



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“ ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CUENCA ATMOSFÉRICA DEL BAJÍO, MÉXICO MEDIANTE MODELACIÓN: ESTUDIO DE CASO 2008”

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(FISICOQUÍMICA DE LA ATMÓSFERA)

PRESENTA:

JENNIFER SANDRA GARCÍA ESCALANTE

JURADO EXAMINADOR

Dr. José Agustín García Reynoso. (Director de Tesis)
Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez. (Presidente)
Dr. Ernesto Caetano Neto. (Vocal)
Dra. Beatriz Cárdenas González. (Suplente)
Mtro. Enrique Kato Miranda. (Suplente)



México D.F. Agosto 2010





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.

DEDICADO A:

A Ti

*que sin pedir nada a cambio,
me regalas el olor de una flor, la sonrisa de un desconocido, la caricia del viento.*

A Ti

*que me regalas el sol en la cara, la brisa de las noches, el arco iris cuando mas lo necesito, y si tengo
suerte un rojo atardecer.*

A Ti

*que nunca veo, pero en quien creo, que no puedo tocar, pero que siento, que no puedo explicar, pero
lo único que doy por hecho.*

A Ti

*que te busco, que te espero, que te doy, en quien confié, a quien espero ver algún día, y sé que veré
sonriendo y con los brazos abiertos.*

A Ti

*que me regalaste a mis padres de quienes aprendo, a mis hermanos que amo, a mis amigos que
quiero, a un ser que adoro por ser tan diferente, a un maestro que nunca olvidare.*

A Ti

*de quien solo el nombre conozco,
que me trajiste hasta aquí, que me dejas disfrutar, reír, llorar, aprender, tropezar, amar.*

A Ti

*JESUS
MIDIOS
MI TODO.*

*A; Mi mamá Ma. De los Ángeles, a mi hermana Mónica, a mi hermano Jorge, los amo y espero
sigamos unidos por siempre, a mis amigos, Linda y Pablo porque la vida a su lado es más fácil y
siempre contarán conmigo. Y a todas las personas con las que he compartido una parte de mi vida y
ahora están o no en ella.*

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra y al Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, por ser mi hogar en los últimos años y darme el honor de crecer como persona y realizar mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAcyT), por el apoyo económico otorgado para realizar mi proyecto de investigación, durante dos años de maestría.

Al Dr. José Agustín García Reynoso, por todo su apoyo y tiempo dedicado a la realización de este proyecto de investigación, encontrando en él no sólo a un excelente tutor, sino a un amigo al que admiro y aprecio.

Al Dr. Gerardo Ruiz por su valiosa contribución para el mejoramiento de este trabajo.

Al Dr. Ernesto Caetano Neto, por sus consejos y observaciones realizadas que ayudaron a enriquecer este trabajo.

Al M en C. Enrique Kato Miranda, por aceptar ser parte de mi jurado, apoyándome con sus consejos y conocimientos para la realización de este trabajo y facilitando los datos para la modelación.

A la Dra. Beatriz Cárdenas González, por su apoyo y consejos para la realización de este trabajo.

A mis compañeros del Posgrado y del CCA por su valiosa amistad y apoyo en todos los aspectos de mi vida y por que encontré más fácil y placentera mi estancia con ustedes que ahora son mis amigos.

A todos ustedes, GRACIAS...

El secreto del mundo es que todas las cosas subsisten y no mueren; tan sólo se retiran y desaparecen de nuestra vista para regresar más tarde. Nada muere; los hombres fingen estar muertos y tienen que aguantar la parodia de sus funerales y afligidas necrológicas, y ahí están, de pie, mirando por la ventana, sanos y salvos, con un nuevo y extraño disfraz.

RALPH WALDO EMERSON

Mi doctrina es: Vive de tal modo que llegues a desear vivir otra vez, éste es tu deber “Porque vivirás de todas formas”

NIETZSCHE

Los hechos de una vida previa encauzan la vida presente.

TOLSTOI

Tengo todo eso que te falta para empezar a recorrer ese camino azul que no tendrá final, tengo las ansias de triunfar y que el premio sea tu risa y una que otra lagrima, tengo tantas cosas para ti, que te pondría en las manos para no mentir, tengo todo eso de lo que te mueres de ganas, tengo ganas de que te des cuenta, “Que soy yo lo que te falta”

JSGE

INDICE DE TABLAS	3
INDICE DE ILUSTRACIONES	4
RESUMEN	7
1.INTRODUCCION	8
2.OBJETIVOS	11
OBJETIVO GENERAL	11
OBJETIVOS PARTICULARES	11
3.JUSTIFICACION	12
4.MARCO TEORICO	15
4.1 NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE	15
4.2 EFECTOS EN LA SALUD OCASIONADOS POR LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	16
4.2.1 OZONO (O ₃)	17
4.2.2 DIOXIDO DE AZUFRE (SO ₂)	17
4.2.3 MONOXIDO DE CARBONO (CO)	18
4.2.4 OXIDOS DE NITROGENO (NO _x)	19
4.2.5 COMPUESTOS ORGANICOS VOLATILES (COV)	19
4.2.6 PARTICULAS IGUALES O MENORES A 10 MICRAS (PM)	20
4.1 CALIDAD DEL AIRE	20
5.AREA DE ESTUDIO	25
6. MÉTODO	27
6.1 OBTENCIÓN DE FECHAS A MODELAR	27
6.2 CALIDAD DEL AIRE EN LA REGION	35
6.3 INVENTARIO DE EMISIONES	37
6.3.1 EMISIONES DE ÁREA Y MÓVILES	38
6.3.2 EMISIONES PUNTUALES	40
6.4 DESCRIPCION DEL MODELO DE MESOESCALA MM5	42
6.4.1 TERRAIN	43
6.4.2 REGRID	43
6.4.3 LITTLE_R	44
6.4.4 INTERPF	44
6.4.5 MM5	44
6.5 DESCRIPCION DEL MODELO MCCM	45
6.5.1 MCCM	46
6.6 EVALUACIÓN DEL MODELO	47
6.6.1 ESTRATEGIA DE ANIDAMIENTO	51
6.6.2 CARACTERÍSTICAS DEL DOMINIO	51
7. RESULTADOS	52

7.1 COMPARACIÓN DEL MODELO vs RED DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE DEL ESTADO.	52
7.2 ANALISIS CUALITATIVO	60
8. ANALISIS DE RESULTADOS	70
9. CONCLUSIONES	72
REFERENCIAS	74



RESUMEN

La modelación de la calidad del aire proporciona valiosa información acerca de la calidad de este en las ciudades, y por lo tanto, constituye una herramienta indispensable en el desarrollo de los programas de gestión de la calidad del aire que implementan las autoridades ambientales y demás sectores involucrados, con el fin de llevar a cabo acciones a corto, mediano y largo plazo y con esto proteger la salud de la población.

El Bajío es un sector importante del país, por sus giros de generación de energía eléctrica, refinación del petróleo, petroquímica, metalúrgica, química, automotriz y alimentos, siendo las principales emisoras de contaminantes la generación de energía y la refinación del petróleo, estas se localizan en el municipio de Salamanca, la Refinería Ingeniero Antonio M. Amor (RIAMA) y la termoeléctrica Salamanca, son las principales fuentes que afectan la calidad del aire de las ciudades cercanas con alto índice de población, como son; Silao, Celaya, Irapuato y León. Este trabajo presenta un estudio de la calidad del aire, un inventario de emisiones desarrollado para modelación y los resultados obtenidos por un modelo de calidad del aire implementado en la región, reconocida en años recientes como una Cuenca atmosférica. Así mismo se describe la metodología para la selección de días representativos del año 2008. Los resultados muestran que el empleo de la selección de un conjunto de días aleatorios del 2008 es representativo de todo el año. Las comparaciones entre los resultados del modelo y mediciones muestran que el modelo posee un buen desempeño para reproducir las concentraciones de ozono, y un desempeño menor para SO_2 , se observa que los picos de ozono se encuentran viento abajo y generalmente hacia el oeste de las ciudades, lo cual es un problema para las poblaciones cercanas, se muestra que existe un transporte de este a oeste de los contaminantes y las condiciones topográficas inducen una dispersión baja de los contaminantes sobre todo cuando los vientos son calmos, haciendo que los contaminantes se concentren en el área de estudio en donde se encuentra el municipio de Salamanca.

1.INTRODUCCION

Este estudio surge con la finalidad de conocer y comprender el fenómeno de la contaminación en la cuenca atmosférica del Bajío, debido a que las emisiones no sólo son un problema local, sino regional, por el transporte de los mismos a grandes distancias de la fuente de emisión.

En este trabajo se muestra el método utilizado para obtener un conjunto de días representativos para modelar la meteorología y la calidad del aire, la descripción del modelo utilizado, los índices empleados para evaluar la representatividad del modelo y los resultados de la modelación de la calidad del aire en la cuenca atmosférica del Bajío.

Esta región ha tenido un desarrollo industrial muy importante en los últimos cincuenta años, sobre todo en el sector de generación de electricidad y petroquímica, ubicándose en Salamanca La Refinería “Ing. Antonio Manuel Amor” y la Central Termoeléctrica “Salamanca”, y en Querétaro se encuentra la termoeléctrica “El Sauz” establecidas en la década de los cincuenta, setenta y noventa respectivamente, éstas han desempeñado un papel determinante en este proceso de desarrollo del corredor industrial, ya que constituyen una fuente de energía de primera necesidad y de gran importancia para la economía local, regional, y del país, esto desarrolló de manera exponencial, los empleos generados, establecimientos industriales, comercios y servicios en Salamanca y en todo el corredor Industrial del Bajío, lo que trajo consigo un aumento de la población alrededor de estos centros industriales, que con el paso del tiempo, se tradujo en problemas de salud de la población.

Se denomina “Cuenca Atmosférica” a una parte de la atmósfera que se comporta de manera coherente con respecto a la dispersión de emisiones de contaminantes, es un espacio geográfico, el cual se encuentra parcial o totalmente delimitado, ya sea por elevaciones montañosas u otras características de la naturaleza, que presenta características meteorológicas y climáticas similares, donde la calidad del aire esta influenciada por las fuentes de emisión antropogénicas y naturales en el interior de la misma, y por el

transporte de contaminantes provenientes de otras cuencas atmosféricas cercanas (Magaña, V. & Caetano, E. 2007). Por estas características se ha reconocido al Bajío como una cuenca atmosférica, lo cuál permite una mejor gestión en la calidad del aire, siendo esto necesario para mantener ó controlar los niveles de contaminación, y además es necesario en estudios de modelación y calidad del aire delimitar la región por consideraciones topográficas, más allá de limitaciones políticas.

Para mejorar la calidad del aire en la región el encargado es el Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato que ha realizado esfuerzos en mejorar e implementar medidas en el tema de calidad del aire en la región, después de que se presentara en el año 2003 en Salamanca, una de las contingencias ambientales más larga y una acumulación de contaminantes que puso en riesgo la salud de la población guanajuatense.

La Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire, es la encargada de proporcionar a quien así lo requiera, un diagnostico en tiempo real de los datos y medidas para mantener el problema de contaminación atmosférica controlado en la zona.

La calidad del aire en la región se reconoció como crítica por la Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-1994, por las características geográficas y climáticas del municipio, éstas traen consigo;

- ✖️ Altas concentraciones de bióxido de azufre en la atmósfera, como resultado de la quema de combustoleo de alto contenido de azufre en la industria y la generación de electricidad.
- ✖️ Altas concentraciones de partículas suspendidas, derivadas de la actividad industrial, las emisiones de vehículos a automotores, etc.
- ✖️ Desfogues nocturnos de compuestos orgánicos, volátiles generados en la industria química y petroquímica.

Con el propósito de conocer el problema de calidad del aire de la región, es necesario realizar medidas conjuntas con el Gobierno del Estado, el Municipio de Salamanca y demás estados que conforman el corredor industrial, Petróleos Mexicanos, y Comisión Federal de Electricidad, para realizar estudios de modelación de calidad del aire a un nivel regional, para conocer la influencia de las emisiones de los sectores energéticos a los alrededores. Por su parte la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Guanajuato , esta conformada por 12 estaciones de monitoreo automático fijas, y una unidad móvil, se encuentran distribuidas en los municipios del corredor industrial, lo cual permite implementar medidas de control y programas como la entrada en vigor del “Programa Para Mejorar la Calidad del Aire en Salamanca”, donde se presentan acciones específicas realizadas para la reducción de emisiones en la zona, donde se observa en los últimos años una tendencia decreciente en los niveles de contaminación, logrando reducciones significativas.

Por lo tanto, este estudio pretende servir como una herramienta más para evaluar nuevas estrategias con fundamentos científicos, que sirvan para la toma de decisiones. Con el fin de llevar a cabo acciones a corto, mediano y largo plazo, para proteger la salud de la población y que sean estos municipios ambientalmente adecuados para la población del Bajío.

1.INTRODUCCION

Este estudio surge con la finalidad de conocer y comprender el fenómeno de la contaminación en la cuenca atmosférica del Bajío, debido a que las emisiones no sólo son un problema local, sino regional, por el transporte de los mismos a grandes distancias de la fuente de emisión.

En este trabajo se muestra el método utilizado para obtener un conjunto de días representativos para modelar la meteorología y la calidad del aire, la descripción del modelo utilizado, los índices empleados para evaluar la representatividad del modelo y los resultados de la modelación de la calidad del aire en la cuenca atmosférica del Bajío.

Esta región ha tenido un desarrollo industrial muy importante en los últimos cincuenta años, sobre todo en el sector de generación de electricidad y petroquímica, ubicándose en Salamanca La Refinería “Ing. Antonio Manuel Amor” y la Central Termoeléctrica “Salamanca”, y en Querétaro se encuentra la termoeléctrica “El Sauz” establecidas en la década de los cincuenta, setenta y noventa respectivamente, éstas han desempeñado un papel determinante en este proceso de desarrollo del corredor industrial, ya que constituyen una fuente de energía de primera necesidad y de gran importancia para la economía local, regional, y del país, esto desarrolló de manera exponencial, los empleos generados, establecimientos industriales, comercios y servicios en Salamanca y en todo el corredor Industrial del Bajío, lo que trajo consigo un aumento de la población alrededor de estos centros industriales, que con el paso del tiempo, se tradujo en problemas de salud de la población.

Se denomina “Cuenca Atmosférica” a una parte de la atmósfera que se comporta de manera coherente con respecto a la dispersión de emisiones de contaminantes, es un espacio geográfico, el cual se encuentra parcial o totalmente delimitado, ya sea por elevaciones montañosas u otras características de la naturaleza, que presenta características meteorológicas y climáticas similares, donde la calidad del aire esta influenciada por las fuentes de emisión antropogénicas y naturales en el interior de la misma, y por el

transporte de contaminantes provenientes de otras cuencas atmosféricas cercanas (Magaña, V. & Caetano, E. 2007). Por estas características se ha reconocido al Bajío como una cuenca atmosférica, lo cuál permite una mejor gestión en la calidad del aire, siendo esto necesario para mantener ó controlar los niveles de contaminación, y además es necesario en estudios de modelación y calidad del aire delimitar la región por consideraciones topográficas, más allá de limitaciones políticas.

Para mejorar la calidad del aire en la región el encargado es el Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato que ha realizado esfuerzos en mejorar e implementar medidas en el tema de calidad del aire en la región, después de que se presentara en el año 2003 en Salamanca, una de las contingencias ambientales más larga y una acumulación de contaminantes que puso en riesgo la salud de la población guanajuatense.

La Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire, es la encargada de proporcionar a quien así lo requiera, un diagnostico en tiempo real de los datos y medidas para mantener el problema de contaminación atmosférica controlado en la zona.

La calidad del aire en la región se reconoció como crítica por la Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-1994, por las características geográficas y climáticas del municipio, éstas traen consigo;

- ✘ Altas concentraciones de bióxido de azufre en la atmósfera, como resultado de la quema de combustoleo de alto contenido de azufre en la industria y la generación de electricidad.
- ✘ Altas concentraciones de partículas suspendidas, derivadas de la actividad industrial, las emisiones de vehículos a automotores, etc.
- ✘ Desfogues nocturnos de compuestos orgánicos, volátiles generados en la industria química y petroquímica.

Con el propósito de conocer el problema de calidad del aire de la región, es necesario realizar medidas conjuntas con el Gobierno del Estado, el Municipio de Salamanca y demás estados que conforman el corredor industrial, Petróleos Mexicanos, y Comisión Federal de Electricidad, para realizar estudios de modelación de calidad del aire a un nivel regional, para conocer la influencia de las emisiones de los sectores energéticos a los alrededores. Por su parte la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Guanajuato , esta conformada por 12 estaciones de monitoreo automático fijas, y una unidad móvil, se encuentran distribuidas en los municipios del corredor industrial, lo cual permite implementar medidas de control y programas como la entrada en vigor del “Programa Para Mejorar la Calidad del Aire en Salamanca”, donde se presentan acciones específicas realizadas para la reducción de emisiones en la zona, donde se observa en los últimos años una tendencia decreciente en los niveles de contaminación, logrando reducciones significativas.

Por lo tanto, este estudio pretende servir como una herramienta más para evaluar nuevas estrategias con fundamentos científicos, que sirvan para la toma de decisiones. Con el fin de llevar a cabo acciones a corto, mediano y largo plazo, para proteger la salud de la población y que sean estos municipios ambientalmente adecuados para la población del Bajío.

2.OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ✘ Caracterizar la contaminación ambiental en la Cuenca Atmosférica del Bajío, por medio de una actualización del inventario de emisiones, y aplicando un modelo de calidad del aire, para conocer la zona de influencia y de concentración de contaminantes.

OBJETIVOS PARTICULARES

- ✘ Mejorar la identificación de la contribución de las fuentes de emisión en la calidad del aire en la región.
- ✘ Desarrollar el inventario de emisiones para modelación con el fin de contar con un instrumento que permita identificar el impacto de las emisiones generadas por cada una de las fuentes, con ello se podrá evaluar, en futuros proyectos, la eficacia de las medidas implementadas y reorientar las líneas de acción de acuerdo al tipo de contaminante y fuente generadora.
- ✘ La adaptación del Modelo MCCM (Multiscale Climate Chemistry Model), en la región del Bajío, para así evaluar la calidad del aire.
- ✘ Evaluar el desempeño del modelo en la región de estudio.

3.JUSTIFICACION

El Bajío y principalmente Guanajuato tiene características muy particulares, por ubicarse en esa región, el municipio de Salamanca, gran generador de energía, y por tanto una fuente de emisión de grandes cantidades de contaminantes a la atmósfera. Presentan condiciones meteorológicas y climatológicas que en algunas ocasiones dificultan la dispersión de contaminantes, lo cual es de importancia para la salud de la población. Por lo anterior es indispensable la aplicación de un modelo de calidad del aire para identificar el impacto de las emisiones generadas por el sector industrial en la región.

En los años anteriores se han venido desarrollando e implementando programas para mejorar la calidad del aire en diferentes municipios del corredor industrial y en los que se presentan altos índices de población expuesta, como es el caso de él, “Programa Para Mejorar la Calidad del Aire en León” que se desarrollo para los años 2008 – 2012, ó como los que se han desarrollado en Salamanca para los años 2007 – 2012.

Este tipo de programas tienen como tema primordial reconocer las emisiones de contaminantes atmosféricos a partir de su operación normal y por el uso de combustibles fósiles, carbón, petróleo y gas natural, en centrales eléctricas grandes, y las emisiones de todas las fuentes, y estrategias a seguir para la disminución de dichas emisiones. Con estudios de modelación como éste se podrá estudiar el impacto a nivel de cuencas atmosféricas y servirá como una herramienta para seguir trabajando en la calidad del aire en la región tan exitosamente como hasta ahora.

El sistema de monitoreo automático de la ciudad que es operado por el Gobierno del Estado cuenta con 13 estaciones fijas de monitoreo y 2 móviles, además de una red de 18 unidades de muestreo manual en el corredor Industrial del Bajío.

Los principales contaminantes primarios, de importancia en la región producto de las emisiones de procesos que usan y producen combustibles fósiles, incluyen el Dióxido de azufre (SO₂), los Óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas menores a 10 y 2.5 micras (PM₁₀ y PM_{2.5}), aunque también son importantes las emisiones de Dióxido de carbono (CO₂), por ser un gas de efecto invernadero y los hidrocarburos.

Específicamente el sector industrial de la región se compone de la refinería Ingeniero Antonio M. Amor que emite alrededor de 42,945 toneladas anuales de SO₂ y 2,203 toneladas anuales de PM₁₀, siendo uno de los principales generadores de estos contaminantes en la región y que cuenta con más de cincuenta y tres plantas de proceso para la elaboración de combustóleo y aceites de diversos grados.

La central termoeléctrica de Salamanca emite alrededor de 35,451 toneladas anuales de SO₂, y 1,776 toneladas anuales de PM₁₀, siendo el segundo contribuidor de estos contaminantes a la región industrial, y que abastece de energía principalmente a los habitantes de los estados de Guanajuato, Colima, Zacatecas, Aguascalientes y Querétaro.

El centro de nuestra área de estudio lo ubicaremos en la ciudad de Salamanca, este se localiza en el municipio del mismo nombre, se ubica al centro del Estado de Guanajuato, y forma parte del Bajío. Colinda al norte con los municipios de Irapuato, Guanajuato, Dolores Hidalgo y San Miguel de Allende (Querétaro); al este con Santa Cruz de Juventino Rosas, Villagrán y Cortazar; al sur con los municipios de Cortazar, Jaral del Progreso, y Valle de Santiago y al oeste, con los municipios Valle de Santiago, Pueblo Nuevo e Irapuato. El Municipio de Salamanca ocupa una superficie de 774 km², representando el 2.5 % del total del territorio del Estado. En el año de 1950, la población Salmantina era de poco más de 49 mil habitantes, el establecimiento de la refinería marcó el inicio de una era de desarrollo industrial y una acelerada expansión demográfica. Para el año 2000, Salamanca contaba ya con alrededor de 227,000 habitantes, de los cuales un 60% se concentraban en la cabecera municipal, para el año 2005 la población total era 233 mil 623 habitantes (INEGI 2005). Otra de las ciudades con alto índice de población y

problemas de contaminación atmosférica a contemplar en el estudio es León, que según el censo del 2005 paso a ser la quinta zona metropolitana del país, y que cuenta con una población de 1.748.629 de habitantes, siendo así las más poblada del estado de Guanajuato. Aunado a estas características físicas y de alta densidad de población, en los últimos años se reconoció al Bajío como una cuenca atmosférica, de acuerdo a la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de prevención y control de la contaminación, una cuenca es un espacio geográfico, el cual se encuentra parcial o totalmente delimitado, ya sea por elevaciones montañosas u otras características de la naturaleza, con características meteorológicas que influyen en la dispersión de contaminantes.

4.MARCO TEORICO

4.1 NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE

Para la evaluación y aseguramiento de la calidad del aire en la población existen las normas de calidad del aire, donde se denomina a los contaminantes criterio como aquellos para los que existen normas y que fueron identificados como perjudiciales para la salud y bienestar de los seres humanos por su mayor abundancia en las atmósferas urbanas. El concepto de contaminantes criterio comprende partículas suspendidas iguales ó mayores a 10 micras (PM₁₀) y a 2.5 micras (PM_{2.5}), plomo (Pb), el ozono (O₃), el bióxido de azufre (SO₂), el bióxido de nitrógeno (NO₂) y el monóxido de carbono (CO).

Las normas de calidad del aire constituyen el marco de referencia para la evaluación, prevención y control de la contaminación atmosférica ya que dichas normas establecen los niveles o umbrales de concentración de contaminantes bajo los cuales se considera que no se presenten impactos adversos sobre la salud de la población, esto a través de las normas Oficiales Mexicanas.

Tabla 1 Normas Oficiales Mexicanas (Diario Oficial de la Federación)

CONTAMINANTE	NORMA APLICABLE	LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO	EXPOSICIÓN	PUBLICACIÓN
Ozono (O ₃)	NOM-020-SSA1-1993	0.11 ppm (1 hr)	1 vez al año	30/10/2002
		0.08 ppm (8 hr)	4 veces al año	
Monóxido de Carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	11 ppm	1 vez al año	18/08/1994
Dióxido de Azufre (SO ₂)	NOM-022-SSAI-1993	0.11 ppm (24 hr)	1 vez al año	18/08/1994
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	NOM-023-SSAI-1993	0.21 ppm (1hr)	1 vez al año	18/08/1994
Partículas				
PM10	NOM-025-SSAI-1993	120 ug/m3	1 vez al año	26/09/2005
PST		210 ug/m3	1 vez al año	
PM2.5		65 ug/m3	1 vez al año	

FUENTE: Diario Oficial de la Federación.

4.2 EFECTOS EN LA SALUD OCASIONADOS POR LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Los contaminantes poseen distinto potencial para producir daños sobre la salud humana, dependiendo del tipo de contaminante, de las propiedades físicas y químicas de sus componente, la frecuencia a la exposición, la duración de la misma y la concentración.

De manera general se establece que la capacidad de un contaminante para producir un efecto en la salud depende fundamentalmente de dos factores: la magnitud de la exposición y la vulnerabilidad de las personas expuestas.

La magnitud de la exposición está en función de la concentración del contaminante en la atmósfera, de la duración de la exposición y de su frecuencia.

La vulnerabilidad de las personas es diferente debido a que algunos grupos de población son más sensibles o vulnerables que otros a la contaminación del aire, esto obedece a factores como la genética, etnia, género y edad, nutrición, acceso a los servicios de salud, etcétera.

La exposición se define como el contacto con un contaminante. Al respecto la exposición a los contaminantes se puede clasificar en aguda que se presenta ante concentraciones elevadas de contaminantes en corto tiempo que logran ocasionar daños sistémicos al cuerpo humano. La exposición aguda también se relaciona con enfermedades de vías respiratorias como bronquitis, neumonía, tos, entre otras. La crónica se presenta cuando una exposición es respectiva a través del tiempo; también es usada para describir cuál es el periodo que toma en ocurrir alguna respuesta a la exposición a algún químico.

Los síntomas por exposición a la contaminación del aire se manifiestan principalmente en la disminución de la capacidad respiratoria, incrementa en la frecuencia de enfermedades respiratorias crónicas y agudas, aumento de ataques de asma e incremento de casos de enfermedades cardiacas. Esto se debe a que los pulmones son el órgano de choque para todos los

contaminantes del aire, si las células de las vías aéreas del pulmón se inflaman se reduce la habilidad del sistema respiratorio para combatir infecciones y eliminar partículas extrañas.

Aunque tradicionalmente ciertos grupos de población son considerados como más susceptibles entre ellos los infantes menores a 5 años y los adultos mayores, no se descarta la posibilidad de que cualquier persona pueda ser afectada.

4.2.1 OZONO (O₃)

Es un gas altamente reactivo, su impacto en la salud se debe a su capacidad de oxidación, por ello daña las células en las vías respiratorias causando inflamación y reduce la capacidad del aparato respiratorio para combatir las infecciones y remover las partículas extrañas, además afecta los mecanismos de defensa, por lo que puede provocar un aumento de las infecciones respiratorias.

El ozono es un riesgo para la salud de niños y niñas, adultos mayores y quienes padecen problemas cardiovasculares y respiratorios, como asma, enfisema pulmonar y bronquitis crónica.

El ozono es un irritante que afecta la mucosa ocular y respiratoria. Estudios han demostrado que se presenta irritación y ardor en los ojos, catarro, ardor y dolor de garganta, tos seca o irritativa, además de la exacerbación de infecciones respiratorias y a nivel del tracto respiratorio inferior se han detectado síntomas como tos, dificultad para respirar, dolor de pecho y decremento en la función pulmonar.

4.2.2 DIOXIDO DE AZUFRE (SO₂)

Es un gas incoloro, no inflamable y no explosivo, con un olor sofocante y altamente soluble en el agua. Su permanencia en la atmósfera es de entre 2 y 4 días. Durante este tiempo puede ser transportado a miles de kilómetros y formar ácido sulfúrico. El cual se precipita en alguna otra región lejos de su origen.

El ácido sulfúrico, el dióxido de azufre y las sales de sulfato son irritantes de las membranas mucosas del tracto respiratorio, incluso llegan a ocasionar enfermedades crónicas del sistema respiratorio como bronquitis y enfisema pulmonar. Los óxidos de azufre penetran en los pulmones y se convierten en un agente irritante del tracto respiratorio inferior cuando se absorben en la superficie de las partículas respirables, mismas que se inhalan o se disuelven en las gotas de agua que penetran por las mismas vías. Los aerosoles sulfatados son agentes irritantes de tres o cuatro veces más potentes que el SO₂, estas pequeñas partículas penetran hasta los pulmones y se oxidan.

El 99% de las emisiones de este contaminante es generado por el sector industrial, destacando los giros de energía (como el petróleo y la petroquímica y la generación de energía eléctrica) establecidos en el municipio de Salamanca, estos representan alrededor del 54% y 44% de las emisiones actualmente. Existen otros giros como la industria química, la de alimentos y la fabricación de ladrillos que aportan en su conjunto alrededor del 1% de las emisiones.

Las emisiones de SO₂ también contribuyen de manera importante a la deposición ácida, conocida como 'lluvia acida' que puede ocasionar daños a peces y otras formas de vida acuática, bosques cosechas, edificios, y monumentos.

Las partículas finas que se forman a partir de las emisiones de SO₂ también contribuyen a la escasa visibilidad en los paisajes porque estas dispersan eficazmente la luz natural.

4.2.3 MONOXIDO DE CARBONO (CO)

El sector transporte aporta la mayor cantidad de este contaminante al contribuir con el 66% del total de la generación, destacan vehículos particulares que, por su número y características, son los principales generadores de emisiones de CO (40%), la industria del petróleo y petroquímica aportan (29%) y, en menor grado, los demás tipos de vehículos inventariados que en conjunto representan alrededor del 25% de las emisiones.

Las emisiones de CO en un área cerrada pueden causar la muerte por insuficiencia cardíaca o sofocación debido a la alta afinidad de la hemoglobina

por este compuesto. El CO se asocia con la disminución de la percepción visual, la capacidad del trabajo, la destreza manual y la habilidad de aprendizaje. Sus efectos son mayores en personas con enfermedades cardiovasculares, angina de pecho o enfermedades cardioperiféricas.

Debido al fuerte gradiente espacial que presenta este contaminante, las concentraciones encontradas en micro ambientes como calles con intenso tráfico vehicular, en el interior de vehículos de transporte público y en las cocinas de casa habitación son mucho mayores que las concentraciones medidas en las estaciones de monitoreo.

Esto quiere decir que a pesar de que no se exceda la norma de calidad del aire ambiente, puede haber un número considerable de personas que estén expuestas a niveles de alto riesgo de este contaminante.

4.2.4 OXIDOS DE NITROGENO (NO_x)

La emisión de óxidos de nitrógeno tiene como sus principales generadores a la industria de la generación de energía eléctrica y a la petroquímica, con alrededor del 75%, seguido por las fuentes móviles con el 22%, de éste último se destacan los autos particulares y el resto del sector transporte, el restante 3% deriva de combustión en casas habitación, comercios y servicios.

El dióxido de nitrógeno puede formar ácido nítrico y ácido nitroso en presencia de agua. Ambos pueden precipitarse junto con la lluvia o combinarse con el amoníaco para formar nitrato de amonio.

La acumulación de nitrógeno en el cuerpo humano está relacionada con afecciones del tracto laringeo-traqueo-bronquial, así como con la disminución de la resistencia a infecciones y disminuye también la capacidad respiratoria.

4.2.5 COMPUESTOS ORGANICOS VOLATILES (COV)

El principal aporte (34%) de compuestos orgánicos es generado por la industria del petróleo y la petroquímica, seguido por los vehículos particulares con aproximadamente el 22%, un 15% es emitido por la flota vehicular restante y casi un 4% proviene de las fuentes biogénicas presentes en la región. Alrededor del 24% provienen de las actividades relativas a las fuentes de área

(consumos de solventes, limpieza y desengrasado, entre otras), que están reemplazadas por un sin número de actividades que se realizan utilizando productos que contienen hidrocarburos o los hidrocarburos mismos para una gran variedad de actividades, también se utilizan combustibles para generar energía eléctrica en el sector servicios.

4.2.6 PARTICULAS IGUALES O MENORES A 10 MICRAS (PM)

Dentro de las partículas totales que se generan, destacan las de fracción respirable (PM_{10} y $PM_{2.5}$) cuyo tamaño es igual o inferior a 10 y 2.5 micrómetros respectivamente, la exposición a estas partículas puede causar reducción en la función pulmonar, lo cual contribuye a aumentar la frecuencia de las enfermedades respiratorias.

Estas provienen principalmente de fuentes como caminos sin pavimentar, que representan un 40%, la industria del petróleo y petroquímica, con el 26%, la generación de energía eléctrica, 21%, la erosión eólica con el 9%. Estas fuentes contribuyen aproximadamente con el 94% del total de las emisiones de PM_{10} , el porcentaje restante de dicha contribución se distribuye entre las actividades como la quema de esquilmos y la combustión de combustibles fósiles entre otros.

4.1 CALIDAD DEL AIRE

La calidad del aire en la región está determinada por los niveles de contaminantes criterio emitidos principalmente por las fuentes de área y móviles, en el caso del corredor industrial del Bajío, los principales contaminantes normados que se registran por encima de las normas de calidad del aire son el dióxido de azufre (SO_2), y partículas (PST, PM_{10} y $PM_{2.5}$), mientras que el monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), presentan concentraciones por debajo de la norma, en el caso de ozono (O_3), por ser este un contaminante secundario depende de las reacciones químicas con otras especies presentes en la atmósfera.

Estudios en la región han dado las características de la calidad del aire en años

anteriores y en los que los resultados fueron motivo de preocupación para las autoridades correspondientes, como es el caso de un estudio realizado por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), campaña que se realizó del 21 de febrero al 9 de marzo de 2003, donde se analizaron SO_2 , CO , O_3 , y PM_{10} , así como variables meteorológicas en superficie y perfil vertical mediante el uso de radiosondeos atmosféricos, donde uno de los principales resultados fue que las emisiones de SO_2 en el Corredor Industrial del Bajío están dominadas por la industria termoeléctrica CFE y la RIAMA, representando para estas fechas un total del 94% de la emisión total en la región, y que la masa total de la PM_{10} esta en su totalidad compuesta de polvo suspendido proveniente de terrenos agrícolas, suelos erosionados y calles sin pavimentar (IMP, Septiembre del 2003).

En el Programa Para Mejorar la Calidad del Aire en Salamanca 2007 – 2012, dio a conocer la cifra de la emisión anual de contaminantes emitidos a la atmósfera para el año 2006, que muestra un total de 151,140 toneladas anuales de contaminantes, la principal emisión es de dióxido de azufre (SO_2), el cual representa un 51% del total de la emisión, seguido por el monóxido de carbono (CO) con el 26% de la emisión, 9% los óxidos de nitrógeno (NO_x), 8% de hidrocarburos y el restante 6% de material particulado menor a 10 y 2.5 micras. El principal contaminante atmosférico en la región es el SO_2 , generado por PEMEX y CFE, así como por el resto de las industrias que utilicen combustibles fósiles, estas generan el 99.7% de este contaminante de acuerdo al inventario de emisiones del 2006.

En esta región se cuenta con la información de la Red de Monitoreo Atmosférico del Estado, esta información debe validarse mediante planes de programas de aseguramiento y control de calidad para poder procesarse estadísticamente para la obtención de indicadores que permitan evaluar el comportamiento de los contaminantes del aire en forma espacial y temporal. El Gobierno de Guanajuato a través del Instituto de Ecología del Estado, fue el que proporcionó la información de calidad del aire proveniente de sus redes de monitoreo en la región, para que se pudiera llevar a cabo esta modelación.

En estudios como “Identificación de Cuencas Atmosféricas” (Magaña y Caetano 2007) se reconocen las características y la formas de modelación de la calidad del aire en una cuenca atmosférica y apoyándonos en imágenes satelitales podemos observar la concentración de contaminantes en lo que reconocemos en este trabajo como la región de estudio que dado a sus características es una cuenca atmosférica, en las ilustraciones 1 y 2 mostradas a continuación se observan las regiones de mayor concentración de contaminantes, como son el SO_2 en el centro de México y el NO_2 , este es el segundo contaminante que se observa concentrado en los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Morelos, Puebla, Querétaro, Michoacán, Estado de México y Jalisco, donde se observa claramente la cuenca atmosférica del Bajío.

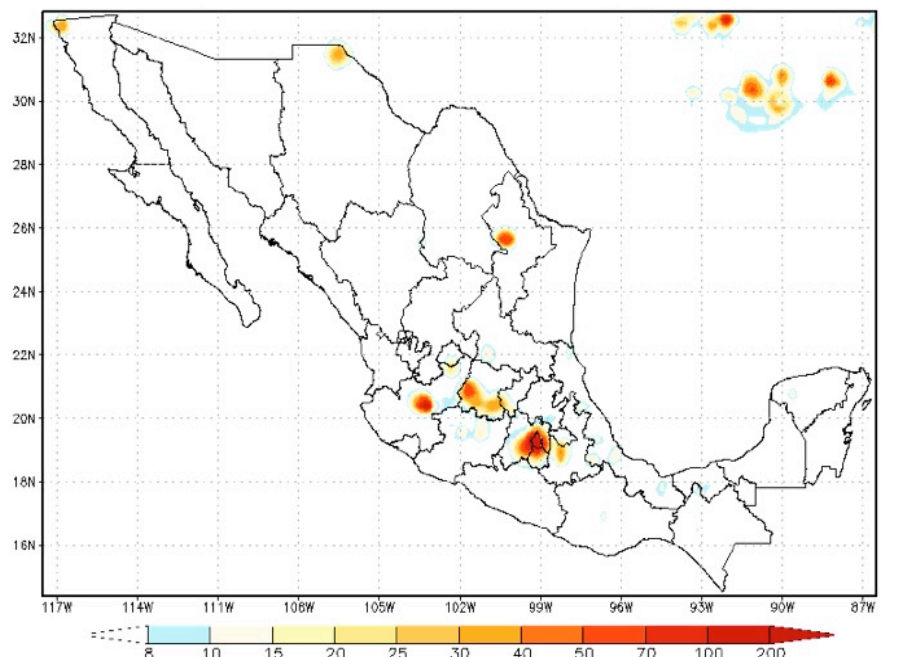


Ilustración 1 Depositación Promedio de SO_2 (pg/m²/s) mediante modelación, se observan tres regiones en el centro de México de sitios de alta depositación de SO_2 .

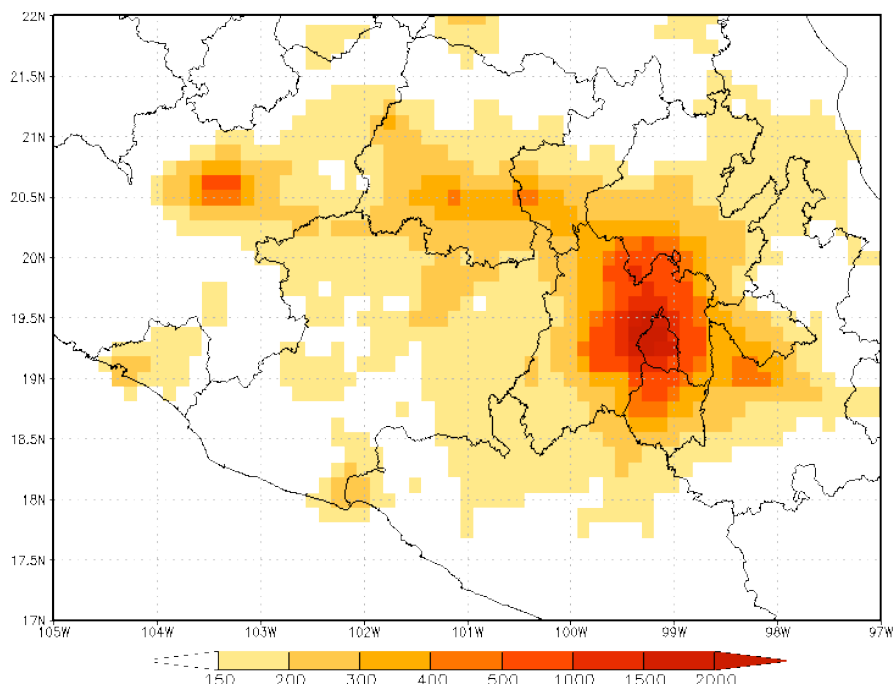
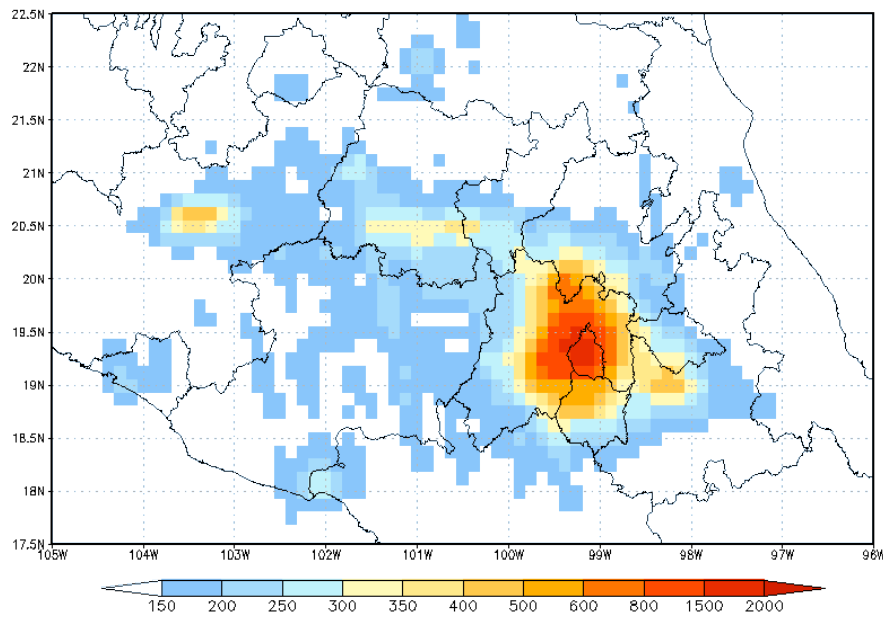


Ilustración 2 . Columna total de NO₂ en el centro de México para 2008 (sup) y 2009 información de satélite OMI (Boersma et al. 2007). Se observan 3 regiones la mayor comprende al DF, Hidalgo, Tlaxcala, estado de México, Morelos y Puebla, la segunda comprende Querétaro, Guanajuato y el norte de Michoacán y la tercera Jalisco.

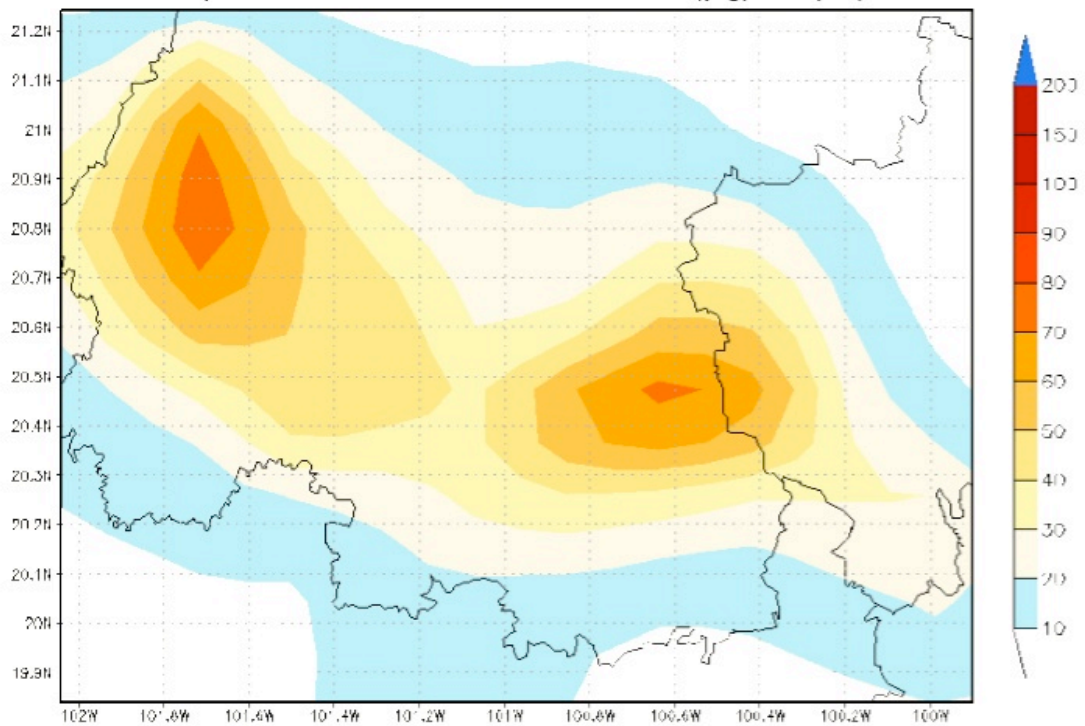


Ilustración 3 Deposición promedio de SO₂

En esta ilustración se observa la deposición promedio de SO₂, sin fuentes puntuales, donde se observa la mayor concentración del mismo en ciudades con mayor población.

5. AREA DE ESTUDIO

La Región del Bajío comprende principalmente el territorio no montañoso del estado de Guanajuato, se ubica al norte del Estado de Michoacán, abarcando en el occidente una parte del Bajo Lerma en el Estado de Jalisco, hacia el sur, la Ciudad de Morelia y en el oriente hasta la Ciudad de Querétaro. Esta zona ha tenido un crecimiento industrial importante durante las últimas cuatro décadas, conformando lo que se denomina el Corredor Industrial del Bajío, en donde se han establecido empresas generadoras de energía eléctrica, petroquímica, industria química, automotriz, curtiduría, metalúrgica y de alimentos principalmente, que han generando una dinámica económica en la zona y fuentes de empleo.

La ciudad de Salamanca se considera una de la más importantes en el Bajío por su actividad industrial, esta se extiende sobre un valle rodeado por una parte de la Sierra de las codornices donde destacan elevaciones como la “Cerquilla” y la “Hierba”, además de “Cerro Grande”, “Mesa Alta”, “los Cielillos”, “Cañada de Pasale”, “La Mesita” y “Los Lobos”, todas ellas con una altura promedio de dos mil metros sobre el nivel del mar, se localiza en la parte central de estado de Guanajuato y esta situado 20° 34’ 13” de latitud norte y 101° 11’ 50” de longitud oeste, a una altura de 1,721 metros sobre el nivel del mar, el río Lerma atraviesa el municipio de oriente a poniente y forma la cuenca hidrológica “Lerma Santiago”, una de las más importantes del estado; al norte del municipio se localizan arroyos como Potrerillos, La joya, Peña prieta, El bordo y Ortega, mismos que son afluentes del Río Temascalatío, al norte se encuentra la presa Zapote.

El clima predominante en la región es semicálido subhúmedo con lluvias en verano en un 92.3% excepto al norte donde el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano.



Ilustración 1 Localización de la región del Bajío, Jalisco (amarillo), Guanajuato (morado), Querétaro (beige), y Michoacán (verde)

La Red de Monitoreo de Calidad del Aire del estado de Guanajuato, esta conformada por 13 estaciones de monitoreo automático fijas y dos unidades móviles distribuidas en los cuatro municipios del Corredor Industrial. Los contaminantes y variables meteorológicas que se miden de la región son los contaminantes criterio por ser estos los normados y por considerarse de mayor impacto a la salud humana, para este estudio los de mayor importancia son el O_3 , SO_2 , CO , Óxidos de Nitrógeno, y partículas, las variables meteorológicas la velocidad del viento (WS), dirección del viento (WD), temperatura (T), humedad relativa (TH), presión barométrica y radiación solar.

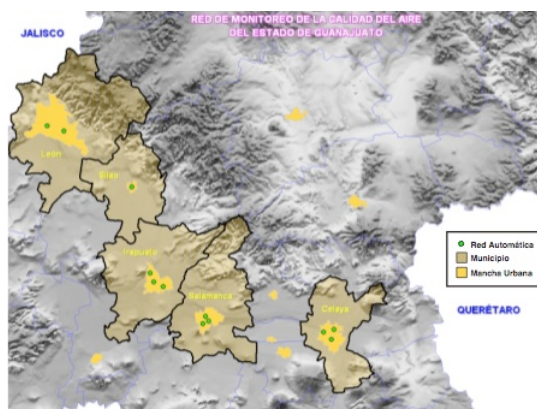


Ilustración 2 Red Automática de Monitoreo de Calidad del Aire

FUENTE: Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato. Red de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Guanajuato.

6. MÉTODO

El método seguido para llevar a cabo este estudio consistió en siete aspectos importantes que son:

- Obtención de fechas para la modelación, mediante técnicas estadísticas .
- Identificar la calidad del aire en la región.
- Actualización del Inventario de emisiones para localizar las fuentes de emisión, actualizar el uso de suelo y población en el año correspondiente a la modelación.
- Obtención de la meteorología con un modelo atmosférico a mesoescala de quinta generación (MM5).
- Aplicar un Modelo de Calidad del Aire, Multiscale Climate Chemistry Model (MCCM).
- Comparación de los resultados de la modelación contra los datos de la Red de Monitoreo Atmosferico del Estado, para comprobar la representatividad de los datos del Modelo.
- Integración de resultados y analisis cuantitativo y cualitativo de la dispersión de los contaminantes en la región.

6.1 OBTENCIÓN DE FECHAS A MODELAR

El Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEG) ha implementado programas con la finalidad de contar con un diagnostico de la problemática de contaminación en el Estado, de esta forma se maneja y controla las estaciones de monitoreo, en el corredor industrial.

El IEG nos proporciono los datos de contaminantes y variables meteorológicas de la región de el año 2008. Posteriormente por tiempo y capacidad computacional, se procede a una selección de días representativos de el universo de datos, por lo cual es necesario recurrir a la estadística para así obtener un conjunto de días que representen toda la muestra, y modelar sólo

estos días, de tal forma que los resultados sean fidedignos y puedan representar la calidad del aire en la región. Se generó una muestra aleatoria de 20, 15, 10 y 5 días empleando el método aleatorio de "Van der Corput" para generar los números aleatorios. La muestra del conjunto de días se equiparó con los datos anuales mediante una prueba estadística para comparar sus medias y saber si son o no iguales. Se considera que la muestra es representativa del año cuando las medias son similares.

Como primer paso se utiliza el programa STATA, cuyas funciones permiten el fácil manejo de datos, generación de gráficas y aplicación de pruebas estadísticas, los datos incluyen adicionalmente una columna con el día Juliano (1 al 366) correspondiente a la fecha. Este paquete está diseñado para el análisis descriptivo de datos y la implementación de diferentes técnicas de estimación. Se obtienen promedios de las concentraciones de los contaminantes criterio y de las variables meteorológicas, por estaciones, de tal forma que estos promedios representen la concentración de el contaminante en todo el bajío, durante todo el año.

Para obtener las muestras de días aleatorios se emplea el método de generación de números aleatorios de la Secuencia de Van der Corput, que es una secuencia de datos construidos en base n de números naturales que van de 0 a 1, para cualquier número real, es construido por el inverso de una representación de base n , en una secuencia de números naturales (1, 2, 3, ...), que tienen una distribución de probabilidad uniforme.

Es el método que converge más rápidamente a una distribución de probabilidad uniforme. En este caso utilizamos los siguientes valores, con base 2, que nos representan el número del día juliano para cada uno de las muestras a modelar.

Una vez que se tiene la secuencia de números de días julianos, se cargan los datos a la paquetería STATA para generar así los datos estadísticos de cada una de las muestras como media y desviación estándar, posteriormente se realizan las pruebas de hipótesis de igualdad de medias con los datos anuales,

para así saber acertadamente que muestra es representativa del año y con ello los días que se van a modelar. Se obtienen las siguientes tablas, graficas e histogramas (Tabla 2, Ilustraciones 6, 7, 8, 9, 10 y 11), para seleccionar la muestra de días que cumplen con la prueba de hipótesis y así utilizar esos días para la modelación.

Tabla 1 Valores estadísticos de la muestra para 15 días, con pruebas de hipótesis (h0) y prueba alternativa (Ha).

Variable	Obs	Mean	Std. Err.	Std. Dev.	[95% Conf. Interval]	
co	8784	1.449091	.0075811	.7105218	1.43423	1.463951
co_s~p15	360	1.454356	.0336584	.6386236	1.388164	1.520549
combined	9144	1.449298	.0074019	.7077982	1.434789	1.463807
diff		-.0052655	.0345016		-.0730946	.0625636

Satterthwaite's degrees of freedom: 396.307

Ho: mean(co) - mean(co_samp15) = diff = 0

Ha: diff < 0	Ha: diff != 0	Ha: diff > 0
t = -0.1526	t = -0.1526	t = -0.1526
P < t = 0.4394	P > t = 0.8788	P > t = 0.5606

La Hipótesis nula (Ho) indica que si restamos a la media de la muestra original la media de la muestra de días aleatorios *samp*, esta resta (diff) debe ser igual a cero, esto quiere decir que son iguales, de ser esto cierto la probabilidad de las hipótesis alternativas (Ha) que muestran que diff es menor a cero, diferente a cero, y/o mayor a cero tendría que ser menor a 0.05, si esto se da la muestra contiene los días que son representativos de nuestro universo, que en este caso es el año completo.

Del ejercicio anterior se obtuvo que una muestra de 10 días es suficiente para representar el año para observar la distribución se realizaron los histogramas de porcentaje contra concentración, de los 10 días que son los que representan el año, y se comparan con el histograma anual, esto para observar las diferencias y ver si se observa similitud.

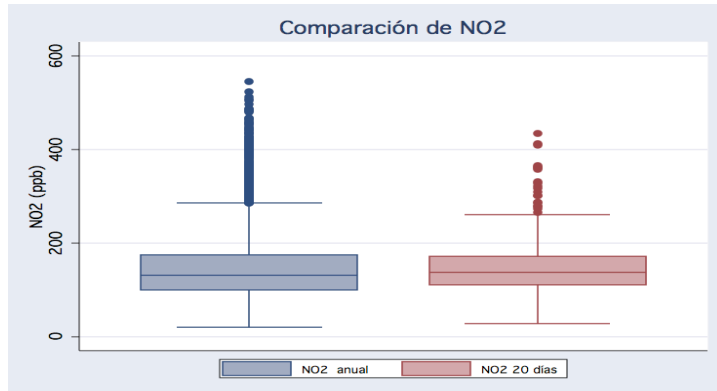
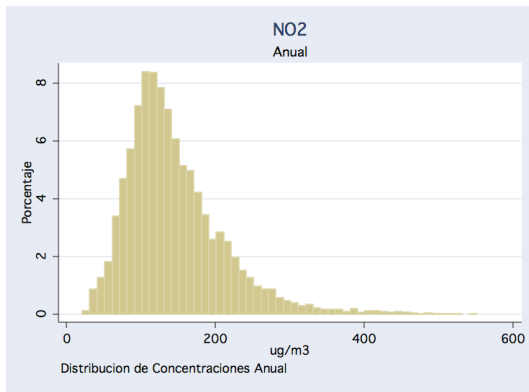
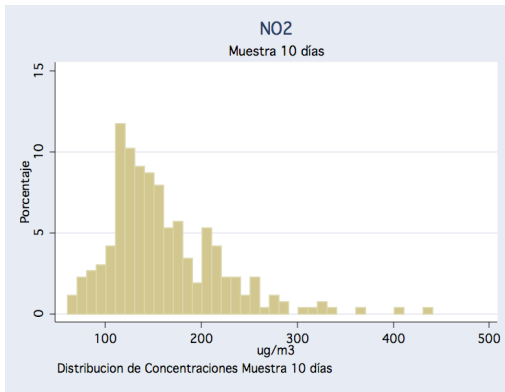
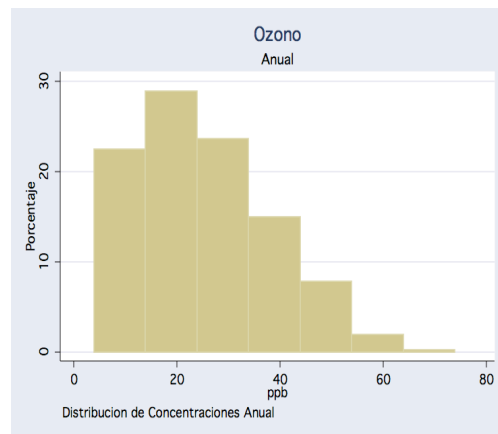
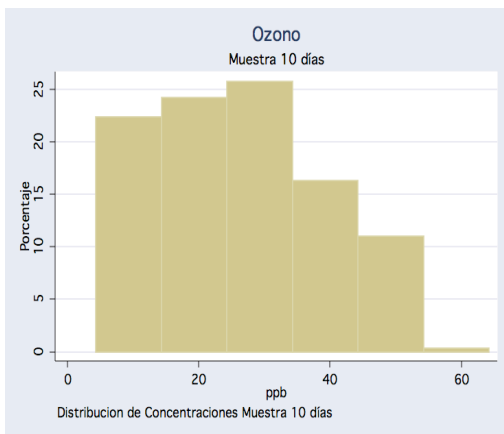


Ilustración 1 Distribución de concentraciones anual y para la muestra de 20 días, para el Dióxido de Nitrógeno



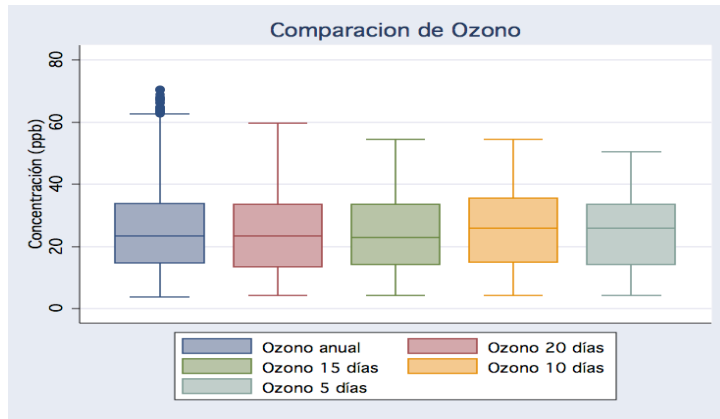
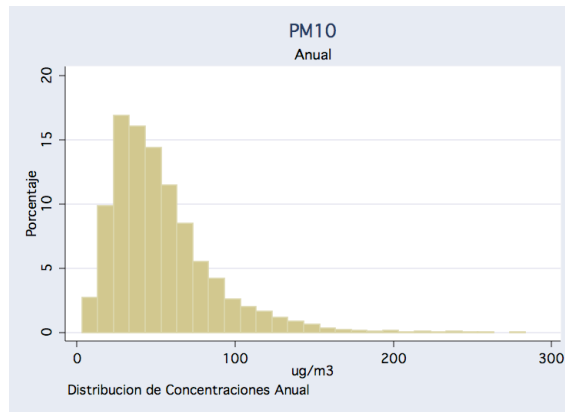
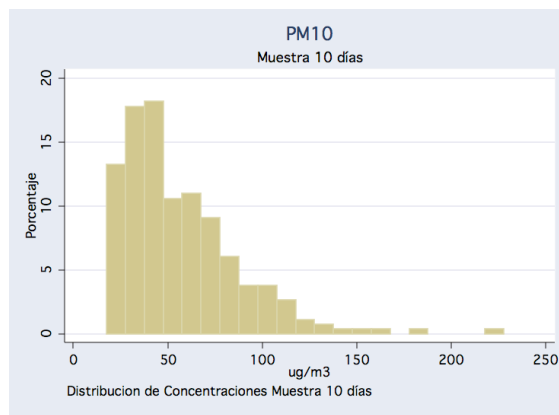


Ilustración 2 Distribución de concentraciones anual y para las muestra de 20, 15, 10 y 5 días, para el Ozono



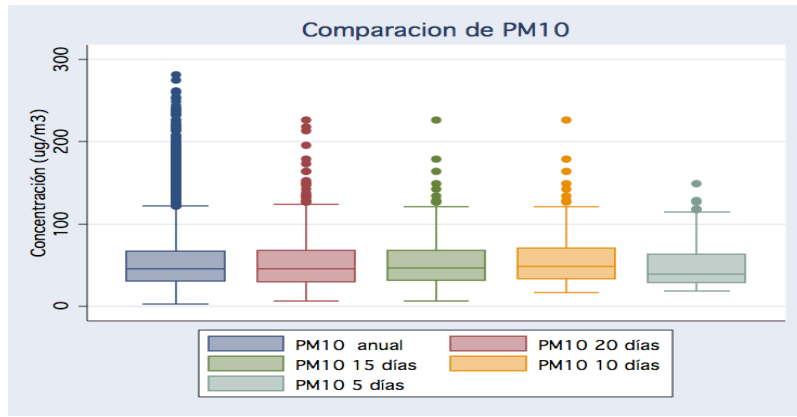
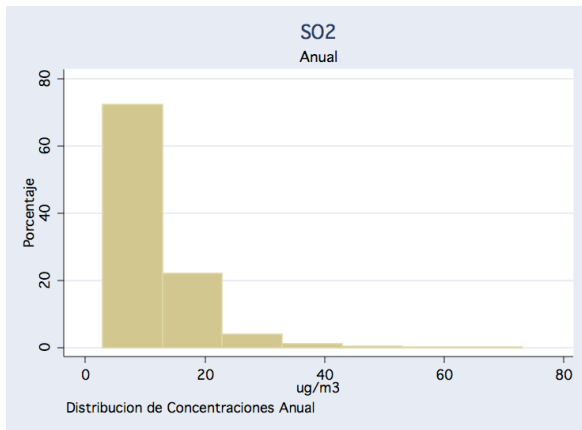
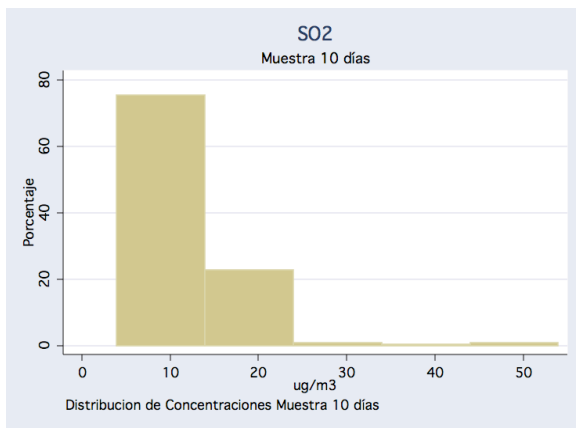


Ilustración 3 Distribución de concentraciones anual y para las muestras de 20, 15, 10 y 5 días, para las partículas de 10 micras



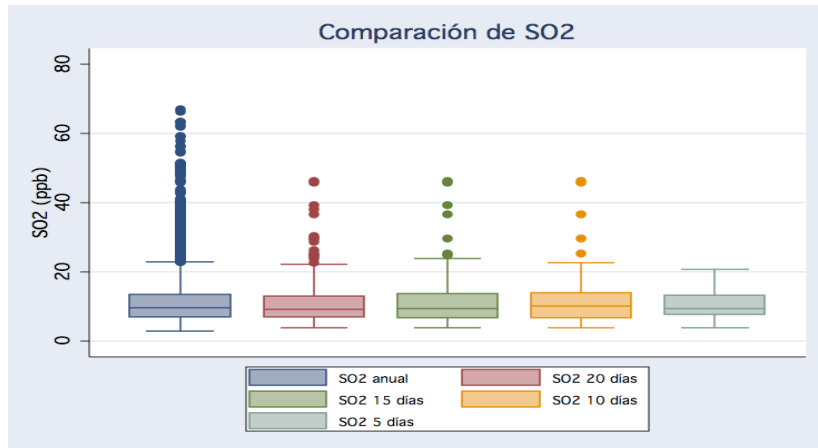


Ilustración 4 Distribución de concentraciones anual y para las muestras de 20, 15, 10 y 5 días, para el Dióxido de Azufre

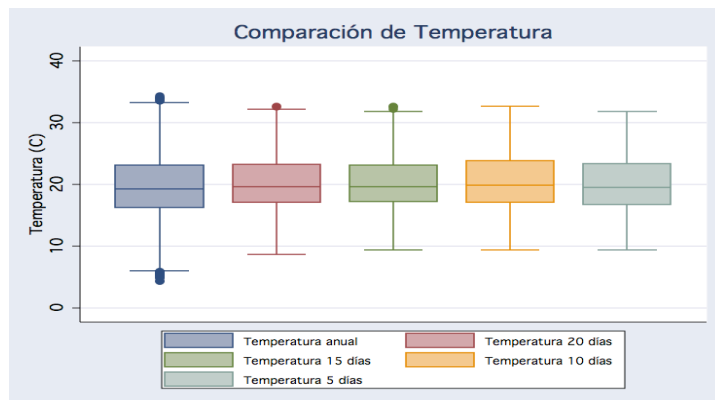
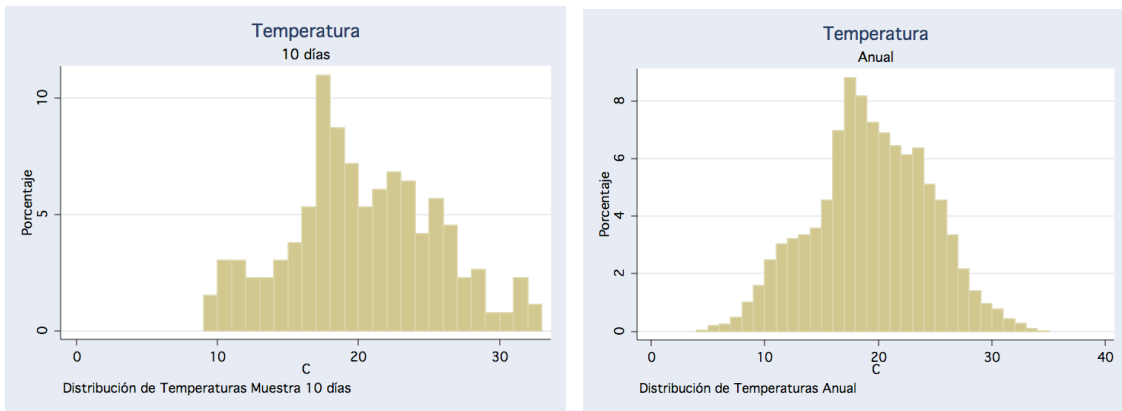


Ilustración 5 Distribución de concentraciones anual y para las muestras de 20, 15, 10 y 5 días, para la Temperatura

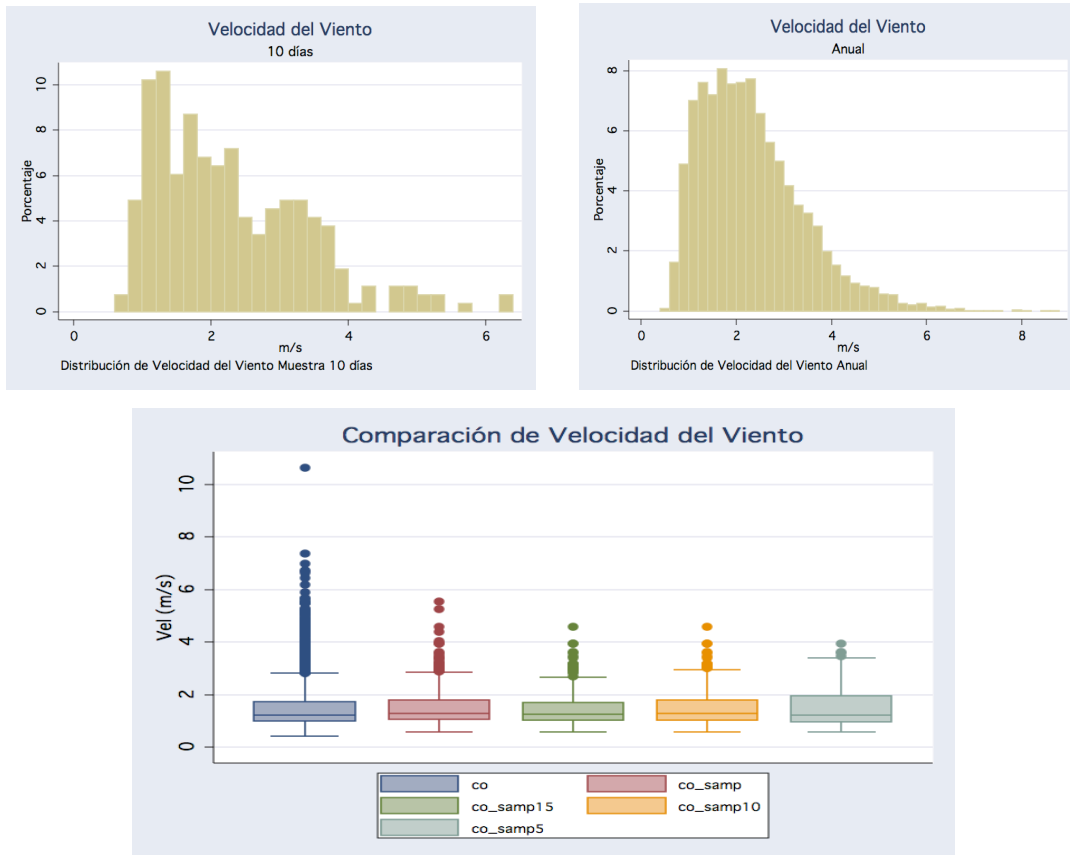


Ilustración 6 Distribución de concentraciones anual y para las muestras de 20, 15, 10 y 5 días, para la Velocidad de Viento

Se observa una similitud en los histogramas de las muestras de 10 días con la muestra anual, esto nos justifica el resultado estadístico, que dice que con esos 10 días se puede representar el año 2008, y estos serán los días que se utilizarán en la modelación. Con las tablas anteriores para cada contaminante y con los valores de las hipótesis, se identificaron los días que son representativos para el año, los días se muestran a continuación y se observa también en la tabla 3 que se seleccionó a los días que presentaban todos los datos de contaminantes y variables meteorológicas.

Tabla 2 Días representativos del año 2008

Juliano	DÍA	SO2	CO	NO2	PM 10	O3
183	1 JULIO	X	X	X	X	X
92	1 ABRIL	X	X	X	X	X
275	1 OCT	X	X	X	X	X
46	15 FEB	X	X	X	X	X
229	16 AGO	X	X	X	X	X
137	16 MAY	X	X	X	X	X
320	15 NOV	X	X	X	X	X
23	23 ENE	X	X	X	X	X

206	24 JUL	X	X	X	X	X
114	23 ABR	X	X	X	X	X
297	23 OCT		X	X		
69	9 MAR		X	X		
252	8 SEP		X	X		
160	8 JUN		X	X		
343	8 DIC		X	X		
11	11 ENE			X		
194	12 JUL			X		
103	12 ABR			X		
286	12 OCT			X		
57	26 FEB			X		

6.2 CALIDAD DEL AIRE EN LA REGION

La región presenta un clima templado, con una temperatura máxima de 36.4° y mínima de 0.8°C, lo cual nos da una temperatura media anual de 19.5°C, presentándose las más altas en verano de 25°C y 36°C. El clima va de Semicálido subhúmedo con lluvias en verano con un nivel de precipitación pluvial anual de 750 mm a templado subhúmedo. Con base a datos meteorológicos la dirección más frecuente en el municipio de Salamanca proviene del suroeste, con una intensidad promedio de 4.7 m/s, se sabe que la dirección del viento varía a lo largo del año, pero también a través del día, durante las horas de la mañana, las direcciones más frecuentes del viento son tanto del sureste como del noreste, durante la noche el viento más frecuente proviene del noreste. En las ciudades del corredor industrial que forman la cuenca atmosférica se presentan diferentes condiciones meteorológicas, en la ilustración 11 se ve la dirección del viento en las cinco ciudades de Guanajuato.

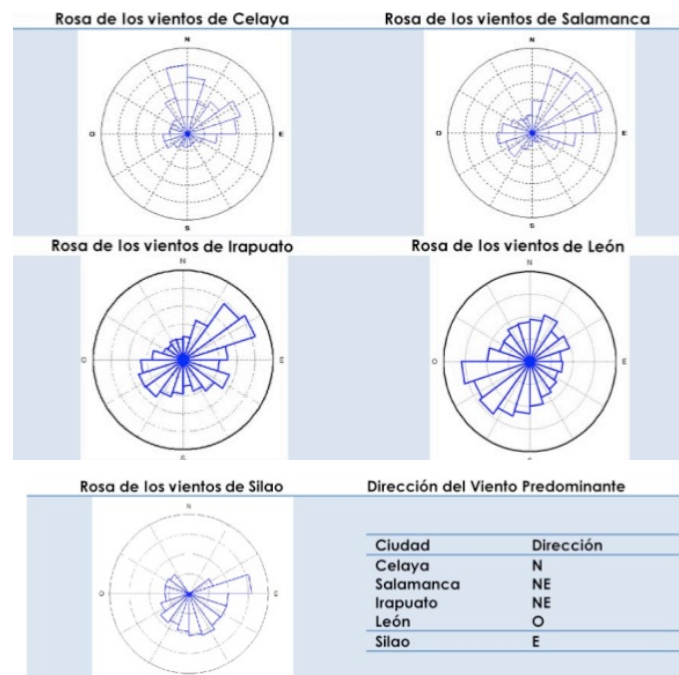


Ilustración 7 Rosas de viento para las ciudades con monitoreo

FUENTE: Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEG), 'La calidad del aire en Guanajuato, informe 2006 del estado y tendencias'.

Se observa en las rosas de los vientos que en las ciudades de Celaya, Salamanca e Irapuato el comportamiento es similar, mientras que en León y Silao, el comportamiento varía debido a su ubicación geográfica, pues se encuentran rodeadas de montañas que van desde el este hasta el oeste (“La calidad del aire en Guanajuato”, Informe 2006 del estado y de tendencias, Red de monitoreo de la calidad del aire del estado de Guanajuato, IEG).

Se sabe que en la mayor parte de la región se tiene una temperatura templada.

Tabla 3 Temperatura en las ciudades de monitoreo.

	Temperatura				
	Celaya	Salamanca	Irapuato	León	Silao
Enero	Fresco	Fresco	Fresco	Fresco	Na
Febrero	Fresco	Fresco	Fresco	Fresco	Na
Marzo	Templado	Templado	Templado	Templado	Na
Abril	Templado	Templado	Templado	Templado	Na
Mayo	Templado	Templado	Templado	Templado	Templado
Junio	Templado	Templado	Templado	Templado	Templado
Julio	Templado	Templado	Templado	Templado	Templado
Agosto	Templado	Fresco	Templado	Fresco	Templado
Septiembre	Templado	Templado	Templado	Templado	Templado
Octubre	Fresco	Fresco	Templado	Fresco	Fresco
Noviembre	Fresco	Fresco	Fresco	Fresco	Fresco
Diciembre	Fresco	Fresco	Fresco	Fresco	Fresco
Anual	Templado	Fresco	Templado	Templado	Templado

FUENTE: ‘La calidad del aire en Guanajuato, informe 2006 del estado y tendencias’, (IEG)

6.3 INVENTARIO DE EMISIONES

El inventario de emisiones es una herramienta indispensable para la gestión de la calidad del aire, ya que a través de su elaboración se identifican y ordenan las fuentes principales de generación de contaminantes y se estima la magnitud de sus emisiones a la atmósfera, lo que permite jerarquizar por contaminante las aportaciones correspondientes de dichas fuentes o sectores.

Los inventarios de emisiones tradicionalmente están integrados por fuentes puntuales (industrias) que están regulados por las autoridades, fuentes de área (comercios, servicios, casas habitación) que comprenden actividades dispersas, como el uso domestico de solventes, actividades de labranza, vehículos que circulan en caminos no pavimentados y el polvo transportado por el viento, también abarca a los vehículos como las locomotoras, las aeronaves y las embarcaciones marítimas comerciales, fuentes móviles (vehículos particulares, camiones de carga, autobuses, etcétera) y fuentes naturales (erosión del suelo y emisiones biogénicas como el SO₂ y PM producto de la actividad volcánica).

El inventario de emisiones del estado de Guanajuato corresponde al año 2006 y se observa en la siguiente tabla, donde se ve la proporción de cada contaminante considerado en el estudio.

Tabla 4 Inventario de emisiones de Guanajuato. 2006

Sector	PM10		SO2		CO		NOX		COT		TOTAL	
	t/a	%	t/a	%	t/a	%	t/a	%	t/a	%	t/a	%
Fuentes puntuales	4,869	16.7	83,848	96.1	14,972	1.6	16,554	27.3	12,830	4.4	133,073	9.3
Fuentes de área	23,651	80.9	1,961	2.2	16,319	1.7	2,860	4.7	77,994	27.1	122,785	8.6
Vegetación y uso de suelo	60	0.2	0	0.0	574	0.1	4,749	7.8	141,363	49.0	146,746	10.3
Fuentes móviles	654	2.2	1,466	1.7	928,386	96.7	36,532	60.2	56,135	19.5	1,023,173	71.8
Total	29,234	100.0	87,275	100.0	960,251	100.0	60,695	100.0	288,321	100.0	1,425,776	100.0
%	2.1		6.1		67.3		4.3		20.2		100.0	

FUENTE: Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEG)

En el caso de las fuentes fijas las estimaciones de las emisiones de contaminantes están basadas en los datos reportados por instituciones

gubernamentales, así como en estimaciones complementarias aplicando técnicas como la de factores de emisión y balances de masa. En lo referente a las fuentes de área que corresponden a fuentes comerciales, de servicios y otras actividades urbanas que generan contaminantes atmosféricos, las emisiones se estiman en forma colectiva a partir de metodologías específicas en las que también se aplican factores de emisión, índices de actividad y balances de masa.

6.3.1 EMISIONES DE ÁREA Y MÓVILES

En el caso del área de estudio, se generó un inventario de emisiones para modelación a partir de la población y emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), para ello el primer paso fue actualizar el uso de suelo. Se empleó la población para ubicar el cambio de uso de suelo a urbano como se muestra en la Ilustración 13 (a y b).

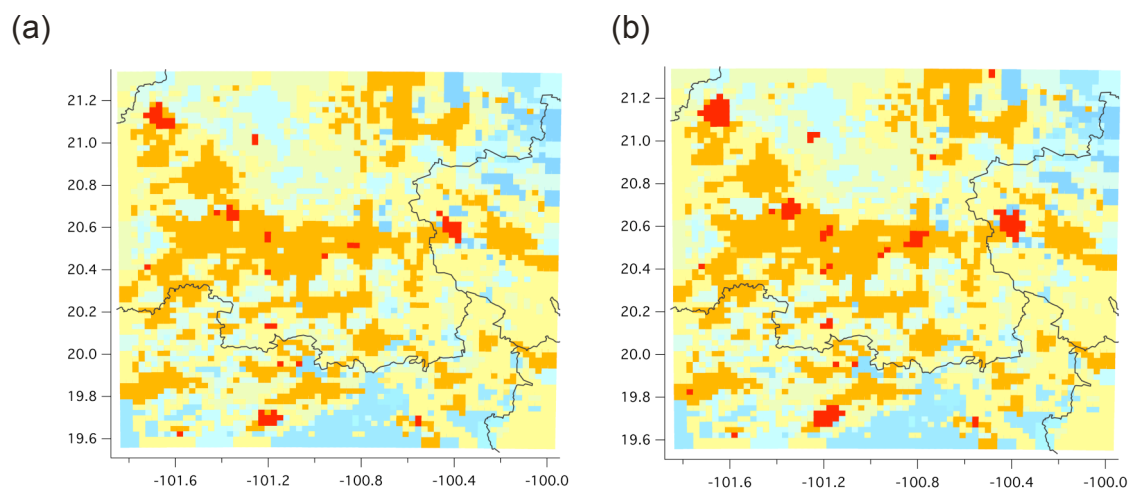


Ilustración 8 Uso de suelo original (a) y uso de suelo actualizado a partir de la población del 2005 (b).

A partir del uso de suelo actualizado, se le asigno a cada celda de tipo urbano la emisiones de una celda de la ZMVM, la emisión se ajustó mediante una proporción de población mediante la siguiente ecuación:

$$E_{i,j} = E_z \left(\frac{P_{i,j}}{P_z} \right)$$

donde:

$E_{i,j}$ – emisión en la celda i, j del dominio del Bajío kg/km^2

E_z – emisión de la celda preseleccionada de la ZMVM

$P_{i,j}$ – Población en la celda i, j del dominio del Bajío (hab)

P_z – Población en la celda preseleccionada del la ZMVM

Las emisiones obtenidas se muestran en la **Ilustración 14** donde se pueden apreciar las emisiones de las zona urbanas como León al noroeste, Querétaro al este y Morelia al sur.

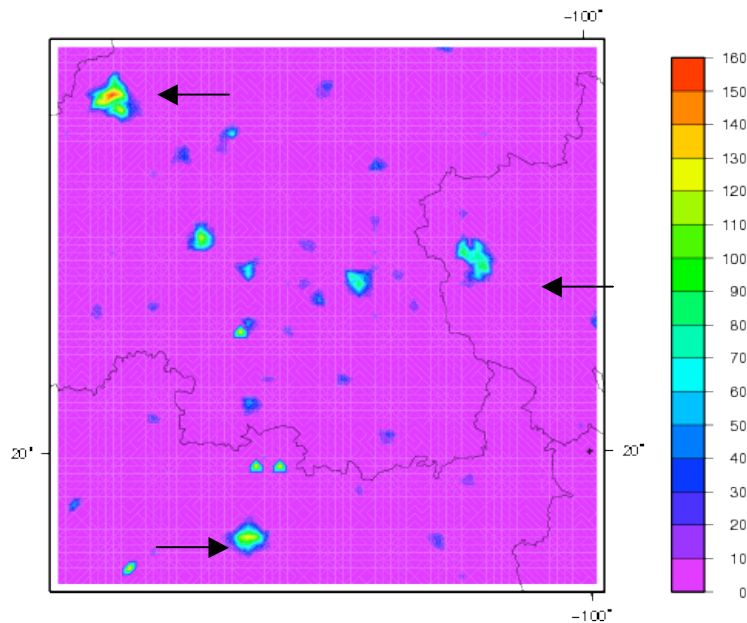


Ilustración 9 Emisiones de CO para modelación (kg/km^2)

6.3.2 EMISIONES PUNTUALES

En el caso de las emisiones puntuales se utilizaron los datos del SINE para la ubicación y emisión de las mismas.

La altura efectiva de chimenea se obtuvo a partir de los datos de temperatura, diámetro, altura de chimenea y velocidad de salida de los gases por la chimenea empleando las ecuaciones de Briggs. Este método calcula la elevación de la pluma sobre la altura de la chimenea (ΔH) como función de la distancia viento abajo x de la chimenea, la distancia crítica (x^*), se define por:

$$x^* = 14F_b^{5/8} \quad \text{para } F_b < 55m$$

$$x^* = 34F_b^{2/5} \quad \text{para } F_b \geq 55m$$

donde F_b es el parámetro de flujo de flotación median la ecuación empírica definida como

$$F_b = gv_s r_s^2 \frac{(T_s - T_a)}{T_s}$$

donde F_b esta en metros y;

g – aceleración de la gravedad, 9.81 m/s²

v_s – velocidad de salida de gases en chimenea, en m/s

r_s - radio de chimenea

T_s - temperatura de los gases de salida, en K

T_a - temperatura ambiente a la salida de los gases, en K

El ascenso de la pluma ($\Delta H=H-h$) para condiciones inestables o neutras se comporta de acuerdo a la ley de 2/3, donde h es la altura de la chimenea, en metros y H es la altura efectiva, en metros. Considerando u como la velocidad del viento promedio (en m/s) a la altura de la chimenea, para $x \geq 3.5x^*$, la elevación final de la pluma en metros se determina empíricamente usando;

$$\Delta H = \frac{1.6F_b^{1/3}}{u} (3.5x^*)^{2/3}$$

y para $x < 3.5x^*$, la turbulencia atmosférica interviene y la fórmula se convierte en

$$\Delta H = \frac{1.6F_b^{1/3}}{u} x^{2/3}$$

Las ecuaciones anteriores se emplean para plumas con flotación $T_s > T_a$ así como también para jets. Para todos los casos se considera la velocidad del viento de 4m/s.

Una vez calculada la altura efectiva se asigno en la capa correspondiente del archivo de emisiones puntuales. Las alturas de los niveles sigma y el nivel en el archivo del inventario se muestran en la siguiente tabla. Y por ultimo en la **Ilustración 15** se observa la población actualizada e y las fuentes puntuales que son la RIAMA, la Termoeléctrica Salamanca y la Termoeléctrica los Sauces en Querétaro en un punto rojo.

Tabla 5 Nivel en el archivo del inventario y altura (m) de cada nivel sigma.

Nivel	Sigma	Altura (m)	Nivel	Sigma	Altura (m)
8	0.99875	8.4	4	0.96	274.127
7	0.99625	25.	3	0.925	520.669
6	0.9935	44.0126	2	0.895	737.243
5	0.981	129.226	1	0.875	884.449

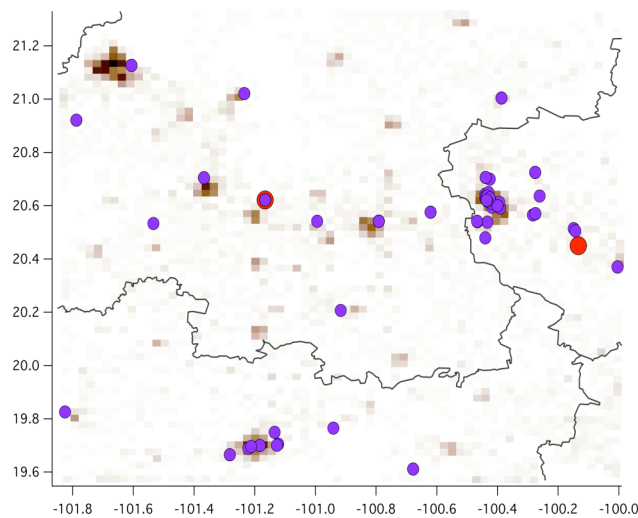


Ilustración 10 Población (cuadros en tonos cafés) y fuentes puntuales consideradas para la emisión (círculos) las termoeléctricas en rojo.

6.4 DESCRIPCION DEL MODELO DE MESOESCALA MM5

El modelo atmosférico de mesoescala de quinta generación MM5 fue desarrollado por la Universidad de Pennsylvania y NCAR denominado (PSU/NCAR Mesoescala Modelling System Version 3) y es un sistema de diagnóstico y pronóstico a mesoescala de las variables meteorológicas, este se basa en las principales ecuaciones que rigen la circulación atmosférica, de los procesos físicos que son visualizados a través de esquemas de parametrizaciones y una serie de preprocesadores de datos que preparan la información que será usada por el modelo. Por ser un modelo de dominio público (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>) para la Comunidad de las Ciencias Atmosféricas, sus cambios y adecuaciones son probados por numerosos usuarios.

Algunas de las características del MM5 se describen a continuación:

- Es un modelo de diagnóstico o pronóstico. Se utiliza para realizar simulaciones de eventos pasados, en tiempo real y de pronóstico.
- Es un modelo de tipo euleriano, asimila los datos en cuatro dimensiones.
- Tiene la capacidad de efectuar múltiples anidamientos y simulaciones de una forma hidrostática o no hidrostática.
- Se puede aplicar a cualquier zona del mundo, con datos de entrada de campos meteorológicos, topografía y uso de suelo.
- El código fuente está escrito en lenguaje de programación Fortran 90/77.
- Cuenta con una amplia gama de parametrizaciones de capa límite planetaria, convección, física de nubes, etcétera.

El MM5 es un sistema de modelación compuesto por módulos de preprocesamiento y post procesamiento de datos con una estructura como la

mostrada en la Figura y que se describe a continuación.

6.4.1 TERRAIN

Preprocesamiento que define los dominios madre y anidado, la resolución y el tipo de proyección del mapa. Asigna valores de topografía y las características del terreno.

6.4.2 REGRID

Preprocesamiento con el que a partir de los datos de gran escala de viento, humedad, temperatura, construye las mallas de los dominios a trabajar con la resolución deseada, generando así análisis de datos interpolados con alta resolución espacial, listos para ser procesados por los módulos RAWINS o INTERPF. La información utilizada puede ser histórica, para estudios de diagnósticos o simulación, o en tiempo real para pronóstico operativo del tiempo.

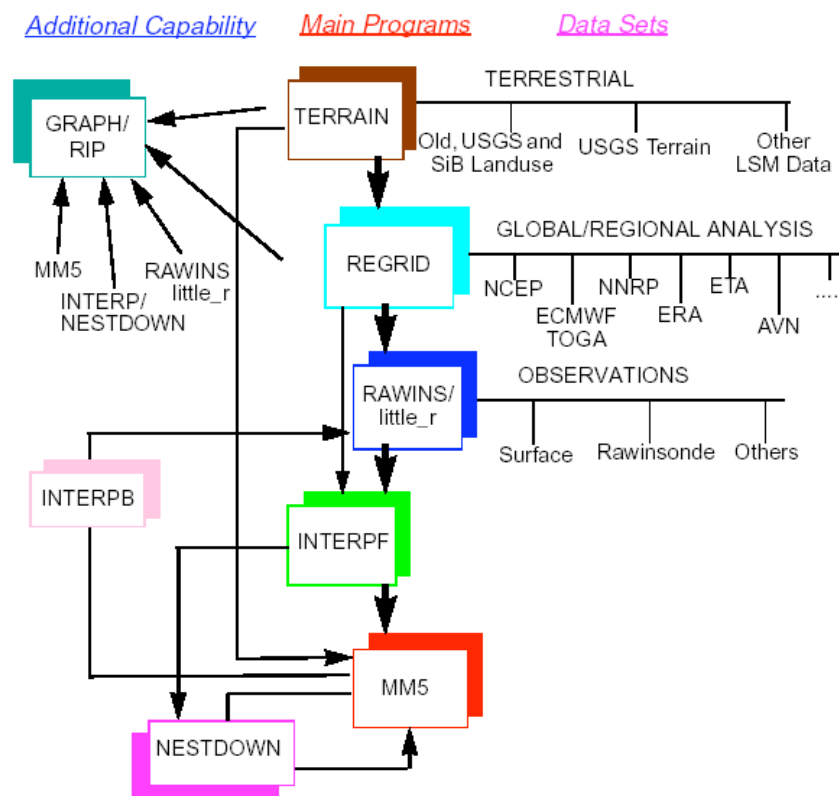


Ilustración 11 Diagrama de flujo del sistema de modelación MM5-V3

FUENTE: <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/overviewGIF.html>

6.4.3 LITTLE_R

Preprocesamiento donde se realiza un análisis objetivo de la información utilizando datos observados en superficie de estaciones meteorológicas y de altura, como radio sondeo, globo piloto, etc. Cuya finalidad es mejorar los campos de las variables utilizadas como condición inicial.

6.4.4 INTERPF

Preprocesamiento donde se interpola los datos iniciales de coordenadas de presión a coordenadas sigma. Este tipo de conversión de coordenadas permite una mejor representación de la orografía.

6.4.5 MM5

Ultimo módulo que resuelve numéricamente un sistema de ecuaciones primitivas en términos de flujos en coordenadas sigma por medio de diferencias finitas.

Finalmente los campos de salida del modelo son visualizados por los posprocesadores gráficos GRADS o NCARG GRAPHICS.

El modelo trabaja en coordenadas verticales sigma definidas de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{(P - P_t)}{(P_s - P_t)}$$

donde P es la presión

P_t es una constante que especifica el límite vertical de la presión y

P_s es la presión de superficie.

La siguiente figura (Ilustración 17) muestra un perfil donde se aprecian los distintos niveles sigma. La coordenada sigma 0 se sitúa en el límite superior, mientras que la sigma 1 se sitúa en la superficie. La resolución vertical del modelo se define a partir de las coordenadas sigmas con una lista de valores de 0 a 1, que necesariamente no tienen que estar equiespaciadas.

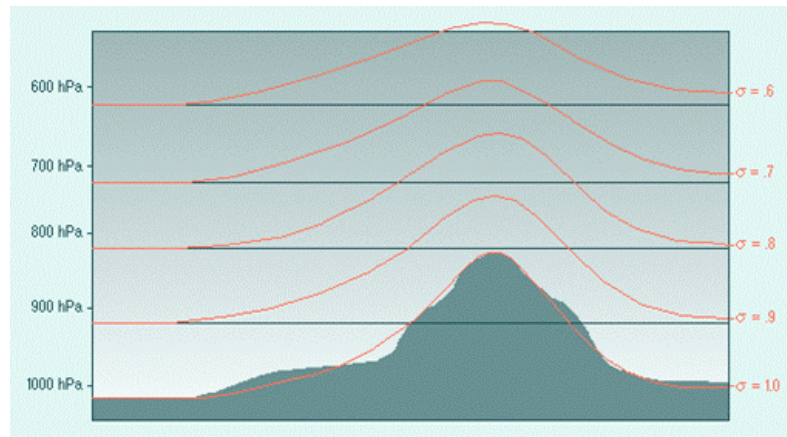


Ilustración 12 Coordenadas verticales sigma

FUENTE: <http://meted.ucar.edu>

6.5 DESCRIPCION DEL MODELO MCCM

A continuación se muestra una descripción de los modelos utilizados así como sus especificaciones y los pasos a seguir para correrlos.

El MCCM es un modelo que:

- ✘ Acopla directamente los procesos meteorológicos y químicos.
- ✘ Desarrollado específicamente para simular la calidad del aire en terreno complejo (Multiescala mediante anidamiento, con mejor resolución vertical y horizontal, no-hidrostático y con coordenadas que siguen el terreno)
- ✘ Incluye la química de la fase gaseosa, deposición, emisiones antropogénicas y biogénicas y fotólisis.
- ✘ Descripción avanzada de los procesos dinámicos como la determinación de la altura de la PBL.
- ✘ Incorpora una descripción explícita de los procesos de precipitación de nubes.
- ✘ Posee la capacidad de anidamientos múltiples, por lo que puede aplicarse como modelo de clima regional acoplado a la química.

Para efectos de modelación se requiere conocer los contaminantes emitidos a la atmósfera, con resoluciones espacial y horaria adecuadas al modelo.

Debido a su capacidad intrínseca de predicción de clima y a que se encuentra directamente acoplado a procesos químicos, el MCCM se puede aplicar en tiempo real a la predicción regional y urbana de la calidad del aire. Las emisiones biogénicas se calculan con base en los datos de uso de suelo, temperatura superficial y radiación. El modelo calcula simultáneamente 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. Una ventaja del acoplamiento en línea de la meteorología y la química es que provee resultados consistentes sin la interpolación de datos en contraste con modelos no acoplados de química y transporte.

6.5.1 MCCM

Es la parte del sistema de modelación, donde la predicción de la meteorología, el transporte de contaminantes toma lugar. El MCCM consiste en una parte meteorológica, que principalmente equivale a MM5 y a la parte acoplada de química, intercambio turbulento, emisiones antropogénicas y biogénicas, deposición y transformaciones químicas. Además de la estimación de las especies químicas en la fase gaseosa. Toma en consideración la advección, el transporte turbulento, la emisión y la deposición.

Para la química en la fase gaseosa el modelo emplea el mecanismo RADM2 que incluye 14 especies estables inorgánicas, 4 intermediarios reactivos y 3 especies abundantes estables (Oxígeno, nitrógeno y agua). La química orgánica la representan 26 especies estables y 16 radicales peroxi.

Una vez que se ha corrido el modelo se requiere de observar los resultados, y esto se logra mediante diferentes paqueterías de graficación en este caso el GRADS (Gris Analysis and Display System) que se utiliza para desplegar datos y el análisis de los mismos, y es implementado en todos los sistemas UNIX.

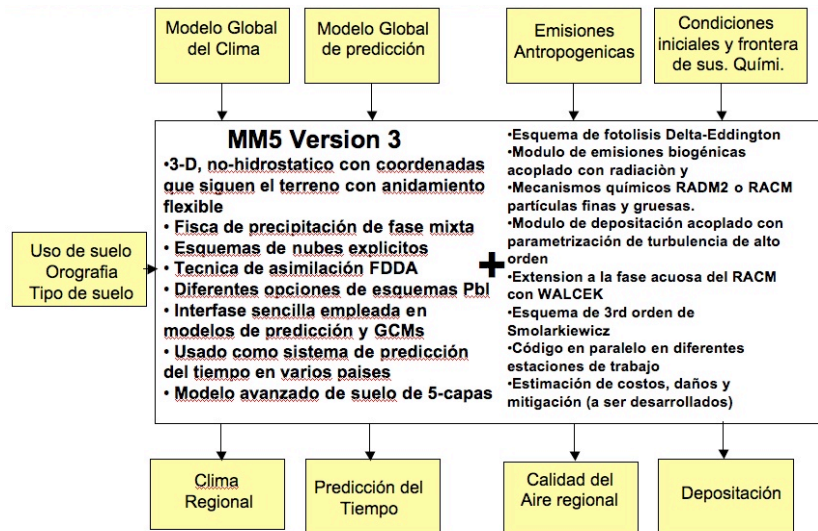


Ilustración 13 Módulos del modelo acoplado de meteorología y química MCM

6.6 EVALUACIÓN DEL MODELO

Para conocer si un modelo puede reproducir lo que se desea es necesario evaluarlo, para esto se utilizan dos metodologías una cualitativa y otra cuantitativa.

La cualitativa se realiza mediante el empleo de graficas, mapas y diagramas, en los cuales se observa la proximidad de los datos del modelo contra los valores observados y la evaluación cuantitativa se realiza mediante el empleo de parámetros estadísticos.

Para evaluar el desempeño del modelo de forma cuantitativa se calcularon las siguientes métricas estadísticas:

$$\sigma_p = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(p_i - \bar{p} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma_o = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(o_i - \bar{o} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$RMSD = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(p_i - O_i \right)^2 \right]^{1/2}$$

Donde σ_p y σ_o son las desviaciones estándar de los datos predichos y observados respectivamente, para un parámetro o contaminante dado en las N

ubicaciones o puntos de monitoreo, Los parámetros p_i y o_i fueron tomados como promedio por hora para cada punto o estación de monitoreo, donde \bar{p} y \bar{o} son los valores de las medias para las N ubicaciones. RMSD (root-mean-square-difference) es la raíz cuadrática de las diferencias medias entre los valores predichos y los observados.

Con estas herramientas se puede determinar que el nivel de acierto del modelo es considerado alto si la desviación estándar de los datos de predicción es similar a la desviación de los datos de observación, mientras que RMSD sea menor que la desviación estándar de los datos observados.

RMSD se descompone en dos componentes:

(RMSDs) Raíz sistemática cuadrática media de la desviación, entre valores medidos y modelados.

$$RMSD_s = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\hat{p}_i - o_i \right)^2 \right]^{1/2}$$

Raíz no sistemática cuadrática media de la desviación, entre valores medidos y modelados. (RMSDu)

$$RMSD_u = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\hat{p}_i - p_i \right)^2 \right]^{1/2}$$

Donde:

$$\hat{p}_i = a + b \bar{o}_i$$

Donde a y b son la ordenada y pendiente respectivamente de la regresión lineal de mínimos cuadrados entre p y o. RMSDs es una medida de error sistemático en el modelo de predicción mientras que RMSDu describe la discrepancia no lineal entre las predicciones y lo observado, la cual puede ser interpretada como una medida de precisión, que corresponde a errores aleatorios.

El índice de concordancia entre las predicciones y las observaciones de un parámetro es definido como:

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

Este índice compara las salidas de los valores de predicción con los valores observados. El rango posible para este índice es de 0 a 1, siendo el valor de 1 una concordancia perfecta.

Este índice compara las salidas de los valores de predicción con los valores observados. El rango posible para este índice es de 0 a 1, siendo el valor de 1 una concordancia perfecta.

Nge y **Nb**: Las mediciones **Nge** error Craso normalizado (normalized gross error) y **Nb** Tendencia del error normalizado (normalized bias) fueron usadas para evaluar el desempeño del modelo.

Nge esta definido por:

$$Nge = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|p_i - o_i|}{o_i}$$

Nb esta definido por:

$$Nb = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{p_i - o_i}{o_i}$$

Donde N es el número de estaciones de monitoreo p_i y o_i son los valores de los resultados del modelo y observación en la i -ésima estación.

Estas medidas de error también se pueden presentar como porcentajes, cuando Nb es negativo quiere decir que en promedio los datos de pronóstico fueron menores a los medidos, y si es positivo los valores sobrepasan a las mediciones. El **Nge** muestra el error craso, es decir cuantifica los promedios de los errores sin importar si hubo sobre valoración o si los datos del modelo fueron menores a los medidos.

Promedio de error normalizado (average normalizad bias) **ANB** (West et al 2004) es una medición cuantitativa de la concordancia entre mediciones y

modelo tanto para variables meteorológicas como especies químicas. El ANB se define como el promedio del residual entre el promedio de las mediciones:

$$ANB = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N o_i}$$

donde N es el número total de observaciones, siendo p_i y o_i son los valores de los resultados del modelo y observación en la i-ésima estación. Esta definición sopesa los subestimados y sobreestimados de igual forma, así un sobreestimado de 1 ppb con un subestimado de una ppb podría resultar en una ANB de cero.

Para cuantificar el efecto de los gases criterio y poder hacer el estudio comparativo de forma más objetiva se utiliza la métrica denominada, “Exposición Potencial Integrada de la Población”.

Exposición Ψ ; cuantifica la magnitud de la exposición en tiempo y espacio, incorporando el tamaño de la población potencialmente expuesta a los niveles no saludables de algún gas criterio y se calcula mediante la fórmula;

$$\Psi = \frac{\sum_{n=1}^m \sum_{i,j} \varpi_{i,j,n} C_{i,j}}{m \varpi_{\max}}$$

donde: $\varpi_{i,j,n}$ es la población en la celda i, j y ϖ_{\max} es la población máxima en la región de estudio.

6.6.1 ESTRATEGIA DE ANIDAMIENTO

Este es el dominio sobre el que se va a modelar, se utiliza la estrategia de anidamientos unidireccionales (one way), como se ve en la **ilustración 19**.

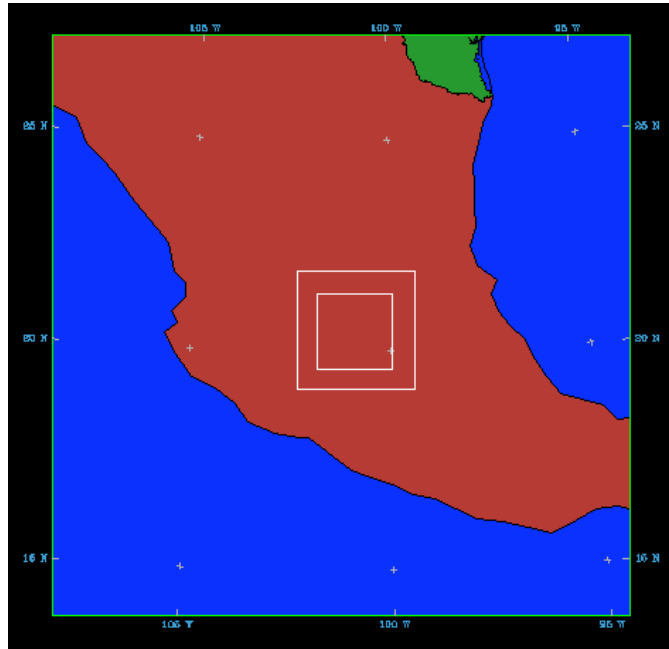


Ilustración 14 Dominios utilizados en la modelación regional

6.6.2 CARACTERÍSTICAS DEL DOMINIO

Se considera un radio de influencia de 1,600 Km, la estrategia de anidamientos emplea tres dominios, el centro de los dominios se localiza en una latitud 20.601 N y longitud -101.225 W, los tres dominios mayores son cuadrados teniendo un lado de 1,620 Km, el segundo dominio es de 333 Km y el tercer dominio es de 210 Km, encontrándose la región de estudio en la parte central.

Tabla 6 Estrategia de anidamientos

Dominio	Nx	Ny	Dx km
1	60	60	27
2	37	37	9
3	70	70	3

7. RESULTADOS

De la selección aleatoria de fechas para el 2008 se obtuvieron los siguientes días, la media de este conjunto de días es muy parecida a la media anual, adicionalmente este conjunto de días tiene los datos completos de las variables meteorológicas y de las concentraciones de contaminantes.

Tabla 1 Muestra de días que se obtuvieron para la modelación

Juliano	DÍA	SO ₂	CO	NO ₂	PM ₁₀	O ₃
183	1 JULIO	X	X	X	X	X
92	1 ABRIL	X	X	X	X	X
275	1 OCT	X	X	X	X	X
46	15 FEB	X	X	X	X	X
229	16 AGO	X	X	X	X	X
137	16 MAY	X	X	X	X	X
320	15 NOV	X	X	X	X	X
23	23 ENE	X	X	X	X	X
206	24 JUL	X	X	X	X	X
114	23 ABR	X	X	X	X	X

7.1 COMPARACIÓN DEL MODELO vs RED DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE DEL ESTADO.

Los resultados de las comparaciones de red de monitoreo contra los del modelo se calcularon con el paquete IGOR, con éste se tienen dos reportes el primero para los contaminantes de nuestro interés O₃ y SO₂ y el segundo de meteorología para las variables Temperatura y Velocidad de viento, en estas graficas que se obtienen se observa la concordancia del modelo con los datos medidos y se puede observar la capacidad del modelo en generar concentraciones similares a las medidas.

OZONO

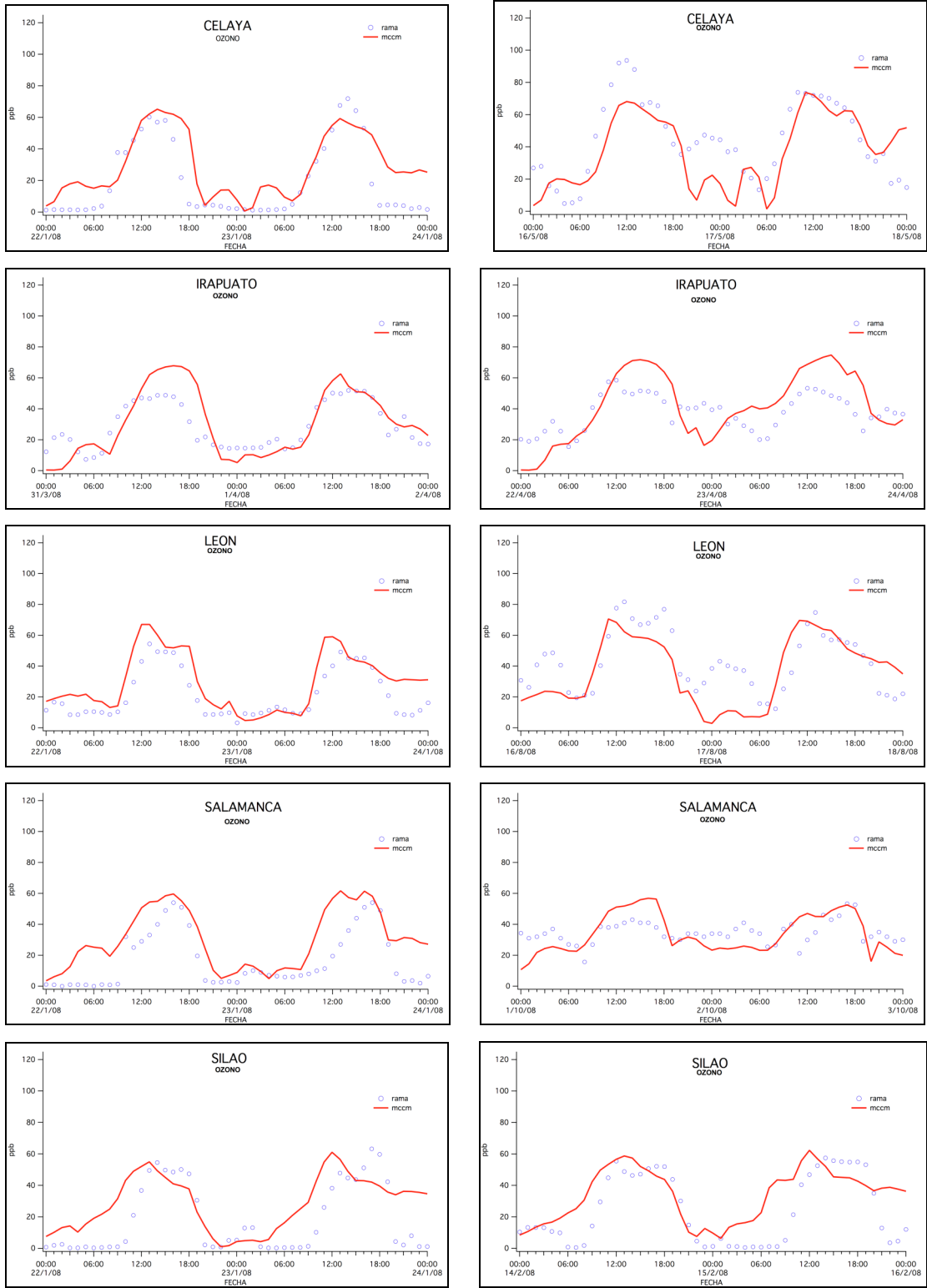


Ilustración 1 Comparación del Modelo contra Red de Monitoreo del Estado para Ozono.

DIOXIDO DE AZUFRE

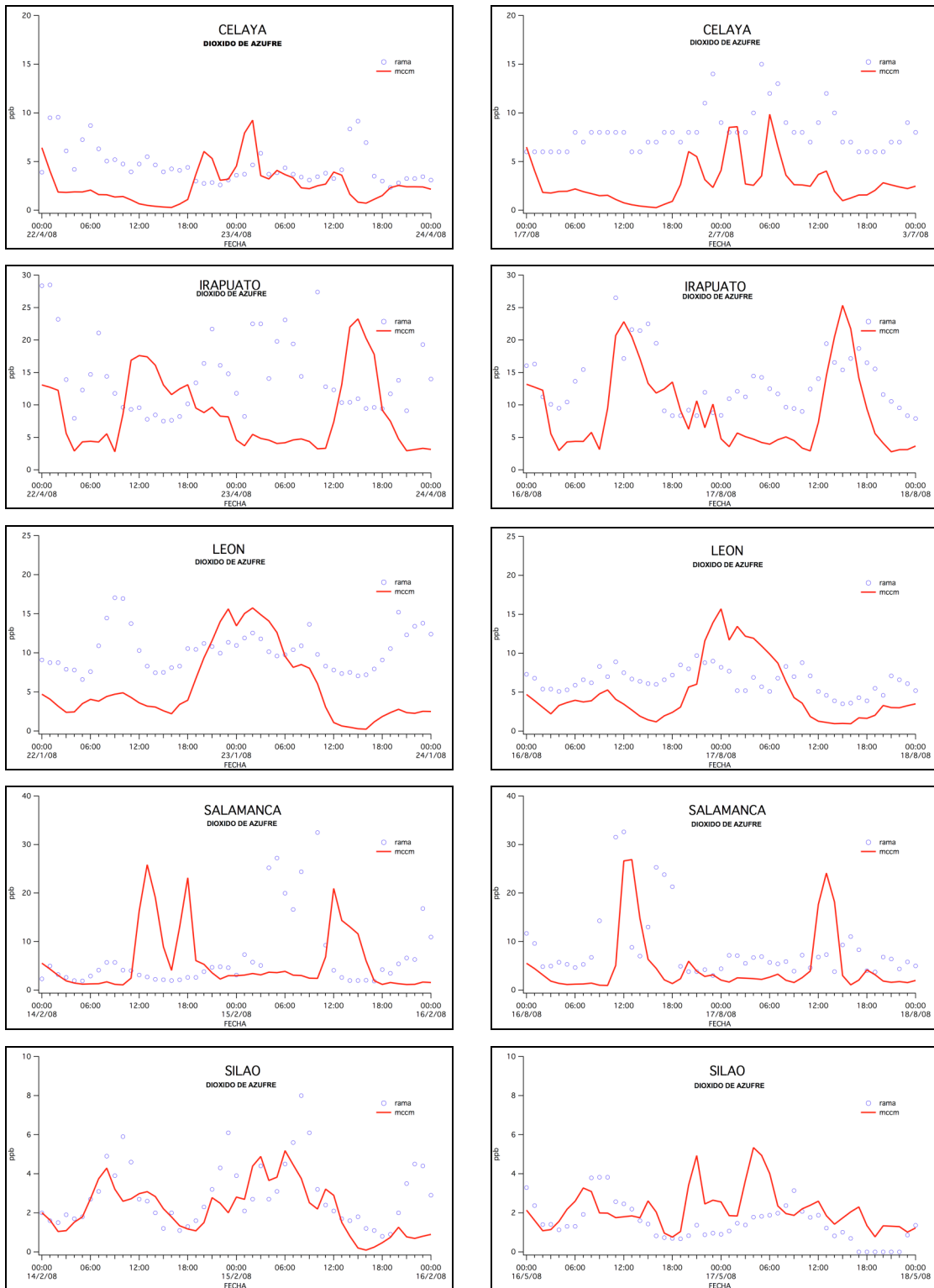


Ilustración 2 Comparación del Modelo contra Red de Monitoreo del Estado para Dióxido de Azufre.

TEMPERATURA

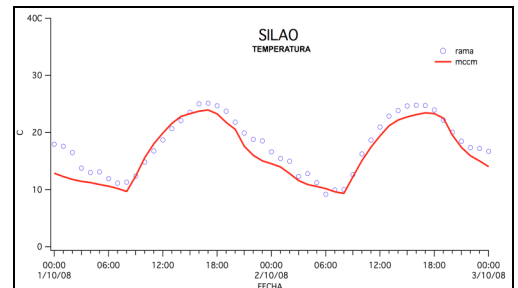
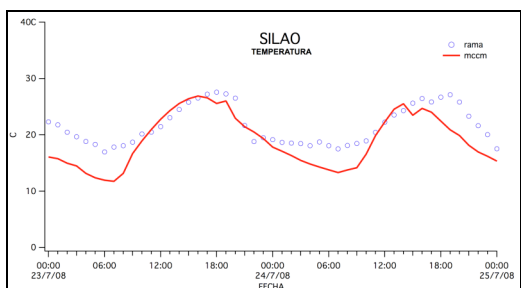
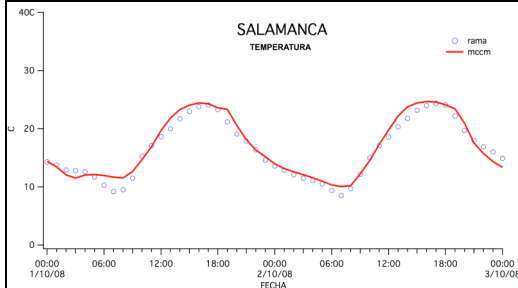
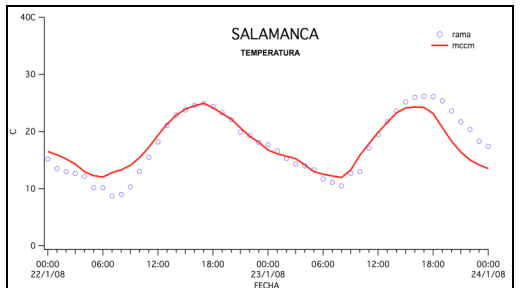
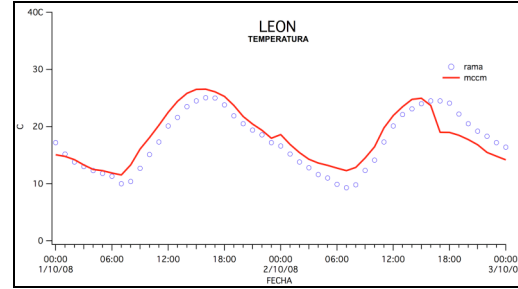
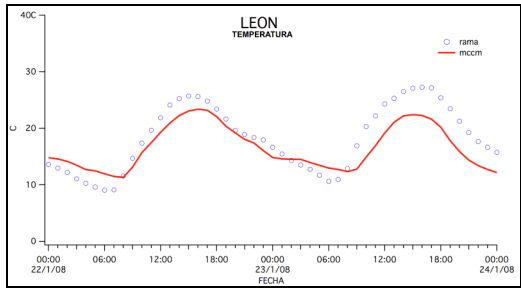
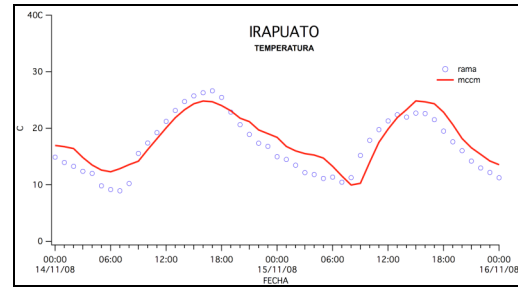
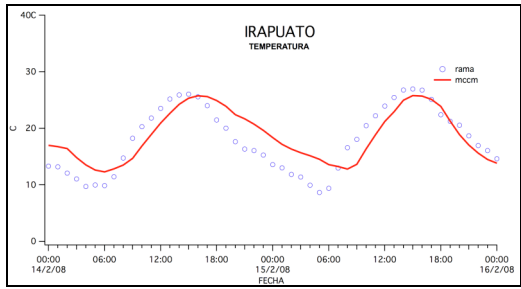
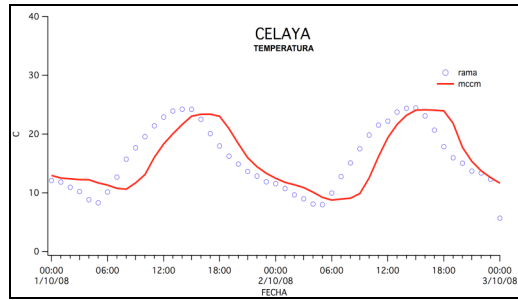
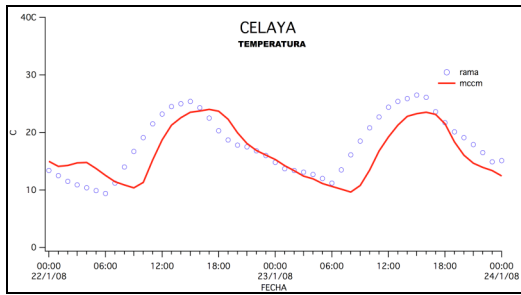


Ilustración 3 Comparación del Modelo contra Red de Monitoreo del Estado para Temperatura.

VELOCIDAD DE VIENTO



Ilustración 4 Comparación del Modelo contra Red de Monitoreo del Estado para Velocidad de Viento.

Para evaluar el desempeño del modelo de forma cuantitativa se analizan los índices de concordancia en las estaciones ubicadas en los diferentes municipios, así como otros datos estadísticos.

A partir de la evaluación se observa que el desempeño del modelo para reproducir las concentraciones de SO_2 es menor ya que no puede estimar las concentraciones máximas reportadas por las mediciones, debido a que en el inventario no se incluyen emisiones extraordinarias de SO_2 de los procesos industriales en la región. Esto se concluye ya que en algunos periodos las concentraciones del modelo si son similares a las concentraciones observadas.

Para el caso de concentraciones de ozono, se observa que los índices de concordancia y los otros parámetros estadísticos indican que se reproduce satisfactoriamente en las cinco ciudades y mejor aun para la temperatura, donde se observa la capacidad del modelo para reproducir casi perfectamente dicha variable, en el caso de velocidad del viento se observa una diferencia significativa, sobre todo en las horas de la tarde y las primeras del día cuando las mediciones muestran intensidades de viento bajas, esto puede ser ya que el modelo da un valor del viento en una celda de 9 km² y la medición es puntual. A continuación se observan las tablas de los datos estadísticos para la evaluación cuantitativa.

Tabla 2 Comparación de los resultados del modelo (M) contra las mediciones de la Red de Monitoreo del Estado (R) para O₃ en la estación Celaya.

Comparación de resultados del MCCM vs Red de Monitoreo para O ₃										
CELAYA	01 ENE	15 FEB	01 ABR	23 ABR	16 MAY	01 JUL	24 JUL	16 AGO	01 OCT	15 NOV
Indice de concordancia	0.85	0.76	0.89	0.83	0.81	0.2	0.4	0.49	0.39	0.61
RMSD	16.4	18.6	14.7	18	19.1	35.4	26.2	24.5	26.3	21.8
RMSDs	11.9	14.6	9.4	11.3	10.2	29.4	23	19.7	22	19.2
RMSDu	11	11.3	11.3	14.1	15.9	19.2	12	14.2	14.7	10.8
Nge (%)	39.6	24.9	10.6	5.7	5.9	35.3	13.9	12.5	43.5	19.8
Nb (%)	38.8	24.4	8.7	1.1	1.1	34.6	12.6	11	43.1	18.6
ANB (%)	53.2	90.3	7.8	1.7	1.3	28.7	12.2	10.1	16.8	13.1

Estadísticos	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R		
Dstd	20	23	20	15	20	27	21	24	22	24	22	5	22	8	21	8	15	10	21	9
Máximo	65	71	66	45	68	74	70	80	74	94	79	22	77	34	71	32	57	32	66	28
Promedio	29	19	30	16	34	31	36	45	38	44	38	10	37	17	36	18	33	12	29	12
Mínimo	0.7	1.2	2.3	2.3	3.9	4.1	0.4	3.2	1.4	4.8	3.3	3.2	1.5	3.7	0.2	4.7	14	1.5	0.4	2.1

Tabla 3 Comparación de los resultados del modelo contra las mediciones de la Red de Monitoreo del Estado para SO₂ en la estación Celaya.

Comparación de resultados del MCCM vs Red de Monitoreo para SO ₂																				
CELAYA	01 ENE	15 FEB	01 ABR	23 ABR	16 MAY	01 JUL	24 JUL	16 AGO	01 OCT	15 NOV										
Indice de concordancia	0.41	0.41	0.50	0.29	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.42										
RMSD	4.9	5.7	6.4	3.5	4.2	5.8	10.7	7.3	6.8	13.8										
RMSDs	4.5	5.4	6.3	2.9	3.6	5.4	10.3	7.4	6.7	13.7										
RMSDu	1.7	1.6	1.4	1.8	2.3	2	2.3	1.9	1	1.7										
Nge (%)	6.4	6.9	7.1	5.5	6.2	6.7	7.1	7.3	8	8.4										
Nb (%)	6.2	6.7	7.1	3.1	4.8	6.6	7.0	7.1	8	8.4										
ANB (%)	6.3	6.9	7.3	4.2	5.1	6.6	7.8	7.3	8	8.3										

Estadísticos	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R
Dstd	2	3	2	3	5	4	2	2	2	2	2	2	2	6	2	3	1	2	2	6
Máximo	9	17	8	21	7	19	9	9	12	12	10	15	12	38	9	21	4	16	9	33
Promedio	2	6	2	7	2	7	3	4	3	6	3	8	3	10	3	10	2	8	2	15
Mínimo	0.2	3.3	0.1	2.8	0.1	2.6	0.2	2.3	0.2	3.9	0.2	6	0.2	5	0.2	7	0.2	5	0.2	5

Tabla 4 Comparación de los resultados del modelo contra las mediciones de la Red de Monitoreo del Estado para Temperatura en la estación Celaya.

Comparación de resultados del MCCM vs Red de Monitoreo para TEMP																				
CELAYA	01 ENE	15 FEB	01 ABR	23 ABR	16 MAY	01 JUL	24 JUL	16 AGO	01 OCT	15 NOV										
Indice de concordancia	0.85	0.90	0.73	0.66	0.80	0.53	0.85	0.81	0.86	0.32										
RMSD	3.53	3.18	6.06	7.2	4.57	5.36	3.34	4.06	3.72	8.71										
RMSDs	2.09	1.89	5.17	6.49	3.72	1.85	1.32	2.50	1.58	7.58										
RMSDu	2.84	2.56	3.07	3.27	2.58	5.06	3.06	3.19	3.31	4.47										
Nge (%)	16.7	18.5	20.9	25.8	17.2	23.6	12.9	14.9	22.8	100										
Nb (%)	58	25	20.8	25.8	17.1	3.52	6.47	12.1	6.23	94										
ANB (%)	8.2	22.4	21.7	25.8	16.5	2.01	5.74	11.7	0.39	64										

Estadísticos	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R
Dstd	4	5	4	5	4	5	5	5	5	4	5	3	5	3	5	4	5	5	4	4
Máximo	24	26	24	26	26	31	27	33	27	30	27	27	27	27	27	27	24	24	24	21
Promedio	16	17	17	17	18	22	19	25	19	22	19	19	19	20	19	21	15	15	16	10
Mínimo	9.6	9.4	10	8	11	13	11	17	11	16	11	15	11	15	11	15	8	5	10	2.6

Tabla 5 Comparación de los resultados del modelo contra las mediciones de la Red de Monitoreo del Estado para Velocidad de Viento en la estación Celaya.

Comparación de resultados del MCCM vs Red de Monitoreo para VELOCIDAD DE VIENTO										
CELAYA	01 ENE	15 FEB	01 ABR	23 ABR	16 MAY	01 JUL	24 JUL	16 AGO	01 OCT	15 NOV
Indice de concordancia	0.16	0.33	0.51	0.29	0.38	0.11	0.14	0.30	0.29	0.68
RMSD	2.35	2.45	2.17	3.5	2.06	2.39	2.5	7.3	7.46	2.3
RMSDs	1.74	1.77	1.35	2.9	1.05	1.77	1.85	7.4	7.36	1.9
RMSDu	1.53	1.68	1.67	1.8	1.71	1.51	1.58	1.9	1.16	1.3
Nge (%)	109	136	115	5.5	81	95	236	7.3	53	85
Nb (%)	106	118	94	3.1	40	51	202	7.1	2.11	25
ANB (%)	97	70	53	4.2	14	15	66	7.3	42.7	4.3

Estadísticos	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R
Dstd	1	0	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	2	6	2	3	1	6	1	2
Máximo	6	3	6	4	7	4	9	9	6	4	6	5	12	38	9	21	5	26	6	8
Promedio	3	1	3	2	3	2	3	4	2	2	2	2	3	10	3	10	3	5	3	3
Mínimo	1.6	1	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	2.3	0.3	0.9	0.1	1	0.2	5	0.2	7	0.5	1.5	1.1	0.8

7.2 ANALISIS CUALITATIVO

Para el análisis cualitativo se obtienen mapas de concentración de O_3 y SO_2 , donde se puede observar la región de alta concentración y hacia donde se desplazan los contaminantes.

La modelación de ozono para las fechas seleccionadas se observa en las siguientes ilustraciones para los meses de Enero y Febrero.

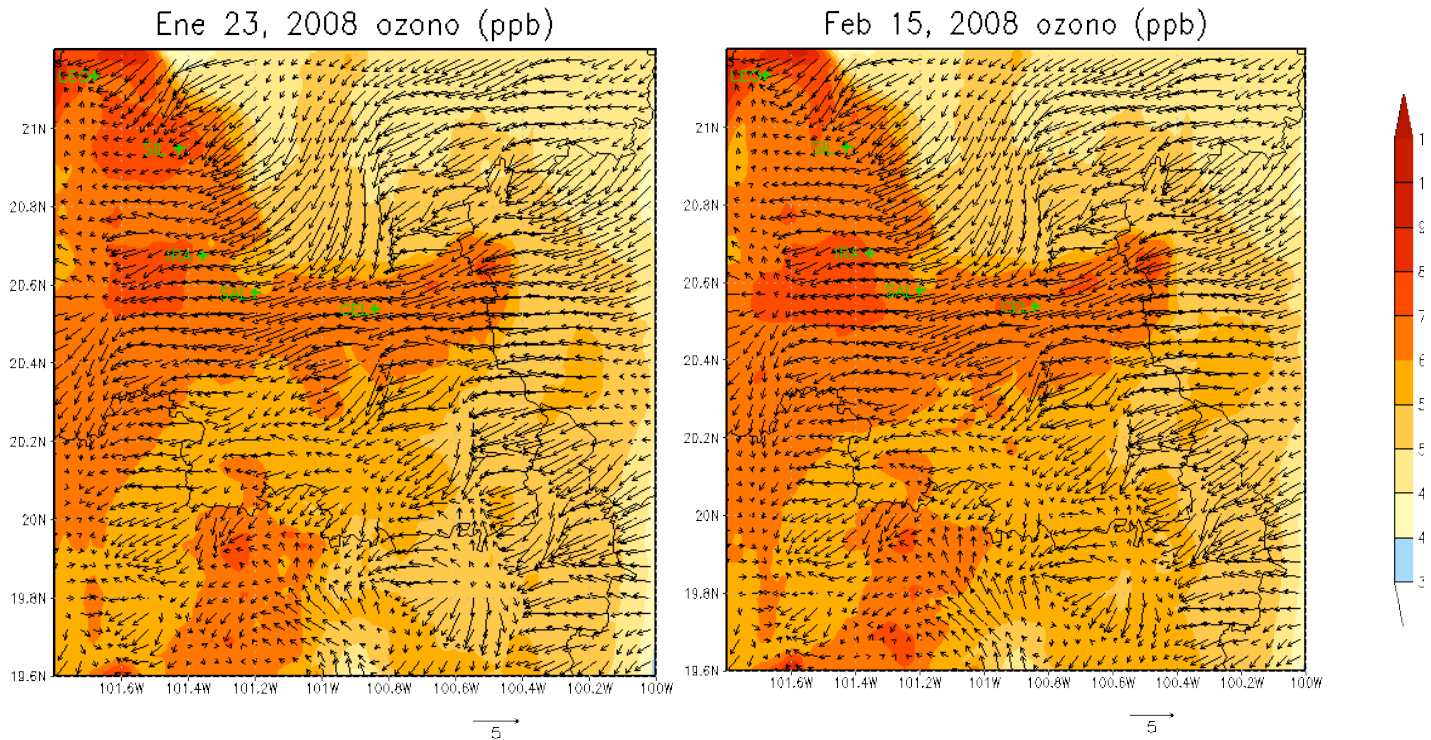


Ilustración 5 Concentraciones promedio de Ozono en la región para los meses de Invierno Enero y Febrero y con localización de las ciudades. (LEO), León, (SIL), Silao, (IRA), Irapuato, (SAL), Salamanca, (CEL), Celaya.

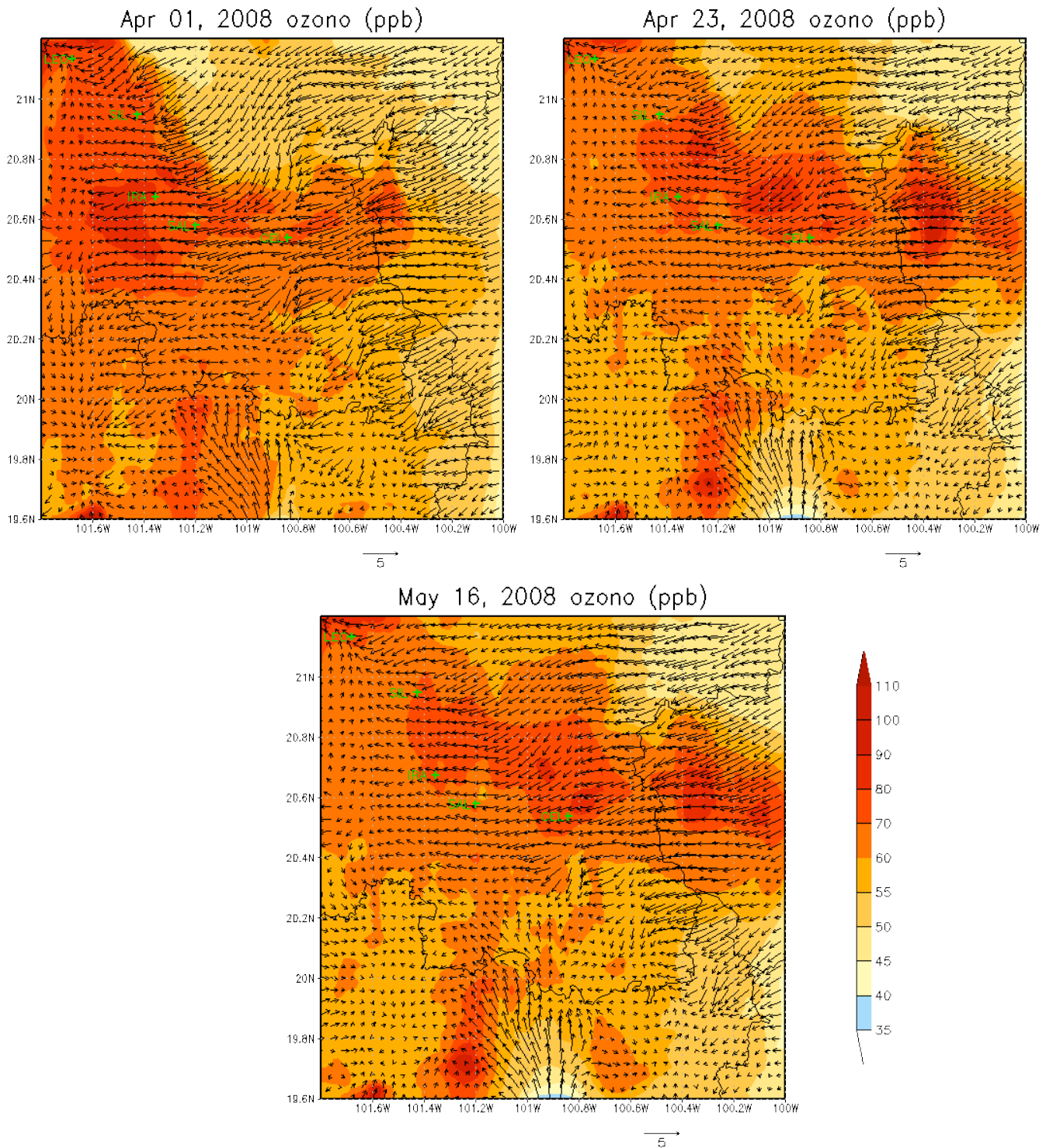


Ilustración 6 Concentraciones promedio de Ozono en la región para los meses Abril y Mayo que se caracterizan por una fuerte intensidad en la radiación solar y secas, con localización de las ciudades. (LEO), León, (SIL), Silao, (IRA), Irapuato, (SAL), Salamanca, (CEL).

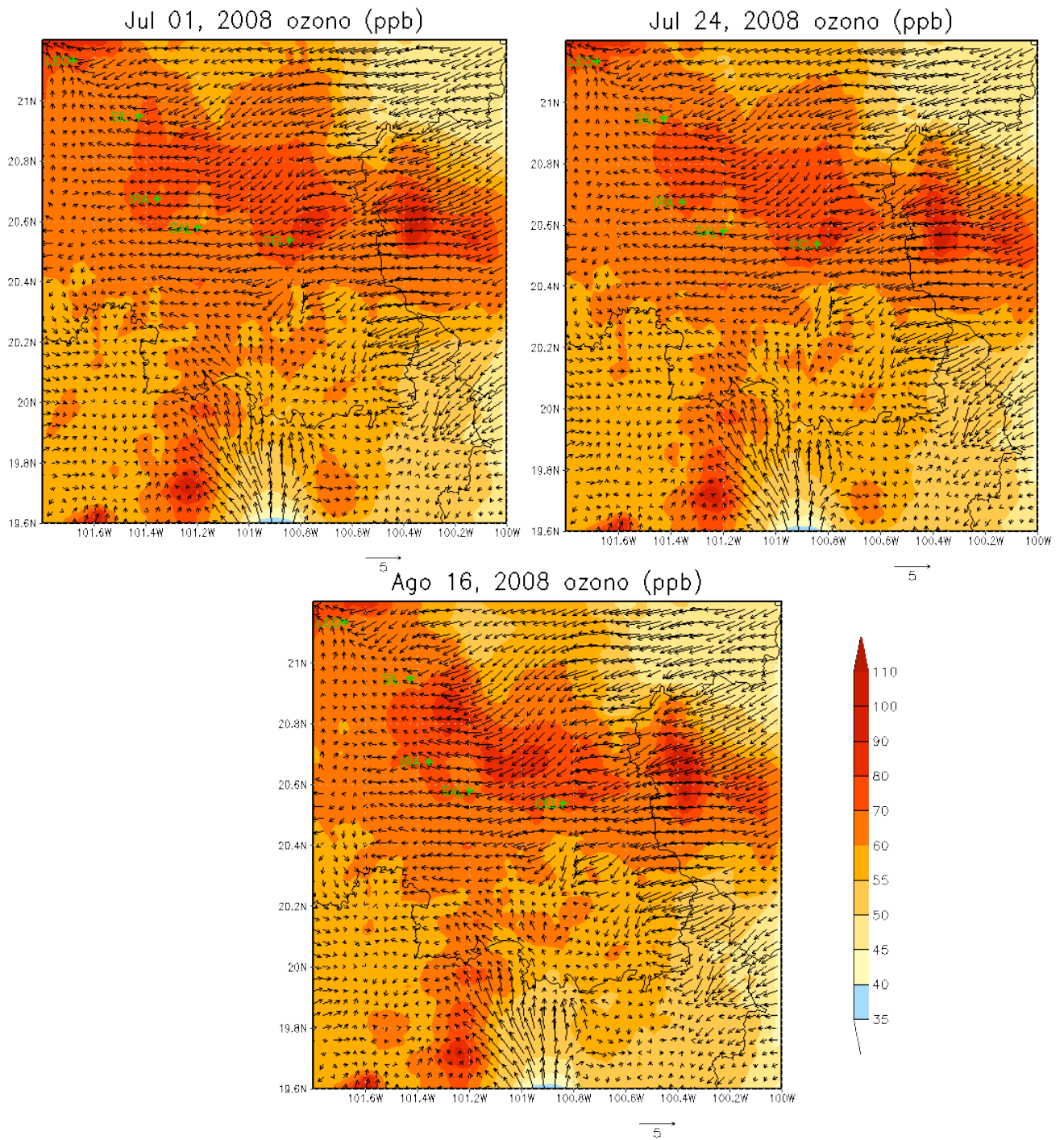


Ilustración 7 Concentraciones promedio de Ozono en la región para los meses Julio y Agosto que se caracterizan por su humedad y fuertes lluvias, con localización de las ciudades. (LEO), León, (SIL), Silao, (IRA), Irapuato, (SAL), Salamanca, (CEL), Celaya.

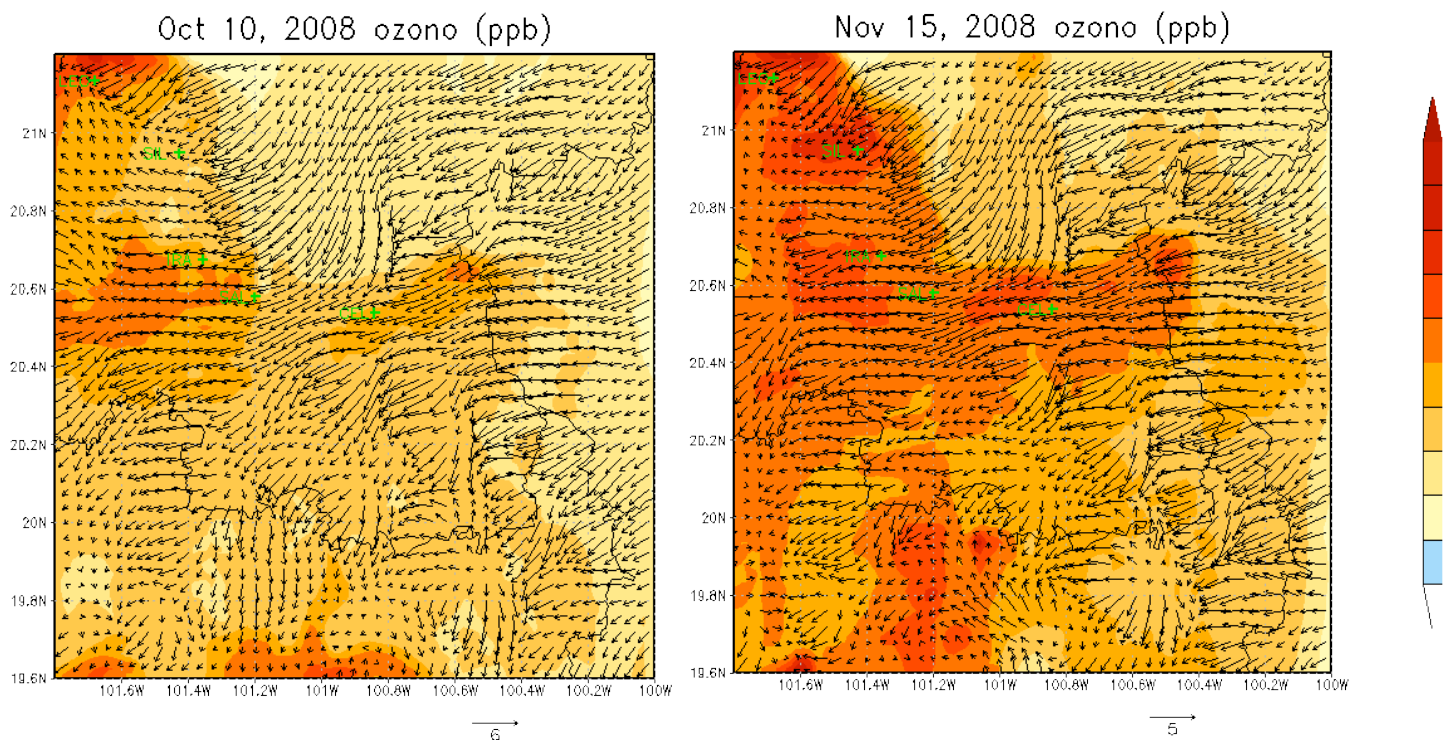


Ilustración 8 Concentraciones promedio de Ozono en la región para los meses Octubre y Noviembre con localización de las ciudades. (LEO), León, (SIL), Silao, (IRA), Irapuato, (SAL), Salamanca, (CEL), Celaya.

En las ilustraciones anteriores (Ilustración 24, 25, 26 y 27), Las direcciones del viento son parecidas en todo el año, con dirección al oeste, lo cual indicaría que hay un transporte de contaminantes desde Querétaro hacia Guanajuato, esto puede generar un aumento en la concentración de contaminantes en las áreas urbanas, se muestra la dispersión del Ozono en toda la región y generalmente los picos no se encuentran en las zonas urbanas ya que este se desplaza viento abajo e impacta en otras regiones.

Los mapas de SO₂ se muestran a continuación, en concentración en partes por billón y con nivel de terreno.

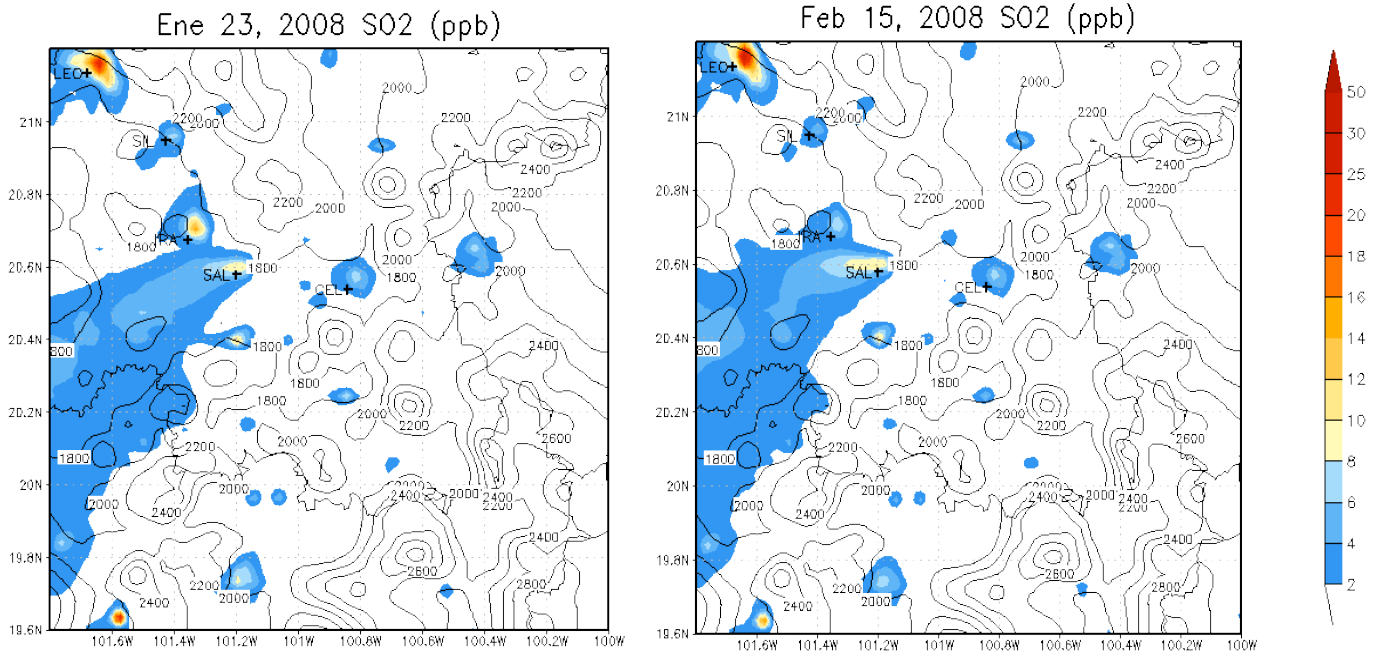
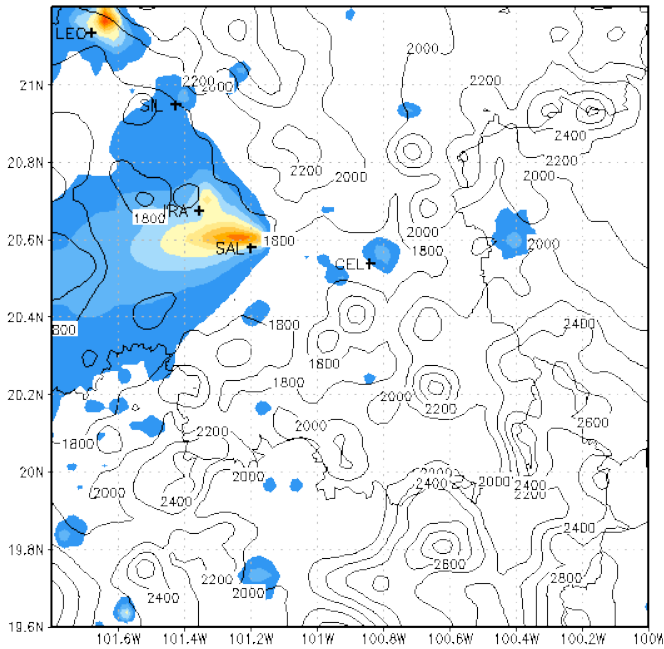
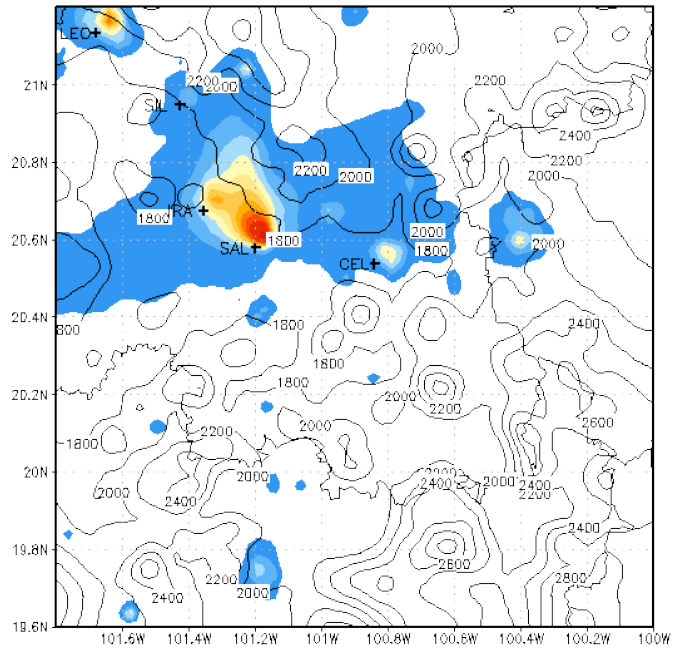


Ilustración 9 Concentraciones promedio de Dióxido de Azufre, con topografía, donde se observan las ciudades de León, Silao, Irapuato, Salamanca y Celaya para los meses de Enero y Febrero.

Apr 01, 2008 S02 (ppb)



Apr 23, 2008 S02 (ppb)



May 16, 2008 S02 (ppb)

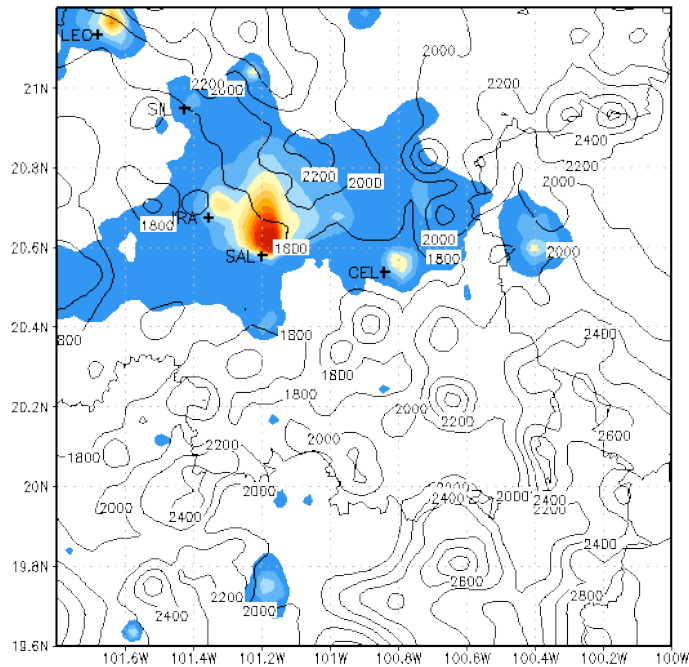
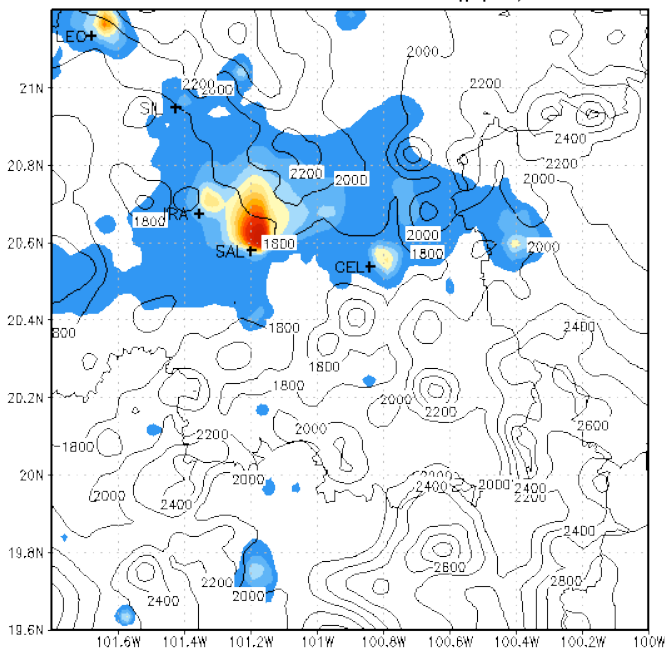
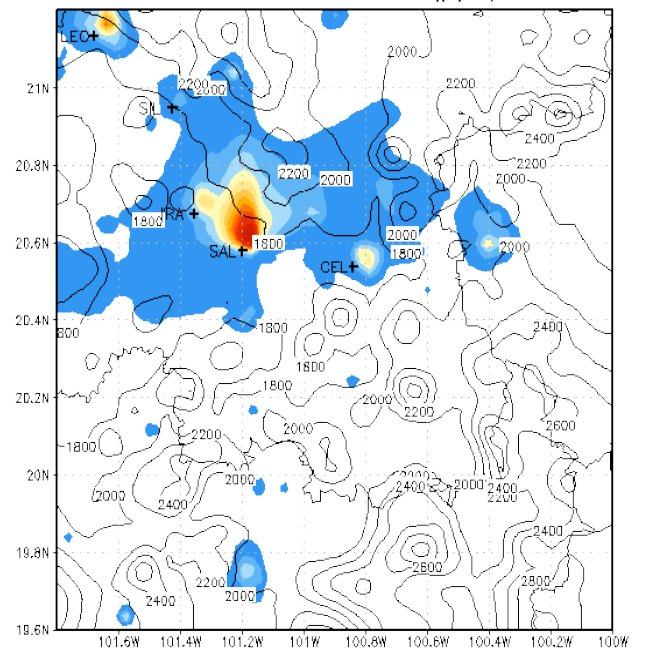


Ilustración 10 Concentraciones promedio de Dióxido de Azufre, con topografía, donde se observan las ciudades de León, Silao, Irapuato, Salamanca y Celaya para los meses de Abril y Mayo.

Jul 01, 2008 S02 (ppb)



Jul 24, 2008 S02 (ppb)



Ago 16, 2008 S02 (ppb)

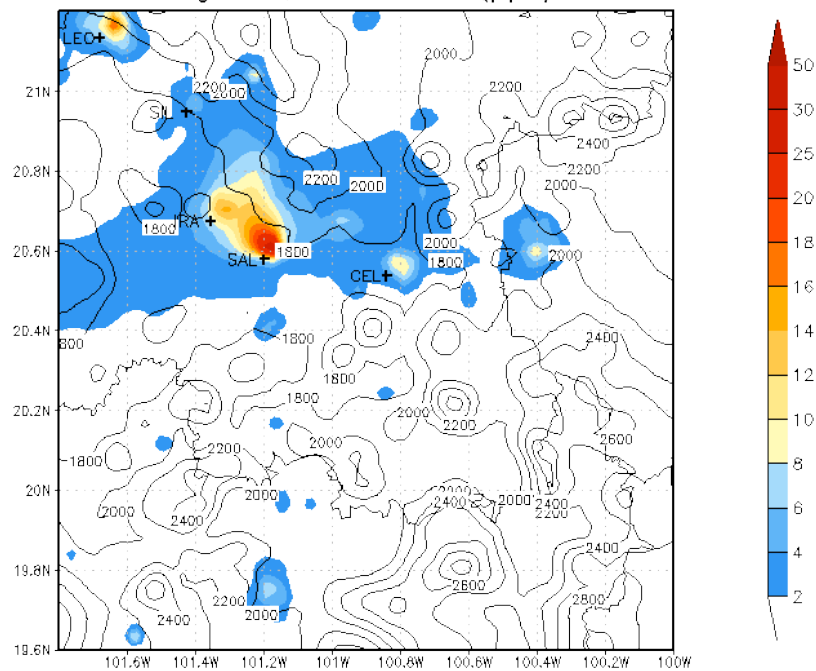
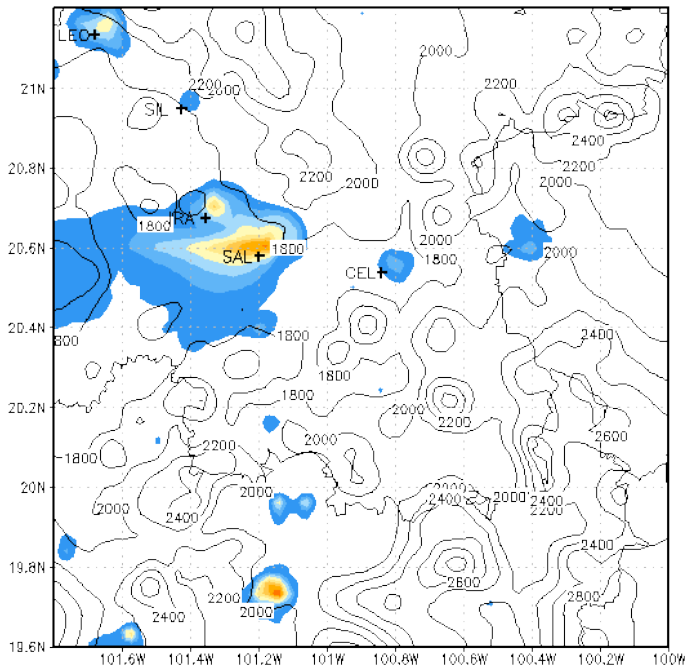


Ilustración 11 Concentraciones promedio de Dióxido de Azufre, con topografía, donde se observan las ciudades de León, Silao, Irapuato, Salamanca y Celaya para los meses de Julio y Agosto que presentan lluvias.

Oct 10, 2008 SO₂ (ppb)



Nov 15, 2008 SO₂ (ppb)

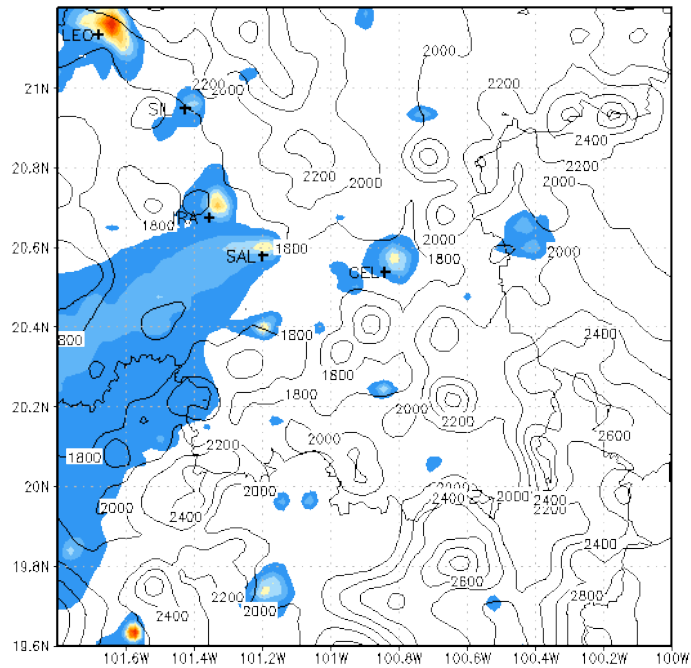


Ilustración 12 Concentraciones promedio de Dióxido de Azufre, con topografía, donde se observan las ciudades de León, Silao, Irapuato, Salamanca y Celaya para los meses de Octubre y Noviembre.

En la Ilustraciones anteriores (**Ilustración 28, 29, 30 y 31**) se muestra la dispersión del SO₂ de la fuente de emisión hacia el oeste, y la zona donde llega la influencia de este contaminante.

La utilidad principal del modelo de calidad del aire es su capacidad para reproducir escenarios donde se presenten altos niveles de concentración de contaminantes y su interacción con la población. Para efectuar esta evaluación se propone un escenario donde se muestre la población en la región contra las concentraciones de dióxido de azufre y de ozono, esto para observar de forma cualitativa el impacto de los contaminantes en la población. La evaluación se hace calculando la métrica de exposición potencial y se generan mapas que se muestran a continuación en las ilustraciones 32 y 33 para O₃ y SO₂ respectivamente.

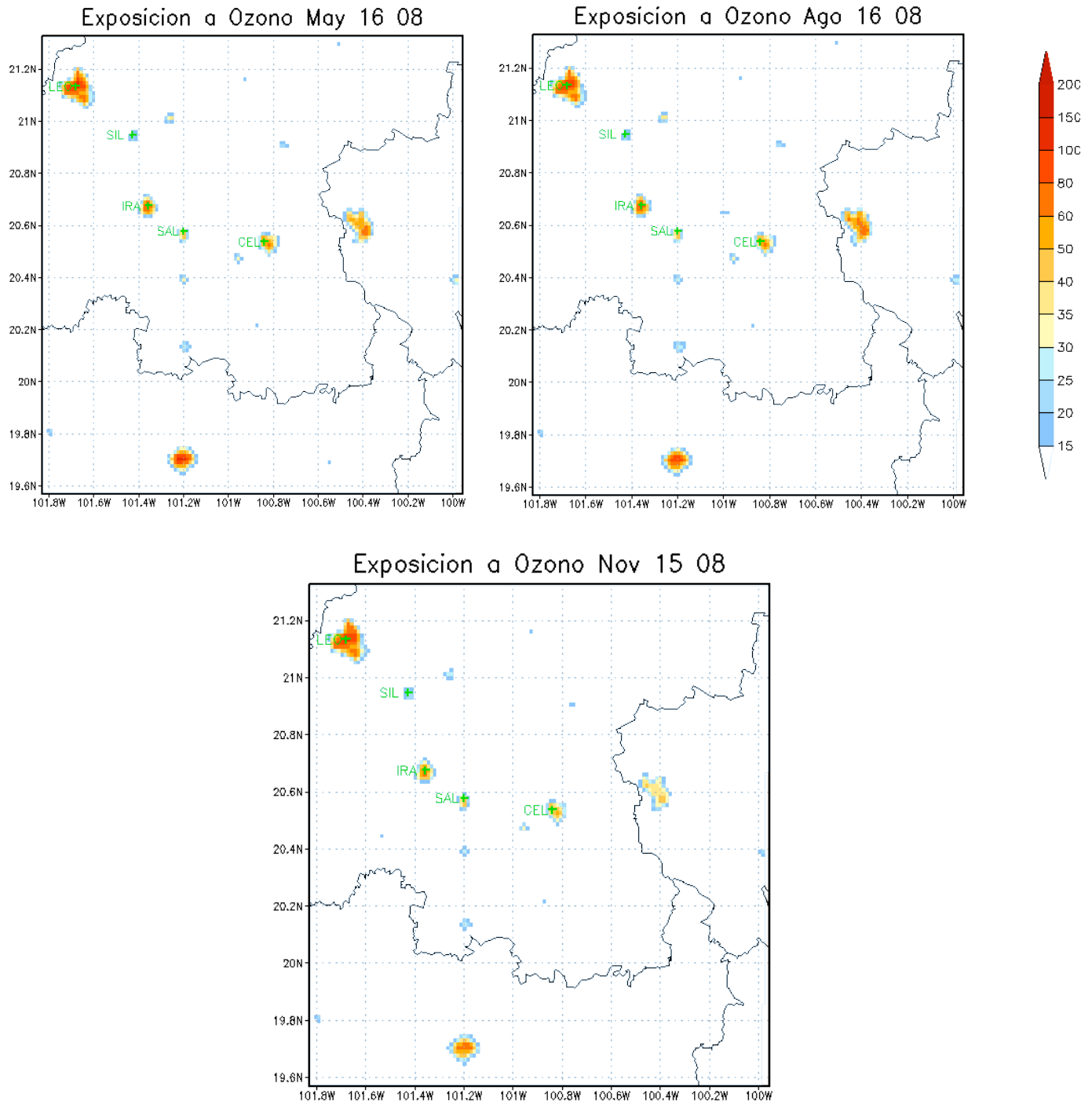
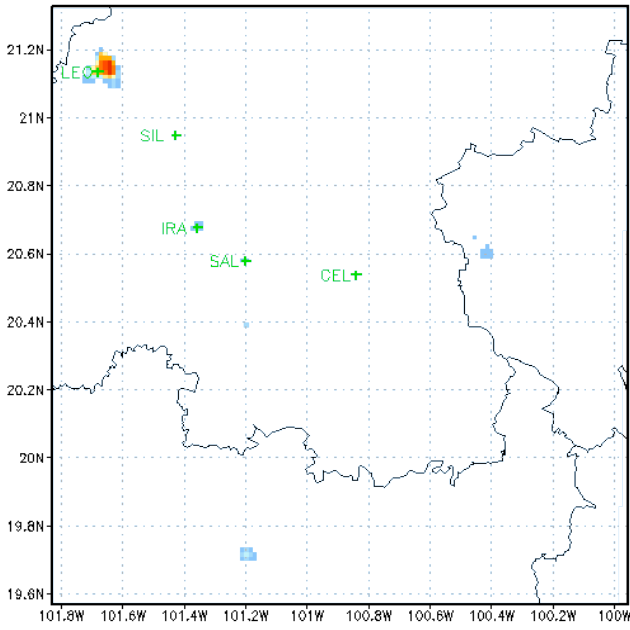
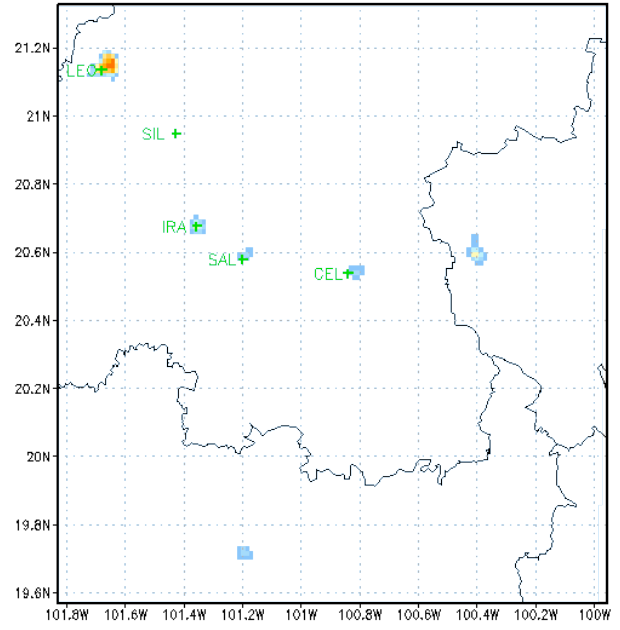


Ilustración 13 Concentración máxima de O₃ por (población/ población total)

Exposicion a SO2 Feb 15 08



Exposicion a SO2 May 16 08



Exposicion a SO2 Ago 16 08

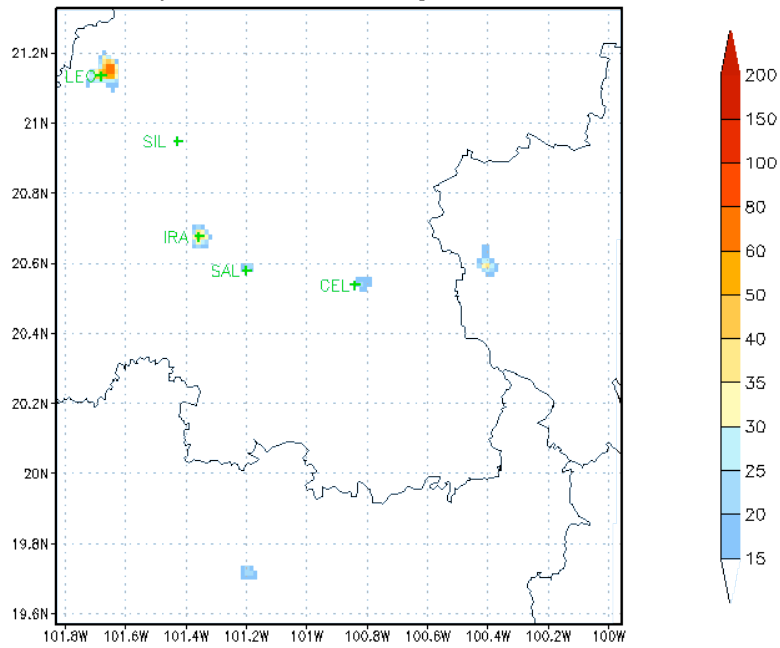


Ilustración 14 Concentración promedio de 24 horas de SO₂ por (población/población total)

8. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados muestran que el empleo de la selección de un conjunto de diez días para la representación del año es satisfactorio, ya que se comprobó de forma estadística que la media de la muestra de conjunto de días es similar a la media anual, así como también ambos conjuntos de datos poseen distribuciones similares.

La actualización del Inventario de emisiones nos proporcionó resultados más cercanos a la realidad contribuyendo a una modelación satisfactoria. Se observa que se tienen desviaciones o diferencias, ya que en el análisis estadístico se tienen resultados con índices de concordancia cercanos a 1 para el ozono y óxidos de nitrógeno (donde 1 es la concordancia perfecta), estos resultados sirven de base de comparación para futuras modelaciones.

El desempeño del modelo en reproducir las concentraciones de dióxido de azufre es menor debido a que los índices de concordancia tienen valores cercanos a 0.5, ya que el modelo no puede estimar las concentraciones máximas reportadas por las mediciones, pues en el inventario no se incluyen emisiones extraordinarias de SO₂ de los procesos industriales en la región. Esto se infiere a partir de la observación de que en algunos periodos las concentraciones del modelo si son similares a las concentraciones observadas.

En las ilustraciones de concentraciones promedio de Ozono (Ilustración 24 – 27), con letras verdes se localizan las ciudades, Silao, Salamanca, León, Irapuato y Celaya, las direcciones del viento promedio son parecidas en todo el año, con dirección este a oeste, lo cual indicaría que hay un transporte de contaminantes desde Querétaro hacia Guanajuato, y que en vientos intensos podría afectar hasta el estado de Jalisco, esto puede generar un aumento en la concentración de contaminantes en áreas urbanas, y en regiones que no se encuentran industrializadas (como Celaya y Silao), pero que se encuentran en el corredor y en la cuenca atmosférica.

Se aprecia que el pico de ozono se manifiesta viento abajo de las ciudades, lo cual genera un problema para la salud de la población, en otros casos se observa la interacción de la cuenca con otras cuencas cercanas, como la de Morelia.

En las ilustraciones de dispersión de SO_2 se observa la pluma del dióxido de azufre cuya trayectoria va de la fuente de emisión hacia el oeste. El incremento en las concentraciones de SO_2 se pueden deber a la topografía y a que en ciertas épocas del año (abril – agosto) la intensidad del viento es baja.

Se observa también como la calidad del aire en la región esta influenciada casi en su totalidad por las emisiones del sector energético de Salamanca y en otros casos por las emisiones de las fuentes urbanas.

Se observa también como la calidad del aire en la región esta influenciada casi en su totalidad por las emisiones del sector energético de Salamanca y en otros casos por las emisiones de las fuentes urbanas.

Tanto para ozono como para SO_2 , los mapas de exposición potencial muestran que en las zonas de mayor densidad de población se tienen los valores más altos de exposición potencial, como se observa sobre las ciudades de León, Querétaro y Morelia principalmente. Los niveles de concentración del modelo no rebasan las normas.

9. CONCLUSIONES

Con este estudio se puede tener una mejor descripción de la calidad del aire en la región del Bajío, así como de las ciudades que se ven más influenciadas por contaminantes, como son León y Salamanca, se puede incluso conocer la tendencia de la contaminación del aire en la cuenca atmosférica así como su trayectoria e influencia en áreas circundantes.

Se obtuvo un conjunto de días representativos del 2008 con los cuales se puede modelar la meteorología y la calidad del aire en la región, este procedimiento podrá ser usado en futuras modelaciones de la demarcación.

El análisis estadístico de los resultados del modelo contra mediciones, muestra que el modelo tiene un buen desempeño para ozono, óxidos de nitrógeno y no para el dióxido de azufre, debido a que no se tienen consideradas en el inventario las emisiones extraordinarias de este contaminante.

De los resultados de la modelación se observa que las concentraciones máximas de ozono se encuentran fuera de las áreas urbanas, viento abajo, principalmente hacia el oeste.

Se concluye que las actividades industriales localizadas en Salamanca tiene la mayor contribución de emisiones de dióxido de azufre a la cuenca atmosférica del Bajío, y como se observa en los mapas no se debe dejar de mencionar a otros corredores importantes como el de Querétaro y Michoacán que impactan e intercambian con otras cuencas, influenciando a otros municipios.

La calidad del aire en Salamanca se ve influenciada principalmente por las emisiones locales, por ser esta zona de alta actividad productiva y densidad de población, y en algunos periodos por el transporte de contaminantes de otras regiones, aunado a sus características de cuenca atmosférica.

Uno de los principales problemas que enfrenta la ciudad de Salamanca es baja dispersión y contribuciones de otras regiones impactando en los niveles de SO_2 .

Se observa que el comportamiento no varía en cada estación a lo largo del año, los meses con la concentración más alta de estos contaminantes son Mayo, Julio y Noviembre, y se presentan en las primeras horas de la mañana.

La exposición potencial se da mayormente en las zonas con mayor densidad de población.

El transporte y la dispersión de los contaminantes está influenciado por variaciones globales y regionales del clima, y obviamente por las condiciones topográficas locales.

En este trabajo se observó la dispersión y acumulación de contaminantes en la cuenca atmosférica del Bajío, lo anterior sirve de base para estrategias de control a futuro.

Se recomienda desarrollar un inventario de emisiones útil para la modelación a partir de los inventarios desarrollados en la región, esto quiere decir que presente una distribución espacial y temporal así como especiación química de los contaminantes como de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), para esta especiación se requiere de una buena caracterización de las fuentes, y se recomienda también incluir el área de Aguascalientes y sus emisiones.

Se recomienda generar escenarios donde el modelo reproduzca los niveles altos de concentración de SO_2 para con ello evaluar la exposición potencial en dichos escenarios.

REFERENCIAS

Bustos, S. (2004) “*Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: análisis del proceso*”. **Tesis de maestría. Universidad de Chile.**

Cabrera, V. (2008) “*Evaluación de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos con la técnica espectroscópica DOAS pasiva*”. **Tesis de Maestría CCA-UNAM.**

Carter, W. (2007) “*Development of an Improved Chemical Speciation Database for Processing Emissions of Volatile Organic Compounds for Air Quality Models*” .

Comisión para la Cooperación de América del norte. Montreal. (2004). “*Emisiones Atmosféricas de las Centrales Eléctricas en América del Norte*”. In: Montreal, Québec, Canadá.

Cortés, P. (2005) “*Simulación de Concentración de contaminantes empleando los códigos MM5 y MCCM.*” **Tesis de Maestría. Centro de investigación en Materiales Avanzados Chihuahua.**

Díaz Nigenda, E. (2004) “*Modelación de partículas PM₁₀ emitidas por erosión eólica en el Valle de México*”. **Tesis de Maestría CCA-UNAM.**

García Reynoso, A. (2002) “*Evaluación de escenarios utilizando el modelo regional de calidad del aire Multiscale Climate Chemistry Model*” **Tesis de Doctorado CCA-UNAM.**

García, R.A., T. Schoenemyer, D.A. Jazcilevich, G. Ruiz-Suarez, and V. Fuentes-Gea, (2000) “*Implementation of the Multiscale Climate Chemistry Model (MCCM) for Central Mexico*”, Air Pollution VII, edited by J.W.S. Longhurst, C.A. Brebbia, and H. Power, pp. 71–78, WIT Press,.

Grell, G.A., S. Emeis, W.R. Stockwell, et al (2000): Application of a multiscale, coupled MM5/Chemistry model to the complex terrain of the VOLTAP valley campaign, Atmos. Environ., 34, 1435–1453.

INEGI: 2006, *Censo Estadístico de Población y Vivienda 2006*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

Iniestra, R., Tania López, David Parra y Zachariah Adelman. “*Preparation of the First National Emissions Inventory for Modeling at a national level in Mexico*”.(2007) In preparation

IEG, Gobierno del Estado de Guanajuato. (2008). "*Informe Ambiental del Estado de Guanajuato*".

IEG, Gobierno del Estado de Guanajuato. (2009). "*Segundo Informe de Resultados año 2009*". PROAIRE LEON.

IEG, Gobierno del Estado de Guanajuato. (2007-2012). "*Segundo Informe de resultados*" (2009). PROAIRE SALAMANCA.

IEG, Gobierno del Estado de Guanajuato (2006). "*Red de Monitoreo de la calidad del aire del Estado de Guanajuato. Análisis y manual de consulta*".

IEG, Gobierno del Estado de Guanajuato. (2008) "*Registro de Emisiones y transferencia de Contaminantes Guanajuato*"

IEG, SEMARNAT. (2004). "*Inventario de Emisiones del Corredor Industrial del Bajío*".

Jacobson, M. (1999). "*Fundamentals of Atmospheric Modeling*". Cambridge University Press.

Jazcilevich, D., et al (2003). "*An Air quality Modeling study Comparing Two Possible Sites for the new international airport for Mexico City*". In: J. Air & Waste Manage. Assoc. 53, 366-378

Jazcilevich, D., Garcia, R. & Ruiz, S. (2002). "*A modeling study of air pollution trough land use change in the Valley of Mexico*". Atmospheric Environment 36, 2297-2307

Jazcilevich, D., Garcia, R. & Ruiz, S. (2003b). "*A study o fair flow patterns affecting pollutant concentrations on the Central Region of Mexico*". Atmospheric Environment 37, 183-193

Magaña, V. & Caetano, E. (2007) "*Identificación de Cuencas Atmosféricas*" In: Informe INE-CCA.

Martínez, B. (1995) "*Introducción al monitoreo Atmosférico*", ECO/GTZ/Departamento del Distrito Federal.

Olvera, C. (2005), "*Simulación de concentración de contaminantes en la Ciudad de Querétaro empleando MCCM*". **Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.**

Seinfeld, J. (1998) "*Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*" John Wiley and Sons Inc. EUA.

SEMARNAT, IEG, Gobierno del Estado de Guanajuato. (2008 – 2012). "*Programa para mejorar la calidad del aire en León*"

SEMARNAT, IEG, Gobierno del Estado de Guanajuato. (2008-2012). *“Programa de Educación Ambiental para mejorar la calidad del aire en Salamanca”* .

SEMARNAT, INE, Gobierno del Estado de Guanajuato. (2007). *“Tercer Almanaque de Datos y Tendencias de la Calidad del Aire en Nueve Ciudades Mexicanas”* .

Sosa, G. (2006). *“Modelación de la exposición de la población de Salamanca. Gto. a los contaminantes atmosféricos”*. In: Instituto Mexicano del Petróleo.

Wellens, A. (2009) *“El Modelo Gaussiano de Dispersión Atmosférica”* Facultad de Ingeniería. UNAM.

Paginas Web visitadas.

<http://epa.gov>

<http://inegi.gob.mx>

<http://ine.gob.mx>

<http://www.sma.df-gob/simat>

<http://ecologia.guanajuato.gob.mx>

<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>

Leyes y normas revisadas.

Ley para la Protección y Preservación del Ambiente del Estado de Guanajuato.

Norma Oficial Mexicana NOM-041-SEMARNAT -2006

Norma Oficial Mexicana NOM-050-SEMARNAT -1993

Norma Oficial Mexicana NOM-047-SEMARNAT -1999

Norma Oficial Mexicana NOM-045-SEMARNAT -2006

Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993

Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993

Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993

Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993

Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA1-1993

Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993

Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993