



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTUDIO DEL ORIGEN DE EMISIONES DE LOS
INCREMENTOS EXTRAORDINARIOS EN
CONCENTRACIÓN DE SO₂ EN LA ZMVM EN EL
PERIODO 2007-2009.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

CINTIA GABRIELA RESÉNDIZ MARTÍNEZ



MÉXICO, D.F.

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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: Profesor: DR. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

VOCAL: Profesor: M. en C. NÉSTOR NOÉ LÓPEZ CASTILLO

SECRETARIO: Profesor: DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

1er. SUPLENTE: Profesor: GEMA LUZ ANDRACA AYALA

2° SUPLENTE: Profesor: SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, FISICOQUÍMICA
ATMOSFÉRICA.** UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CIRCUITO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA S/N, CIUDAD
UNIVERSITARIA, DEL. COYOACÁN, 04510 MÉXICO D.F.

ASESOR DEL TEMA:

DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

SUSTENTANTE:

CINTIA GABRIELA RESÉNDIZ MARTÍNEZ

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Agustín García Reynoso por su asesoría y apoyo en la realización de mi trabajo de tesis. Por brindarme la oportunidad de trabajar con él, por compartir sus conocimientos conmigo y guiarme en la parte final de mi carrera.

Al Dr. Víctor Luna Pabello y el M. en C. Néstor Noé López Castillo por sus correcciones y observaciones para mejorar este trabajo de investigación.

Al Dr. Hugo Delgado Granados del Instituto de Geofísica, por brindarnos la información con respecto al comportamiento del volcán Popocatepetl que fue de primordial importancia.

A la UNAM, máxima casa de estudios y a mi querida Facultad de Química, que fue mi segundo hogar durante mi carrera y sin duda alguna, para mi es un gran orgullo pertenecer a esta institución.

DEDICATORIA

Primero, dedico esto a mis padres Alejandra Martínez y Enrique Reséndiz, que son mi motivación y mi ejemplo a seguir, sé que gracias a ellos, a su incondicional amor y apoyo he llegado hasta donde estoy.

A mis hermanas Ingrid y Miriam Reséndiz Martínez, compañeras, amigas y consejeras en cada momento.

A Luis Zárate, mi mejor amigo y compañero, por estar a mi lado todos estos años y aunque hubo momentos difíciles supimos superarlos juntos.

Finalmente, pero no por eso menos importantes, a mis indispensables amigos que ya los considero mi familia, los que están en las buenas y en las malas a mi lado, siempre alegrando mi vida y causando momentos inolvidables.

ÍNDICE GENERAL.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.	1
1.3. OBJETIVOS.	2
1.4. HIPÓTESIS.	3
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	4
2.1. ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO, ZMVM.	4
2.2. SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO, SIMAT.	7
2.3. RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO, RAMA.	8
2.4. FUENTES DE CONTAMINANTES.	11
2.4.1 Fuentes puntuales o fijas.	12
2.4.2. Fuentes de Área.	12
2.4.3 Fuentes Móviles (Vehículos Automotores).	13
2.4.4. Fuentes Naturales.	14
2.5. CONTAMINACIÓN POR SO ₂ .	15
2.5.1 Características generales de SO ₂ .	16
2.5.2. Dióxido de azufre en la ZMVM.	17
2.6. ESTADO DE HIDALGO.	21
2.7. VOLCÁN POPOCATÉPETL.	26
2.8. MEDICIÓN EN EL VOLCÁN.	28
2.8.1. Espectrómetro de Correlación (COSPEC).	29
2.8.2. Espectroscopia de Absorción Óptica Diferencial (DOAS).	30
2.9. MARCO NORMATIVO RESPECTO AL SO ₂ .	32
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	34
3.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO MCCM.	36
3.1.1 Módulos de MCCM.	37
3.2. CASO DE ESTUDIO: INCREMENTOS EXTRAORDINARIOS DE CONCENTRACIÓN DE SO ₂ EN EL PERIODO 2007-2009.	39
3.3 RECOPIACIÓN DE DATOS DE RAMA.	41
3.4 COMPORTAMIENTO DEL VOLCÁN EN DÍAS CON IE.	46
3.5 EJECUCIÓN DEL MODELO.	48
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	50
4.1. ÍNDICE DE CONCORDANCIA.	50
4.2. VISUALIZACIÓN DE DATOS DE SALIDA DE MCCM.	57

4.2.1. Despliegue en dos dimensiones mediante GraDS.	57
4.2.2. Visualización en tres dimensiones con VIS5D.	71
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	79
6. CONCLUSIONES.	87
7. REFERENCIAS.	90
8. ANEXOS.	95
8.1. RAMA: Analizadores por estación de monitoreo y período de operación.	95
8.2. REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA.	96
8.3. Gráficas de tendencias de contaminantes(1990-2008).	98
8.4. Aviso de Incremento Extraordinario en la concentración de SO ₂	99
8.5. MULTISCALE CLIMATE CHEMISTRY MODEL (MCCM).....	100
8.6. MODELOS DE MESOESCALA.....	101
8.7. DATOS DE MONITOREO VOLCÁNICO CON MINIDOAS.	102
8.8. BRISA DE VALLE Y DE MONTAÑA.	103
8.9. RESULTADOS EN DOS DIMENSIONES DE LA MODELACIÓN PARA EL AÑO 2010.	105

ÍNDICE DE GRÁFICAS E ILUSTRACIONES.

Ilustración 2.1. Zona Metropolitana del Valle de México.....	5
Ilustración 2.2. Sistema de información CICA.	10
Gráfica 2.1. Emisiones de SO ₂ por sector industrial.....	19
Gráfica 2.2. Indicadores de cumplimiento de NOM y recomendaciones internacionales.	20
Ilustración 2.3. Mapa del Estado de Hidalgo con las principales zonas industriales.	20
Gráfica 2.3. Contribución de cada sector de contaminación de SO ₂ , CO y NO _x en Hidalgo.	24
Gráfica 2.4. Sectores con mayor emisión de SO ₂ en Tula, Hidalgo.....	25
Ilustración 2.4. Localización del volcán Popocatepetl.....	27
Ilustración 2.5. Metodología de medición de COSPEC.	29
Ilustración 2.6. Fundamento de mini-DOAS.	30
Ilustración 2.7. Localización de estaciones de medición con mini-DOAS.	31
Ilustración 3.1. Diagrama de la metodología general.	35
Gráfica 3.1. a-f). Máxima concentración registrada por estación y por hora para días con IE.....	41
Gráfica 3.2. Emisión de SO ₂ por el volcán en días con IE registrados en la ZMVM..	47
Gráfica 4.1. a-d). Comparación del índice de concordancia para MCCM con y sin emisión del volcán en días con IE de SO ₂	51
Gráfica 4.2. Comparación de los datos de meteorología de RAMA y MCCM..	55
Gráfica 4.3. Comparación de concentración de SO ₂ entre RAMA y MCCM....	56
Ilustración 4.1. a-j) Trayectorias de SO ₂ en retroceso para días con IE.	58

Ilustración 4.2. Visualización de concentración de SO ₂ y dirección de vientos en las horas con picos en concentración el 13/11/2007.	72
Ilustración 4.3. Comportamiento de los vientos alrededor del volcán el 13/11/2007.	73
Ilustración 4.4. Perspectiva vertical de vientos sobre el D.F. en el día 13/11/2007.	74
Ilustración 4.5. Visualización de concentración de SO ₂ y dirección de vientos en las horas con picos en concentración el 28/02/2008.	75
Ilustración 4.6. Visualización de concentración de SO ₂ y dirección de vientos en las horas con picos en concentración el 24/02/2009.	77
Ilustración 5.1. Localización de fuentes de SO ₂ consideradas.	80
Ilustración 5.2. Trayectoria en 3D de los vientos en el día 12/enero/2009..	81
Ilustración 5.3. Visualización del patrón de los vientos hacia la ZMVM el día 12/enero/2009	82

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1. Municipios del Estado de México y su contribución de SO ₂	18
Tabla 2.2. Emisiones de SO ₂ por sector en la ZMVM.....	19
Tabla 2.3. Listado de zonas industriales en Hidalgo.	22
Tabla 2.4. Emisión de SO ₂ por sector industrial en Tula, Hidalgo.....	25
Tabla 2.5. Normatividad aplicable a la contaminación atmosférica por SO ₂ .	32
Tabla 3.1. Recopilación de avisos de incrementos extraordinarios de SO ₂ en 2007-2009.....	40
Tabla 3.2. Datos de COSPEC para emisión del volcán en días con IE de SO ₂	48
Tabla 3.3. Promedio de emisión del volcán del año 2006 incluida al modelo MCCM.	49
Tabla 4.1. Conteo de trayectorias por día con incremento extraordinario considerando su tendencia al siguiente día en el pronóstico.	69
Tabla 4.2. Resumen de fechas con mayor incremento de concentración.	71
Tabla 5.1. Resultados de la modelación para días con IE en el 2010.....	90

RESUMEN

En este trabajo el objetivo es detectar la fuente de las emisiones de SO₂ en los días con incremento extraordinario (IE) en concentración de dicho **contaminante (≥ 200 ppm) registrados en la Zona Metropolitana** del Valle de México (ZMVM) durante el periodo 2007-2010.

La metodología usada en este trabajo está basada en el manejo del modelo de calidad del aire MCCM (Multiscale Chemistry Climate Model), el cuál incorpora procesos meteorológicos y químicos, emisiones antropogénicas y biogénicas, también lleva acabo la predicción del clima regional y así como de la calidad del aire del dominio establecido.

Para este trabajo se incorporaron las emisiones del volcán Popocatépetl al inventario que toma el modelo MCCM como base de modelación, los datos medidos por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y Red Meteorológica (REDMET), se compararon con los resultados de la modelación con el fin de evaluar el desempeño de MCCM.

Los resultados estadísticos mostraron que el desempeño del modelo es bueno ya sea en pronóstico meteorológico y del contaminante SO₂, mientras que la determinación de la fuente de las emisiones en los días con IE de SO₂ fue visualizada en 2 dimensiones (GRADS) y en 3 dimensiones (VIS5D), estos programas incorporan los datos meteorológicos con los de emisión de contaminantes para determinar, en base al comportamiento de los vientos, la dirección de transporte de contaminantes hacia la zona de estudio.

Se determinó que las emisiones de Tula, Hidalgo y del Popocatépetl influyen en la calidad del aire de la ZMVM durante los casos de estudio y aunque la emisión volcánica si tiene influencia, las emisiones de origen antropogénico son las que se deben controlar para mejorar la calidad del aire en la ciudad.

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En algunas ocasiones se registran mediciones de altas concentraciones de SO₂ en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), a partir de las cuales las autoridades las identifican como emisiones extraordinarias de SO₂. Se desea conocer cuál es el origen de dichas emisiones extraordinarias.

1.2. JUSTIFICACIÓN.

Al ser la Ciudad de México una de las más pobladas, esto es generalmente sinónimo de contaminación, se le adiciona la problemática de que esta rodeada de montañas lo cual provoca un estancamiento de contaminantes atmosféricos en la cuenca.

El monitoreo atmosférico llevado a cabo en la ZMVM es relevante para informar a la población sobre la situación ambiental por medio del sistema IMECA, implementado por la Secretaría de Medio Ambiente, aun así, esta obtención de datos también debería ser utilizada para beneficio de la población, con la prevención y aplicación de medidas para reducción de

contaminación, no sólo de la contaminación propia de la ciudad sino de las fuentes externas que influyen en la calidad del aire de la ZMVM.

La calidad del aire en la ZMVM ha sido aceptable el 60% de los días del año de 2010, lo cual implica que aún se debe trabajar para abatir la concentración de contaminantes a niveles que no sean nocivos para la población. Las concentraciones de SO₂ en el aire se encuentran en promedio en niveles permisibles, sin embargo existen períodos donde las concentraciones llegan a valores altos y rebasan las recomendaciones de salud propuestas por la Secretaría de Salud y de la Organización Mundial de la Salud por lo tanto es necesario conocer su origen, con lo cual se podrán aplicar medidas de prevención, de control y así evitar problemas de salud a futuro.

1.3. OBJETIVOS.

- Inclusión de emisiones de SO₂ del volcán en inventario (INEM 1999) del pronóstico de calidad del aire.
- Mediante un modelo computacional, obtener pronósticos sobre la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), concentración, transporte y trayectoria de los contaminantes atmosféricos hacia la ciudad.

- Evaluar el desempeño del modelo con un análisis estadístico y comparaciones con las mediciones del SIMAT.
- Con los resultados de la modelación, determinar si hay influencia de las emisiones volcánicas y antropogénicas del sector industrial en la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México.

1.4. HIPÓTESIS.

Los incrementos extraordinarios de concentración de SO₂ en la Zona Metropolitana del Valle de México en el periodo 2007-2009 pueden ser provocados por emisiones provenientes del volcán Popocatepetl o de la región industrial en Tula, Hidalgo, o bien de ambas fuentes. La cercanía de estas posibles fuentes de emisión con la ZMVM y la dirección de los vientos son los factores principales para el transporte de contaminantes.

CAPÍTULO 2 . ANTECEDENTES.

2.1. ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO, ZMVM.

El Valle de México forma parte de una cuenca, la cual tiene una elevación promedio de 2,240 metros sobre el nivel del mar y una superficie de 9,560 km²; presenta valles intermontañosos, mesetas, así como terrenos semiplanos, en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco; está integrada por una parte del Estado de México, el sur del Estado de Hidalgo, el sureste de Tlaxcala y la totalidad del Distrito Federal.

La ZMVM con una superficie de 7,732 km² incluye las 16 delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios del Estado de México (Ilustración. 2.1). Su ubicación geográfica y su entorno característico ejercen una influencia determinante sobre la calidad del aire existente en esta zona.

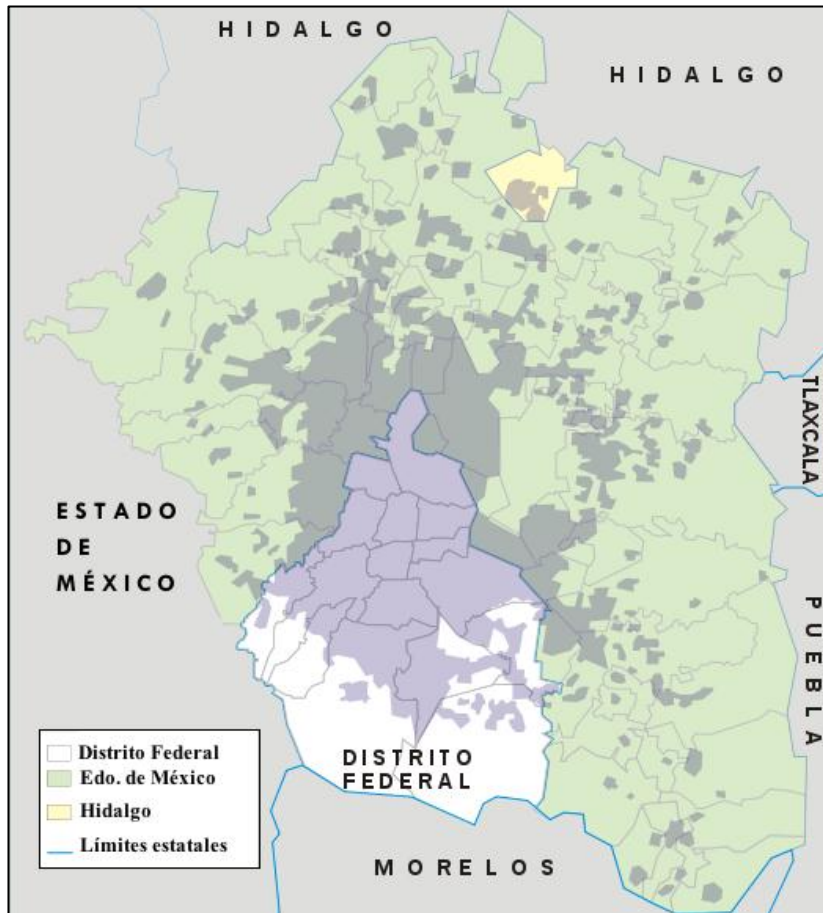


Ilustración 2.1. Zona Metropolitana del Valle de México.

Entre los principales factores fisiográficos y climáticos que afectan la calidad del aire destacan los siguientes (Procuraduría ambiental y del ordenamiento territorial del D.F., 2011):

- Las montañas que delimitan la cuenca alcanzan una altitud promedio de 3200 metros, con elevaciones que superan los 5400 metros.

- El entorno montañoso que rodea la cuenca constituye una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y la dispersión de los contaminantes. Por ello, se favorece la acumulación de los contaminantes atmosféricos.
- Las frecuentes inversiones térmicas que ocurren en el valle, en más del 70% de los días del año, son un fenómeno natural que causa un estancamiento temporal de las masas de aire en la atmósfera.
- La intensa y constante radiación solar que se registra en el Valle de México durante el año, favorece la formación del ozono. Esto es resultado de las reacciones que la luz ultravioleta desencadenan entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos emitidos a la atmósfera, los cuales son precursores del ozono.
- El contenido de oxígeno en el Valle de México es 23% menor que a nivel del mar, lo cual hace más contaminantes los procesos de combustión.

2.2. SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO, SIMAT.

En diciembre del 2000 se definió el concepto SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México) que incluye la operación del Sistema de Avisos de Emisiones Extraordinarias de Contaminación, éste se activa cuando se registran concentraciones elevadas de contaminantes atmosféricos en cualquier hora o estación de monitoreo del sistema para $PM_{10} \geq 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_2 y $NO_2 \geq 0.200 \text{ ppm}$ (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, 2011),.

En la actualidad el SIMAT esta integrado por:

- Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA): realiza mediciones continuas y permanentes de ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) y partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), cuenta con 34 estaciones (ANEXO 8.1).
- Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA): realiza mediciones cada seis días y su principal objetivo es obtener muestras de Partículas Suspendidas Totales (PST), Partículas Menores a 10 micrómetros (PM_{10}) y Partículas Menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) y tiene 12 estaciones.

- Red de Depósito Atmosférico (REDDA): obtiene muestras de depósito húmedo y depósito seco en la Ciudad de México, esta red cuenta con 16 sitios de muestreo.
- Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET): tiene como función proporcionar información de los parámetros meteorológicos para elaborar el Pronóstico meteorológico y modelos de dispersión con 16 estaciones.

2.3. RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO, RAMA.

La información que proporciona RAMA es importante para evaluar la calidad del aire y su difusión mediante el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) y permite la instrumentación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) en situaciones de riesgo para la salud de la población.

El monitoreo realizado por RAMA también permite evaluar el desempeño de las acciones de prevención y control de contaminación en la Ciudad de México.

La información generada en los subsistemas del SIMAT, RAMA y REDMET, se concentra en el Centro de Información de la Calidad del Aire (CICA) donde

cada minuto se obtiene registro de los 184 analizadores automáticos: 107 de contaminantes atmosféricos y 77 de parámetros meteorológicos.

La información genera 184 promedios, que son empleados para la generación del IMECA y el Índice de radiación solar o Ultravioleta (IUV) y cada hora son publicados en la página web de la Secretaría de Medio Ambiente, datos que fueron utilizados para la realización de este estudio.

En el CICA se lleva a cabo una vigilancia continua de la calidad del aire para notificar oportunamente la existencia de episodios de incremento extraordinario de PM_{10} , SO_2 o NO_2 y la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM) determina la activación o desactivación del PCAA, también genera publicaciones que permiten evaluar la calidad del aire y la verificación de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM).

En la ilustración 2.3 se esquematiza los insumos del CICA y los servicios que ofrece.

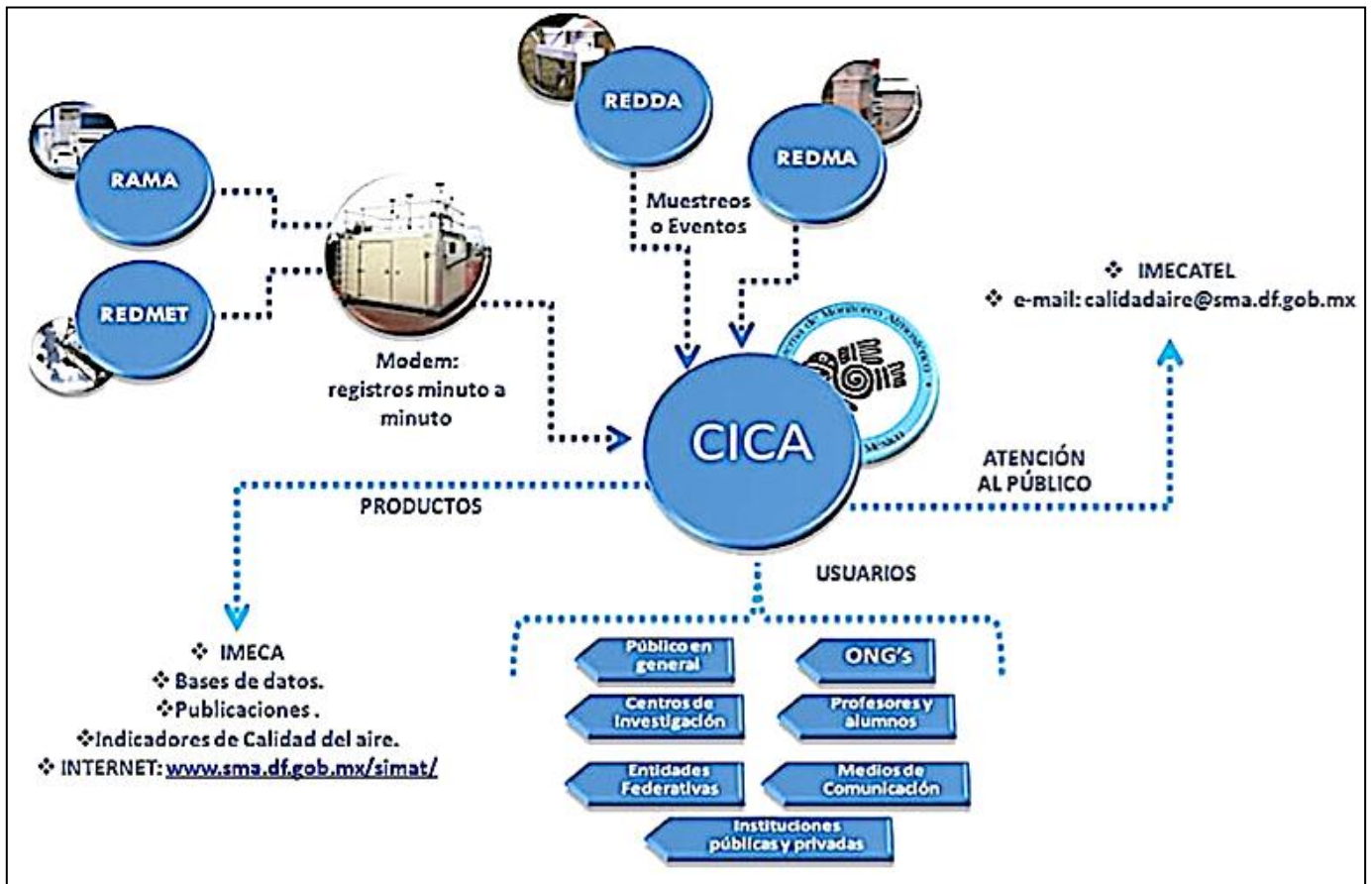


Ilustración 2.2. Sistema de información CICA.

El medio por el cual se hace llegar la información de situaciones ambientales conocidas como emisiones extraordinarias de contaminantes, es un aviso electrónico (ANEXO 8.4) que se envía a la Secretaría de Salud, a la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM) y a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), con la finalidad de que se instrumenten las acciones necesarias (Sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México, 2011).

El conteo estadístico de estas emisiones extraordinarias se lleva a cabo considerando lo siguiente:

- Si en varias zonas de calidad del aire (NO, NE, CE, SO ó SE) de la Zona Metropolitana se presentan incrementos extraordinarios a la misma hora, se considera para el conteo un incremento por cada zona.
- Si en una estación de monitoreo se presenta un incremento durante horas continuas, se considera para el conteo como un sólo incremento extraordinario.
- Si se presentan incrementos extraordinarios en varias estaciones de la misma zona, se considera para el conteo sólo la estación que presenta la mayor concentración.

2.4. FUENTES DE CONTAMINANTES.

Las fuentes de emisión se agrupan en cuatro categorías principales:

1. *Fuentes puntuales o fijas.*
2. *Fuentes de área.*
3. *Fuentes móviles (de vehículos automotores).*
4. *Fuentes naturales.*

2.4.1. Fuentes puntuales o fijas.

Son definidas en el Art. 6 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (ANEXO 8.2). Las fuentes puntuales incluyen:

- Sectores industriales: químico, petrolero y petroquímico; pinturas y tintas, automotriz, celulosa y papel, acero y hierro, vidrio, generación de energía eléctrica, asbestos, cemento y cal y tratamiento de aguas residuales.
- Fuentes que afecten el equilibrio ecológico de un estado o país adyacente.

2.4.2. Fuentes de Área.

Las fuentes de área representan un porcentaje significativo de las emisiones de contaminantes, por lo que deben siempre incluirse en un inventario de emisiones para asegurar que éste se encuentre completo. Un inventario de fuentes de área generalmente consiste de las siguientes categorías:

- Combustión en fuentes fijas.
- Uso de solventes.
- Almacenamiento y transporte de derivados de petróleo
- Fuentes industriales y comerciales ligeras.
- Fuentes agrícolas.
- Manejo de residuos.

2.4.3. Fuentes Móviles (Vehículos Automotores).

Las fuentes móviles de emisión están constituidas por los vehículos automotores que incluyen:

- Automóviles.
- Camiones.
- Autobuses.

En la mayoría de las áreas urbanas, los vehículos automotores son los principales generadores de las emisiones de COT (carbono orgánico total), CO (monóxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrógeno), SO_x (óxidos de azufre), PM (micro partículas), contaminantes tóxicos del aire y que reducen la visibilidad (SMA, 2008).

Debido a la magnitud de sus emisiones y a las consideraciones especiales requeridas para estimar su volumen, los vehículos automotores se manejan separadamente de otras fuentes de área. Las emisiones de vehículos automotores están integradas por diversos contaminantes que son generados por diferentes procesos.

2.4.4. Fuentes Naturales.

Los fenómenos naturales, la vida animal y vegetal pueden tener un papel importante en la calidad del aire. La contribución de este tipo de fuentes, deben ser consideradas para anexarse en el inventario de acuerdo a la magnitud de su importancia.

- **Emisiones Biogénicas.** Referidas a la vegetación (pastos, cultivos, arbustos, bosques, etc.) ya que emiten cantidades significativas de hidrocarburos a la atmósfera.
- **Emisiones por erosión.** Los vientos arrastran material de superficie o suelos sin cobertura de vegetación y pueden inducir un incremento en la concentración de partículas en grandes extensiones.
- **Emisiones por incendios.** La quema de cultivos, bosques y pastizales genera una gran cantidad de partículas y gases. Si bien pueden ser provocados por el hombre se consideran fuentes emisión naturales.
- **Emisiones volcánicas.** En algunos casos, los volcanes activos presentan constantes emisiones de dióxido de azufre, lo que conlleva a un aumento en la concentración de este contaminante en la atmósfera, pudiendo ocasionar daños a la salud, sin embargo estas emisiones no son incluidas en el inventario de emisiones.

Los volcanes causan distintos tipos de peligros geológicos, incluyendo flujos de lava, flujos piroclásticos, caída de ceniza, etc. La ceniza más fina (diámetro entre 1 y 64 micras) y otros aerosoles de composición

no silícica que se emiten durante o entre erupciones (SO_2 , H_2S , etc.) permanecen en la atmósfera por meses o años y representan una de las mayores fuentes naturales de contaminantes atmosféricos. Un 99% del SO_2 volcánico se emite continuamente y solamente el 1% se emite durante erupciones esporádicas. (Red iberoamericana para el monitoreo y modelización de cenizas y aerosoles volcánicos y su impacto en infraestructuras y calidad del aire).

Aunque las emisiones provenientes de fuentes naturales son escasas y las emisiones son cuantitativamente poco significativas. La importancia de cuantificar estas emisiones, radica en determinar el grado de participación en la formación de otros compuestos más contaminantes y en la calidad del aire.

2.5. CONTAMINACIÓN POR SO_2 .

Las emisiones de contaminantes se han reducido a consecuencia de la implementación de algunos programas ambientales que incluyen la elaboración de inventarios de emisiones donde se registran las tendencias en un periodo de tiempo.

Estos inventarios sirven de registro histórico de los niveles de contaminación del aire, por lo cual es necesario su actualización y validación periódica, tanto de la información básica que se requiere como lo que conlleva los métodos de estimación de las emisiones contaminantes.

El *Inventario de emisiones de contaminantes criterio* del año 2008, publicado en 2010, presenta tendencias de emisión de contaminantes para el periodo

(1990-2008), donde se observa una disminución en la cantidad de contaminantes, principalmente en la emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y en dióxido de azufre (ANEXO 8.3).

2.5.1 Características generales de SO₂.

- El dióxido de azufre se genera de fuentes naturales y actividades antropogénicas, como es la combustión de compuestos ricos en azufre.
- Es hidrosoluble y al hidrolizarse da lugar a compuestos ácidos lo que le confiere sus características potencialmente corrosivas.
- Se asocia a la humedad de las mucosas conjuntival y respiratoria por lo cual constituye un riesgo en la promoción de la irritación e inflamación aguda o crónica de ojos y vías respiratorias.
- Se asocia también con las partículas suspendidas (PST) ya que esta combinación de dióxido de azufre/partículas suspendidas totales (SO₂/PST), en condiciones favorables para su acumulación y permanencia en la atmósfera, han sido responsables del incremento de la morbilidad y la mortalidad en enfermos crónicos del corazón y vías respiratorias.
- Los valores criterio para evaluar la calidad del aire, establecen límites sobre concentraciones de diversos contaminantes, con base

en la protección de la salud de la población y son los parámetros de vigilancia de la calidad del aire ambiental. Establecen la referencia para la formulación de los programas de control y la evaluación de los mismos.

2.5.2. Dióxido de azufre en la ZMVM.

En el Distrito Federal, las fuentes puntuales y móviles son las que contribuyen en mayor proporción a la generación de SO_2 , dado que la zona urbana es la que presenta mayor afluencia vehicular.

Las principales delegaciones del Distrito Federal con emisiones de SO_2 son (Inventario de Contaminantes Criterio, 2008):

- Gustavo A. Madero (120 ton/año).
- Iztapalapa (59 ton/año).
- Azcapotzalco (49 ton/año).
- Iztacalco (41 ton/año).
- Miguel Hidalgo (23 ton/año).
- Benito Juárez (18 ton/año).

En Gustavo A. Madero, las concentraciones altas se deben a la industria del hierro y acero, la cual se encuentra en uno de los principales sectores de generación de SO_2 .

En el Estado de México, las altas emisiones de SO_2 , se atribuyen a la actividad industrial de las zonas que se muestran a continuación en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Municipios del Estado de México y su contribución de SO₂.

Municipio	Emisiones de SO₂ por:
La Paz (45 ton/año) e Ixtapaluca (465 ton/año)	Industria de papel y de madera
Tlalnepantla (622 ton/año) Ecatepec (195 ton/año)	Industria del hierro y acero, de fundición, de fabricación de cemento, textil e industria química.
Naucalpan (283ton/año)	Industria química

Fuente: *Inventario de contaminantes criterio*. SMA, 2008.

Según la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, del total de SO₂ de la ZMVM (6,704 ton/año), las fuentes puntuales participan con mas del 50% del total de contaminación por SO₂ (aproximadamente 3,352 ton/año).

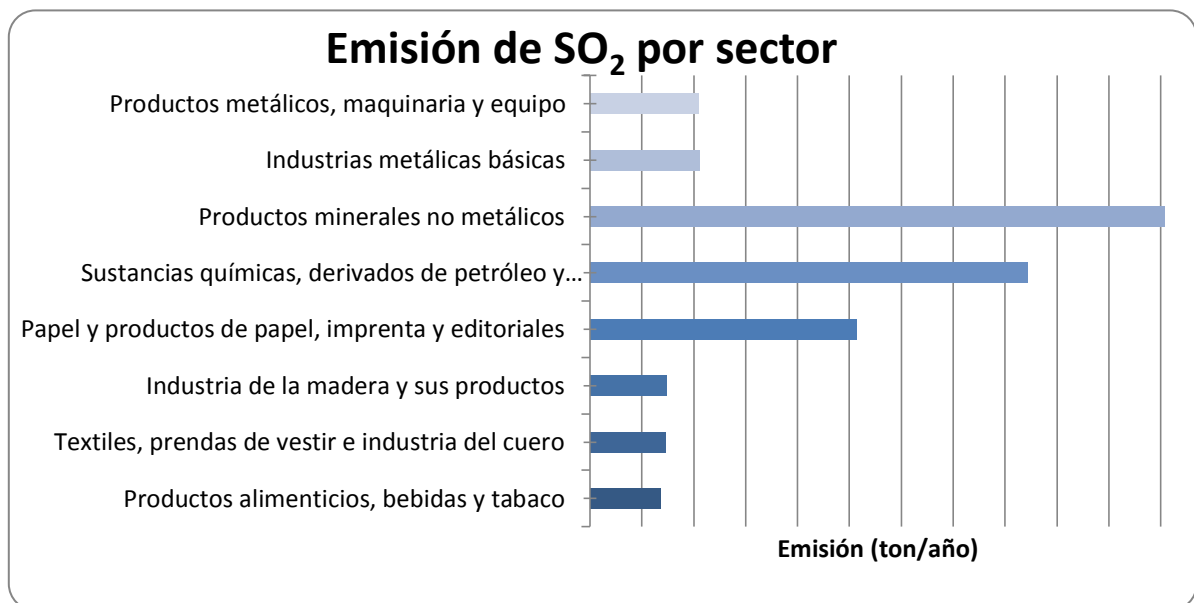
A continuación en la tabla 2.2 se muestra la distribución porcentual por tipo de fuente dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Tabla 2.2. Emisiones de SO₂ por sector en la ZMVM.

2008		
Sector	Emisión de SO ₂ (ton/año)	Emisión %
Fuentes puntuales	3,375	50.34
Fuentes de área	23	0.34
Fuentes móviles	3,306	49.31
TOTAL	6,704	100

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2008

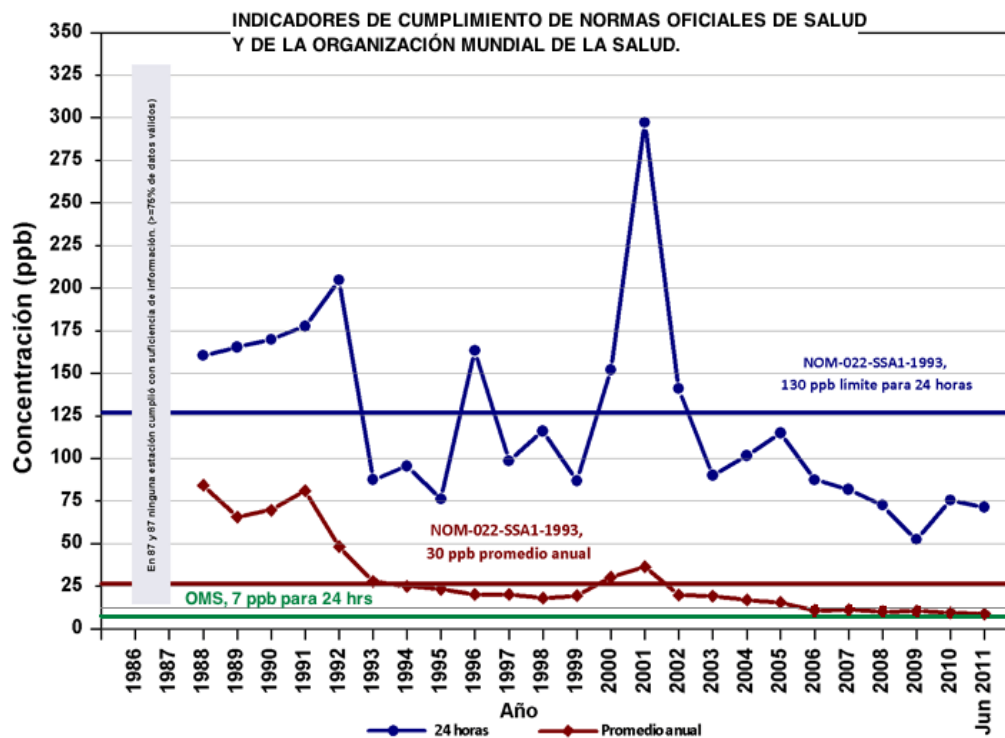
En la gráfica 2.1 se muestran los principales tipos de industria más contribuyen a la emisión de SO₂ en la ZMVM sumando el 50.34% del total de la contaminación por dióxido de azufre.

**Gráfica 2.1. Emisiones de SO₂ por sector industrial.**

Fuente: *Inventario de contaminantes criterio*. SMA, 2008.

Con este panorama de diversas fuentes de emisión de SO_2 dentro y fuera de la Ciudad de México, es importante conocer si influyen las emisiones externas en la calidad del aire o sólo se trata de contaminación local que también debe ser prevenida y controlada para reducir la cantidad de incrementos extraordinarios de contaminantes.

Según la normatividad mexicana, la concentración de dióxido de azufre en la atmósfera no debe rebasar el límite máximo normado de 0.13 ppm o lo que es equivalente a 341 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un lapso de 24 horas una vez al año y 0.03 ppm (79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio anual, para protección a la salud de la población susceptible (Secretaría de Salud, 2010). Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que la concentración óptima de SO_2 en el aire no debe rebasar las 0.007 ppm en un lapso de 24 hrs (Gráfica 2.2).



Gráfica 2.2. Indicadores de cumplimiento de NOM y recomendaciones internacionales.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal y OMS, 2011.

En general, la tendencia de contaminación de SO₂ ha disminuido, sin embargo estos resultados son basados en promedios que se hacen por día, posteriormente por mes y por año, por lo cual no están representadas las emisiones extraordinarias que se han registrados en ciertas horas del día y en un año determinado, es por eso que este estudio se enfoca en la localización de las fuentes de estas emisiones extraordinarias de SO₂.

La reducción de las emisiones de SO₂ se debe principalmente a la disminución en el contenido de azufre en los combustibles y al cambio a combustibles gaseosos y menos contaminantes.

Según el gráfico 2.2, las normas mexicanas no se han rebasado los límites máximos permisibles desde el 2003 (concentración por día y anual), sin embargo, la recomendación de la Organización Mundial de la Salud de 0.007 ppm en 24hrs si es rebasada.

2.6. ESTADO DE HIDALGO.

En el estado de Hidalgo, al noreste de la ZMVM, se encuentran gran cantidad de parques industriales. En el mapa de la ilustración 2.4 y tabla 2.3 se enumeran los principales complejos industriales, la importancia que se le da al complejo de Tula es por la cercanía con la ZMVM y la cantidad de SO₂ que emite a la atmósfera.

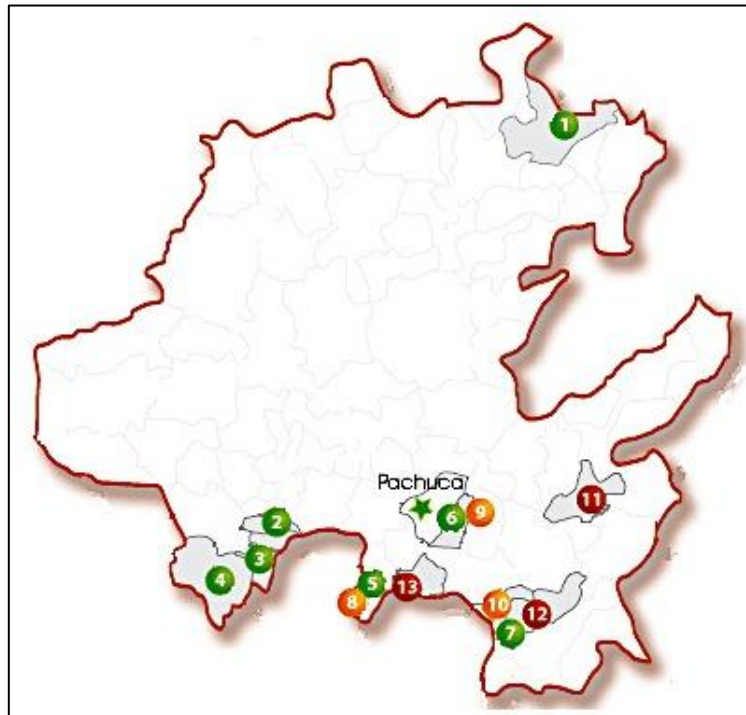


Ilustración 2.3. Mapa del Estado de Hidalgo con las principales zonas industriales.

Fuente: Corporación de Fomento de Infraestructura Industrial, 2011.

Tabla 2.3. Listado de zonas industriales en Hidalgo.

PARQUES INDUSTRIALES DEL ESTADO DE HIDALGO	
1	Parque Industrial Huejutla
2	Parque Industrial Atitalaquia
3	Parque Industrial Tula
4	Parque Industrial Tepeji del Río
5	Parque Industrial Tizayuca

Continuación Tabla 2.3. Listado de zonas industriales en Hidalgo

6	Parque Industrial La Reforma
7	Parque Industrial Sahagún
8	Parque Logístico Tizayuca*
9	Parque Industrial Metropolitano*
10	Parque industrial Tlanalapa*
11	Parque industrial Tulancingo**
12	Parque Industrial Tepeapulco**
13	Parque Industrial Villa de Tezontepec**

* Parques industriales en desarrollo

** Parques industriales en prospecto

Fuente: Corporación de Fomento de Infraestructura Industrial, 2011.

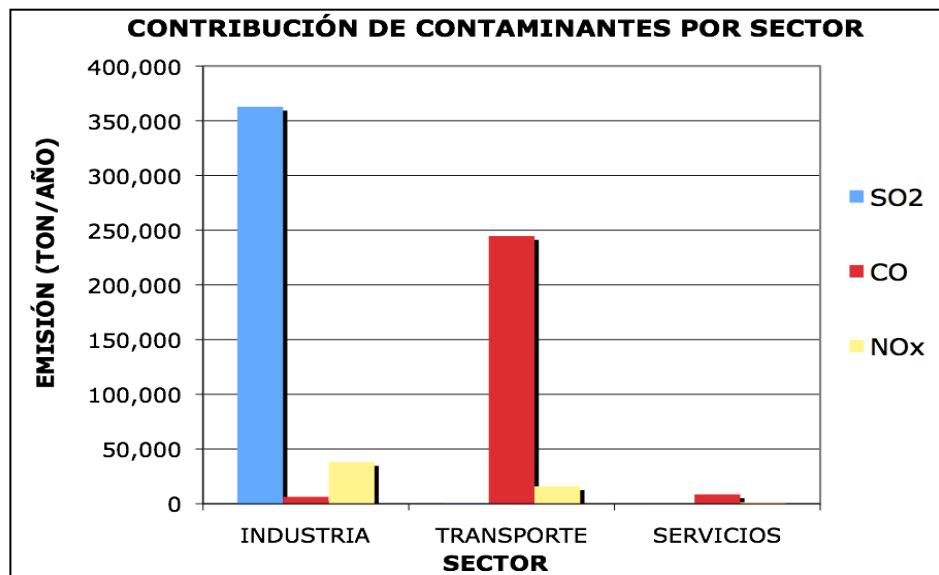
Como ya se sabe, en esta región del país se encuentra Tula, uno de los complejos industriales de más importancia, en este se emiten aproximadamente 323,000 toneladas de dióxido de azufre por año (10.2 Kg/s), las industrias con mayor emisión son la refinería Miguel Hidalgo y la planta de energía Francisco Pérez Ríos (SEMARNAT, 2002). Según el Instituto Mexicano del Petróleo estas dos industrias contribuyen con el 90% del SO₂ y el 80% del NO_x totales del Estado de Hidalgo (IMP, 2006).

La refinería M. Hidalgo procesa 296,000 barriles al día de petróleo crudo, representando el 20% del total de la capacidad de refinación en el país. Sus productos finales son la gasolina, turbosina, keroseno y subproductos de combustible. Además de las mencionadas, en esta zona se encuentran

industrias del cemento, textil y confección, alimentos procesados y electrónicos.

De acuerdo con el *Compendio de datos estadísticos ambientales* del año 2009, el 99% de las emisiones en Hidalgo son correspondientes a fuentes fijas, en este caso corresponden a las industrias en el estado.

En la gráfica 2.3 se muestran las cantidades emitidas de cada contaminante en el Edo. de Hidalgo.



Gráfica 2.3. Contribución de cada sector de contaminación de SO₂, CO y NO_x en Hidalgo.

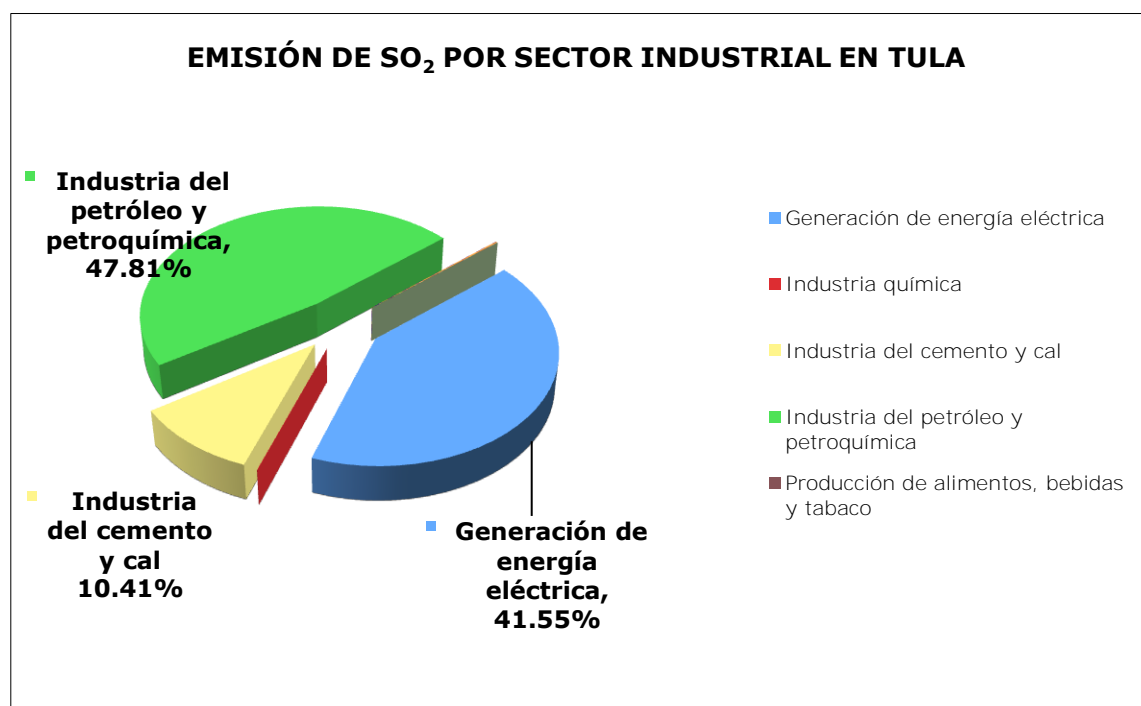
Fuente: *Compendio de datos estadísticos ambientales*, 2009.

Según el estudio hecho para el inventario de emisiones del estado de Hidalgo en el año 2002, por el consejo estatal de ecología, la mayoría de las emisiones de SO₂ son hechas por la industria petroquímica y de generación de energía como se muestra en la tabla 2.4 y gráfica 2.4.

Tabla 2.4. Emisión de SO₂ por sector industrial en Tula, Hidalgo.

SECTOR	EMISIÓN SO ₂ (TON/AÑO)	% EMISIÓN
Generación de energía eléctrica	150,700.67 (4.8 Kg./s)	41.54
Industria química	116.22 (0.004 Kg./s)	0.03
Industria del cemento y cal	37,771.96 (1.2 Kg./s)	10.41
Industria del petróleo y petroquímica	173,428.14 (5.5 Kg./s)	47.81
Producción de textiles, prendas de vestir e industria del cuero	604.44 (0.02 Kg./s)	0.17
Producción de alimentos, bebidas y tabaco	63.5	0.02
Producción de sustancias químicas y artículos de plástico o hules	44.42	0.01
TOTAL	362,756.83	100

Fuente: Inventario de emisiones del Edo. de Hidalgo, 2002

**Gráfica 2.4. Sectores con mayor emisión de SO₂ en Tula, Hidalgo.**

Fuente: Inventario de emisiones del Edo. de Hidalgo, 2002

Un estudio hecho por la SEMARNAT y el Instituto Nacional de Ecología (INE) en 2008, con el propósito de realizar un monitoreo continuo y simultáneo de la calidad del aire y meteorología en la región Tula-Tepeji-Zumpango, así como la determinación de las vías del transporte de contaminantes de la zona industrial de Tula hacia la Zona Metropolitana de Valle de México (ZMVM), encontró que el problema de la calidad del aire en el estado es de extensión regional, es decir, afecta no sólo al municipio de Tula de Allende, sino que involucra a otras poblaciones de los estados de Hidalgo y del Valle de México (INE, 2008).

2.7. VOLCÁN POPOCATÉPETL.

La ubicación geográfica del volcán Popocatépetl es de 19° 01' latitud norte y 98° 37' longitud oeste, con una altitud que alcanza los 5,426 metros sobre el nivel del mar. La localización del volcán con respecto a la Ciudad de México se muestra en la ilustración 2.4.

Considerar la actividad volcánica como una fuente de contaminación natural permitirá conocer a mediano plazo su implicación como factor de riesgo en diversas enfermedades de la población. En cuanto a una posible erupción, el riesgo del volcán Popocatépetl es bajo, ya que no se trata de un volcán activo, sin embargo su constante exhalación de gases y cenizas puede condicionar la calidad del aire de la población.

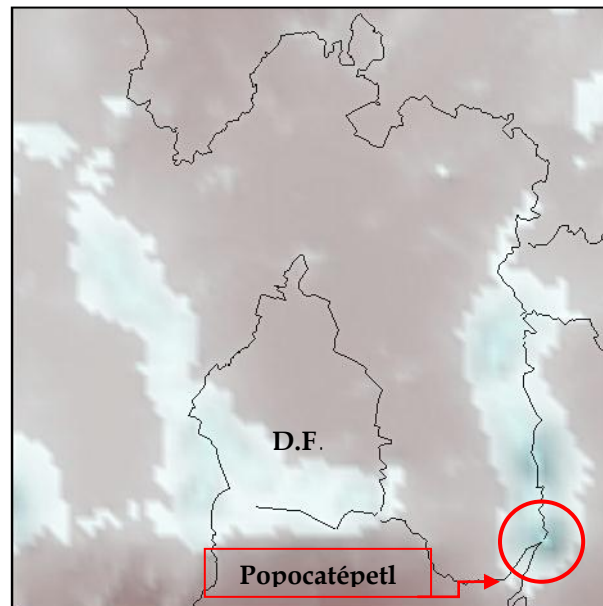


Ilustración 2.4. Localización del volcán Popocatépetl.

En el periodo de febrero a diciembre de 1994, el Popocatépetl emitió 24,261 toneladas de dióxido de azufre, representando una importante fuente natural de contaminación. Durante la última semana de diciembre de ese mismo año, el Popocatépetl inició una nueva etapa de actividad, expulsando cenizas y óxidos de azufre, en ese entonces se realizaron pruebas a personas expuestas de uno a cinco días a las emisiones del volcán donde la mayoría experimento ardor y resequedad en la garganta, tos, disnea, entre otras.

El Popocatépetl emite SO_2 continuamente sin una visible erupción y durante la campaña MILAGRO (Megacity Initiative: Local and Global Research Observations) en 2006, se estimaron flujos de emisiones de SO_2 provenientes del volcán, teniendo un promedio diario dentro del intervalo de 7 a 50 kg/s con un instrumento DOAS localizado en el norte del volcán

(Gutter, 2008). Estos valores son similares a las mediciones hechas en Abril del 2003, con 10 kg/s de emisión de SO₂ (De Foy, et al. 2009)

Aunque las emisiones provenientes de fuentes naturales son intermitentes y están consideradas como poco significativas. La importancia de cuantificar estas emisiones, radica en determinar el grado de participación en la formación de otros compuestos más contaminantes como es el caso del ozono.

2.8. MEDICIÓN EN EL VOLCÁN.

El monitoreo volcánico llevado a cabo por la CENAPRED en conjunto con la UNAM, es realizado por dos metodologías que son:

1. Espectrómetro de Correlación (COSPEC)
2. Espectroscopia de Absorción Óptica Diferencial

Estas se describen en términos generales a continuación.

2.8.1. Espectrómetro de Correlación (COSPEC).

A partir del año 1994, las emisiones del SO_2 del Popocatépetl se cuantifican usando COSPEC dos veces por semana a dos veces por mes, por lo que se tiene una baja frecuencia de muestreo con esta instrumentación (CENAPRED, 2010).

El COSPEC utiliza a la radiación ultravioleta dispersada por la atmósfera como fuente de radiación. El instrumento es instalado en una plataforma móvil y la pluma volcánica es atravesada horizontalmente, donde se obtiene una concentración total en la sección transversal de la pluma (Ilustración. 2.6).

Esta metodología de medición tiene ventajas como instrumento para la vigilancia volcánica, debido a que este dispositivo funciona con luz dispersa y las mediciones son posibles incluso en condiciones nubladas.

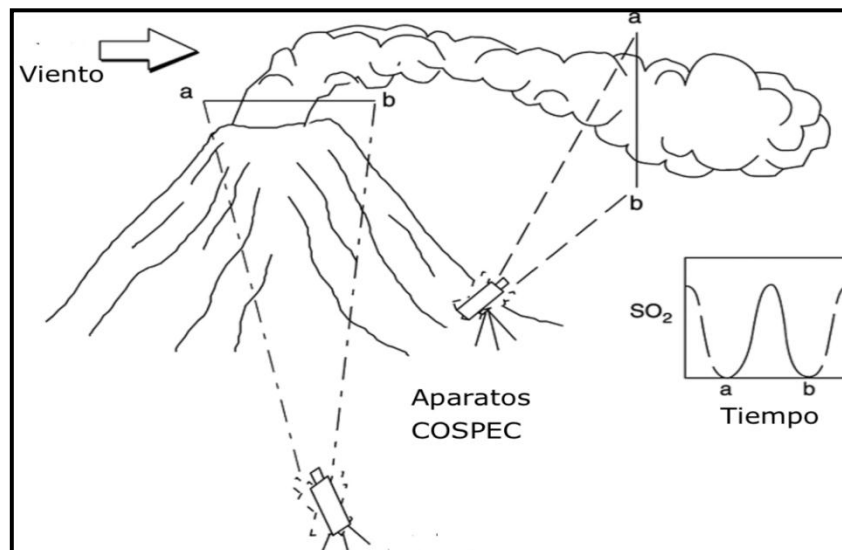


Ilustración 2.5. Metodología de medición de COSPEC.

Fuente: Fischer, et al, 2002. *Open and almost shut case for explosive eruptions: Vent processes determined by SO_2 emission rates at Karymsky volcano, Kamchatka.*

2.8.2. Espectroscopia de Absorción Óptica Diferencial (DOAS).

En general, DOAS (por sus siglas en inglés) funciona midiendo la intensidad de la luz radiante del sol. La medición de la diferencia de la luz fuera de la pluma de gas emitido y dentro de esta, sirve para determinar la absorción de la radiación. Esta diferencia proporciona una concentración que posteriormente se utiliza para calcular el flujo de gases.

El mini-DOAS trabaja midiendo la intensidad de la luz radiante proveniente del sol (UV). Cuando las partículas como son las de agua de las nubes o dióxido de azufre interfieren con la luz solar, el mini-DOAS detecta menos luz. La reducción en la cantidad de luz depende de la concentración de dichas partículas en la atmósfera. Entonces entre menos intensidad de luz, mas es la cantidad de partículas (Ilustración. 2.7).

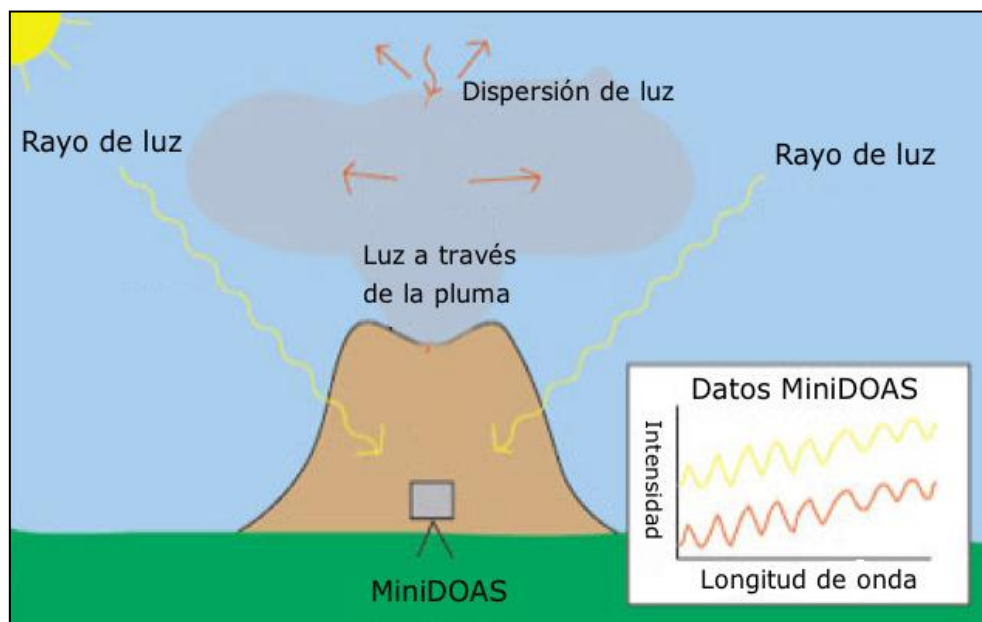


Ilustración 2.6. Fundamento de mini-DOAS.

Fuente: Scripps Institution of Oceanography. *Volcano expedition to the Mariana Islands*, 2011.

En el Popocatépetl se han instalado 3 instrumentos mini-DOAS (Ilustración 2.7):

- Tlamacas: situado a 4 Km. al norte del cráter del volcán. Fue instalado en Julio del 2005. Coordenadas: $19^{\circ} 03' 58.68''$ Norte, $98^{\circ} 37' 40.08''$ Oeste.
- Chipiquixtle: instalados en el periodo de Marzo a Junio de 2007 . Coordenadas: $19^{\circ} 0'31.68''$ N , $98^{\circ}39'23.76''$ Oeste.
- Colibrí: al igual que el instrumento Chipiquixtle fue instalado en el mismo periodo. Coordenadas: $18^{\circ}59'13.20''$ N, $98^{\circ}33'25.92''$ O.

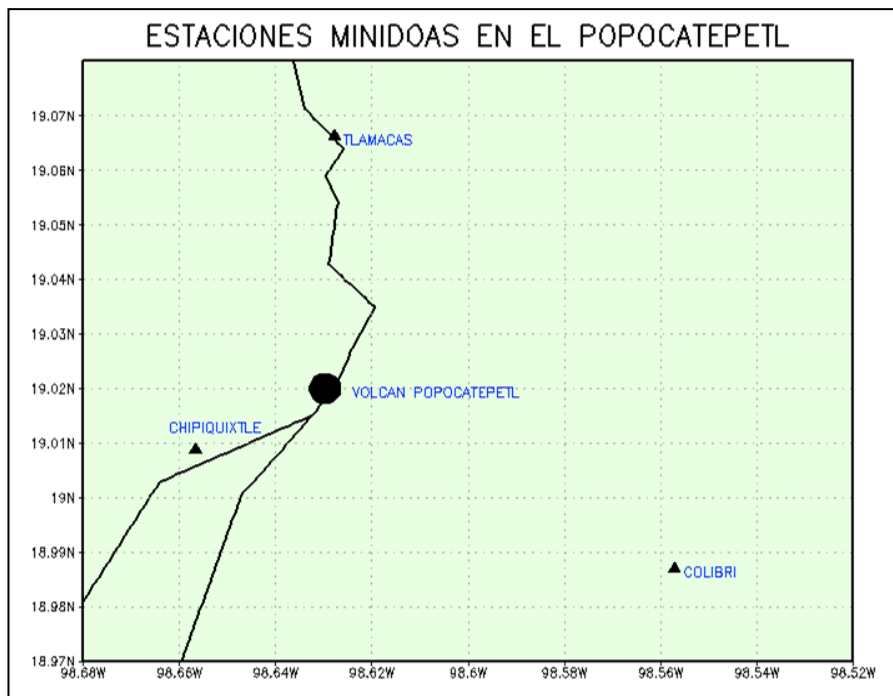


Ilustración 2.7. Localización de estaciones de medición con mini-DOAS.

2.9. MARCO NORMATIVO RESPECTO AL SO₂.

La Secretaría de Salud y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), aplican las NOM (Normas Oficiales Mexicanas) y NMX (Normas Mexicanas) correspondientes a los límites máximos permisibles de concentración de SO₂ y la emisión de contaminantes atmosféricos (fuentes fijas y fuentes móviles) y otras normas que regulan la medición de los contaminantes.

Para fines de este trabajo, nos enfocamos en la normatividad correspondiente al dióxido de azufre, que se enlista a continuación en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Normatividad aplicable a la contaminación atmosférica por SO₂.

SECRETARÍA CORRESPONDIENTE	CLAVE DE LA NORMA	NOMBRE COMPLETO DE NORMA
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)	NOM-038-SEMARNAT-1993	Métodos de medición para determinar la concentración de dióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)	NOM-039-SEMARNAT-1993	Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de dióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico, en plantas productoras de ácido sulfúrico.

Tabla 2.5. Continuación

SECRETARÍA CORRESPONDIENTE	CLAVE DE LA NORMA	NOMBRE COMPLETO DE NORMA
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)	NOM-046-SEMARNAT-1993	Niveles máximos permisibles de SO ₂ , neblinas de SO ₃ y H ₂ SO ₄ , provenientes de la producción de ácido dodecilbencensulfónico en fuentes fijas.
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)	NOM-085-SEMARNAT-1994	Fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones. Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, PST, SO ₂ y NO _x . Requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como niveles de emisión de dióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo.
Secretaría de Salud (SSA)	NOM-022-SSA1-1993	Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al dióxido de azufre. Valor normado para la concentración de SO ₂ en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.
Organización Mundial de la Salud	WHO Air quality guideline values, 2005	Concentración de SO ₂ recomendada por OMS: 24 horas: 0.007 ppm 10 min: 0.190 ppm

Fuente: Secretaría de Salud y SEMARNAT, 2011 y Organización Mundial de la Salud, 2005.

CAPÍTULO 3 . METODOLOGÍA.

Para identificar oportunamente los riesgos ambientales para los ecosistemas y la salud de la población es necesario conocer las rutas de acceso de los agentes contaminantes, la climatología de la región y, en cada caso, la velocidad de su traslado, acumulación y degradación, especialmente de los contaminantes que causan efectos dañinos a la salud.

La zona industrial de Tula, al norte de la ciudad, como ya se dijo, tiene emisiones considerables de SO₂ al igual que las emisiones intermitentes del volcán Popocatepetl, al sur.

En este trabajo se presenta la determinación de la posible fuente de emisión de SO₂ para los episodios identificados de emisiones extraordinarias a partir de la modelación del pronóstico de calidad del aire y de meteorología en la ZMVM. Para la realización de esta investigación se requieren los datos históricos de las emisiones de SO₂ en la Ciudad de México, los cuales se encuentran en la base de datos de la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, las bases de datos de NARR (North American Regional Reanalysis) disponible en la página web de NCAR (National Center For Atmospheric Research). En la ilustración 3.1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología llevada a cabo en este estudio.

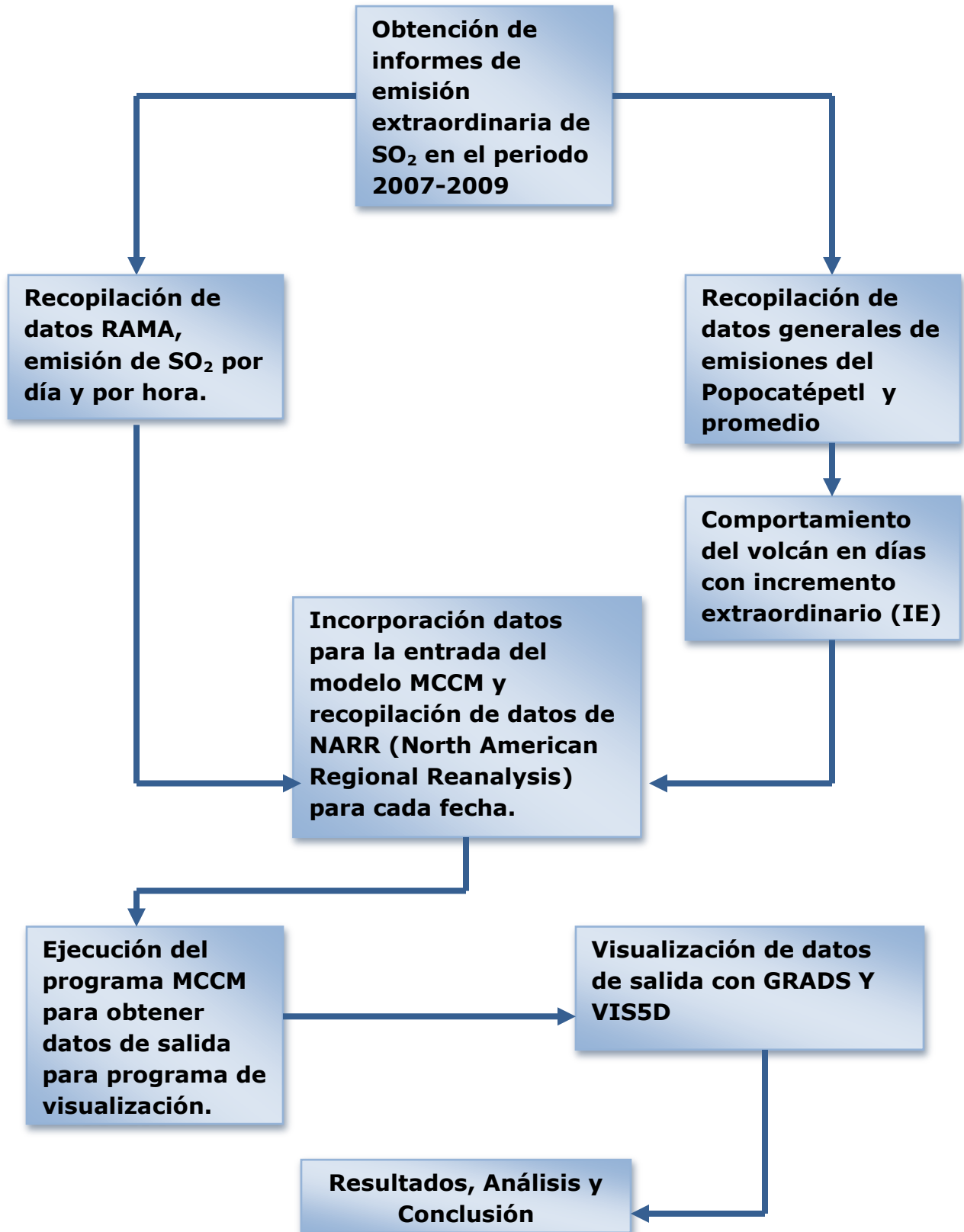


Ilustración 3.1. Diagrama de la metodología general.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO MCCM.

La complejidad de procesos no lineales involucrados en la fotoquímica de los contaminantes hace necesario el uso de un modelo acoplado, que lleve a cabo la predicción del clima regional y aplicación en tiempo real a la predicción regional y urbana de la calidad del aire (García, 2003).

Para esto se utiliza el modelo Multiscale Climate Chemistry Model (MCCM), desarrollado por el Instituto Fraunhofer en Alemania (ANEXO 8.5), es un modelo que cumple con las siguientes características:

- Acoplamiento de procesos meteorológicos y químicos
- Incluye química de fase gaseosa, deposición, emisiones antropogénicas y biogénicas
- Incorpora descripción de procesos de precipitación y nubes
- Incluye advección e intercambio turbulento.

El MCCM se basa en el modelo a mesoescala de quinta generación **MM5**, que tiene la capacidad de: anidamiento múltiple, asimilación de datos en cuatro dimensiones, dinámica no hidrostática, modelación de procesos microfísicas y posee dos mecanismos detallados de fase gaseosa -RADM2 y RACM- con 39 y 47 especies químicas respectivamente.

Este modelo también lleva a cabo el cálculo simultáneo de los cambios meteorológicos y químicos en el dominio del modelo y genera las distribuciones tridimensionales dependientes del tiempo de las principales especies orgánicas e inorgánicas relevantes a la formación de oxidantes y las emisiones biogénicas son calculadas con base a datos regionales como son uso de suelo, temperatura superficial y radiación.

3.1.1. Módulos de MCCM.

- TERRAIN genera los datos de elevación de terreno, uso de suelo y vegetación distribuido en la malla de estudio.

- REGRID hace análisis meteorológicos, este tiene dos componentes:
 - Pregrid: genera varios archivos con datos meteorológicos tridimensionales, que incluyen la temperatura superficial del mar (SST) y nieve, crea un archivo para cada intervalo de tiempo dentro del análisis, esta parte del MCCM lee los datos de NARR con las fechas asignadas y los procesa para que Regridder los lea.
 - Regridder: lee los archivos de salida del Pregrid y TERRAIN con lo cuál genera los archivos con los datos meteorológicos para el área de interés.

- RAWINS/LITTLE_R asimila datos de mediciones para las condiciones iniciales y de frontera.

- INTERPF interpola los datos en la vertical, pasa la información de coordenadas de presión a coordenadas sigma (terreno), obtiene las condiciones iniciales meteorológicas y las condiciones de frontera dependientes del tiempo para ser empleadas por MCCM.

- INTCHEM suministra una distribución inicial para todas las especies químicas (valores de concentración en capa límite, troposfera libre y

troposfera superior).

- EMISSIONS muestra siempre las emisiones horarias para la especie RADM2 (y emisiones de PM₁₀) en formato MM5 v3.
- MCCM es la parte del sistema de modelación que realiza la predicción meteorológica (advección, intercambio turbulento, emisiones antropogénicas y biogénicas, deposición y transformaciones químicas), transporte de contaminantes y transformación química (mecanismo RADM2 o RACM).
- NESTDOWN se emplea para realizar modelaciones en dominios de resolución mayor a partir de resultados de modelaciones previas.

El modelo químico y climático de multiescala MCCM (ANEXO 8.6), es un sistema de modelación con el que es posible simular la evolución de las concentraciones de ozono y otros compuestos durante el día. Permite obtener una descripción de los perfiles de concentración de diferentes contaminantes (INE, 2009).

3.2. CASO DE ESTUDIO: INCREMENTOS EXTRAORDINARIOS DE CONCENTRACIÓN DE SO₂ EN EL PERIODO 2007-2009.

La información sobre el incremento extraordinario en la concentración de SO₂ en el aire se da a conocer mediante un aviso emitido por la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, este aviso incluye la fecha y hora en la estación de monitoreo donde fue registrado así como la concentración del contaminante en partes por millón (ANEXO 8.4).

La recopilación de los avisos de incremento extraordinario de SO₂ en el periodo dicho se resume en la tabla 3.1. En las fechas de estudio las concentraciones de SO₂ rebasan la norma NOM-022-SSA1-1993, en algunos casos, hasta se encuentra en el doble de la concentración normada de 0.13 ppm, lo que implica un posible episodio de afecciones a la salud de la población. La recomendación de la OMS es 0.190ppm en 10 min, sí en los periodos de IE se tienen valores promedio de una hora entonces basándose en la recomendación de la OMS, este tipo de concentraciones podrían tener consecuencias en la salud de la población expuesta.

Tabla 3.1. Recopilación de avisos de incrementos extraordinarios de SO₂ en 2007-2009.

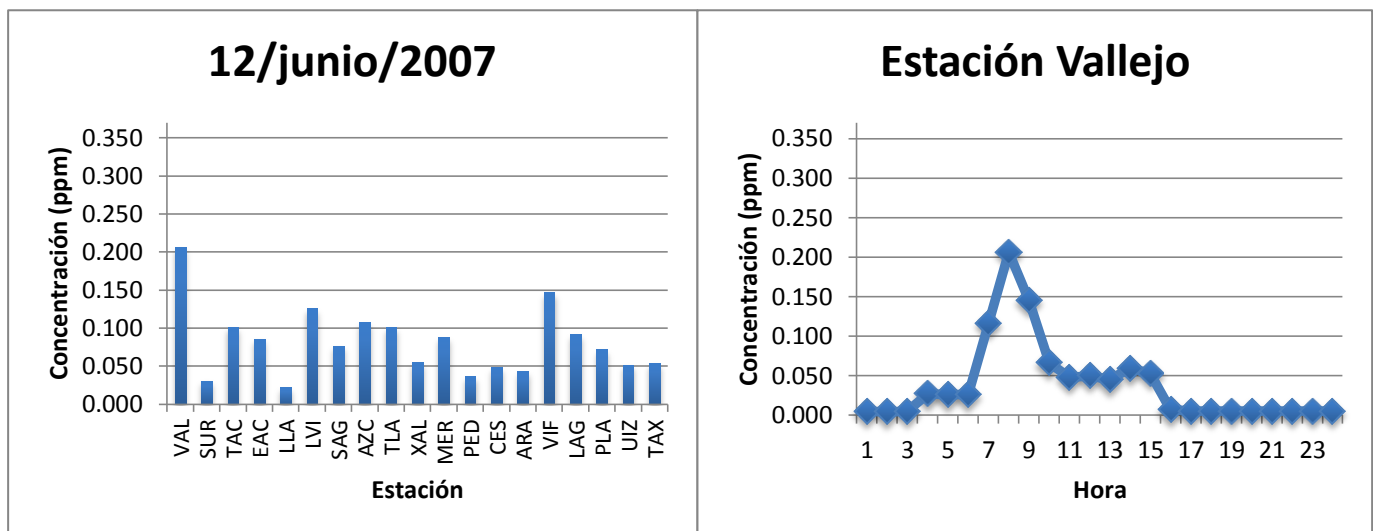
INCREMENTOS EXTRAORDINARIOS DE SO₂					
Día	Año	Hora	Zona	Estación	Concentración (ppm)
12 de Junio	2007	09:00	Noroeste	Vallejo	0.206
31 de Octubre		02:00	Noreste	Los Laureles	0.225
13 de noviembre		04:00	Noreste	Villa de las flores	0.252
15 de enero	2008	00:00	Noroeste	Tultitlán	0.204
27 de enero		05:00	Noreste	Villa de las flores	0.207
28 de Febrero		03:00	Noreste	La Villa	0.236
			Noroeste	Tlalnepantla	0.226
			Noroeste	Tultitlán	0.293
12 de enero	00:00	Noroeste	Tultitlán	0.207	
		Noreste	Villa de las flores	0.219	
04 de Febrero	2009	05:00	Noroeste	Tultitlán	0.206
07 de Febrero		01:00	Noreste	Villa de las flores	0.201
24 de Febrero		02:00	Noreste	Los Laureles	0.340

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

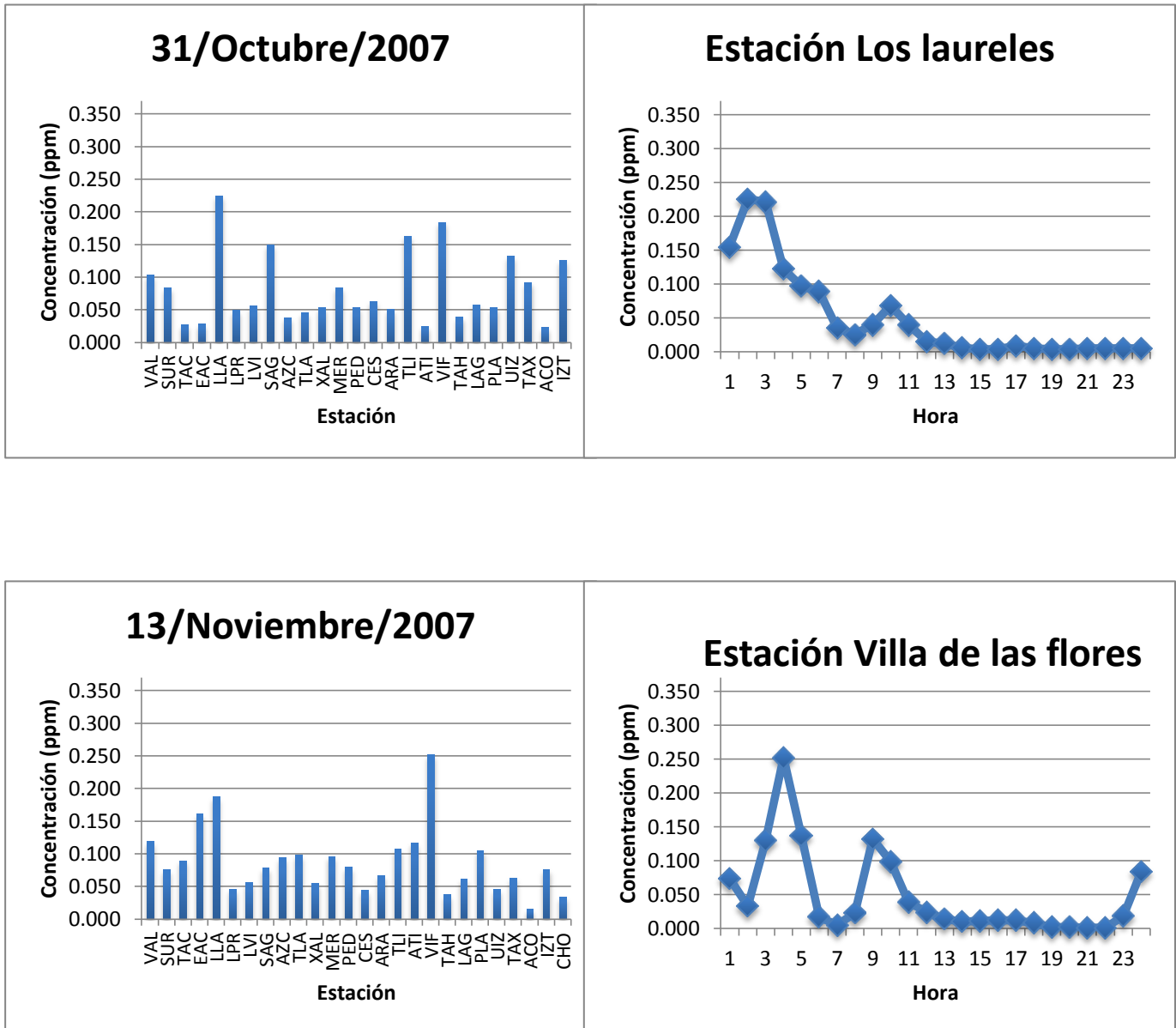
3.3. RECOPIACIÓN DE DATOS DE RAMA.

La Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA), proporciona la base de datos de las estaciones de monitoreo en la ZMVM a través de su sitio de internet.

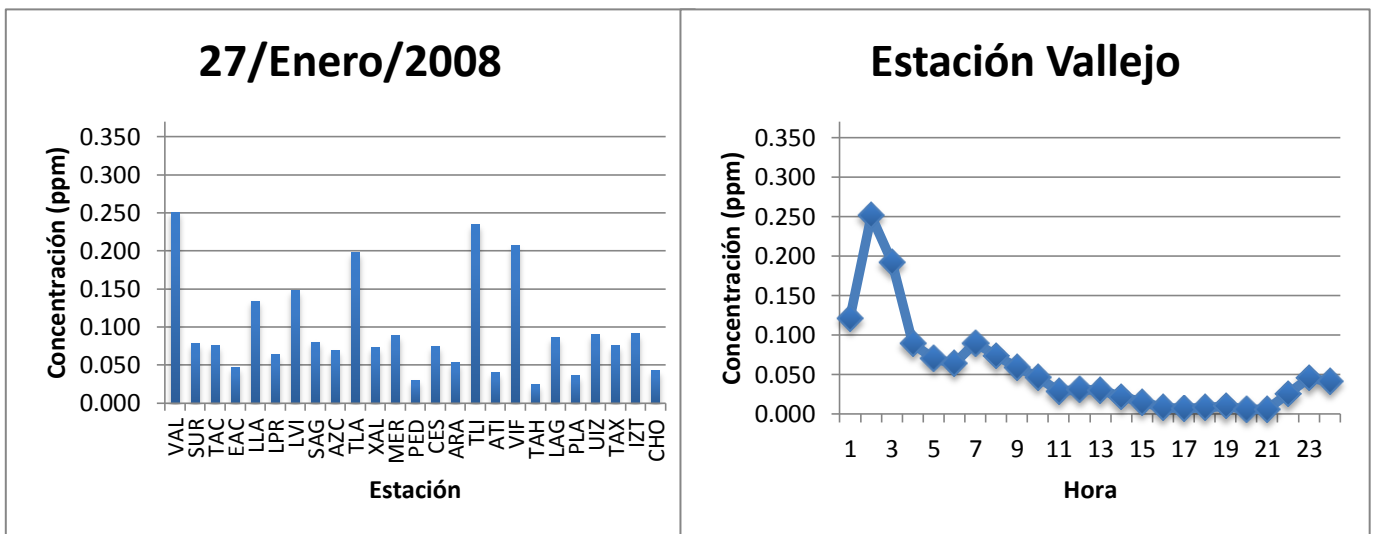
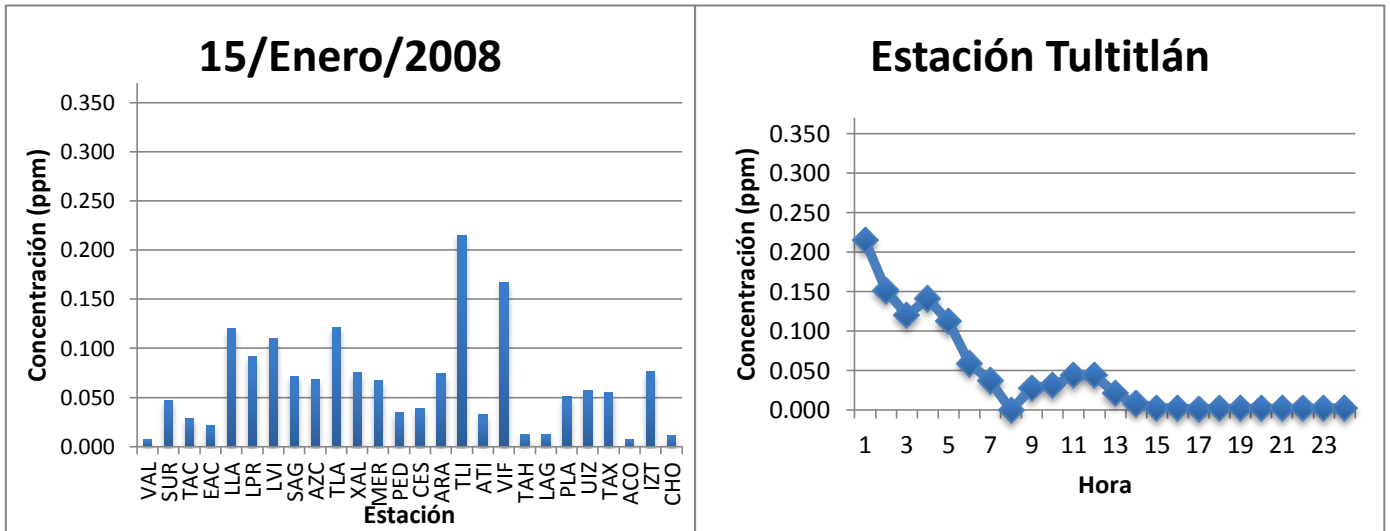
Para la finalidad de este trabajo se toman los datos correspondientes a los años 2007-2009, se realizan las gráficas correspondientes a las fechas señaladas con incrementos extraordinarios en la concentración de SO_2 (Gráficas 3.1).



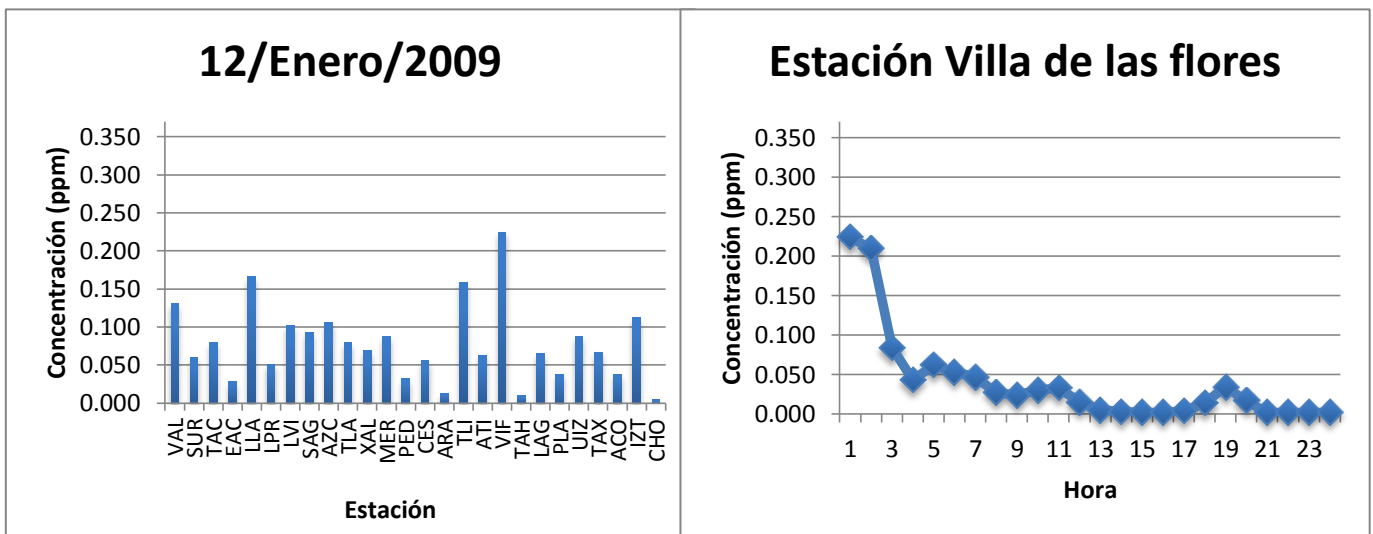
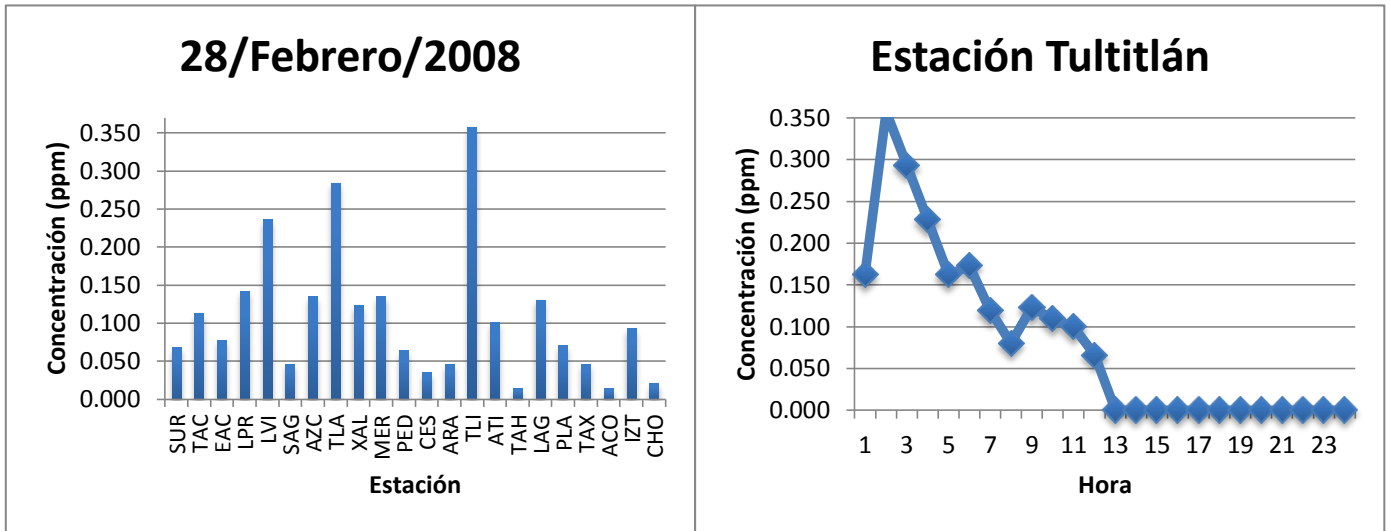
Gráfica 3.1. a) Máxima concentración registrada por estación y por hora para el 12/06/2007.



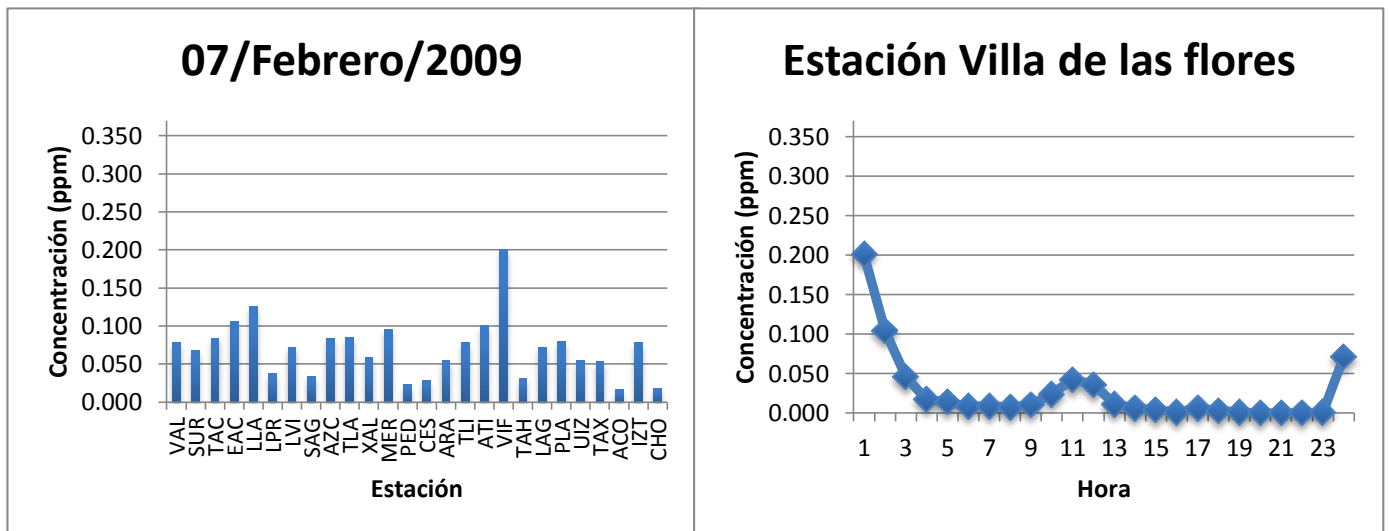
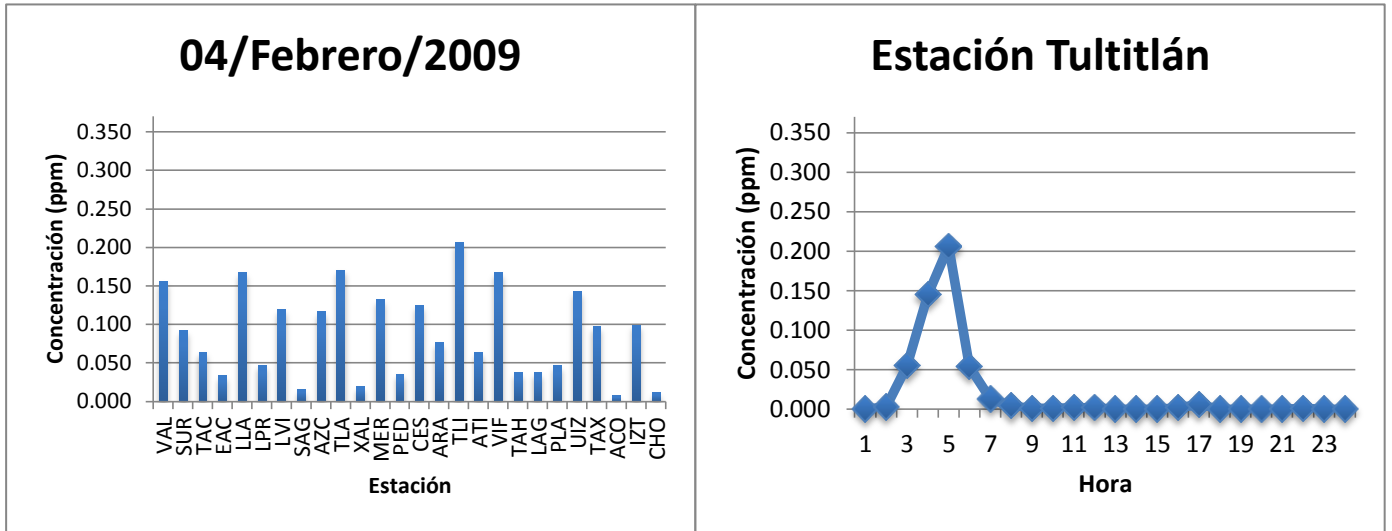
Gráfica 3.1. b) Máxima concentración registrada por estación y hora para el 31 de octubre y 13 de noviembre del 2007.



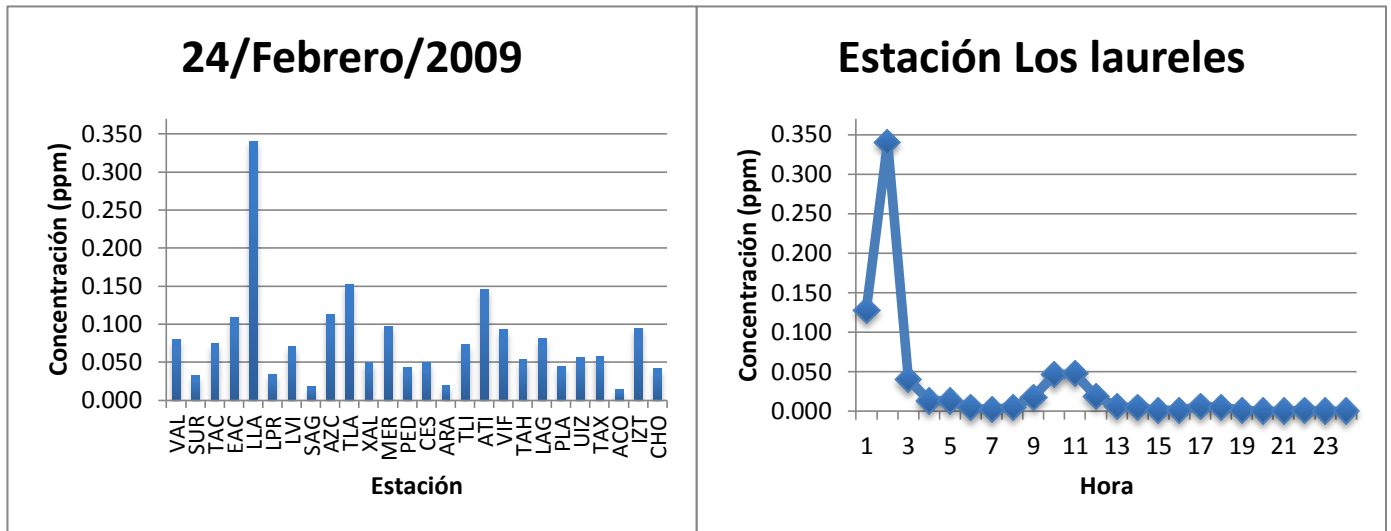
Gráfica 3.1. c) Máxima concentración registrada por estación y por hora para el 15 y 27 de enero del 2008.



Gráfica 3.1. d) Máxima concentración registrada por estación y por hora para el 28/Feb/2008 y 12/Enero/2009.



Gráfica 3.1. e) Máxima concentración registrada por estación y por hora para el 4 y 7 de febrero del 2009.



Gráfica 3.1. f) Máxima concentración registrada por estación y por hora para el 24/Feb/2009.

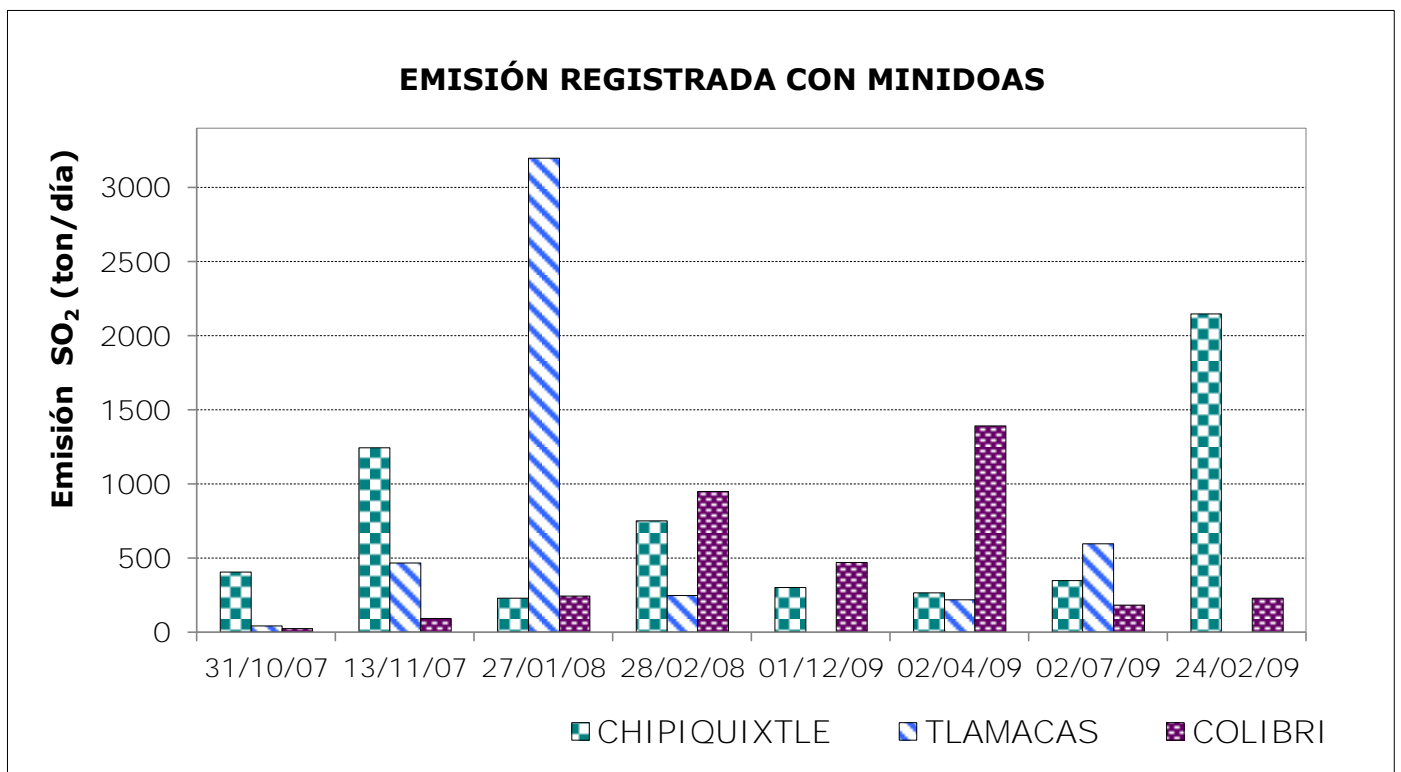
Como se puede observar en la recopilación de los datos, hay una tendencia a mayor concentración de SO_2 en la primera mitad del año, siendo los meses de enero y febrero con más frecuencia de incrementos extraordinarios en concentración de SO_2 .

3.4. COMPORTAMIENTO DEL VOLCÁN EN DÍAS CON IE.

El Popocatépetl emite SO_2 , por esto es importante el monitoreo de los gases emitidos para determinar los cambios en la actividad eruptiva así como la influencia en la calidad del aire.

Las emisiones volcánicas de SO_2 han tenido una alta variabilidad a través del tiempo. El valor máximo se midió el 13 de diciembre de 2000 y fue de $1961.6 \pm 222.5 \text{ Kg. /s}$ (Aparicio, 2010). El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) en conjunto con la UNAM se encargan del monitoreo de gases en el Popocatepetl mediante la generación de datos con los instrumentos COSPEC y miniDOAS y posteriormente se obtienen los datos de flujo de SO_2 (CENAPRED, 2011).

Para los días con incremento extraordinario en el periodo de 2007-2009, se solicitaron las mediciones de los instrumentos COSPEC y miniDOAS (ANEXO 8.7) instalados en el volcán, los datos fueron proporcionados por Dr. Hugo Delgado Granados (Instituto de Geofísica, UNAM). En la gráfica 3.2 se muestran los datos ya promediados por fecha.



Gráfica 3.2. Emisión de SO_2 por el volcán en días con IE registrados en la ZMVM.

Fuente: Instituto de Geofísica UNAM, 2010.

Para los registros en el volcán con el método COSPEC se tienen los siguientes datos en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Datos de COSPEC para emisión del volcán en días con IE de SO₂.

Fecha	Año	COSPEC	Observaciones
13 Noviembre	2007	5167 Ton/día	La dirección de los vientos en la fecha especificada, indica que se llevaría gas a la zona de Juchitepec/Milpa Alta
15 Enero	2008	5193 ton/día	La dirección de los vientos en la fecha especificada, indica que se llevaría gas a la zona de Chalco/ Tláhuac

En los demás días registrados con IE, no hay una medición en el volcán correspondiente en el instrumento COSPEC.

3.5. EJECUCIÓN DEL MODELO.

Con esta recopilación de datos se procede a incorporarlos en el modelo para que al ejecutarlo se obtenga el pronóstico de 48 horas. de la concentración de SO₂ en la ZMVM.

De modo que se tiene dos modelaciones por evento extraordinario, el primero sin incluir las emisiones del volcán y el segundo conteniendo las emisiones del volcán.

La visualización de datos de concentración, meteorológicos de la región y las trayectorias del contaminante se realizaron en 2 dimensiones (GRADs) y en 3 dimensiones (Vis5D).

Los datos para incluir la emisión del volcán al modelo fueron tomados de un estudio previo, se realizó tanto el promedio diario como el anual presentado en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Promedio de emisión del volcán del año 2006 incluida al modelo MCCM.

Flujo de SO ₂ (ton/día)	Promedio de emisiones diario
2027	2,403.14286 ton/día
1510	
3172	
3027	
1670	
3223	
3265	
3667	
	Promedio de emisiones al año
2459	877,147.1429 ton/año
2298	
2056	
2127	
1504	
1639	

Fuente: Basaldud et. al, 2007.

CAPÍTULO 4 . RESULTADOS.

En cuanto a la determinación del desempeño del modelo MCCM para describir las concentraciones ambientales en el área de estudio e identificar la influencia de las emisiones del volcán con los datos obtenidos se llevó a cabo un análisis estadístico en el cual se incluye el índice de concordancia (Willmot et al. 1981).

Por lo que se refiera a visualización de los resultados del modelo se realizó empleado los programas en tres y dos dimensiones (VIS5D y GRADs respectivamente) con el fin de observar la distribución de las emisiones y contaminantes en la región de estudio.

4.1. ÍNDICE DE CONCORDANCIA.

El índice de concordancia proporciona un valor de 0 a 1 y este revela que tan cercano esta el modelo de la realidad, es decir, que tan preciso es el pronóstico hecho por modelación. Entre más se acerque al valor de 1, el pronóstico es mejor.

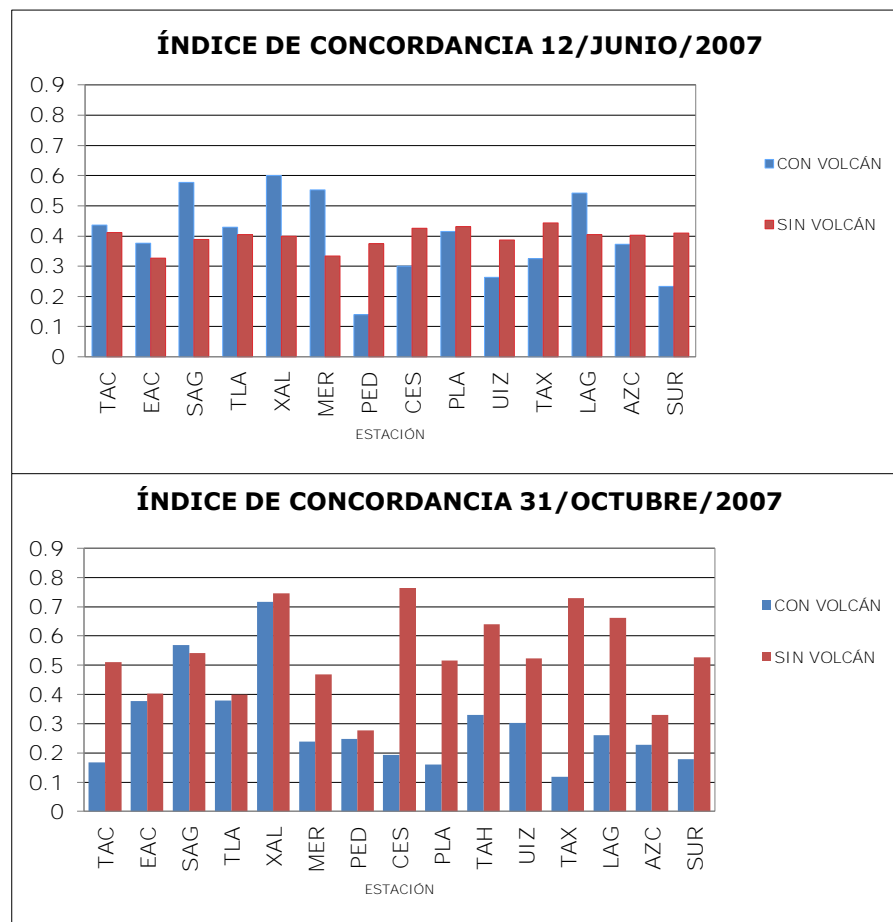
$$I = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|p_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2}$$

En la ecuación anterior, p_i es el valor predicho, o_i es el valor observado al tiempo i , \bar{o} es el valor promedio observado y n es el número de mediciones por estación. Este índice compara la desviación de las predicciones del valor

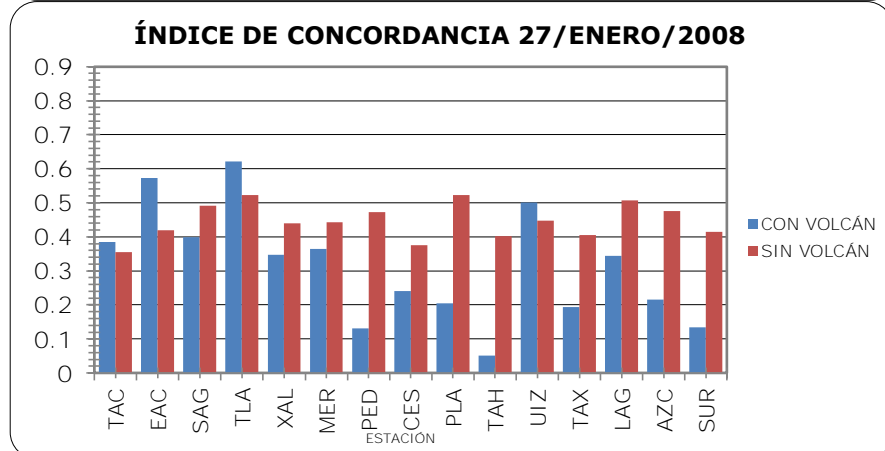
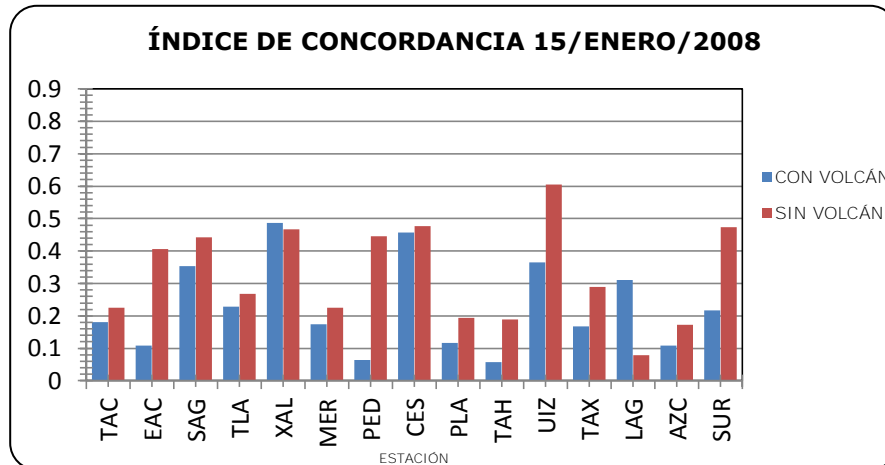
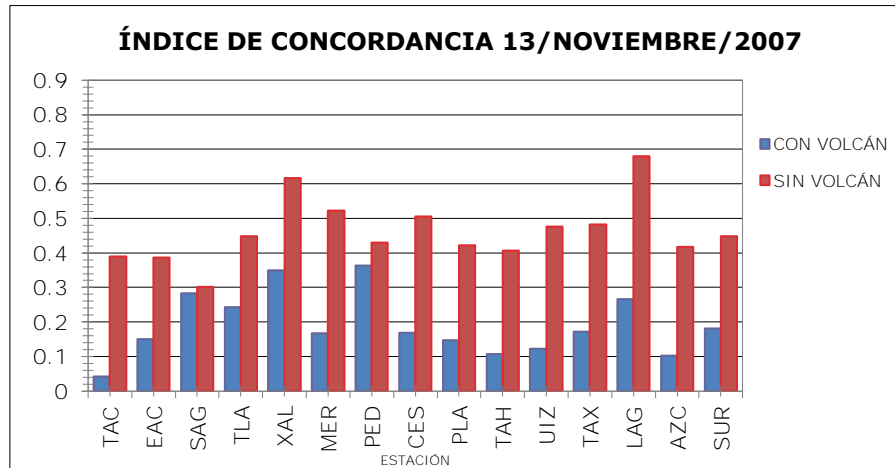
medio de las observaciones con la desviación de las observaciones individuales de la media (Willmott, 1981).

Se realizó este análisis estadístico para datos de velocidad del viento y también para concentración de SO_2 en la atmósfera.

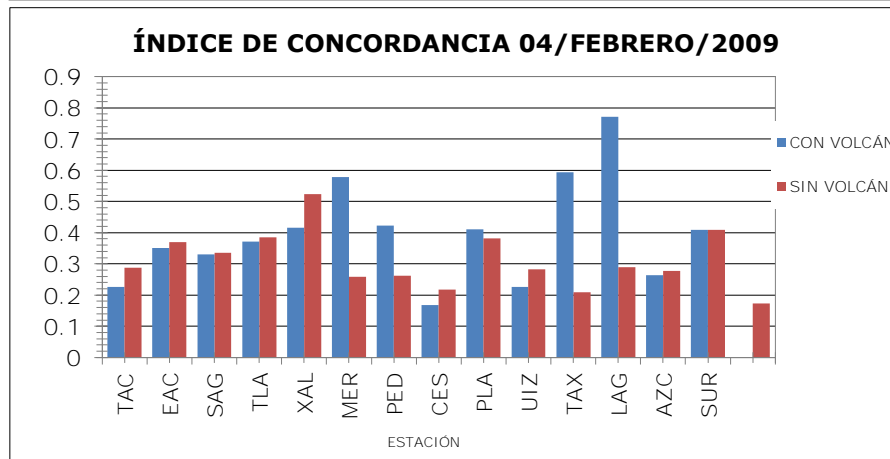
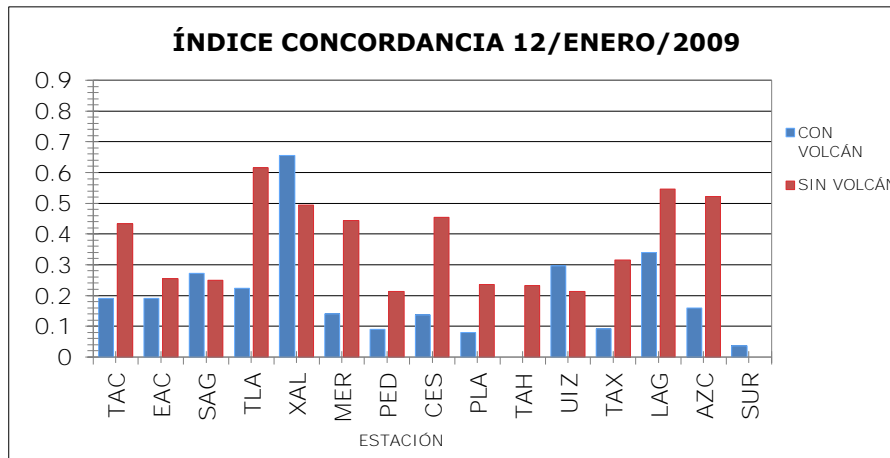
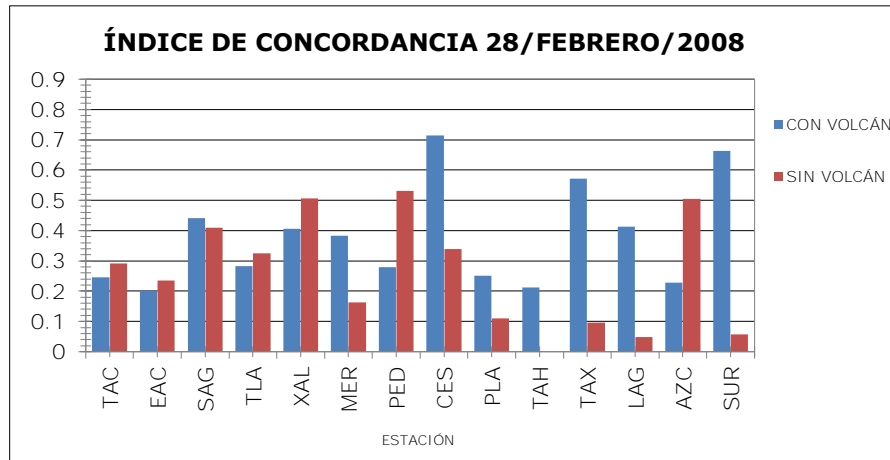
Las gráficas 4.1 muestran la comparación del índice de concordancia del modelo y las mediciones de RAMA, esto para los casos con y sin la inclusión de la emisión del volcán en el inventario.



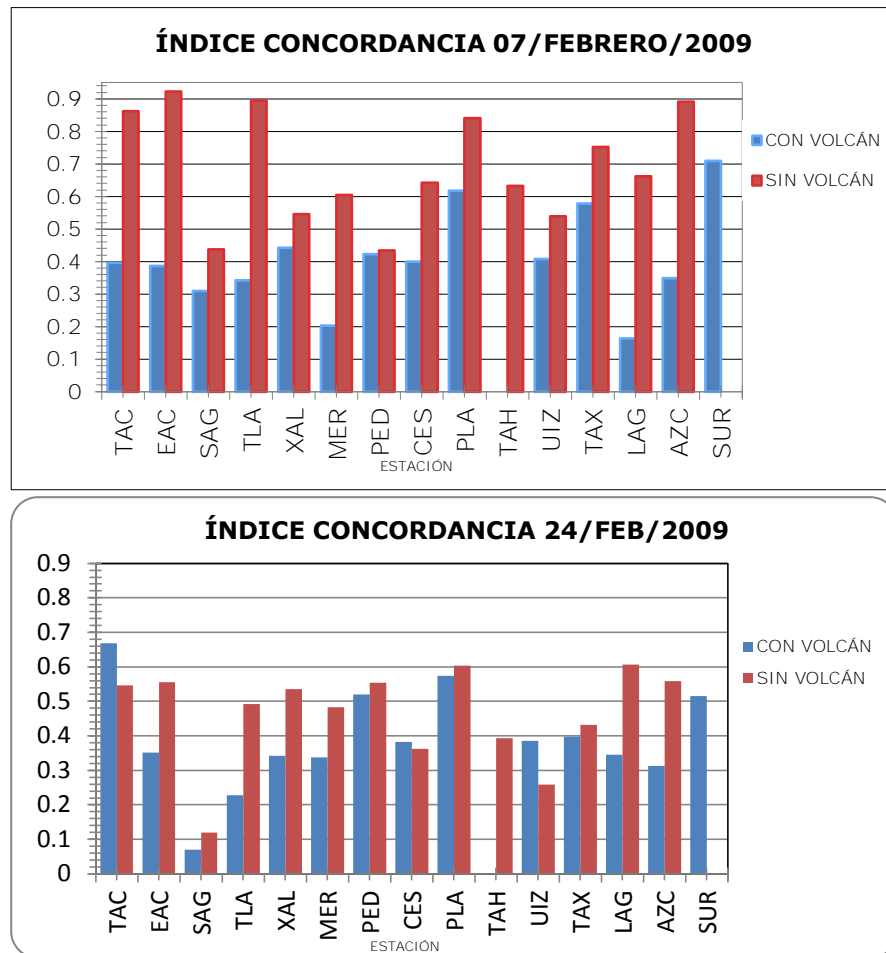
Gráfica 4.1. a) Comparación del índice de concordancia para MCCM con y sin emisión del volcán en 12 de junio y 31 de octubre del 2007.



Gráfica 4.1. b) Comparación del índice de concordancia para MCCM con y sin emisión del volcán en 13 de noviembre del 2007, 15 y 27 de enero del 2008.



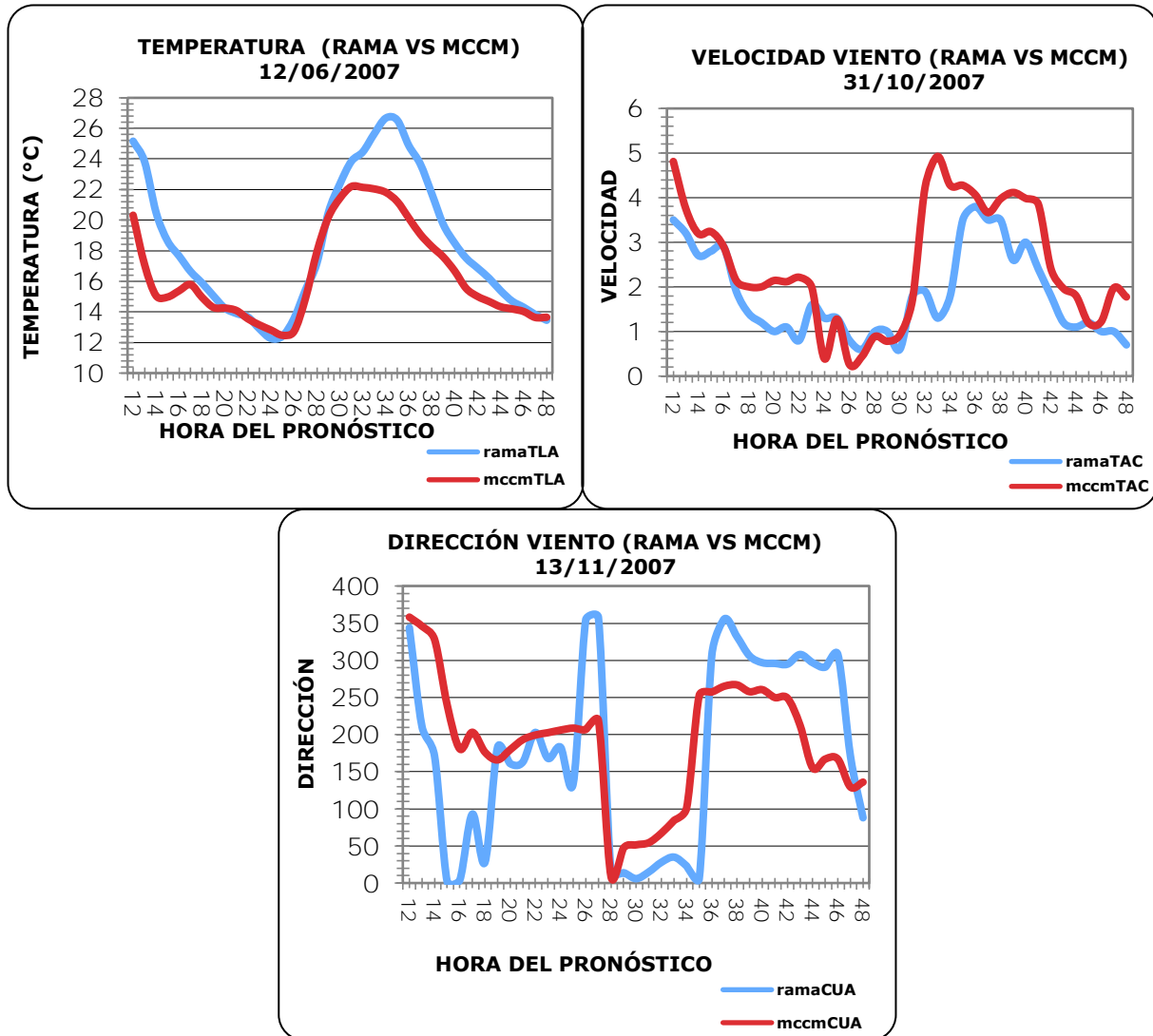
Gráfica 4.1. c) Comparación del índice de concordancia para MCCM con y sin emisión del volcán en 28 de febrero del 2008, 12 de enero y 4 de febrero del 2009.



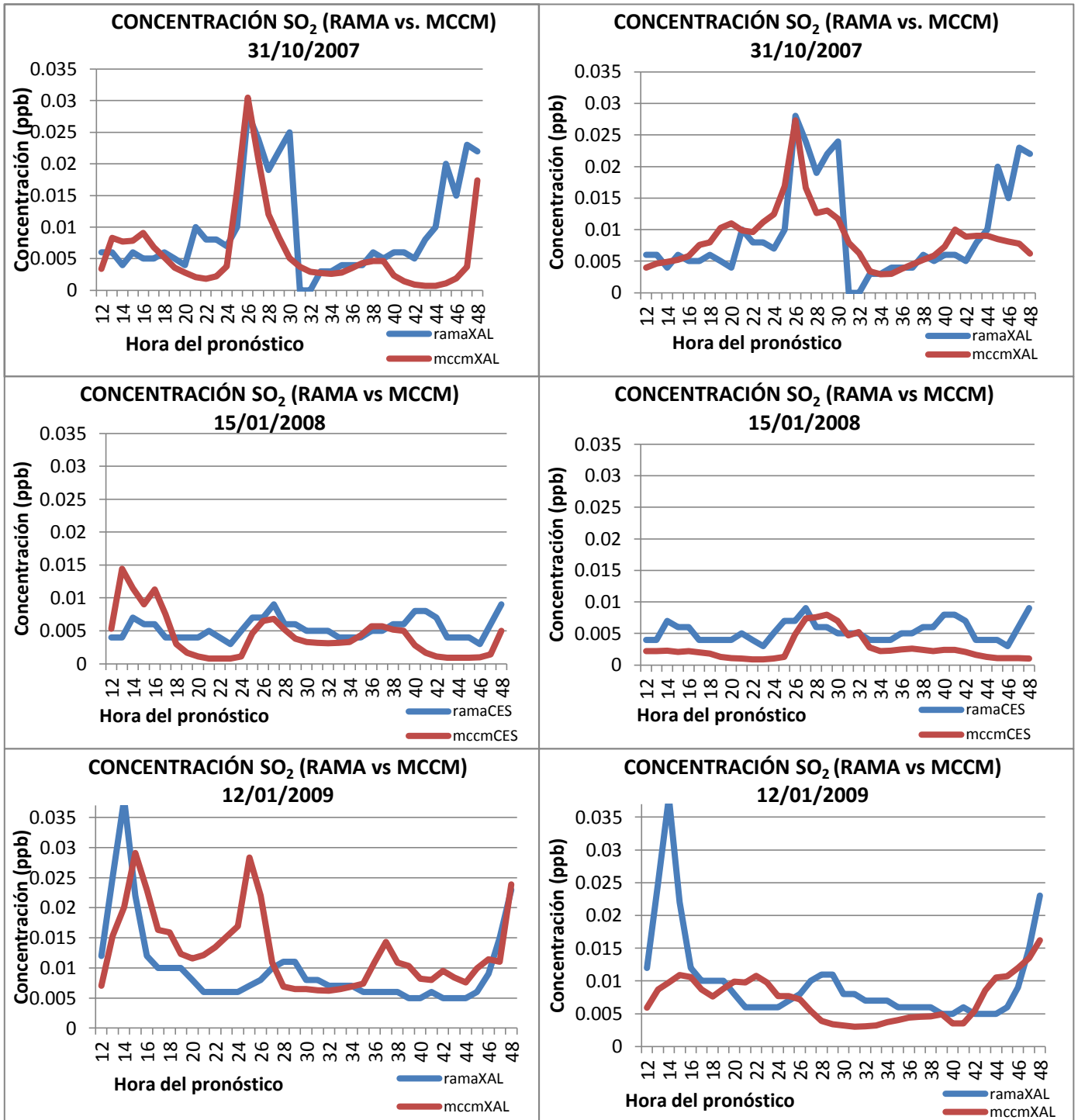
Gráfica 4.1. d) Comparación del índice de concordancia para MCCM con y sin emisión del volcán en 7 y 24 de Febrero del 2009.

El resultado del análisis estadístico indica que la influencia del volcán es significativa, para los periodos estudiados ya que el índice de concordancia varía cuando se incluyen las emisiones del volcán. Sin embargo, la emisión del volcán incluida en el modelo esta considerada como un valor constante, lo anterior hace que en algunos periodos y sitios de monitoreo se mejore el índice de concordancia y en otros se disminuya, para evitar esto en trabajos a futuro se debe considerar que el Popocatépetl emite concentraciones variables de SO_2 e incluir éstas dentro de la modelación.

Las gráficas 4.2 muestran el desempeño del modelo en cuanto a la meteorología (temperatura, velocidad y dirección del viento) y a concentración de SO₂ con y sin la emisión del volcán.



Gráfica 4.2. Comparación de los datos de meteorología de RAMA y MCCM.



Gráfica 4.3. Comparación de la concentración de SO₂ entre RAMA y MCCM (Lado izquierdo con emisión del volcán y lado derecho sin emisión del volcán.

4.2. VISUALIZACIÓN DE DATOS DE SALIDA DE MCCM.

4.2.1. Despliegue en dos dimensiones mediante GraDS.

Las imágenes en dos dimensiones generadas con GraDS (Ilustración 4.1), se despliega la distribución del contaminante en un solo plano, la escala de concentración de SO₂ (en ppb) se representa con una escala de colores y las trayectorias en retroceso del contaminante en superficie, las cuales muestran el origen de las emisiones a seis horas previas de la emisión, cada punto en la línea representa una hora atrás en la trayectoria del contaminante.

Para determinar las estaciones de las cuáles partirá la trayectoria, se tomaron en cuenta los datos de RAMA que indicaban las estaciones con mayor registro de concentración de SO₂ en los días con IE (Gráficas 3.1), esto incluye la estación donde se registró el incremento extraordinario, así como las siguientes estaciones con alta concentración de SO₂ registrada.

En cada par de imágenes de 2D en las ilustraciones 4.1 (a-j), se muestran dos trayectorias, una correspondiente a la fecha y la hora con incremento extraordinario (menos 6 horas) y la otra es el día siguiente a esta fecha (der.), esto para observar la tendencia que tiene el SO₂ para transportarse de la fuente de emisión hacia las estaciones que registraron el IE.

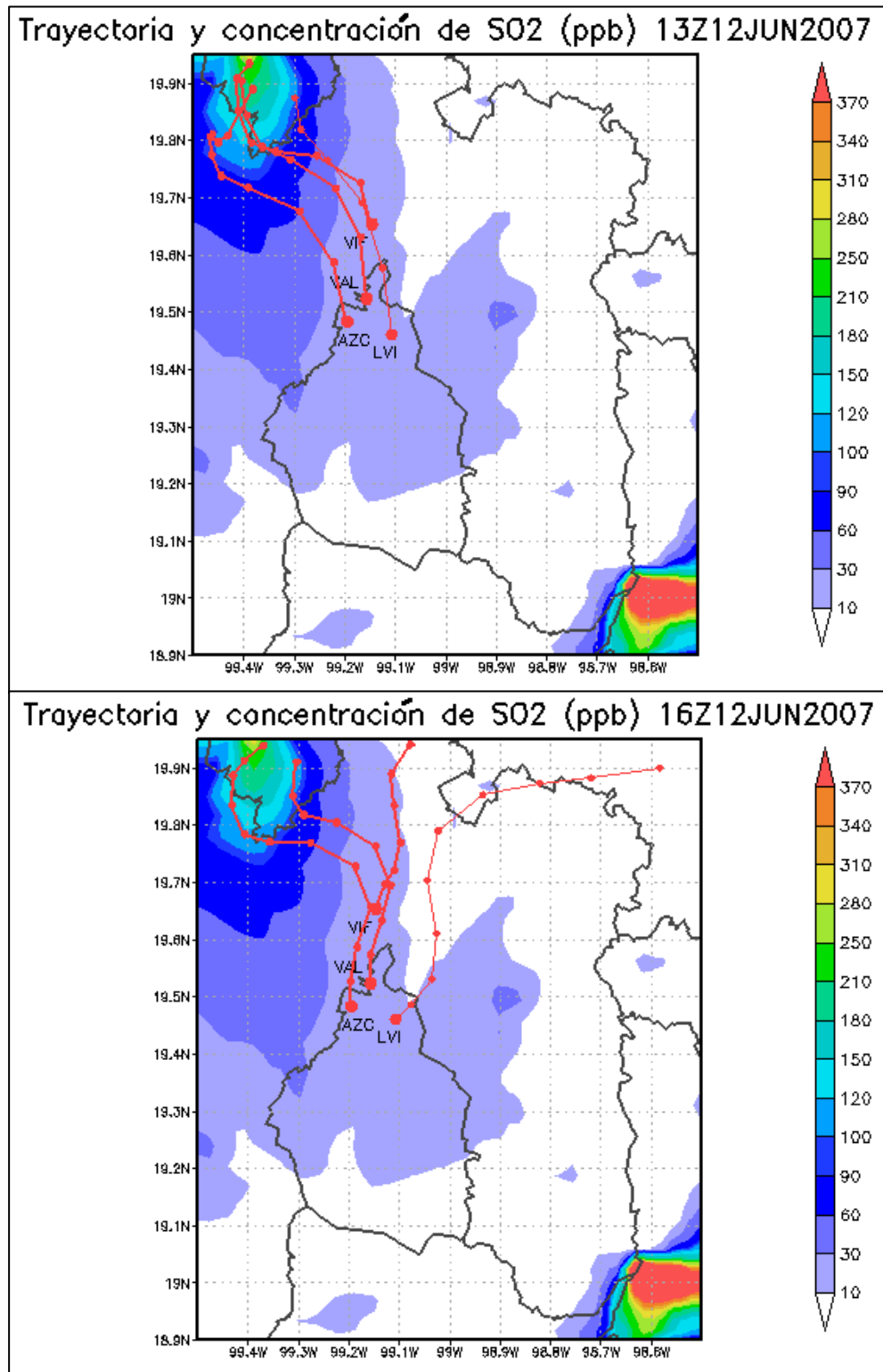


Ilustración 4.1. a) Trayectorias de SO₂ en retroceso para el 12 de junio del 2007.

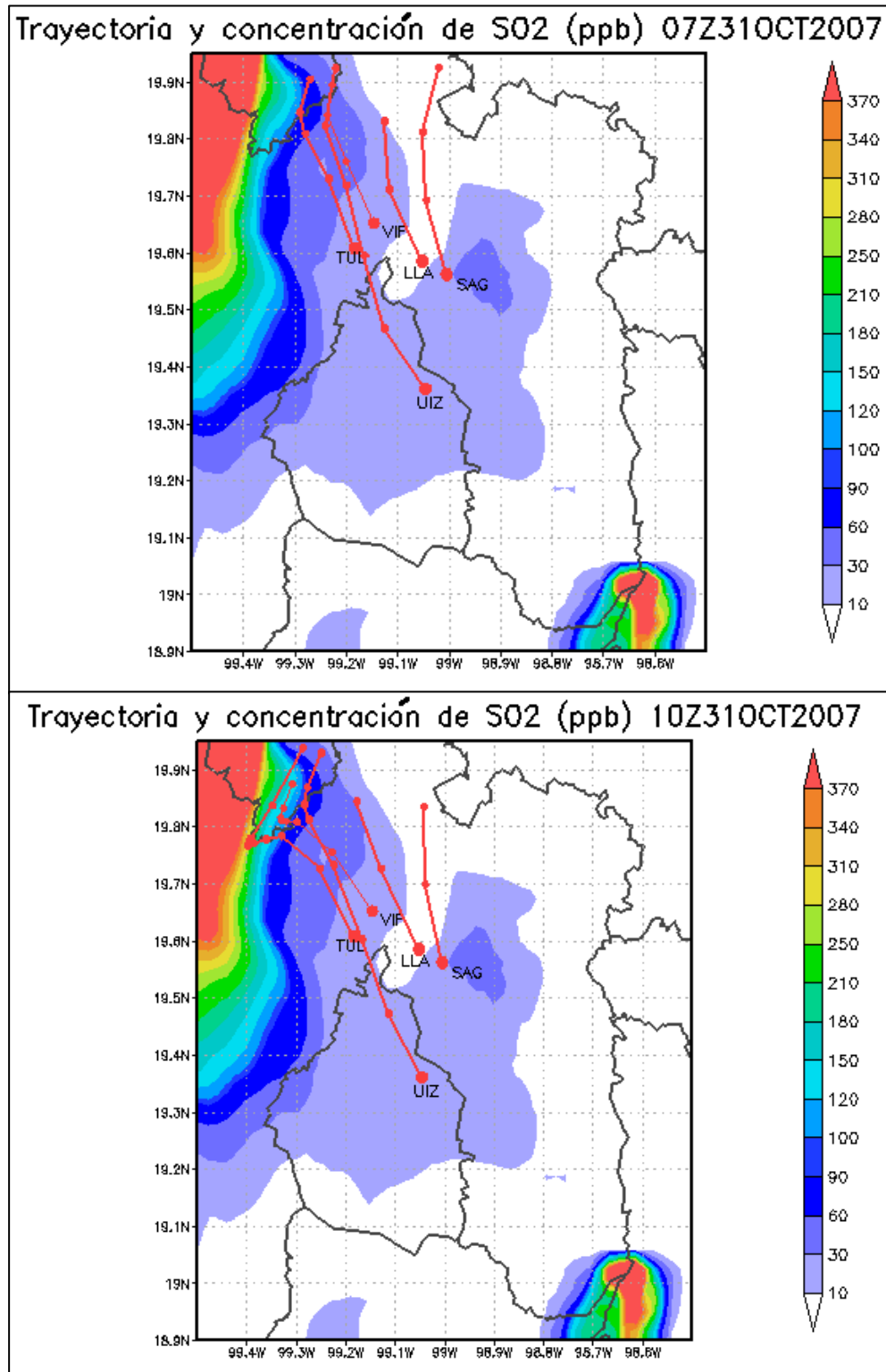


Ilustración 4.1. b) Trayectorias de SO₂ en retroceso para el 31 de octubre del 2007.

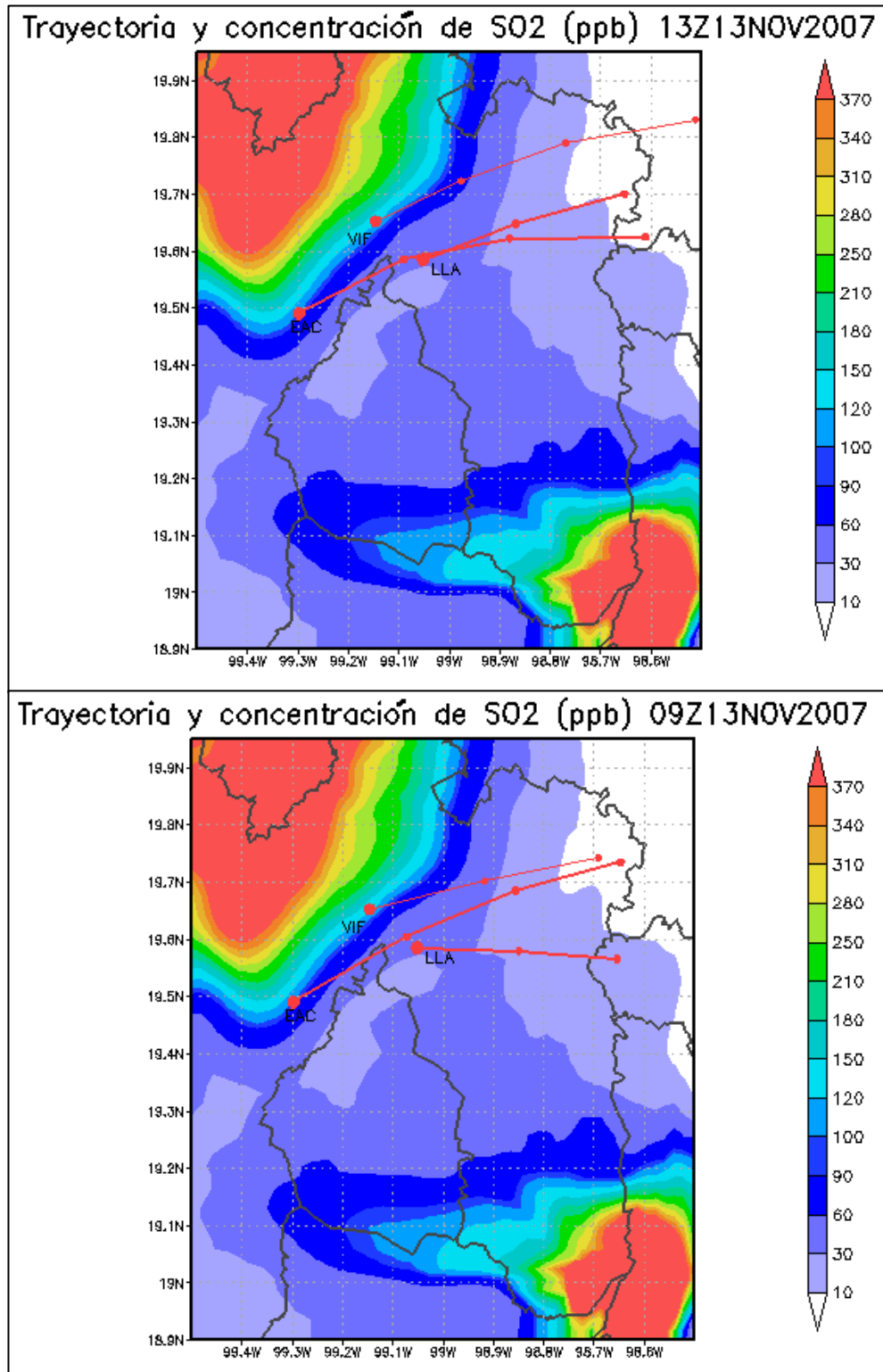


Ilustración 4.1. c) Trayectorias de SO₂ en retroceso para el 13 de noviembre del 2007.

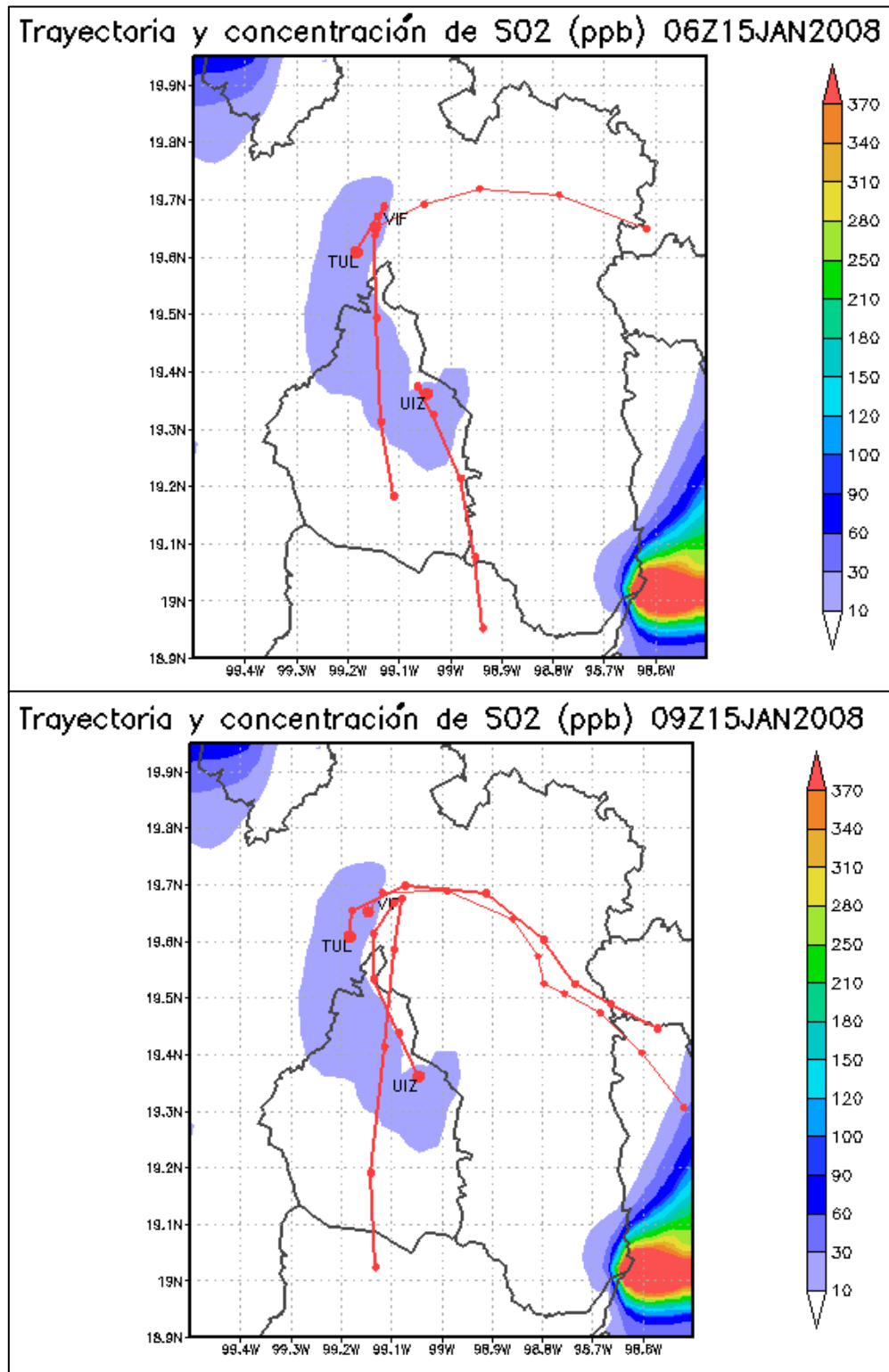


Ilustración 4.1. d) Trayectorias de SO₂ en retroceso para el 15 de enero del 2008.

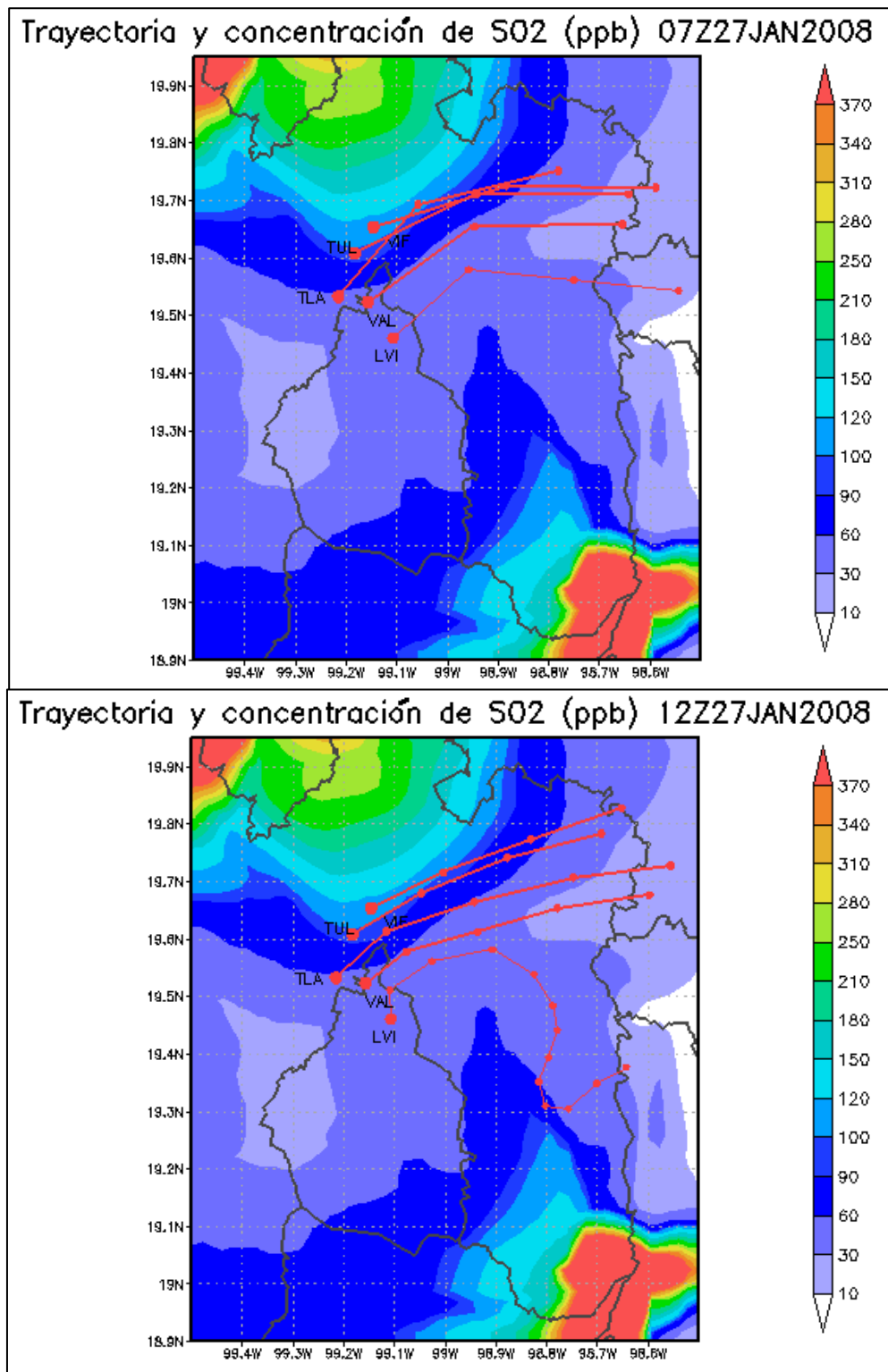


Ilustración 4.1. e) Trayectorias de SO₂ en retroceso para el 27 de enero del 2008.

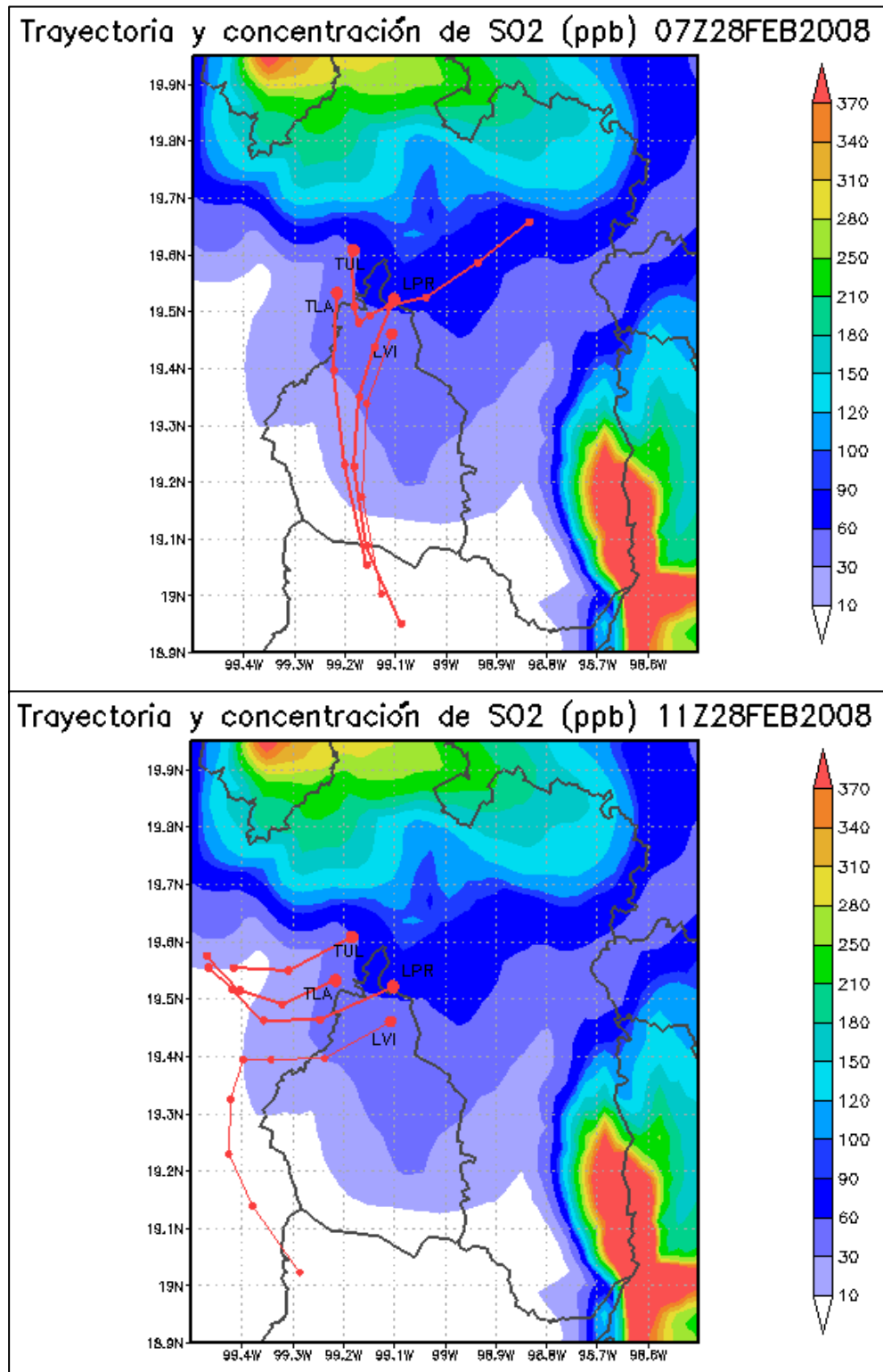


Ilustración 4.1. f) Trayectorias de SO₂ en retroceso para el 28 de febrero del 2008.

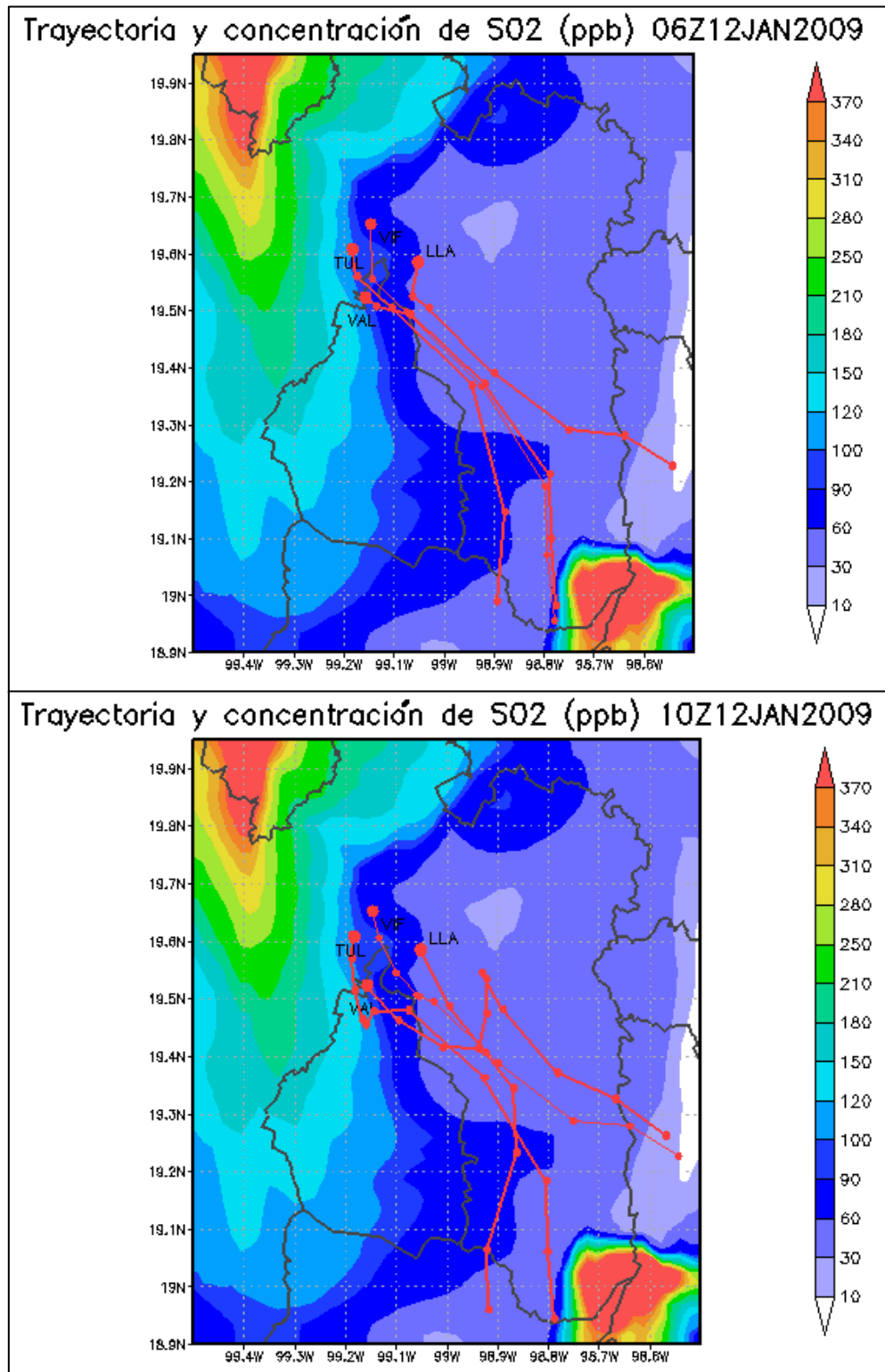


Ilustración 4.1. g) Trayectorias de SO₂ en retroceso para el 12 de enero del 2009.

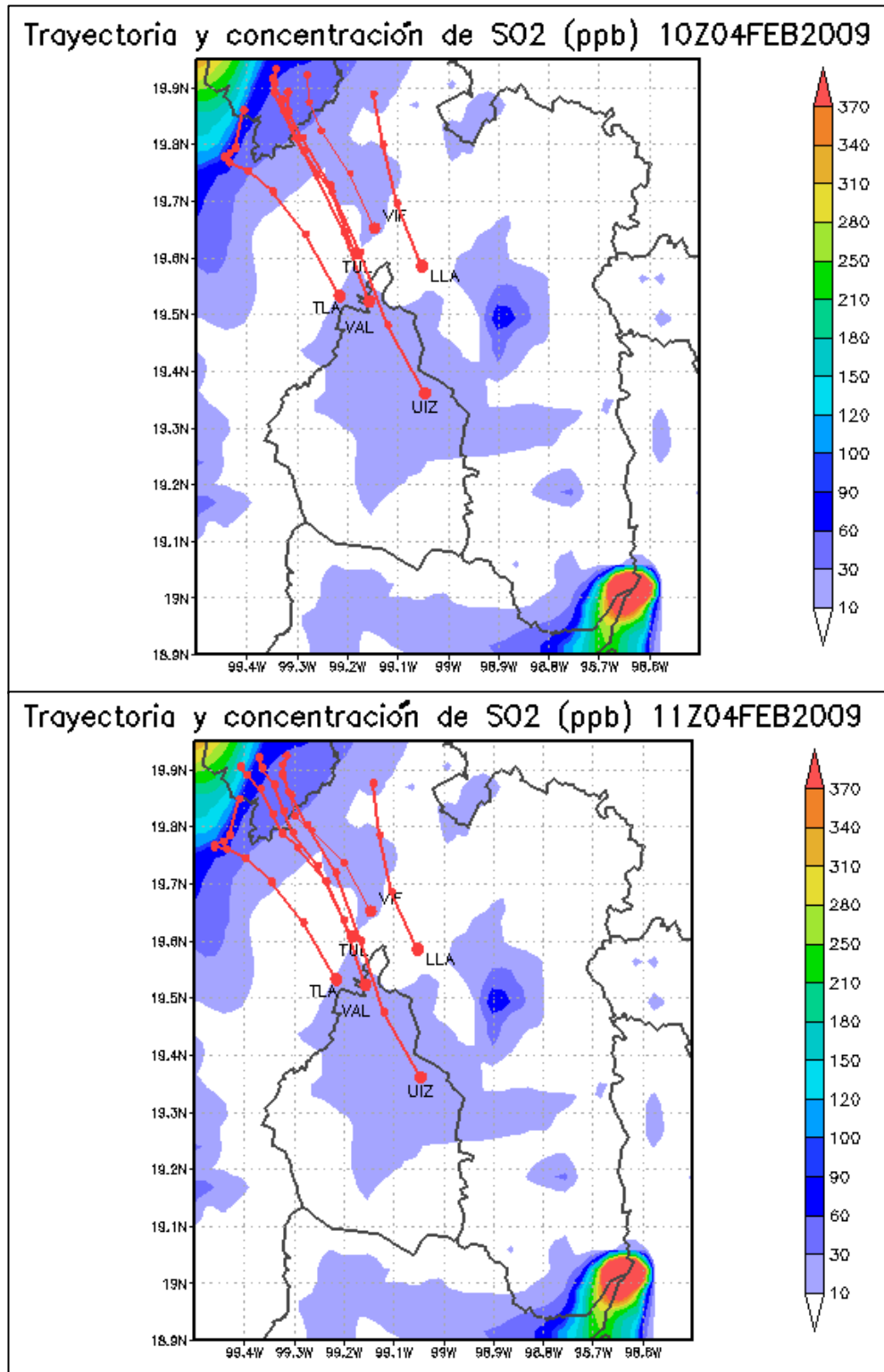


Ilustración 4.1. h) Trayectorias de SO₂ en retroceso para el 4 de febrero del 2009.

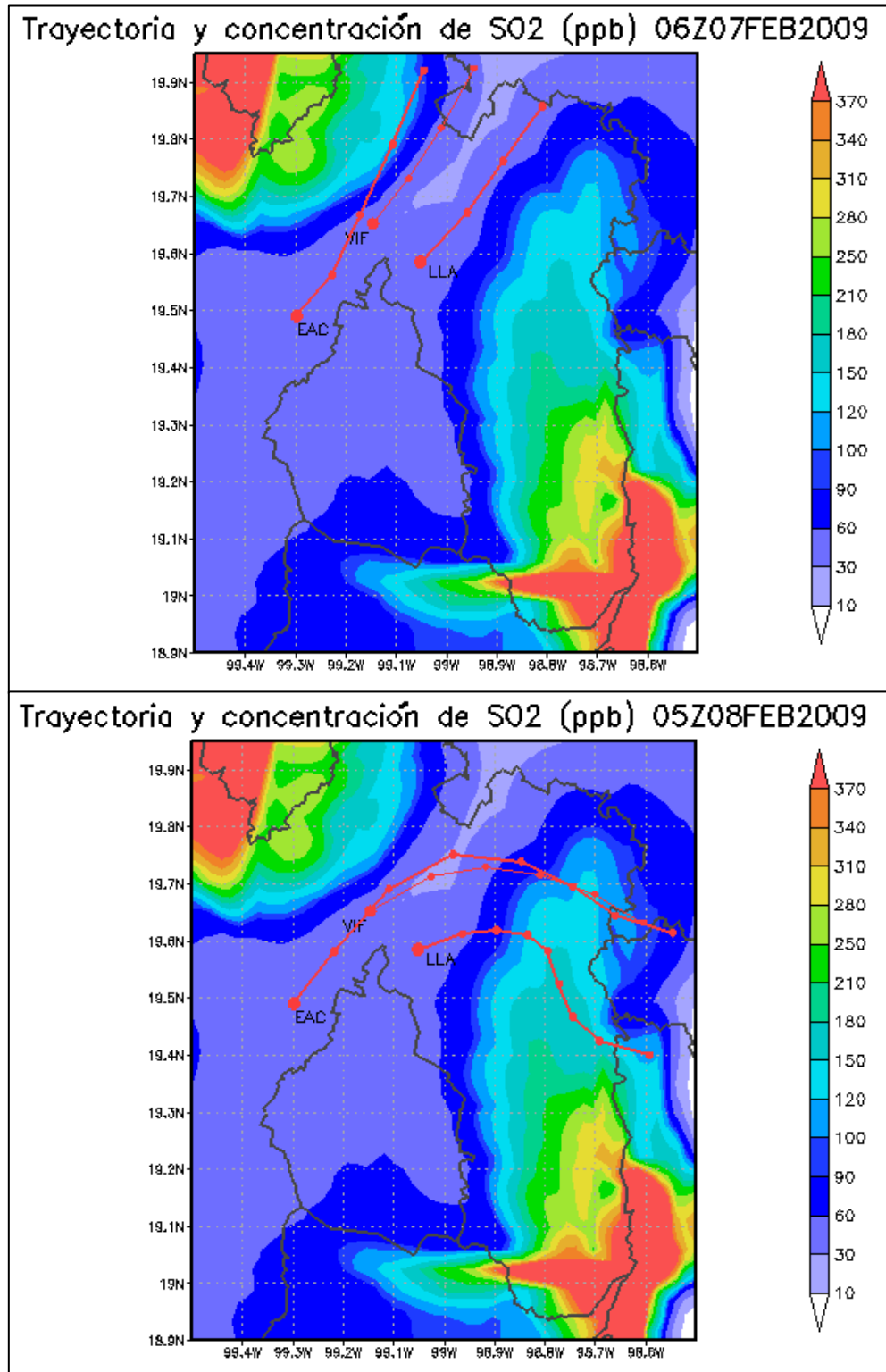


Ilustración 4.1. i) Trayectorias de SO₂ en retroceso para el 7 de febrero del 2009.

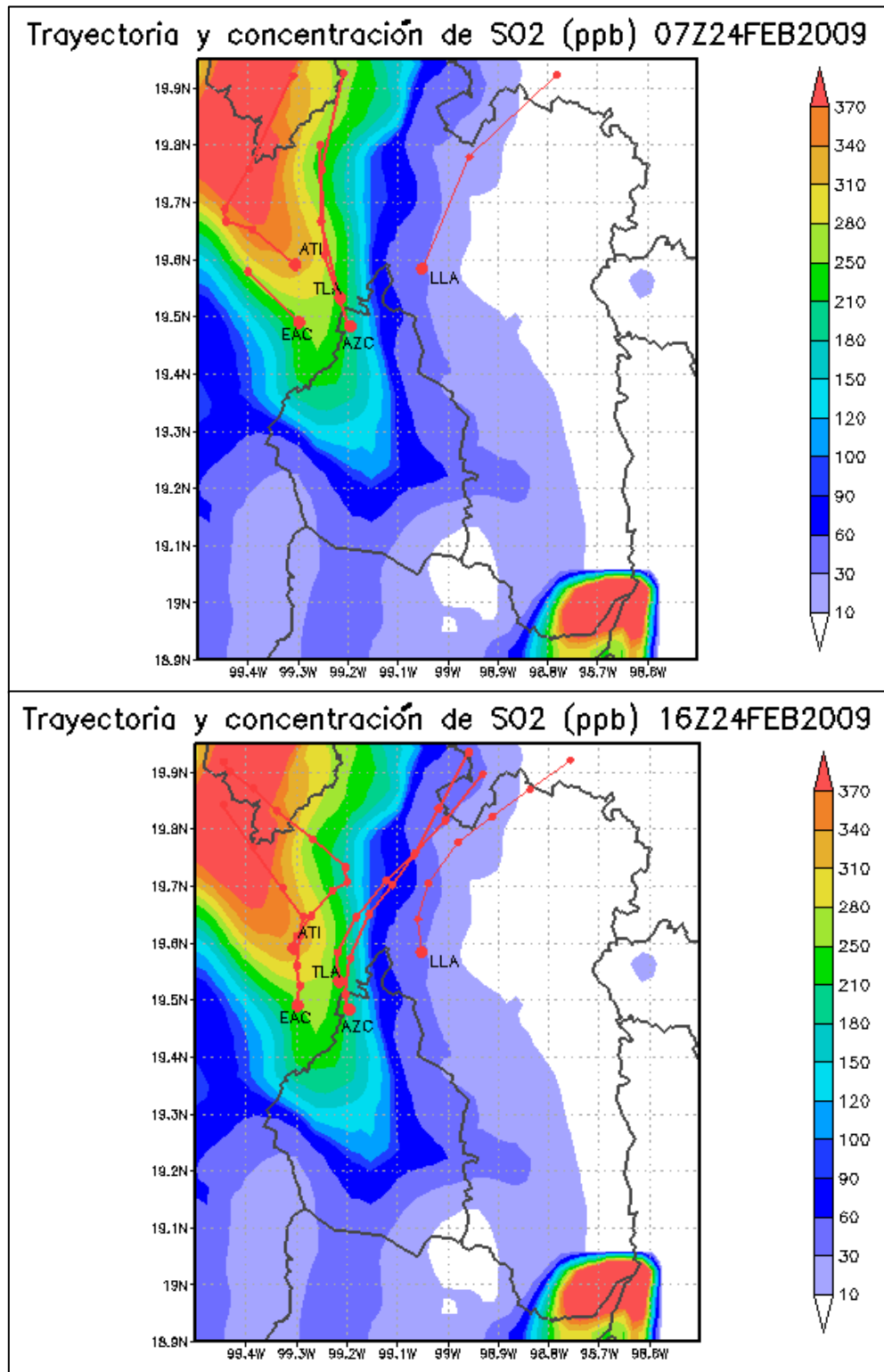


Ilustración 4.1. j) Trayectorias de SO₂ en retroceso para el 24 de febrero del 2009.

Las ilustraciones 4.1 a-j muestran la trayectoria del SO₂ basada en la dirección de los vientos. En cada imagen el punto inicial, con el nombre abreviado de la estación de monitoreo atmosférico (RAMA), se indica a la hora en que fue registrado el IE. El modelo emplea el horario universal coordinado por lo tanto, a la hora en las imágenes se restan 6 horas para obtener la hora local en la cual ocurrió el incremento de SO₂ y cada punto en la línea de la trayectoria representa el recorrido de la parcela de aire durante una hora.

Según los resultados de la modelación en sólo una fecha con IE, 12 de enero del 2009 (Ilustración 4.1g), se observan trayectorias definidas de SO₂ del volcán hacia la ZMVM y en las estaciones de miniDOAS de Chipiquixtle y Colibrí (Gráfica 3.2) registraron un total de 770 toneladas de SO₂/día emitidos del volcán. En fechas como el 15 de enero y 28 de febrero del 2008 (Ilustraciones 4.1 d y f) hay tendencia de los vientos de sur/sureste hacia el norte, aunque la trayectoria no sea clara los datos de COSPEC del monitoreo volcánico (Tabla 3.2) indican que el 15 de enero del 2008 se registró una emisión del volcán de 5,193 toneladas SO₂/día y los vientos llevarían la emisión hacia la zona de Tláhuac, mientras que el 28 de febrero del mismo año los datos de miniDOAS indican que el volcán presentó flujo de SO₂ variante (2.1 a 25.8 kg/s) con un promedio de 918.7 toneladas/día (ANEXO 8.7).

Las trayectorias correspondientes a Tula son bien definidas en las fechas 12 de junio, 31 de octubre del 2007 y 4 de febrero del 2009 (Ilustraciones 4.1 a, b y h), sin embargo, no todas los vientos tienen una tendencia obvia, en la mayoría de las fechas con IE indican que existen otras fuentes emisión de SO₂, como en los días 13 de noviembre del 2007, 27 de enero del 2008 y 7 de febrero del 2009 (Ilustraciones 4.1 **c**), **e**) y el inciso **i**) aparte de las

fuentes supuestas en la hipótesis, en estas fechas las trayectorias indican que la emisión es transportada desde la zona este del Estado de Hidalgo, de Tlaxcala e incluso de Puebla y para poder determinar de que fuente provienen se tendría que analizar con el modelo estas fechas en un dominio mayor que contemple más estados del país.

El resumen en la tabla 4.1 se hace considerando la posible fuente de emisión, las trayectorias las cuales indican que la contaminación por SO₂ proviene de una dirección noroeste serán referidas al complejo industrial de Tula, Hidalgo. Mientras que el contaminante proveniente de la dirección sureste, será considerada como emisión del volcán. La trayectoria del contaminante será confirmada con la visualización de en tres dimensiones que podemos observar el comportamiento de los vientos y determinar si es factible que estas emisiones lleguen a la ZMVM ya que los factores topográficos influyen en gran medida a la distribución de contaminantes.

Tabla 4.1. Conteo de trayectorias por día con incremento extraordinario

FECHA	FUENTE		
	TULA, HIDALGO	POPOCATÉPETL	Provenientes de
12/Junio/2007	6	-	2 - Hidalgo
31/Octubre/2007	7	-	4 - Hidalgo
13/Noviembre/2007	-	-	2 - Tlaxcala 4 - Hidalgo
15/Enero/2008	-	5	1 - Hidalgo
27/Enero/2008	-	1	8 - Hidalgo 1 - Tlaxcala
28/Febrero/2008	-	3	4 - Edo. México 1 - Morelos

Continuación Tabla 4.1. Conteo de trayectorias por día con incremento extraordinario.

FECHA	FUENTE		
	TULA, HIDALGO	POPOCATÉPETL	Provenientes de
12/Enero/2009	-	8	-
4/Febrero/2009	12	-	-
7/Febrero/2009	-	-	3 - Hidalgo 2 - Tlaxcala 1 - Puebla
24/Febrero/2009	5	-	4 - Hidalgo
Total = 84	30	17	37
100%	35.72%	20.24%	44.04%

Como se puede observar en la tabla 4.1, la contribución de cada una de las posibles fuentes de emisión es importante. Sin embargo, del total de 84 trayectorias el mayor porcentaje de éstas, con un 44%, son provenientes de fuentes no especificadas.

4.2.2. Visualización en tres dimensiones con VIS5D.

Mientras GraDS muestra una proyección de los datos de salida de MCCM en un sólo plano (2 dimensiones), Vis5D es un software que muestra mapas en tercera dimensión y también muestra una animación tanto del comportamiento de los vientos como de la concentración de SO₂.

Las fechas presentadas a continuación en la tabla 4.2, fueron elegidas para su visualización en tres dimensiones por que son los días con mayor IE en concentración.

Tabla 4.2. Resumen de fechas con mayor incremento de concentración.

Fecha	Hora registrada	Zona	Estación RAMA	Concentración registrada (ppm)
13/Nov/2007	04:00	Noreste	Villa de las flores	0.252
28/Feb/2008	03:00	Noroeste	Tultitlán	0.293
24/Feb/2009	02:00	Noreste	Los Laureles	0.340

Las imágenes en la Ilustración. 4.2 muestran la dirección de los vientos mediante flechas y en color azul la cantidad de SO₂ en la zona.

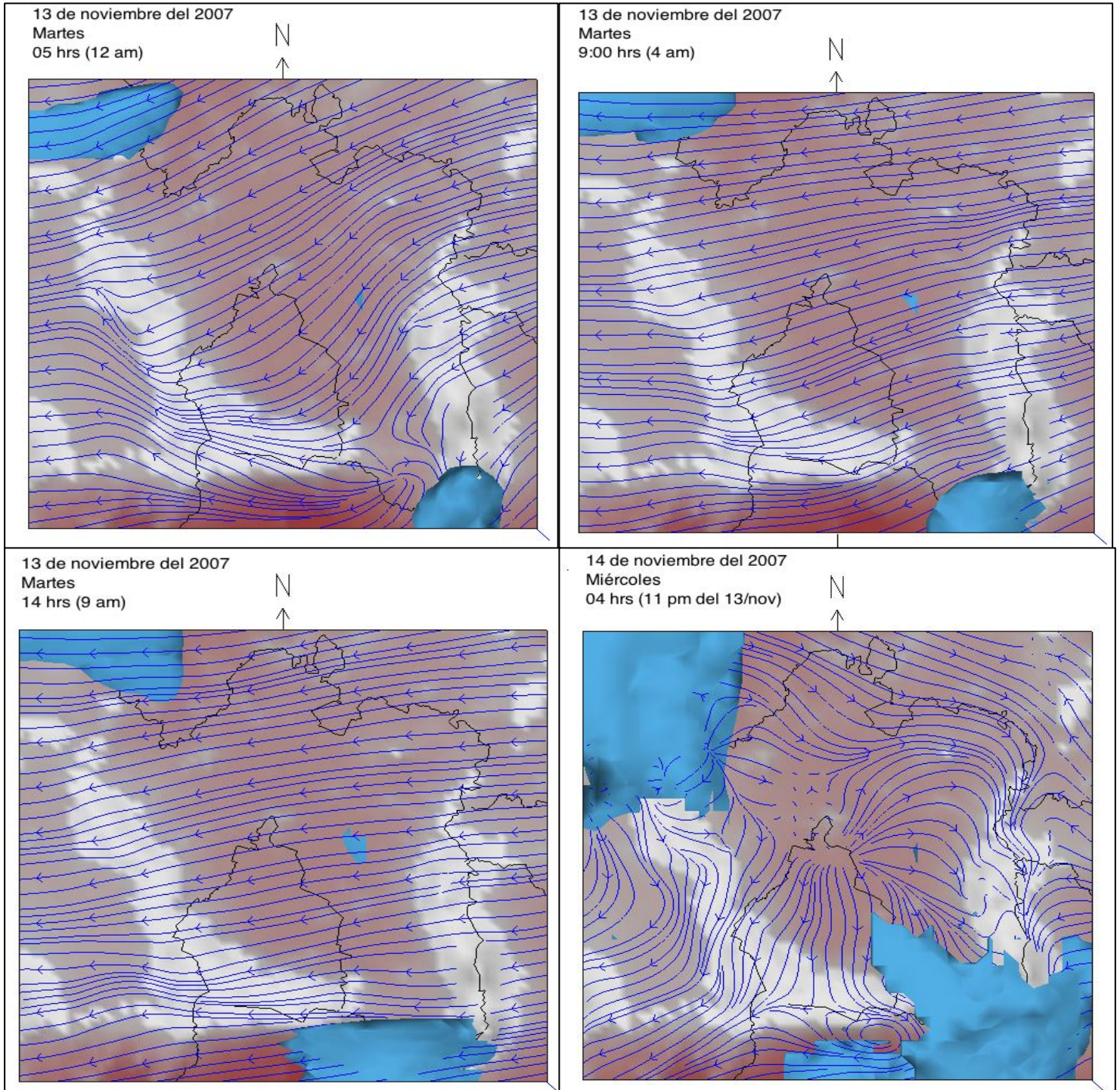
13 DE NOVIEMBRE DEL 2007.

Ilustración 4.2. Visualización de concentración de SO₂ y dirección de vientos en las horas con picos de contaminante durante el día 13/11/2007.

Como se puede observar en esta fecha, los vientos provienen del este en las horas 9 y 14 (4 y 9 am respectivamente), estas son horas en las que según RAMA hubo picos de SO_2 (gráfica 3.1 b), coinciden con las trayectorias en dos dimensiones (ilustración 4.1 c). Sin embargo, existe un último incremento en la hora 23 del mismo día, cuando se observa en 3D (ilustración 4.2) la dirección de los vientos a esa hora se puede notar que éstos ya provienen del sureste hacia el norte y es posible que el último incremento corresponda a una emisión del volcán ya que los datos miniDOAS proporcionados por el Dr. Hugo Granados (Instituto de Geofísica, UNAM) indican que el 13 de noviembre del 2007 el volcán emitió una cantidad considerable de dióxido de azufre (1243 ton/día). En la ilustración 4.3 se muestra el comportamiento de los vientos alrededor del volcán en las horas del último pico de concentración de SO_2 registrado.

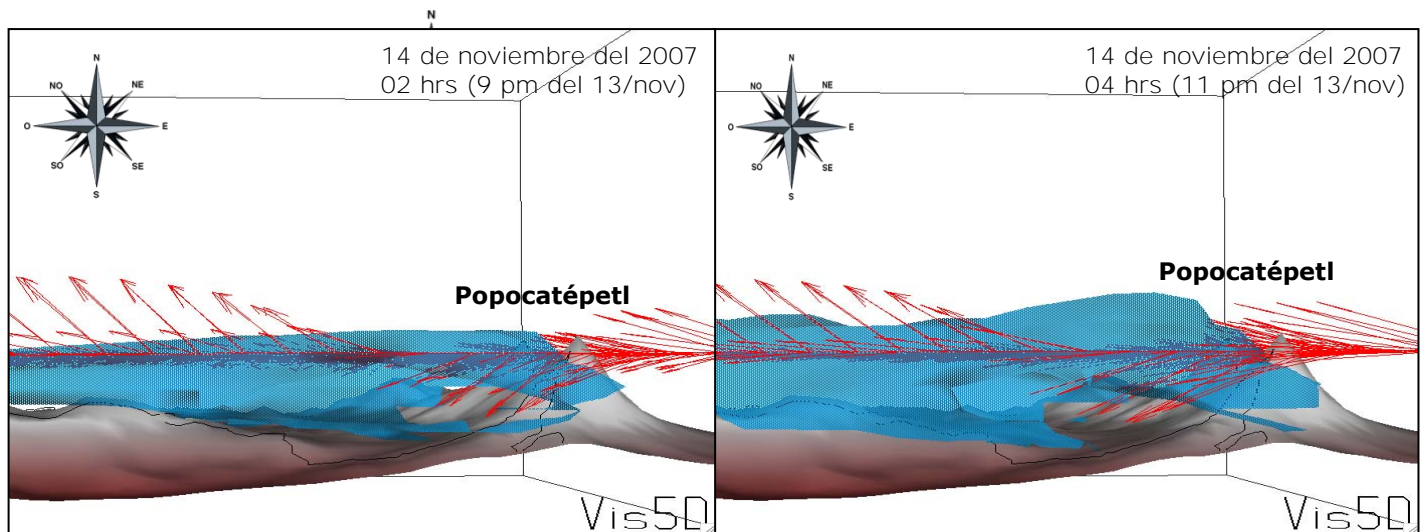


Ilustración 4.3. Comportamiento de los vientos alrededor del volcán el 13/11/2007.

La visualización de los vientos con respecto al volcán, indican que parte de la cantidad de SO_2 emitida puede descender del volcán hacia la ZMVM, ocasionando un posible incremento en la concentración de dióxido de azufre.

Con el pronóstico de MCCM se puede observar el comportamiento de los vientos pasando la parte montañosa de la ZMVM (Ilustración 4.4), arriba de la zona montañosa el comportamiento del flujo de aire es casi lineal, en pocas ocasiones se perturba, sin embargo en la región montañosa se puede notar que el flujo de aire desciende hacia la ciudad, llevando consigo concentración de SO_2 , a este comportamiento de los vientos se le conoce como efecto brisa montaña-valle (ANEXO 8.8).

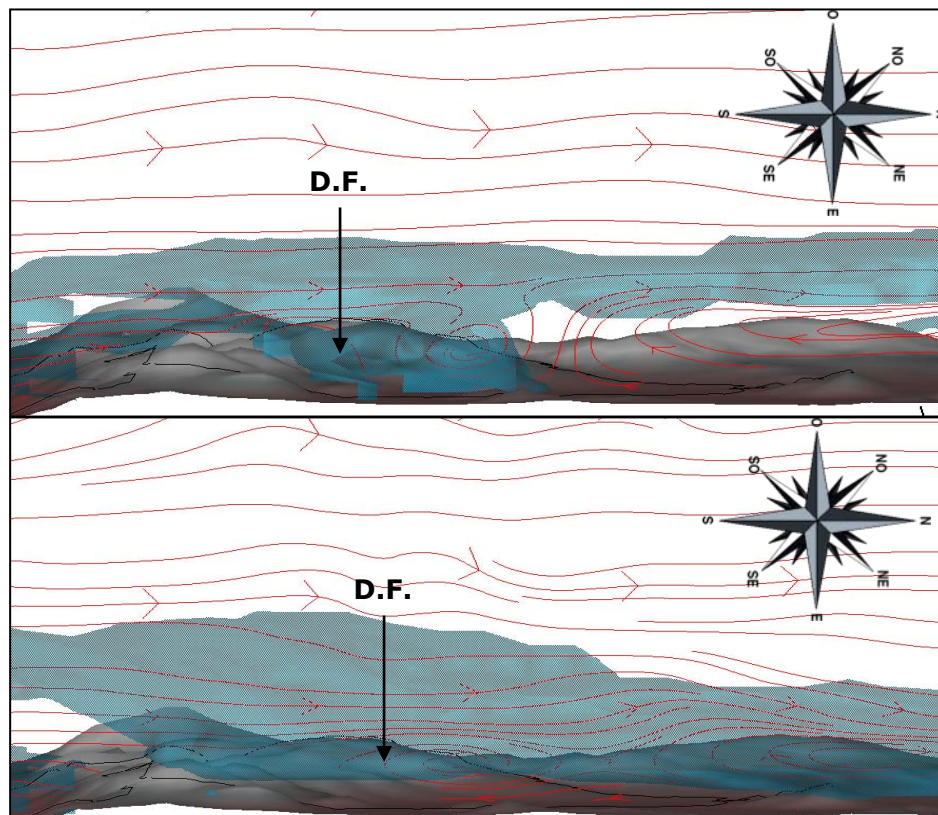
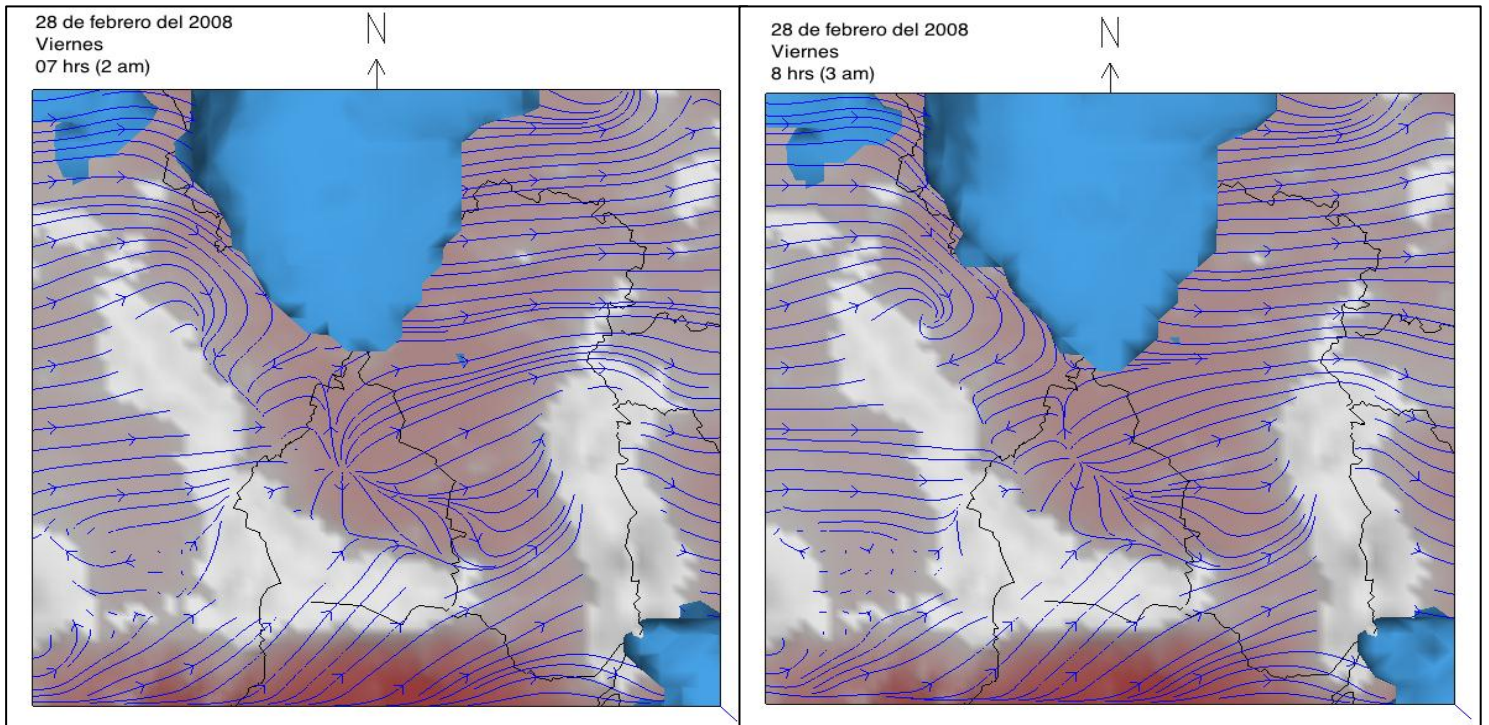


Ilustración 4.4. Perspectiva vertical de vientos sobre el D.F. en el día 13/11/2007.

En las imágenes de la ilustración 4.5 se muestran los resultados para la fecha del 28 de febrero del 2008, la cual presentó una concentración máxima de 0.350 ppm a las 2 am en la estación de Tultitlán pero bajo el criterio de IE se considera la de 0.293 ppm por que se registro a la misma hora en tres estaciones (3 am).

28 DE FEBRERO DEL 2008.



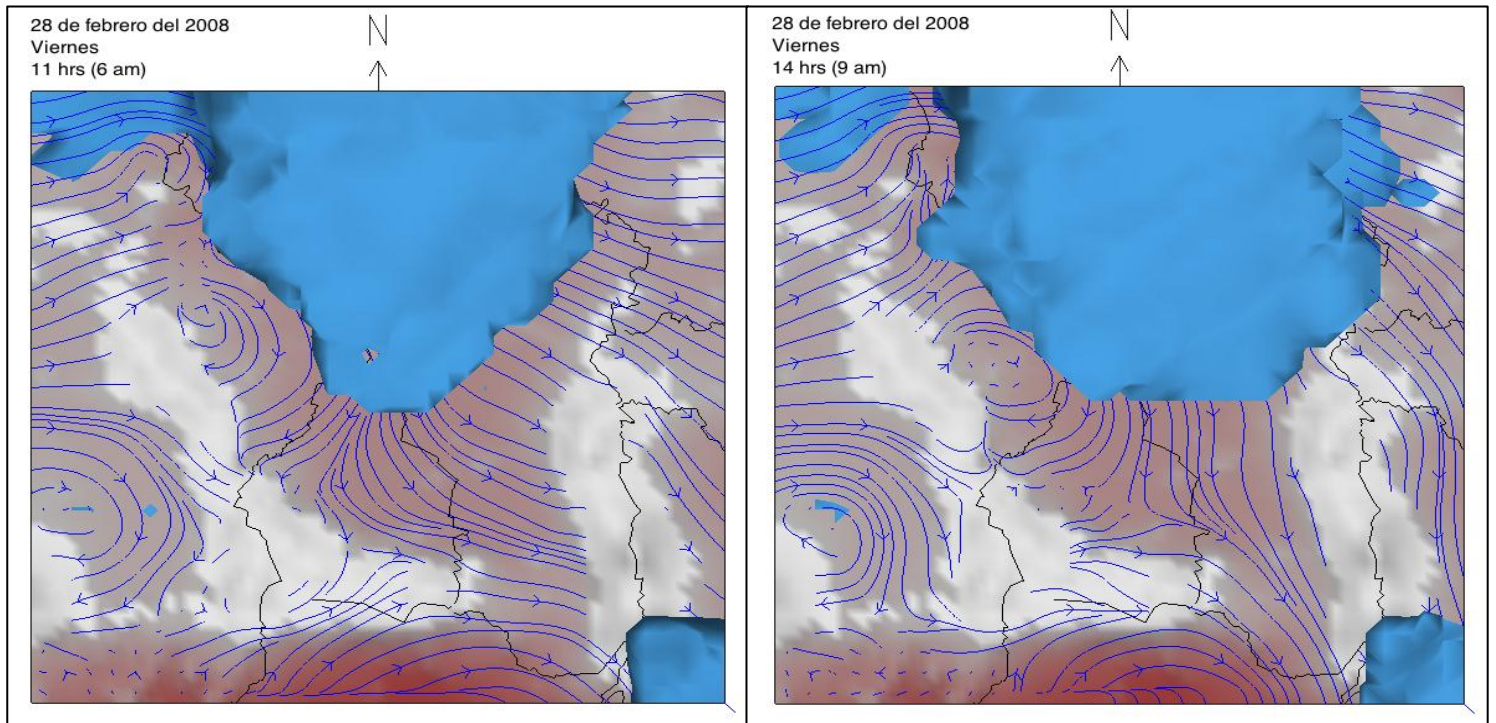


Ilustración 4.5. Visualización de concentración de SO₂ y dirección de vientos en las horas con picos en concentración el 28/02/2008.

La contribución de Tula en las concentraciones de SO₂ es notable y en la región norte de la ZMVM predominan los vientos de norte a sur, sin embargo la visualización de dos dimensiones muestra una trayectoria diferente, es posible que el contaminante emitido por ambas fuentes llegará a la ciudad de México.

La ilustración 4.6 presenta los resultados del modelo para el 24 de febrero del 2009, en esta fecha el valor de la concentración de SO_s fue máxima al tener 0.340 ppm, duplicando así el valor normado por la Secretaría de Salud.

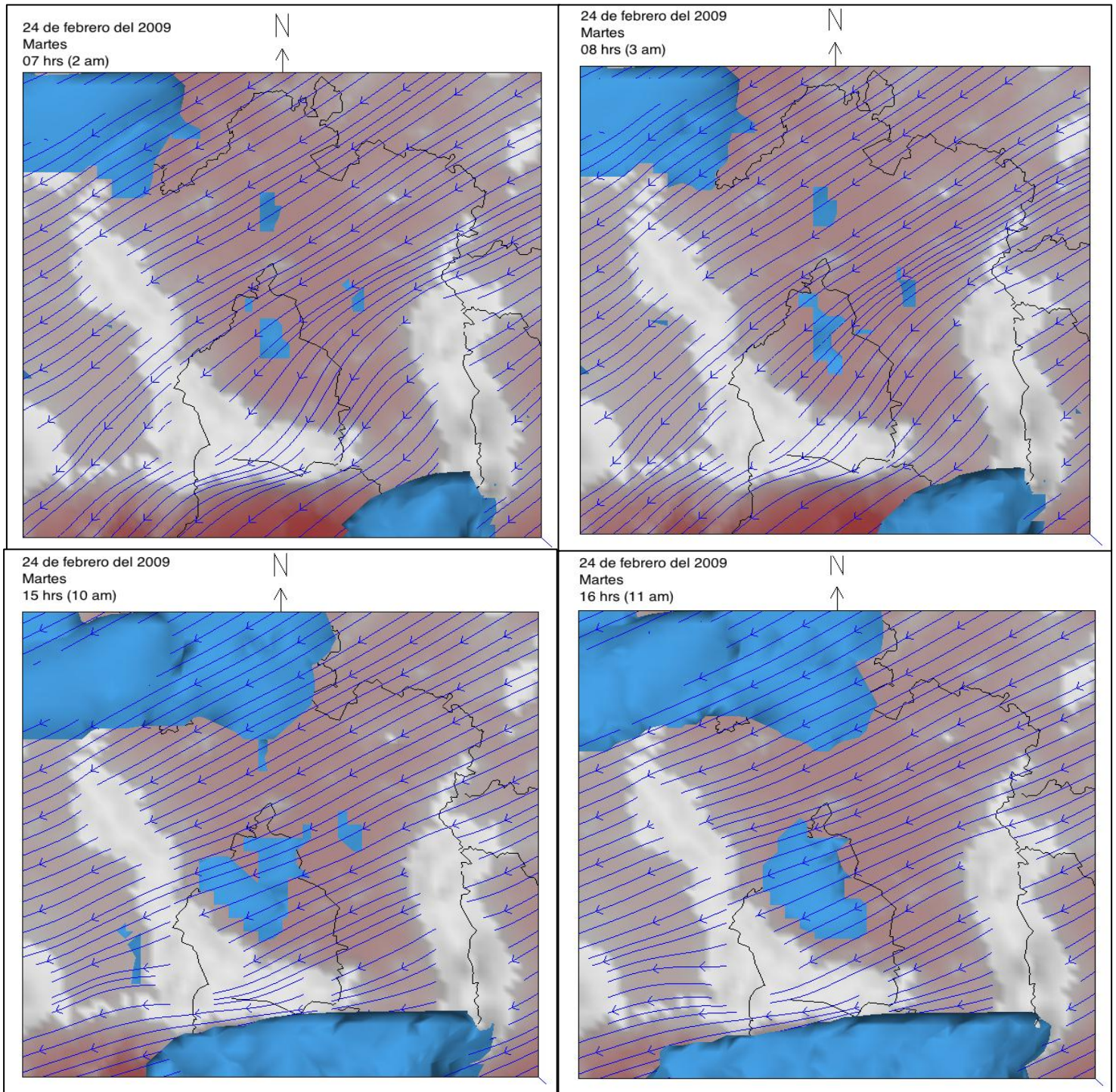
24 DE FEBRERO DEL 2009.

Ilustración 4.6. Visualización de concentración de SO₂ y dirección de vientos en las horas con picos en concentración el 24/02/2009.

El 24 de febrero del 2009, el monitoreo volcánico indica una emisión promedio de 2,147 toneladas de SO₂ por día, sin embargo, parece ser que ésta no tuvo influencia en la ZMVM ya que la meteorología en esta fecha no favorece la dispersión sureste hacia la zona de interés. Según la proyección en dos dimensiones (Ilustración 4.1j) se observa que la contaminación proviene en su mayoría de la región de Tula, los vientos en la ilustración 4.6 son de norte-noreste hacia el sur y cuando se observa el pronóstico completo de MCCM se puede notar que la contaminación de Tula esta afectando la calidad del aire de la ZMVM ya que la mayoría de los vientos llevan dirección del norte al sur.

Según la visualización en dos dimensiones del 12 de enero de 2009, la emisión viene del volcán pero al revisar con vis5D la trayectoria de los vientos nunca fue de sureste hacia la ZMVM

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Los resultados del modelo presentan el pronóstico de la meteorología y el transporte del contaminante a la región estudiada, al tratarse de un modelo estos resultados no pueden ser considerados 100% exactos y para analizar estadísticamente el desempeño de MCCM se hizo una comparación con las mediciones de RAMA (Gráficas 4.1) con el fin de conocer que tan cercano esta a la realidad y para saber si se puede considerar como un buen pronóstico, además que el MCCM ya ha sido utilizado para la calidad del aire de la Ciudad de México (García, 2000).

Se consideraron desde un inicio dos fuentes externas de emisión (Tula y Popocatépetl) por la cercanía con el Valle de México (Ilustración. 5.1) y la cantidad considerable que emiten de SO_2 , con Tula como el mayor emisor de ambas fuentes ya que es un flujo más constante que el volcán que es intermitente, pero esta hipótesis de que sólo son dos fuentes externas de emisión son las que influyen en la calidad del aire en la ZMVM no es exacta, al parecer también hay influencia también desde Tlaxcala, Estado de México e incluso Puebla y Veracruz,

Un estudio previo a este, realizado en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, demostró que las grandes emisiones de SO_2 de Tula sí afectan a la ZMVM (García Escalante, 2008). Sin embargo, nuestro estudio determinó que los vientos no siempre vienen de norte a sur y por lo tanto Tula no es la única fuente de contaminación hacia la Ciudad de México y aparte de considerar la emisión antropogénica, también se incluye la volcánica y se llevó a cabo la modelación incluyendo la emisión promedio del volcán (año

2006), con los resultados obtenidos se puede decir que esta emisión, aunque en menor contribución que Tula, también está relacionada con la calidad del aire de la ZMVM.

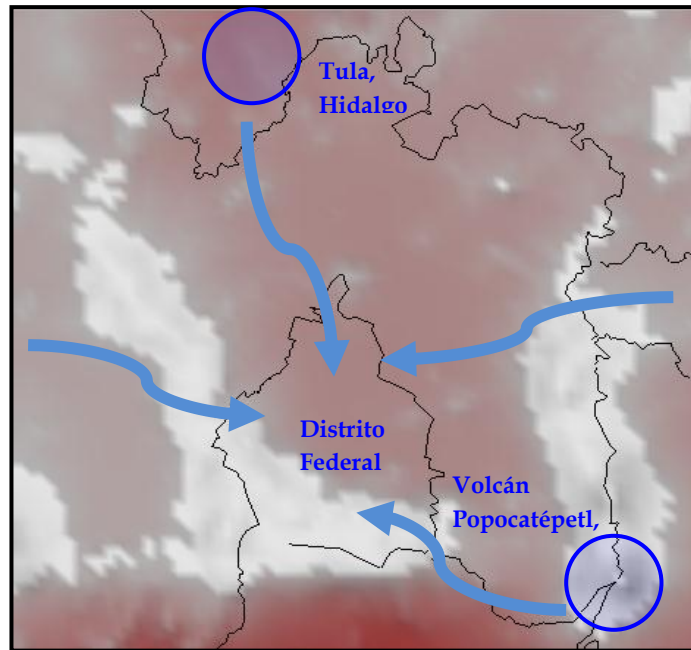


Ilustración 5.1. Localización de las fuentes de emisión de SO_2 consideradas.

Los resultados del modelo y su posterior visualización en tres dimensiones muestra que en algunas fechas la emisión del volcán es acarreada por los vientos hacia la ZMVM y aunque la altura del Popocatepetl es un factor limitante, en este caso los patrones de los vientos tuvieron un papel importante en la distribución de las concentraciones y su influencia en la calidad del aire de la Ciudad de México. Si bien las emisiones del sur-sureste pueden ser consideradas provenientes del volcán como en la fecha del 12 de enero del 2009 donde la visualización en dos dimensiones muestra que la emisión proviene del volcán mientras que un análisis en tercera dimensión revela que el SO_2 rodea el Popocatepetl como se muestra en la ilustración

5.2.

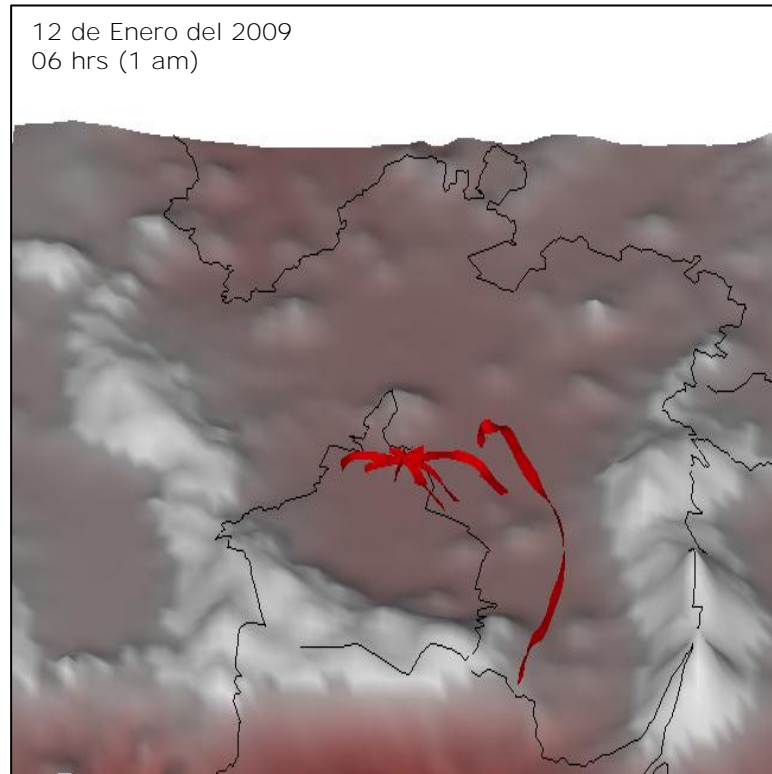


Ilustración 5.2. Trayectoria en 3D de los vientos en el día 12/Enero/2009.

En las ilustración 5.3 se muestra el patrón de vientos una hora antes y en la hora registrada con IE, se puede observar que en ambas horas los vientos rodean la zona montañosa correspondiente al Popocatepetl, estas emisiones pueden provenir de otra fuente y no precisamente atribuirse al volcán. Para determinar que sucede en estos casos es necesario ampliar el dominio de modelación para seguir las trayectorias más allá de los límites de la ZMVM.

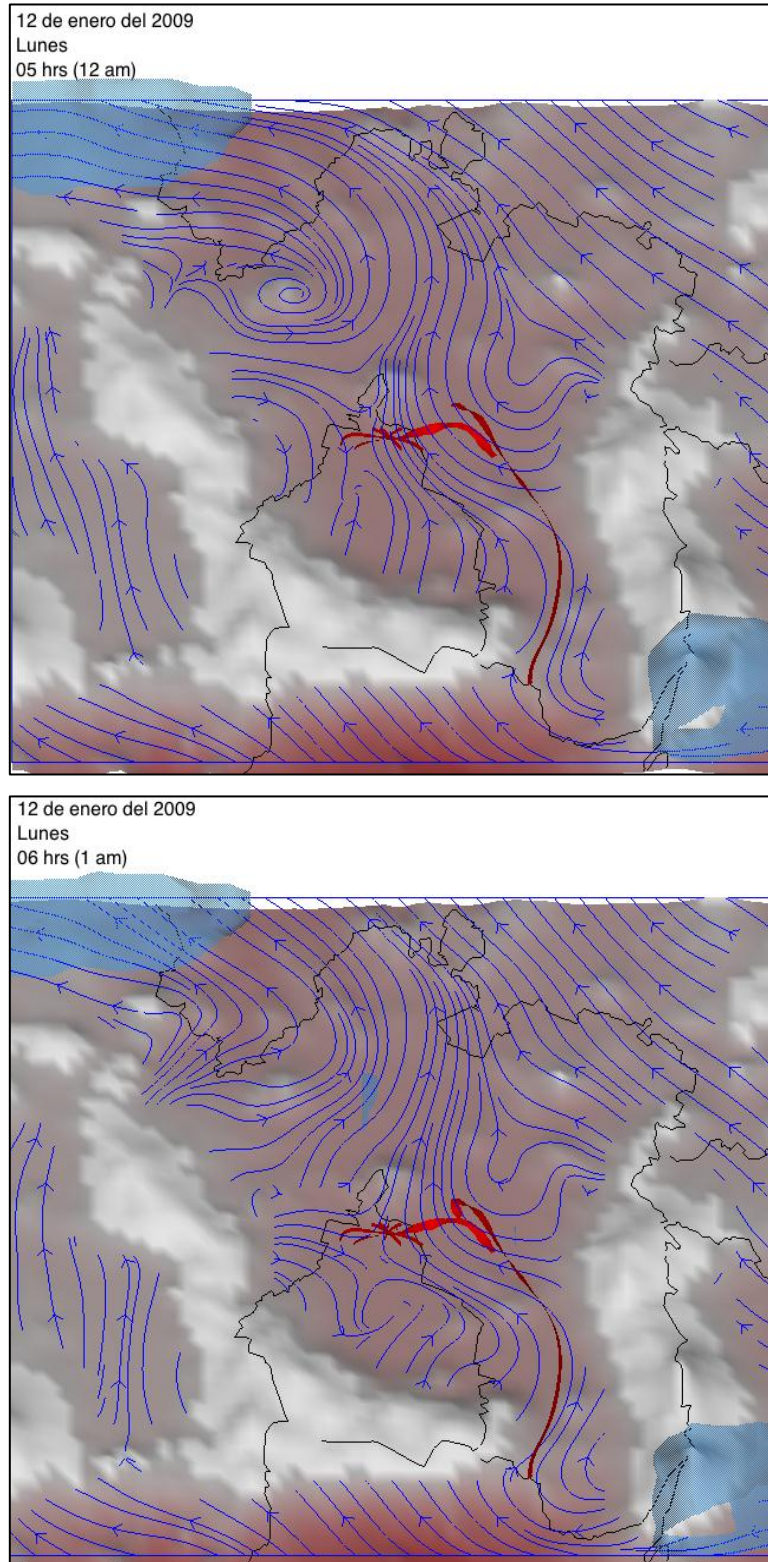


Ilustración 5.3. Visualización del patrón de los vientos hacia la ZMVM en el 12 de enero del 2009.

Un estudio realizado en noviembre de 1997, revela que las mediciones de SO₂ y CO registradas en la Ciudad de México son afectadas por emisiones volcánicas, ya que bajo la influencia de estas emisiones, la concentración de SO₂ puede alcanzar más de cuatro veces el promedio mensual de 0.02 ppmv y los mayores picos de concentración son observados durante la noche en lugares lejanos a las fuentes de emisión antropogénica de la ciudad. La producción en la cantidad de partículas de sulfato muestra incrementos bajo condiciones de alta concentración de SO₂ debido a emisiones volcánicas y alta humedad en el ambiente (Raga et al, 1999), es por esta razón que las emisiones del volcán no se deben omitir del inventario ya que si se contemplaran en este, el pronóstico sería más cercano a la realidad y se podrían predecir contingencias que afectan la calidad del aire, basándose en monitoreo del volcán y patrones del viento.

Cuando fueron analizados el comportamiento de los vientos en fechas con vientos de sur hacia la ZMVM reveló que aún con las zonas montañosas que se encuentran alrededor de la metrópoli, las emisiones si descienden como parte del efecto *brisa montaña y valle* llevando consigo el SO₂ volcánico y antropogénico, por lo tanto podemos decir que esto también contribuye al incremento extraordinario registrado por la Secretaría de Medio Ambiente.

La visualización con en dos dimensiones dio como resultado una serie de trayectorias de SO₂, haciendo un resumen de estos resultados se tiene que:

- El 20.27% de los casos, las emisiones son provenientes del volcán Popocatepetl.

- Con un porcentaje de 35.7%, indica que las emisiones en los días con incrementos extraordinarios provienen de Tula, Hidalgo.
- El 44% de las emisiones de SO₂ en los días con incremento extraordinario, son provenientes fuentes mas alejadas de la ZMVM y no estaban consideradas en el estudio.

Aunque las fuentes de emisión consideradas si tuvieron influencia en los días con IE de SO₂, el mayor porcentaje de las trayectorias del contaminante no señala ninguna de las fuentes mencionadas, esto indica que se debe ampliar el dominio del estudio para determinar las otras fuentes externas de SO₂ aparte de las ya consideradas, esto con el fin de mejorar la calidad del aire que respiramos.

Al finalizar la modelación para las fechas de los años 2007-2009, se realizó la recopilación de datos de SO₂ para determinar los incrementos extraordinarios en concentración en el 2010, en el cual se encontraron cinco fechas en el transcurso del año con una concentración mayor a las 0.200 ppm, posteriormente se hizo la misma modelación con MCCM para estas nuevas fechas con resultados se encuentran en el Anexo 8.9 y se resumen en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Resultados de la modelación para días con IE en el 2010.

FECHA	CONCENTRACIÓN SO₂ (PPM)	HORA	ESTACIÓN REGISTRADA	TRAYECTORIA
27 Enero 2010	0.310	1 am	Villa de las Flores (VIF)	Noroeste
24 Febrero 2010	0.216	9 am	Tultitlán (TUL)	Norte
03 Marzo 2010	0.258	3 am	Villa de las Flores (VIF)	Noroeste
18 Marzo 2010	0.344	2 am	Tultitlán (TUL)	Noroeste
13 Noviembre 2010	0.248	10 am	Tultitlán (TUL)	Noroeste

Como se puede observar en la tabla 5.1 y en las imágenes del Anexo 8.9, la mayoría de las trayectorias de SO₂ provienen de la zona noroeste de la ZMVM, con lo cual podemos decir que estos incrementos en la concentración tuvieron influencia de una fuente externa que en este caso estaría localizada en la zona industrial de Tula, Hidalgo y aunque el volcán tuvo emisiones importantes, éste no tuvo influencia ya que los vientos no favorecieron el desplazamiento sureste-norte.

Con los resultados de los años 2007-2009 y ahora 2010, se observa que la zona industrial de Tula afecta significativamente la calidad del aire de la Ciudad de México durante todo el año, en algunos años sólo se presentan incrementos de SO₂ a principios de año como es el caso del 2008 y 2009

pero en 2010 están presentes a principios y finales del año, lo cual es preocupante por las afecciones a la salud de la población.

6. CONCLUSIONES.

La inclusión del promedio de las emisiones del volcán al inventario se llevo a cabo y se determinó que estas emisiones de origen natural si tienen influencia en la calidad del aire de la ciudad, con esto se mejoró el pronóstico de MCCM como se puede ver en los resultados del índice de concordancia para los días 12/junio/2007, 28/febrero/2008 y 4/febrero/2009, no obstante, la emisión que se utilizó es un promedio anual del 2006 y además se hizo la consideración para el modelo de que se trata de una emisión constante, por lo tanto se recomienda utilizar el monitoreo del volcán para determinar en que días la emisión volcánica tiene influencia en la contaminación atmosférica y predecir contingencias en la ciudad dependiendo de la dirección que lleven los vientos.

El señalar las fuentes de emisión en los días con incremento extraordinario de SO_2 fue uno de los objetivos a cumplir y con el uso de MCCM se realizó el pronóstico que reveló la influencia de las dos fuentes consideradas para el estudio en la Ciudad de México. Aunque la emisión del Popocatepetl es significativa los fenómenos naturales como es el SO_2 volcánico no son controlables ni son aplicables acciones preventivas a estos fenómenos, aún así, es importante considerar estas emisiones en el inventario para que los datos de pronóstico sean más cercanos a la realidad y prevenir a la población de alguna contingencia ambiental provocada por emisiones del volcán.

Se observó que el comportamiento de los vientos son un factor fundamental para la dispersión del contaminante, ya que se analizaron a mayor detalle y reveló que, aún con los factores topográficos que se encuentran alrededor

de la ZMVM, las emisiones si descienden como parte del efecto brisa de montaña y valle llevando consigo SO₂ volcánico y antropogénico.

La hipótesis de que cuando se tienen vientos del sur implica que viene del volcán no es totalmente exacta ya que en ocasiones se tiene altas concentraciones de SO₂ y no provienen del volcán, como lo es el caso del 12 de enero 2009 en ese episodio de alta concentración de SO₂ proviene de otra fuente que no es el Popocatepetl, pero tiene influencia en la región.

La contaminación proveniente de Tula no es novedad y no sólo SO₂ se emite de esta región industrial, sino que también otros compuestos dañinos a la salud como son los compuestos orgánicos volátiles y su aportación en la mala calidad del aire de la Ciudad de México es significativa, la falta de estrategias de mitigación para controlar la contaminación al ambiente de manera efectiva, hace que la emisión de ésta y de otras zonas industriales afecte la salud de la población cada día.

Si bien los límites máximos permisibles que establecen las NOM no son aplicables a estos incrementos extraordinarios de SO₂ ya que estos incrementos son registrados por hora, mientras que las establecidas en la Norma Oficial son basadas en promedios de 24 horas y anuales. Sin embargo, las recomendaciones establecidas por la OMS en 2005 si son rebasadas significativamente, entonces con esto se recomienda una modificación a las normas mexicanas en base a la guía de la Organización Mundial de la Salud y en beneficio de la población que esta constantemente expuesta.

En cuanto al modelo usado, que tiene como objetivo relacionar matemáticamente el efecto de las emisiones de una fuente en concentraciones a nivel de suelo y establecer si los niveles permisibles están siendo o no excedidos, se concluye que MCCM tiene un desempeño aceptable, sin embargo, la eficacia de la predicción de un modelo siempre dependerá de la exactitud de los datos de entrada, datos de emisiones y meteorología que se le proporcionen (Godish, 1991) y por esto es importante tener en consideración todas las fuentes, tanto naturales como antropogénicas.

7. REFERENCIAS.

1. Aparicio Juárez, Rosa María (2010). *Procesamiento de datos de emisión de dióxido de azufre obtenidos por espectrometría de absorción óptica diferencial en el volcán Popocatepetl* (Tesis de licenciatura- BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA). Disponible en: http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/TESIS_ROMAPJU.pdf
2. Basaldud R.; Grutter M.; Baumgardner D.; Harig R.; Junkerman W.; Rivera-Cardenas C.; Delgado H.; Woehrschimmel H. (2007). *Optical remote sensing of the SO₂ plume from Popocatepetl volcano (Mexico): 2D visualization and flux estimations*. American Geophysical Union, Spring Meeting 2007, abstract #A33A-14.
3. DeFoy B., Bei N., Herndon S., Huey L., Martínez A., Ruiz-Suárez L., Wood E., Zavala M., and Molina L.: Hit from both sides: tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO₂ retrievals during the MILAGRO field campaign, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 9, 16563-16605, doi:10.5194/acpd-9-16563-2009, 2009.
4. Forkel R., García Reynoso A. (2003). *Manual del Multiscale Climatic Chemistry Model (MCCM)*.
5. García R. A., T. Schoenemyer, A. Jazcilevich D., G. Ruiz-Suarez, V. Fuentes-Gea: 2000, *Implementation of the Multiscale Climate Chemistry Model (MCCM) for Central Mexico*, Air Pollution VII, ISBN 1-

- 85312-822-8, Editors: J.W.S Longhurst, C.A. Brebbia, H.Power, WIT Press.
6. García Escalante, Jennifer Sandra (2008). *Impacto del sector energético de Tula Hidalgo en la Calidad del Aire de la ZM VM* (Tesis de licenciatura- UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO).
Disponible en:
http://132.248.9.195:8080/tesdig2/Procesados_tesis_2008/octubre/0634411/Index.html
 7. Gobierno del Estado de Hidalgo (2011). *Corporación de Fomento de Infraestructura Industrial. Parques industriales*. Consultado el 30 de Junio del 2011. Disponible en: <http://cofoin.hidalgo.gob.mx/>
 8. Grutter M., Basaldud R., Rivera C., Harig R., Junkerman W., Caetano E., and Delgado-Granados H.: SO₂ emissions from Popocatepetl volcano: emission rates and plume imaging using optical remote sensing techniques, Atmos. Chem. Phys., 8, 6655-6663, doi:10.5194/acp-8-6655-2008, 2008.
 9. Instituto de Geofísica, UNAM (2011). *Vulcanología. Popocatepetl*. Consultado el 30 de Junio del 2011. Disponible en: <http://www.geofisica.unam.mx/vulcanologia/spanish/volcanes/009popoc.html>
 10. Instituto Nacional de Ecología (2003). *Inventario de emisiones del Estado de Hidalgo del año 2002*. Consultado el 1 de Julio del 2011. Disponible en: http://www.ine.gob.mx/descargas/calairt3_gob_edo_hgo.pdf

11. Instituto Nacional de Ecología (2009). *Herramientas de análisis, modelos matemáticos, proyectos de modelación*. Consultado el 4 de julio del 2011. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/calair-herramientas-analisis/568-calair-proyectos-modelacion>
12. North American Regional Reanalysis. Base de datos de cada 3 horas para los años 2007-2009. Consultado el 5 julio del 2011. Disponible en:
<http://dss.ucar.edu/pub/narr/>
13. Organización Mundial de la Salud (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Resumen de evaluación de los riesgos*. Consultado el 4 de Julio del 2011. Disponible en:
http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair_agg/en/index.html
14. Raga, G. B., D. Baumgardner, G. Kok, A. Baez and I. Rosas (1999), *Evidence for Volcanic Influence on Mexico City Aerosols*. Geophysical Research Letters, Vol. 26, No. 8, 1149-1152.
15. Scripps Institution of Oceanography, UC SAN DIEGO. *Volcano expedition to the Mariana Islands, tools and techniques, MiniDOAS*. Consultado el 3 de Julio del 2011. Disponible en:
http://sio.ucsd.edu/marianas/equipment/mini_doas.cfm
16. Secretaría de Gobernación. Centro Nacional de Prevención de Desastres (2011). *Monitoreo Volcánico*. Consultado el 3 de Julio del 2011. Disponible en:

<http://www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstVolcanica/MVolcan/DescripcionMvolcan/>

17. Secretaría de Medio Ambiente del D.F., SIMAT (2011). **Base de datos RAMA (2007-2009)**. Consultado el 30 de Junio del 2011. Disponible en:

<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=2&opcioninfoproductos=2>

18. Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal (2011). **Sistema de Monitoreo Atmosférico**. Consultado el 28 Junio del 2011. Disponible en:

<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=4&opcionrecursostecnicos=2>

19. Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, SIMAT (2011). **Emisiones extraordinarias**. Consultado el 30 de Junio del 2011. Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pneventos.htm>

20. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011). **Normas Oficiales Mexicanas vigentes**. Consultado el 3 de Julio del 2011. Disponibles en:

<http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/normas/Pages/normasoficialesmexicanasvigentes.aspx>

21. Secretaría de Medio Ambiente, SIMAT (2011). **Indicadores de calidad del aire**. Consultado el 30 de Junio del 2011. Disponible en:

<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=2&opcioninfoproductos=26>

22. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (2010). *Inventario de emisiones de contaminantes criterio 2008*. Consultado el 30 de Junio del 2011. Disponible en: http://www.sma.df.gob.mx/inventario_emisiones/index.php?op=pub

23. SEMARNAT, SSA, Secretaría de medio ambiente del D.F., Secretaría de Ecología del Edo. de México, (2003). *Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México*. Disponible en medio impreso y en medio electrónico en: http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_publicacion=394

24. Willmott, C. J.: 1981, *On the validation of models*. Phys. Geography 2, 184-194.

8. ANEXOS.

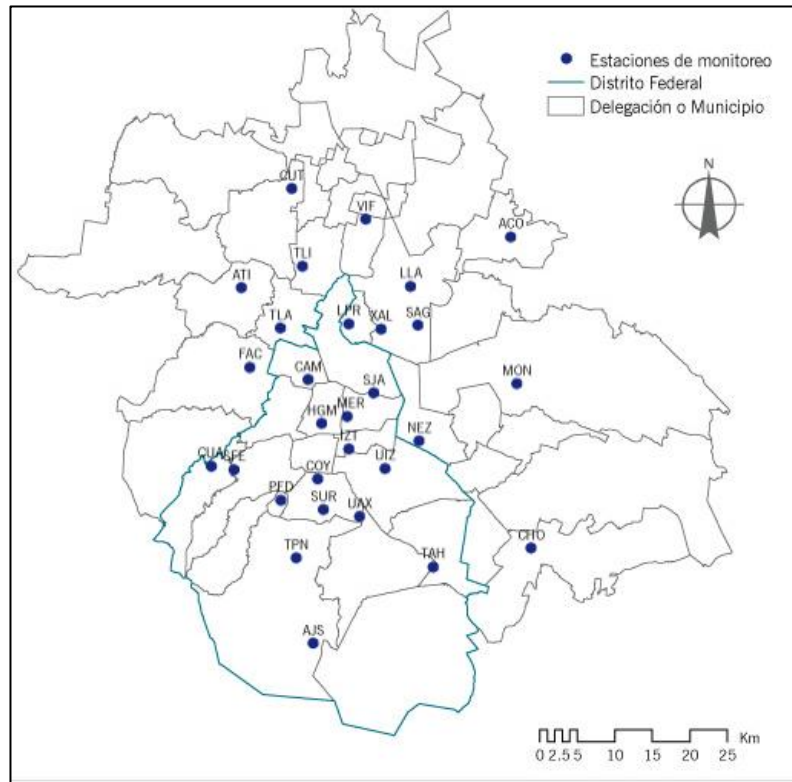
8.1. RAMA: Analizadores por estación de monitoreo y período de operación. Disponible en:

<http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnrama2.htm#>

RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO (RAMA)

	Estación	Clave	O ₃	SO ₂	NO ₂	NOx	CO	PM10	H ₂ S	PM2.5
1	Lagunilla	LAG	Jun-1990 >	Dic-1994 >	Dic-1994 >	Dic-1994 >	Ene-1986 >			
2	Vallejo	VAL		Ene-1986 >			Dic-1994 >			
3	Santa Ursula	SUR	Jun-2000 >	Ene-1986 >	Jun-2000 >	Jun-2000 >	Jun-2000 >	Jun-2000 >		
4	Tacuba	TAC	Jun-1993 >	Ene-1986 >	Feb-1993 >	Feb-1993 >	Dic-1992 >		1986-2002	
5	ENEP Acatán	EAC	Jul-1990 >	Ene-1986 >	Jun-1992 >	Jun-1992 >	Jun-1992 >	Jun-2000 >		
6	Los Laureles	LLA		Ene-1986 >						
7	La Presa	LPR		Ene-1986 >						
8	La Villa	LVI		Ene-1986 >				Ene-1993 >		
9	San Agustín	SAG	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Sep-1992 >	Sep-1992 >	Dic-1994 >	Jun-2000 >		Ago-2003 >
10	Atzacapotzalco	AZC	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Dic-1994 >	Dic-1994 >	Dic-1994 >			
11	Tlalnepantla	TLA	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1993 >		Ago-2003 >
12	Xalostoc	XAL	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1993 >		
13	Merced	MER	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1993 >	1986-2002	Ago-2003 >
14	Pedregal	PED	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1993 >		
15	Cerro de la Estrella	CES	Ene-1986 >	Dic-1994 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Ene-1993 >		
16	Plateros	PLA	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Dic-1994 >	Dic-1994 >	Ene-1986 >	Jun-2000 >		
17	Hangares	HAN	Ene-1986 >	Ene-1986 >	Jun-1992 >	Jun-1992 >	Jun-1993 >	Jun-2000 >		
18	UAM Iztapalapa	UIZ	Abr-1987 >	Ene-1993 >	Dic-1994 >	Dic-1994 >	Ene-1986 >			Ago-2003 >
19	Aragón	ARA		Mar-1993 >			Ene-1986 >			
20	Netzahualcoyotl	NET		1994 - 2000			1986 - 2000	1993 - 2000		
21	I.M.P.	IMP					Ene-1986 >			
22	Benito Juárez	BJU	1992-2005	Ene-1995 >	Nov-1992 >	Nov-1992 >	Ene-1986 >			
23	Taxqueña	TAX	Nov-1992 >	Ene-1995 >	Ene-1995 >	Ene-1995 >	Ene-1986 >	Jun-2000 >		
24	Metro Insurgentes	MIN					Ene-1986 >			
25	Cuitlahuac	CUI					1986 - 1993			
26	Tultitlán	TLI		Nov-1993 >	Nov-1993 >	Nov-1993 >	Nov-1993 >	Nov-1993 >		
27	Atizapán	ATI		Nov-1993 >	Nov-1993 >	Nov-1993 >	Nov-1993 >			
28	Villa de las Flores	VIF		Nov-1993 >	Nov-1993 >	Nov-1993 >	Nov-1993 >			
29	Cuajimalpa	CUA	Dic-1993 >							
30	Tlalpan	TPN	Dic-1993 >							
31	Chapingo	CHA	Dic-1993 >				1995 - 1996			
32	Tlahuac	TAH	Dic-1993 >	Nov-1993 >	1995 - 1996	1995 - 1996	1995 - 1996	Nov-1993 >		
33	Coyoacán	COY	Jun-2005 >							Ago-2003 >
34	San Juan de Aragón	SJA								Ago-2003 >
35	La Perla	PER								Ago-2003 >
36	Camarones	CAM								Ago-2003 >

ESTACIONES RAMA



8.2. REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA. Disponible en:

http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGEEPA_MPCCA.pdf

Capítulo 1 Artículo 6º. Para los efectos de este Reglamento se estará a las definiciones que se contienen en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la protección al Ambiente, así como las siguientes:

Emisión: La descarga directa o indirecta a la atmósfera de toda sustancia, en cualquiera de sus estados físicos, o de energía.

Fuente nueva: Es aquella en la que se instale por primera vez un proceso o se modifiquen los existentes.

Fuente fija: es toda instalación establecida en un sólo lugar, que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales, de servicios o actividades que generen o puedan generar contaminantes a la atmósfera.

Fuente múltiple: Aquella fuente fija que tiene dos o más ductos o chimeneas por las que se descargan las emisiones a la atmósfera, provenientes de un sólo proceso.

Inmisión: La presencia de contaminantes en la atmósfera, a nivel de piso.

Ley: La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

Plataforma y puertos de muestreo: Instalaciones para realizar el muestreo de gases o partículas en ductos o chimeneas.

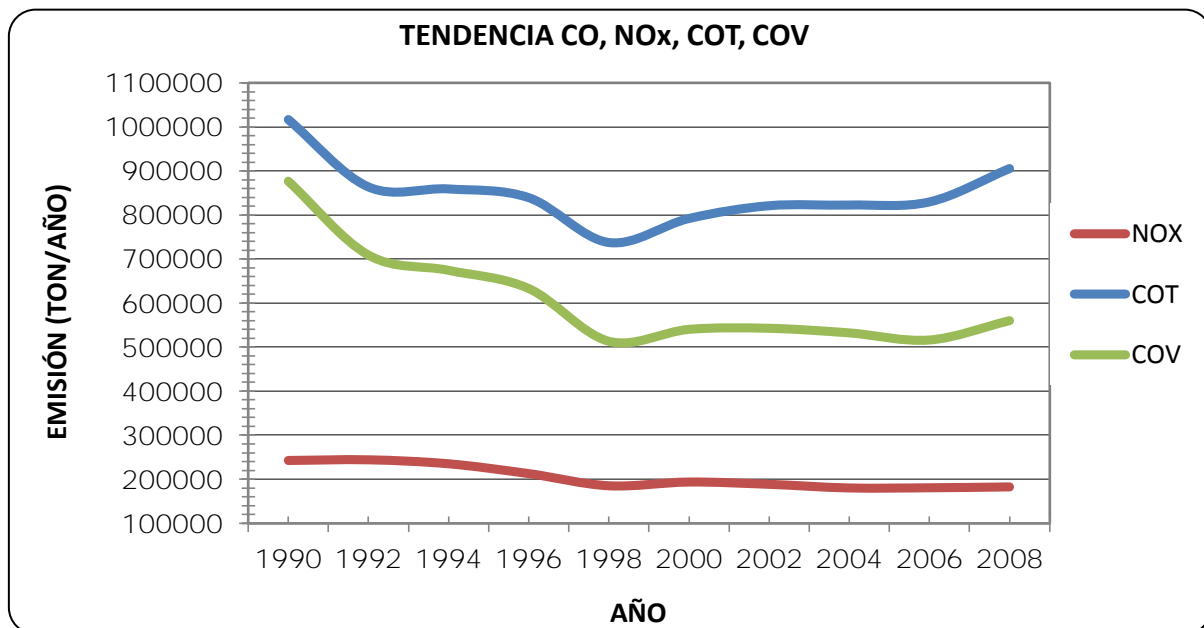
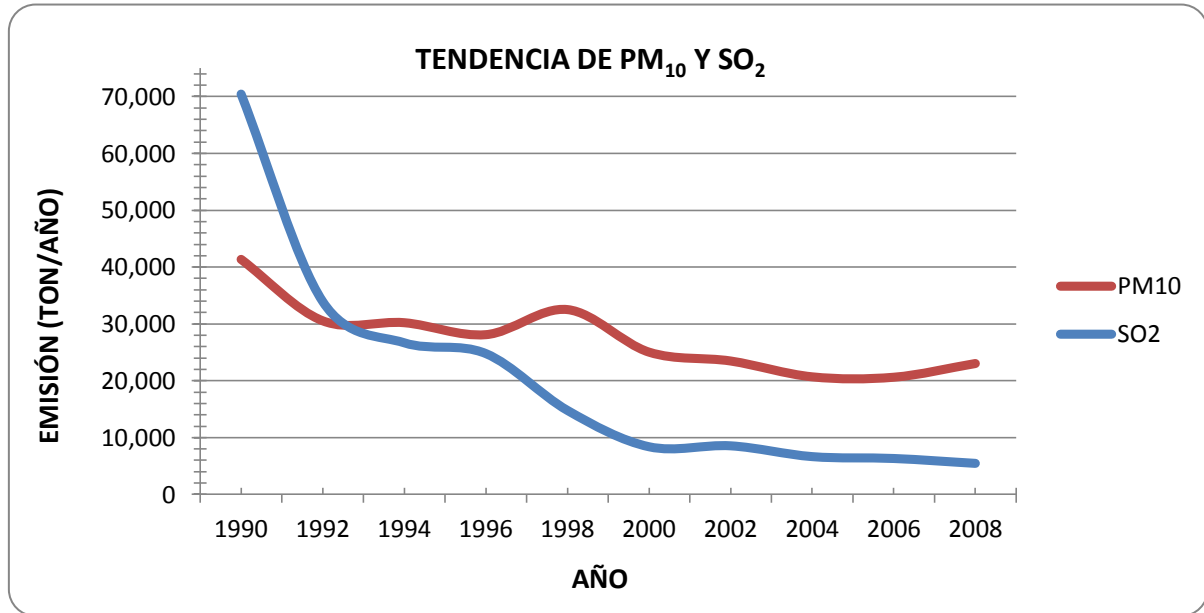
Reglamento: El Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera.

Secretaría: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología

Verificación: Medición de las emisiones o gases de partículas sólidas o líquidas a la atmósfera provenientes de vehículos automotores.

Zona crítica: Aquella en la que por sus condiciones topográficas y meteorológicas se dificulte la dispersión o se registren altas concentraciones de contaminantes a la atmósfera.

8.3. Gráficas de tendencias de contaminantes(1990-2008).



8.4. Aviso de Incremento Extraordinario en la concentración de SO₂.



Secretaría del Medio Ambiente
Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire
Dirección de Monitoreo Atmosférico

Fecha: 24 de Febrero de 2009
Hora: 08:00

AVISO DE INCREMENTO EXTRAORDINARIO

Le informamos que a las 02:00 horas de hoy, se registró en la estación LOS LAURELES de la zona NORESTE, un promedio horario de 0.340 ppm de dióxido de azufre (SO₂). Debido a esta situación, el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire de este contaminante pudiera rebasar los 100 puntos en las próximas 24 horas, para esta zona.

Lo anterior con la finalidad de instrumentar las acciones de vigilancia en la zona de impacto.

Se anexa archivo de Excel con hoja de gráficos.

ATENTAMENTE

DIRECCIÓN GENERAL DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE.

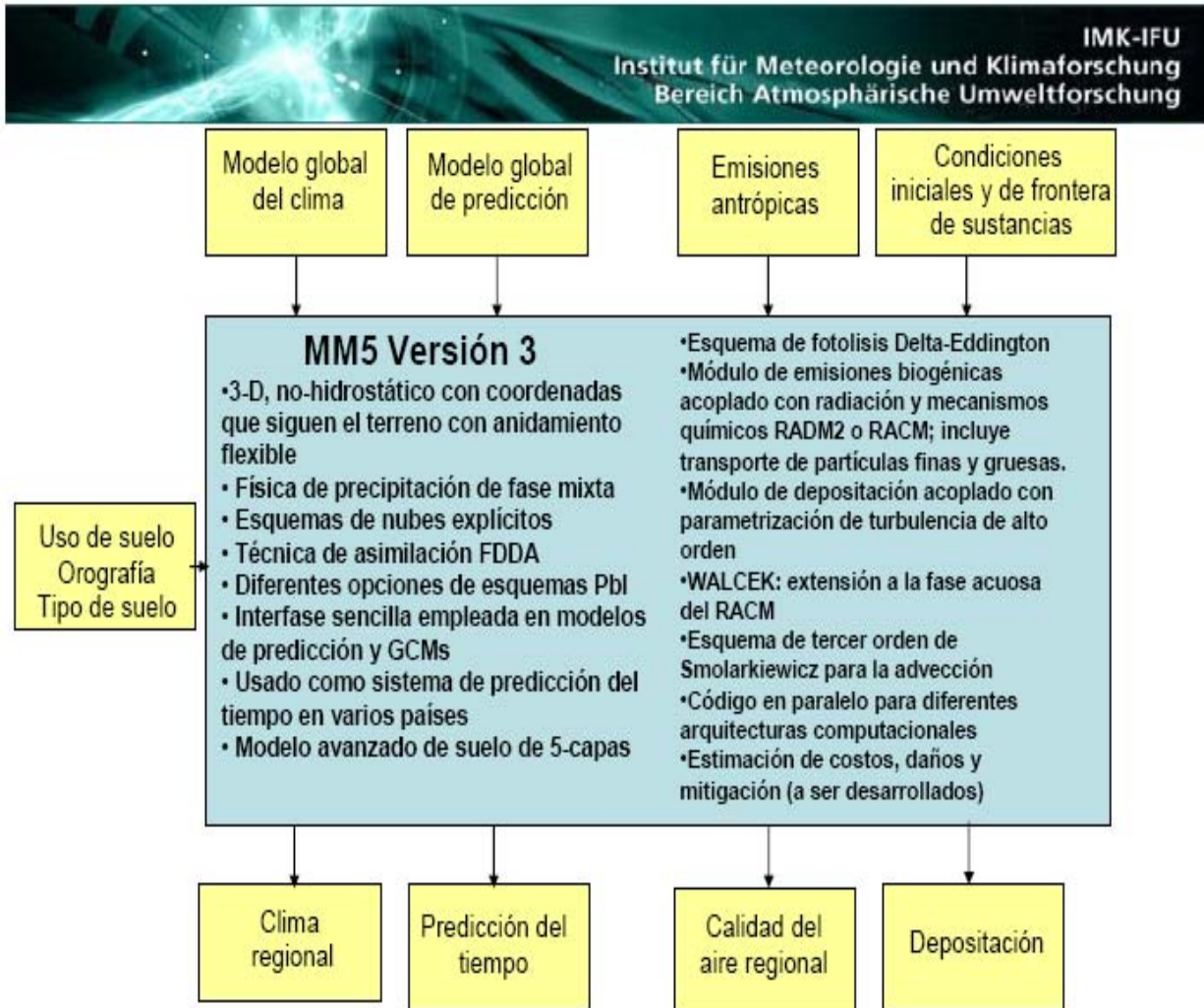


Agricultura No. 21 • 1 er. Piso • Col. Escandón • C.P. 11800
• Deleg. Miguel Hidalgo • Tel. 5278-9931 Ext. 6130



SA-ADDA-F-04(00)

8.5. MULTISCALE CLIMATE CHEMISTRY MODEL (MCCM). DESARROLLADO POR EL INSTITUTO FRAUNHOFER, ALEMANIA.



8.6. MODELOS DE MESOESCALA

Tipos de modelos atmosféricos

Los modelos atmosféricos deterministas pueden clasificarse de diferentes maneras de acuerdo con el criterio que se tome como referencia, por ejemplo, su escala espacial, o bien, la forma en que plantean las ecuaciones que describen el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera. Por su escala espacial, los modelos deterministas se pueden clasificar como modelos de *micro-escala*, *meso-escala*, *regionales*, *sinópticos* y *globales*.

Modelos atmosféricos de acuerdo con su escala espacial

Modelo	Dominio típico	Resolución típica
Microescala	200 x 200 x 100 m	5 m
Mesoescala (urbano)	100 x 100 x 5 km	2 km
Regional	1000 x 1000 x 10 km	20 km
Sinóptico (continental)	3000 x 3000 x 20 km	80 km
Global	65,000 x 65,000 x 20 km	50 x 50

Por la forma en que plantean las ecuaciones que describen el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, se les puede clasificar como modelos eulerianos (que usan un sistema de coordenadas fijo con respecto a la tierra) y lagrangianos (que usan un sistema de coordenadas que sigue el movimiento de la atmósfera).

8.7. DATOS DE MONITOREO VOLCÁNICO CON MINIDOAS. (Estaciones con registro de mayor emisión)

CHIPIQUIXTLE	Flujo [Kg./s]	Flujo [ton/día]	Vel. Viento [m/s]	Dirección del viento [DEG]
2007.11.13	14.39	1243.25	5.34	100.34

TLAMACAS	Flujo [Kg./s]	Flujo [ton/día]	Vel. Viento [m/s]	Dirección del viento [DEG]
2008.01.27	35.27	3196.96	10	0

TLAMACAS	Flujo [Kg./s]	Flujo [ton/día]	Vel. Viento [m/s]	Dirección del viento [DEG]
2008.01.27	35.27	3196.96	10	0

COLIBRÍ	Flujo [Kg./s]	Flujo [ton/día]	Vel. Viento [m/s]	Dirección del viento [DEG]
2008.02.28	10.63	918.71	3.8	277.6

COLIBRÍ	Flujo [Kg./s]	Flujo [ton/día]	Vel. Viento [m/s]	Dirección del viento [DEG]
2009.02.04	16.10	1391.61	9.5	307

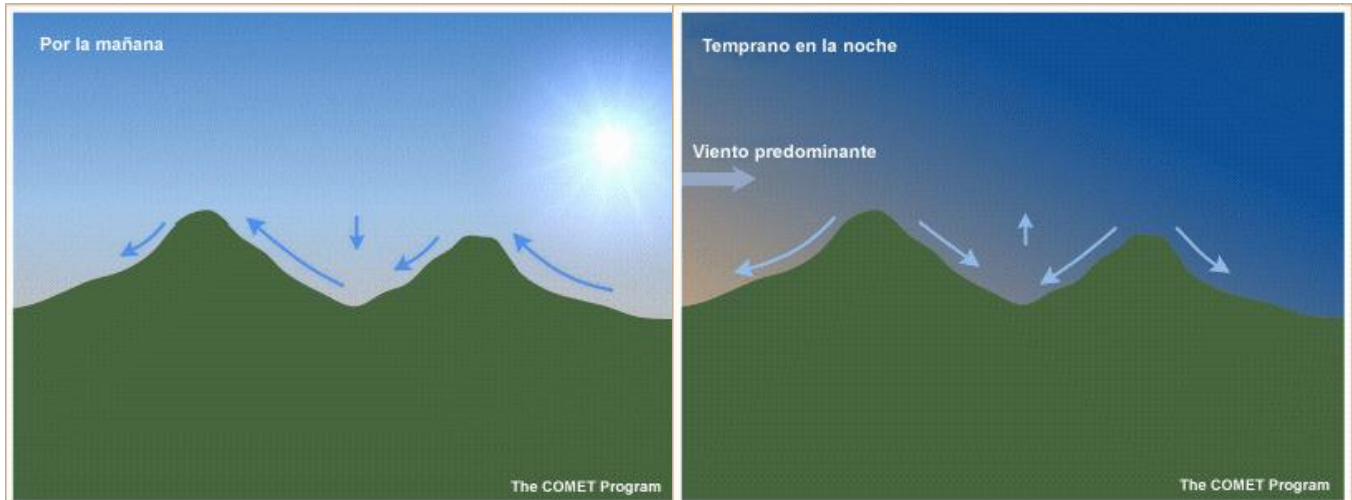
CHIPIQUIXTLE	Flujo [Kg./s]	Flujo [ton/día]	Vel. Viento [m/s]	Dirección del viento [DEG]
2007.11.13	24.85	2146.79	8.91	55.69

8.8. BRISA DE VALLE Y DE MONTAÑA.

Brisas de ladera ascendentes y descendentes.

Las brisas de ladera ascendentes y descendentes son componentes de un patrón local y diario de circulación del viento en las zonas de montaña que se observa con frecuencia en las pendientes de las montañas.

El desarrollo de estas brisas se ve favorecido bajo condiciones de gradiente de presión débil en la escala sinóptica. La formación e intensidad de las brisas de ladera ascendentes y descendentes depende del contraste en la temperatura del suelo provocado por el calentamiento diurno y el enfriamiento nocturno. El calentamiento y enfriamiento se intensifican cuando el cielo está despejado y el suelo está seco.



Fuente: http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mtnval_es/print.htm

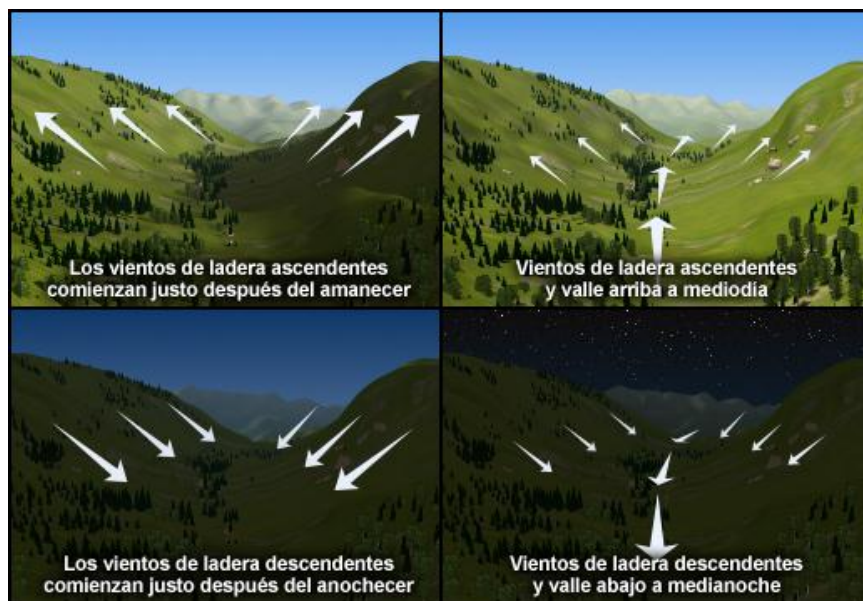
Consultado el 10 de Agosto del 2011.

Vientos valle arriba y valle abajo.

Los vientos valle arriba y valle abajo son parte importante del sistema tridimensional de circulaciones diurnas de valle y de montaña.

Las mismas condiciones ambientales que apoyan los vientos de ladera ascendentes y descendentes sustentan los vientos valle arriba y valle abajo. Al igual que los vientos de ladera, los vientos de valle alcanzan sus máxima intensidad cuando la atmósfera está despejada y vientos calmados. Por el contrario, la existencia de vientos fuertes en altura puede suprimir las brisas valle arriba y valle abajo al provocar mezcla vertical y perturbar la capa de inversión.

Los efectos de los vientos de valle y de montaña también pueden modificar los patrones de vientos existentes en la mesoescala. Entre las condiciones ambientales que pueden inhibir los vientos valle arriba podemos mencionar la humedad del suelo y el manto de nieve, que minimiza el calentamiento diurno de la superficie. Sin embargo, estas condiciones pueden, a su vez, fomentar la generación de vientos valle abajo por la noche.

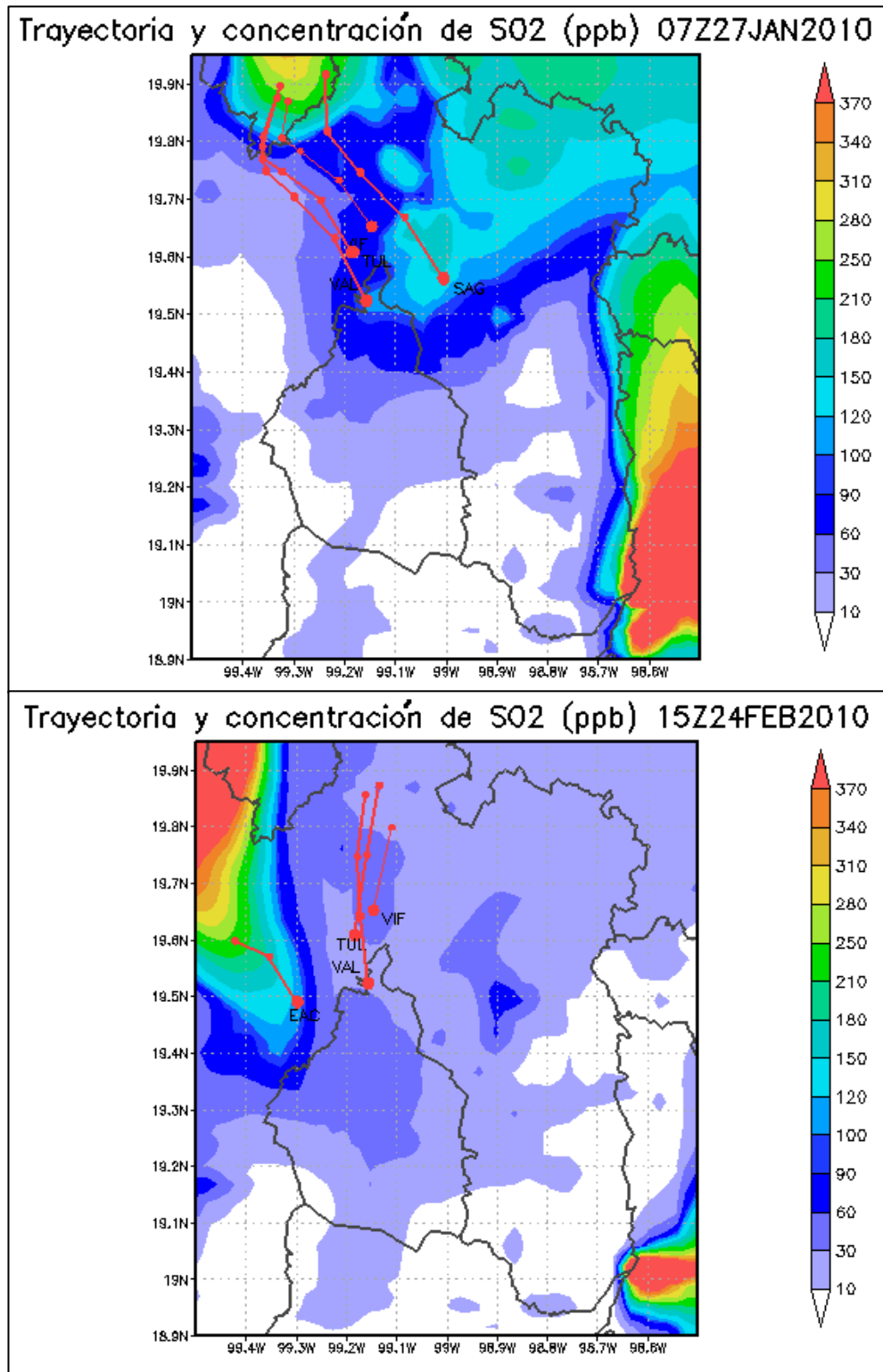


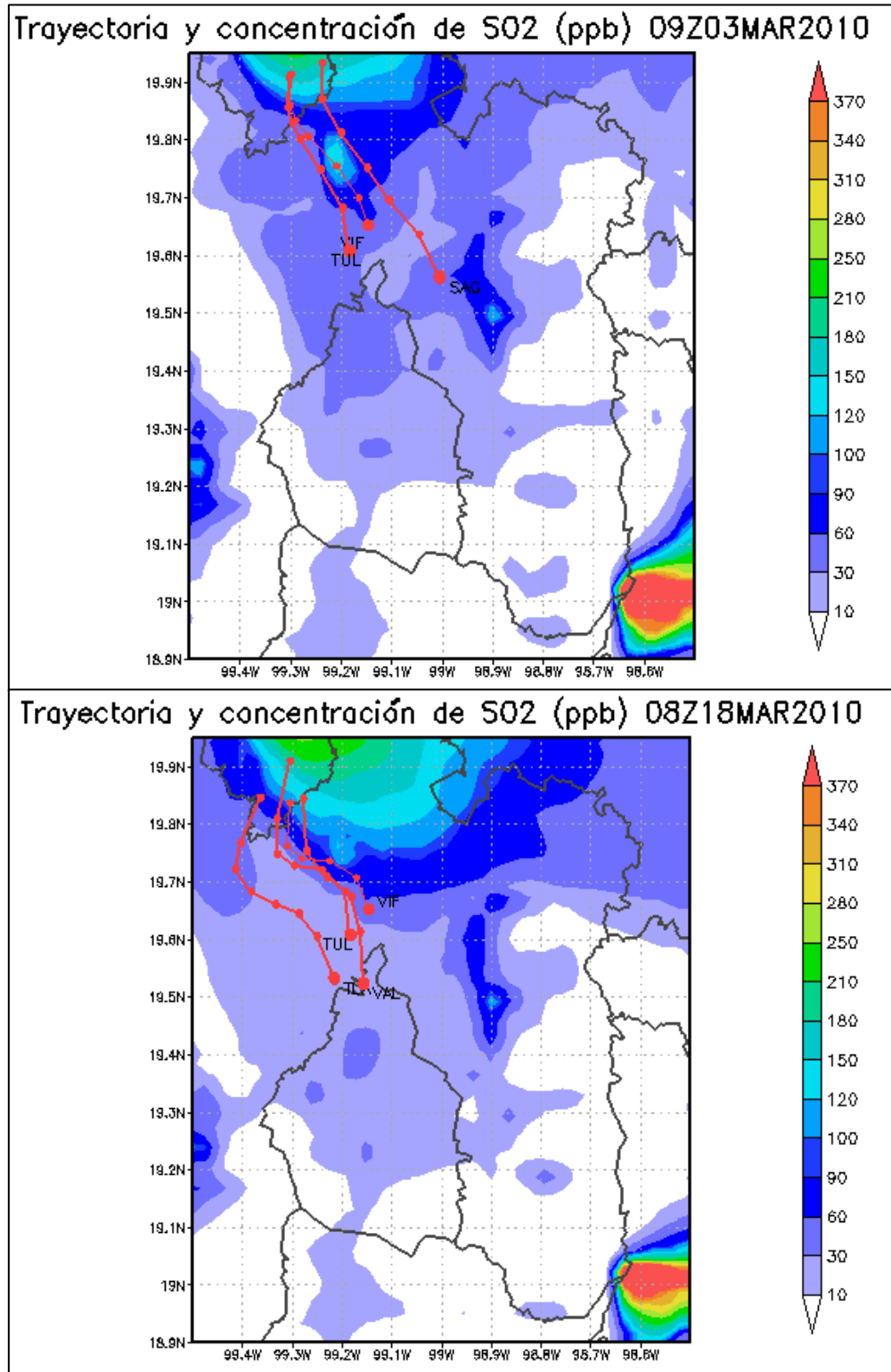
The COMET Program

Fuente: http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mtnval_es/print.htm

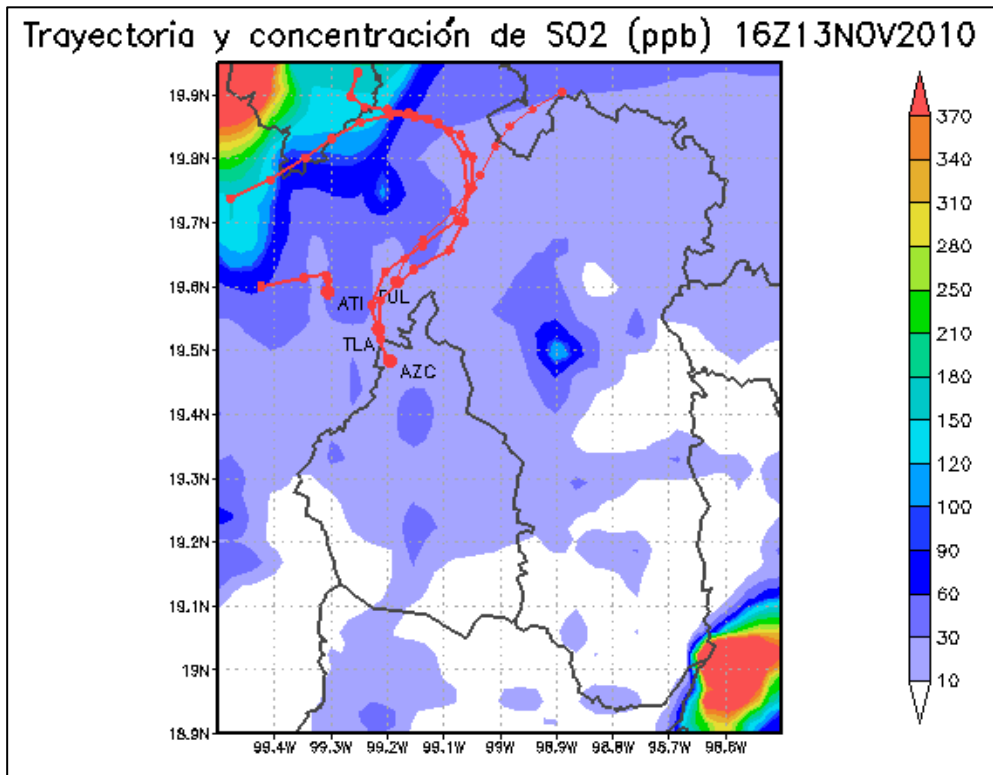
Consultado el 10 de Agosto del 2011.

8.9. RESULTADOS EN DOS DIMENSIONES DE LA MODELACIÓN PARA EL AÑO 2010.





L



Las imágenes muestran la trayectoria de dióxido de azufre hacia la estación que registro el incremento extraordinario, cada punto es una hora de retroceso en la trayectoria y a la hora presentada se le restan 6 horas para que este en hora del centro.