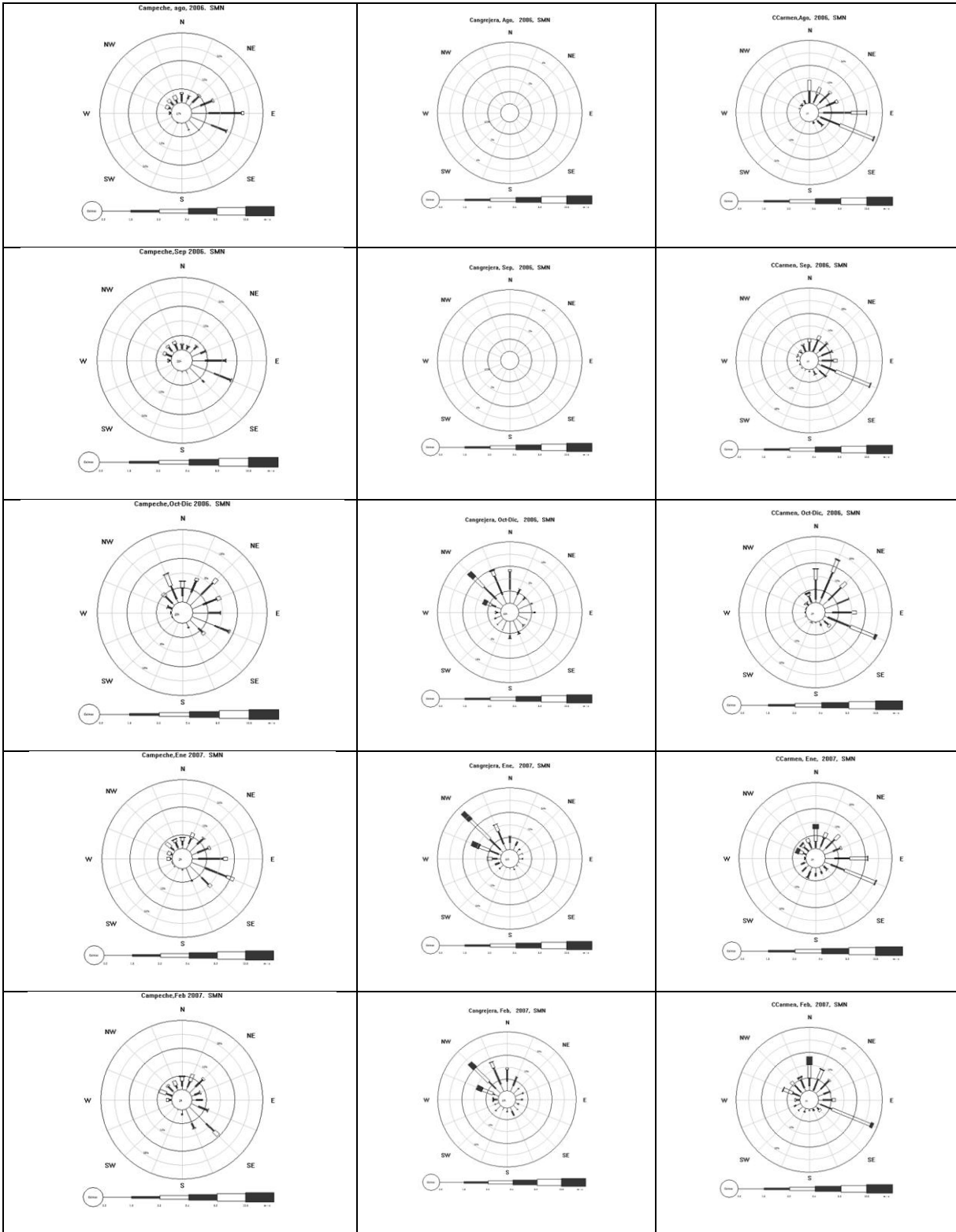


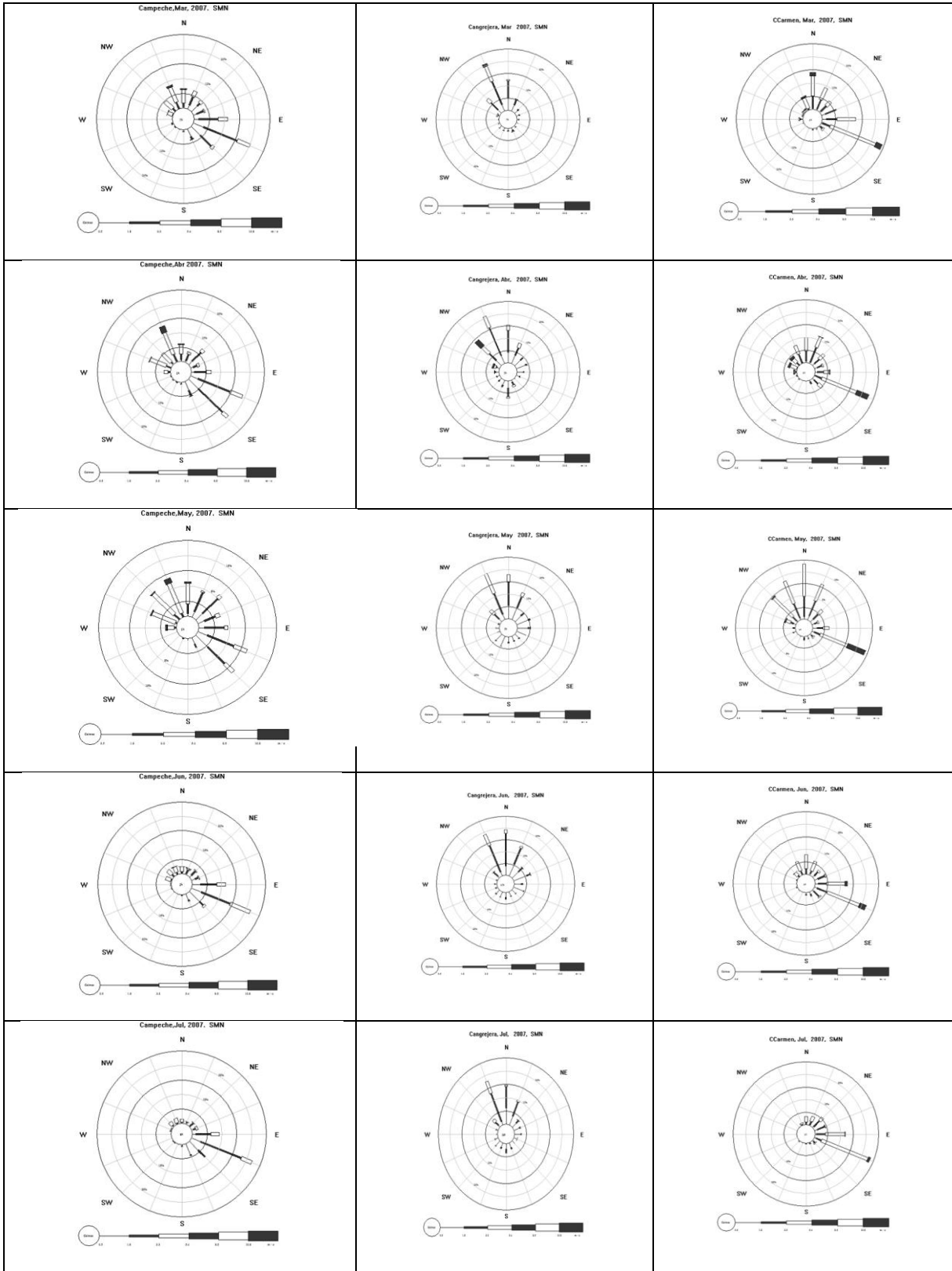


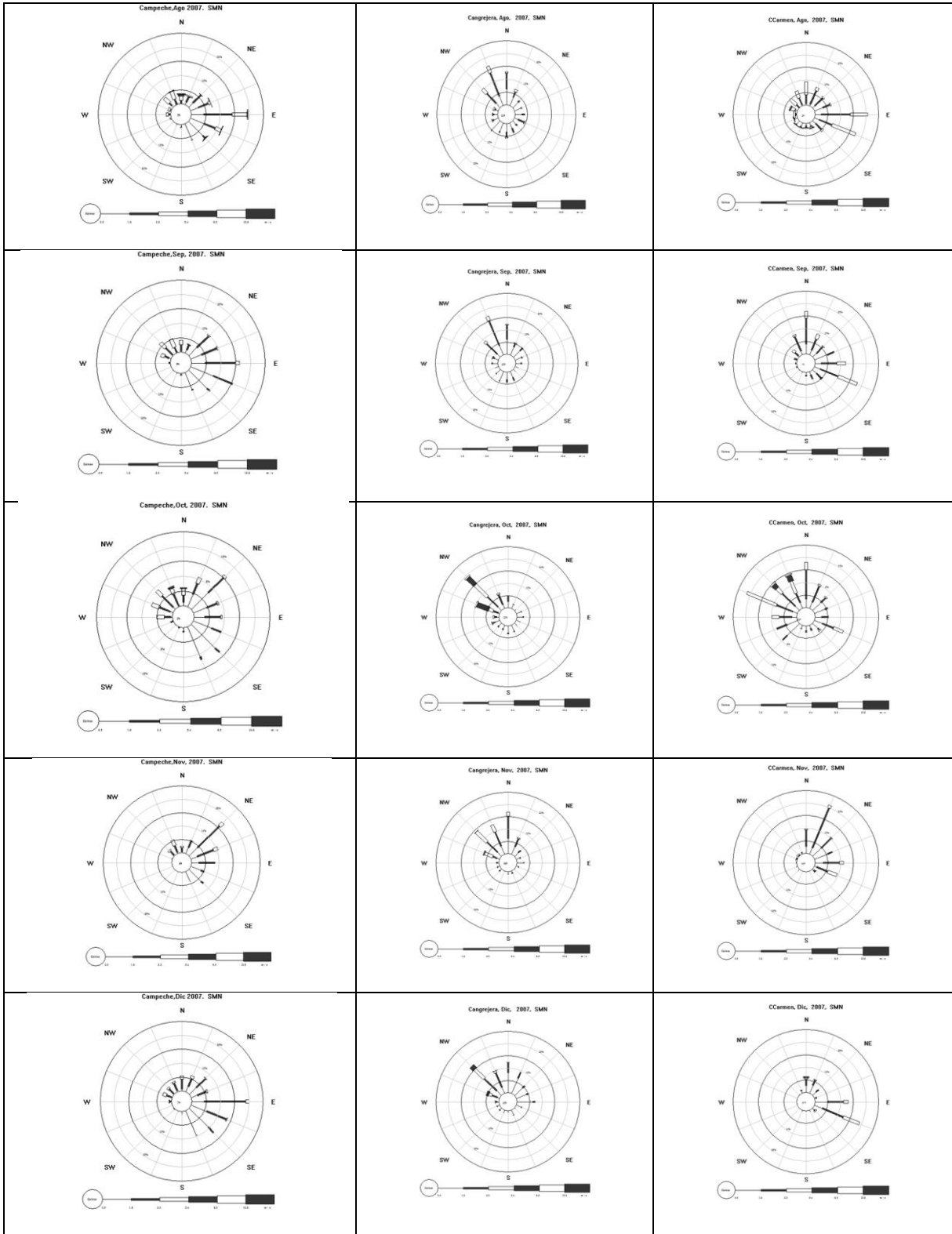






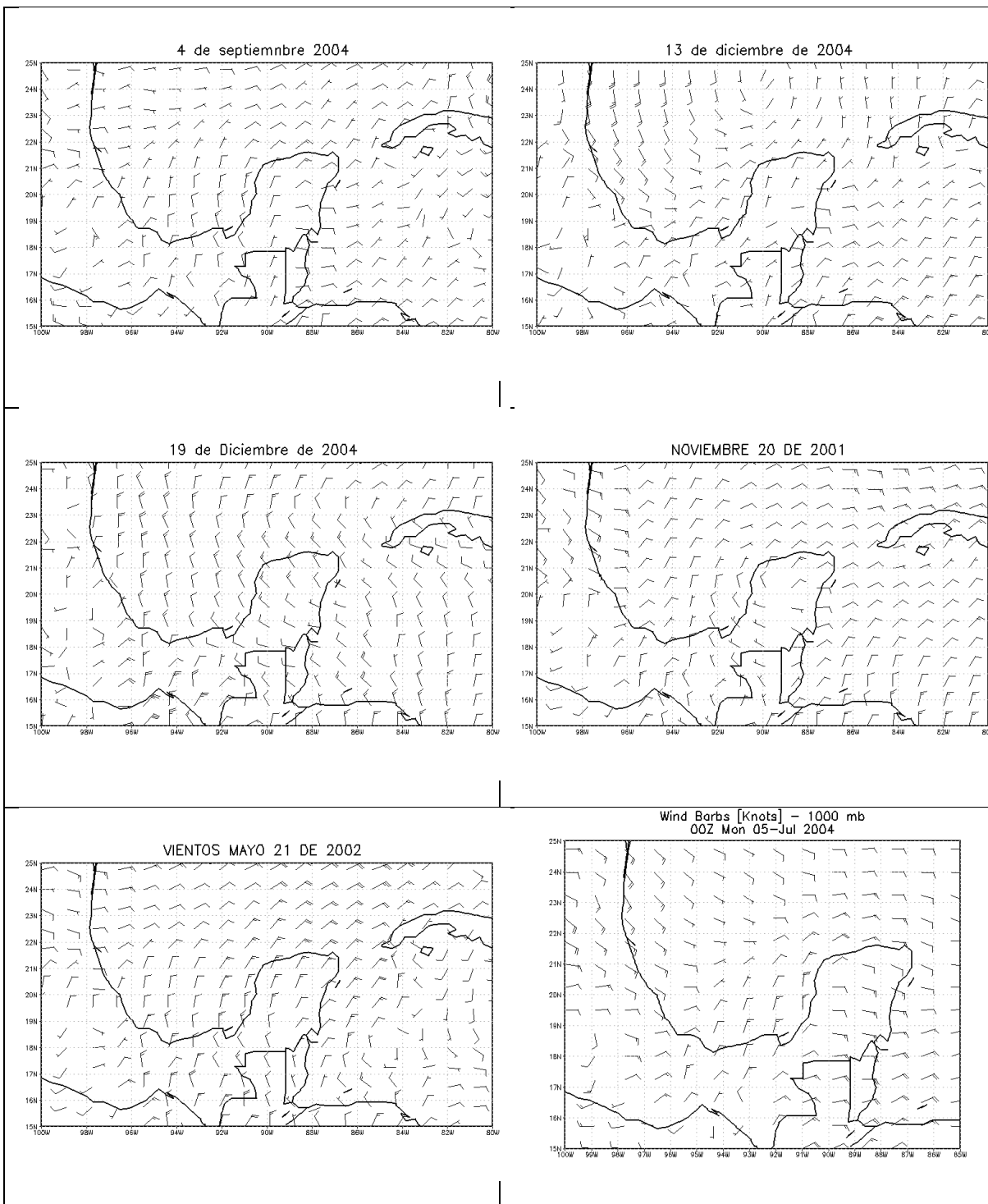






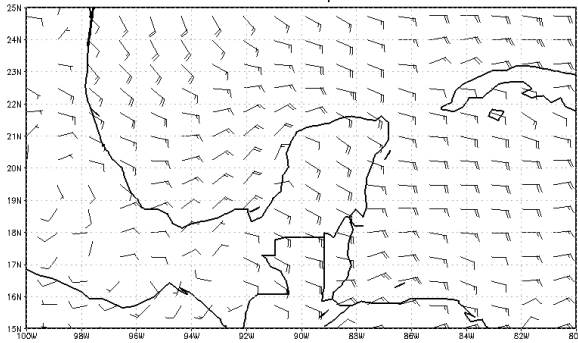
# ANEXO D

## TRAYECTORIA DE LOS VIENTOS DIAS ENCONTRADOS

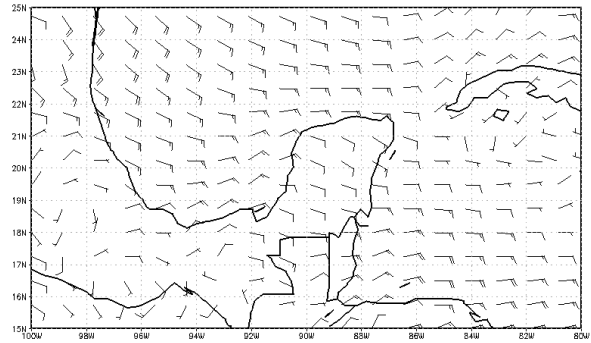




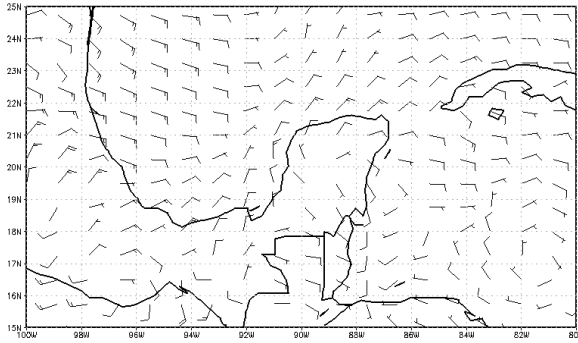
Wind Barbs [Knots] - 1000 mb  
00Z Sun 01-Apr 2007



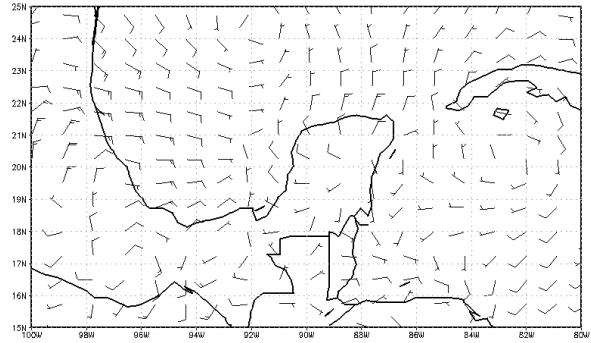
Wind Barbs [Knots] - 1000 mb  
00Z Sat 17-Jun 2006



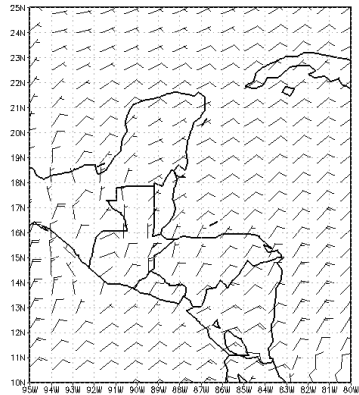
VIENTOS MAYO 29 DE 2002



VIENTOS MAYO 30 DE 2002

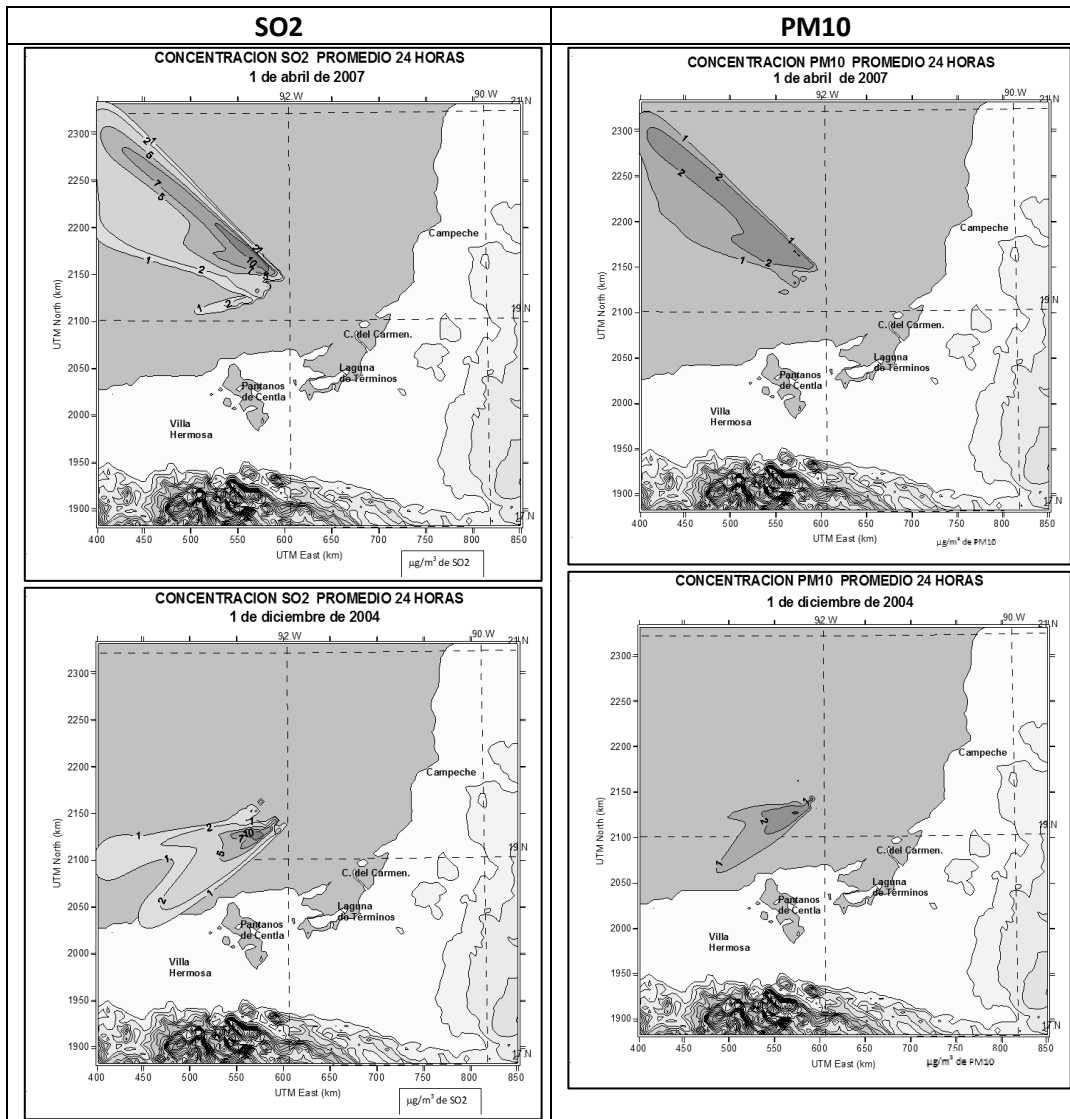


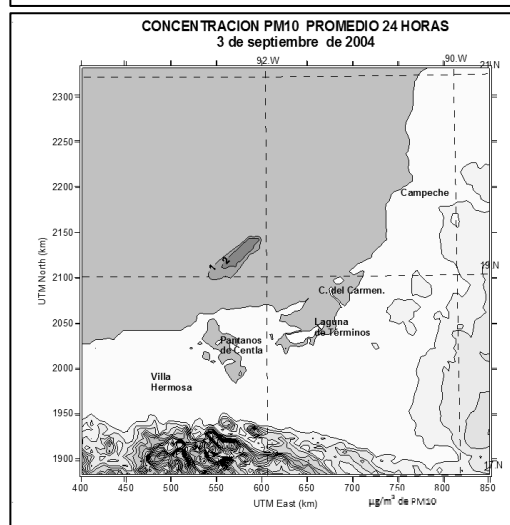
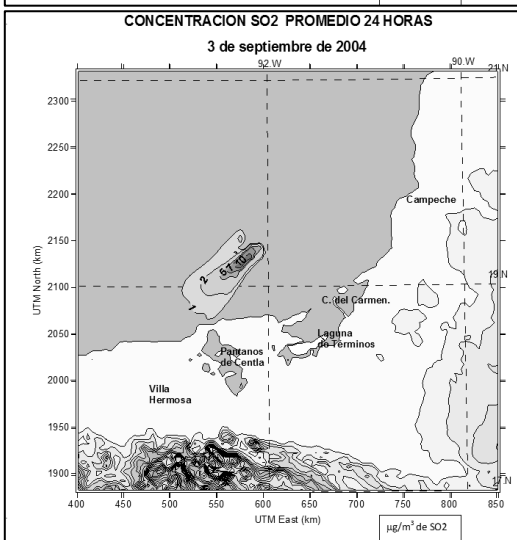
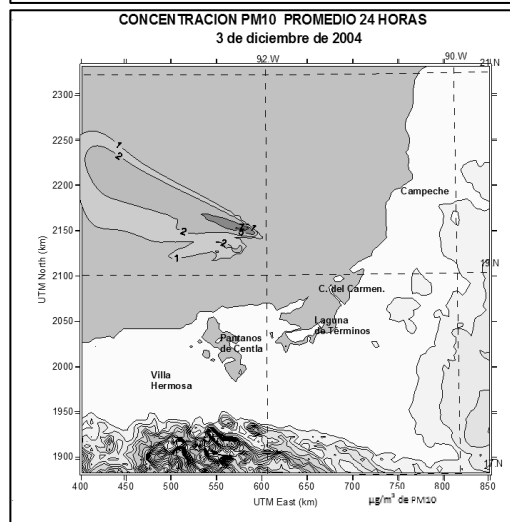
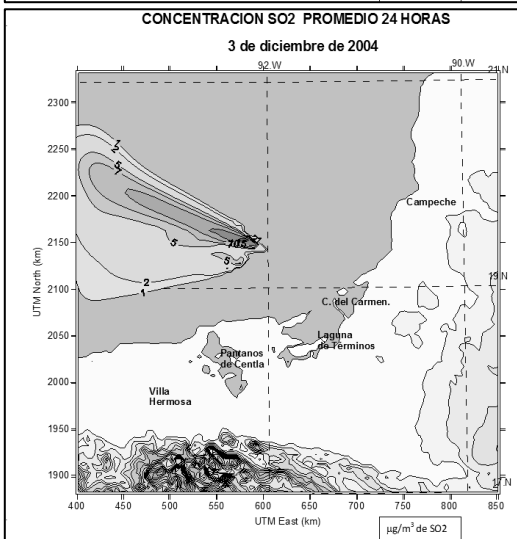
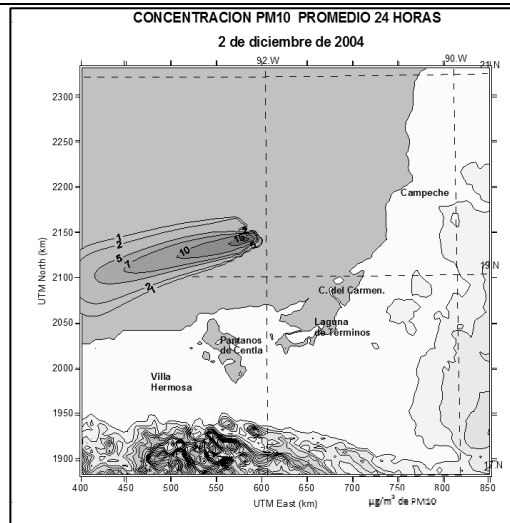
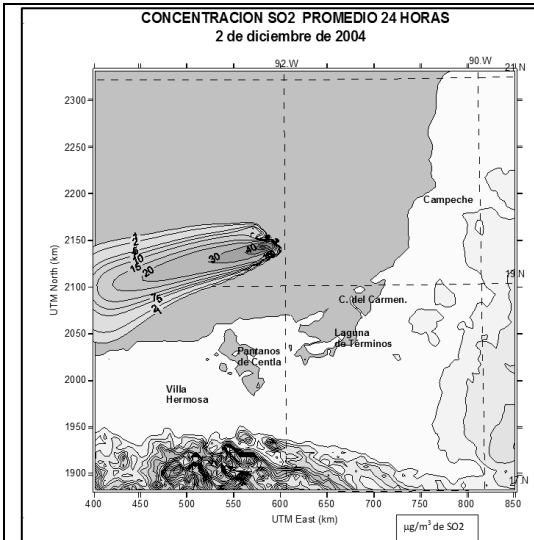
Wind Barbs [Knots] - 1000 mb  
-Dec 2004

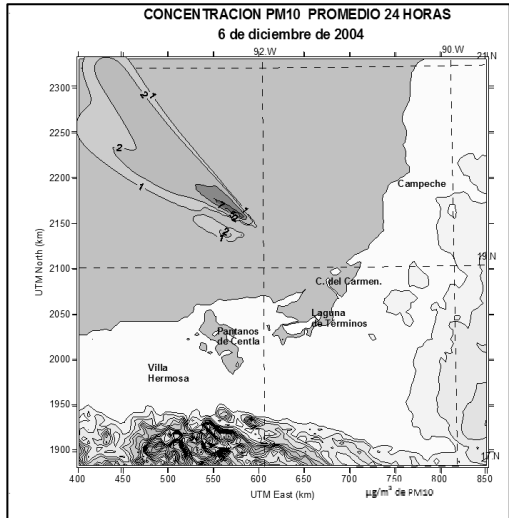
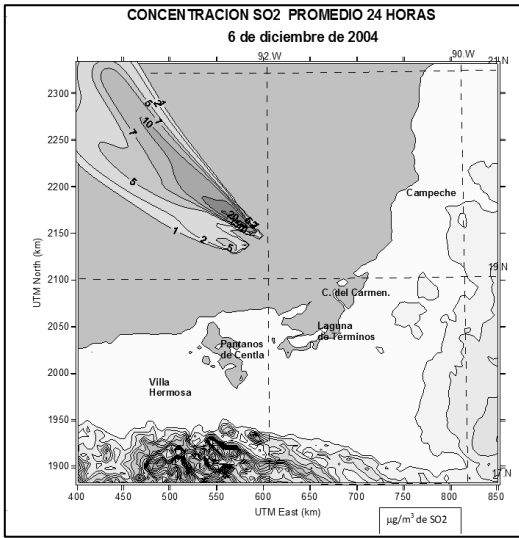
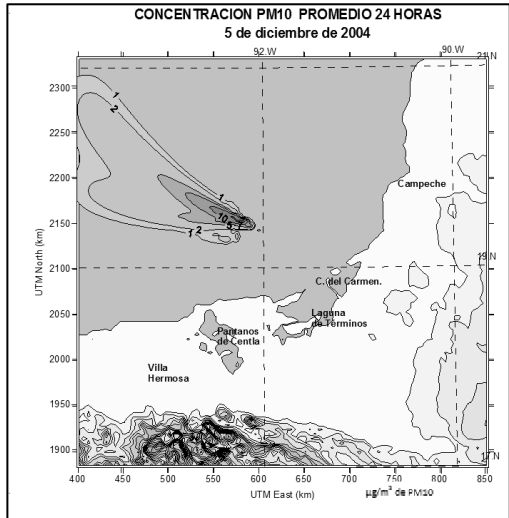
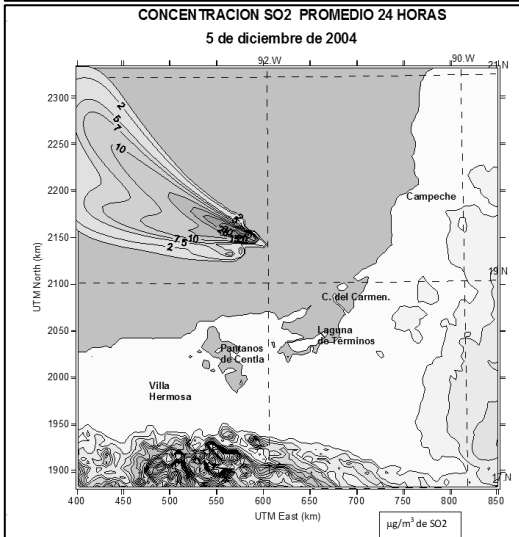
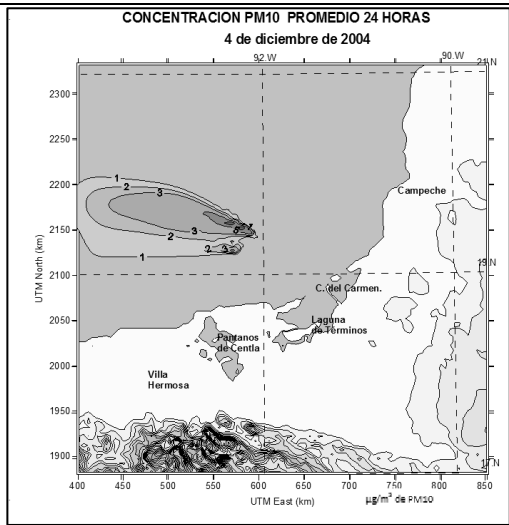
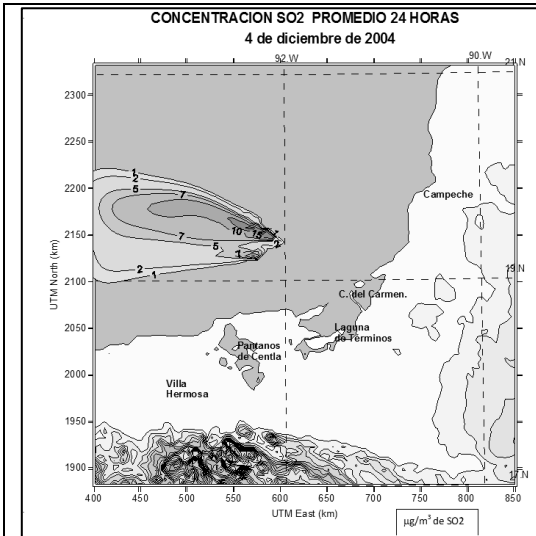


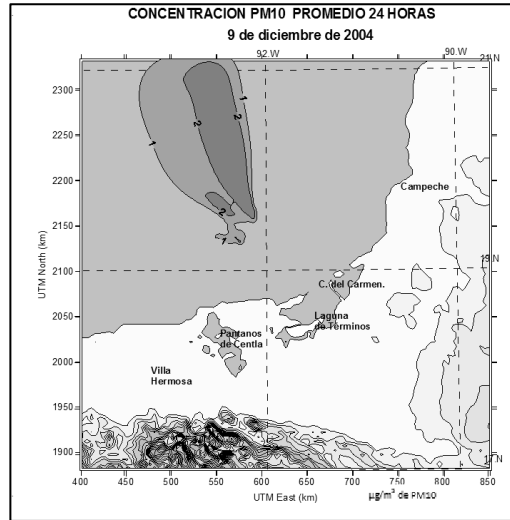
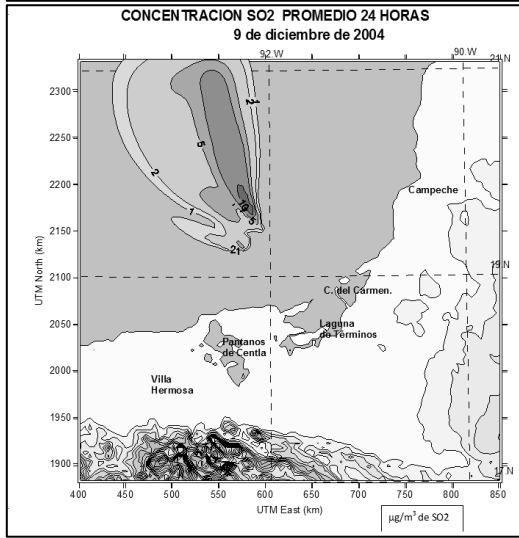
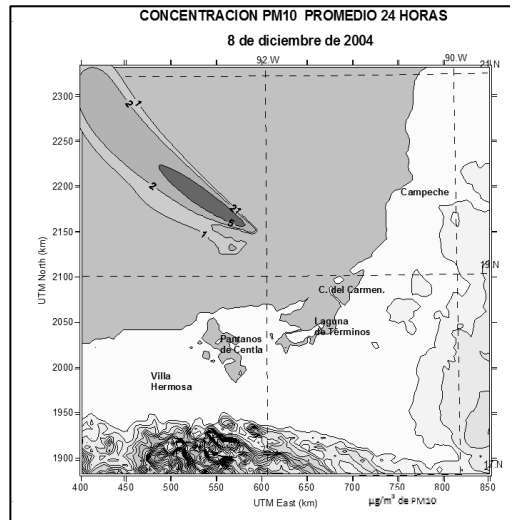
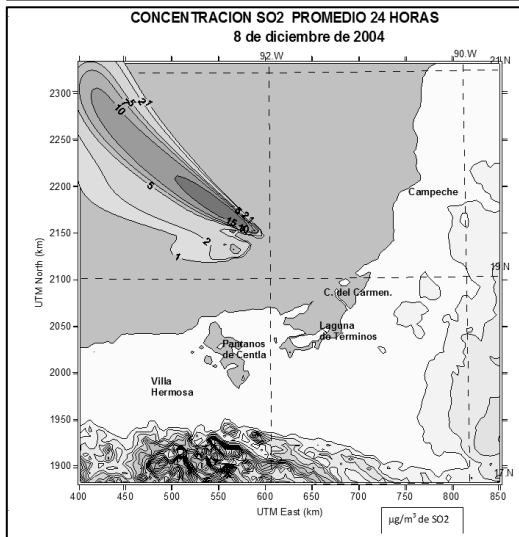
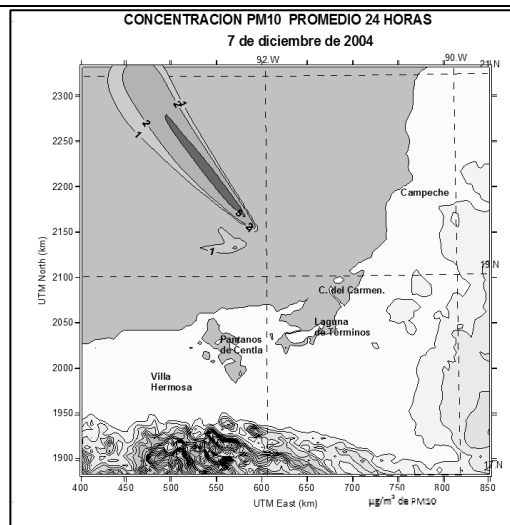
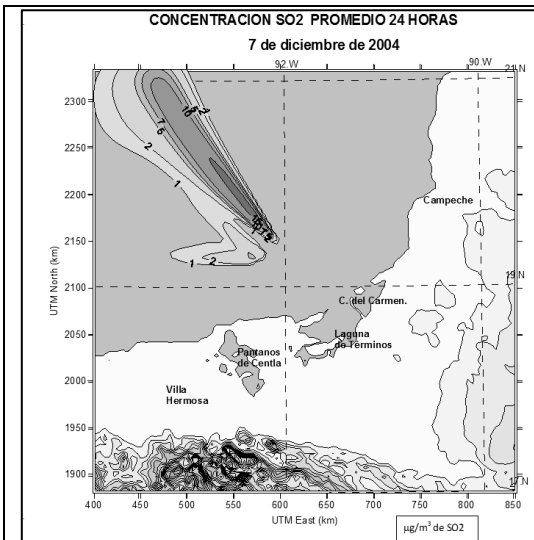
# ANEXO E

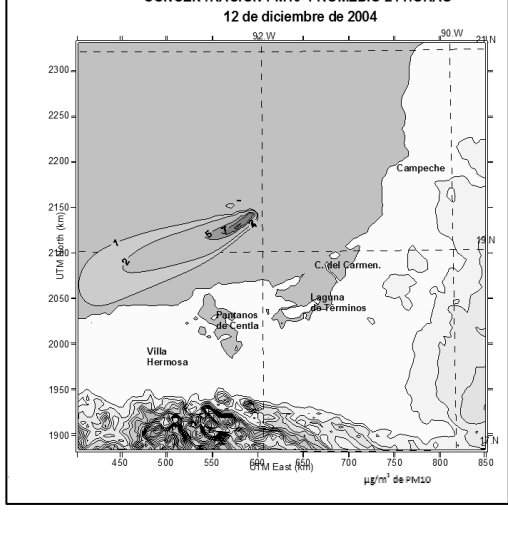
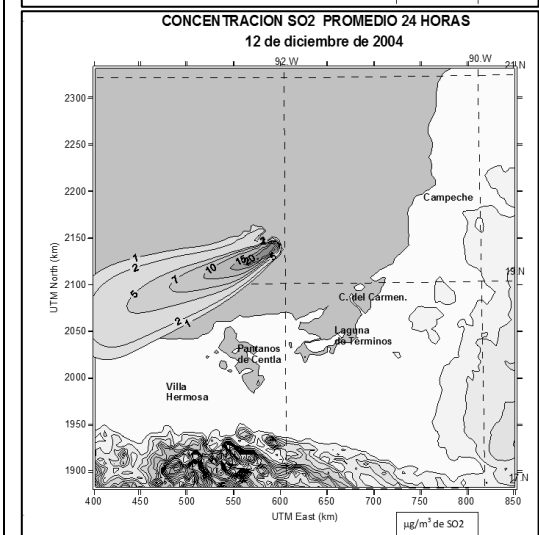
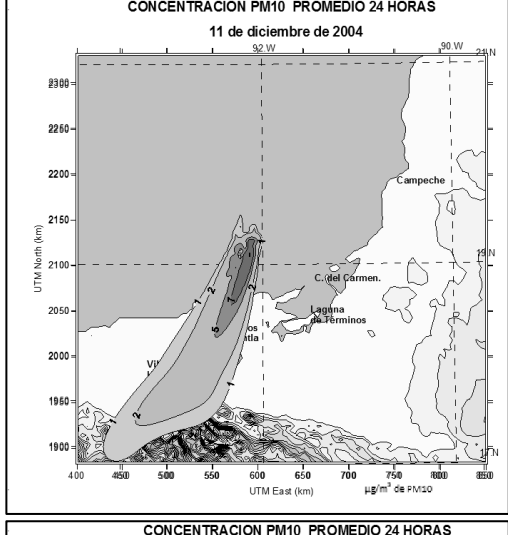
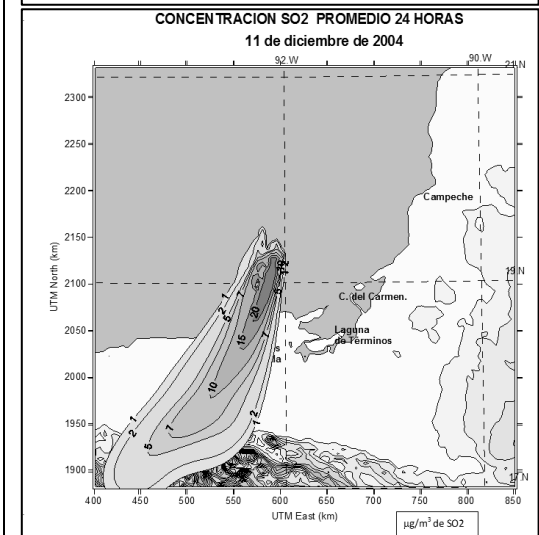
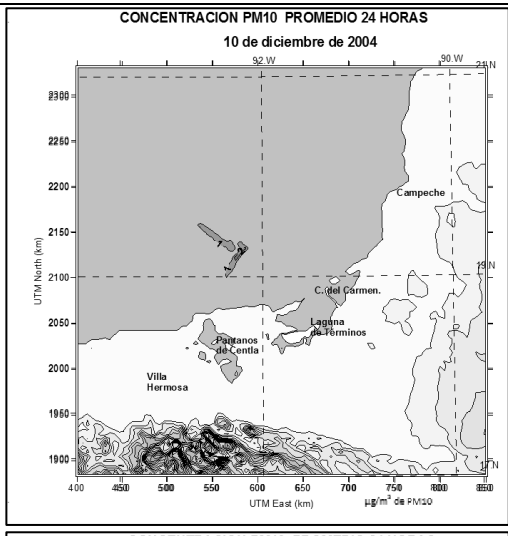
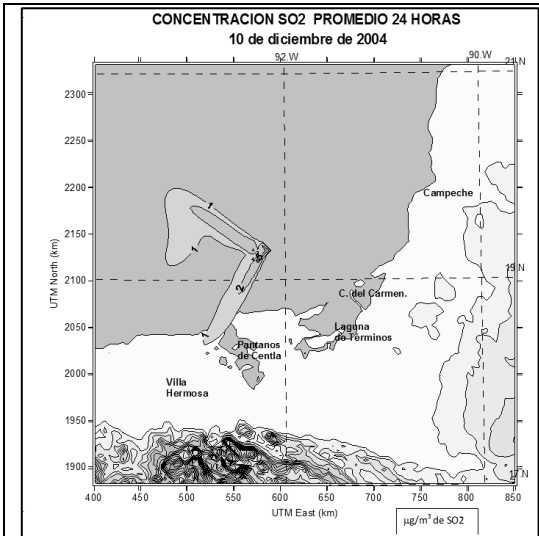
## LINEAS DE ISOCONCENTRACIÓN PROMEDIO DE 24 HORAS PERIODOS SIMULADOS

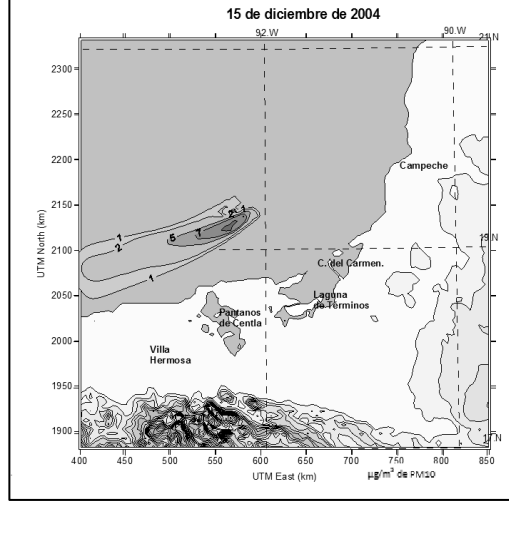
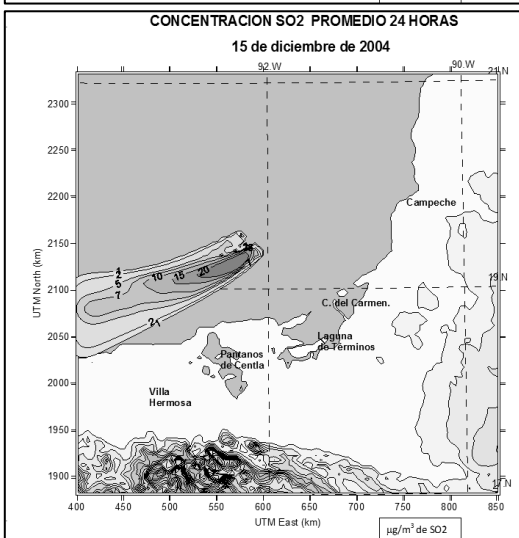
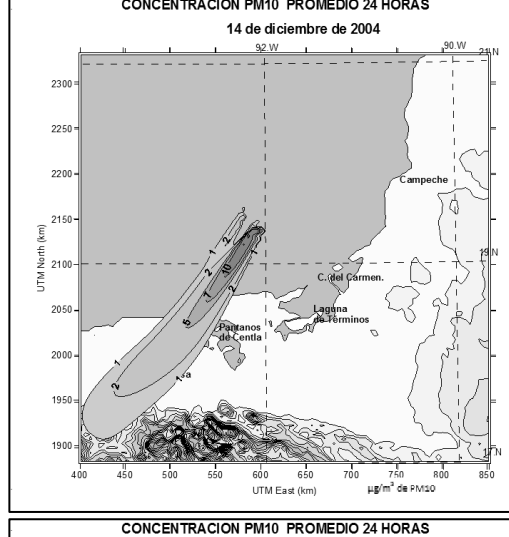
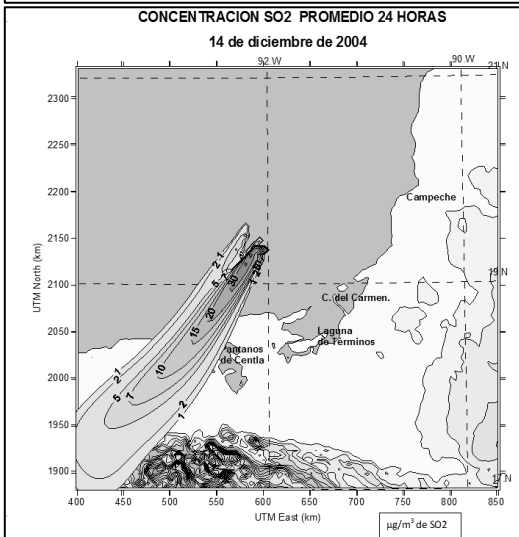
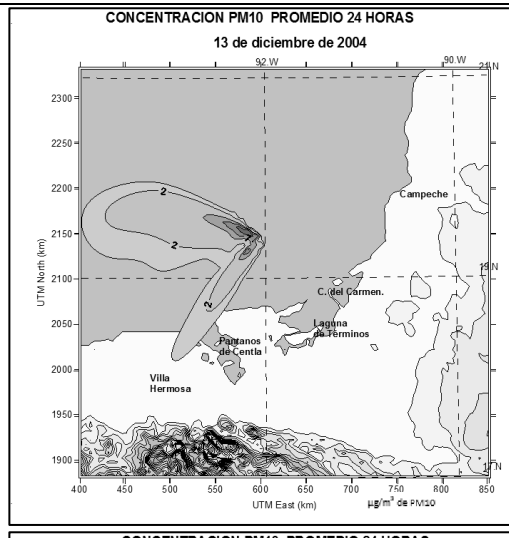
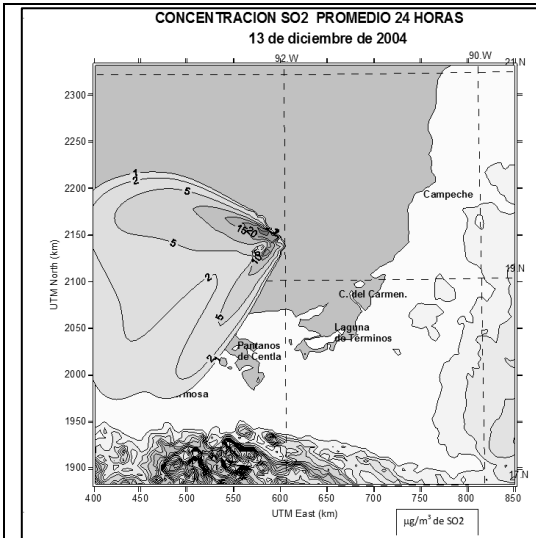


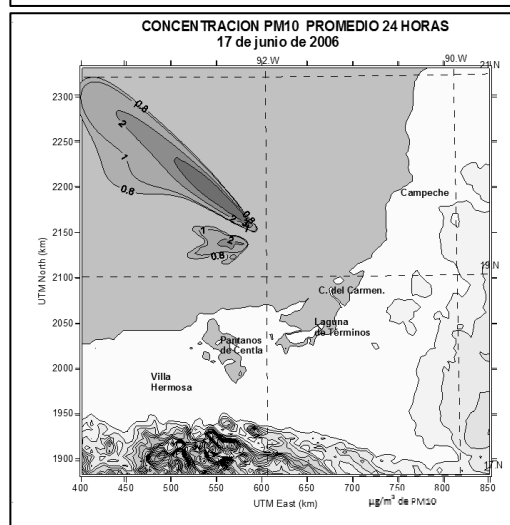
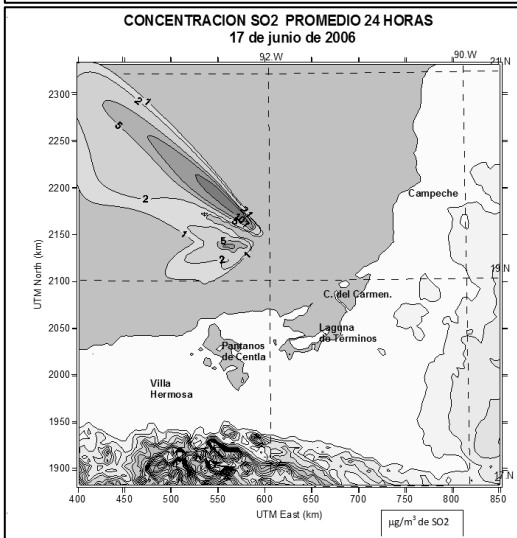
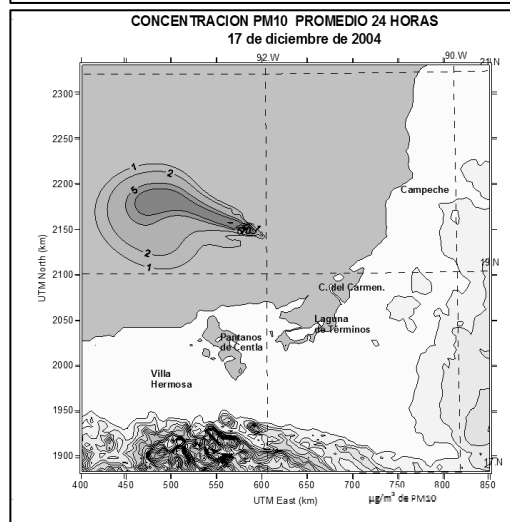
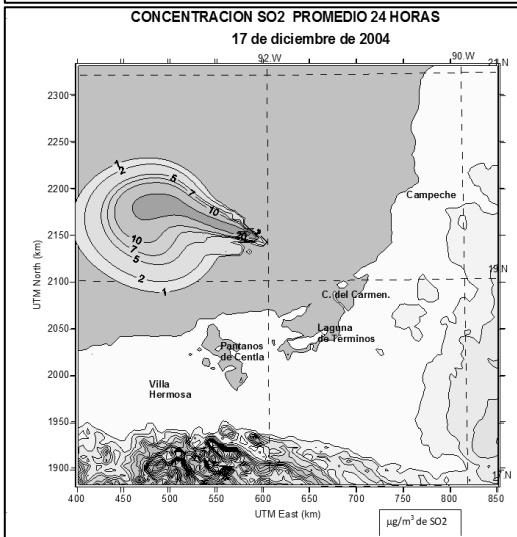
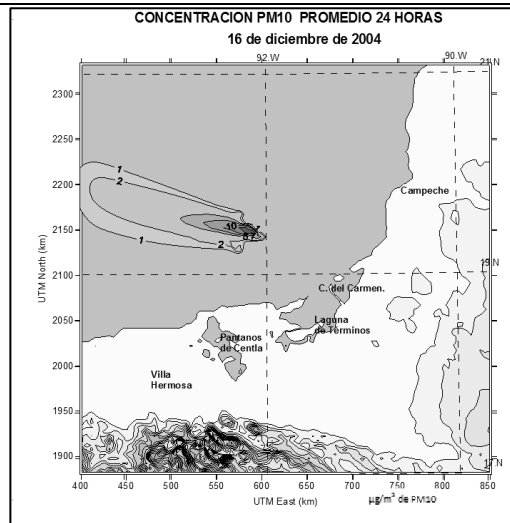
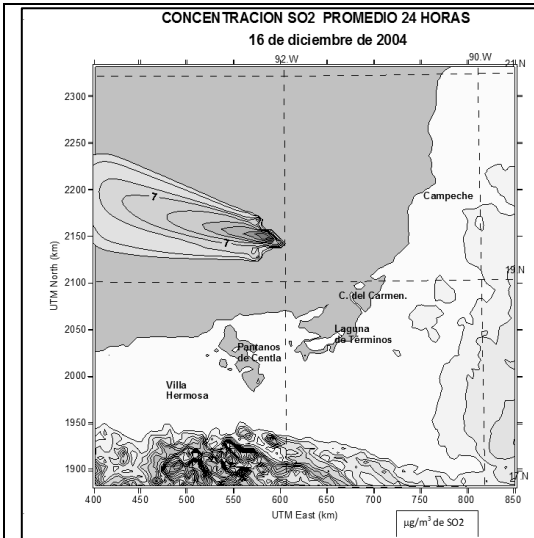




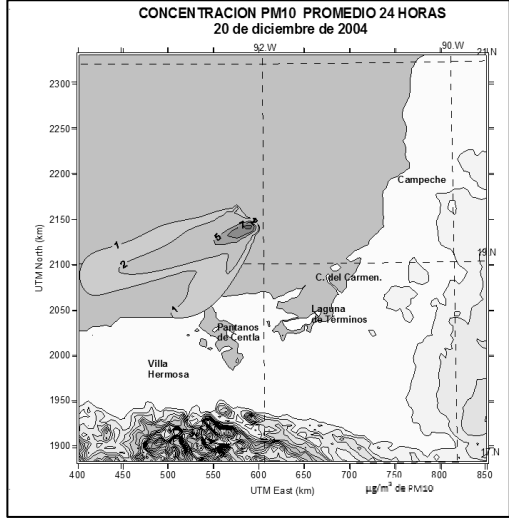
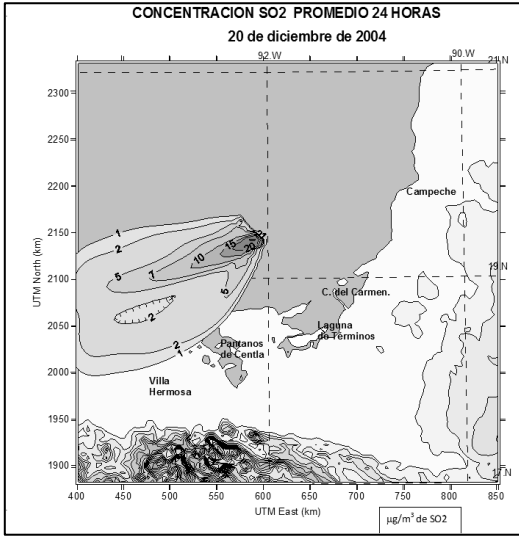
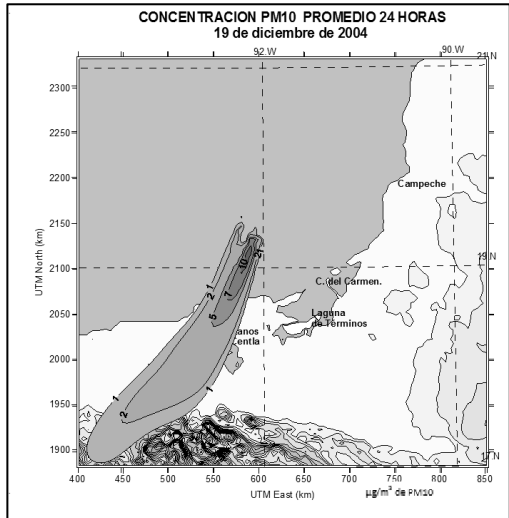
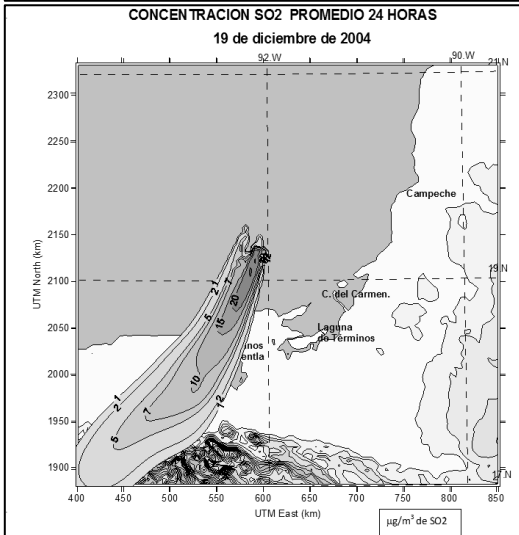
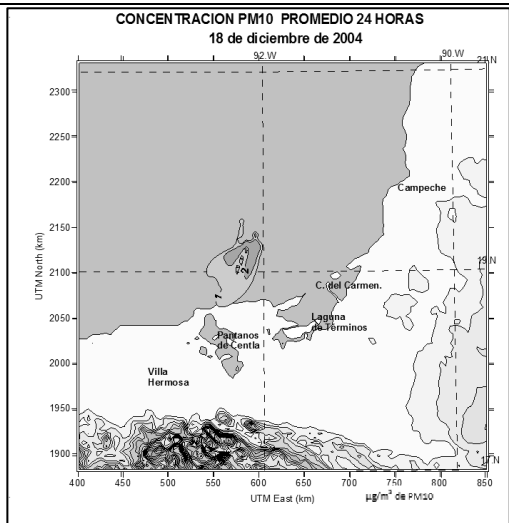
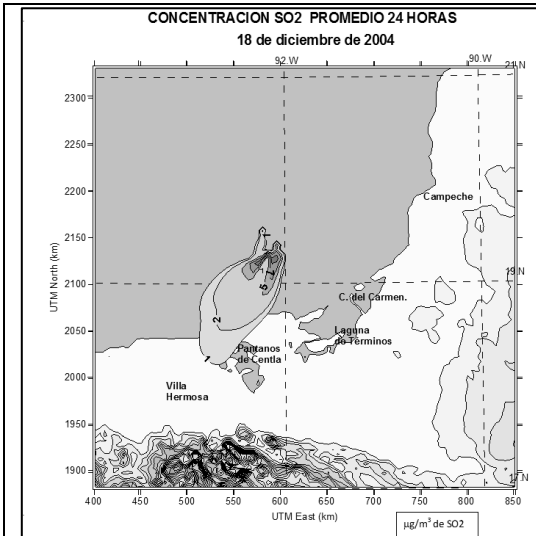


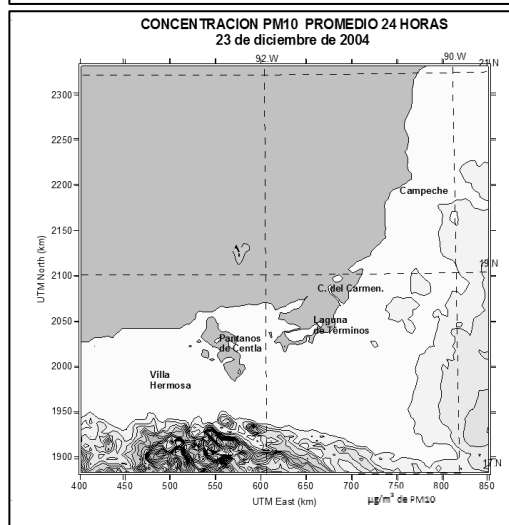
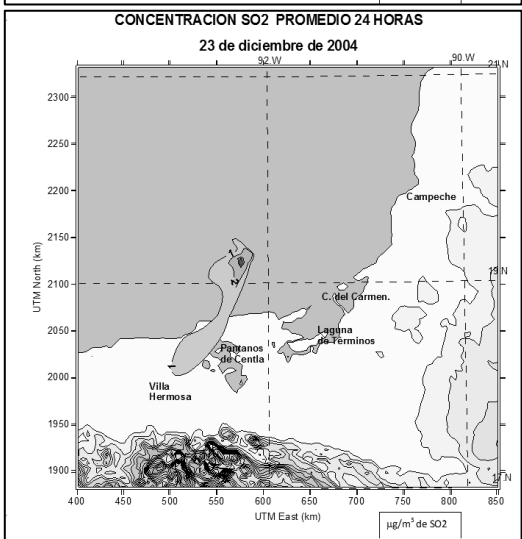
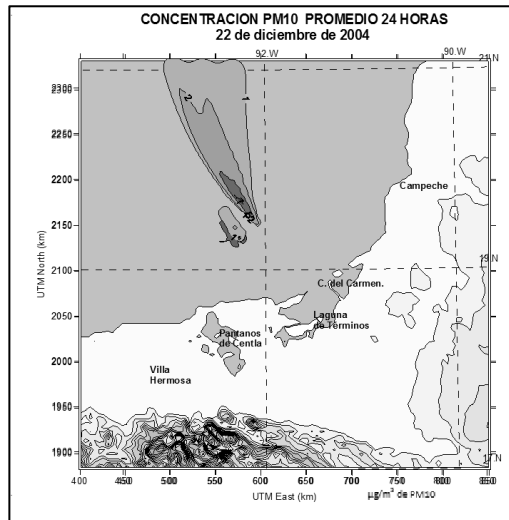
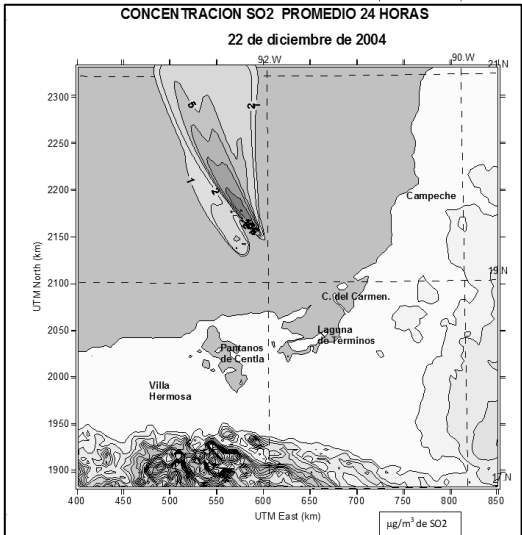
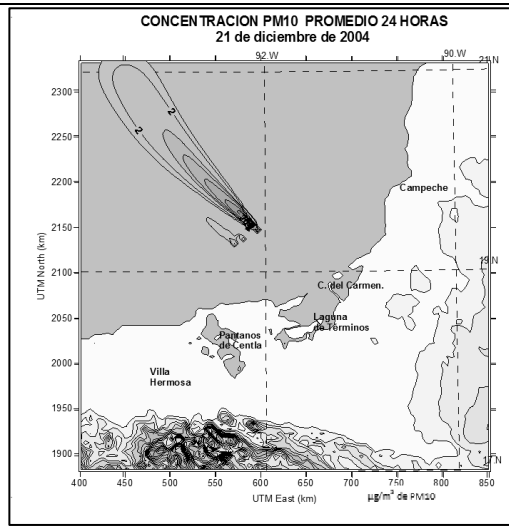
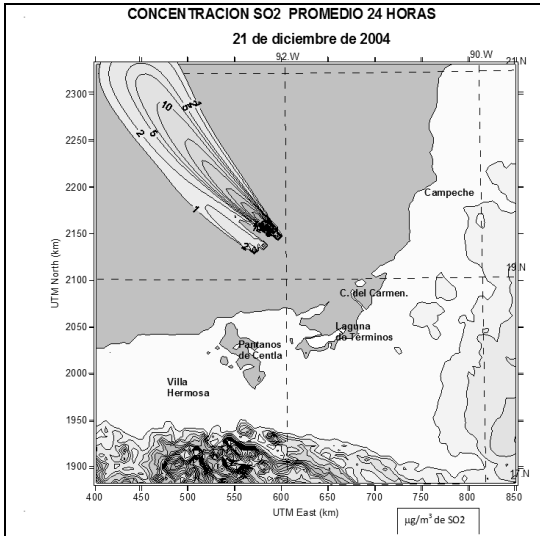


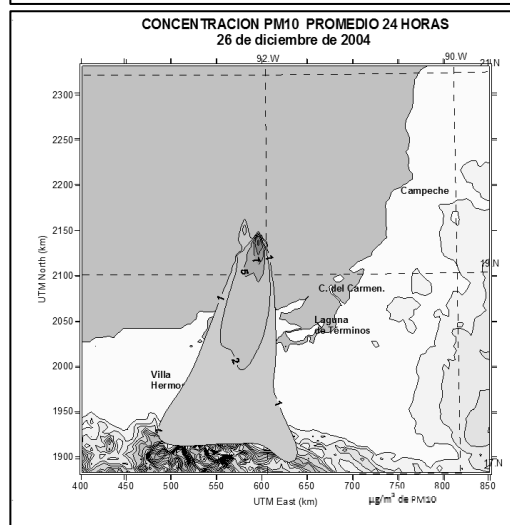
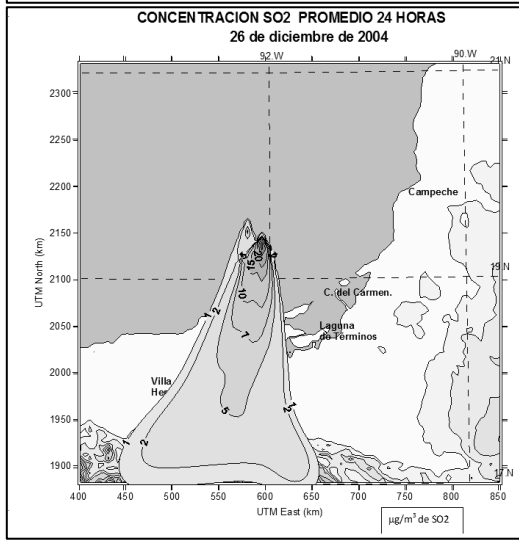
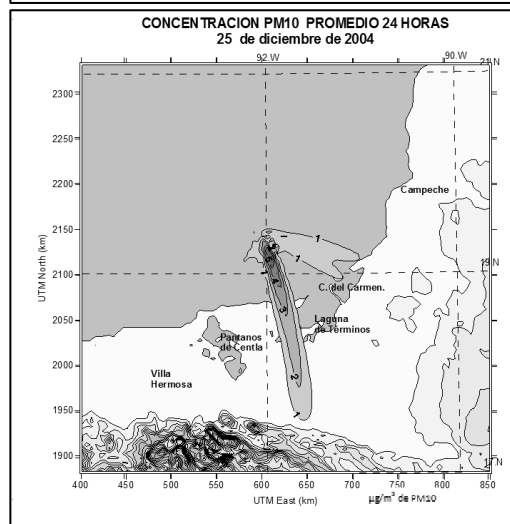
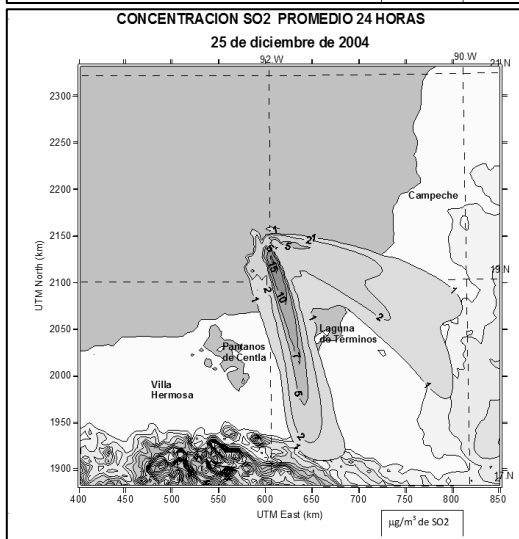
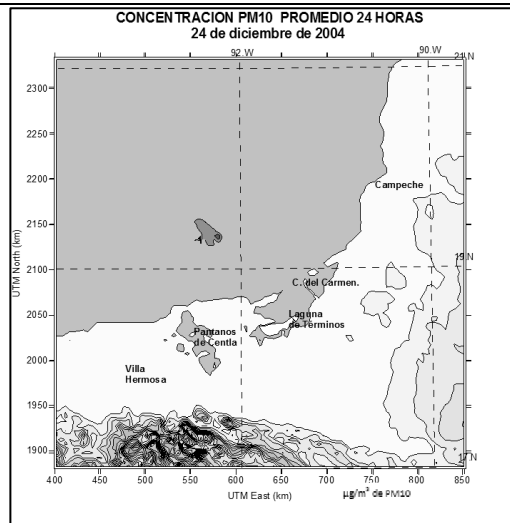
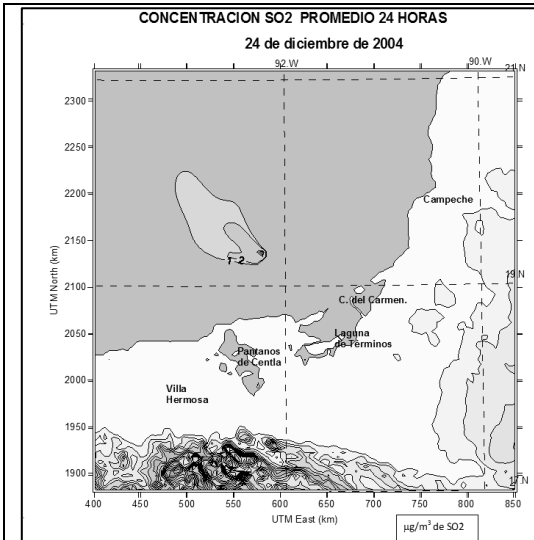


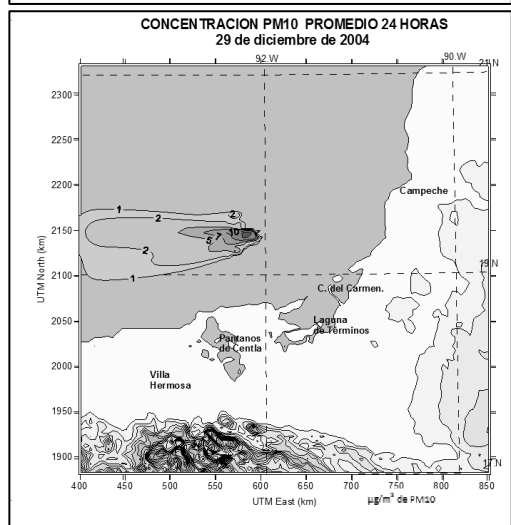
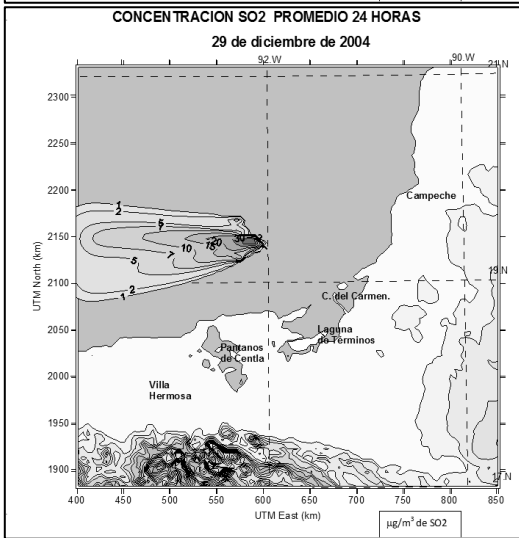
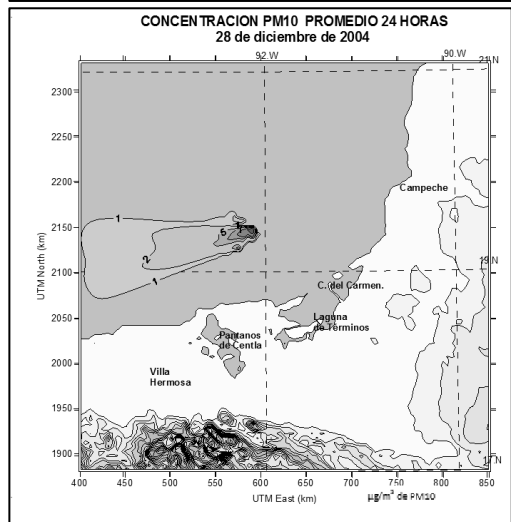
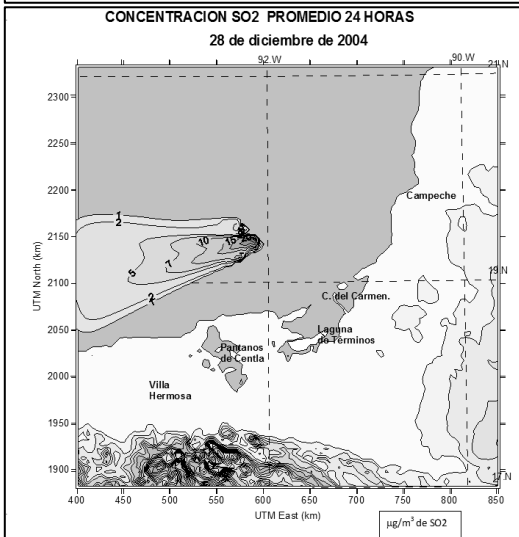
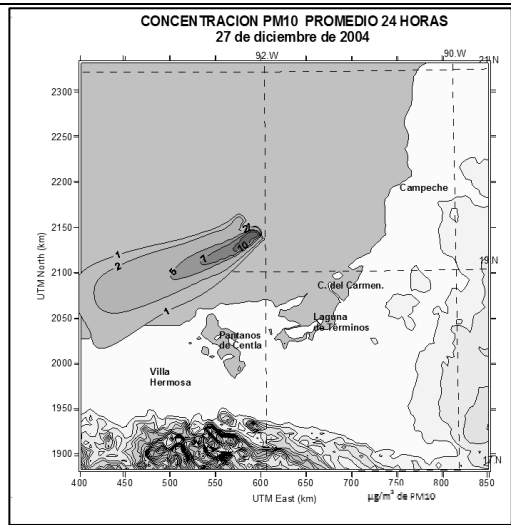
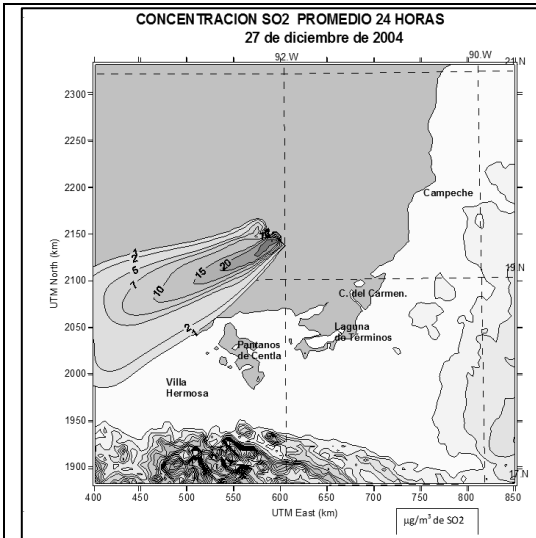


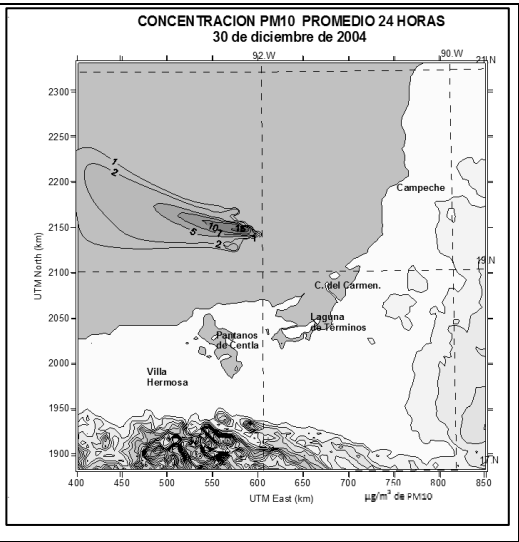
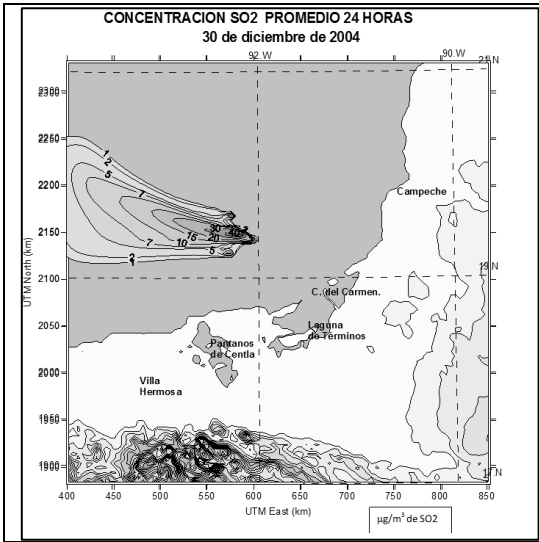












## ANEXO F

### PRIMEROS 10 VALORES MÁXIMOS ENCONTRADOS DURANTE LA SIMULACIÓN EN LOS DIFERENTES PERIODOS

FECHA	DIOXIDO DE AZUFRE										PARTÍCULAS MENORES A 10 MICRAS									
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Dic.1/ 04	14.8	14.6	12.4	11.4	11.2	10.3	9.1	9.0	8.8	8.7	5.2	5.2	4.4	4.0	4.0	3.6	3.2	3.2	3.1	3.1
Dic.2/ 04	68.3	55.2	55.2	48.5	46.9	45.7	44.4	43.5	40.8	39.5	24.5	19.8	19.8	17.4	16.8	16.4	15.9	15.6	14.6	14.2
Dic.3/ 04	24.8	22.9	19.6	18.8	18.8	18.3	18.0	16.7	16.7	16.7	8.9	8.2	7.0	6.8	6.8	6.6	6.5	6.0	6.0	6.0
Dic.4/ 04	24.3	22.6	22.0	19.0	18.9	18.8	17.9	17.2	17.0	16.7	8.7	8.1	7.9	6.8	6.8	6.8	6.4	6.2	6.1	6.0
Dic.5/ 04	52.3	44.3	44.2	38.7	36.5	35.6	34.0	33.3	31.8	29.8	18.8	15.9	15.9	13.9	13.1	12.8	12.2	12.0	11.4	10.7
Dic.6/ 04	23.1	23.1	22.3	21.0	20.4	20.2	19.6	19.6	18.7	17.9	8.3	8.3	8.0	7.5	7.3	7.2	7.0	7.0	6.7	6.4
Dic.7 /04	18.4	18.3	17.7	17.4	17.4	17.1	17.1	17.0	17.0	16.6	6.6	6.6	6.3	6.3	6.3	6.1	6.1	6.1	6.1	6.0
Dic.8/ 04	19.5	19.0	18.5	18.5	18.2	18.1	18.1	18.0	18.0	18.0	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.4
Dic.9/ 04	11.7	11.0	11.0	10.9	10.6	10.5	10.5	10.4	10.2	10.2	4.2	4.0	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7	3.6
Dic.10 /04	9.1	7.0	6.3	5.5	5.3	4.7	4.4	4.3	3.6	3.6	3.2	2.5	2.3	2.0	1.9	1.7	1.6	1.5	1.3	1.3
Dic.11/ 04	28.7	27.7	27.6	27.2	26.4	26.3	25.9	25.0	24.9	24.7	10.3	9.9	9.9	9.8	9.5	9.4	9.3	9.0	8.9	8.9
Dic.12/ 04	32.4	28.5	27.4	25.0	24.5	22.6	22.3	20.5	20.0	19.4	11.6	10.2	9.8	9.0	8.8	8.1	8.0	7.3	7.2	7.0
Dic.13 /04	39.8	36.1	31.0	28.6	28.3	26.0	25.6	24.7	24.2	21.5	14.3	13.0	11.1	10.3	10.1	9.3	9.2	8.9	8.7	7.7
Dic.14/ 04	49.9	43.3	42.3	39.3	37.3	36.9	36.6	35.9	35.9	35.4	17.9	15.5	15.2	14.1	13.4	13.3	13.1	12.9	12.9	12.7
Dic.15/ 04	30.0	29.7	28.9	28.8	28.7	27.8	27.5	27.4	27.2	27.0	10.7	10.7	10.4	10.3	10.3	10.0	9.9	9.8	9.8	9.7
Dic.16/ 04	54.5	52.1	45.0	43.0	42.7	38.6	34.3	33.2	32.9	30.5	19.6	18.7	16.2	15.4	15.3	13.9	12.3	11.9	11.8	11.0
Dic.17/ 04	43.2	36.2	35.5	29.2	28.9	27.6	27.6	27.6	27.3	27.2	15.5	13.0	12.7	10.5	10.4	9.9	9.9	9.9	9.8	9.8
Dic.18/ 04	13.2	11.9	11.4	10.9	10.1	10.0	9.7	9.3	9.0	8.7	4.7	4.3	4.1	3.9	3.6	3.6	3.5	3.3	3.2	3.1
Dic.19/04	32.0	31.7	31.4	28.8	28.7	28.6	28.1	27.7	27.2	26.6	11.5	11.4	11.3	10.4	10.3	10.3	10.1	10.0	9.8	9.6
Dic.20/ 04	31.6	31.2	25.9	25.3	25.2	24.7	23.6	21.5	20.7	20.6	11.3	11.2	9.3	9.1	9.0	8.9	8.5	7.7	7.4	7.4
Dic.21/ 04	144.6	101.9	83.1	63.8	52.0	48.1	47.5	45.4	44.0	42.8	51.9	36.6	29.8	22.9	18.7	17.2	17.0	16.3	15.8	15.4

**CONTINUACIÓN ANEXO F**

FECHA	DIOXIDO DE AZUFRE										PARTÍCULAS MENORES A 10 MICRAS									
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Dic.22/ 04	21.2	19.9	19.7	19.3	18.5	17.9	17.5	17.2	17.0	16.9	7.6	7.1	7.1	6.9	6.7	6.4	6.3	6.2	6.1	6.1
Dic.23 /04	6.1	5.1	4.0	3.9	3.3	3.2	3.2	3.0	2.7	2.7	2.2	1.8	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
Dic.24/ 04	7.3	5.4	4.8	4.8	4.2	4.0	3.8	3.6	3.6	3.4	2.6	1.9	1.7	1.7	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2
Dic.25/ 04	17.3	16.3	16.2	15.8	14.2	14.0	13.9	13.5	13.0	12.8	6.2	5.9	5.8	5.7	5.1	5.0	5.0	4.8	4.7	4.6
Dic.26/ 04	46.4	41.0	37.1	31.5	28.3	27.2	22.9	22.3	20.1	19.9	16.7	14.7	13.3	11.3	10.1	9.8	8.2	8.0	7.2	7.1
Dic.27/ 04	41.2	35.7	35.7	35.2	34.7	34.4	32.9	29.3	28.4	28.0	14.8	12.8	12.8	12.6	12.4	12.3	11.8	10.5	10.2	10.1
Dic.28/ 04	55.4	45.1	39.5	38.0	32.3	30.2	27.6	23.5	23.1	22.2	19.9	16.2	14.2	13.6	11.6	10.8	99.1	84.5	82.1	79.6
Dic.29/04	48.6	43.3	43.3	41.2	40.6	38.6	37.7	37.3	33.0	30.6	17.5	15.6	15.5	14.8	14.6	13.8	13.5	13.4	11.9	11.0
Dic.30/ 04	60.1	56.4	49.0	42.2	39.8	38.9	38.5	36.2	36.2	35.5	21.6	20.2	17.6	15.2	14.3	13.9	13.8	13.0	13.0	12.7
Jun. 17/06	13.5	13.5	13.4	13.2	12.9	12.6	12.1	11.7	11.5	11.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.9	4.5	4.4	4.2	4.1	4.1
abr. 1/07	14.5	14.4	13.5	13.3	13.1	12.7	12.4	12.3	11.7	11.7	4.7	4.8	4.9	5.2	5.2	4.5	4.5	4.4	4.2	4.2
Sept. 3/04	12.6	11.2	10.8	10.3	10.2	10.0	8.7	8.1	7.9	7.8	10.2	10.3	10.8	11.2	12.6	10.0	8.7	8.1	7.9	7.8

**Ácido sulfhídrico:** Es un ácido inorgánico de fórmula  $H_2S$ . Este gas, más pesado que el aire, es inflamable, incoloro, tóxico y su olor es el de la materia orgánica en descomposición, como los huevos podridos.

**Advección:** Proceso de transporte de una propiedad atmosférica, como el calor o la humedad, por efecto del viento.

**Alquitranes:** Sustancia bituminosa, grasa, oscura y de olor fuerte, que se obtiene de la destilación de ciertas materias orgánicas.

**ARPEL:** Asociación Regional de empresas de petróleo y gas natural en Latinoamérica y el Caribe.

**Azimut:** se mide desde el punto cardinal norte en sentido horario de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  y se llama Acimut verdadero (Azv) o real. El azimut podrá ser magnético, si se mide respecto al norte magnético (Azm).

**Biotopo:** Área de condiciones ambientales uniformes que provee de espacio vital a un conjunto de flora y fauna

**Boyancia:** Ascenso, empuje.

**Breas:** La brea o pez es un residuo de la **pirólisis** de un material orgánico o destilación de alquitranes.

**C.C.A:** Centro de Ciencias de la Atmosfera, Universidad nacional Autónoma de México.

**Capa límite planetaria:** Sección de la atmósfera más cercana a la superficie terrestre, generalmente a altitudes cercanas a 500 1.000 m, donde la fricción influye en el viento, también se le denomina capa límite atmosférica.

**Compuestos orgánicos volátiles:** Los COV's son sustancias químicas orgánicas cuya base es el carbono y se evaporan a temperatura y presión ambiental generando vapores, que pueden ser precursores del ozono en la atmósfera.

**Corrida:** Referente a Simulación.

**D.O.S.:** Sistema Operativo por disco.

**Dietilenglicol:** Es un líquido viscoso, incoloro e inodoro de sabor dulce. Es higroscópico, miscible en agua, alcohol, etilenglicol.



**Dispersión atmosférica:** Transporte y dilución de un contaminante que depende en primer lugar, de las condiciones meteorológicas y, después de los parámetros y condiciones en que se produce la emisión en la fuente, o sea de la velocidad y temperatura de los gases y la masa y peso molecular de los diferentes compuestos.

**Diversidad étnica:** Es el conjunto de diversas razas que existen en el mundo y que difieren en el color de la piel, estatura, lenguaje, costumbres etc.

**Emisión Atmosférica:** Es el vertido de determinadas sustancias a la atmósfera.

**Endulzamiento de gas:** Eliminación el H<sub>2</sub>S y el CO<sub>2</sub> del gas natural

**EPA:** Agencia de protección Ambiental de estados Unidos.

**Estuario:** Los estuario son cuerpos de agua donde la desembocadura de un río se abre a un **ecosistema marino**, con una salinidad entre dulce y salada, o donde el agua de mar se diluye significativamente con el agua dulce que proviene del drenaje terrestre.

**Factores de emisión:** Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad.

**Fenómeno de El Niño:** El fenómeno denominado El Niño consiste en un calentamiento de las aguas del Pacífico que tiene lugar cada 2 a 7 años y que tiene una gran influencia en el comportamiento del clima en diversos lugares del mundo.

**Fluvial:** De los ríos o relativo a ellos.

**Irradiancia;** La irradiancia es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. En unidades del sistema internacional se mide en W/m<sup>2</sup>.

**KPa;** Kilo pascal, unidad de presión que equivale a 1000 pascales.

**Línea de iso concentración: Línea** que une puntos con igual concentración.

**Litoral:** Costa de un continente o isla.

**NARR:** North American Regional Reanalysis

**NCAR:** Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas.

**NECEP:** Centro Nacional de predicción Ambiental.

**NOAA:** Administración Nacional Atmosférica y Oceánica

**Plataforma continental:** La plataforma continental es la superficie del fondo submarino cercano a la costa, comprendido entre el litoral y las profundidades que no son mayores de 200 metros. Se trata del perímetro extendido de los continentes que se encuentra cubierto por mares no demasiado profundos.

**Plataforma Petrolera:** Conjunto de las instalaciones ubicadas en los mares u océanos para extraer petróleo o gas natural del subsuelo marino

**PM<sub>10</sub>:** Se denomina **PM10** a pequeñas partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento ó polen, dispersas en la atmósfera, y cuyo diámetro varía entre 2,5 y 10 µm.

**Puff:** Nube, bocanada, soplido de un contaminante.

**Reserva de la Biosfera:** Se integran por varias zonas biológicas y geográficas, donde una de ellas se convierte en el área núcleo exclusivamente para la investigación y la conservación de las especies en peligro de extinción representativas de la flora y la fauna mexicanas. Poseen estas reservas una superficie mayor de los 10 kilómetros cuadrados.

**Turbomáquinas:** Máquina cuyo elemento principal es un rodete (rotor) a través del cual pasa un fluido de forma continua, cambiando éste su cantidad de movimiento por acción de la máquina, dándose así una transferencia de energía entre la máquina y el fluido, la cual puede ser en sentido máquina-fluido o fluido-máquina.

**USGS:** Servicio de Geología y Suelos de Estados Unidos,

**UTM:** El Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator es un sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator, que se construye como la proyección de Mercator normal, pero en vez de hacerla tangente al Ecuador, se la hace tangente a un meridiano.