



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL CENTRO DE
MÉXICO DE LAS EMISIONES GENERADAS
POR INCENDIOS EN EL PARQUE NACIONAL
LA MALINCHE”

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(FÍSICO-QUÍMICA DE LA ATMÓSFERA)

PRESENTA:

ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS

JURADO EXAMINADOR:

DRA. MA. DE LOURDES VILLERS RUIZ (PRESIDENTA)

DR. JORGE ZAVALA HIDALGO (VOCAL)

DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO (TUTOR)

DR. EMMANUEL DÍAZ NIGENDA (SUPLENTE)

DR. JOSÉ NOEL CARBAJAL PÉREZ (SUPLENTE)



MÉXICO D.F

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Al ***Posgrado en Ciencias de la Tierra*** y al ***Centro de Ciencias de la Atmósfera*** de la UNAM por ser la casa de estudios 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 la realización de este proyecto durante dos años de maestría.

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

A la ***Dra. María de Lourdes Villers Ruiz*** por su apoyo, comprensión y colaboración, facilitándome los datos para que este trabajo fuera realizado.

Al ***Dr. Jorge Zavala Hidalgo*** por aceptar ser parte de mi jurado, apoyándome con sus consejos y observaciones realizadas para el mejoramiento de este trabajo.

Al ***Dr. Emmanuel Díaz Nigenda*** por su valiosa contribución y consejos para el mejoramiento de este trabajo y por su valiosa amistad.

Al ***Dr. José Noel Carbajal Pérez*** por su valiosa contribución para enriquecer este trabajo y por su pronta respuesta.

Al ***Dr. Ricardo Torres Jordón***, a la ***M. en C. Laura Margarita Granada Masias***, al ***Dr. Arón Jazcilevich Diamant***, a la ***M. en C. Bertha Mar*** y al ***M. en C. Williams Vásquez*** por su apoyo, consejos y conocimientos brindados para mi crecimiento profesional.

A todos ustedes, GRACIAS...

DEDICATORIA

A mi hija **Aixa** que a pesar de su corta edad
entiende perfectamente las circunstancias. TE AMO.

A mi esposo **Fernando** por todo su apoyo brindado
en esta nueva etapa que comenzamos. TE AMO.

A mis padres **Ma. Del Carmen** y **B. Eliseo** por su apoyo incondicional
y estar siempre ahí para nosotros, que simplemente
les debo lo que ahora soy, muchas gracias por todo. LOS AMO.

A mi hermano **Adrian** y mis primos **Juan Manuel** y **Andrea**
por ser mis mejores amigos y de quienes aprendo
demasiado a diario, GRACIAS.

A la familia **Campos Molina** y **Mendoza Martínez**
por su incondicional apoyo, MUCHAS GRACIAS.

A mis **amigos** y **compañeros** que de alguna forma
contribuyeron a que terminara este proyecto. GRACIAS.

Y en especial al arquitecto del universo...

ÍNDICE

RESUMEN.....	11
CAPÍTULO 1 INTRODUCCION	13
OBJETIVO.....	14
JUSTIFICACION.....	14
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	16
2.1 Ambiente de fuego.....	17
2.2 Meteorología	17
2.3 Topografía.....	18
2.4 Combustibles	18
2.5 Causas de los incendios forestales	19
2.6 Retroalimentación del incendio	20
2.7 Tipos de incendio	21
2.8 Consecuencias de los incendios forestales.....	22
2.9 Características de los contaminantes	22
2.10 Normatividad	23
2.11 Área de estudio	23
CAPÍTULO 3 GENERALIDADES DEL MODELO	28
3.1 Modelo Weather Research and Forecasting (WRF)	28
3.2 Post-procesador del WRF (WPP)	29
3.3 Generalidades del Modelo de Herramientas de Evaluación (MET).....	30
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA.....	31
4.1 Identificación de los eventos.....	32
4.2 Evaluación de la influencia.....	34

4.3 Obtención de datos	34
4.3.1 Datos meteorológicos.....	34
4.3.2 Descripción de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).....	34
4.4 Datos de incendios	35
4.5 Factores de Emisión.....	35
4.6 Inventario de emisiones	36
4.7 Método elegido para la estimación de las emisiones	36
4.8 Datos de entrada del Modelo WRF.....	38
4.9 Cálculo del índice de concordancia.....	40
4.10 Cálculo de Proporción.....	41
<i>CAPÍTULO 5 RESULTADOS</i>	<i>42</i>
5.1 Comparación entre mediciones de la RAMA y el modelo	42
5.2 Análisis estadístico	48
5.3 Resultados de los escenarios.....	49
<i>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	<i>60</i>
<i>CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA.....</i>	<i>62</i>
<i>ANEXO I</i>	<i>67</i>
<i>ANEXO II</i>	<i>69</i>
<i>ANEXO III</i>	<i>82</i>

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Triángulo del Fuego.</i>	16
<i>Figura 2. La meteorología y el clima son dos factores en la distribución y propagación de incendios, la época de secas es cuando es más probable la generación de incendios.</i>	17
<i>Figura 3. Las laderas pueden contribuir a la dispersión de incendios.</i>	18
<i>Figura 4. Los tipos de combustibles son muy importantes para la propagación del incendio.</i>	19
<i>Figura 5. Ejemplo de foco secundario por gravedad.</i>	20
<i>Figura 6. Incendio superficial.</i>	21
<i>Figura 7. Área de estudio abarca los estados de Morelos, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Distrito Federal y Estado de México, el polígono rojo corresponde al Parque Nacional Malinche y de color verde los municipios a evaluar en este trabajo.</i>	24
<i>Figura 8. Ubicación del Parque Nacional Malinche y los municipios evaluados.</i>	26
<i>Figura 9. Tipo de vegetación en Malinche a) Bosque de Pinus montezumae, b) Agricultura de temporada.</i>	27
<i>Figura 10. Diagrama de flujo de pre-procesadores del WRF.</i>	28
<i>Figura 11. Diagrama de flujo del modelo WPP.</i>	29
<i>Figura 12. Diagrama de flujo de la modelación con WRF y METv3.</i>	31
<i>Figura 13. Ubicación de los incendios evaluados en el Parque Nacional Malinche.</i>	33
<i>Figura 14. Localización de estaciones de la RAMA Fuente: Red Ambiental de Monitoreo Atmosférico (RAMA).</i>	35
<i>Figura 15. Evaluación de emisiones de un incendio. Fuente: EPA Chapter 13.</i>	37
<i>Figura 16. Temperatura promedio de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 4 – Marzo – 2009.</i>	43
<i>Figura 17. Temperatura promedio de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 11 – Marzo – 2006.</i>	43
<i>Figura 18. Promedio de la Humedad Relativa de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 4 – Marzo – 2009.</i>	44
<i>Figura 19. Promedio de la Humedad Relativa de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 11– Marzo– 2006.</i>	44
<i>Figura 20. Ozono promedio en ppb de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 04 – Marzo – 2009.</i>	44
<i>Figura 21. Ozono promedio en ppb de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 11 – Marzo – 2006</i>	45
<i>Figura 22. Promedio de Dióxido de Azufre (SO₂) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el</i>	45

Figura 23. Promedio de dióxido de azufre (SO_2) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el	45
Figura 24. Promedio de Monóxido de carbono (CO) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el.....	46
Figura 25. Promedio de Monóxido de carbono (CO) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el.....	46
Figura 26. Promedio de Dióxido de nitrógeno (NO_2) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el.....	46
Figura 27. Promedio de Dióxido de nitrógeno (NO_2) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el.....	47
Figura 28. Promedio de Monóxido de nitrógeno (NO) en ppb para las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el.....	47
Figura 29. Promedio de Monóxido de nitrógeno (NO) en ppb para las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el 11 – Marzo – 2006.....	47
Figura 30. Concentración máxima de CO de 30 ppm para la hora inicial se muestra de color azul y la final de color morado.	49
Figura 31. Concentración máxima de NO_2 es de 0.55 ppm.	50
Figura 32. Concentración máxima de NO de 0.6 ppm.	50
Figura 33. Concentración máxima de O_3 de 30 ppb.....	51
Figura 34. Concentración máxima de PM_{10} de $16 \mu g/m^3$	51
Figura 35. Concentración máxima de Tolueno de 0.002 ppm.	52
Figura 36. Concentración máxima de CO de 5 ppm la hora inicial del incendio se presenta de color amarillo y la hora final de color morado.	52
Figura 37. Concentración máxima de NO_2 de 0.045 ppm.....	53
Figura 38. Concentración máxima de O_3 de 3 ppb la hora inicial se muestra de color azul y la hora final de color morado.	53
Figura 39. Concentración máxima de Tolueno de 2.6 ppm.	54
Figura 40. Dirección de viento para el 18 de abril del 2006, el viento predominante es de sureste.....	56
Figura 41. Dirección de viento del 11-febrero -2009, l viento predominante es al noroeste.....	56
Figura 42. Dirección del viento predominante sureste a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.	82
Figura 43. Concentración máxima de CO 3.5 ppm durante el incendio.....	83
Figura 44. Concentración máxima de NO 0.05 ppm durante el incendio.	83
Figura 45. Concentración máxima de NO_2 0.08 ppm durante el incendio.....	84
Figura 46. Concentración máxima de PM_{10} $12 \mu g/m^3$ durante el incendio.....	84

Figura 47. Concentración máxima de Xyleno 0.07 ppm durante el incendio.....	85
Figura 48. Dirección del viento (sur-norte) predominante a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.	86
Figura 49. Concentración máxima de CO 5 ppm durante el incendio.....	86
Figura 50. Concentración máxima de NO 0.18 ppm durante el incendio.	87
Figura 51. Concentración máxima de NO ₂ 0.045 ppm durante el incendio.	87
Figura 52. Concentración máxima de PM ₁₀ de 21 µg/m ³ durante el incendio.....	88
Figura 53. Concentración máxima de Tolueno 0.003 ppm durante el incendio.	88
Figura 54. Dirección del viento (sur-norte) predominante a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.	89
Figura 55. Concentración máxima de CO 30 ppm durante el incendio.....	89
Figura 56. Concentración máxima de NO ₂ 0.55 ppm durante el incendio.....	90
Figura 57. Concentración máxima de NO 0.6 ppm durante el incendio.	90
Figura 58. Concentración máxima de O ₃ 30 ppb durante el incendio.	91
Figura 59. Concentración máxima de PM ₁₀ 16 µg/m ³ durante el incendio.	91
Figura 60. Concentración máxima de Tolueno 0.0025 ppm durante el incendio.....	92
Figura 61. Dirección del viento (norte-sur) predominante a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.	93
Figura 62. Concentración máxima de CO 5 ppm durante el incendio.....	93
Figura 63. Concentración máxima de NO 0.045 ppm durante el incendio.	94
Figura 64. Concentración máxima de O ₃ 3.3 ppb durante el incendio.	94
Figura 65. Concentración máxima de PM ₁₀ de 20 µg/m ³ durante el incendio.....	95
Figura 66. Concentración máxima de Etanol 2.6 ppm durante el incendio.	95
Figura 67. Dirección del viento (este-oeste) predominante a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.....	96
Figura 68. Concentración máxima de CO 0.27 ppm durante el incendio.	96
Figura 69. Concentración máxima de NO 0.005 ppm durante el incendio.	97
Figura 70. Concentración máxima de NO ₂ 0.005 ppm durante el incendio.....	97
Figura 71. Concentración máxima de PM ₁₀ de 15 µg/m ³ durante el incendio.....	98
Figura 72. Dirección del viento (norte-oeste) predominante a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.....	99
Figura 73. Concentración máxima de CO 5 ppm durante el incendio.....	99
Figura 74. Concentración máxima de NO ₂ 0.12 ppm durante el incendio.....	100
Figura 75. Concentración máxima de NO 0.045 ppm durante el incendio.	100
Figura 76. Concentración máxima de O ₃ 3.3. ppb durante el incendio.	101

Figura 77. Concentración máxima de PM_{10} de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el incendio..... 101

Figura 78. Concentración máxima de Tolueno 0.0036 ppm durante el incendio. 102

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Resumen de normas de contaminantes atmosféricos.</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2. Municipios evaluados de Tlaxcala.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 3. Biomasa de las comunidades de Malinche.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 4. Datos de los incendios registrados en Malinche.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 5. Factores de emisión EPA AP-42.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 6. Principales compuestos del inventario de emisiones Tlaxcala 2005.</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 7. Índice de concordancia.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 8. Condiciones meteorológicas para cada incendio evaluado.</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 9. Resumen de las emisiones calculadas con respecto al tipo de vegetación.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 10. Proporción de las emisiones calculadas y el inventario de emisiones Tlaxcala 2005.</i>	<i>58</i>

RESUMEN

La emisión de contaminantes por incendios forestales y quemas agropecuarias contribuye a la contaminación del aire. El presente trabajo se realizó con el objetivo de determinar la afectación de la calidad del aire en el centro de México por los incendios ocurridos en el Parque Nacional Malinche. El período de incendios forestales evaluado fue durante la temporada de secas (Febrero – Abril) de los años 2006 y 2009, tomando los incendios más importantes tanto en duración como en extensión de área quemada.

Debido a que la información en el país sobre las emisiones son muy escasas y la duración de los incendios es muy variable, se estimaron las emisiones de once contaminantes (SO_2 , CO, NO_x , VOC's, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , CH_4 , $C_{\text{elemental}}$, $C_{\text{orgánico}}$, CO_2 y Benceno) y ocho Hidrocarburos Poli cíclicos Aromáticos (HAP's), (Metanol, Formaldehído, Benzopireno, Tolueno, Xileno, Estireno, Fenol y Hexano), empleando la información de factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Se utilizó el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) versión 3.3.1 para analizar la dispersión de los contaminantes, se utilizó el modelo Post-Procesador WRF (WPP) versión 3 para la visualización del impacto en la calidad del aire en la región y finalmente el modelo de herramientas para la validación (MET) versión 3.0.1 el cual establece los estadísticos entre el modelo y los datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).

Se modelaron dos tipos de escenarios (con y sin emisiones) con el objetivo de hacer la comparación entre éstos y su afectación en la calidad del aire del centro de México por los incendios ocurridos. Como resultado se obtuvieron las emisiones y las concentraciones de los contaminantes evaluados; así también, se obtuvieron los promedios de temperatura, humedad relativa, y de las concentraciones de los contaminantes evaluados por las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT). Por otro lado se compararon las emisiones calculadas y las del inventario de emisiones de Tlaxcala 2005, ya que este no incluye las emisiones por incendios forestales. Se observó que hay una proporción desde el 1% hasta un 8% en partículas menores de 10 micras (PM_{10}) y de 0.1 a 1% en Monóxido de Carbono (CO) como los contaminantes más representativos.

Como conclusión tenemos que los incendios forestales sí afectan la calidad del aire del centro de México, especialmente en el Estado de Tlaxcala; por lo que se requiere una mayor atención por parte de los tomadores de decisiones, para aplicar algún programa que permita obtener

información precisa y poder determinar el impacto de los incendios forestales en la calidad del aire y en la salud de la población.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCION

Un incendio forestal es un proceso a gran escala de combustión natural, que consume diferentes tipos de flora, tamaños y edades de bosques en un área geográfica. En consecuencia, los incendios forestales son fuentes potenciales de grandes cantidades de contaminantes del aire que deben ser considerados cuando se trata de relacionar las emisiones con la calidad del aire en ciudades cercanas a áreas forestales como sucede en el centro de México.

El tamaño, la intensidad y la ocurrencia de un incendio forestal dependen directamente de variables tales como condiciones meteorológicas, topografía, tipo de vegetación así como su contenido de humedad y la masa del combustible por hectárea (carga de combustible disponible). Una vez que comienza un incendio, el material combustible seco se consume primero. Si la liberación de energía es grande y de suficiente duración, ocurre el secado de material verde vivo, con la posterior quema de éste. Bajo condiciones ambientales adecuadas y de combustible, este proceso puede iniciar una reacción en cadena. Estos eventos ocurren principalmente en época de secas.

Los incendios forestales contribuyen directamente en el incremento de bióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera y en la deforestación, con sus consecuencias como la erosión de los suelos o el cambio de estructura y composición de los bosques (Villers, 2006). Al igual afecta a los ecosistemas y la salud de la población.

Existen modelos de la calidad del aire que nos permiten evaluar el impacto de los incendios forestales los cuales nos permiten simular diferentes tipos de escenarios en donde se pueden modificar las emisiones de un sitio en particular, generando escenarios específicos para la distribución espacial y temporal de la calidad del aire. El uso de modelos es común para la evaluación de estrategias de los tomadores de decisiones; sin embargo, la exactitud y eficiencia de los modelos dependen de factores como la resolución del modelo, sus parámetros, su física y química como también se encuentra en los datos de entrada con los que se alimentan, para poder validar los resultados obtenidos mediante la comparación de mediciones en campo. Por esta razón es preciso contar con datos confiables para obtener un mejor resultado del modelo y su validación.

El propósito de este trabajo es modelar el impacto en la calidad del aire en el centro de México por las emisiones generadas de los incendios forestales ocurridos en el Parque Nacional Malinche

(PNM). La información sobre la superficie quemada y la duración del incendio en el Parque corresponde a los Proyectos CONACyT 38697 y 52464 (Villers, 2005, Villers, 2008).

Debido a que la información sobre las emisiones son muy escasas y la duración de los incendios es muy variable, se estimaron las emisiones de once contaminantes (SO_2 , CO, NO_x , VOC's, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , CH_4 , $\text{C}_{\text{elemental}}$, $\text{C}_{\text{orgánico}}$, CO_2 y Benceno) y ocho Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HAP's), (Metanol, Formaldehído, Benzopireno, Tolueno, Xyleno, Estireno, Fenol y Hexano) empleando la información de los métodos de estimación de emisiones y factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Se utilizó el modelo WRF para la modelación de la calidad del aire, para lo cual se crearon dos escenarios con la finalidad de comparar las emisiones con incendios y las emisiones sin incendios, se utilizaron los modelos WPP para la visualización y el modelo METv3 para la validación de los resultados del modelo con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).

Se calculó la proporción de los contaminantes CO, NO_x , PM_{10} y COV's con el inventario de emisiones de Tlaxcala 2005.

Con este trabajo se pretende establecer una evaluación de los resultados de la modelación con el modelo WRF y la afectación de la calidad del aire de la región, como una propuesta metodológica para continuar y ampliar las investigaciones sobre la afectación en la calidad del aire por los incendios forestales.

OBJETIVO

- Aplicar un método de varias herramientas de modelación para evaluar el impacto de los incendios forestales del Parque Nacional Malinche en la calidad del aire del centro de México.

JUSTIFICACION

Las emisiones de incendios deben ser caracterizadas y consideradas para lograr una buena gestión de la calidad del aire.

Las estimaciones temporales y espaciales de las emisiones de los incendios han sido problemáticas principalmente debido a la incertidumbre en el tamaño, la ubicación y caracterización precisa de las fuentes, y su variabilidad temporal y espacial.

No se conoce el impacto de las emisiones provenientes de los incendios forestales en la calidad del aire del centro de México. Este trabajo pretende identificar de forma cualitativa y cuantitativa dicho impacto y la validación del método utilizado.

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

En la actualidad existen pocas investigaciones sobre la afectación de la calidad del aire por las emisiones generadas de los incendios forestales, mediante la aplicación de modelos, (Pouliot, *et. al.*,2004) realizó el acoplamiento de los modelos BLUESKY y SMOKE; (Stuefer, *et. al.*, 2009) realizaron la modelación con WRF de los incendios de Alaska. En México Contreras, *et. al.* (2003) realizó un estudio de laboratorio de las emisiones de NOx mediante quimioluminiscencia para *Pinus hartwegii* y Villers y López (2004) realizaron una cuantificación de combustibles en el Parque Nacional Malinche, de igual forma Villers se ha dado a la tarea de la cuantificación y afectación en la flora por los incendios ocurridos en esta región.

La emisión es la descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, proveniente de una fuente fija o móvil y la concentración de una sustancia en el aire es la relación que existe entre el peso o el volumen de una sustancia y la unidad de volumen del aire en la cual está contenida.

Los componentes del triángulo del fuego varían en el espacio y en el tiempo para producir cambios en el comportamiento de los incendios forestales.

El comportamiento de un incendio forestal se puede definir por la forma en que se incendia el combustible, se propaga el incendio y otras características meteorológicas como por ejemplo la humedad relativa. La velocidad de propagación del incendio, su intensidad y otras características de comportamiento del fuego responden a la combinación particular y siempre cambiante de los componentes del triángulo del fuego (Figura 1).

El ambiente afecta al comportamiento del fuego, también hay que recordar que el mismo incendio puede modificar el ambiente en el que arde.



Figura 1. Triángulo del Fuego.

2.1 Ambiente de fuego

Los tres componentes del triángulo del fuego que controlan el comportamiento del incendio son la meteorología, la topografía y los combustibles. El comportamiento depende de las condiciones de los tres componentes. El triángulo muestra esta relación de dependencia, por ejemplo en un área donde los combustibles son abundantes y secos, el tiempo es caluroso, seco y ventoso, y la disposición de los combustibles en el terreno es favorable, existe el potencial de un incendio de comportamiento extremo.

2.2 Meteorología

La meteorología es la componente más variable del ambiente. El clima controla la frecuencia de los incendios y la superficie afectada en amplias escalas temporales (en años o décadas) (Villers y López, 2004, Fulé y Covington, 1998), ya que la variabilidad en las condiciones climáticas y meteorológicas modifican constantemente la ignición y la dispersión de los incendios al modificar el estado de los combustibles (Villers y López, 2004; Pereira *et al.*, 2005), los factores meteorológicos pueden cambiar rápidamente debido a los cambios en las masas de aire, el ciclo diurno (noche y día) y efectos locales como la topografía, las condiciones cambian en el espacio, motivo por el cual no se presentan las mismas condiciones en diferentes partes del incendio.

Los factores meteorológicos que influyen en el comportamiento son:

- Temperatura
- Humedad relativa
- Estabilidad atmosférica
- Velocidad y dirección del viento
- Precipitación



Figura 2. La meteorología y el clima son dos factores en la distribución y propagación de incendios, la época de secas es cuando es más probable la generación de incendios.

Cada uno de estos factores pueden afectar el comportamiento del fuego y todos juntos pueden contribuir a crear un incendio de comportamiento extremo como se observa en la Figura 2.

2.3 Topografía

La topografía es el factor más constante de los tres componentes, sin embargo las características topográficas pueden variar enormemente con la distancia como se ejemplifica en la Figura 3. Los factores más importantes para el comportamiento son:

- Altitud
- Posición de la ladera
- Orientación
- Rugosidad del terreno
- Pendiente de la ladera



Figura 3. Las laderas pueden contribuir a la dispersión de incendios.

2.4 Combustibles

Se entiende por combustibles forestales a un complejo de materiales vivos y muertos. (Villers 2006) La presencia de combustibles es muy importante para la propagación del incendio, sus variaciones son espaciales y temporales ya que puede cambiar mucho el tipo de vegetación entre lugares cercanos y en cada estación del año, la humedad de los combustibles vivos y muertos, varían en el espacio y en el tiempo debido a las características de la topografía y las condiciones meteorológicas, en la Figura 4 se puede observar un ejemplo.

Las características específicas que afectan a la propagación son:

- Carga de combustible

- Tamaño y forma
- Compactación
- Continuidad horizontal
- Contenido de humedad
- Composición química



Figura 4. Los tipos de combustibles son muy importantes para la propagación del incendio.

2.5 Causas de los incendios forestales

Los incendios forestales son causados por el hombre, la naturaleza o por interacción de estos dos.

En los causados por el hombre intervienen los intencionales, por negligencia, descuido o accidentales.

Los causados por la naturaleza son generalmente por la radiación solar, y/o tormentas eléctricas.

Focos Secundarios

Los focos secundarios constituyen uno de los problemas de control más serios en los incendios, la causa principal de los focos son las **pavesas**, es decir partículas de combustible encendidas o incandescentes transportadas por la columna de convección o por el viento. Este transporte de masa provoca focos secundarios, es decir nuevas igniciones fuera del perímetro principal del incendio. Los tres métodos de transporte de pavesas son:

- Convección
- Viento
- Gravedad

La **convección** eleva pequeños fragmentos de material ardiente en una columna convectiva y los transporta a cierta distancia por delante del incendio, por ejemplo pavesas transportadas por la convección son: las piñas, fragmentos de corteza, hojas y ramillas.

El **viento** por sí solo puede transportar las pavesas a distancias cortas. La combinación de viento y fuertes corrientes convectivas pueden transportar las pavesas considerables en la dirección del viento y causar focos secundarios a gran distancia del incendio principal.

La **gravedad** también puede ser responsable del transporte de pavesas cuesta abajo. Normalmente, cuanto más pronunciada una pendiente, tanto mayor son los problemas de focos secundarios producidos por material caliente que rueda cuesta abajo como se observa en la Figura 5.



Figura 5. Ejemplo de foco secundario por gravedad.

2.6 Retroalimentación del incendio

El fuego afecta al ambiente que a su vez retroalimenta el incendio. Se ha observado que las enormes cantidades de calor generadas por el fuego afectan la atmósfera circundante, de modo que los incendios crean sus propias condiciones meteorológicas.

Las dimensiones de un incendio pueden variar considerablemente. Conforme el incendio crece, también aumenta la región del ambiente que se ve afectada. Los incendios extremos tienen un alto significado social, económico y ecológico (Beverly y Martell, 2005), y han sido ampliamente relacionados con factores específicos del clima. Pausas (2004), encontró que los cambios regionales en la superficie incendiada y la frecuencia de los incendios son provocados por la disminución en la precipitación provocando que las temporadas de incendios sean más calientes y

secas. Para un incendio grande el ambiente de fuego puede extenderse varios kilómetros en sentido horizontal y miles de metros en sentido vertical.

La estabilidad de la atmósfera inferior se evalúa atendiendo a la distribución vertical de la temperatura. La atmósfera se considera estable si las parcelas de aire se resisten al desplazamiento vertical, lo cual significa que la convección es amortiguada o queda suprimida completamente. Si la capa baja de la atmósfera es muy inestable, permite mayores desplazamientos verticales del aire, lo cual puede contribuir al desarrollo de tormentas posiblemente peligrosas o extensas columnas de fuego.

Los vientos en altura, son vientos que afectan a la columna convectiva. Los vientos fuertes tienden a inhibir el desarrollo vertical de las columnas convectivas y pueden inclinar la columna de humo de manera que permanezca cerca del suelo conforme el humo se aleja del incendio, sin embargo, en un ambiente muy inestable los vientos pueden ser más erráticos y durante periodos de vientos más suaves, el desarrollo vertical de la columna de humo puede intensificarse y aumentar el potencial de transporte de pavesas con los vientos más fuertes.



Figura 6. Incendio superficial.

2.7 Tipos de incendio

Superficial: es la quema de los escombros sueltos en la superficie como las ramas muertas, las hojas y la vegetación baja. (véase Figura 6).

De copas: Avanzan consumiendo las copas de los árboles, tienen mayor velocidad que los incendios superficiales.

Subterráneos: se propagan bajo la superficie alimentados de la materia orgánica seca y de raíces, su velocidad de propagación es menor que la de los incendios de superficie.

2.8 Consecuencias de los incendios forestales

Efectos sobre la flora

Los incendios forestales producen la disminución de la diversidad florística del bosque al mínimo, reducción de la tasa de crecimiento y calidad de la madera, debilitamiento de la vegetación y contribuyen al incremento de niveles de deforestación.

Efectos sobre la fauna

Los efectos de los incendios sobre la fauna, pueden ser directos por la mortalidad de las especies de la región, o bien indirectas por la modificación del hábitat ya que contribuye a la escasez de alimento y refugio y ocasiona disminución en la diversidad de especies.

Efectos sobre el suelo

Los efectos varían dependiendo de la naturaleza del suelo y de la frecuencia, duración e intensidad del fuego, producen disminución de la cantidad de materia orgánica.

Efectos sobre el agua

Las cenizas y carbones producto de la combustión van a parar a las corrientes y cuerpos de agua, tornándose turbias y disminuyendo considerablemente la calidad, evitando ser consumida por el hombre y los animales.

Efectos sobre el aire

El efecto es inmediato y visible, hay una disminución de visibilidad dificultando el transporte terrestre y aéreo. Las partículas y el humo producto de los incendios generan sobrecalentamiento del aire, contribuyendo a la contaminación por CO₂ y el aumento de la temperatura en la atmósfera.

2.9 Características de los contaminantes

Los incendios forestales son considerados como procesos de combustión natural de gran potencia que consumen los diferentes estados, tamaños y tipos de vegetación en un área geográfica determinada. El efecto es inmediato y visible, hay una disminución de visibilidad dificultando el

transporte terrestre y aéreo. Las partículas y el humo producto de los incendios generan sobrecalentamiento del aire, contribuyendo a la contaminación por CO₂ y el aumento de la temperatura en la atmósfera.

Los principales contaminantes atmosféricos emitidos en un incendio son las partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}) el Monóxido de carbono (CO), Óxidos de nitrógeno (NO_x) Compuestos orgánicos volátiles (COV's) y una cantidad despreciable de Dióxido de azufre (SO₂) (Chow 1995). Estos contaminantes son importantes porque contribuyen a problemas ambientales como el smog, la lluvia ácida, la carga de nutrientes (Eutrofización), así como también afectan a la salud humana.

2.10 Normatividad

Considerando que la calidad del aire debe ser satisfactoria en todo el país y para asegurar el bienestar de la población y el equilibrio ecológico, las emisiones a la atmósfera se deben reducir y controlar mediante la aplicación de normas, en la Tabla 1 se muestran las concentraciones máximas permisibles para los contaminantes de interés de este trabajo de investigación.

Tabla 1. Resumen de normas de contaminantes atmosféricos.

Contaminante	Límite de exposición aguda		Límite de exposición crónica (valor medio)		Norma
	Concentración	Tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Para protección de la salud de la población susceptible	
O₃	0.11 ppm	1 hora	1 vez cada 3 años	*na	NOM-020-SSA-1993
CO	11 ppm	8 horas	1 vez al año	*na	NOM-021-SSA-1993
NO₂	0.21 ppm	1 hora	1 vez al año	*na	NOM-023-SSA-1993
PM₁₀	150 µg/m ³	24 horas	1 vez al año	50 µg/m ³ (*maa)	NOM-025-SSA-1993

*na: no aplica

*maa: media aritmética anual

2.11 Área de estudio

En las siguientes secciones se describe la región de estudio donde se realiza la modelación y evaluación del impacto de los incendios en la calidad del aire en el centro de México.

Centro de México

La región centro de México abarca los estados de Morelos, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Estado de México y Distrito Federal (Figura 7), se localiza entre 18.3 y 20.4 Norte y 100.5 y 97.5 Oeste, con una altitud hasta 4661 m sobre el nivel del mar, su extensión territorial es de 87,841 km². El clima es de tipo templado subhúmedo, precipitación promedio anual entre 600 y 1270 mm y temperatura media anual de hasta 20°C. La vegetación que se presenta son Bosques templados de coníferas y latifoliada, árboles y arbustos de hoja caediza, además de las especies agrícolas y forrajes se presentan pastizales introducidos por el hombre y cuenta con aproximadamente 34'436,695 habitantes (INEGI 2010).

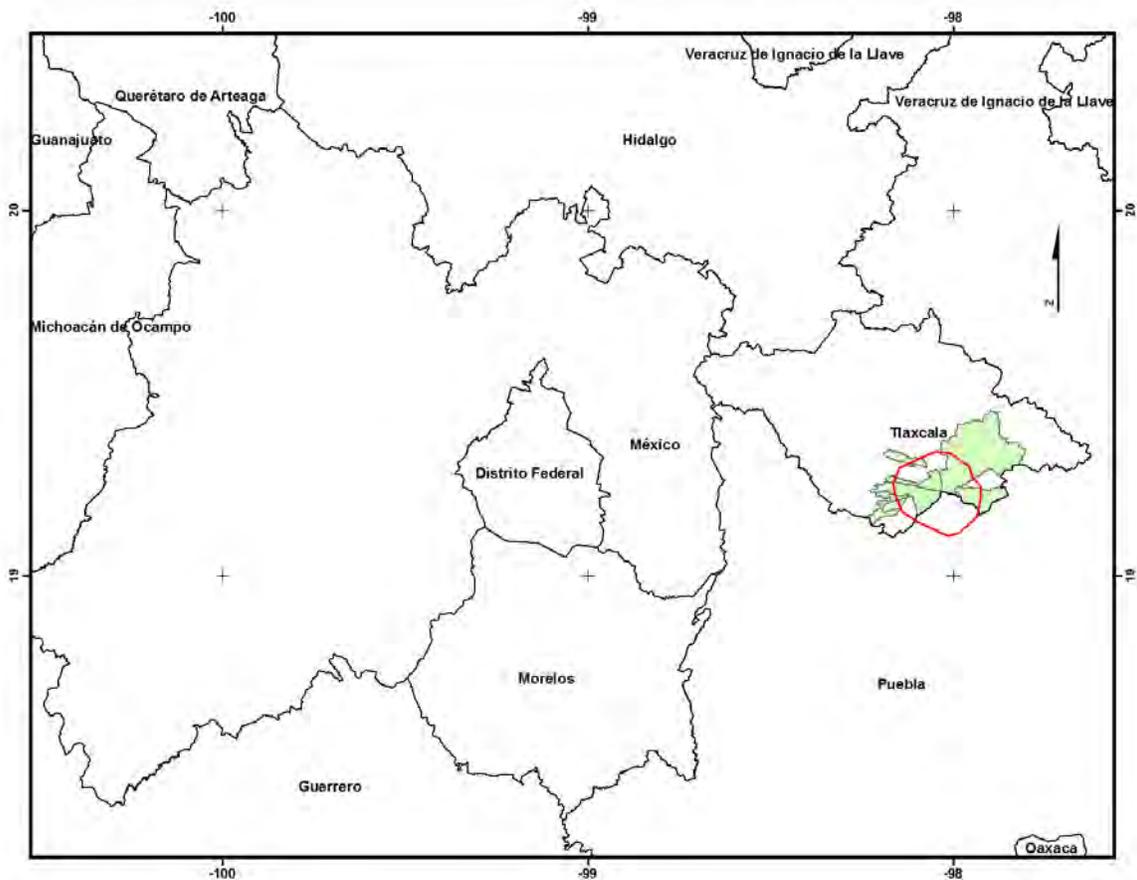


Figura 7. Área de estudio abarca los estados de Morelos, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Distrito Federal y Estado de México, el polígono rojo corresponde al Parque Nacional Malinche y de color verde los municipios a evaluar en este trabajo.

Parque Nacional Malinche (PNM)

Está localizado al sur-oriente del Estado de Tlaxcala y el centro del Estado de Puebla, es un área natural protegida que se localiza entre los 19°14' latitud Norte y 98°58' longitud Oeste; a una altitud entre los 2300-2900 m, forma parte del eje Neovolcánico Transversal y representa una montaña aislada (Meade 1986). Malinche es un volcán inactivo con una altura de 4,461 metros sobre el nivel del mar, siendo la quinta elevación más importante de México (Yarza de la Torre 1971). El clima es del tipo templado subhúmedo, precipitación promedio anual entre los 600 y 1000 mm y temperatura media anual entre 12 y 16°C, además de presentar una marcada época de lluvias y secas. El PNM comprende una superficie total de 45,852.45 hectáreas, de las cuales 14,433.81 hectáreas corresponden al Estado de Puebla y 31,418.638 hectáreas al Estado de Tlaxcala.

En la Tabla 2 y en la Figura 8 se muestra la ubicación de los municipios de Tlaxcala en los que se evaluaron los incendios.

Tabla 2. Municipios evaluados de Tlaxcala.

Municipio	Longitud	Latitud
Acuamanala de Miguel Hidalgo	-98.134	19.214
Contla de Juan Cuamatzi	-98.080	19.281
Huamantla	-98.011	19.302
Mazatecochco de Jose Maria Morelos	-98.141	19.209
Papalotla de Xicohtencatl	-98.130	19.188
San Francisco Tetlanohcan	-98.080	19.284
Teolocholco	-98.036	19.219
Zitlaltepec de Trinidad Sánchez Santos	-97.956	19.204

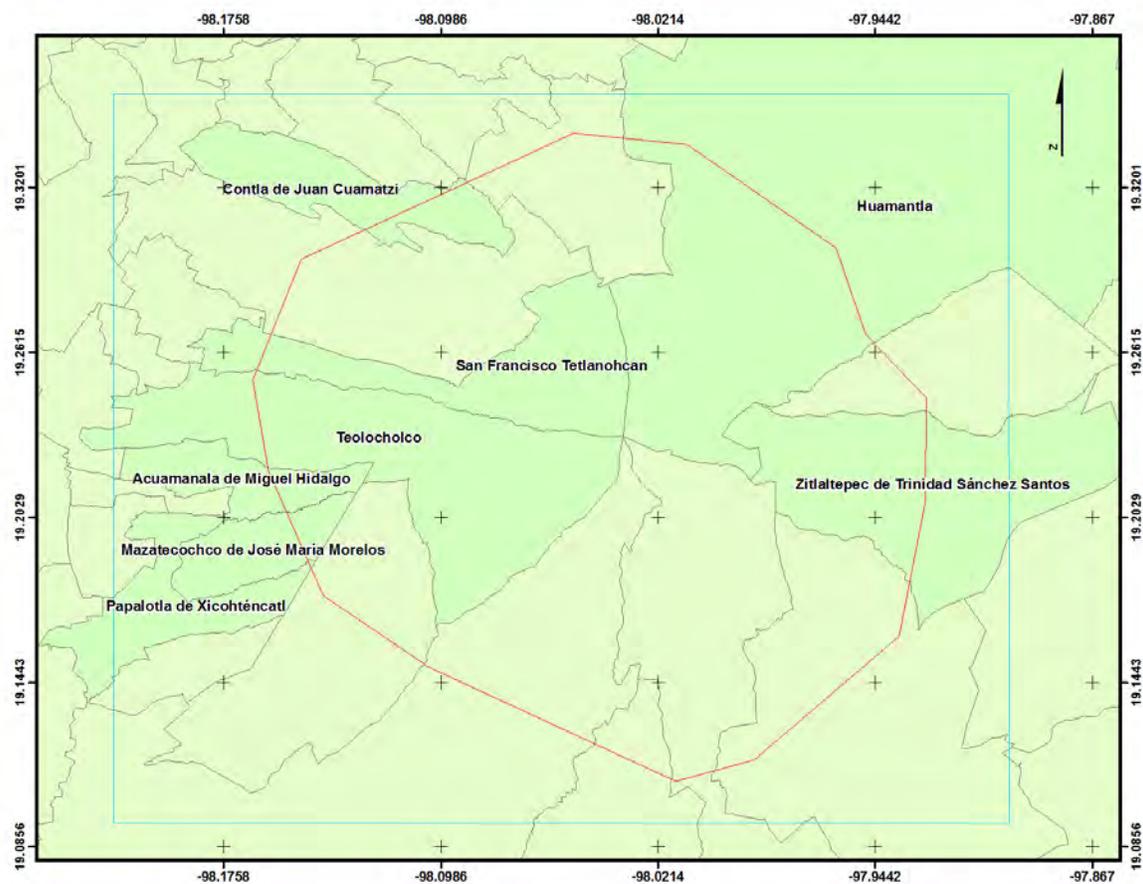


Figura 8. Ubicación del Parque Nacional Malinche y los municipios evaluados.

Tipo de vegetación

En el PNM existen tres asociaciones vegetales naturales, bosque de pino, bosque de pino-aile y oyamel y zacatonal de alta montaña, además de otras zonas transformadas en cultivos. Las especies predominantes dentro del bosque de pino son *Pinus hartwegii*, *P. leiophylla*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus* y *P. teocote*. En el bosque de pino-aile y oyamel se encuentran las especies de pino antes mencionadas, así como el aile (*Alnus jorullensis*) y el oyamel (*Abies religiosa*), y en el zacatonal de alta montaña se observan pastos que crecen en amplios macollos de hasta 1 m de altura, siendo la especie *Festuca tolucensis* la que conforma esta comunidad vegetal (Villers *et al.* 2006). Los cultivos de temporal dominantes en esta zona son básicamente el trigo (*Triticum aestivum*) y el maíz (*Zea mays*), aunque alternadamente se siembran leguminosas como el chícharo (*Pisum sativum*) y la haba (*Vicia faba*). Entre las plantaciones frutales hay manzanos (*Malus pumilas*), duraznos (*Prunus persica*), capulín (*Prunus capuli*) y tejocote

(*Crataegus pubescens*; Gómez-Álvarez 2002). En la Figura 9 se pueden observar algunos ejemplos de la vegetación de Malinche.



Figura 9. Tipo de vegetación en Malinche a) Bosque de *Pinus montezumae*, b) Agricultura de temporada.

Estimación de biomasa de las comunidades

Considerando la información previamente descrita, en la Tabla 3 se muestra la biomasa por comunidades de la vegetación presente en el PNM, con el propósito de realizar el cálculo de emisión por los incendios forestales.

Tabla 3. Biomasa de las comunidades de Malinche.

Comunidad	Biomasa (T/ha)
<i>Pinus montezumae</i> ¹	268.02
<i>Pinus leiophylla</i> ¹	237.2
<i>Pinus-Quercus</i> ¹	136.4
Agricultura de temporada (Trigo)²	4.480

¹ Fabiola Rojas García, Consideraciones para el balance de carbono: Evaluación del movimiento de biomasa en el Parque Nacional Malinche, 2008

² Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), 2004

CAPÍTULO 3 GENERALIDADES DEL MODELO

3.1 Modelo Weather Research and Forecasting (WRF)

El modelo de pronóstico e investigación del tiempo (WRF) ha estado en desarrollo durante los últimos años. La versión actual del WRF (ARW) es la 3.3.1 , disponible para todo el público en la página de la University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). El ARW está diseñado para ser un sistema flexible de simulación atmosférica. Este modelo es adecuado para su uso en una amplia gama de aplicaciones a través de escalas que van desde metros hasta miles de kilómetros.

EL WRF hace las simulaciones de la meteorología a meso-escala y micro-escala, el National Center Atmospheric Research (NCAR) es actualmente un subconjunto del código general WRF que incluye:

- El proceso de la solución de la dinámica, incluyendo anidamientos en una sola vía, y de dos vías .
- El Sistema de pre-procesamiento WRF (WPS) .
- El WRF tiene un sistema de asimilación de datos (WRF-Var), que actualmente soporta la capacidad de 3DVAR.
- Numerosos paquetes de física aportados por los colaboradores del WRF y la comunidad investigadora.
- Varios programas gráficos y programas de conversión para las herramientas de otros gráficos.

En la Figura 10 se muestra un diagrama de flujo del proceso del modelo WRF.

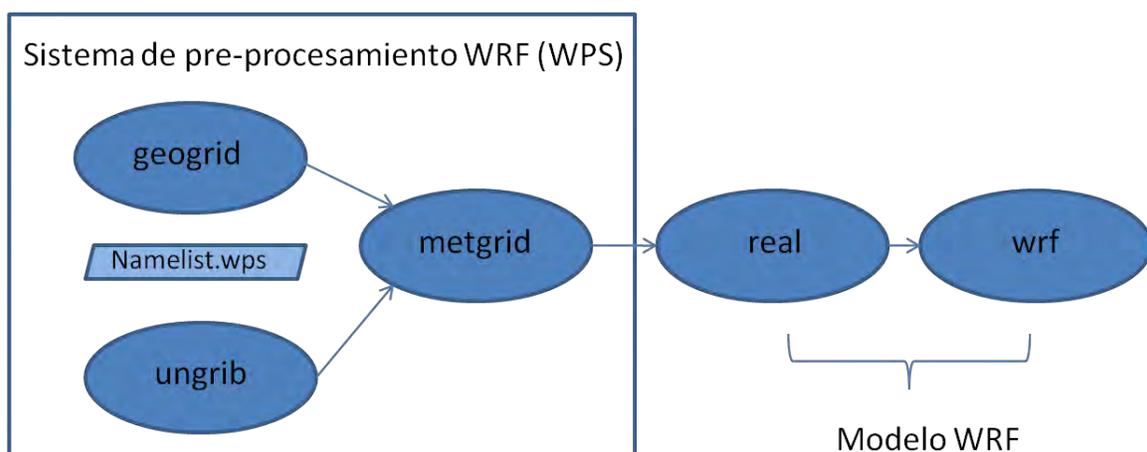


Figura 10. Diagrama de flujo de pre-procesadores del WRF.

WRF Pre-Procesadores (WPS)

El WRF tiene como preprocesador el WPS, que es un conjunto de tres programas cuya función colectiva es preparar la entrada al programa de simulaciones con datos reales. Cada uno de los programas se lleva a cabo en la primera etapa de preparación:

- 1.- **geogrid** define los dominios de simulación del modelo e interpola los datos geográficos como el terreno, uso de suelo, etc.;
- 2.- **ungrib** extrae los campos meteorológicos a partir de archivos GRIB (es el formato utilizado por los institutos de meteorología para hacer las bases de datos del tiempo)y
- 3.- **metgrid** es la interpolación horizontal de los campos meteorológicos obtenidos por *ungrib* al modelo definido por la malla. El trabajo de interpolación vertical de los campos meteorológicos se lleva a cabo dentro del programa *real*.

A partir de los datos procesados del WPS, el principal objetivo del programa *real* es crear en el modelo un núcleo dinámico específico, para la configuración básica, tanto inicial (*wrfinput_d01*) y un límite (*wrfbdy_d01*), estos son los archivos generados, posteriormente estos archivos son utilizados por el *wrf* donde nos indican:

wrfinput_d01 archivos de condiciones iniciales, de un solo nivel de tiempo de los datos.

wrfbdy_d01 archivos de datos de condiciones de frontera para los pasos de tiempo múltiples, para poder procesarlos y crear los archivos finales *wrfout_d01*.

3.2 Post-procesador del WRF (WPP)

Se trabajó con la versión 3.0.1 para el post-procesamiento de los datos de salida del WRF-ARW (*wrfout_d01*) en dos formatos: NetCDF y binario.

En la Figura 11 se muestran los pasos del WPP.

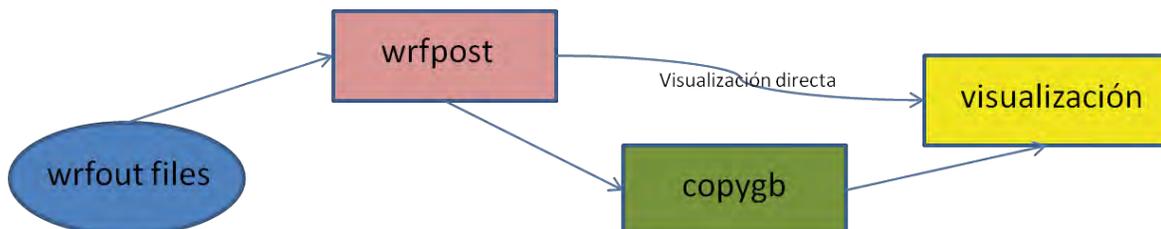


Figura 11. Diagrama de flujo del modelo WPP.

WRF Post-Procesadores

El post-procesador WRF se divide en dos partes:

El **wrfpost**: Realiza la interpolación vertical en las isobaras y otras superficies del modelo, calcula los campos de diagnóstico, descompone los puntos de masa del viento (ARW), este puede dar la visualización directa sin tener que compilar el *copygb*.

Este es el único post-procesador que se utilizó llegando directamente a la visualización de dirección de viento, humedad relativa y temperatura a 250, 500 y 850 mb .

En la página web www2.ucar.edu se encuentra información más detallada acerca de los modelos.

Se puede encontrar más información en la página www.dtcenter.orf/wrf-nmm

3.3 Generalidades del Modelo de Herramientas de Evaluación (MET)

MET Versión 3.0.1 es un conjunto de herramientas de verificación desarrollada por el Developmental Testbed Center(DTC) para el uso de la comunidad de predicción meteorológica, para ayudarles a valorar y evaluar el desempeño de predicciones numéricas del modelo WRF.

El modelo requiere de los datos de salida del WPP ya que estos están en el formato correcto para el METv3.0.1.

Los pre-procesadores utilizados del MET fueron el Point-stat y el Stat-Analysis. Información sobre la descripción de los diferentes parámetros estadísticos calculados se encuentran de acuerdo a lo propuesto por la organización meteorológica mundial (WMO 2011). La descripción de los parámetros estadísticos usados por el modelo se encuentra en la página <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>

El **Point-stat** ofrece las estadísticas de verificación de los puntos de observación.

Esta herramienta utiliza varios métodos de interpolación como por ejemplo el valor máximo o el ajuste por mínimos cuadrados y calcula las estadísticas como por ejemplo la estadística de variables continuas.

Se puede encontrar más información sobre los métodos calculados por el METv3.0.1 en la página <http://www.cawcr.gov.au/events/verif2011>

La herramienta de **Stat-Anlaysis** realiza las estadísticas finales en el tiempo y en el espacio de los resultados horarios de cada una de las estaciones del Point-stat, el Stat-analysis hace una consolidación de todos estos datos.

Se puede encontrar más información en la página www.dtcenter.org/METv3

CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA

Se modelaron dos tipos de escenarios, uno con emisiones originadas en el incendio y otro sin estas contribuciones. Las salidas del WRF sirvieron de datos de entrada para el WPP con el cual se generaron imágenes de dirección de viento, humedad relativa y ozono a 250, 500 y 850 mb respectivamente. Las salidas del WPP sirvieron de datos de entrada para el METv3, con el cual se generaron los estadísticos de las salidas del modelo y los datos de la RAMA para los períodos correspondientes a los eventos estudiados. Se calcularon promedios de los siguientes compuestos; Monóxido de carbono (CO), Óxido de nitrógeno (NO), Dióxido de nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃), Dióxido de azufre (SO₂), Temperatura (Temp) y Humedad relativa (RH).

Posteriormente se realizó un script para la visualización de los escenarios en el cual se calculó la diferencia de las salidas de las simulaciones con emisiones y sin emisiones, y se generaron las imágenes horarias del período de duración del incendio.

En la Figura 12 se describen los pasos seguidos para la modelación.

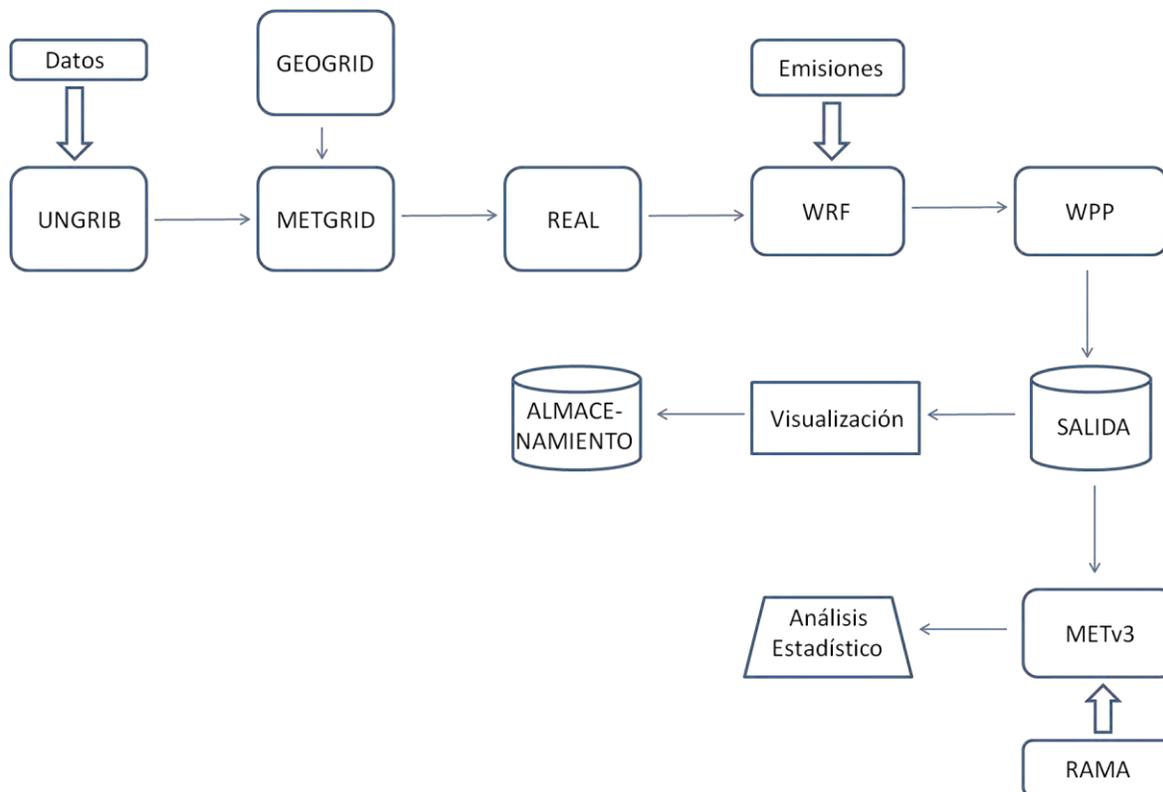


Figura 12. Diagrama de flujo de la modelación con WRF y METv3.

4.1 Identificación de los eventos

Para la aplicación del modelo se seleccionaron seis fechas de incendios de los años 2006 y 2009 que destacaban por ser los mayores incendios en cuanto a duración y área quemada, así como por presentarse de dos a siete incendios para la misma fecha, dicha información corresponde a los proyectos CONACyT 38697 y 52464 (Villers-Ruiz, 2005, 2008). Todos los incendios fueron de tipo superficial. En la Tabla 4 se presentan los incendios evaluados.

Tabla 4. Datos de los incendios registrados en Malinche.

Fecha	Municipio	Latitud	Longitud	Hora inicio	Hora fin	Área quemada (ha)	Vegetación	Biomasa* Ton/ha
11 Marzo 2006	Zitaltepec	19.249	-97.989	10:30	15:00	6.0	Pinus montezumae	268.02
	Zitaltepec	19.216	-97.958	8:45	20:00	82.0	Pinus montezumae	268.02
18 Abril 2006	Juan Cuamatzi	19.288	-98.015	11:30	15:00	56	Pinus montezumae	268.02
	Tetlanohcan	19.281	-98.067	12:15	14:00	4	Pinus montezumae	268.02
	Huamantla	19.277	-98.07	13:25	17:20	3	Pinus montezumae	268.02
18 Marzo 2006	Zitlaltepec	19.218	-98.123	9:00	12:00	10	Bosque de encino	136.4
	José María Morelos	19.187	-98.139	12:10	13:50	2	Agricultura de temporada	4.48
	Huamantla	19.261	-97.963	17:00	19:20	1.5	Pinus montezumae	268.02
	Xicohténcatl	19.249	-98.119	14:30	17:00	1	Agricultura de temporada	4.48
	Miguel Hidalgo	19.213	-98.124	14:55	20:00	1	Bosque de encino	136.4
	Tetlanóhcan	19.201	-98.127	15:20	17:30	4	Bosque de encino	136.4
11 Febrero 2009	Huamantla	19.4269	-97.877	15:30	19:00	8	Pinus montezumae	268.02
	Juan Cuamatzi	19.308	-98.062	15:00	16:00	0.25	Agricultura de temporada	4.48
	Teacalco	19.225	-98.145	13:30	15:30	3	Bosque de encino	136.4
	Teolocholco	19.243	-98.147	16:00	17:30	1.5	Agricultura de temporada	4.48
	Juan Cuamatzi	19.286	-98.104	8:45	10:30	1.5	Bosque de encino	136.4
	Juan Cuamatzi	19.285	-98.102	11:50	14:55	2	Agricultura de temporada	4.48

1 Marzo 2009	Teolocholco	19.231	-98.135	6:30	9:00	2.5	Agricultura de temporada	4.48
	Teolocholco	19.231	-98.135	8:45	10:50	2	Agricultura de temporada	4.48
	Zitlaltepec	19.210	-97.948	8:00	9:50	2	Pinus leiophylla	237.2
	Zitlaltepec	19.215	-97.97	8:30	14:00	25	Pinus montezumae	268.02
	Zitlaltepec	19.216	-97.968	9:20	11:00	1	Pinus montezumae	268.02
4 Marzo 2009	Tetlanóhcan	19.200	-98.139	17:30	19:30	6	Bosque de encino	136.4
	Chiautempan	19.265	-98.135	6:15	8:30	1.5	Agricultura de temporada	4.48
	Juan Cuematzi	19.299	-98.080	11:45	13:00	2	Agricultura de temporada	4.48
	Juan Cuematzi	19.274	-98.090	12:20	16:10	18	Agricultura de temporada	4.48
	Teolocholco	19.229	-90.141	18:15	22:00	4	Bosque de encino	136.4

*Cálculo de biomasa basado en Rojas García, 2008

En la Figura 13 se observa la ubicación de los incendios.

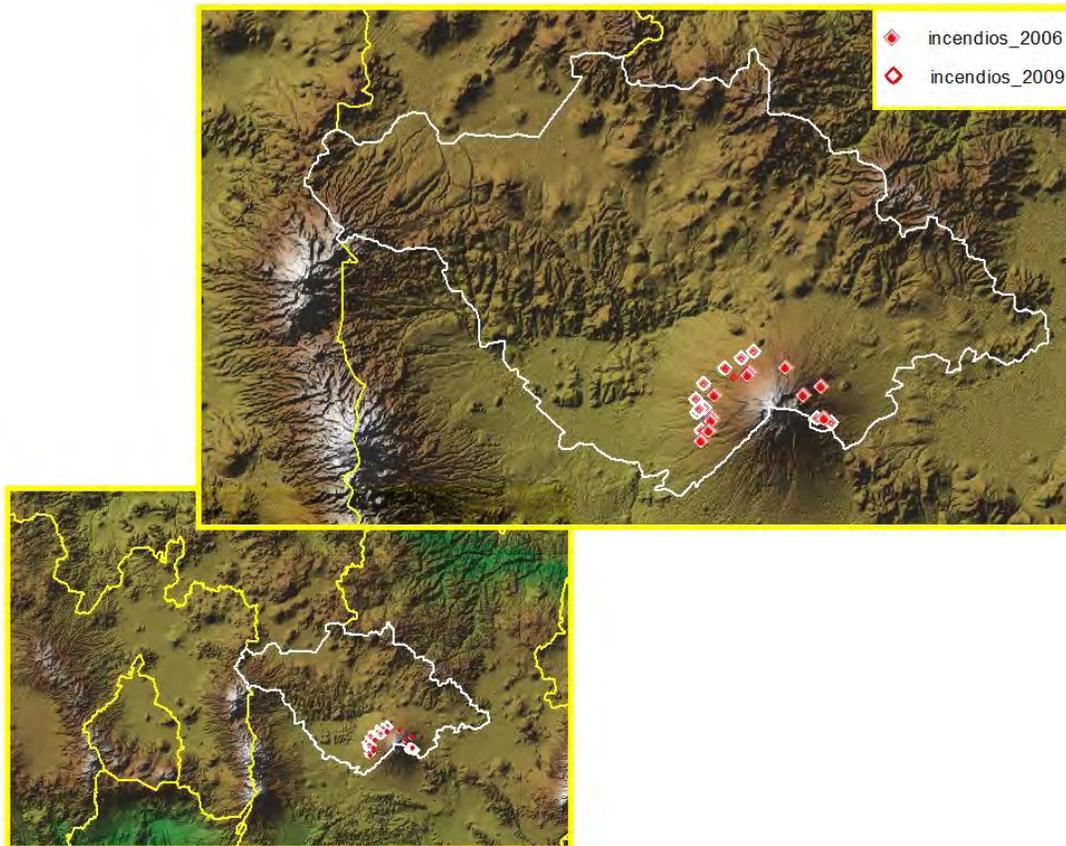


Figura 13. Ubicación de los incendios evaluados en el Parque Nacional Malinche.

4.2 Evaluación de la influencia

Se compararon los resultados de las modelaciones con y sin emisiones de los incendios con el fin de identificar la influencia en concentraciones y la región de impacto de los eventos.

Los resultados de las modelaciones se compararon contra los datos medidos de la RAMA para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) para las variables meteorológicas y la concentración de contaminantes, con el fin de observar que el modelo reproduce adecuadamente estas variables.

4.3 Obtención de datos

A continuación se describe la obtención de los datos para este trabajo.

4.3.1 Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos que requiere el modelo WRF se obtuvieron de la página web de la UCAR, que corresponden a datos de re-análisis The North America Regional Reanalysis (NARR). Esa base de datos refiere información a largo plazo, de alta frecuencia, dinámica, con datos meteorológicos y de superficie hidrológica de la tierra, existen datos desde 1979 hasta la fecha y la información a la que se accedió comprende cuatro tipos de datos, cada 3 horas:

- 3D, contiene 29 niveles de presión.
- flx, datos de diagnóstico de un solo nivel.
- pbl, capa límite.
- sfc, datos de superficie (ej. precipitación, radiación).

4.3.2 Descripción de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) es el subsistema del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la ZMVM que realiza mediciones continuas y permanentes de Ozono (O_3), Dióxido de azufre (SO_2), Óxidos de nitrógeno (NO_x), Monóxido de carbono (CO), Partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) y Partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$). La información que proporciona esta red es primordial en la evaluación oportuna de la calidad del aire en la Ciudad de México y su difusión mediante el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA). La rapidez con que se envía y recibe la información, permite la instrumentación inmediata del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) en situaciones de riesgo para la salud de la población.

Los datos medidos se efectuaron mediante el empleo de observaciones de la RAMA, la cual posee 32 estaciones. En la Figura 14 se muestra la localización de las estaciones de la RAMA, empleadas para realizar las comparaciones de los resultados del modelo.



Figura 14. Localización de estaciones de la RAMA Fuente: Red Ambiental de Monitoreo Atmosférico (RAMA).

4.4 Datos de incendios

La información sobre la superficie quemada y la duración del incendio en el Parque Nacional La Malinche corresponde a los Proyecto CONACYT 38697 y 52464 (Villers, 2005, Villers, 2008) los cuales se depuraron y se escogieron los años 2006 y 2009 en la época de sequía, se consideraron solo los incendios de mayor superficie quemada y se sabe que todos los incendios evaluados son de superficie.

4.5 Factores de Emisión

El actor de emisión es una medida promedio de un contaminante ó material específico emitido a la atmósfera por un proceso particular como combustión, de equipo, o fuente. Se expresa en kilogramos de partículas por tonelada de material ó combustible.

Los Factores de emisión (Tabla 5) fueron tomados de la EPA (Environmental Protection Agency) del AP-42 capitulo 1

Tabla 5. Factores de emisión EPA AP-42.

Compuesto	Factor de emisión (kg/Mg)
SO ₂	0.83
CO	144
NO _x	6.5
VOC	6.8
PM _{2.5}	12
PM ₁₀	14
CH ₄	6.8
CE	0.73
CO	5.8
CO ₂	1521
Metanol	1.8
Formaldehido	1.5
Benzopireno	0.00015
Benceno	0.2
Tolueno	0.16
Xyleno	0.058
Estireno	0.13
Fenol	0.15
Hexano	1.4

4.6 Inventario de emisiones

Los inventarios de emisiones fueron proporcionados por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal por la Dirección de Programas de la Calidad del Aire e Inventario de Emisiones para los años 2006 y 2009, además del inventario de emisiones del 2005 de Tlaxcala.

4.7 Método elegido para la estimación de las emisiones

El método utilizado para la estimación de las emisiones fue el publicado por la EPA.

La Figura 15 resume los pasos necesarios para evaluar las emisiones de un incendio. En primer lugar, se necesita información sobre el consumo de combustible, que depende de la superficie quemada, la cantidad de materiales combustibles por unidad de área (antes del incendio), y las características y condiciones del combustible. La cantidad de combustible realmente quemado en un incendio dependerá de la carga de combustible y el estado, el tipo de combustible, factores climáticos y meteorológicos, y la intensidad del fuego. Varios modelos empíricos se han desarrollado para estimar el consumo de combustible.

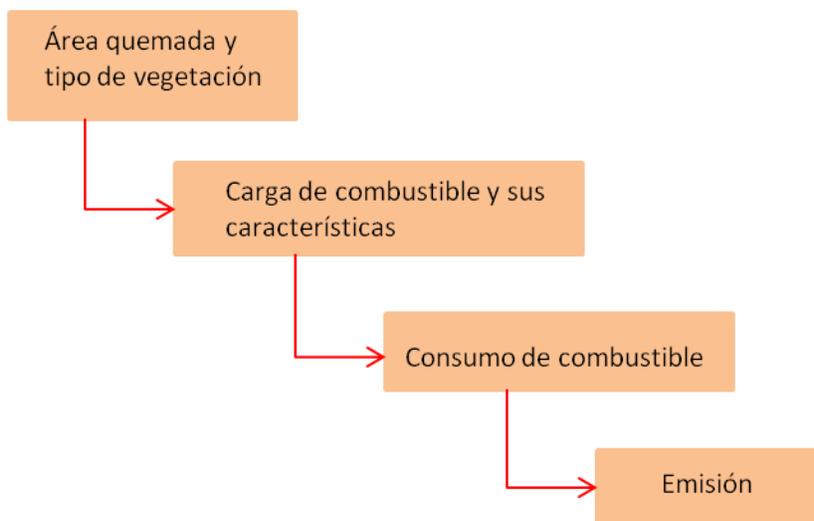


Figura 15. Evaluación de emisiones de un incendio. Fuente: EPA Chapter 13.

Cálculo de las emisiones

Las emisiones fueron calculadas de acuerdo a la fórmula del AP-42 EPA.

El algoritmo utilizado para la estimación de emisiones de fuego se puede resumir de la siguiente manera:

$$E = \frac{FE \times A \times B}{T}$$

Donde

E = emisión (kg/hr)

FE = Factor de emisión (kg/Mg)

A = Área quemada (ha)

B = Biomasa del tipo de vegetación (Mg/ha)

T = Tiempo de duración del incendio (hr)

Ejemplo del cálculo de la emisión de SO₂ para *Pinus montezumae*:

FECHA	Comunidad	Latitud	Longitud	Duración del incendio (hr)	Área quemada (ha)	Vegetación	Biomasa (Mg/ha)	Factor de emisión del SO ₂ (kg/Mg)	Emisión de SO ₂ (kg/hr)
20060418	Juan Cuamatzi	19.288	-98.01	4	56	Pinus montezumae	268.02	19	3114.39

$$E_{SO_2} = \frac{19 \left(\frac{kg}{Mg} \right) \times 56 \text{ (ha)} \times 268.02 \left(\frac{Mg}{ha} \right)}{4 \text{ (hr)}}$$

$$E_{SO_2} = 3114.39 \frac{kg}{hr}$$

En el Anexo I se encuentran los datos calculados de las emisiones de los incendios y su proporción con el inventario de emisiones de Tlaxcala 2005.

4.8 Datos de entrada del Modelo WRF

La información de emisiones de los incendios seleccionados se incluyen dentro del archivo de emisiones mediante un programa en fortran el cual lee el archivo fuegos.csv

fuegos.csv

Es un archivo que contiene la longitud y la latitud del incendio, la capa en la que se encuentra, la hora GMT del inicio y fin del incendio y las emisiones de los 14 compuestos evaluados, este nos genera un archivo que se integra al inventario de emisiones y es evaluado en el wrf-chem.

namelist.wps

Es un archivo del modelo WRF, en éste se definen todos los parámetros a modelar, como la fecha de inicio y fin de la simulación, la latitud y longitud, uso de suelo, la malla, el tipo de proyección, los datos meteorológicos, entre otros.

WPS

El objetivo del pre-procesador *geogrid* es definir los dominios de simulación, e interpolar varios conjuntos de datos terrestres (categorías del suelo, la altura del terreno, la temperatura media

anual, el albedo mensual y la pendiente) a las redes del modelo. Los dominios de simulación se definen utilizando la información especificada por el usuario, en el archivo “namelist.wps”. Además de calcular la latitud, longitud, y los factores de escala del mapa en cada punto de la malla, el número de celdas utilizadas fue de 121 x 91 con una resolución de 3 km y 30 niveles sigma.

El programa **ungrib** lee los archivos GRIB y escribe los datos en un formato simple. Los archivos GRIB contienen campos variables en el tiempo meteorológico.

El programa **metgrid** interpola los datos meteorológicos que se extraen por el pre-procesador **ungrib** en los dominios de simulación definido por el **geogrid**. La salida del **metgrid** es leído por el programa **real**.

WRF

El principal objetivo para el programa **real** son los datos procesados del WPS los datos de entrada del programa **real** son:

- El tiempo definido de modelación (vientos horizontales, altura, temperatura, humedad relativa), superficie (presión en la superficie, la altitud, la temperatura de la superficie del mar, la humedad del suelo).
- Campos terrestres (elevación, uso de suelo, tipo de vegetación, rugosidad del suelo, clima mensual y el albedo) y proyección (factores de mapa, la latitud y longitud, ángulos de proyección de rotación).
- Los períodos múltiples de los datos se procesan y crean los archivos de entrada para el **wrf**, para la configuración básica, tanto de condiciones iniciales (**wrfinput_d01**) y como de condiciones de frontera (**wrfbdy_d01**).

Los archivos generados por el **real** son utilizados por el **wrf**, para correr la simulación numérica y crear los archivos finales **wrfout_d01**.

WPP

El **wrfpost** interpola el pronóstico del modelo por ejemplo, presión, altura y calcula la presión media del nivel del mar.

Ejemplos de campos generados por WPP:

- 1) Temperatura, viento, humedad.
- 2) La humedad relativa y los campos de viento
- 3) SLP (dos clases)
- 4) Precipitaciones

- 5) Capa límite atmosférica
- 6) Flujos radiativos
- 7) Flujos de superficie

METv3.0.1

Los datos de entrada del modelo MET son los archivos de salida *WRFPRS* del modelo WPP al igual que los inventarios de emisiones del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de los años 2006 y 2009.

4.9 Cálculo del índice de concordancia

En cualquier estudio de investigación una cuestión clave es la fiabilidad de los procedimientos de medida empleados.

Tradicionalmente se ha reconocido una fuente importante de error de medida en la variabilidad entre observadores. Consecuentemente, un objetivo de los estudios de fiabilidad debe consistir en estimar el grado de dicha variabilidad, por ello se hizo el cálculo del índice de concordancia que es el dato entre los valores medidos de la RAMA y los valores del modelo cuyo valor va del 0 al 1, el cual es una evaluación del error y se calcula de la siguiente forma.

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

Donde:

P = son los valores dados por el modelo

O = son los valores medidos por la RAMA

Datos de Inventario de emisiones Tlaxcala 2005

Para conocer la contribución de las emisiones de los incendios a las emisiones anuales se calculó la proporción de las emisiones provenientes de incendios con respecto a las emisiones anuales en el estado. Para ello se obtuvieron los datos de los compuestos evaluados en esta tesis del inventario de emisiones de Tlaxcala 2005, expuestos en la Tabla 6.

Tabla 6. Principales compuestos del inventario de emisiones Tlaxcala 2005.

Inventario de Tlaxcala 2005	
Contaminante	Emisión (Ton/año)
CO	378,128
NOx	21,098
PM ₁₀	6181
COV's	53,126

4.10 Cálculo de Proporción

Es importante el cálculo de proporción como ejercicio de la comparación de los resultados del modelo y el inventario de emisiones.

Un ejemplo del cálculo de la proporción en la contribución de las emisiones de incendios al inventario se presenta a continuación:

Fecha	Número de incendios	Emisión (kg/h)	Total área quemada (ha)	Tiempo total de duración del incendio (horas)	Contaminante	Inventario Tlaxcala 2005 (Ton/año)	Emisión total incendio (Ton/año)	Proporción %
		4502.74	6	4.5				
110306	2	25640.58	82	11.75	PM ₁₀	6181	483.83	7.92
	Total	30143.32	88	16.25				

$$\text{Emisión} = 4502.74 + 25640.58 = 30143.32 \text{ kg/h}$$

$$\text{Emisión}_{\text{total}} = \frac{30143.32 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) \cdot 16.25 \left(\frac{\text{h}}{\text{año}}\right)}{1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{Ton}}\right)} = 483.83 \left(\frac{\text{Ton}}{\text{año}}\right)$$

$$\text{Proporción} = \frac{483.83 \left(\frac{\text{Ton}}{\text{año}}\right) \cdot 100}{6181 \left(\frac{\text{Ton}}{\text{año}}\right)} = 7.92\%$$

Los resultados para los otros incendios se pueden observar en el Anexo I

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

La herramienta utilizada para la modelación fue el WRF, con él se intenta modelar la calidad del aire en el centro de México se realizaron dos escenarios uno con emisiones de los incendios en el PNM y otro sin incendios para determinar el impacto. Con el fin de analizar los resultados obtenidos se aplicó un análisis estadístico (METv3), las comparaciones entre los resultados de la modelación y los datos medidos se obtuvieron mediante el empleo de observaciones de la Red Ambiental de Monitoreo Atmosférico (RAMA) para los años 2006 y 2009; y el inventario de emisiones de Tlaxcala 2005.

5.1 Comparación entre mediciones de la RAMA y el modelo

En la actualidad la RAMA cuenta con 36 estaciones de monitoreo ubicadas en puntos estratégicos de la Ciudad de México (Ver Figura 14), 24 están localizadas en el DF y 12 en el Estado de México. Las estaciones de monitoreo cuentan con criterios técnicos para su ubicación, densidad de población, distribución de fuentes de emisión y topografía.

Para estas representaciones solo se tomaron en cuenta las siguientes estaciones ya que son las que contienen los datos para estos períodos de simulación. Aragón (ARA), Atizapán (ATI), Azcapotzalco (AZC), Cerro de la estrella (CES), Enepe Acatlan (EAC), Hangares (HAN), Lagunilla (LAG), Los Laureles (LLA), La Presa (LPR), Merced (MER), Pedregal (PED), Plateros (PLA), Santa Úrsula (SUR), Tacuba (TAC), , Tláhuac (TAH), , Taxqueña (TAX), Tlanepantla (TLA), Tultitlán (TLI), UAM Iztapalapa (UIZ), Vallejo (VAL), Villa de Flores (VIF) y Xalostoc (XAL).

A continuación se presentarán las gráficas de comparación entre las mediciones de la RAMA y las salidas del METv3 para los dos escenarios, donde se muestra la eficiencia del modelo.

Las gráficas representan el promedio de la variación horaria de la temperatura, humedad relativa y concentraciones de contaminantes criterio, el tiempo es en horas locales y se seleccionaron las fechas 11 de Marzo de 2006 y 4 de Marzo 2009; ya que éstas son en las que el modelo tiene un mejor desempeño .

Las comparaciones del modelo se realizaron con las mediciones sobre la ZMVM que es donde se tiene información meteorológica y de calidad del aire, es con el propósito de validar el modelo, así garantizando los resultados de la simulación sobre la región del PNM son confiables.

Temperatura

Las comparaciones entre los resultados del modelo y las mediciones de la RAMA para la temperatura, las Figuras 16 y 17 muestran que el modelo reproduce adecuadamente el patrón de temperatura.

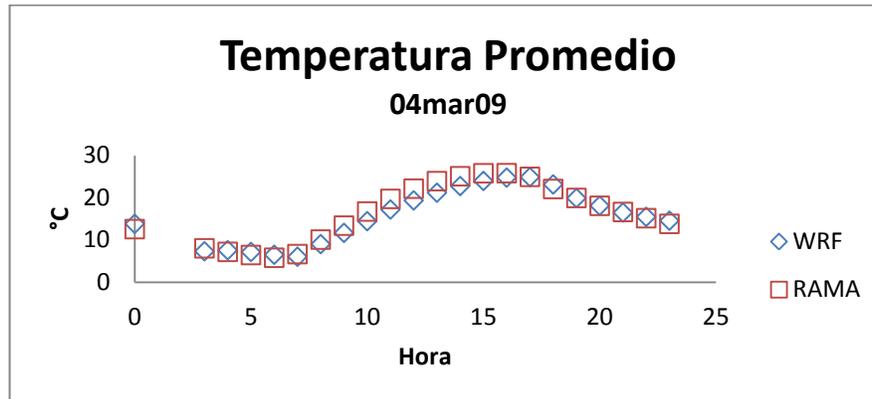


Figura 16. Temperatura promedio de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 4 – Marzo – 2009.

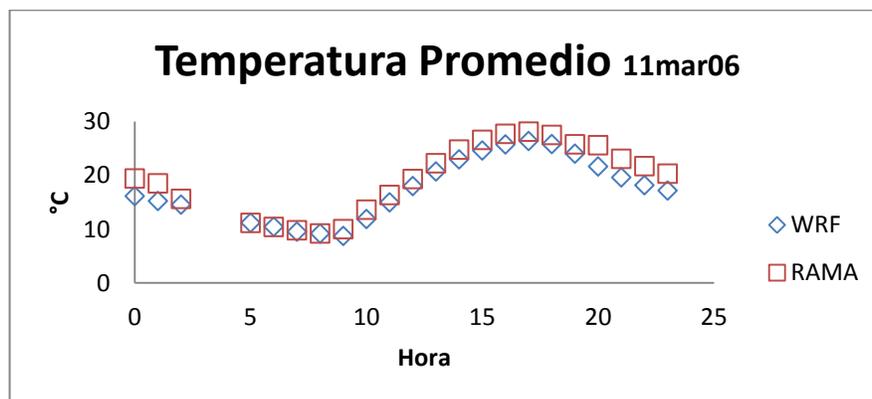


Figura 17. Temperatura promedio de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 11 – Marzo – 2006.

Humedad Relativa

Las Figuras 18 y 19 muestran el patrón horario de la humedad relativa.

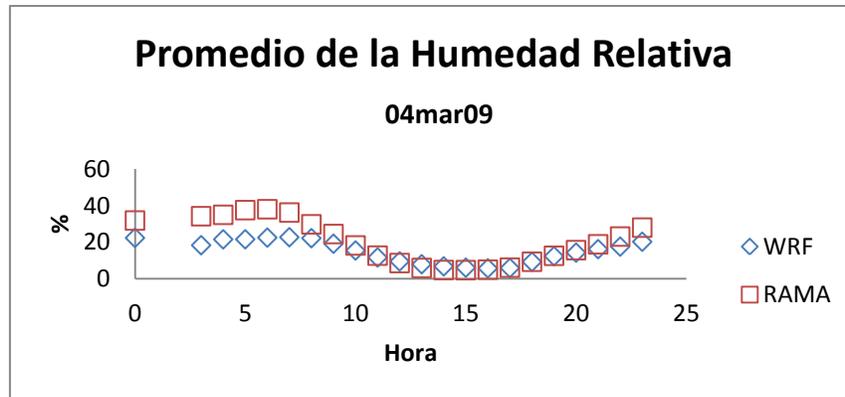


Figura 18. Promedio de la Humedad Relativa de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 4 – Marzo – 2009.

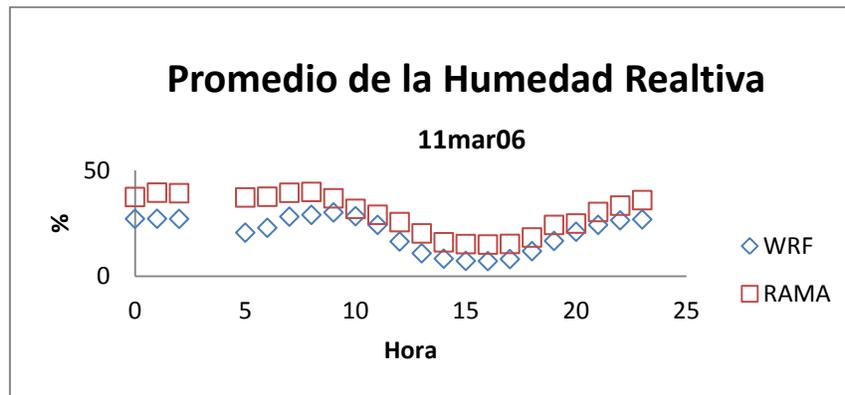


Figura 19. Promedio de la Humedad Relativa de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 11–Marzo– 2006.

Concentración de Ozono

Las Figuras 20 y 21 presentan el comportamiento horario del ozono.

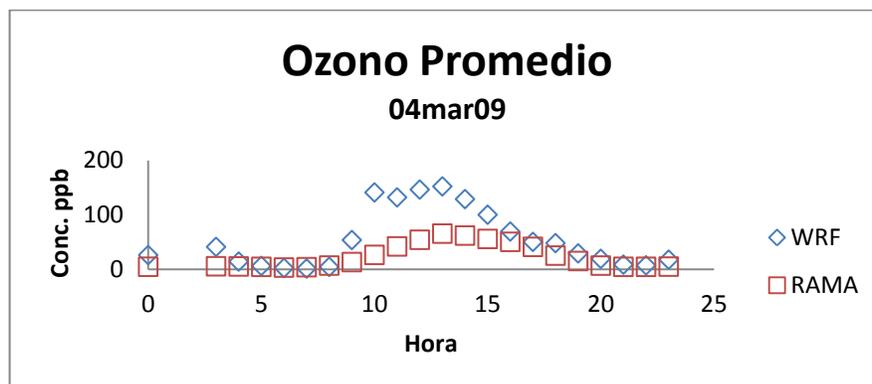


Figura 20. Ozono promedio en ppb de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 04 – Marzo – 2009.

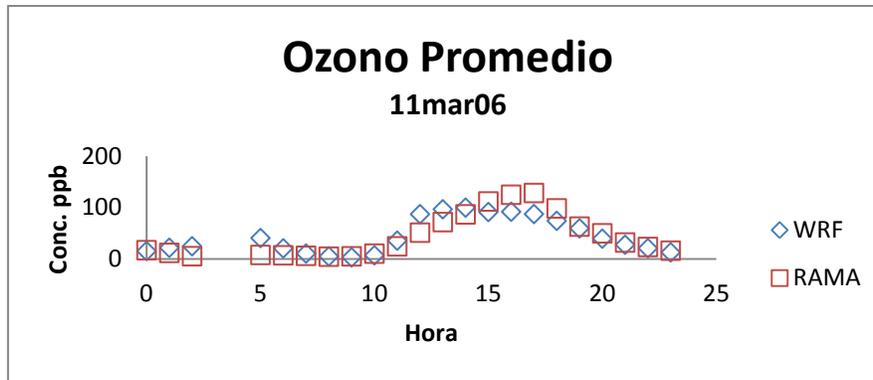


Figura 21. Ozono promedio en ppb de las mediciones de la RAMA y el modelo WRF para el 11 – Marzo – 2006 .

Concentración de Dióxido de Azufre (SO₂)

Las Figuras 22 y 23 representan el comportamiento horario del SO₂

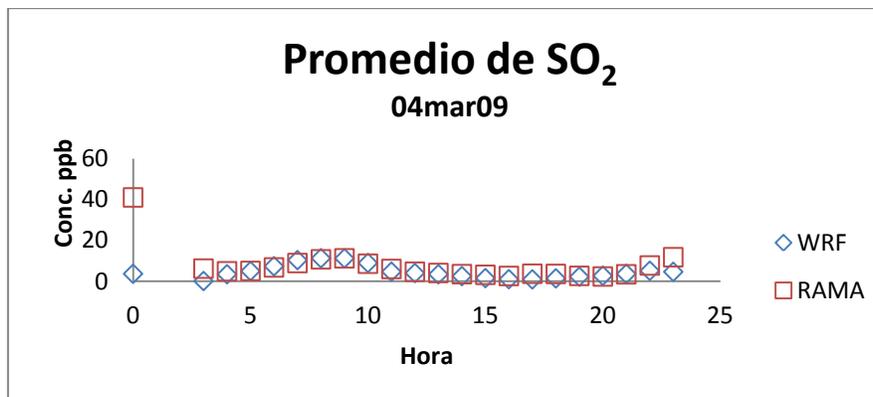


Figura 22. Promedio de Dióxido de Azufre (SO₂) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el 4 – Marzo – 2009 .

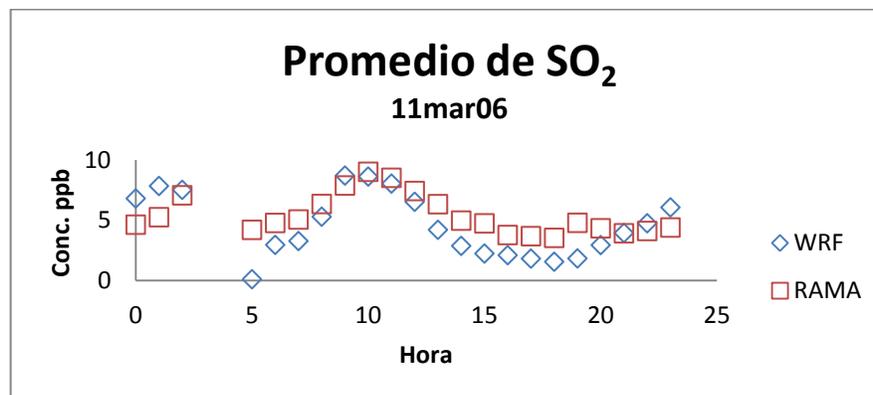


Figura 23. Promedio de dióxido de azufre (SO₂) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el 11 – marzo – 2006.

Concentración de Monóxido de Carbono (CO)

Las Figuras 24 y 25 representan el comportamiento horario del CO

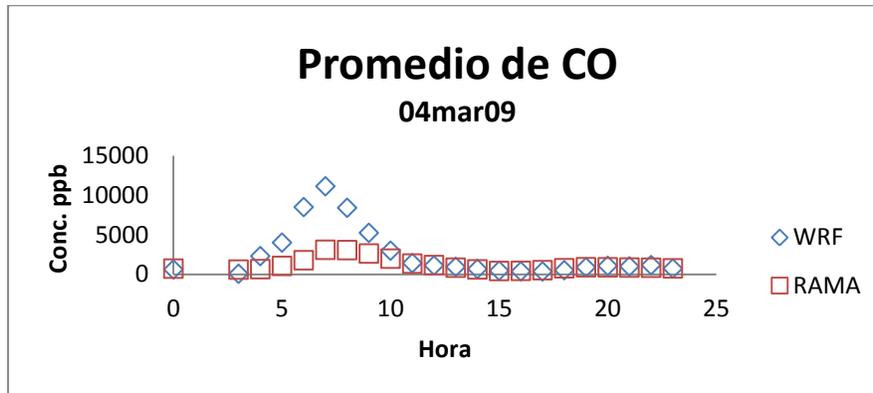


Figura 24. Promedio de Monóxido de carbono (CO) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el 4 - Marzo - 2009.

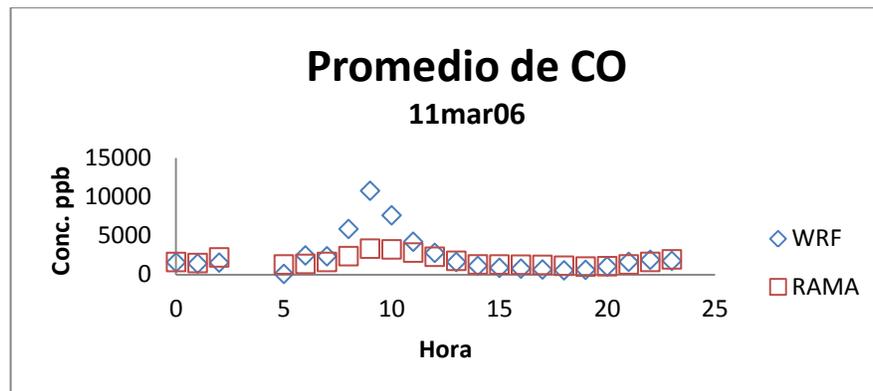


Figura 25. Promedio de Monóxido de carbono (CO) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el 11 - Marzo - 2006 .

Concentración de Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

Las Figuras 26 y 27 representan al contaminante NO₂

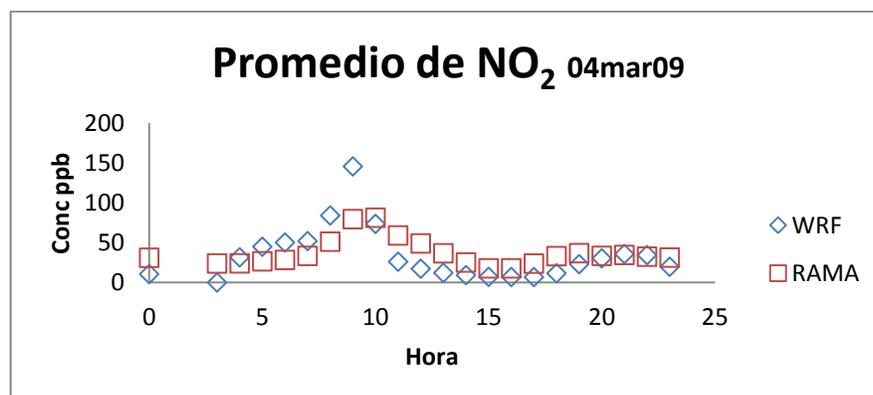


Figura 26. Promedio de Dióxido de nitrógeno (NO₂) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el 4 - Marzo - 2009.

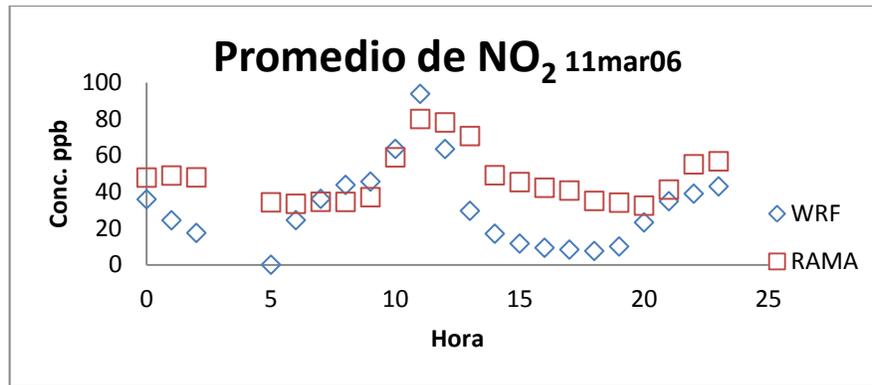


Figura 27. Promedio de Dióxido de nitrógeno (NO₂) en ppb de las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el 11 – Marzo – 2006.

Concentración de Óxido de Nitrógeno (NO)

Las Figuras 28 y 29 representan el comportamiento horario del NO

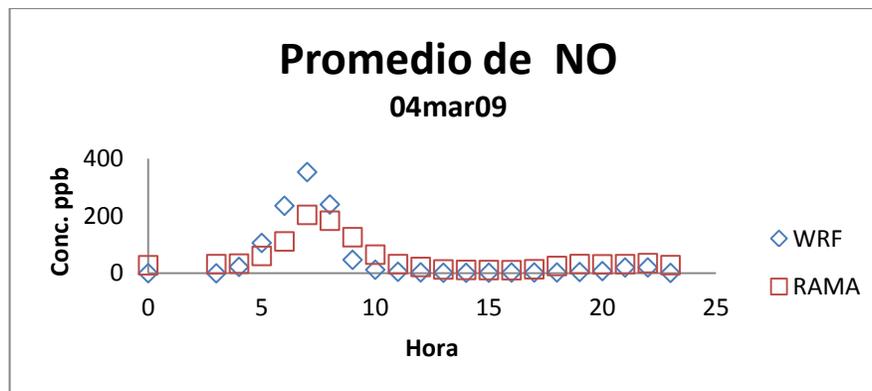


Figura 28. Promedio de Monóxido de nitrógeno (NO) en ppb para las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el 4 – Marzo – 2009.

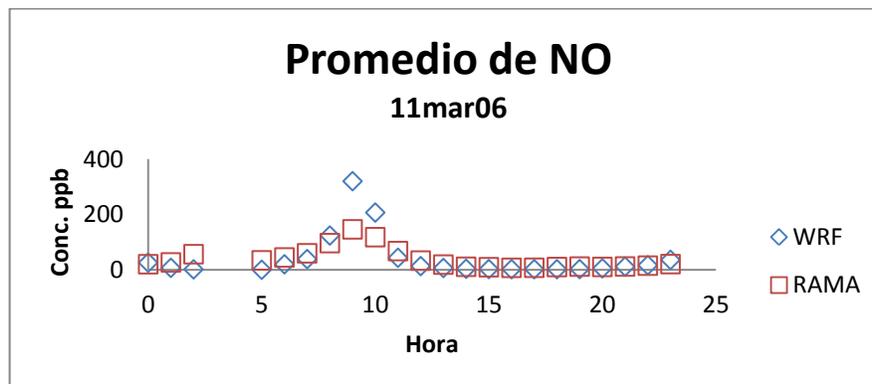


Figura 29. Promedio de Monóxido de nitrógeno (NO) en ppb para las estaciones de la RAMA y el modelo WRF para el 11 – Marzo – 2006.

En el Anexo II se pueden encontrar todas las tablas y gráficos realizados de los incendios evaluados.

5.2 Análisis estadístico

Las tablas del análisis estadístico muestran el índice de concordancia (Ic), es un indicador de la diferencia entre los valores medidos y los valores del modelo, cuyo valor va de 0 a 1, la cual es una evaluación del error (Willmott, 1981; Willmott *et al.*, 1985) siendo 1 el valor de concordancia perfecta.

En la Tabla 7 se muestra los índices de concordancia.

Tabla 7. Índice de concordancia.

Fecha	Temp	RH	Ozono	SO ₂	NO	NO ₂	CO
11 – feb – 09	0.98	0.99	0.88	0.3	0.17	0.43	0.22
01 – mar – 09	0.97	0.99	0.88	0.3	0.16	0.43	0.22
04 – mar – 09	0.98	0.97	0.87	0.23	0.50	0.64	0.89
11 – mar – 06	0.99	0.93	0.89	0.47	0.50	0.68	0.89
18 – mar – 06	0.93	0.84	0.98	0.09	0.66	0.73	0.96
18 – abr – 06	0.88	0.87	0.96	0.28	0.19	0.23	0.01

Se observa en la Tabla 7 que el modelo reproduce satisfactoriamente las variables meteorológicas y las concentraciones ambientales, siendo las mejores reproducidas la temperatura, humedad relativa y ozono ya que su valor es mayor a 0.8, esto indica que el modelo genera resultados parecidos a los observados. Por otro lado, los que tienen valores de Ic más bajos son el SO₂, NO, NO₂ y en algunos casos el CO, lo que indica que la simulación debe ser mejorada incorporando una mejor información, como lo es en el caso del SO₂ ya que el modelo no detecta emisiones extraordinarias provenientes del volcán Popocatepetl, o del CO y NOx provenientes de la central termoeléctrica Francisco Pérez Ríos y la refinería Miguel Hidalgo de Tula, Hidalgo.

5.3 Resultados de los escenarios

Aplicando el modelo WRF se obtienen las concentraciones de los contaminantes atmosféricos para el centro de México. A continuación se muestran las fechas más representativas en cuanto a concentraciones de los contaminantes.

18 – Abril – 2006

Abarca 3 incendios en los municipios de Huamantla, Juan Cuematzi y Tetlanohacan tiene en total de área quemada 63 ha y ocurrió de las 11:30 hrs. a las 17:20 hora local. El incendio más importante es el de Juan Cuematzi con 56 ha y una duración de 4 horas con vegetación de *Pinus Montezumae* con una biomasa de 268.02 Ton/ha. En las Figuras 30 a 35 muestran la dispersión de los contaminantes CO, NO, NO₂, O₃, PM₁₀ y Tolueno y la dirección del viento durante el incendio.

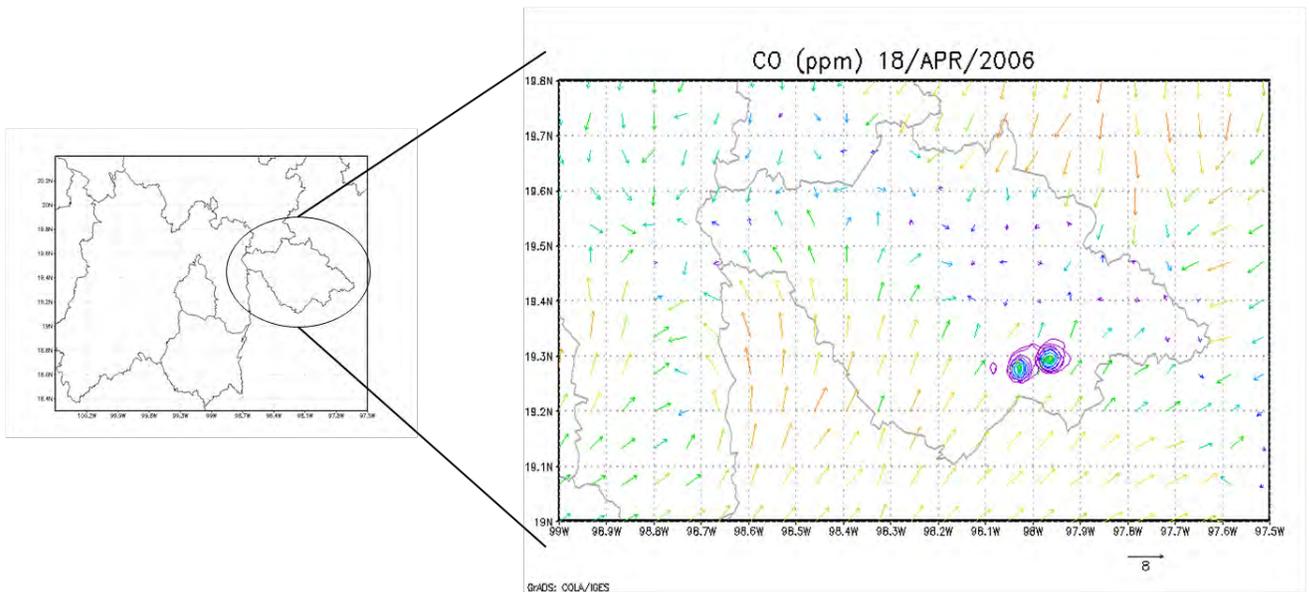
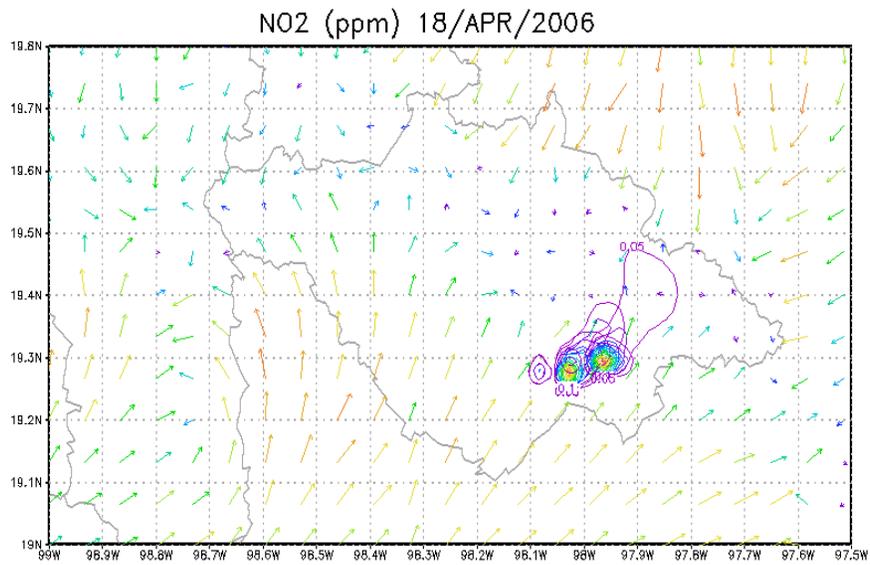
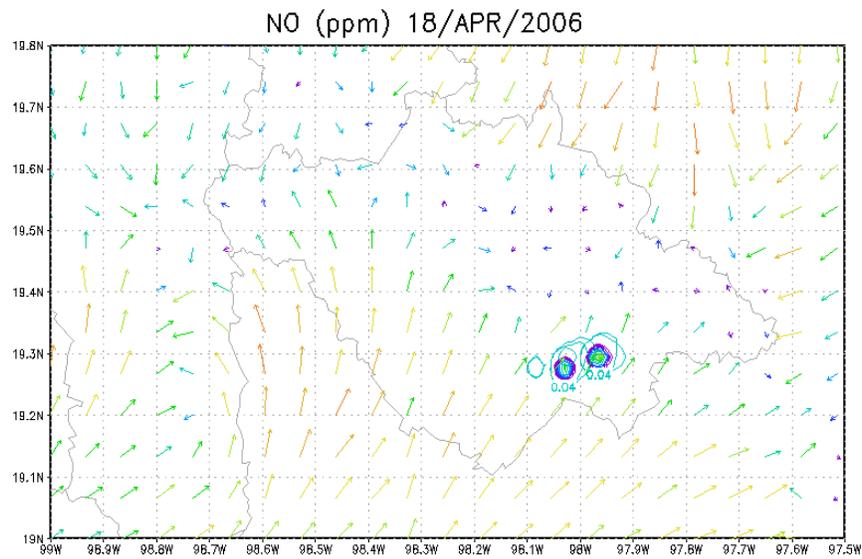


Figura 30. Concentración máxima de CO de 30 ppm para la hora inicial se muestra de color azul y la final de color morado.



GrADS: COLA/IGES

Figura 31. Concentración máxima de NO₂ es de 0.55 ppm.



GrADS: COLA/IGES

Figura 32. Concentración máxima de NO de 0.6 ppm.

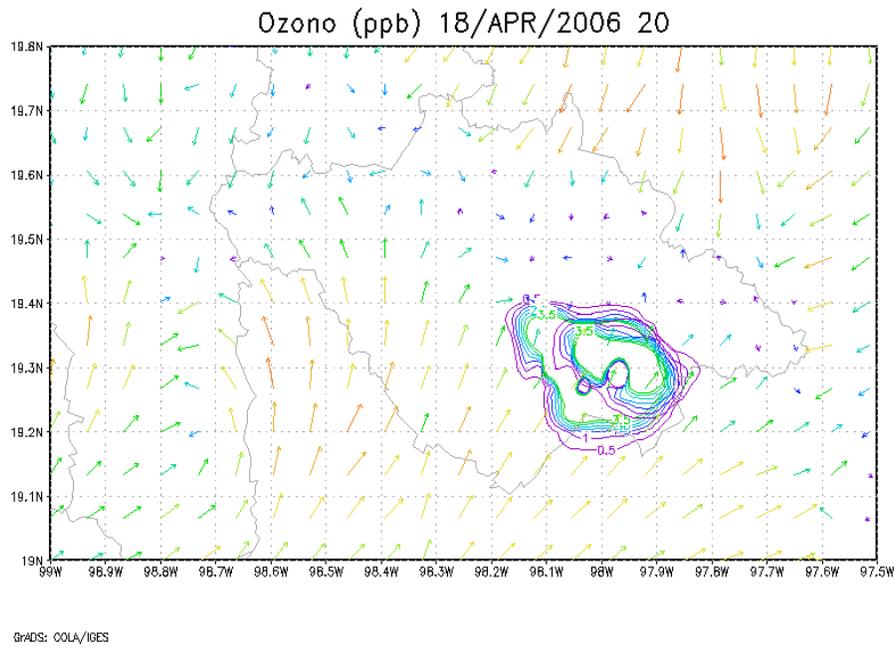


Figura 33. Concentración máxima de O₃ de 30 ppb.

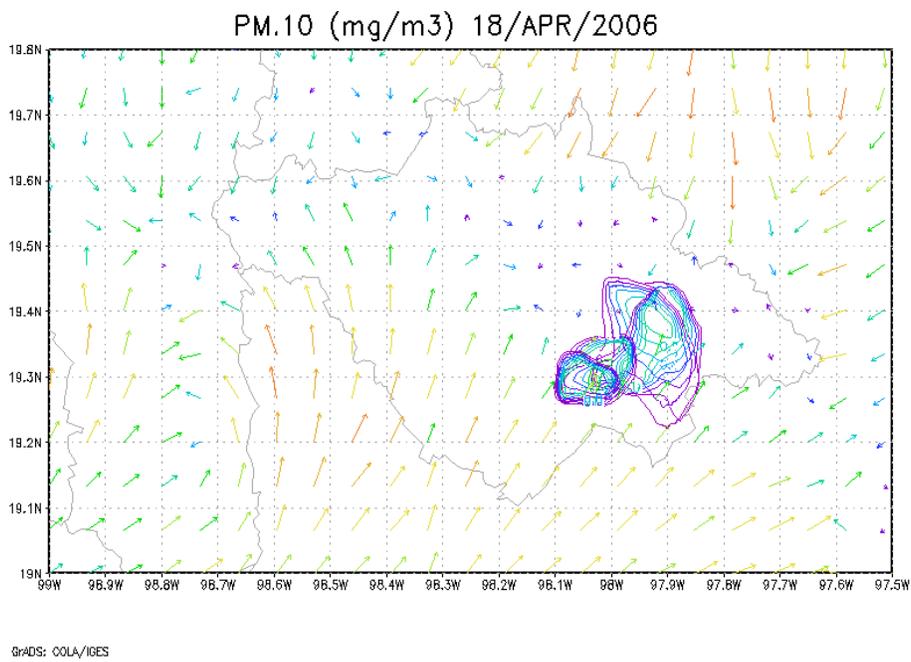


Figura 34. Concentración máxima de PM₁₀ de 16 µg/m³.

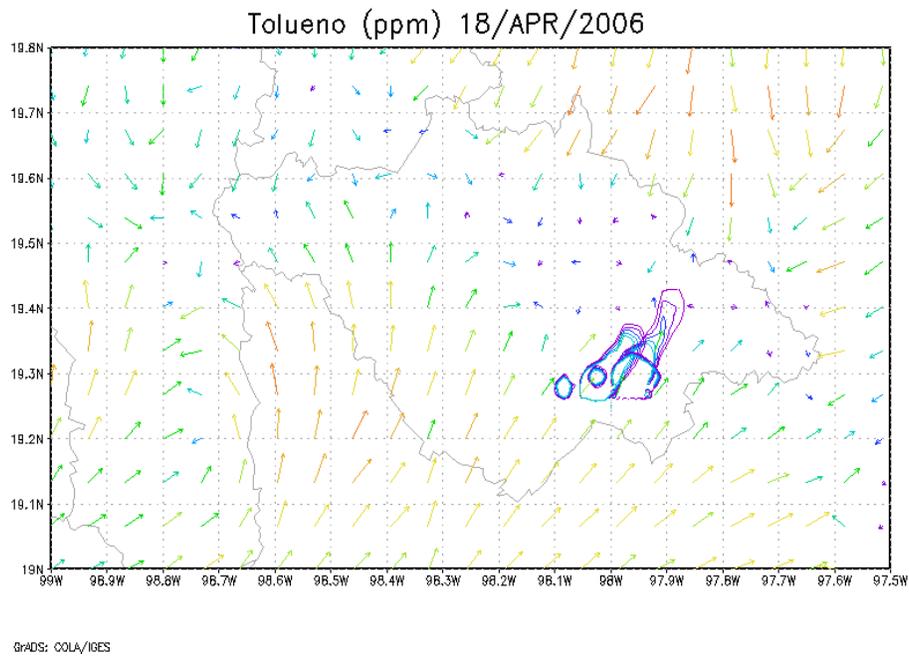


Figura 35. Concentración máxima de Tolueno de 0.002 ppm.

11 – Febrero – 2009

Abarca 4 incendios en los municipios de Huamantla y Teacalco tiene en total de área quemada 12.75 ha y tiene una duración de las 15 a 17 hrs. Donde el incendio más importante es el de Huamantla con 8 ha y una duración de 2 horas con vegetación de *Pinus Montezumae* con una biomasa de 268.02 Ton/ha. En las Figuras 36 a la 39 se muestra la dirección del viento y la dispersión de contaminantes de CO, NO₂, O₃ y Tolueno durante la ocurrencia del evento.

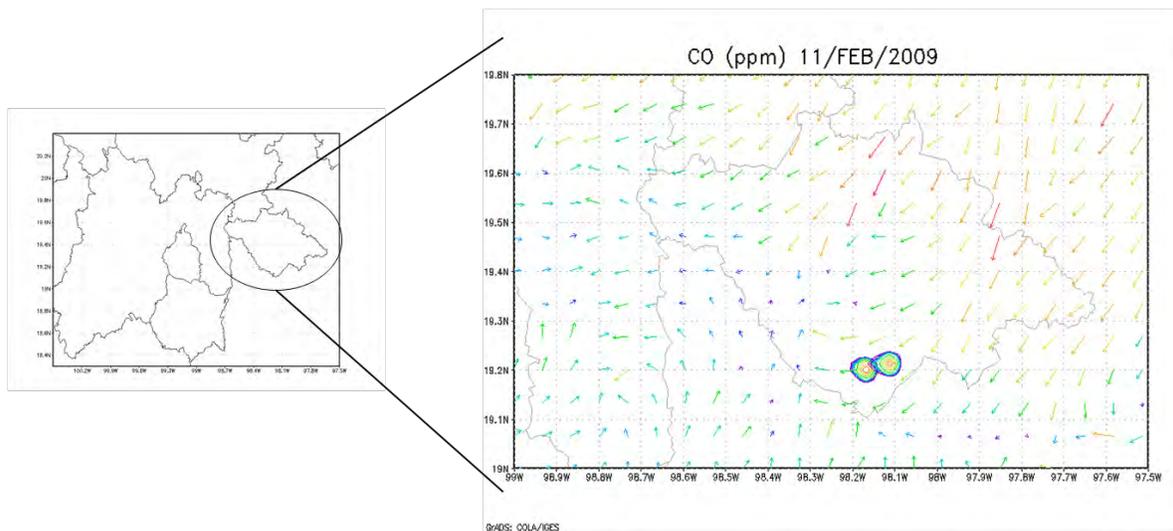


Figura 36. Concentración máxima de CO de 5 ppm la hora inicial del incendio se presenta de color amarillo y la hora final de color morado.

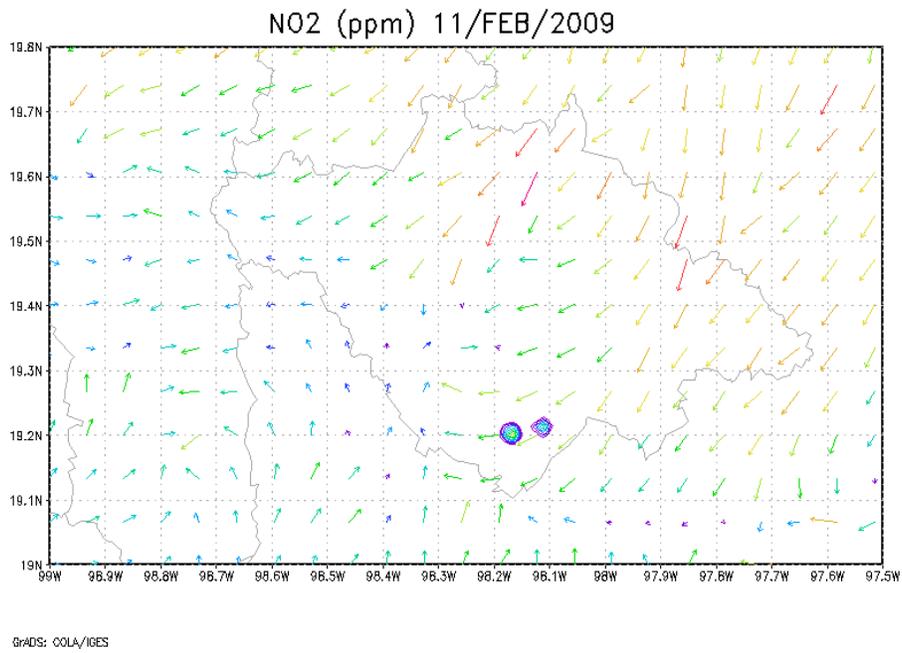


Figura 37. Concentración máxima de NO_2 de 0.045 ppm.

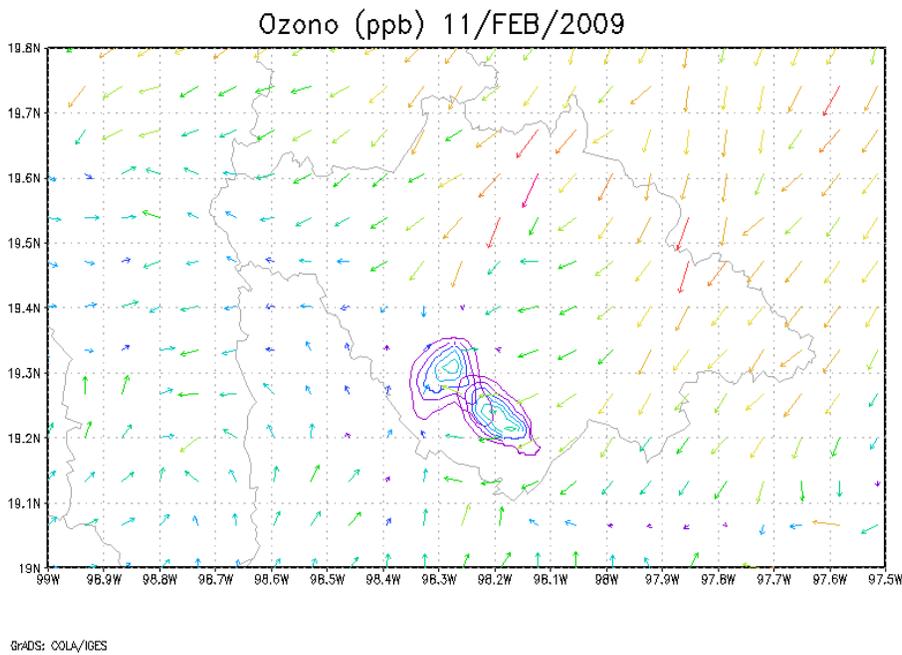


Figura 38. Concentración máxima de O_3 de 3 ppb la hora inicial se muestra de color azul y la hora final de color morado.

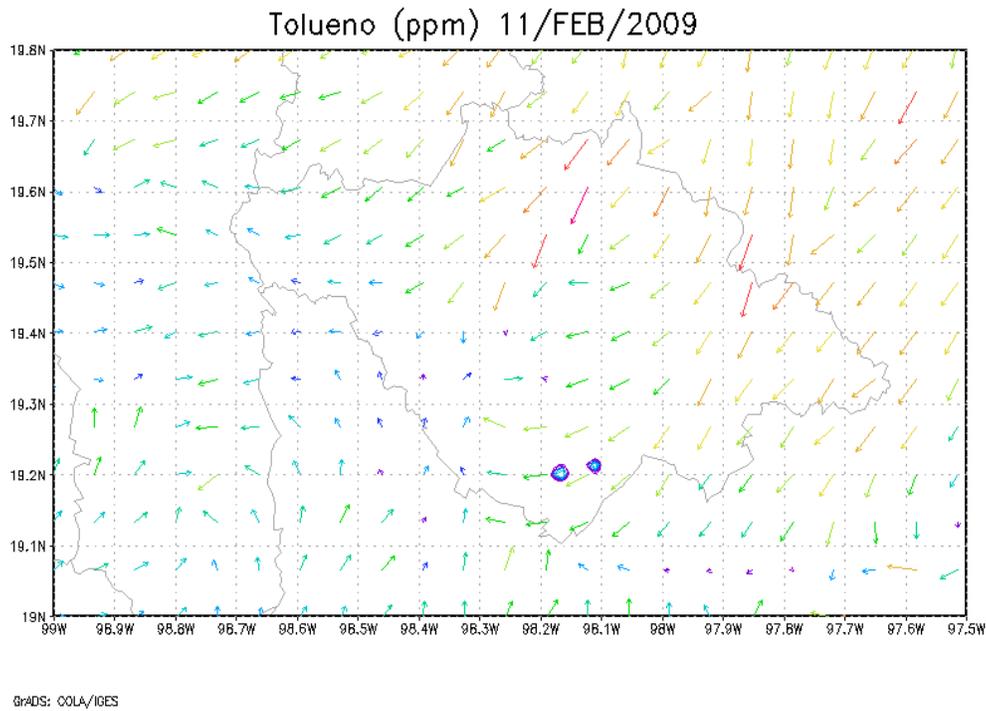


Figura 39. Concentración máxima de Tolueno de 2.6 ppm.

En el Anexo III se pueden observar todas las figuras de las concentraciones de los contaminantes evaluados para los incendios.

Condiciones meteorológicas

De los escenarios modelados se pudo extraer las variables meteorológicas de temperatura máxima y mínima, contenido de vapor de agua, altura de la capa limite (pblh) y la tendencia de la dirección del viento durante las horas de los episodios de incendios estos resultados se pueden observar en la Tabla 8.

Tabla 8. Condiciones meteorológicas para cada incendio evaluado.

Fecha	Hora	pblh* (m)	T max (°C)	T min (°C)	Contenido de vapor de agua (kg/kg)	Tendencia de la dirección del viento
11 -marzo-2006	10	500	17	15	0.006	Este
	14	1200	21	19	0.0045	Noreste
18-marzo-2006	10	600	17	15	0.002	Norte
	14	1600	19	17	0.0035	Norte
18-abril-2006	12	2800	25.5	24	0.0045	Este
	17	3000	21	20	0.006	Norte
11-febrero- 2009	14	1800	19	17	0.005	Oeste
	17	900	17	16	0.006	Oeste
1-marzo-2009	6	200	7	3	0.0055	Sur
	15	600	15	13	0.0045	Sur
4-marzo-2009	12	800	15	11	0.0015	Oeste
	17	2100	17	11	0.0025	Oeste

*pblh: Altura de la capa límite.

En este trabajo no se consideró estudiar a detalle las condiciones sinópticas meteorológicas presentes durante los períodos de interés.

Los incendios proporcionan energía adicional a la atmósfera, al hacer la diferencia de las magnitudes de viento entre el escenario con emisión menos sin emisión se debería de observar el cambio de la magnitud de viento; sin embargo el modelo no alcanza a reproducir este cambio. En las Figuras 42 y 43 se muestra el patrón de dirección de viento ocurrido en los incendios del 18 de abril de 2006 y 11 de febrero del 2009.

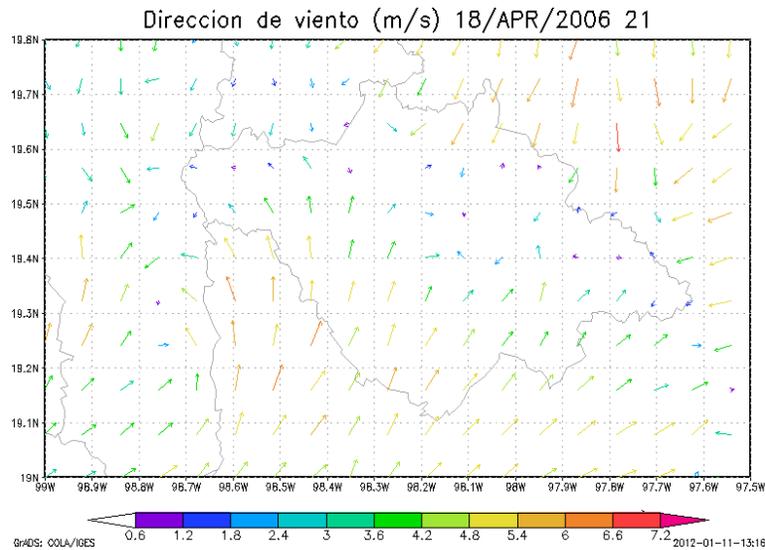


Figura 40. Dirección de viento para el 18 de abril del 2006, el viento predominante es de sureste.

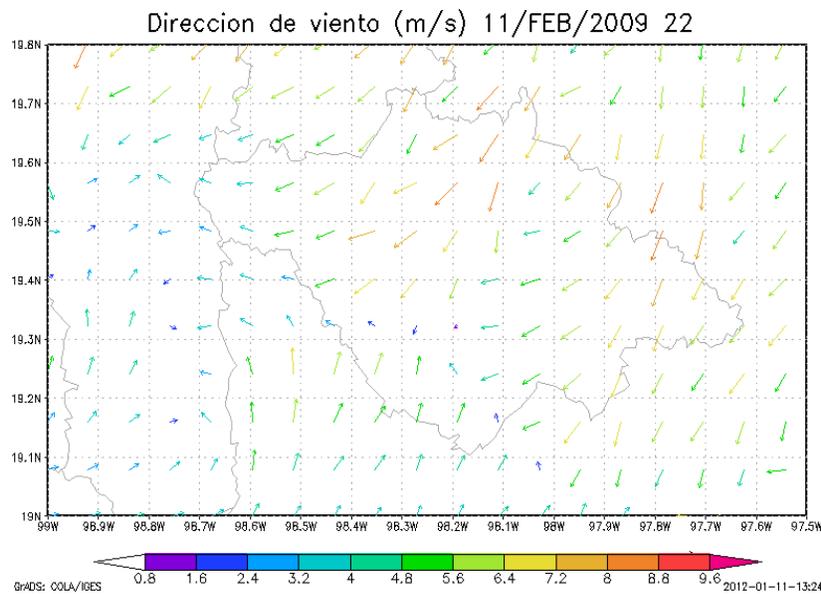


Figura 41. Dirección de viento del 11-febrero -2009, l viento predominante es al noroeste.

La Tabla 9 muestra un resumen de las emisiones calculadas de los incendios, cabe destacar que los incendios son de superficie, lo que implica que la biomasa no es consumida totalmente se necesita un factor para hacer el cálculo más preciso, por falta de información se hicieron los cálculos tomando en cuenta el tipo de vegetación y su correspondiente factor de emisión.

Tabla 9. Resumen de las emisiones calculadas con respecto al tipo de vegetación.

Fecha	Municipio	Vegetación	Biomasa* Ton/ha	Área quemada (ha)	Emisión (kg/h)			
					CO	NO _x	COV	PM ₁₀
11 Marzo 2006	Zitaltepec	Pinus montezuma e	268.02	6.0	46313.85	2090.55	2187.04	4502.736
	Zitaltepec	Pinus montezuma e	268.02	82.0	263731.68	11904.55	12453.99	25640.58
18 Abril 2006	Juan Cuamatzi	Pinus montezuma e	268.02	56	540328.32	24389.82	25515.50	52531.92
	Tetlanohcan	Pinus montezuma e	268.02	4	77189.76	3484.26	3645.07	7504.56
	Huamantla	Pinus montezuma e	268.02	3	28946.16	1306.59	1366.90	2814.21
18 Marzo 2006	Zitlaltepec	Bosque de encino	136.4	10	65472	2955.33	3091.73	6365.33
	José María Morelos	Agricultura de temporada	4.48	2	645.12	29.12	30.46	62.72
	Huamantla	Pinus montezuma e	268.02	1.5	19297.44	871.06	911.26	1876.14
	Xicohténcatl	Agricultura de temporada	4.48	1	129.02	5.82	6.09	12.54
	Miguel Hidalgo	Bosque de encino	136.4	1	6547.2	295.53	309.17	636.53
	Tetlanóhcan	Bosque de encino	136.4	4	39283.2	1773.2	1855.04	3819.2
11 Febrero 2009	Huamantla	Pinus montezuma e	268.02	8	88216.87	3982.01	4165.80	8576.64
	Juan Cuamatzi	Agricultura de temporada	4.48	0.25	161.28	7.28	7.62	15.68
	Teacalco	Bosque de encino	136.4	3	29462.40	1329.90	1391.28	2864.40
	Teolochohco	Agricultura de temporada	4.48	1.5	645.12	29.12	30.46	62.72
1	Juan Cuamatzi	Bosque de encino	136.4	1.5	14731.20	664.95	695.64	1432.20
	Juan Cuamatzi	Agricultura de temporada	4.48	2	430.08	19.41	20.31	41.81
	Teolochohco	Agricultura	4.48	2.5	460.80	20.80	21.76	44.80

Marzo 2009	de temporada							
	Teolocho	Agricultura de temporada	4.48	2	645.12	29.12	30.46	62.72
	Zitlaltepec	Pinus leiophylla	237.2	2	34156.80	1541.80	1612.96	3320.80
	Zitlaltepec	Pinus montezumae	268.02	25	175431.27	7918.77	8284.25	17055.82
	Zitlaltepec	Pinus montezumae	268.02	1	19297.44	871.07	911.27	1876.14
4 Marzo 2009	Tetlanóhcan	Bosque de encino	136.4	6	58924.80	2659.80	2782.56	5728.80
	Chiautempan	Agricultura de temporada	4.48	1.5	483.84	21.84	22.85	47.04
	Juan Cuematzi	Agricultura de temporada	4.48	2	1121.95	50.64	52.98	109.08
	Juan Cuematzi	Agricultura de temporada	4.48	18	2903.04	131.04	137.09	282.24
	Teolocho	Bosque de encino	136.4	4	19641.60	886.60	927.52	1909.60

Las emisiones varían de acuerdo al tipo de vegetación entre mayor sea el contenido de biomasa será mayor la emisión, en este caso corresponde al *Pinus montezumae* su biomasa es de 268.02 Ton/ha, lo que indica que es 98.32% mayor la emisión que la de agricultura de temporada y 49.1% que Bosque de encino (*Pinus Quercus*) y 11.5% más que *Pinus Leiophylla*.

Posteriormente se calculó la proporción de las emisiones del incendio y el inventario de emisiones de Tlaxcala 2005 ya que es el único que está disponible actualmente para cuantificar la aportación de las emisiones generadas por los incendios que no están contempladas en los inventarios, donde sólo se calcularon las PM₁₀, CO, NOx y COV's.

Tabla 10. Proporción de las emisiones calculadas y el inventario de emisiones Tlaxcala 2005.

Fecha	Contaminante	Inventario de Emisiones		Proporción (%)
		Tlaxcala 2005 (Ton/año)	Emisión Total de incendios (Ton/año)	
11-Marzo-2006	CO	378,128	5038.2	1.33
	NOx	21,098	227.4	1.08
	COV's	53,126	237.9	0.45
	PM₁₀	6,181	489.8	7.92
18-Marzo-2006	CO	378,128	1445.1	0.38
	NOx	21,098	65.2	0.31
	COV's	53,126	68.2	0.13

	PM₁₀	6,181	140.5	2.27
18-Abril-2006	CO	378,128	3878.8	1.03
	NOx	21,098	175.1	0.83
	COV's	53,126	183.2	0.34
	PM₁₀	6,181	377.1	6.10
	TOTAL			22.17 %
11-febrero-2009	CO	378,128	651.7	0.17
	NOx	21,098	29.4	0.14
	COV's	53,126	30.8	0.06
	PM₁₀	6,181	63.4	1.03
1-Marzo-2009	CO	378,128	2206.4	0.58
	NOx	21,098	99.6	0.47
	COV's	53,126	104.2	0.20
	PM₁₀	6,181	214.5	3.47
4-Marzo-2009	CO	378,128	830.8	0.22
	NOx	21,098	37.5	0.18
	COV's	53,126	39.2	0.07
	PM₁₀	6,181	80.8	1.31
	TOTAL			7.9%

Se observa en la Tabla 10 que las emisiones de PM₁₀ son las más altas esto representa un daño a la salud ya que Las *Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS)* constituyen el análisis más consensuado y actualizado sobre los efectos de la contaminación en la salud, y recogen los parámetros de calidad del aire que se recomiendan para reducir de modo significativo los riesgos sanitarios. Dichas Guías señalan que una reducción de la contaminación por partículas (PM₁₀) de 70 a 20 microgramos por metro cúbico permite reducir en aproximadamente un 15% las muertes relacionadas con la calidad del aire. Aunque solo son los incendios más representativos de estos años llegan a aumentar hasta un 22% más las emisiones, afectando la calidad del aire para el año 2006 y un 8% para el 2009.

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de este trabajo se tiene una propuesta metodológica para determinar e incluir las emisiones de incendios en el modelo de calidad de aire.

De los resultados obtenidos se observa que las emisiones por incendios en el PNM sí afectan la calidad del aire del centro de México en especial la del Estado de Tlaxcala. Incrementan las emisiones de CO en 2.74%, NOx en 2.22%, en VOC 0.92% y PM₁₀ en 16.29 % para el año 2006; para el año 2009 0.97% de CO, 0.79% de NOx, 0.33% de VOC y 5.81% de PM₁₀, considerando que solo son los incendios más representativos de estos años contribuyen a un total de emisiones de 22% para el 2006 y de 8 % para el 2009, por tanto es importante considerar los incendios forestales para la calidad del aire.

Actualmente en los inventarios de emisiones no se incluyen las emisiones de los incendios forestales. En este estudio se especificó que la contribución de los incendios estudiados tienen un total de las emisiones anuales en un 8% para el 2009 y de 22.17% en el 2006, lo que significa que se deben considerar estas fuentes en el Estado de Tlaxcala.

A pesar de que los incendios son de amplia magnitud considerando el área quemada no se observó que tuviesen influencia sobre la Ciudad de Puebla, sin embargo los municipios más afectados por las concentraciones de PM₁₀ son Huamantla y San Francisco Tetlanohcan ya que pueden afectar a la salud humana.

En la actualidad la información sobre datos de los incendios es limitada, en la mayoría de los casos no se conoce el tipo de vegetación real, ya que hay mucha renovación y no se introducen las mismas especies y la diferencia de emisión es muy diferente, depende de la biomasa como en este caso la mayor biomasa la tiene el *Pinus montezumae* teniendo hasta un 98% más de emisión que la agricultura de temporada (maíz), de igual forma sucede con los datos de la hora inicial y final del incendio por lo que se requiere de una mayor atención por parte de los tomadores de decisiones en aplicar algún programa que incluya el tipo de vegetación preciso de los bosques naturales y de renuevo y su extensión al igual que la ubicación y duración del incendio como su extensión afectada, para poder determinar el impacto que tienen en la calidad del aire y en la salud humana. Las Guías de calidad del aire de la OMS señalan que una reducción de la contaminación por partículas (PM₁₀) de 70 a 20 microgramos por metro cúbico permite reducir en aproximadamente un 15% las muertes relacionadas con la calidad del aire, como se hizo en San Diego California por

(Delfino *et al.*, 2009). Por lo anterior se sugiere hacer un estudio más a detalle para saber con más precisión el impacto que se tiene en la región por este tipo de fuentes.

Es necesario tener los propios factores de emisión ya que los tomados de la EPA nos ayudan a darnos una idea de cómo están las emisiones, pero en realidad no tenemos el mismo tipo de vegetación que se indica. A futuro se puede mejorar los factores de emisión por la detección de satélites.

Se observa que al hacer los estadísticos con los datos de la RAMA para el 2006 y 2009 no se observan diferencias significativas, lo que conlleva a que la emisión de los contaminantes de los incendios forestales del PNM no llegan a la ZMVM, por lo que se recomienda hacer estos estadísticos con las estaciones montadas cerca de Malinche o del sistema de monitoreo atmosférico del Estado de Tlaxcala.

El desempeño del modelo es satisfactorio ya que reproduce adecuadamente el comportamiento horario de la meteorología y algunos contaminantes, actualmente está limitado a emisiones de 24 horas, se recomienda ampliarlo para tener un seguimiento de incendios de amplia magnitud como el caso de Coahuila que tuvo una duración de aproximadamente 22 días consumiendo 193,222 ha las cuales fueron de pastizales, arbolado adulto y matorrales, con vientos de 30 a 50 km. (SEMARNAT 2011). Existen otras banderas para el WRF tal es el caso del WRF-fire en el cual se puede simular la extensión del incendio, la altura de la columna de humo, entre otras variables.

Como se observa la utilidad principal de los modelos de calidad del aire es su capacidad para reproducir escenarios donde se presenten altos niveles de concentración de contaminantes y así poder tomar medidas preventivas para reducir la concentración.

Por último se recomienda generar información sobre la calidad del aire en el Estado de Tlaxcala mediante monitoreo atmosférico, ya que la calidad del aire depende de dos variables muy importantes que son la meteorología y las emisiones locales y con ello tener una mejor evaluación del impacto de los incendios forestales de Malinche.

Este trabajo permite abrir nuevos campos de investigación, como posibles trabajos a futuro se puede realizar la evaluación del impacto de la calidad del aire y los efectos a la salud a las comunidades cercanas a los incendios del PNM, mejorar la resolución del modelo y su amplitud a más días de emisiones, calcular los factores de emisión de la región de Malinche, cuantificar las emisiones por el tipo de vegetación para la validación de los resultados del modelo, estudiar las condiciones sinópticas meteorológicas presentes durante los incendios.

CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA

Bravo, A., Sosa, R., Sánchez, P., Saavedra, M. & Jaimes, M. "Impact of wildfires on air quality of Mexico City 1992-1999". Environmental Pollution 117, p 243-253. (2002)

Bravo, A., Sosa, R., Sánchez, P., Saavedra, M. & Jaimes, M. "Wildfires vs. Air quality; Case Mexico city. Proceedings on the 92nd Annual Meeting and Exhibition of the Air & Waste Management Association. St. Louis Missouri, p 99-623. (1999).

Castillo, S. "Incendios Forestales y Medio Ambiente: una Síntesis Global" Laboratorio de Incendios Forestales, Universidad de Chile. (2001)

CONAFOR Comisión Nacional Forestal "Estadística final de incendios forestales 2006". Gerencia nacional de incendios forestales. (2006)

Contreras, M., Rodríguez, T., Retama, H, & Sánchez, R. "Gases del humo de incendios en bosques de Pinus Hartwegii". Agrociencia vol. 37 núm. 003 p 309-316, 2003.

Delfino RJ, Chang J, Wu J, Ren C, Tjoa T, Nickerson B, Cooper D, Gillen DL. "Repeated hospital encounters for asthma in children and exposure to traffic-related air pollution near the home". Department of Epidemiology, School of Medicine, University of California, Irvine 92617-7555, USA. (2009).

Dennis A. "Air pollutant emissions associated with forest, grassland, and agricultural burning in Texas". Atmospheric Environment 36 3779-3792. (2002).

Haltenhoff, H. "Impacto del fuego sobre el medio ambiente", Corporación Nacional Forestal, Gobierno de Chile. (1998).

INEGI, Censo Estadístico de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática 2010..

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

Lee, K. "Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003". Atmospheric Environment 39 85-99. (2005).

Pouliot, G., T. E. Pierce, W. G. Benjey, S. M. Oneill, & S. A. Ferguson. "Wildfire Emission Modeling: Integrating BLUESKY and SMOKE. Presented at 14th International Emission Inventory Conference, Las Vegas, NV, April 11 - 14, (2005).

Rodríguez, T. "Incendios Forestales". Universidad Autónoma de Chapingo, Mundi-Prensa, México, p 630. (1996).

SEMARNAT. "Inventario nacional de emisiones del estado de Tlaxcala, 2005.

SEMARNAT. "Situación actual y perspectivas del maíz en México 1996-2012"

SMA-GDF:2004. 'Inventario de emisiones de la ZMVM, 2006'.

SMA-GDF:2009. 'Inventario de emisiones de la ZMVM, 2009'.

Stuefer, M., .Grell. G., Freitas. S., Newby. G., Kulchitsky. A., Higbie. L., "UAFSmoke - A WRF/Chem Wildfire Smoke Forecasting System for Alaska", University of Alaska Fairbanks. (2009).

Stuefer, M. " Wildfire Smoke Modeling". University of Alaska Fairbanks. Geophysical Institute. (2009).

Universidad de Chile. "Fuentes de emisiones atmosféricas". Departamento de ingeniería mecánica.

U.S. EPA AP-42 Contract No. 68-D-98-046 Work Assignment No. 5-03 p 4.

U.S. EPA "Developed of Emissions Inventory Methods for Wildland Fire" Final Report Research Triangle Park, North Carolina 27711. (2002).

U.S. EPA "Wildfires And Prescribed Burning" Final Report Chapter 13, Research Triangle Park, North Carolina 27711. (2007).

U.S. EPA "Description of the fire scheme in WRF". Research Triangle Park, North Carolina. (2010).

Vera, V. & Rodríguez T. "Supervivencia e incremento en altura de Pinus Hartwegii a dos años de quemas prescritas e incendios experimentales". Agrociencia vol. 41 núm. 002 p 219-230. (2007).

Villers-Ruiz. L. "Comportamiento del fuego y evaluaciones de riesgo a incendios en áreas forestales de México. Un estudio en el volcán Malinche". Informe final. Proyecto CONACyT 38697. 45 p. (2005)

Villers-Ruiz. L. "Movimientos de biomasa forestal en el Parque Nacional Malinche Consideraciones para la evaluación de los almacenes de carbono". Informe final Proyecto CONACyT 52464. 80 p. (2008).

Villers, R & Hernandez, L. "Incendios forestales y el fenómeno de El Niño en México" Universidad Nacional Autónoma de México. Sevilla España, Wildfire. (2007).

Villers-Ruiz. L., F. Rojas-Garcia & P. Tenorio-Lezama. Guía Botánica del Parque Nacional Malinche. Tlaxcala-Puebla. Centro de Ciencias de la Atmósfera e Instituto de Biología UNAM y CONACyT. México 196 p. (2006).

Villers, R. "Incendios Forestales". Ciencias. núm. 081 p 60-66. (2006).

Villers, R. & López, B. "Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios forestales de México: un estudio en el volcán la Malinche". Atmósfera (2004).

Wiedinmyer C. "Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling". Atmospheric Environment 40 3419-3432. (2006).

Mesografía

Environmental Modeling Center-NOAA [en línea]
<<http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rreanl/narr.bams.Aug19.pdf>> [consulta: enero 2010]

Environmental Protection Agency [en línea] <www.epa.gov> [consulta: junio 2010].

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [en línea] <<http://inegi.gob.mx>> [consulta: marzo 2011].

SEMARNAT. “Com.142/11-SEMARNAT reporta situación de incendios en Coahuila” [en línea]
<http://saladeprensas.semarnat.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=3244:com-14211-semarnat-reporta-situacion-de-incendios-en-coahuila&catid=50:comunicados&itemid=110> [consulta: diciembre 2011]

Sistema de Monitoreo Atmosférico [en línea] <www.sma.df.gob.mx/simat> [consulta: febrero 2009].

University Corporation for Atmospheric Research [en línea] <<http://www.mmm.ucar.edu>> [consulta: agosto 2009]

University Corporation for Atmospheric Research [en línea] <<http://dss.ucar.edu/pub>> [consulta: marzo 2010]

World Meteorological Organization (WMO 2011) Forecast Verification Research [en línea]
<http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/Forecast_Verification.html> [consulta : noviembre 2010].

Weather Research and Forecasting Model [en línea] <<http://www.wrf-model.org>> [consulta: enero 2010].

World Health Organization (WHO) [en línea]

<<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/index.html>> [consulta: 10 nero 2012].

Normas revisadas

Norma Oficial Mexicana número 20 de la Secretaria de Salud del año 1993 (NOM-020-SSA1-1993)

Norma Oficial Mexicana número 21 de la Secretaria de Salud del año 1993 (NOM-021-SSA1-1993)

Norma Oficial Mexicana número 23 de la Secretaria de Salud del año 1993 (NOM-023-SSA1-1993)

Norma Oficial Mexicana número 25 de la Secretaria de Salud del año 1993 (NOM-025-SSA1-1993)

ANEXO I

Tablas de cálculo de emisiones de los incendios y su proporción con el inventario de Tlaxcala 2005
2006

FECHA	Número de incendios	Tiempo Total (horas)	CONTAMINANTE																Área quemada (ha)				
			SO2	CO	NOx	VOCs	PM2.5	PM10	CH4	Cleimen tal	Coriántrico	CO2	Metanol	Formalde hido	Benzopire no	Benceno	Tolueno	Xileno		Etileno	Fenol	Hexano	
11-Feb	4	5.5	508.47	88216.87	3982.01	4165.80	7351.41	8576.64	4165.80	447.21	3533.18	931790.67	1102.71	918.93	0.092	122.52	98.02	35.53	79.64	91.89	857.66	8	
			0.93	161.28	7.28	7.62	13.44	15.68	7.62	0.82	6.50	1703.52	2.02	1.68	0.000	0.22	0.18	0.06	0.15	0.17	1.57	0.25	
			169.82	29462.40	1329.90	1391.28	2455.20	2864.40	1391.28	149.36	1186.68	311196.60	368.28	306.90	0.031	40.92	32.74	11.87	26.60	30.69	286.44	3	
			3.72	645.12	29.12	30.46	53.76	62.72	30.46	3.17	25.98	6814.08	8.06	6.72	0.001	0.90	0.72	0.26	0.58	0.67	6.27	1.5	
			0.17	0.14	0.06	1.03																	
			Proporción %			TOTAL de emisión																	
			84.91	14731.20	664.05	695.64	1227.60	1432.20	695.64	74.68	593.34	155598.90	184.14	153.45	0.015	20.46	16.37	5.93	13.30	15.35	143.22	1.5	
			2.48	430.08	19.41	20.31	35.84	41.81	20.31	2.18	1732	45427.2	5.38	4.48	0.000	0.60	0.48	0.17	0.39	0.45	4.18	2	
			2.66	460.80	20.80	21.76	38.40	44.80	21.76	2.34	1856	48672.0	5.76	4.80	0.000	0.64	0.51	0.19	0.42	0.48	4.48	2.5	
			3.72	645.12	29.12	30.46	53.76	62.72	30.46	3.27	25.98	6814.08	8.06	6.72	0.001	0.90	0.72	0.26	0.58	0.67	6.27	2	
			196.88	34156.80	1541.80	1612.96	2846.40	3320.80	1612.96	173.16	1375.76	360781.20	426.96	355.80	0.036	47.44	37.95	13.76	30.84	35.58	332.08	2	
1-Marzo	7		1011.17	175431.27	7918.77	8284.25	14619.27	17055.82	8284.25	889.34	7065.98	1852992.82	2192.89	1827.41	0.183	243.63	194.92	70.66	158.38	182.74	1705.58	25	
			111.23	19287.44	871.07	911.27	1608.12	1876.14	911.27	97.83	777.26	203859.21	241.22	201.02	0.030	26.80	21.44	7.77	17.42	20.10	187.61	1	
			1.13	208	10	10	13.91	16	10	1.13	10	1184.2	1.13	1.13	0.000	0.13	0.10	0.03	0.07	0.08	0.79	0.1	
			Proporción %			TOTAL de emisión																	
			339.64	58944.80	2659.80	2782.56	4910.40	5728.80	2782.56	298.72	2373.36	622393.20	736.56	613.80	0.061	81.84	65.47	23.73	53.20	61.38	572.88	6	
			2.79	483.84	21.84	22.85	40.32	47.04	22.85	2.45	1949	51105.56	6.05	5.04	0.001	0.67	0.54	0.19	0.44	0.50	4.70	1.5	
			6.47	1121.95	50.64	52.98	93.50	109.08	52.98	5.69	45.19	11850.57	14.02	11.69	0.001	1.56	1.25	0.45	1.01	1.17	10.91	2	
4-Marzo	5		16.73	2903.04	131.04	137.09	241.92	282.24	137.09	14.72	116.93	30663.36	36.29	30.24	0.003	4.03	3.23	1.17	2.62	3.02	28.22	18	
			113.21	19641.60	886.60	927.52	1636.80	1909.60	927.52	99.57	791.12	207464.40	245.52	204.60	0.020	27.28	21.82	7.91	17.73	20.46	190.96	4	
			4.07	835	33.25	35.13	64.13	75.17	35.13	4.13	31.86	8358.12	10.10	8.61	0.001	1.11	0.91	0.32	0.72	0.83	7.97	0.9	
			Proporción %			TOTAL de emisión																	
			0.22	0.18	0.07	1.31																	
			TOTAL EMISION ANUAL			7.89																	

2009

FECHA	Número de incendios	Tiempo Total (horas)	CONTAMINANTE																	Área quemada (ha)		
			SO2	CO	NOx	VOC's	PM2.5	PM10	CH4	Colemet al	Corghini co	CO2	Mietanol	Formal dehidro	Bentopif reno	Benceno	Toueno	Xyleno	Estireno		Fenol	Hexano
11-Marzo	2	16.25	266.95	46313.86	2090.56	2187.04	3859.49	4502.74	2187.04	234.79	1865.42	489190.10	578.92	482.44	0.05	64.32	51.46	18.65	41.81	48.24	450.27	6
			1520.12	263731.61	11904.5	12454.0	21977.6	25640.5	12454.0	1336.97	3	7	3296.65	2747.21	0.27	366.29	293.04	106.23	238.09	274.72	2564.06	82
			Emission total (Ton/año)	25.04	5035.24	277.42	337.89	419.85	437.82	95.54	299.83	53276.41	67.98	53.48	0.01	7.00	5.80	7.03	4.35	5.35	48.39	48.39
		Proporción %	1.33	1.08	0.45	7.92																
		TOTAL de emisión	10.78																			
18-Marzo	6	11	377.37	65472.00	2955.33	3091.73	5456.00	6365.33	3091.73	331.91	2637.07	691548.00	818.40	682.00	0.07	90.93	72.75	26.37	59.11	68.20	636.53	10
			3.72	645.12	29.12	30.46	53.76	62.72	30.46	3.27	25.98	6814.08	8.06	6.72	0.00	0.90	0.72	0.26	0.58	0.67	6.27	2
			Emission total (Ton/año)	111.23	19297.44	871.07	911.27	1608.12	1876.14	911.27	97.83	777.26	203829.21	241.22	201.02	0.02	26.80	21.44	7.77	17.42	20.10	187.61
		Proporción %	0.74	129.02	5.82	6.09	10.75	12.54	6.09	0.65	5.20	1362.82	1.61	1.34	0.00	0.18	0.14	0.05	0.12	0.13	1.25	1
		TOTAL de emisión	37.74	6547.20	295.53	309.17	545.60	636.53	309.17	33.19	263.71	69154.80	81.84	68.20	0.01	9.09	7.27	2.64	5.91	6.82	63.65	1
18-Abril	3	6	226.42	39283.20	1773.20	1855.04	3273.60	3819.20	1855.04	199.14	1582.24	414928.80	491.04	409.20	0.04	54.56	43.65	15.82	35.46	40.92	381.92	4
			5.33	1445.11	65.23	68.24	130.43	140.90	68.24	7.13	58.23	15264.01	18.06	13.05	0.00	2.01	1.61	0.58	1.40	1.51	14.05	
			Emission total (Ton/año)	3114.39	540328.32	24389.8	25515.5	45027.3	52531.9	25515.5	21763.2	5707217.8	8	6754.10	5628.42	0.563	750.46	600.36	217.63	487.80	562.84	5253.19
		Proporción %	444.91	77189.76	3484.26	3645.07	6432.48	7504.56	3645.07	391.31	3109.03	815316.84	964.87	804.06	0.080	107.21	85.77	31.09	69.69	80.41	750.46	4
		TOTAL de emisión	166.84	28946.16	1306.60	1366.90	2412.18	2814.21	1366.90	146.74	1165.89	305743.82	361.83	301.52	0.030	40.20	32.16	11.66	26.13	30.15	281.42	3
		Proporción %	22.46	3878.79	175.08	183.16	323.23	377.10	183.16	17.66	155.33	40969.67	48.48	40.40	0.004	5.39	4.31	1.56	3.50	4.04	37.71	
		TOTAL de emisión	8.30																			
		TOTAL EMISION ANUAL	22.17																			

Como se observa en las tablas de emisión la emisión total anual para el 2009 contribuye con el 7.89% más de las emisiones del inventario de emisiones y para el año 2006 la contribución es de 22.17% mayor, esto es un significativo incremento de las emisiones en el inventario anual de Tlaxcala.

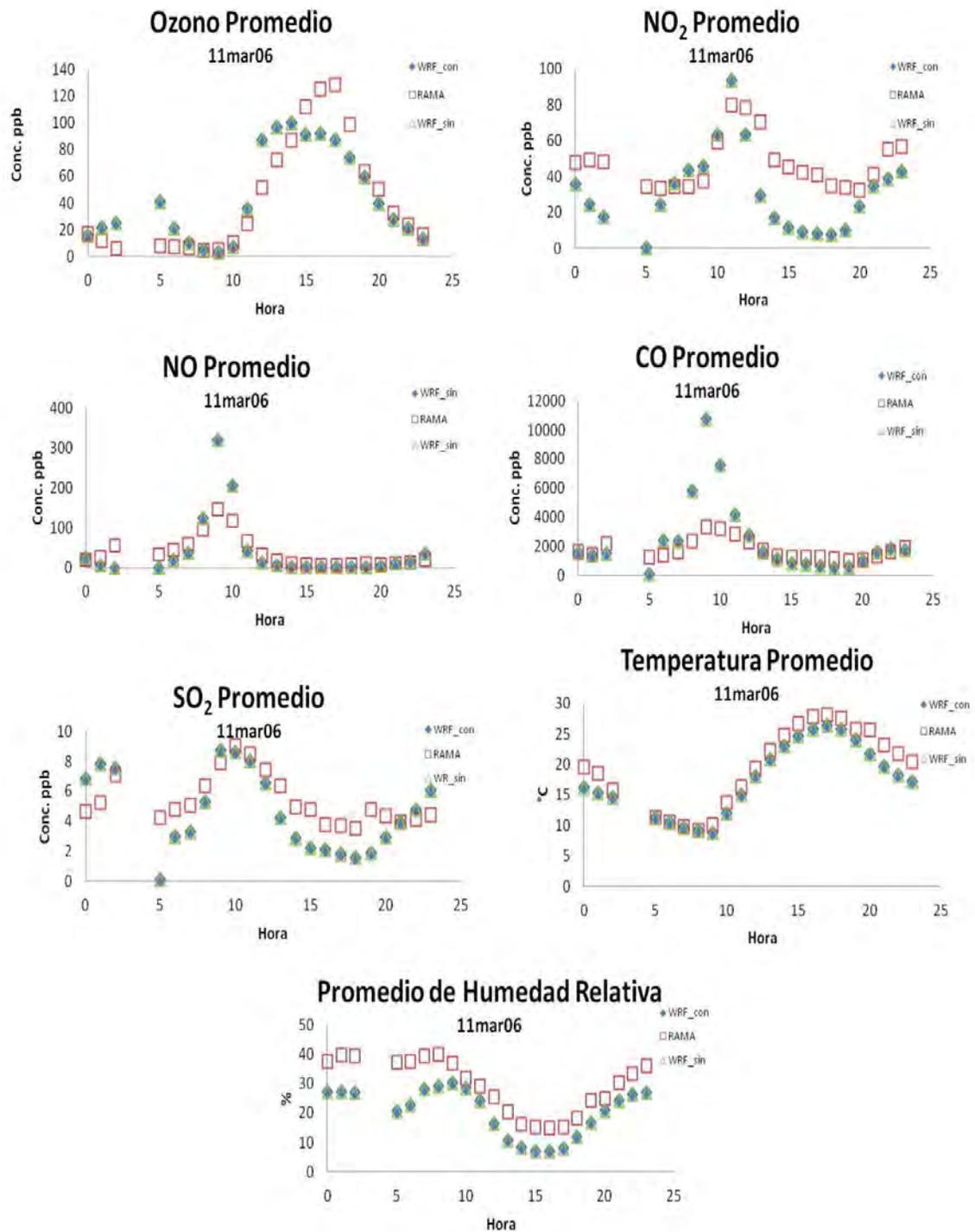
ANEXO II

A continuación se presentan las tablas y gráficos de los promedios punto a punto entre la RAMA y los valores del Modelo.

11 – MARZO – 2006

Hr	Temperatura °C			SO ₂ ppm			RH %		
	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
0	16.15	16.15	19.42	6.79	6.79	4.62	27.17	27.17	37.47
1	15.25	15.25	18.52	7.82	7.83	5.24	27.21	27.22	39.53
2	14.57	14.58	15.64	7.51	7.51	7.05	27.13	27.13	39.27
5	11.21	11.21	11.18	0.10	0.10	4.19	20.64	20.64	37.27
6	10.46	10.46	10.42	2.94	2.94	4.76	22.93	22.93	37.60
7	9.56	9.56	9.81	3.26	3.26	5.05	28.18	28.18	39.47
8	9.21	9.21	9.22	5.28	5.28	6.33	29.03	29.03	39.87
9	8.76	8.76	10.02	8.69	8.69	7.86	30.18	30.18	36.87
10	11.90	11.90	13.63	8.61	8.61	9.00	28.41	28.41	31.87
11	15.00	15.00	16.36	8.02	8.02	8.50	24.28	24.28	29.07
12	18.02	18.02	19.33	6.52	6.52	7.41	16.43	16.43	25.60
13	20.73	20.73	22.26	4.20	4.20	6.32	10.88	10.88	20.27
14	22.98	22.98	24.79	2.86	2.86	4.95	8.32	8.32	16.07
15	24.62	24.62	26.60	2.23	2.23	4.73	7.26	7.26	15.21
16	25.75	25.75	27.72	2.09	2.09	3.76	7.17	7.17	15.00
17	26.38	26.38	28.12	1.81	1.81	3.67	8.11	8.11	15.29
18	25.82	25.82	27.52	1.55	1.55	3.52	11.87	11.87	18.33
19	24.04	24.04	25.78	1.82	1.82	4.77	16.71	16.71	24.27
20	21.66	21.66	25.61	2.93	2.93	4.32	21.06	21.06	24.93
21	19.63	19.63	23.08	3.93	3.93	3.90	24.30	24.30	30.40
22	18.18	18.18	21.72	4.74	4.74	4.10	26.44	26.44	33.40
23	17.18	17.18	20.32	6.05	6.05	4.38	26.88	26.88	36.00
lc	0.99	0.99		0.77	0.77		0.93	0.93	

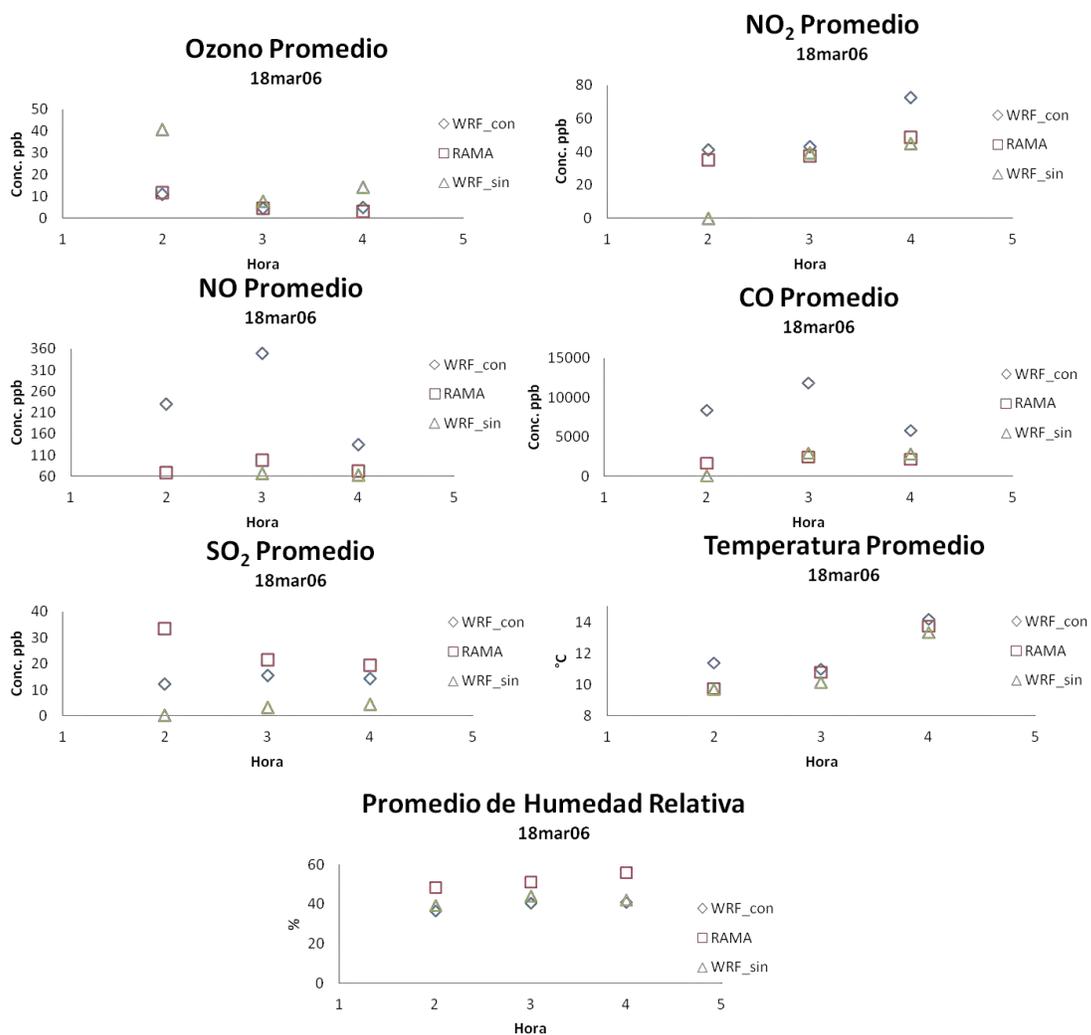
Hr	O ₃ ppm			NO ₂ ppm			NO ppm			CO ppm		
	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
0	15.55	15.56	17.28	36.01	35.99	47.88	25.72	25.73	20.00	1568.87	1568.41	1609.52
1	22.03	22.03	12.00	24.44	24.44	49.00	6.94	6.95	26.41	1406.16	1406.90	1476.19
2	24.95	24.95	5.59	17.51	17.51	48.00	1.55	1.55	56.24	1529.86	1530.03	2195.24
5	40.89	40.89	7.94	0.03	0.03	34.29	0.01	0.01	34.06	80.00	80.00	1290.48
6	20.86	20.86	7.28	24.51	24.51	33.47	19.80	19.80	44.47	2451.16	2451.16	1361.91
7	10.78	10.78	6.33	36.22	36.22	34.59	38.52	38.52	59.53	2345.10	2345.10	1614.29
8	5.20	87.37	4.67	43.86	43.86	34.53	123.63	123.63	96.24	5851.19	5851.19	2361.91
9	3.28	96.87	5.33	45.69	45.69	37.12	319.92	319.92	145.94	10764.39	10764.39	3323.81
10	7.27	100.07	10.56	63.64	63.64	59.00	206.64	206.64	117.76	7611.15	7611.15	3233.33
11	35.82	91.52	24.71	93.86	93.86	80.06	43.45	43.45	67.53	4212.78	4212.78	2823.81
12	87.37	92.07	51.33	63.58	63.58	78.18	13.23	13.23	33.18	2784.08	2784.08	2285.71
13	96.87	87.56	71.94	29.64	29.64	70.71	6.40	6.41	18.71	1609.52	1609.51	1761.91
14	100.06	74.37	86.94	17.06	17.06	49.18	3.59	3.58	10.82	1111.82	1111.81	1295.24
15	91.51	59.70	112.00	11.66	11.66	45.41	2.50	2.50	9.18	859.31	859.34	1285.71
16	92.07	5.20	125.11	9.35	9.35	42.29	2.13	2.13	7.00	759.52	759.53	1261.91
17	87.56	3.28	128.56	8.34	8.34	40.76	1.99	1.99	7.18	643.97	643.96	1238.10
18	74.37	7.27	98.56	7.57	7.57	35.06	1.92	1.92	9.88	534.60	534.60	1128.57
19	59.70	35.82	63.17	10.05	10.05	34.12	2.37	2.37	11.47	599.91	599.92	1019.05
20	39.72	39.71	50.11	23.27	23.27	32.47	5.05	5.05	10.29	1038.96	1038.99	1066.67
21	27.81	27.80	32.17	34.90	34.90	41.29	11.53	11.55	11.76	1629.24	1630.22	1295.24
22	21.13	21.14	23.50	39.07	39.06	55.18	16.31	16.31	14.88	1887.49	1886.65	1619.05
23	13.11	13.11	16.33	43.04	43.04	56.82	35.78	35.79	20.47	1748.05	1748.58	1947.62
Ic	0.89	0.89		0.68	0.68		0.91	0.91		0.89	0.89	



18 – MARZO – 2006

	Temperatura °C			SO ₂ ppb			RH %		
Hr	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
2	11.4	9.71	9.76	14.24	0.10	19.55	41.23	42.43	56.07
3	11	10.14	10.79	15.57	3.38	21.45	40.74	44.24	51.40
4	14.22	13.37	13.73	12.29	4.56	33.50	36.69	39.56	48.60
Ic	0.93	0.99		0.85	0.09		0.84	0.49	

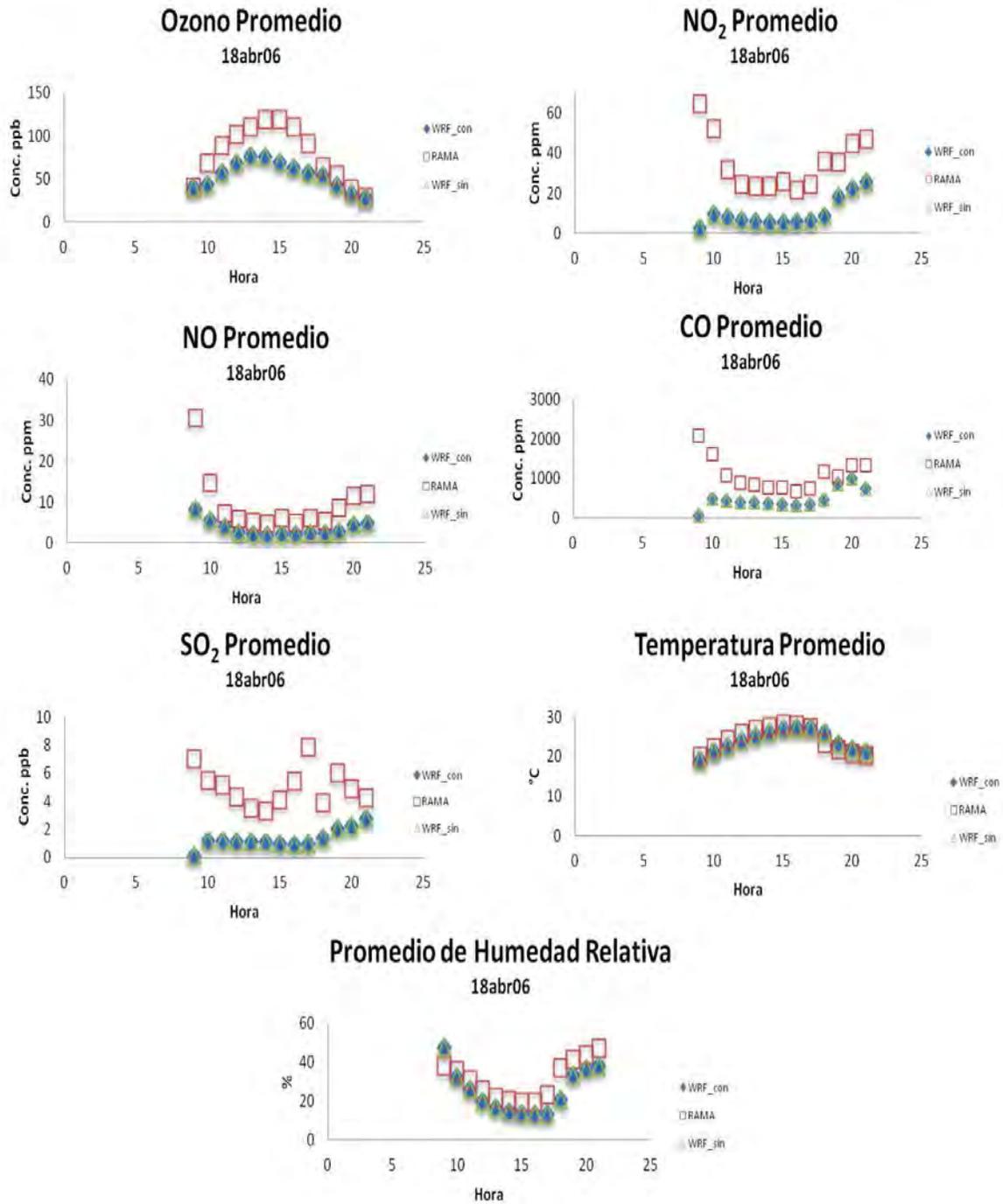
	O ₃ ppb			NO ₂ ppb			NO ppb			CO ppb		
Hr	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
2	5.06	40.89	3.29	41.14	0.03	35.00	229.46	0.01	67.82	8352.33	80.00	1645.00
3	4.65	7.70	4.71	43.10	39.40	37.59	349.66	67.02	98.47	11812.75	2993.24	2465.00
4	11.02	14.27	11.71	72.77	44.78	48.65	134.49	62.99	72.59	5808.47	2818.46	2180.00
Ic	0.98	0.47		0.99	0.73		0.82	0.66		0.42	0.96	



18 – ABRIL – 2006

Hr	Temperatura °C			SO ₂ ppm			RH %		
	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
9	18.99	18.99	19.89	0.10	0.10	6.95	47.63	47.63	38.29
10	21.24	21.24	22.06	1.18	1.18	5.47	32.47	32.47	35.50
11	22.64	22.64	24.18	1.15	1.15	5.11	26.20	26.20	31.14
12	24.00	24.00	25.73	1.10	1.10	4.26	20.14	20.14	25.57
13	25.15	25.15	26.87	1.11	1.11	3.48	16.82	16.82	22.07
14	26.16	26.16	27.58	1.08	1.08	3.32	14.83	14.83	20.43
15	26.94	26.94	28.12	0.99	0.99	4.09	13.55	13.55	19.29
16	27.26	27.26	27.94	0.92	0.92	5.41	13.12	13.12	19.57
17	27.20	27.20	27.15	0.99	0.99	7.82	13.42	13.42	23.07
18	26.04	26.04	23.27	1.36	1.36	3.90	21.01	21.01	37.21
19	23.32	23.33	21.57	2.01	2.01	6.00	33.19	33.18	41.29
20	21.93	21.93	20.63	2.22	2.23	4.86	36.61	36.61	43.71
21	21.09	21.09	20.24	2.74	2.74	4.19	38.16	38.16	47.14
lc	0.88	0.88		0.28	0.28		0.87	0.87	

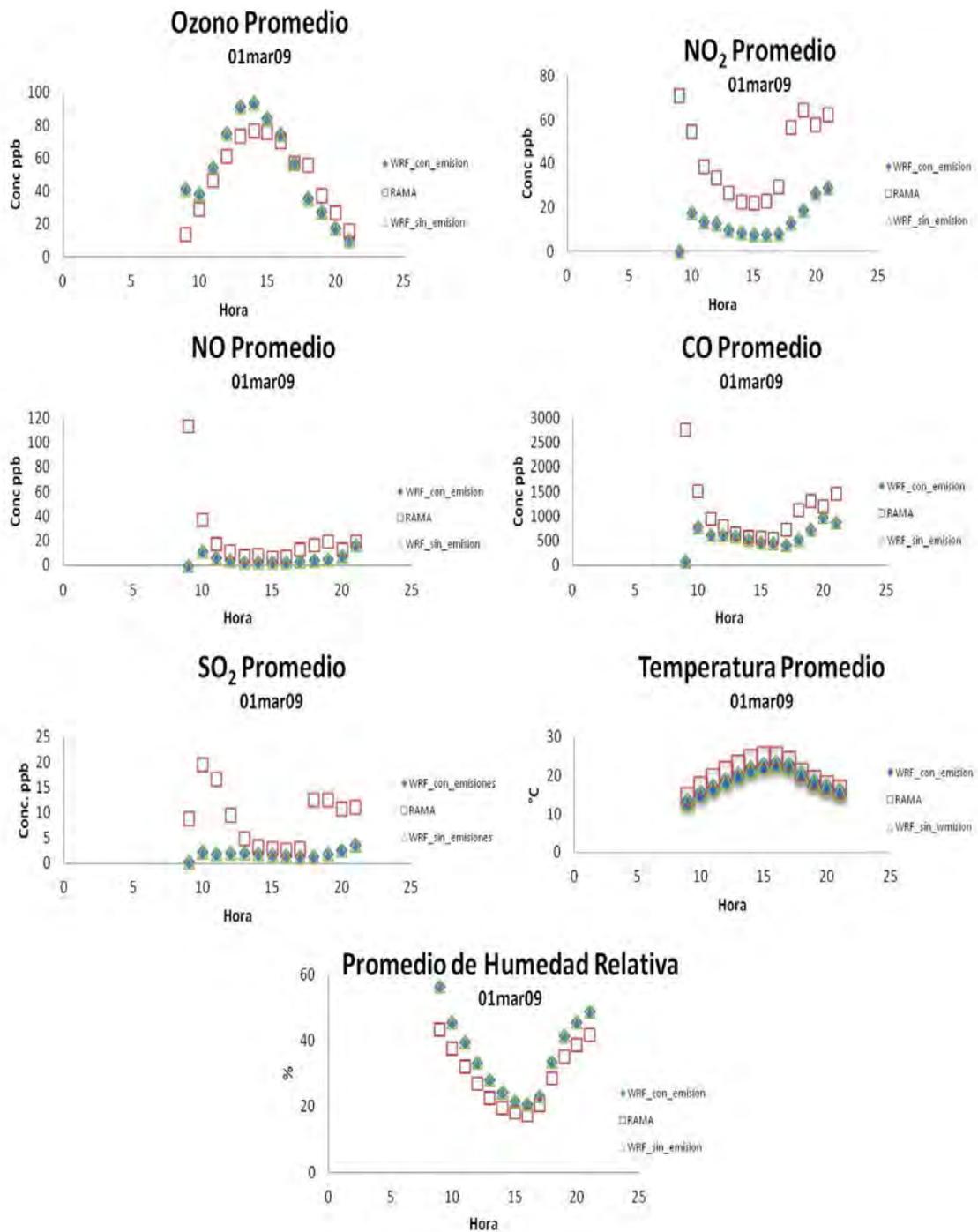
Hr	O ₃ ppm			NO ₂ ppm			NO ppm			CO ppm		
	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
9	40.90	40.90	40.61	2.52	2.52	64.53	8.41	8.41	30.76	80.00	80.00	2095.00
10	43.88	43.88	68.19	9.42	9.42	52.06	5.79	5.79	14.69	484.90	484.90	1615.79
11	57.42	57.42	89.40	8.29	8.29	31.87	4.00	4.00	7.33	446.66	446.66	1083.33
12	69.03	69.03	101.86	6.63	6.64	24.20	2.75	2.76	5.93	397.65	397.41	888.89
13	77.23	77.22	110.50	5.96	5.96	23.65	2.21	2.23	5.35	401.31	401.53	855.00
14	76.36	76.35	119.59	5.36	5.36	23.59	2.12	2.04	4.76	377.08	376.97	785.71
15	69.63	69.64	119.24	5.52	5.52	25.78	2.29	2.28	6.11	350.53	350.53	785.71
16	62.94	62.95	110.76	5.70	5.70	21.50	2.36	2.37	4.94	340.65	340.62	695.24
17	57.52	57.52	91.41	6.49	6.49	24.56	2.52	2.52	6.06	361.25	361.23	761.90
18	54.70	54.70	64.82	8.84	8.84	35.94	2.52	2.51	5.50	466.80	466.76	1180.00
19	43.17	43.17	54.94	18.39	18.40	35.61	2.97	2.97	8.72	864.12	864.12	1070.00
20	33.45	33.45	38.82	22.66	22.66	44.67	4.57	4.57	11.50	1007.88	1007.87	1330.00
21	28.89	28.92	28.47	25.83	25.77	46.83	5.11	5.07	12.06	753.83	751.71	1338.10
lc	0.96	0.96		0.31	0.31		0.96	0.96		0.01	0.01	



01 – MARZO – 2009

Hr	Temperatura °C			SO ₂ ppm			RH %		
	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
21	15.76	15.76	16.45	3.58	3.58	11.05	48.66	48.66	41.75
20	16.93	16.93	17.56	2.59	2.59	10.71	45.45	45.45	38.75
19	18.10	18.10	19.02	1.87	1.87	12.52	41.32	41.32	35.06
18	20.18	20.18	20.89	1.32	1.32	12.57	33.52	33.52	28.50
17	22.58	22.58	24.00	1.19	1.19	2.84	23.25	23.25	20.50
16	23.06	23.06	25.07	1.39	1.39	2.47	20.75	20.75	17.44
15	22.62	22.62	25.05	1.58	1.58	2.79	21.47	21.47	18.13
14	21.50	21.50	24.31	1.83	1.83	3.16	24.16	24.16	19.69
13	20.03	20.03	23.11	1.92	1.92	4.78	28.00	28.00	22.50
12	18.45	18.45	21.44	2.04	2.04	9.50	33.30	33.30	26.94
11	16.84	16.84	19.53	1.88	1.88	16.61	39.45	39.45	32.13
10	15.23	15.23	17.29	2.18	2.18	19.55	45.55	45.55	37.69
9	13.09	13.09	14.48	0.10	0.10	8.68	56.54	56.54	43.19
lc	0.97	0.97		0.30	0.30		0.99	0.99	

Hr	O ₃ ppm			NO ₂ ppm			NO ppm			CO ppm		
	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
21	10.25	10.25	15.50	28.89	28.89	62.38	16.85	16.85	19.85	880.71	880.71	1468.24
20	17.39	17.39	26.53	26.75	26.75	57.92	8.15	8.15	12.77	983.04	983.04	1208.24
19	27.42	27.42	37.06	18.77	18.77	64.31	4.58	4.58	19.38	736.00	736.00	1322.94
18	35.22	35.22	56.00	13.22	13.22	56.69	4.27	4.27	16.54	524.07	524.07	1137.65
17	56.56	56.56	56.94	8.31	8.31	29.57	3.14	3.14	13.00	422.49	422.49	736.47
16	74.44	74.44	70.22	7.88	7.88	22.79	2.68	2.68	7.21	449.90	449.90	548.82
15	84.18	84.18	75.33	7.86	7.86	22.14	2.55	2.55	6.50	472.10	472.10	565.88
14	93.40	93.40	76.76	8.31	8.31	22.57	2.57	2.57	8.86	526.86	526.86	578.75
13	91.30	91.30	73.31	9.76	9.76	26.58	2.82	2.82	8.08	592.19	592.19	658.00
12	75.14	75.14	61.06	12.59	12.59	33.46	4.32	4.32	11.54	621.97	621.97	800.67
11	53.88	53.88	46.25	13.47	13.47	38.69	6.29	6.29	17.54	614.01	614.01	954.00
10	38.00	38.00	29.00	17.55	17.55	54.38	11.38	11.38	37.00	776.84	776.84	1509.38
9	40.91	40.91	13.53	0.03	0.03	71.00	0.01	0.01	113.54	80.00	80.00	2758.00
lc	0.88	0.88		0.43	0.43		0.16	0.16		0.22	0.22	

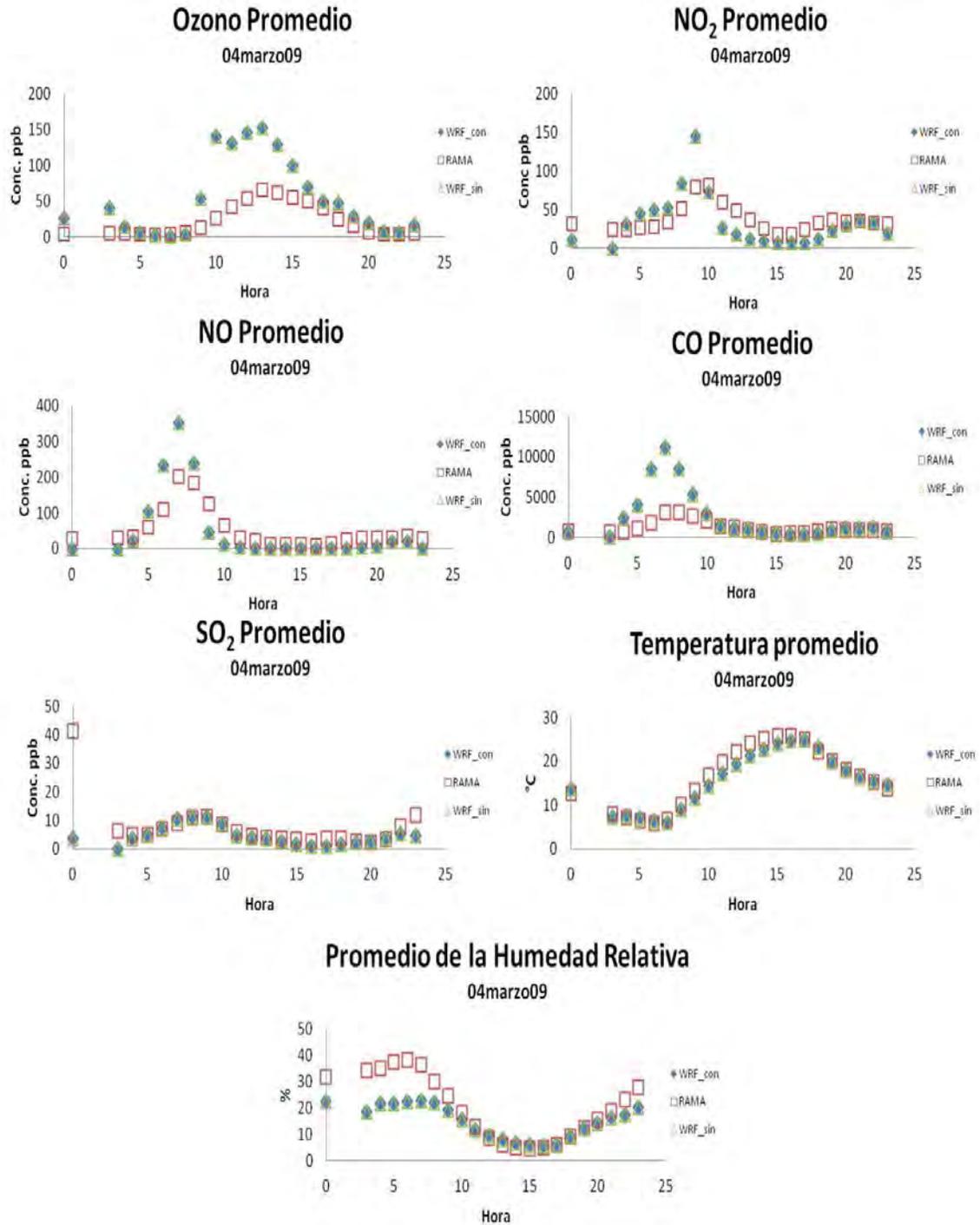


04 – MARZO – 2009

Hr	Temperatura °C			SO ₂ ppm			RH %		
	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
0	13.81	13.81	12.56	3.65	3.65	41.00	22.43	22.43	31.94
3	7.32	7.32	8.01	0.10	0.10	6.19	18.43	18.43	34.31
4	7.57	7.57	7.17	3.42	3.42	4.86	21.65	21.65	35.06
5	7.15	7.15	6.42	4.98	4.98	5.05	21.69	21.69	37.63
6	6.49	6.49	5.77	7.33	7.33	6.76	22.60	22.60	38.13
7	6.03	6.03	6.64	10.34	10.34	8.90	22.81	22.81	36.31
8	9.01	9.01	10.08	11.25	11.25	10.71	22.29	22.29	29.88
9	11.68	11.68	13.38	11.19	11.19	11.20	19.26	19.26	24.56
10	14.45	14.45	16.73	8.95	8.95	8.58	15.56	15.56	18.31
11	17.21	17.21	19.72	4.70	4.70	6.00	11.76	11.76	12.75
12	19.36	19.36	22.14	4.02	4.01	4.65	9.61	9.61	8.69
13	21.19	21.19	23.93	3.42	3.42	4.05	8.05	8.05	6.00
14	22.77	22.77	25.09	2.50	2.50	3.47	6.89	6.89	4.88
15	23.97	23.97	25.79	1.54	1.54	3.14	6.17	6.17	4.81
16	24.77	24.77	25.81	1.01	1.01	2.58	5.80	5.80	5.06
17	24.89	24.89	24.94	0.93	0.93	3.67	5.99	5.99	6.19
18	23.14	23.14	22.06	1.43	1.43	3.58	9.35	9.35	9.40
19	19.90	19.90	19.94	2.23	2.23	2.63	12.42	12.42	12.67
20	18.11	18.11	18.08	2.69	2.69	2.32	14.41	14.41	15.75
21	16.49	16.49	16.62	3.61	3.61	3.40	16.29	16.29	18.94
22	15.47	15.47	15.15	5.13	5.13	7.71	17.67	17.67	23.19
23	14.56	14.56	13.80	4.63	4.63	11.76	20.35	20.35	28.06
lc	0.98	0.98		0.23	0.23		0.97	0.97	

Hr	O ₃ ppm			NO ₂ ppm			NO ppm			CO ppm		
	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
0	25.84	25.84	4.33	10.50	10.51	31.00	0.43	0.43	28.14	624.81	624.79	730.00
3	40.92	40.92	5.29	0.03	0.03	23.86	0.01	0.01	32.07	80.00	80.00	604.71
4	13.93	13.93	4.94	31.58	31.58	24.07	22.52	22.52	33.79	2308.98	2308.98	664.12
5	5.88	5.88	4.18	44.86	44.86	26.57	105.87	105.87	60.64	4017.32	4017.32	1071.77
6	2.12	2.12	2.88	50.16	50.16	28.29	235.47	235.47	111.21	8506.86	8506.86	1790.59
7	1.10	1.10	3.59	51.95	51.95	33.36	353.04	353.06	203.79	11135.98	11135.84	3107.06
8	4.21	4.21	6.53	84.06	84.07	51.21	240.10	240.12	183.36	8415.20	8415.76	3070.59
9	53.54	53.54	13.00	145.55	145.56	79.46	46.98	46.98	126.00	5250.11	5250.43	2635.00
10	141.01	141.00	26.20	73.54	73.54	81.23	12.55	12.55	65.15	2994.67	2994.70	1988.75
11	131.95	131.95	41.73	26.09	26.09	59.00	5.38	5.38	32.15	1426.88	1426.94	1363.75

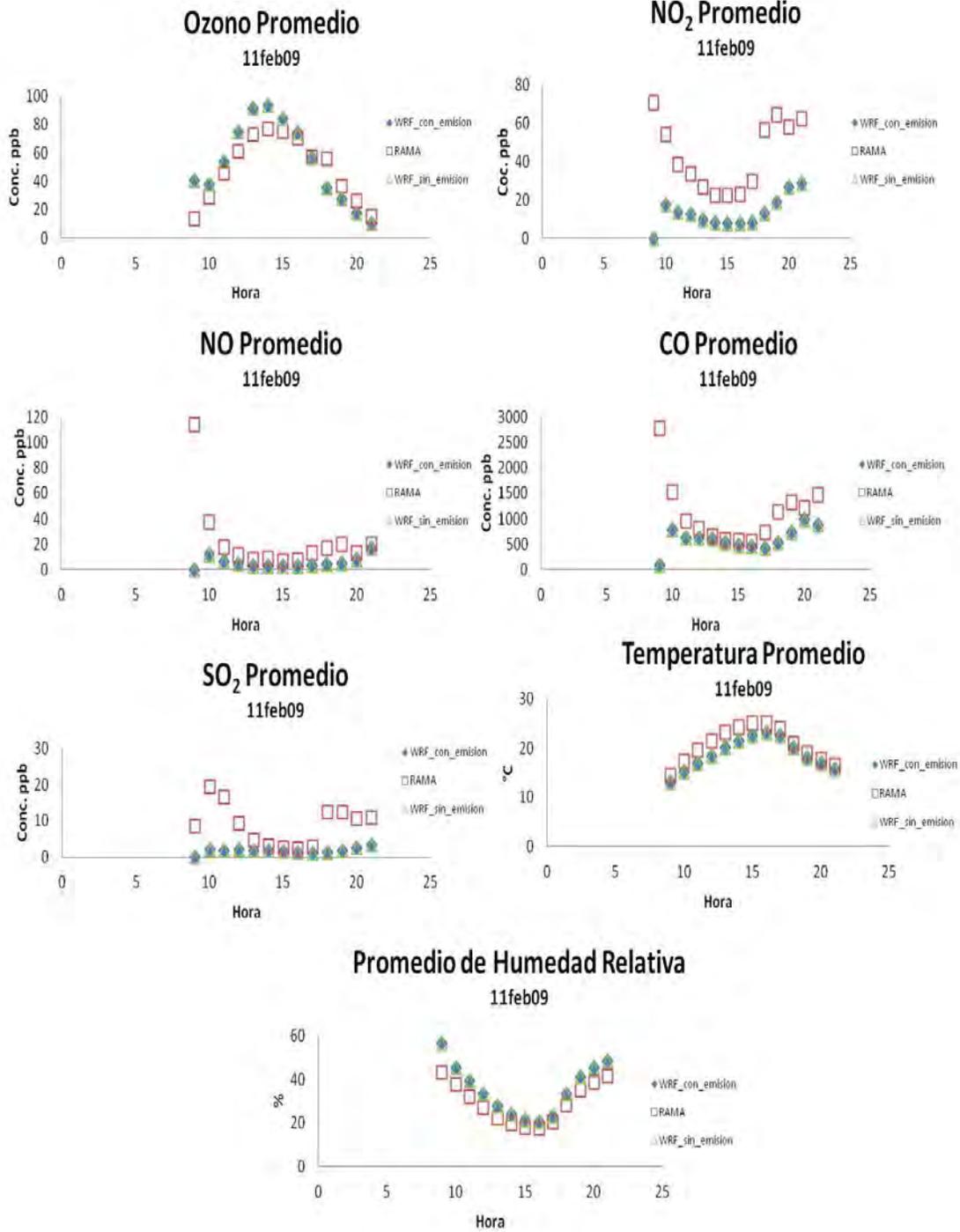
12	146.28	146.28	54.00	17.31	17.31	49.00	3.25	3.25	22.23	1124.07	1124.09	1176.88
13	152.16	152.16	65.29	12.18	12.18	36.67	2.09	2.09	13.42	948.29	948.26	848.75
14	128.77	128.76	61.73	9.26	9.27	25.08	1.91	1.91	11.83	691.16	691.16	629.38
15	100.07	100.07	55.50	7.10	7.11	17.79	2.21	2.21	11.43	467.07	467.12	429.41
16	69.16	69.15	50.19	6.91	6.91	17.79	2.72	2.72	10.93	383.34	383.33	448.24
17	50.15	50.15	40.93	6.82	6.82	23.71	2.96	2.96	14.21	370.98	370.97	535.88
18	47.83	47.82	24.88	11.57	11.57	33.08	3.02	3.02	25.67	526.77	526.73	776.25
19	28.97	28.97	14.94	23.00	23.00	36.83	4.58	4.58	32.42	897.89	897.58	901.25
20	18.99	18.97	6.50	30.27	30.28	33.38	7.69	7.71	31.31	1085.09	1085.79	891.88
21	8.27	8.26	4.27	35.71	35.71	34.54	20.27	20.27	31.92	1012.68	1012.77	863.13
22	6.96	6.96	4.25	34.41	34.41	32.43	20.52	20.51	35.64	1172.92	1172.88	843.53
23	17.41	17.40	4.63	19.73	19.73	31.29	1.40	1.40	28.57	741.43	741.45	757.65
lc	0.87	0.87		0.74	0.74		0.91	0.91		0.89	0.89	



11 – FEBRERO – 2009

Hr	Temperatura °C			SO ₂ ppm			RH %		
	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
9	13.09	13.09	14.48	0.10	0.10	8.68	56.54	56.54	43.19
10	15.23	15.23	17.29	2.18	2.18	19.55	45.55	45.55	37.69
11	16.84	16.84	19.53	1.88	1.88	16.61	39.45	39.45	32.13
12	18.45	18.45	21.44	2.04	2.04	9.50	33.30	33.30	26.94
13	20.03	20.03	23.11	1.92	1.92	4.78	28.00	28.00	22.50
14	21.50	21.50	24.31	1.83	1.83	3.16	24.16	24.16	19.69
15	22.62	22.62	25.05	1.58	1.58	2.79	21.47	21.47	18.13
16	23.06	23.06	25.07	1.39	1.39	2.47	20.75	20.75	17.44
17	22.58	22.58	24.00	1.19	1.19	2.84	23.25	23.25	20.50
18	20.18	20.18	20.89	1.32	1.32	12.57	33.52	33.52	28.50
19	18.10	18.10	19.02	1.87	1.87	12.52	41.32	41.32	35.06
20	16.93	16.93	17.56	2.59	2.59	10.71	45.45	45.45	38.75
21	15.76	15.76	16.45	3.58	3.58	11.05	48.66	48.66	41.75
	0.97	0.97		0.30	0.30		0.99	0.99	

Hr	O ₃ ppm			NO ₂ ppm			NO ppm			CO ppm		
	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA	WRF_con	WRF_sin	RAMA
9	40.91	40.91	13.53	0.03	0.03	71.00	0.01	0.01	113.54	80.00	80.00	2758.00
10	38.00	38.00	29.00	17.55	17.55	54.38	11.38	11.38	37.00	776.84	776.84	1509.38
11	53.88	53.88	46.25	13.47	13.47	38.69	6.29	6.29	17.54	614.01	614.01	954.00
12	75.14	75.14	61.06	12.59	12.59	33.46	4.32	4.32	11.54	621.97	621.97	800.67
13	91.30	91.30	73.31	9.76	9.76	26.58	2.82	2.82	8.08	592.19	592.19	658.00
14	93.40	93.40	76.76	8.31	8.31	22.57	2.57	2.57	8.86	526.86	526.86	578.75
15	84.18	84.18	75.33	7.86	7.86	22.14	2.55	2.55	6.50	472.10	472.10	565.88
16	74.44	74.44	70.22	7.88	7.88	22.79	2.68	2.68	7.21	449.90	449.90	548.82
17	56.56	56.56	56.94	8.31	8.31	29.57	3.14	3.14	13.00	422.49	422.49	736.47
18	35.22	35.22	56.00	13.22	13.22	56.69	4.27	4.27	16.54	524.07	524.07	1137.65
19	27.42	27.42	37.06	18.77	18.77	64.31	4.58	4.58	19.38	736.00	736.00	1322.94
20	17.39	17.39	26.53	26.75	26.75	57.92	8.15	8.15	12.77	983.04	983.04	1208.24
21	10.25	10.25	15.50	28.89	28.89	62.38	16.85	16.85	19.85	880.71	880.71	1468.24
	0.88	0.88		0.43	0.43		0.17	0.17		0.22	0.22	



ANEXO III

Imágenes de los escenarios modelados, con las representaciones de máxima concentración durante los incendios.

11 – MARZO – 2006

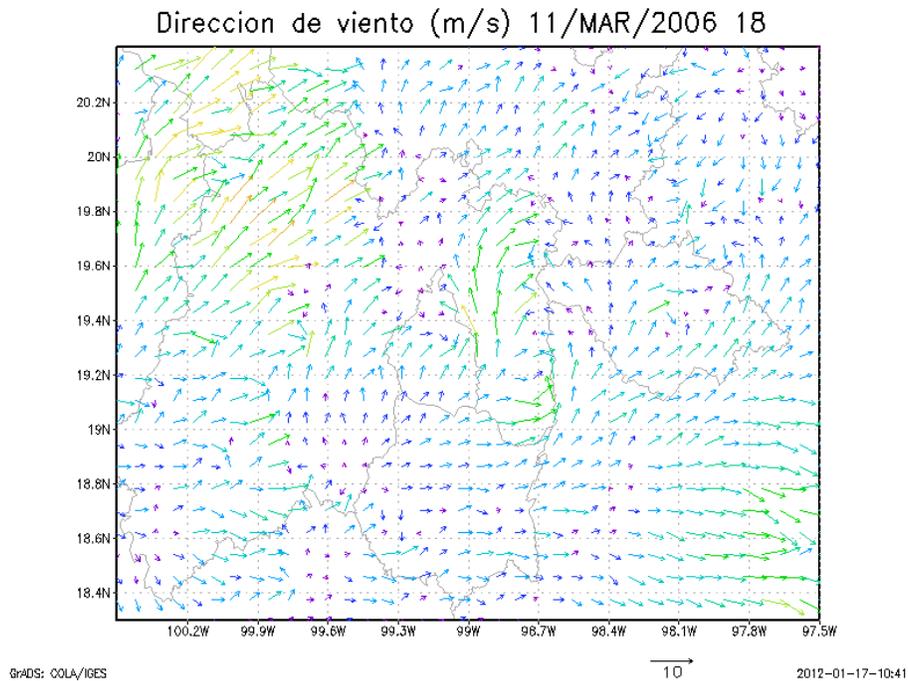


Figura 42. Dirección del viento predominante sureste a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.

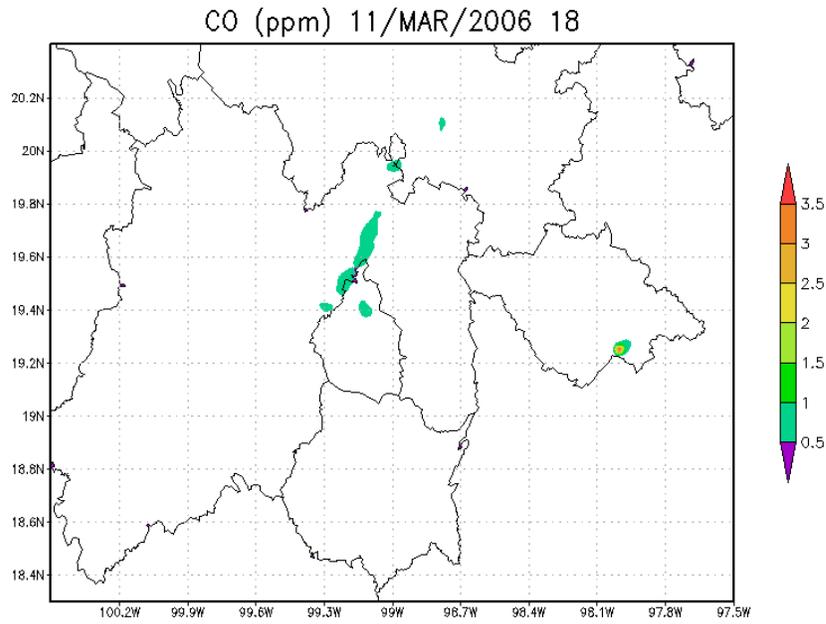


Figura 43. Concentración máxima de CO 3.5 ppm durante el incendio.

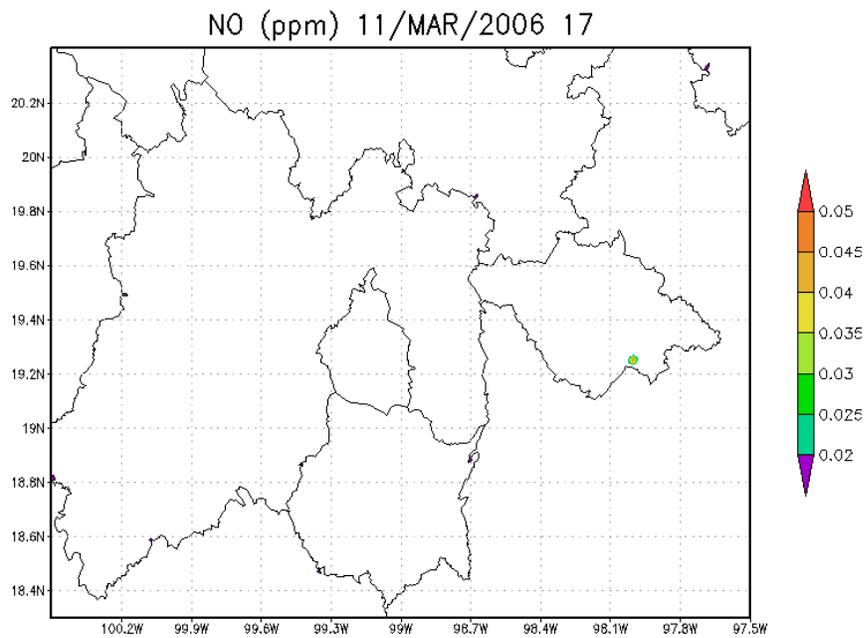
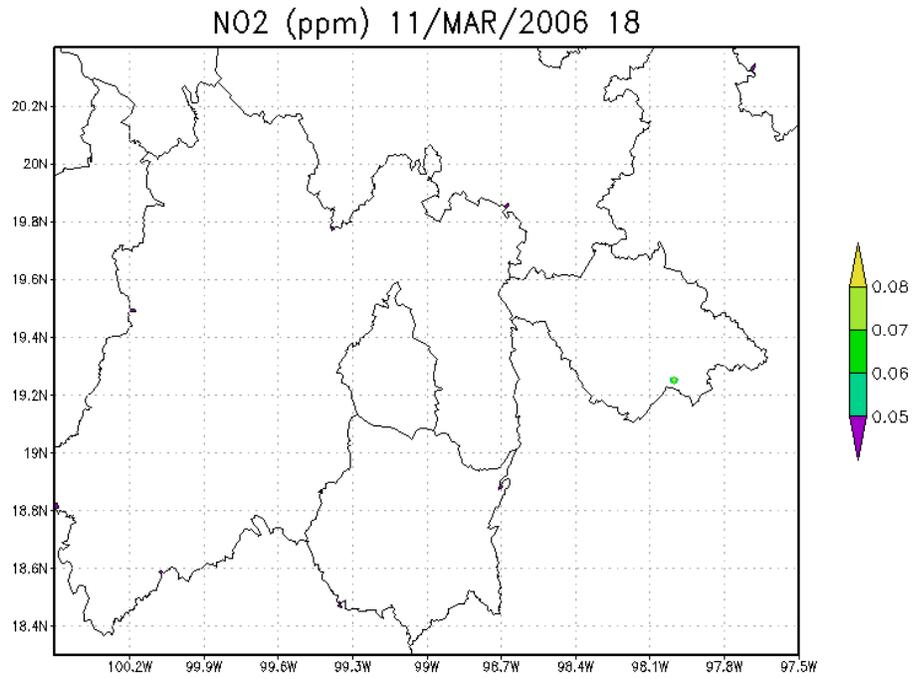
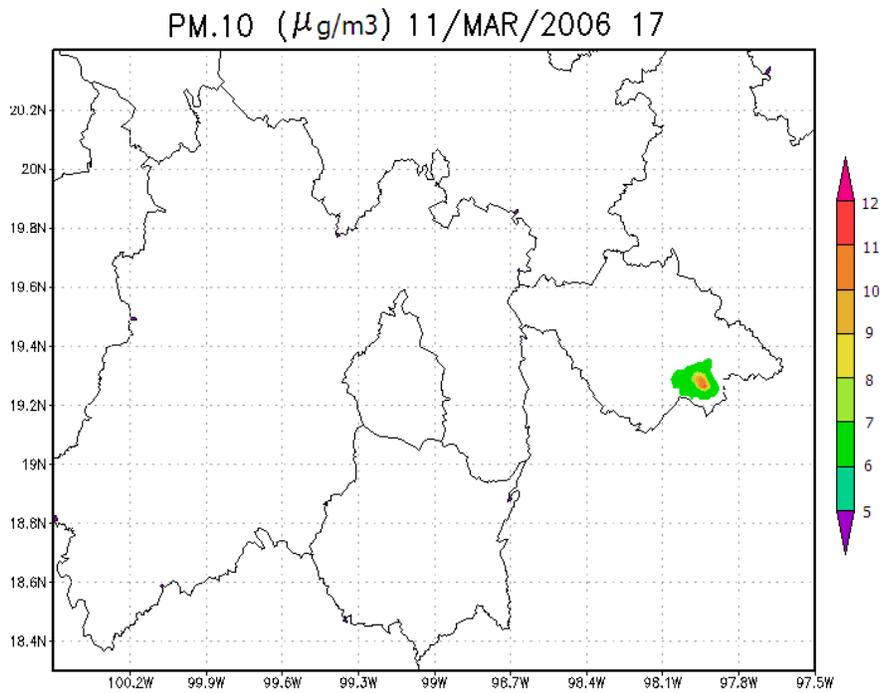


Figura 44. Concentración máxima de NO 0.05 ppm durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

Figura 45. Concentración máxima de NO₂ 0.08 ppm durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

Figura 46. Concentración máxima de PM₁₀ 12 µg/m³ durante el incendio.

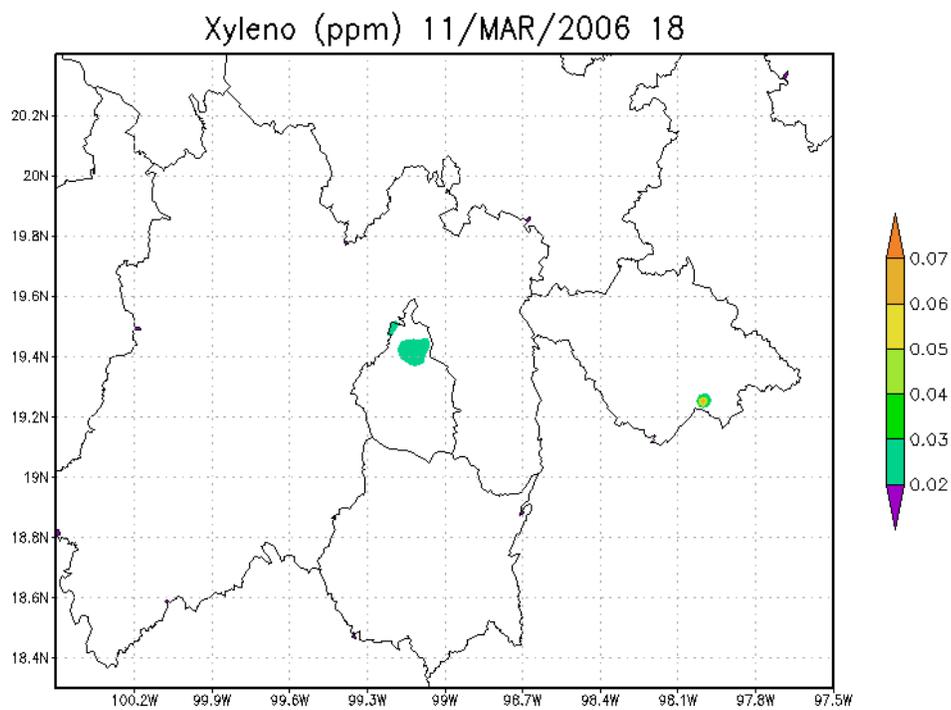


Figura 47. Concentración máxima de Xyleno 0.07 ppm durante el incendio.

18 – MARZO – 2006

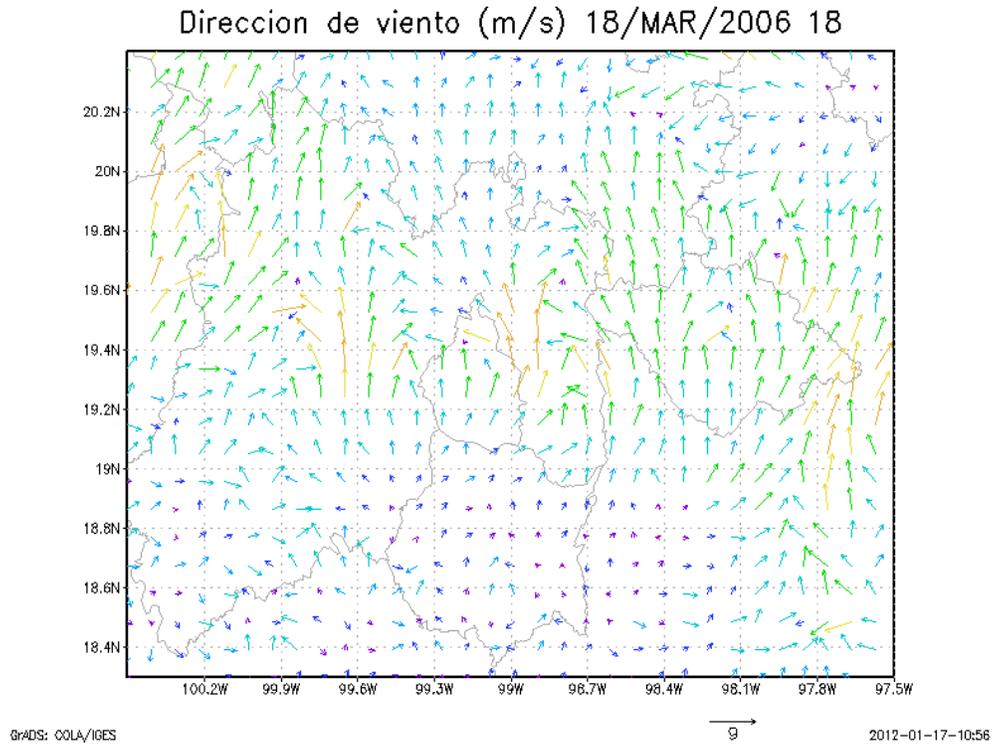


Figura 48. Dirección del viento (sur-norte) predominante a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.

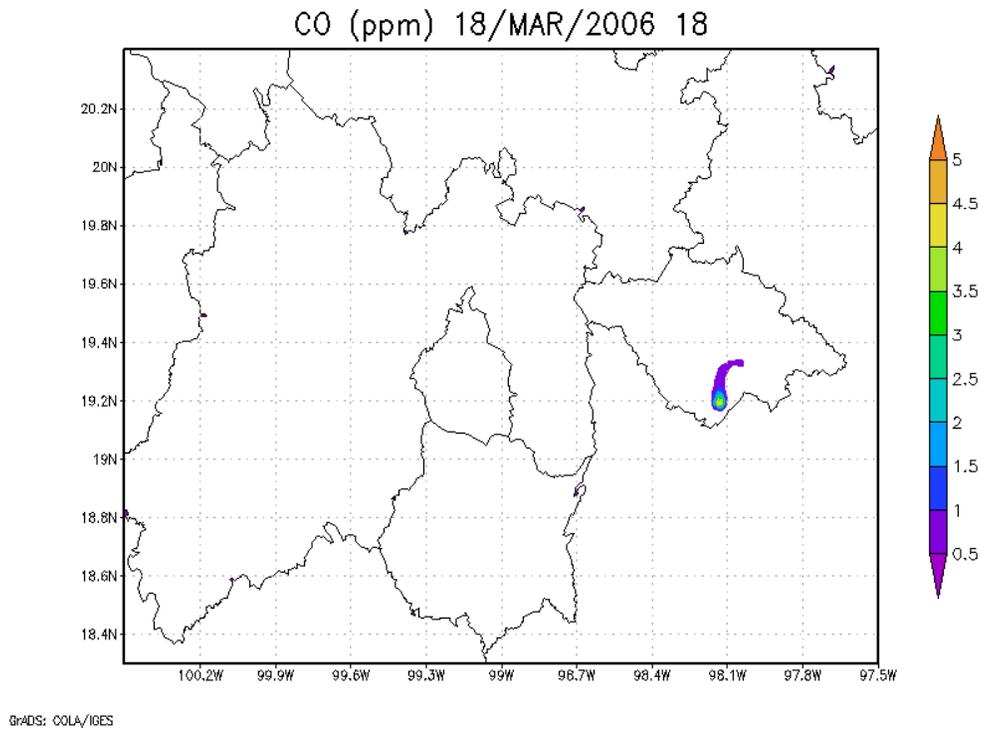
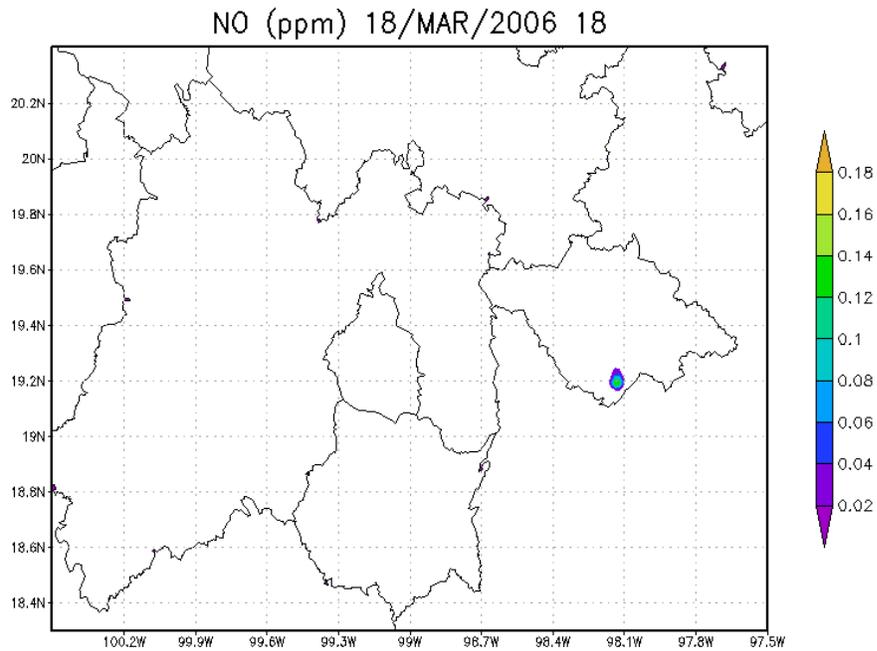
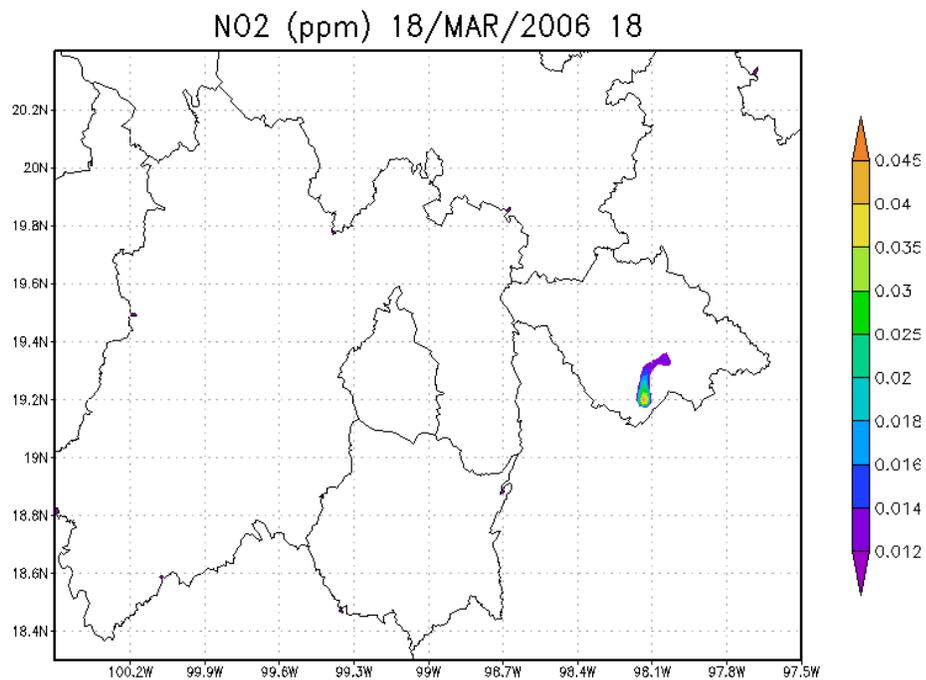


Figura 49. Concentración máxima de CO 5 ppm durante el incendio.



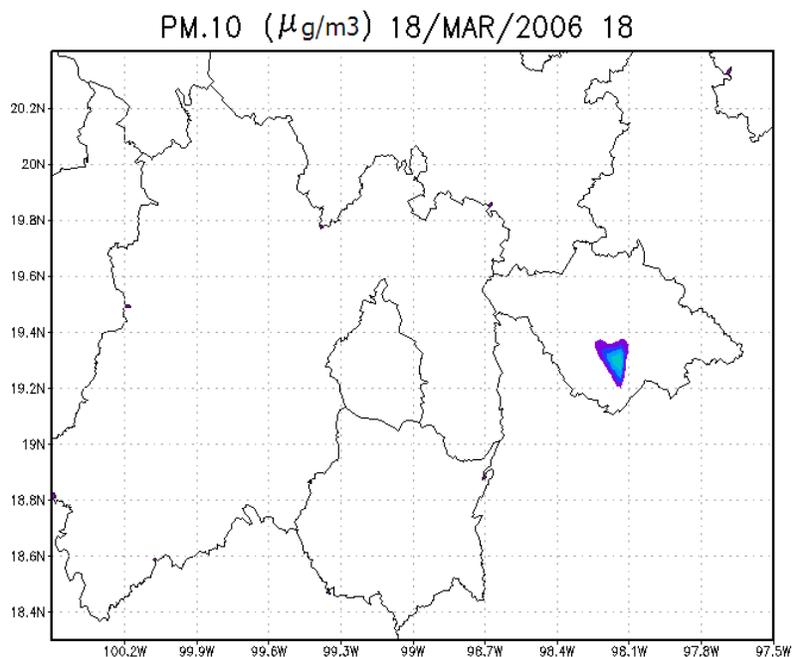
GrADS: COLA/IGES

Figura 50. Concentración máxima de NO 0.18 ppm durante el incendio.



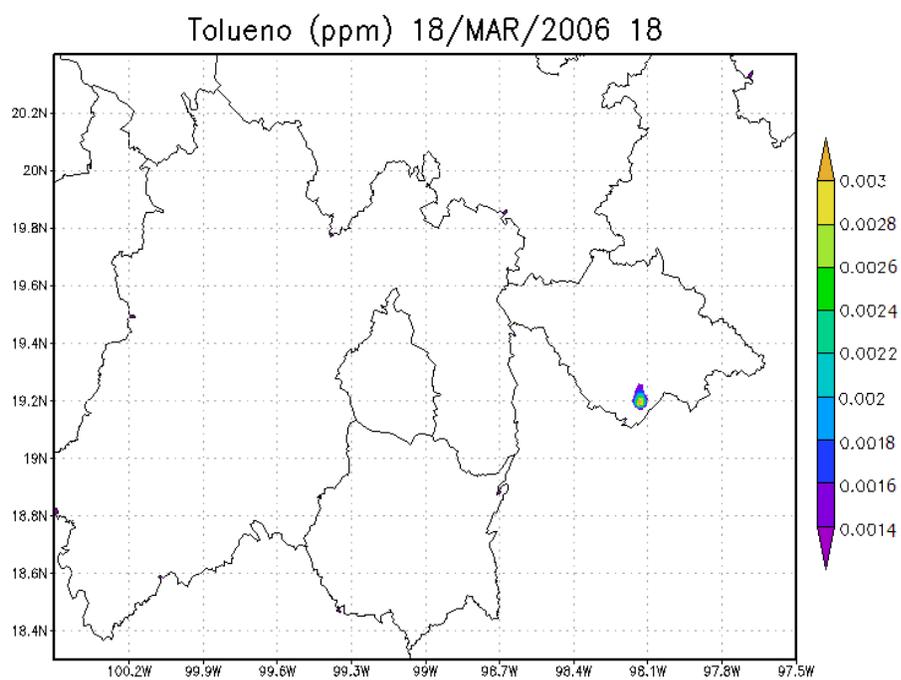
GrADS: COLA/IGES

Figura 51. Concentración máxima de NO₂ 0.045 ppm durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

Figura 52. Concentración máxima de PM_{10} de $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

Figura 53. Concentración máxima de Tolueno 0.003 ppm durante el incendio.

18 – ABRIL – 2006

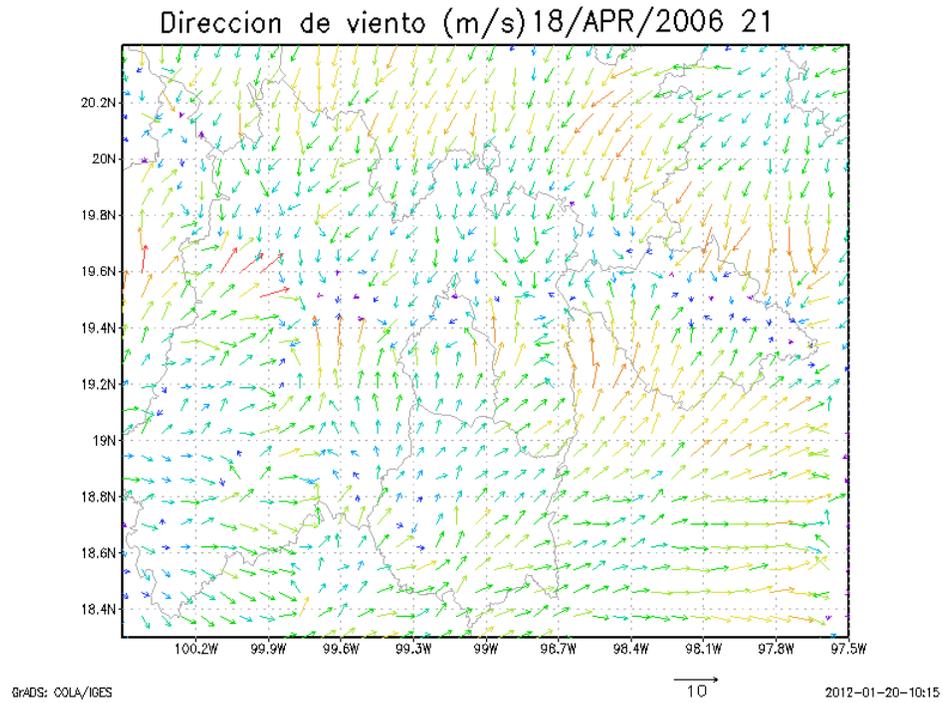


Figura 54. Dirección del viento (sur-norte) predominante a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.

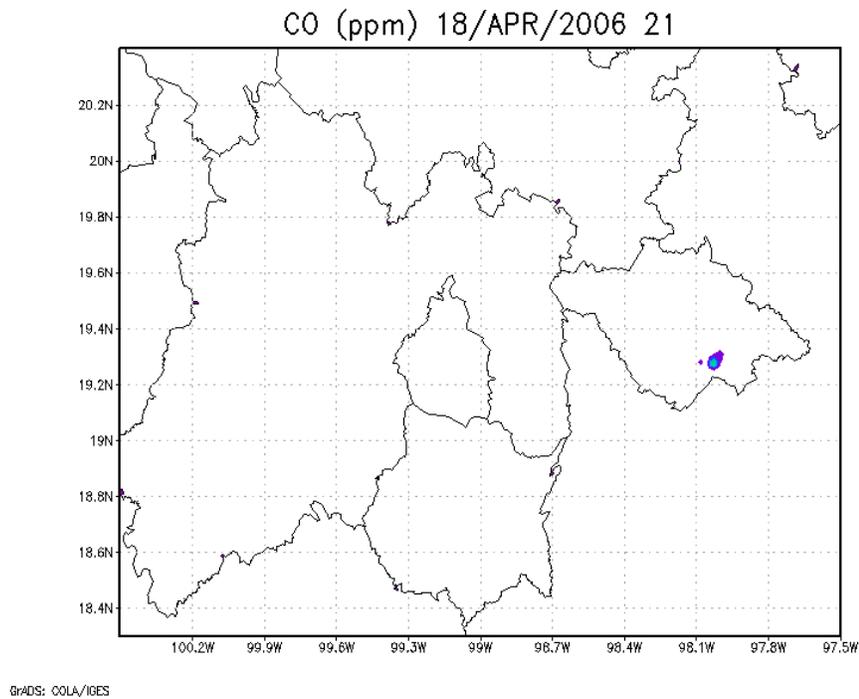


Figura 55. Concentración máxima de CO 30 ppm durante el incendio.

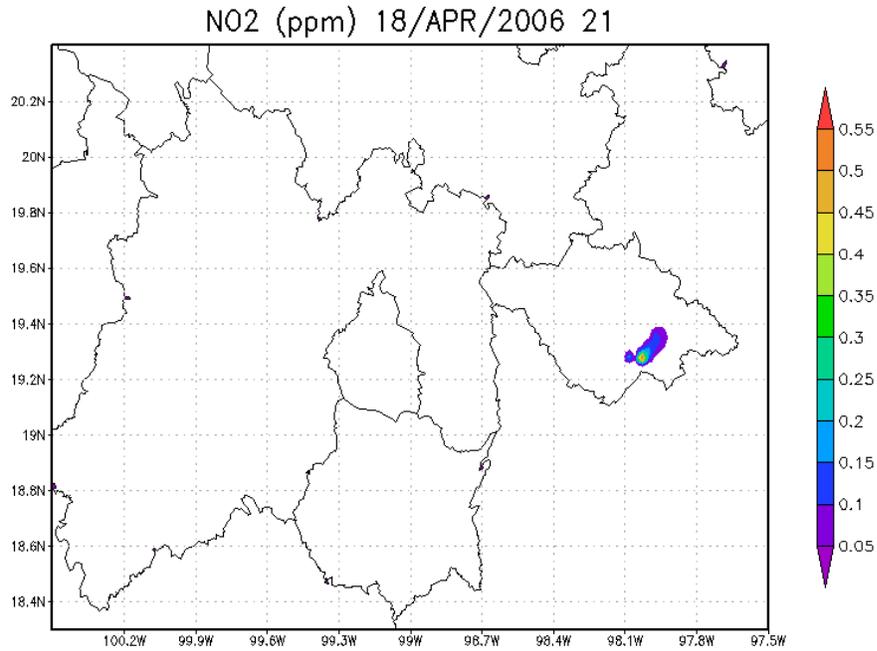


Figura 56. Concentración máxima de NO₂ 0.55 ppm durante el incendio.

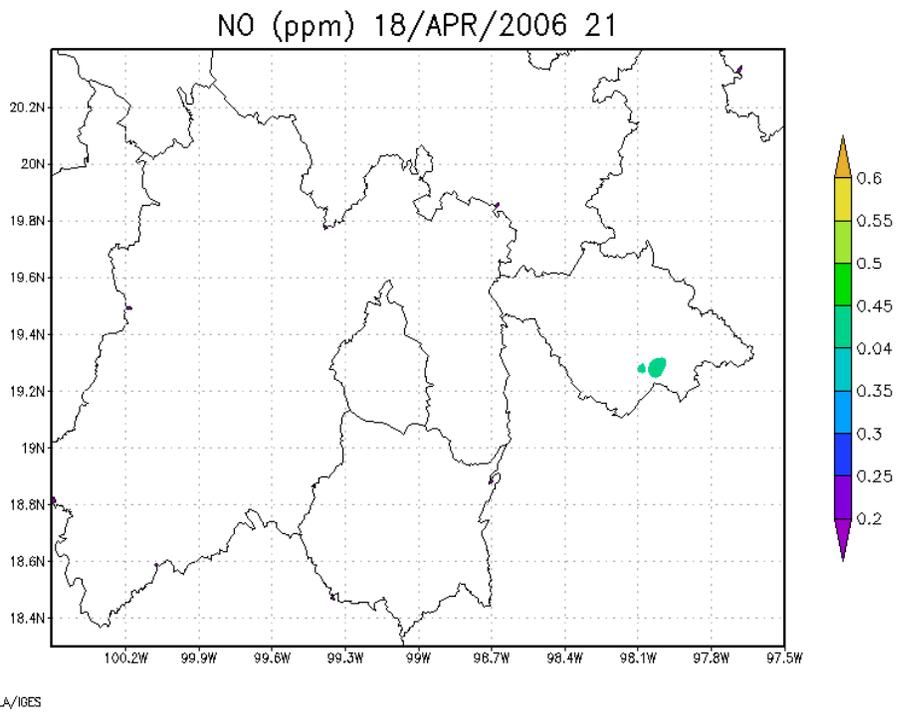
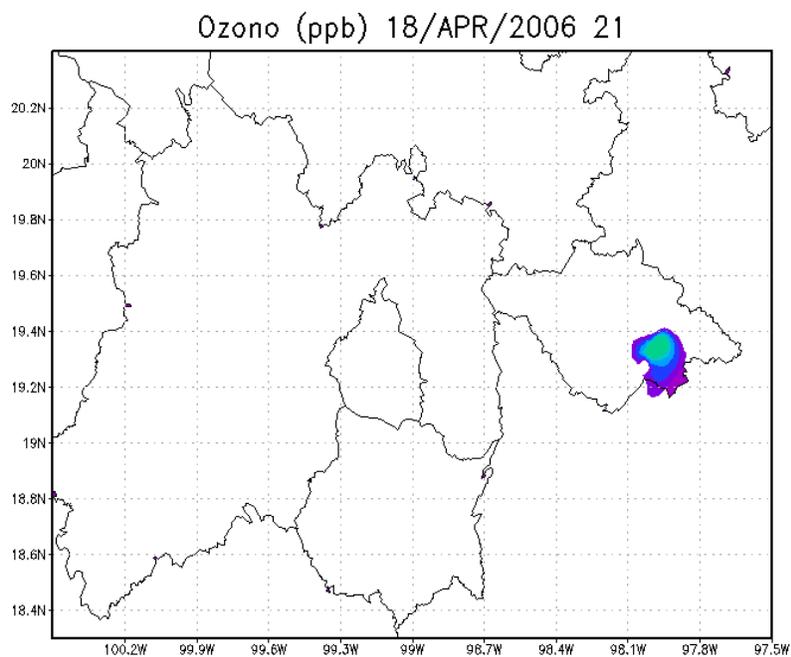
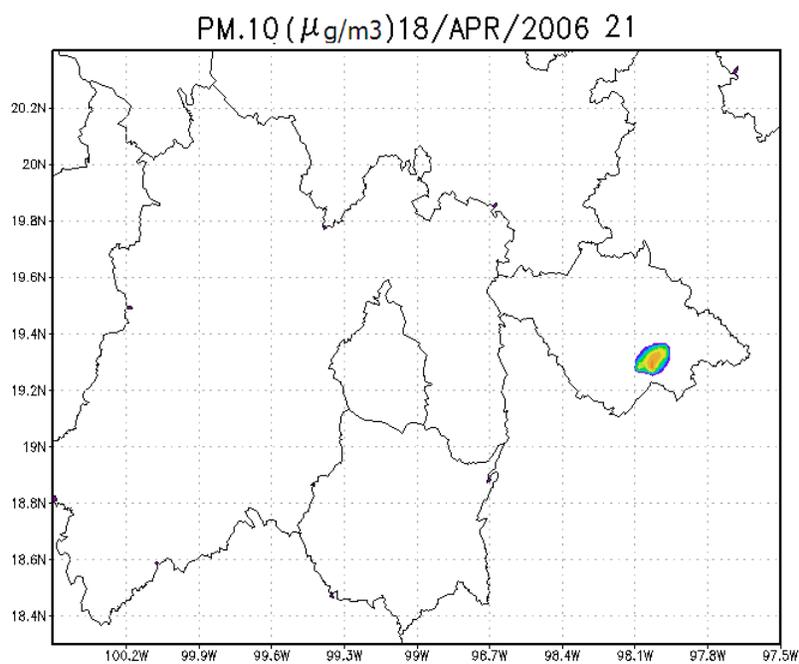


Figura 57. Concentración máxima de NO 0.6 ppm durante el incendio.



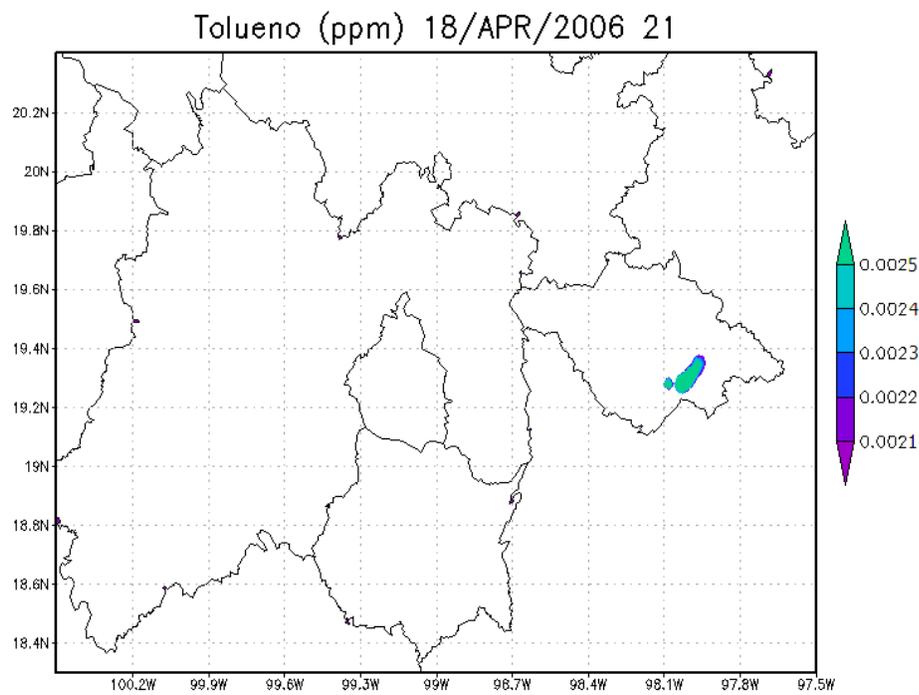
GrADS: COLA/IGES

Figura 58. Concentración máxima de O₃ 30 ppb durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

Figura 59. Concentración máxima de PM₁₀ 16 µg/m³ durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

Figura 60. Concentración máxima de Tolueno 0.0025 ppm durante el incendio.

01 – MARZO – 2009

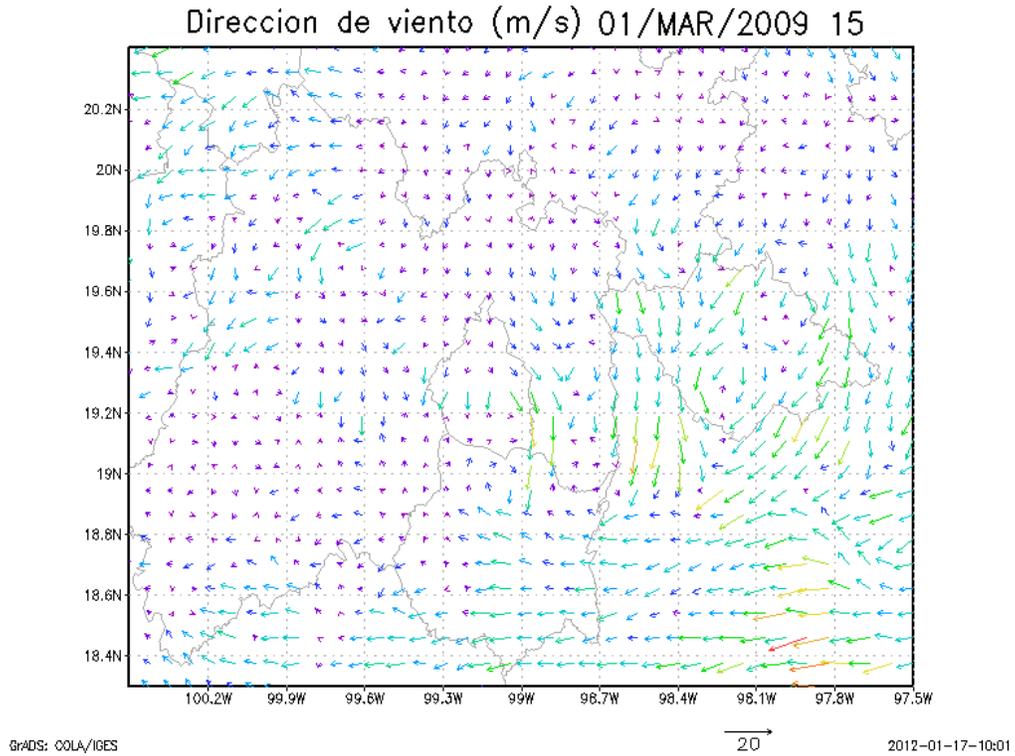


Figura 61. Dirección del viento (norte-sur) predominante a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.

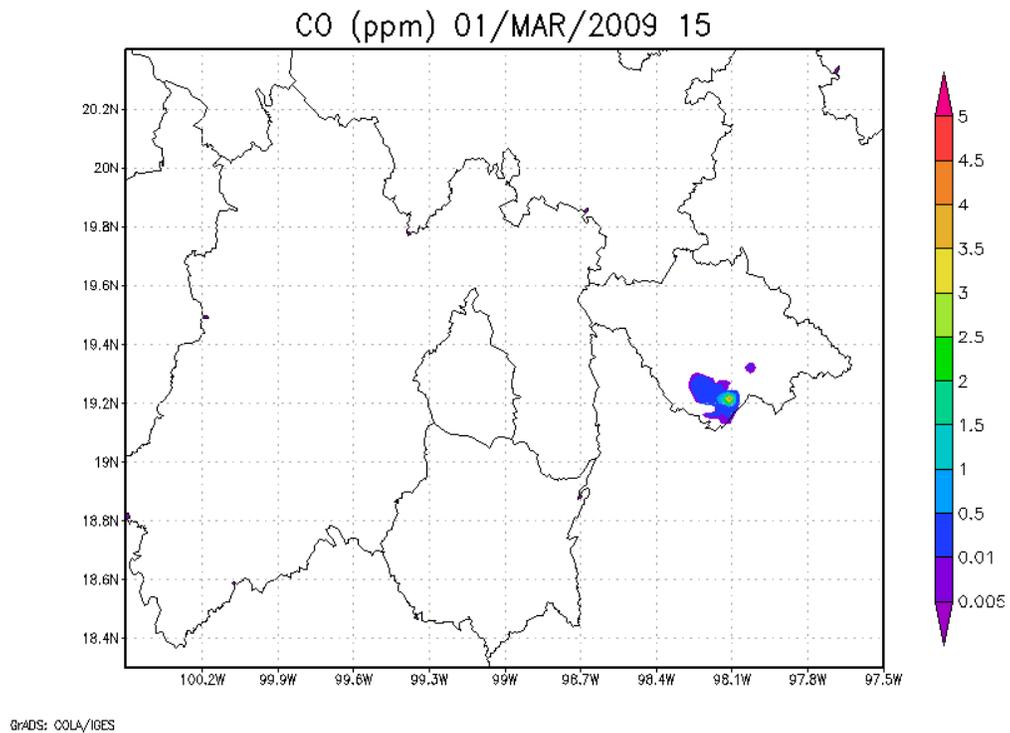
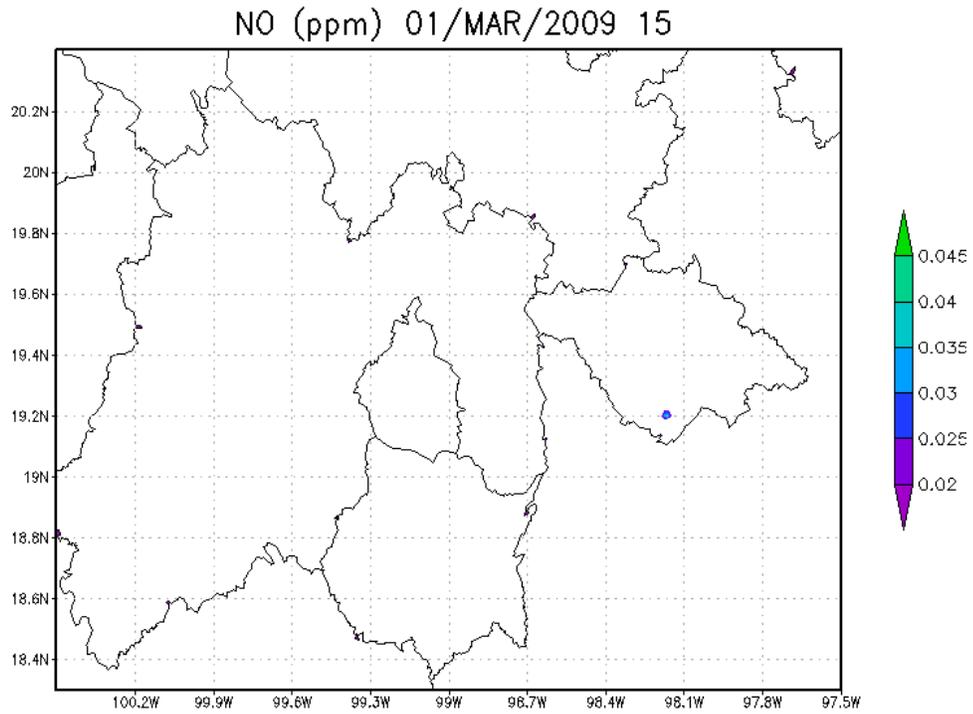
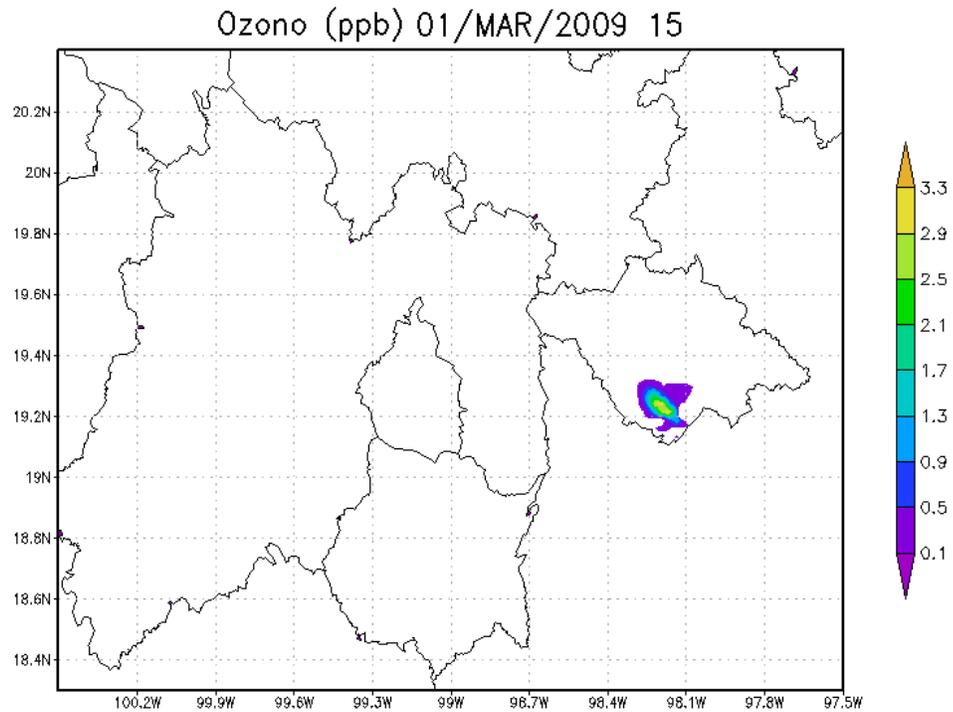


Figura 62. Concentración máxima de CO 5 ppm durante el incendio.



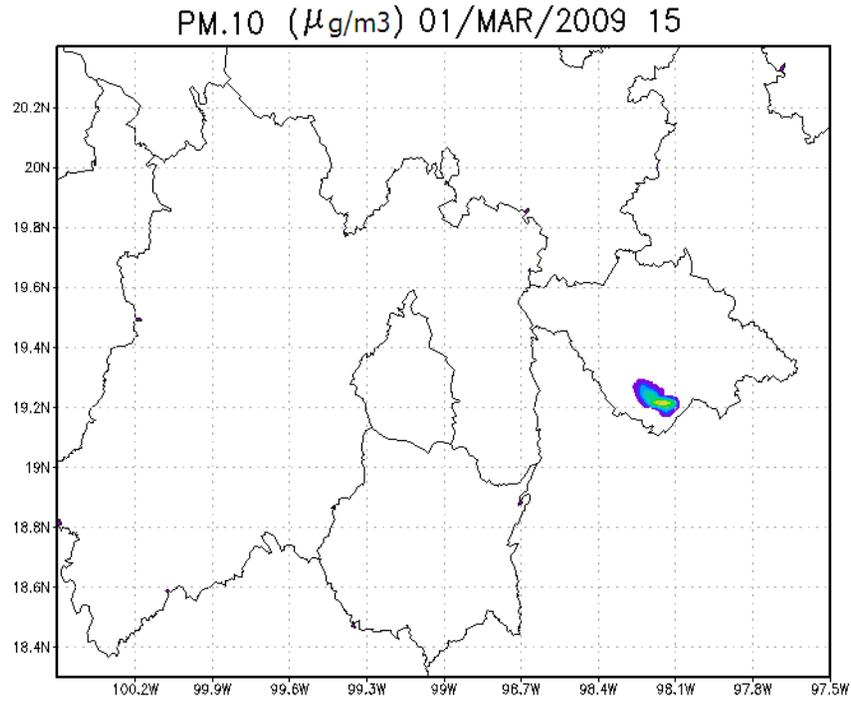
GrADS: COLA/IGES

Figura 63. Concentración máxima de NO 0.045 ppm durante el incendio.



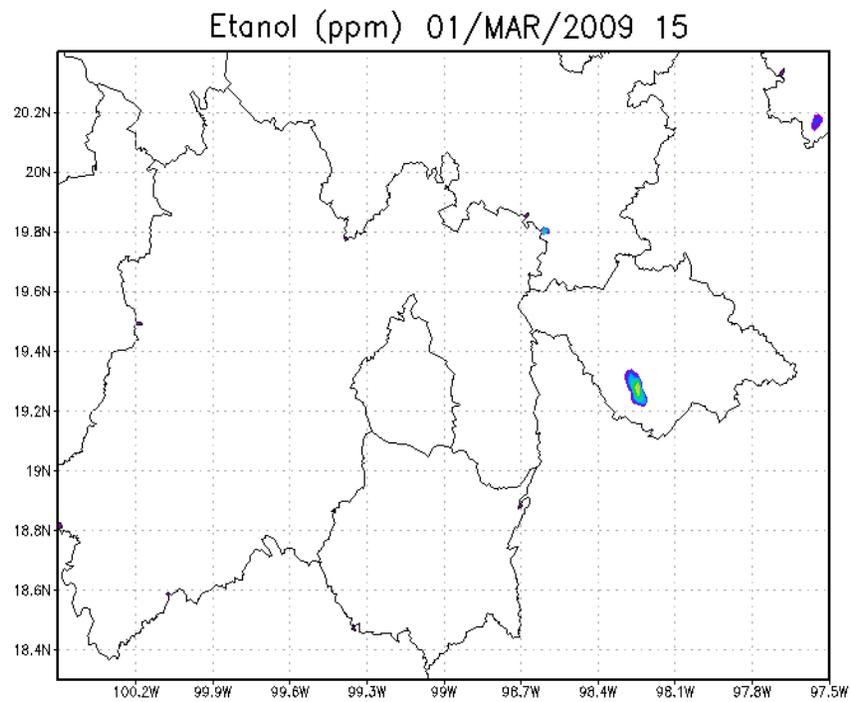
GrADS: COLA/IGES

Figura 64. Concentración máxima de O₃ 3.3 ppb durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

Figura 65. Concentración máxima de PM₁₀ de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

Figura 66. Concentración máxima de Etanol 2.6 ppm durante el incendio.

04 - MARZO - 2009

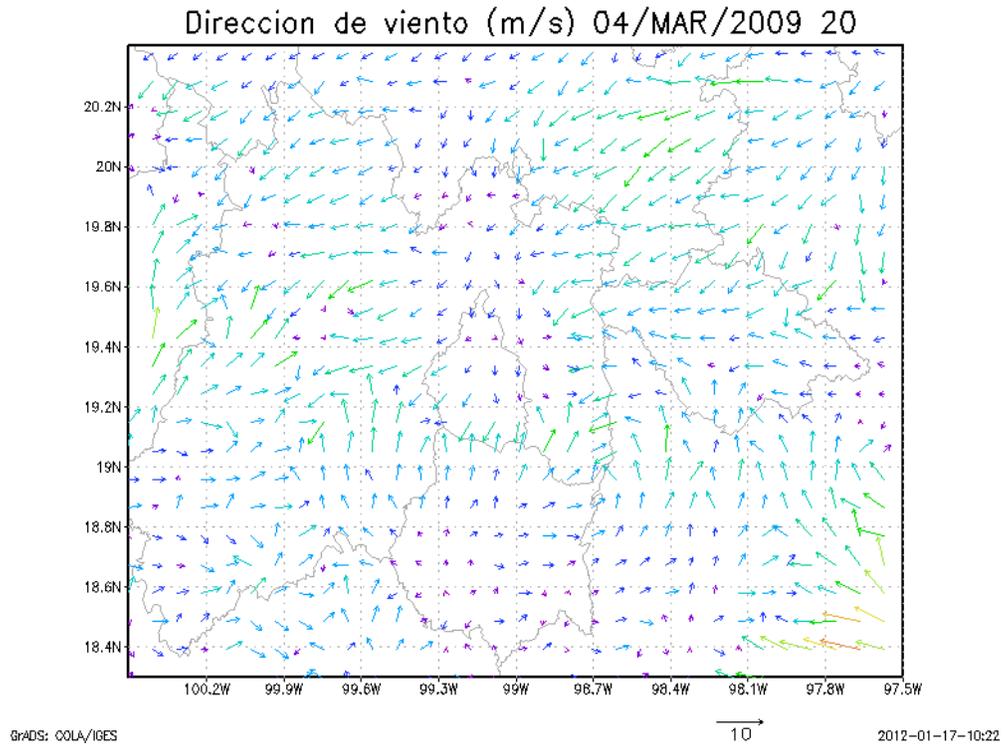


Figura 67. Dirección del viento (este-oeste) predominante a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.

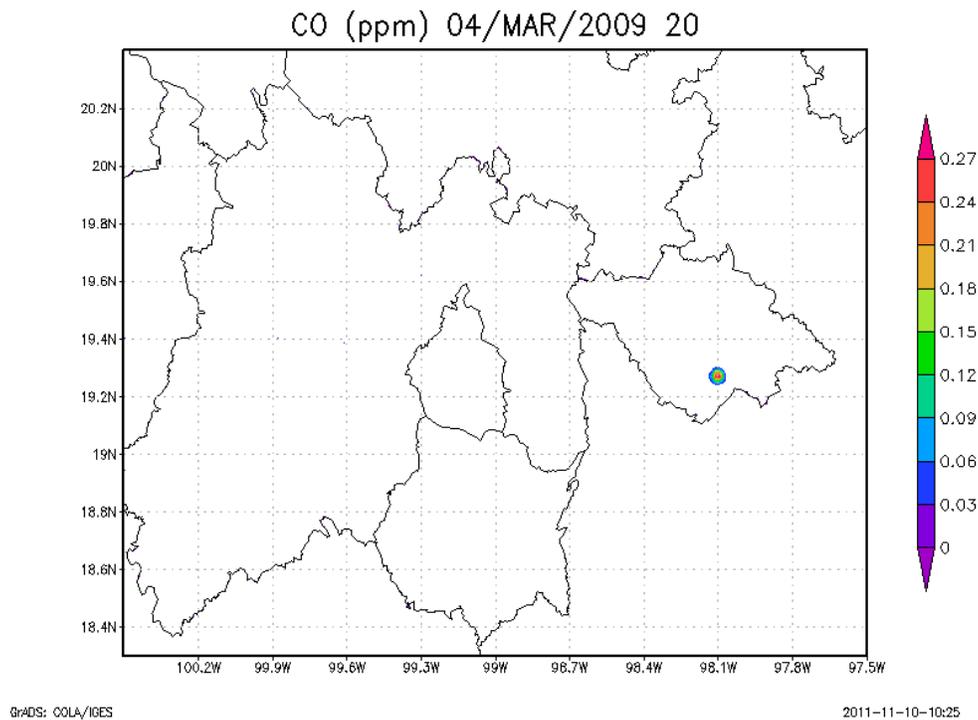
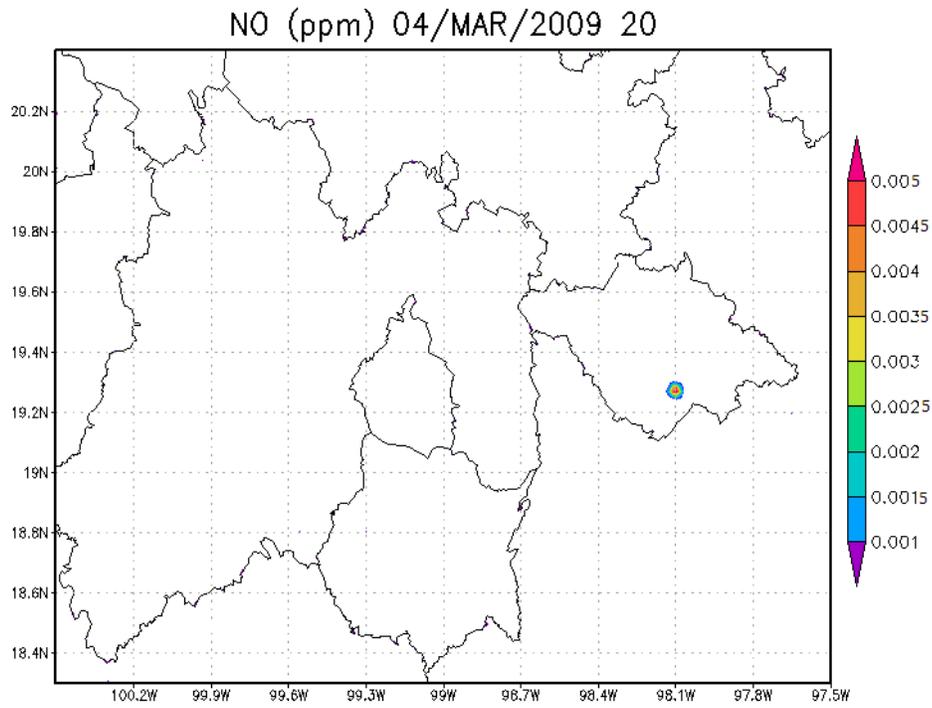


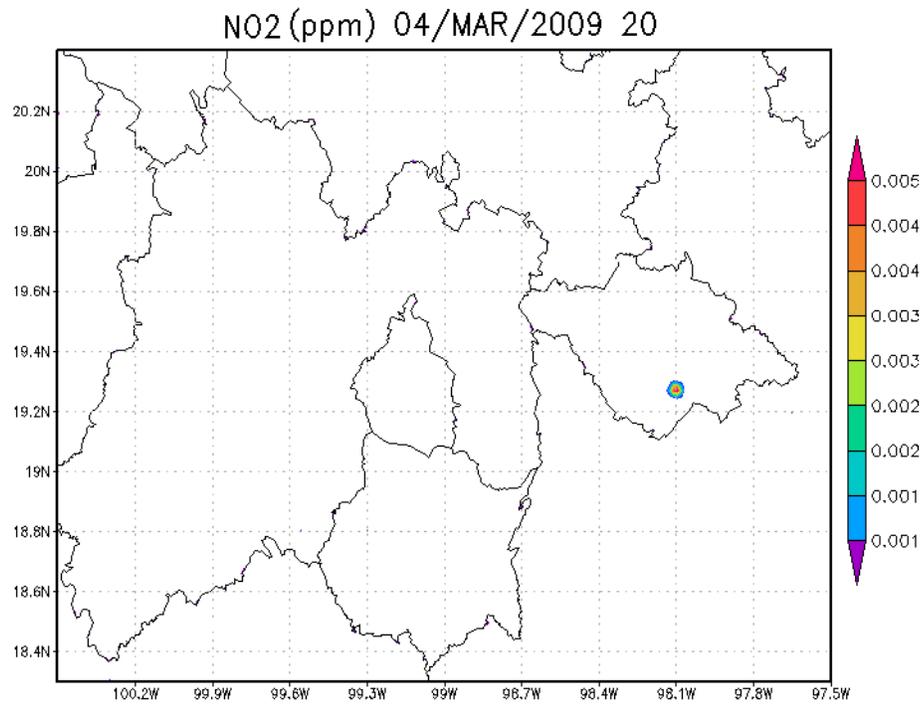
Figura 68. Concentración máxima de CO 0.27 ppm durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

2011-11-10-10:26

Figura 69. Concentración máxima de NO 0.005 ppm durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

2011-11-10-10:26

Figura 70. Concentración máxima de NO₂ 0.005 ppm durante el incendio.

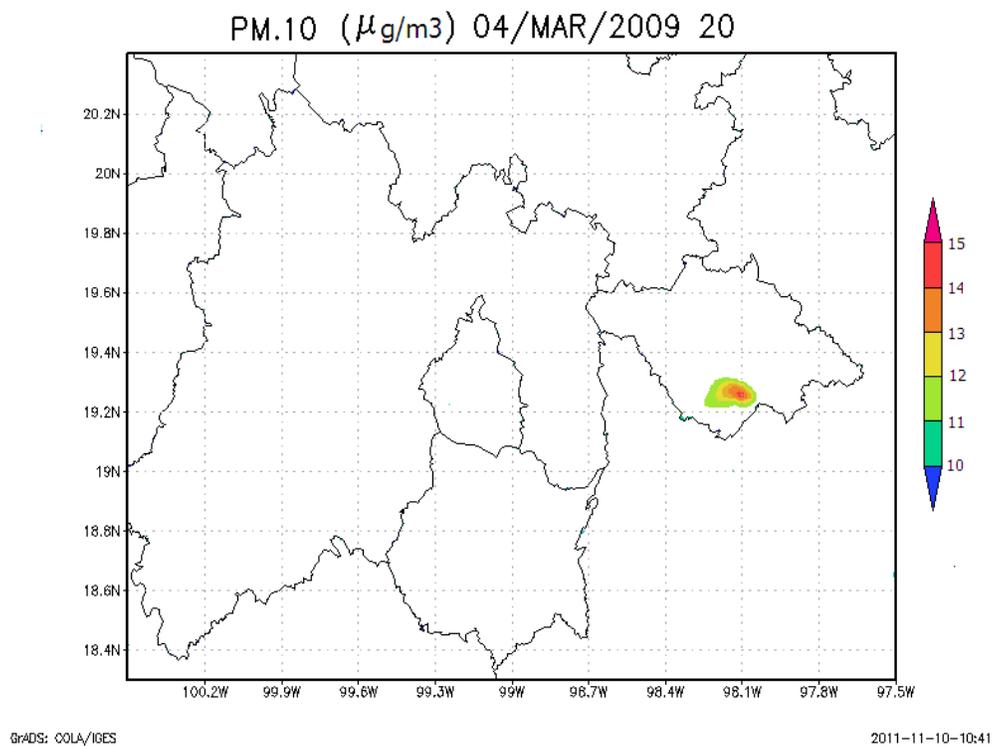


Figura 71. Concentración máxima de PM_{10} de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el incendio.

11 – FEBRERO – 2009

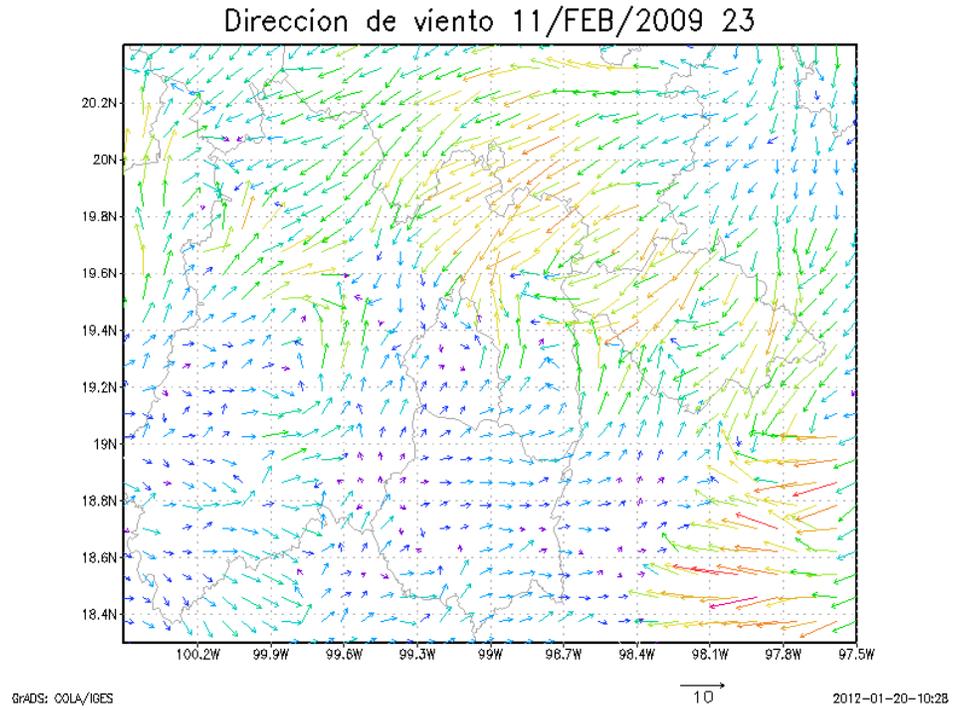


Figura 72. Dirección del viento (norte-oeste) predominante a la hora de mayor concentración de contaminantes del incendio.

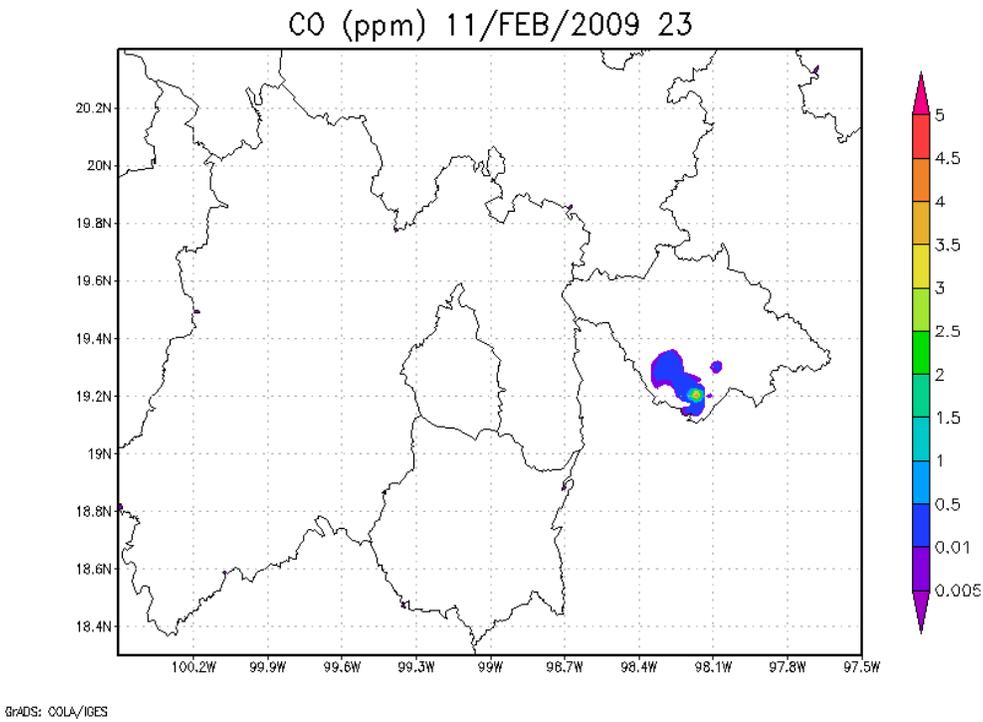


Figura 73. Concentración máxima de CO 5 ppm durante el incendio.

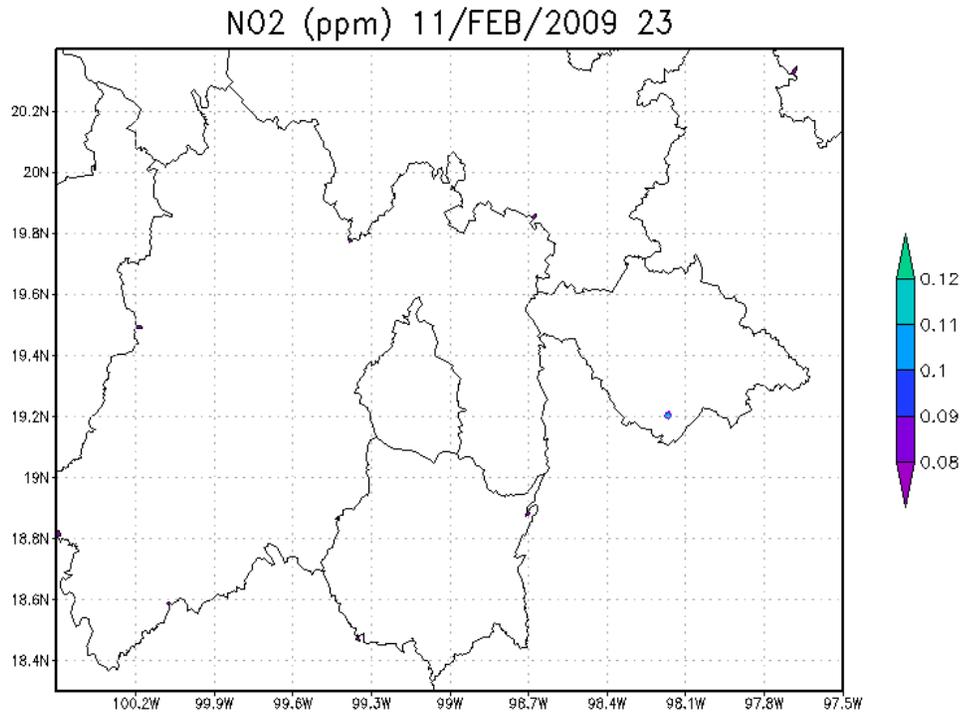


Figura 74. Concentración máxima de NO₂ 0.12 ppm durante el incendio.

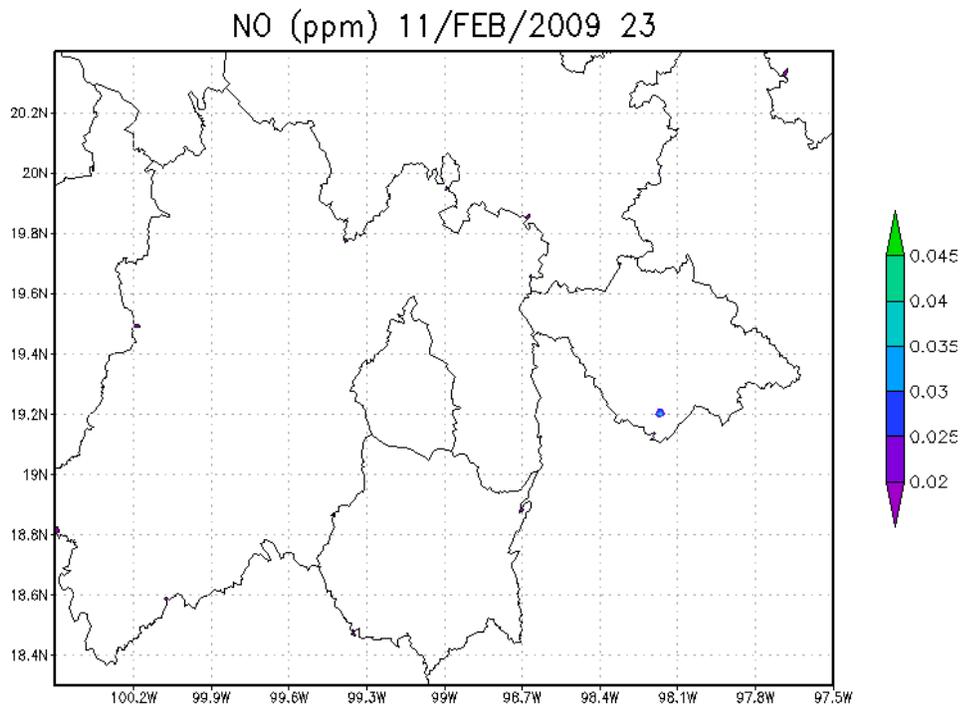
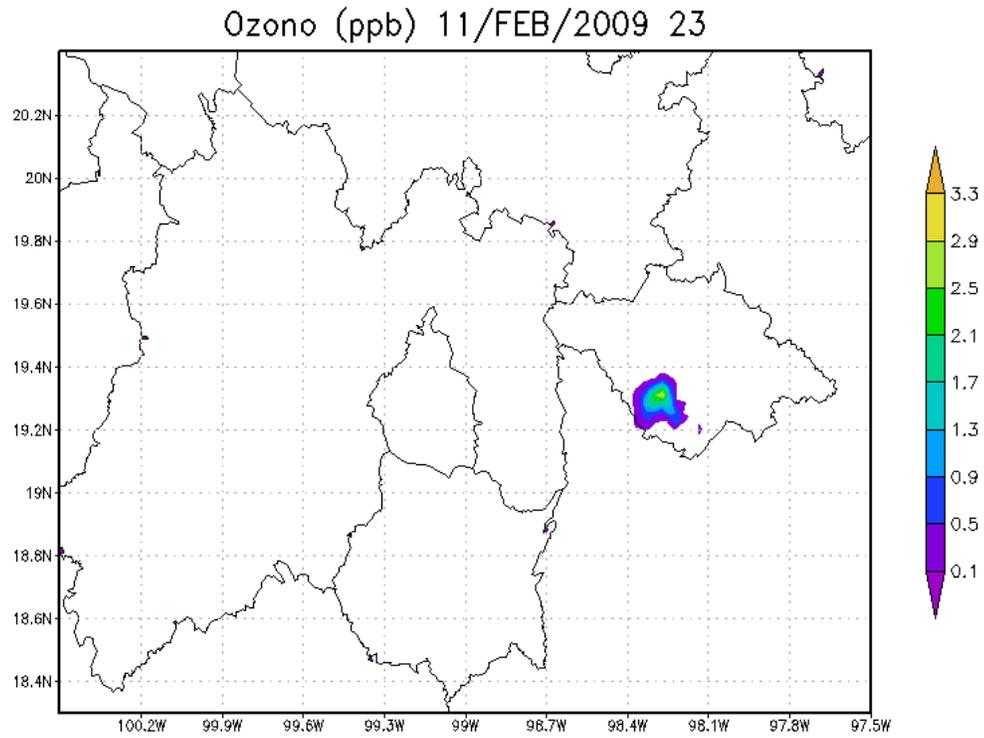
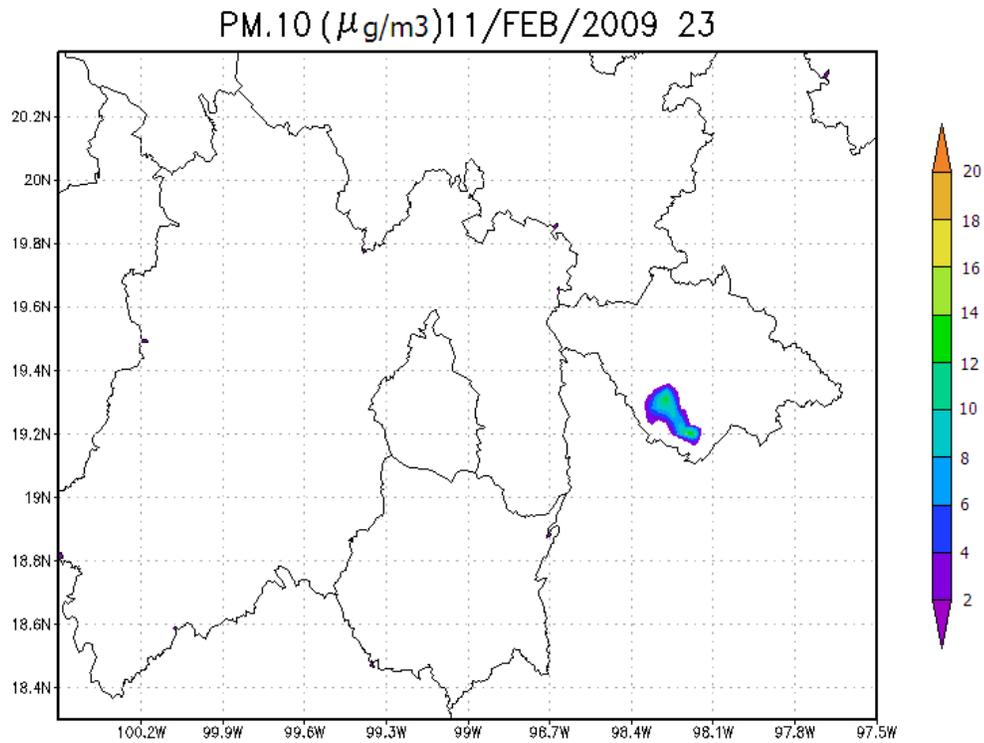


Figura 75. Concentración máxima de NO 0.045 ppm durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

Figura 76. Concentración máxima de O_3 3.3. ppb durante el incendio.



GrADS: COLA/IGES

Figura 77. Concentración máxima de PM_{10} de $20 \mu g/m^3$ durante el incendio.

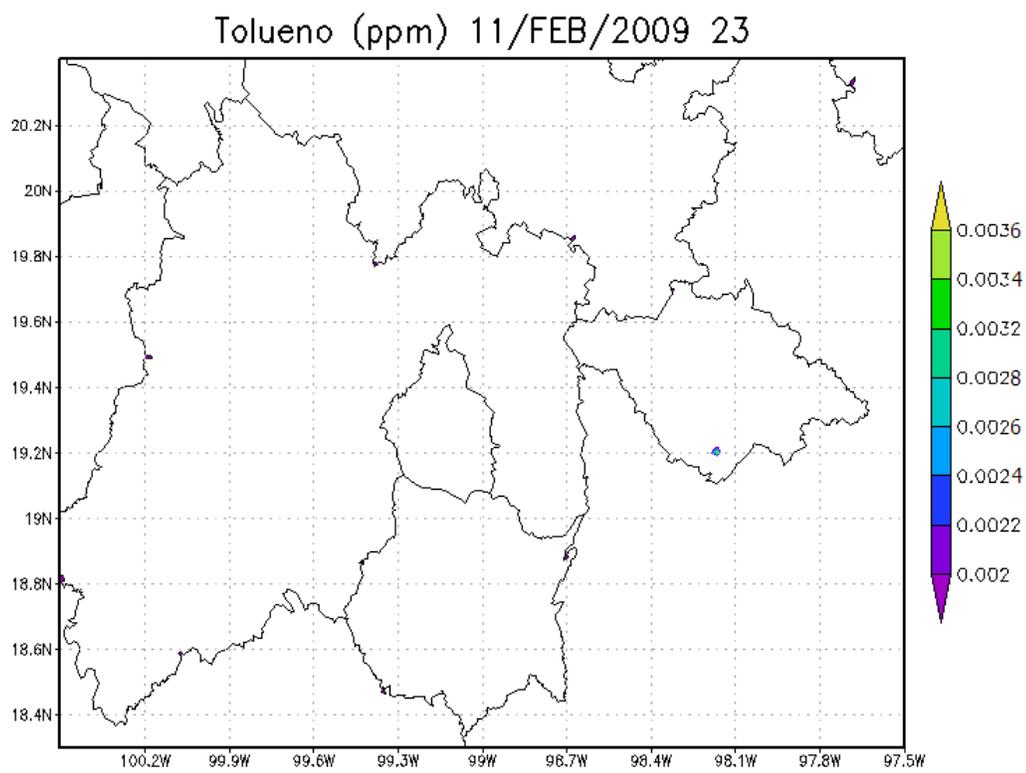


Figura 78. Concentración máxima de Tolueno 0.0036 ppm durante el incendio.