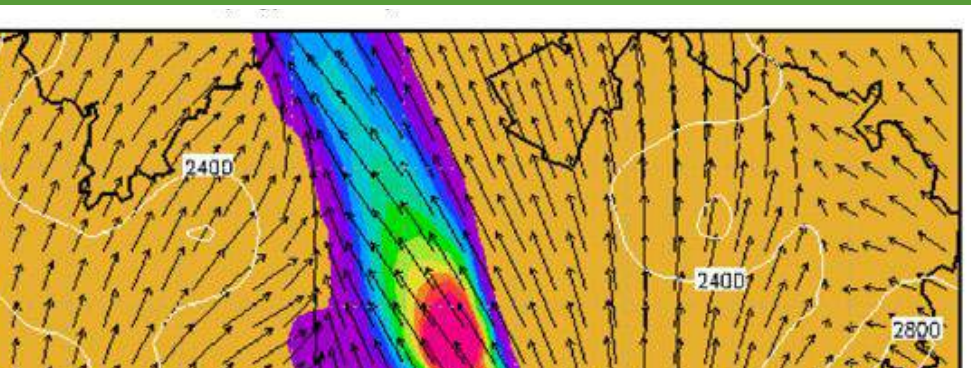
SEMARNAT
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

INECC
INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

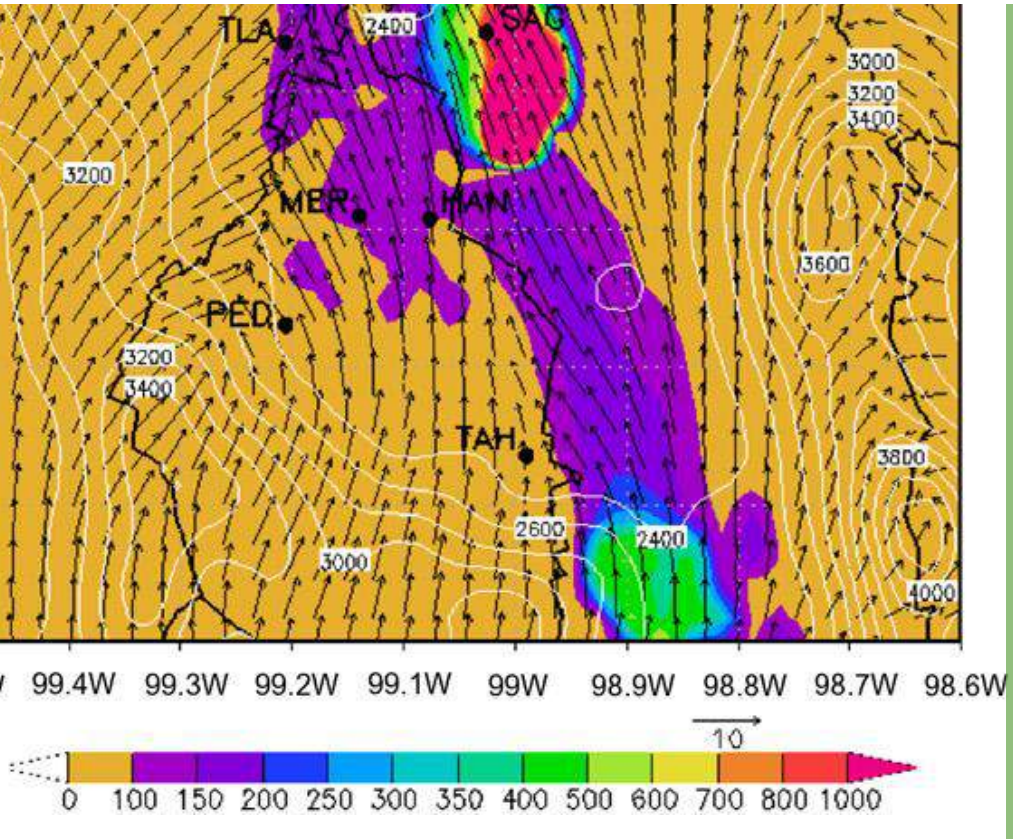
Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México

Informe Final



2016

CONTAMINACIÓN Y SALUD AMBIENTAL



Preparado por:

Centro de Ciencias de la Atmosfera de la Universidad Nacional Autónoma de México

Elaborado para:

Coordinación de Contaminación y Salud Ambiental

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes/ Cuicuilco, Del. Coyoacán, México, D.F. C.P. 04530.
Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404.
www.inecc.gob.mx

diciembre de 2016

Directorio

Dra. María Amparo Martínez Arroyo
Directora General del INECC

Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa
Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental

Dr. Arturo Gavilán García
Dirección de Investigación para el Manejo Sustentable de Sustancias Químicas, Productos y Residuos

D. R. © Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
Periférico Sur 5000. Col Insurgentes Cuicuilco
C. P. 04530. Delegación Coyoacán, México D. F.
http://www.inecc.gob.mx

Reconocimientos

Responsable

Dr. José Agustín García Reynoso

Colaboradores

Centro de Ciencias de la Atmósfera

Dr. Aron Jazcilevich Diamant

Dr. Jorge Zavala Hidalgo

Dra. María del Carmen Leticia Caderón Ezquerro

Dr. Ricardo Torres Jardón

M. en C. Abraham Ortínez Álvarez

M. en C. Bertha Eugenia Mar Morales

M. en C. José Santos García Yee

M. en C. Hugo Barrera Huertas

M. en C. Javier Castillo Miranda

Dra. Telma Castro Romero

M. en C. Jorge Alejandro Torres Jaramillo (BUAP)

Instituto de Geografía

Dr. Manuel Suárez Lastra

Dr. Javier Genaro Delgado Campos

Con el soporte de la supercomputadora Miztli de la UNAM

Página en blanco a propósito.

Índice de contenido

RECONOCIMIENTOS **3**

ÍNDICE DE CONTENIDO **5**

ÍNDICE DE FIGURAS **7**

ÍNDICE DE TABLAS **9**

RESUMEN **11**

RESUMEN EJECUTIVO **11**

1. MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE **14**
1.1. PUEBLA 14
1.2. VALLE DE TOLUCA 14
1.3. ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO 14

2. CONOCIMIENTO CIENTÍFICO ACTUAL DE LA CALIDAD DEL AIRE EN CUENCAS ATMOSFÉRICAS DE LA MEGALÓPOLIS **15**

3. TRANSPORTE DE CONTAMINANTES ENTRE CUENCAS **22**
3.1. RECOMENDACIONES 26

4. VALIDACION DE INVENTARIOS DE EMISIONES **27**
4.1. MÉTODO 1 27
4.2. MÉTODO 2 29
4.3. MÉTODO 3 31
4.4. RECOMENDACIONES 33

5. EMISIONES DE PARTÍCULAS POR EROSIÓN EÓLICA Y VULCANISMO **33**
5.1. EROSIÓN EÓLICA 33
5.2. INFLUENCIA DE CENIZA VOLCÁNICA 36
5.3. RECOMENDACIONES 37

6. IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN CULTIVOS **38**
6.1. ANTECEDENTES 38
6.2. MÉTODO 38
6.3. RESULTADOS 41
6.4. RECOMENDACIONES 43

7. AFECTACIÓN DE BOSQUES POR EXPOSICIÓN A OZONO **43**
7.1. INTRODUCCIÓN 43
7.2. MÉTODO 43
7.3. RESULTADOS 46
7.4. RECOMENDACIONES 48

8. IMPACTOS EN EL PATRIMONIO HISTÓRICO-CULTURAL **48**
8.1. RECOMENDACIONES 51

9. IMPACTOS EN MATERIALES **51**
9.1. RECOMENDACIONES 54

10. ESTRUCTURA URBANO-REGIONAL **54**
10.1. INDICADORES DE DESEMPEÑO URBANO-REGIONAL 54
Porcentaje de viajes que utilizan tres o más modos de transporte *54*

Kilómetros pasajero-recorridos promedio *55*
Tiempo de traslado en Transporte Público de Pasajeros *55*

11. CALIDAD BIOLÓGICA DEL AIRE **56**
11.1. RECOMENDACIONES 59

12. PROPUESTA DE AGENDA CIENTÍFICA PARA LA CAME **59**
12.1. CONSTRUIR EL MODELO ECOSISTÉMICO DE LA MEGALÓPOLIS 62
12.2. REFORZAR EL SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO MEGALOPOLITANO 62
12.3. CONSTRUIR EL INVENTARIO ÚNICO DE LA MEGALÓPOLIS 64
12.4. QUÍMICA ATMOSFÉRICA Y TRANSPORTE ENTRE CUENCAS ATMOSFÉRICAS 65
12.5. IMPACTOS EN SALUD 66
12.6. IMPACTOS SOBRE CULTIVOS Y BOSQUES 66
12.7. IMPACTOS SOBRE PATRIMONIO CULTURAL 67
12.8. CIENCIAS JURÍDICAS Y SOCIALES 67

13. REUNIONES DE EXPERTOS **68**

14. REFERENCIAS **69**

Índice de Figuras

FIGURA 1.- MODELO CONCEPTUAL DE LA CIRCULACIÓN DEL VIENTO EN LA CUENCA DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO (ZMVM) DURANTE LAS CAMPAÑAS DE CAMPO MCMA-2003 Y MILAGRO (FOY ET AL., 2008) 16
FIGURA 2. PERFIL DIURNO DE PRECURSORES Y OXIDANTES O_3 Y $Ox=O_3+NO_2$ PARA EL PASO DE TENANGO DEL AIRE PARA DOS DÍAS TÍPICOS REPRESENTANDO CONDICIONES DE BAJA Y ALTA PRESIÓN (GARCÍA YEE ET AL., 2016). 17
FIGURA 3. RELACIONES OX CON NOX PARA SITIOS URBANOS (UIZ) Y PERIURBANOS (TENANGO DEL AIRE Y AMECAMECA) 18
FIGURA 4.- RELACIONES O3 VRS NOX* (PROXI DE NOY), EN VARIOS SITIOS DE MONITOREO EN MORELOS DURANTE CARIEM, FEB-MAR 2009. ; CUERNAVACA CENTRO; PREPA 1; YAUTEPEC; CUAUTLA; PARQUE IND. CUAUTLA (SALCEDO ET AL., 2012) 19
FIGURA 5.- CORRELACIONES OX VRS NOX EN VARIOS SITIOS DE LA CUENCA PUEBLA-TLAXCALA. AMOZOC, CHIPILO, HUAQUECHULA, ZALCALTENANGO Y CALPULALPAN 19
FIGURA 6.- PATRONES DE VIENTO MEDIO ESTACIONAL A LAS 06,12,18 Y 00 HORAS PARA MARZO Y SEPTIEMBRE (INECC, 2014) 23
FIGURA 7.- OZONO Y RETRO TRAYECTORIAS DE 9 HORAS EN MORELOS DURANTE CUATRO DÍAS, DE LACAMPAÑA CARIEM 2009, FEBRERO-MARZO (SALCEDO ET AL., 2012). 25
FIGURA 8.- MODELO DE DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA VALIDACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES DE ALTA RESOLUCIÓN MEDIANTE EL USO DE OBSERVACIONES Y MODELOS, FUENTE (INECC, 2014) 28
FIGURA 9.- COMPARACIONES DE RESULTADOS DEL MODELO WRF-CHEM CON OBSERVACIONES EN AMECAMECA ENTRE EL 2 DE FEBRERO Y 3 DE MARZO 2011, CON DÍAS CLASIFICADOS EN SISTEMAS DE ALTA Y BAJA PRESIÓN Y TRANSICIÓN. LAS BARRAS CORRESPONDEN A LOS VALORES DEL COEFICIENTE DE CONCORDANCIA ENTRE MODELO Y OBSERVACIONES. 29
FIGURA 10 COMPARACIÓN DE DIRECCIONES E INTENSIDADES DE VIENTO ENTRE EL MODELO WRF-CHEM Y LAS OBSERVACIONES. 30
FIGURA 11, COCIENTES ENTRE VALORES OBSERVADOS Y MODELADOS DE PROMEDIOS HORARIOS DE CO Y NOX. 30
FIGURA 12.- SE COMPARAN COLUMNAS DE CO OBTENIDAS POR SATELITE Y POR EL MODELO WRF-CHEM. 31
FIGURA 13.- CORRELACIONES ENTRE COLUMNA DE CO OBSERVADA POR SATELITE Y DEL MODELO WRF-CHEM. 31
FIGURA 14. COCIENTES CO/NOX OBSERVADOS Y ESTIMADOS DEL INVENTARIO DE EMISIONES EN UN RADIO DE 3 KM A LA REDONDA DEL SITIO DE MONITOREO. 32
FIGURA 15. ZONAS AGRÍCOLAS Y PERIURBANAS: NORTE, TEXCOCO Y TENANGO DEL AIRE, FUENTES DE PM10 POR EROSIÓN EÓLICA. 34
FIGURA 16. CAMPOS DE CONCENTRACIÓN DE PM_{10} Y LÍNEAS DE FLUJO DE VIENTO EN SUPERFICIE EN EL VALLE DE MÉXICO PARA EPISODIO DE PM10 EN MARZO 2006 DURANTE MILAGRO. (DÍAZ-NIGENDA ET AL., 2010) 35
FIGURA 17.- DIFERENCIA DE CONCENTRACIONES SUPERFICIALES MODELADAS DE PM_{10} EN (A) EL 20 DE JUNIO Y EN (B) PARA EL 21 DE JUNIO, 2011. NÓTESE COMO LA DIFERENCIA ABARCA ZONAS DENSAMENTE POBLADAS DE LA ZMVM. 36
FIGURA 18.- PROBABILIDADES DE CAÍDA DE CENIZA PARA UN PERÍODO DE 12 MESES. ERUPCIÓN CON UNA ALTURA DE 3 KM (IZQ.), DE 5 KM (CENTRO) Y DE 10 KM (DER.) 37
FIGURA 19- MAPA HÍBRIDO DE EXCEDENCIAS DEL NIVEL CRÍTICO AOT40 PARA EL CENTRO DE MÉXICO PAR LA TEMPORADA JUNIO-SEPTIEMBRE 2011. CONTIENE PUNTOS DE RESULTADOS DEL MODELO WRF-CHEM, SITIOS DE ESTACIONES DE MONITOREO URBANOS, Y ALGUNOS SITIOS DE CAMPAÑAS INTENSIVAS EN ÁREAS RURALES Y PERIURBANAS. 39
FIGURA 20.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA DADAS EN LA TABLA 3. MILLS ET AL. (2007) 40
FIGURA 21. MAÍZ: A) RENDIMIENTO (T/HA); B) PÉRDIDA DE RENDIMIENTO RELATIVO (%); C) PRODUCCIÓN (T); D) PÉRDIDA DE PRODUCCIÓN DE CULTIVO (T); E) VALOR DE LA PRODUCCIÓN ($) Y F) PÉRDIDA ECONÓMICA ($), PARA EL 2011 42
TABLA 4. ÁREA CULTIVADA, VALOR DE LA PRODUCCIÓN Y PÉRDIDA ECONÓMICA DE VARIOS CULTIVOS SPOR SU EXPOSICIÓN A OZONO, PARA OTROS CULTIVOS NO ES POSIBLE ESTIMAR ESE COSTO POR AUSENCIA DE FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA. 42
FIGURA. 22 SUPERFICIE INTERPOLADA DE LA MÉTRICA AOT40 CON LA DISTRIBUCIÓN DE BOSQUES EN LA REGIÓN 44
FIGURA 23 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS BOSQUES DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO 45

FIG. 24 REDUCCIÓN DE BIOMASA DE LOS BOSQUES DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO. EL PRIMER CUADRO INCLUYE TODAS LAS CATEGORIÁS, LOS CUADROS SIGIENTES SE PRESENTA UNA CATEGORÍA EN CADA CUADRO, ... 48
FIGURA 25.- MAPA DE RECESIÓN PARA PIEDRA VOLCÁNICA DE ALGUNOS MONUMENTOS ARQUEOLÓGICOS EN LA CRCM, 2014 49
FIGURA 26.- MAPA DE TASAS DE RECESIÓN DE PIEDRA VOLCÁNICA "POR PROXI" CON PIEDRA CALCÁREA EN MONUMENTOS HISTÓRICOS 50
FIGURA 27. FOTOGRAFÁS QUE MUESTRAN UNA NAVE INDUSTRIAL Y PARTES DE LA INFRAESTRUCTURA PÚBLICA CON DIFERENTE GRADO DE DAÑO. 52
FIGURA 19.- MODELO CONCEPTUAL SOBRE LAS CONSECUENCIAS EN CASCADA DEL MODELO DE URBANIZACIÓN VIGENTE EN LA CRCM Y QUE PUEDE APLICARSE A OTRAS GRANDES CIUDADES DEL PAÍS FUERA DE LA CORONA (INECC, 2015). 60
FIGURA 20.- DIAGRAMA CONCEPTUAL DE LA INTERACCIÓN ENTRE LOS CUATRO PILARES DE LA POLÍTICA PÚBLICA SOBRE CALIDAD DEL AIRE: OBSERVACIONES, INVENTARIO DE EMISIONES, MODELOS DE CALIDAD DEL AIRE Y LA ESTIMACIÓN DE RIESGOS Y COSTOS DE LOS DIFERENTES RECEPTORES DE LA CONTAMINACIÓN. ILUSTRA TAMBIÉN SOBRE EL CARÁCTER ITERATIVO DEL PROCESO (INECC, 2015)´. 63
FIGURA 20.- EJEMPLOS DE EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN MONUMENTOS DEL PATRIMONIO CULTURAL. SE OBSERVA LA FORMACIÓN DE YESO EN ALGUNAS PIEDRAS Y DESGASTE ACELERADO POR FRACTURAS EN MATERIALES 68

Índice de Tablas

TABLA 1. ESTADÍSTICOS BÁSICOS DE CALIDAD DEL AIRE EN SITIOS RURALES Y PERIURBANOS EN ESTADO DE MÉXICO, PUEBLA Y TLAXCALA, EL SITIO URBANO UAM-IZTAPALAPA EN CDMX SE INCLUYE CON FINES DE COMPARACIÓN. 21
TABLA 2.- DATOS DE LAS REGIONES COMPARADAS EN FIGURA 13 Y ESTADÍSTICOS BÁSICOS..... 31
TABLA 3. FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA AL OZONO DE VARIOS CULTIVOS S DE DE IMPORTANCIA ECONÓMICA EN EL CENTRO DE MÉXICO. MILLS ET AL. (2007) 40
TABLA 5 ÁREA DE BOSQUES EN LA REGIÓN CENTRO DE MÉXICO Y SU IMPORTANCIA RELATIVA 45
TABLA 6 FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA PARA VARIAS ESPECIES RELACIONADAS CON LAS DOMINANTES EN LA REGIÓN CENTRO DE MÉXICO. . (VAN GOETHEM ET AL., 2013) 46
TABLA 7- ESTIMACIÓN DE LA RECESIÓN PARA PIEDRA VOLCÁNICA DE MONUMENTOS HISTÓRICOS EN LA CRCM, 2014.. 50
TABLA 8.- ESTIMACIÓN DE LA RECESIÓN PARA PIEDRA VOLCÁNICA DE MONUMENTOS ARQUEOLÓGICOS EN LA CRCM, 2014 51
TABLA 9.- PRESENCIA DE DIVERSAS ESPECIES O FAMILIAS VEGETALES EN TOULCA, CUERNAVACA Y PUEBLA, IDENTIFICADA POR SU PÓLEN EN 2011 (INECC 2015). 58
TABLA 10.- TIPOS POLÍNICOS ENCONTRADOS EN TOLUCA, CUERNAVACA Y PUEBLA EN 2014-2015, SU IMPORTANCIA RELATIVA Y SU POTENCIAL ALERGÉNICO (INECC 2015). 59

Página en blanco a propósito.

Resumen

Con base en la información disponible y visitas técnicas se realizó el diagnóstico de la calidad del aire en cuencas atmosféricas. Se presentan los resultados por las visitas técnicas en las redes de monitoreo. Se describe el conocimiento científico actual de la calidad del aire en la Megalópolis donde se presenta un resumen de los estudios realizados en el área que incluyen la meteorología, transporte y conversión de contaminantes. En referencia al intercambio de contaminantes entre cuencas se presentan los estudios realizados con partículas inertes y contaminantes secundarios. Se indican tres metodologías para la validación de inventarios de emisiones. Se muestra la influencia de la erosión eólica en la calidad del aire. Con base en los estudios y la información requerida para comprender y con ello desarrollar políticas que apoyen la mejora de la calidad del aire se proponen recomendaciones y la agenda científica para la CAMe.

Resumen Ejecutivo

El objetivo de es este proyecto es mediante la mejor información disponible a la fecha, integrar un diagnóstico sobre el estado del arte acerca de la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México mostrando los mecanismos de transformación y transporte de los contaminantes y sus contribuciones en las distintas épocas del año.

Los temas tratados en el documento incluyen el monitoreo de la calidad del aire, la evaluación de los inventarios de emisiones, la erosión eólica, la interacción entre cuencas atmosféricas, la estructura urbano-regional, la calidad biológica del aire, los impactos de la exposición a ozono sobre bosques, cultivos y materiales. Para ello se realizaron reuniones de trabajo con expertos en calidad del aire y la agenda científica.

En el monitoreo de calidad del aire se realizaron visitas técnicas a redes de monitoreo de la CAMe que incluyen la ciudad de Puebla, Toluca Se identificaron en cada una de las redes las estaciones que son aptas para la activación de un posible programa de contingencia ambiental (PCAA) y aquellas que poseen otra función. En Puebla las estaciones Agua Santa, BIME, San Martín Texmelucan y Atlixco debido a su ubicación y emisiones cercanas no son aptas para un PCAA. En Toluca las estaciones Oxotitlán y Toluca centro son adecuadas para mediciones de fuentes vehiculares lo cual las excluye de ser útiles en un PCAA.

Con base en estudios en la ZMVM y la cuenca del Valle de México se identifica que la atmosfera en la zona urbana cambio de ser sensible a NOx a ser sensible a COV. Así también se identificó que las emisiones de Tula y del volcán Popocatépetl pueden influenciar la calidad del aire. Los estudios muestran una interacción entre las cuencas del centro de México y los patrones de viento y ventilación que se presentan cuando se tiene altos niveles de ozono. Se han identificado los sitios por donde se da el intercambio entre cuencas y algunas de las condiciones meteorológicas que los favorece. Se ha observado que sitios periurbanos puede pueden comportarse como sitio urbano o como un sitio rural, dependiendo de las condiciones meteorológicas y de la hora del día. De las campañas de mediciones sitios rurales y periurbanos no se encuentran exentos de niveles nocivos de ozono.

Estudios de meteorología y meteorología-química atmosférica muestra la influencia de una cuenca atmosférica sobre otra con lo cual se identifica el transporte entre cuencas. Estudios mediante el empleo de trayectorias en superficie muestran que la zona centro-norte de la CdMx es una zona de convergencia y convección. En la zona urbana Puebla-Tlaxcala los vientos cambian de dirección a lo largo del día: siendo hacia el sur y suroeste en la madrugada (12:00 hora GMT). Al pie oriental de la Sierra Nevada se observa una línea de convergencia. En Toluca se observa una línea de convergencia sobre la zona urbana que se desplaza hacia el suroeste-noreste a lo largo del día. En Cuernavaca los vientos están dominados por la señal diurna con brisas del Valle y de Montaña.

La ZMVM exporta parcelas de aire hacia el norte (Estado de México e Hidalgo) entre enero y marzo, hacia el estado de Morelos en mayo, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, hacia el este del Estado de México (Valle de Toluca) de septiembre a diciembre; en mayo permanecen en el Valle de México y zonas aledañas. Toluca exporta hacia Zumpango y CdMx, en septiembre-diciembre hacia el oeste del Ajusco.

Cuernavaca-Cuautla exportan hacia la ZMVM a través de la Sierra del Chichinautzin y el Paso de Tenango del Aire y hacia el Valle de Toluca a través del Paso de Tenango del Valle.

Pachuca exporta hacia el este del Estado de México, a través del corredor Texcoco-Amecameca y Ozumba, principalmente entre junio y diciembre.

Puebla-Tlaxcala exporta hacia el norte del estado de Puebla en enero-abril y noviembre-diciembre, mientras que lo hace hacia la frontera con Morelos en enero, hacia San Martín Texmelucan en enero-abril, en mayo hacia el suroeste, hacia el Valle de México a través del Paso de Tenango del Aire en junio-septiembre.

Se recomienda realizar un esfuerzo para caracterizar la calidad del aire en todas las cuencas atmosféricas que contienen a la región CAMe y su área de influencia y que han sido muy poco estudiadas.

Es necesario establecer y sostener el monitoreo del transporte de contaminantes entre las cuencas atmosféricas en toda la región CAMe y su área de influencia. La calidad el aire en las ANP y las zonas agrícolas de la región debe ser también monitoreada, incluyendo el depósito de contaminantes.

Los altos niveles de oxidantes (Ox) observados en sitios periurbanos y rurales señalan la importancia de caracterizar la composición de COV en toda la región CAMe y su área de influencia.

Los inventarios de emisiones son herramientas utilizadas para el desarrollo de gestión de la calidad del aire. Por lo cual es importante conocer la certidumbre los mismos, para ello se propone realizar comparaciones concurrentes e iterativas. Comparación de modelos de calidad del aire con observaciones en superficie; comparación con mediciones de columna usando métodos ópticos (Stremme et al., 2013); comparación de columna observada por satélite con columna calculada con modelo de calidad del aire y comparación de cocientes de contaminantes observados y estimados del inventario (INECC, 2014; Ruiz-Suárez et al., 2016).

En cuanto a inventarios se recomienda realizar una evaluación de los métodos usados para estimar los inventarios de emisiones en todas las entidades que participan en la CAMe y homologar los métodos, promover la creación de un sistema megalopolitano de inventarios de emisiones, el cual podría servir como prototipo de un sistema nacional de inventarios de emisiones. El sistema de inventarios de emisiones debe contemplar la validación del inventario siguiendo buenas prácticas. Por ejemplo, las recomendadas por el IPCC para los inventarios nacionales de emisiones de GEI. El sistema de inventarios de emisiones debe contemplar el desarrollo del modelo de inventarios de emisiones de alta resolución espacial y temporal. Considerar otras fuentes que afectan la salud como los pólenes y esporas. El calendario del sistema de inventarios de emisiones debe contemplar actividades para evaluar y mejorar el inventario como parte integral de programa de actividades.

La erosión eólica es una fuente importante de partículas que pueden afectar a la salud y el ambiente. Se han identificado mediante modelización los sitios donde puede ocurrir este proceso como lo son la zona agrícola al norte de la ZMVM y la zona agrícola entre Chalco y Tenango del Aire. Se ha encontrado que el control de partículas y su concentración ambiental no posee una relación lineal debido a que las partículas influyen en la radiación recibida en superficie, que influye en la temperatura de la misma y que induce cambios en los patrones de viento. Se pueden emplear los modelos acoplados para evaluar los escenarios de mitigación como prácticas agrícolas alternativas, programas de recuperación de suelos abandonados como nuevos cultivos o áreas recreativas. Pueden también aplicarse para estimar relaciones costo/beneficio de programas de mitigación de emisiones de partículas suspendidas, acoplados con programas de conservación y recuperación de suelos.

La propuesta de agenda científica para la CAMe considera el sistema integral entre cuencas atmosféricas, considerando las interacciones entre las diferentes áreas urbanas que la comprenden: las emisiones, los flujos de bienes y población, la cobertura de suelo e interacción entre cuencas. Con lo anterior se identificaron las líneas principales de investigación:

- Construir el Modelo Ecosistémico de la Megalópolis
- Reforzar el Sistema de Monitoreo Atmosférico Megalopolitano
- Desarrollo del inventario único de la Megalópolis
- Investigación de Química atmosférica y Transporte entre Cuencas Atmosféricas
- Investigación sobre el impacto de la contaminación en el Patrimonio Cultural
- Investigación sobre el impacto de la contaminación en los Cultivos y los Bosques

Adicionalmente la elaboración de política pública para controlar y reducir la contaminación atmosférica en la Megalópolis y su área de influencia requiere de las ciencias que estudian el comportamiento de los individuos y los grupos sociales para identificar las barreras culturales e institucionales, así como los vacíos legales que limitan los alcances efectivos de las propuestas técnico/científicas de políticas públicas, encaminadas a reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos locales y climáticos

1. Monitoreo de la calidad del aire

Con el propósito de realizar una revisión crítica sobre la funcionalidad de los SMCA de la zona centro del país, para operar bajo esquemas de alerta ambiental, se realizaron visitas técnicas a algunas estaciones de dos sistemas de monitoreo de la Megalópolis, o se revisaron registros de observaciones hechas con otros para realizar un análisis situacional de las mismas, como son; la ubicación de las estaciones y su entorno físico. El objetivo fue identificar la función real que desempeñan en la observación de la calidad del aire, la evaluación de inventarios de emisiones y vigilancia ambiental.

1.1. Puebla

La visita técnica consistió en la revisión de las estaciones Velódromo, Agua Santa, BINE, Ninfas y UTP. Se tienen las siguientes observaciones.

Las estaciones Agua Santa y BINE se encuentran a nivel de calle. El ozono es titulado por las emisiones de NO de los vehículos que se desplazan a unos metros de la estación pues las emisiones de NOx están todavía demasiado concentradas. Las estaciones son aptas para registrar emisiones vehiculares, pero las concentraciones observadas no son representativas de las concentraciones ambientales en la parte de la ciudad en que se encuentran. En particular BINE tiene un edificio de cuatro niveles a escasos metros de distancia. No serían aptas para activar un posible PCAA en esa parte de la CAMe.

Por su ubicación, las estaciones San Martín Texmelucan y Atlixco, cuando operen serán aptas para monitoreo rural de ozono, pero no de emisiones de precursores de ozono, tampoco lo serían para activar un posible PCAA en esa parte de la CAMe.

1.2. Valle de Toluca

La visita técnica consistió en la revisión de las estaciones de: Oxotitlán y Toluca Centro. Se tienen las siguientes observaciones. Estas estaciones están a nivel de calle a escasos metros de la banqueta. El ozono es titulado por las emisiones de NO de los vehículos que se desplazan a unos metros de la estación. Las emisiones de precursores están todavía demasiado concentradas. Las estaciones son aptas para registrar y dar seguimiento a cambios en emisiones vehiculares, pero las concentraciones observadas no son representativas de las concentraciones ambientales en la parte de la ciudad en que se encuentran. No serían aptas para activar un posible PCAA en esa parte de la CAMe.

1.3. Zona Metropolitana del Valle de México

Paralelo a las actividades de este proyecto, el Centro de Ciencias de la Atmósfera y el Centro Mario Molina organizaron una serie de reuniones para revisar la aptitud de las estaciones de monitoreo de la RAMA para activar el PCAA y para proponer cambios en el PCAA. Estas reuniones se realizaron en colaboración con personal de la SEDEMA y la SMAGEM así como la CAMe. Se identificaron las estaciones ININ, Ajusco, Milpa Alta, Montecillos y Acolman como no aptas para ese fin por haber sido diseñadas para observar y documentar el transporte de contaminantes hacia y desde la ZMVM. También se propuso que toda nueva estación debe operar al menos por daños para poder evaluar su aptitud como estación participante en el PCAA de la ZMVM.

Un conjunto de recomendaciones sobre el PCAA para la ZMVM lo presentan el CCA y el Centro Mario Molina por otras vías[1] para su consideración.

2. Conocimiento científico actual de la calidad del aire en cuencas atmosféricas de la Megalópolis

La ZMVM y la cuenca del Valle de México han sido caracterizadas por varios estudios intensivos de campo desde los años 90 del siglo pasado, y su área de estudio se fue incrementando desde la ZMVM ,en el estudio MARI (Streit and Guzmán, 1996), hasta el transporte a gran escala en MILAGRO en 2006 con modelos, mediciones de superficie y por aeronaves (Molina et al., 2010).

A partir de ello se sabe que si bien la ZMVM era sensible a NOx cuando se realizó el estudio MARI, para cuando ocurrió la campaña MILAGRO era necesario reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles para alcanzar reducciones de las concentraciones ambientales de ozono (Lei et al., 2007).

Durante MILAGRO se identificó el impacto que llegan a ocasionar las emisiones del volcán Popocatépetl en la calidad del aire de la ZMVM, así como el transporte de la pluma de contaminantes proveniente de la región de Tula, Hgo. (Almanza et al., 2012; B. de Foy et al., 2009). No estaba entre los objetivos de esos estudios observar el transporte de contaminantes entre las cuencas vecinas en la región centro de México, aunque la relectura de los artículos de MILAGRO permite identificar información útil en ese aspecto.

Pocos estudios han investigado el intercambio regional de masas de aire entre la ZMVM y las áreas metropolitanas en las cuencas atmosféricas circunvecinas (Garcia-Reynoso et al., 2009; Ruiz-Suárez et al., 2010; Salcedo et al., 2012). Estudios anteriores han sugerido que el intercambio de masas de aire se puede producir a través de varios puertos de montaña, situados en las montañas que rodean el valle de México (de Foy et al., 2008; Doran and Zhong, 2000; Jazcilevich et al., 2003).

de Foy et al (2005) desarrolló un modelo conceptual de patrones de flujo meteorológicos para la campaña MCMA-2003 con tres grupos: O_3-Sur, O_3- y Frente Frío. Esto se amplió durante la campaña MILAGRO con eventos tipo Venteo-Sur, Convección-Sur y Convección-Norte (de Foy et al., 2008). Estos se muestran en la Figura 1. Los eventos de frente frío se asociaron con lluvia y aire muy limpio. Eventos tipo venteo-sur también tuvieron fuertes vientos y condiciones limpias, pero estos se asociaron con cielos despejados. Eventos tipo O_3-sur presentaron tiempos de residencia más prolongados y tasas de recirculación más altas promoviendo concentraciones elevadas de ozono en el sur de la ciudad. Estos fueron los episodios clásicos de alta contaminación estudiados antes de la campaña MCMA-2003. En contraste, días con episodios tipo O_3-norte presentan una mejor ventilación y el pico de ozono ocurre en el norte de la ciudad.

Con el objeto de comprender mejor el transporte entre cuencas y la calidad del aire en zonas rurales del centro de México, Investigadores del CCA-UNAM han realizado una serie de campañas de monitoreo en cuencas atmosféricas vecinas a la Cuenca Atmosférica

[1] Se encuentra en preparación la Propuestas al programa de contingencia ambientales para la CAME del cual el autor y varios de los participantes de este estudio conforman el grupo de trabajo.

del Valle de México y en sitios de intercambio entre cuencas (Ruiz-Suárez et al., 2016; Salcedo et al., 2012). Aquí se presentan algunos resultados que demuestran el transporte de masas de aire entre el Valle de México y los Valles de Cuernavaca-Cuautla, El Valle de Toluca y los Valles de Cuernavaca-Cuautla, y los Valles de Cuernavaca-Cuautla con la Cuenca Atmosférica de Puebla-Tlaxcala.

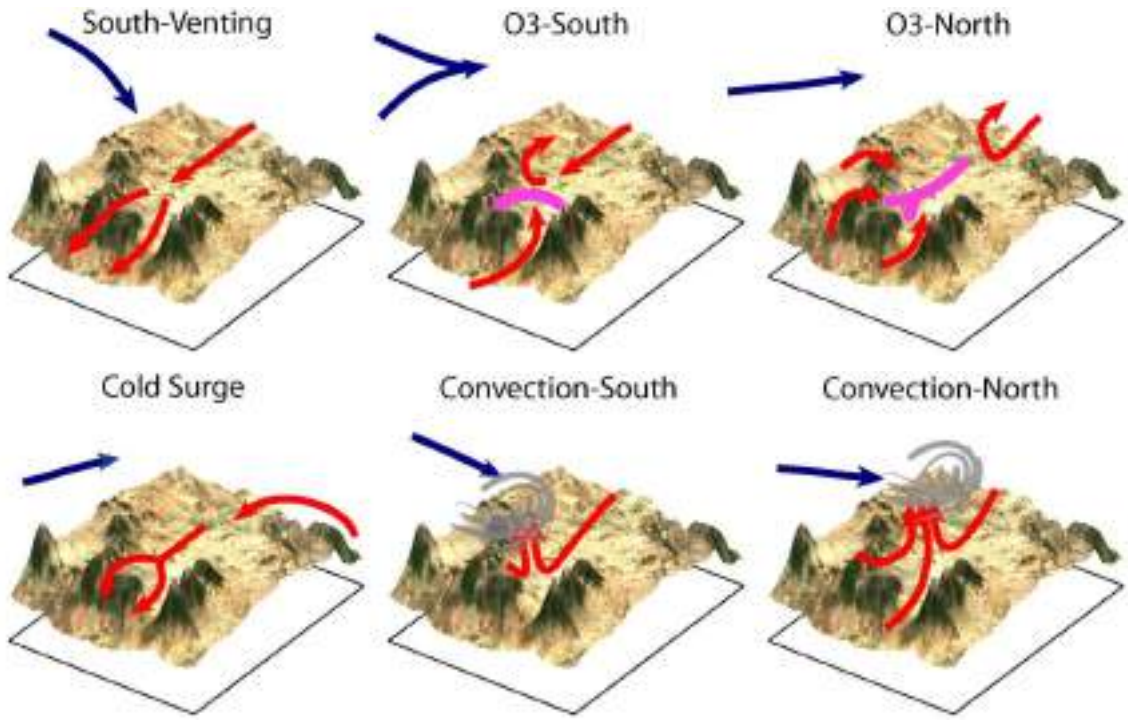


Figura 1.- Modelo conceptual de la circulación del viento en la cuenca de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) durante las campañas de campo MCMA-2003 y MILAGRO (Foy et al., 2008)

La Figura 2 muestra O_3, NO_2, NO Y O_X=O_3+NO_2 en masas de aire provenientes del estado de Morelos, observadas en Amecameca y en Tenango del Aire, sitios sobre el paso de montaña, del mismo nombre, que comunica la Cuenca de México con los Valles de Cuautla y Cuernavaca.

Bajo sistemas de baja presión atmosférica (LPS por sus siglas en idioma inglés), y que corresponden al caso O_3-norte por de Foy et al (2008), las corrientes de viento transportan parcelas de aire limpias en precursores (NO, NO_2 y CO el cual no se muestra) desde el sur (Valle de Cuautla-Cuernavaca, VCC) y tan lejos como el Océano Pacífico. En este caso no se exceden los dos umbrales de la norma de ozono para protección de la salud, NOM-020-SSA1-2014 (SSA, 2014).

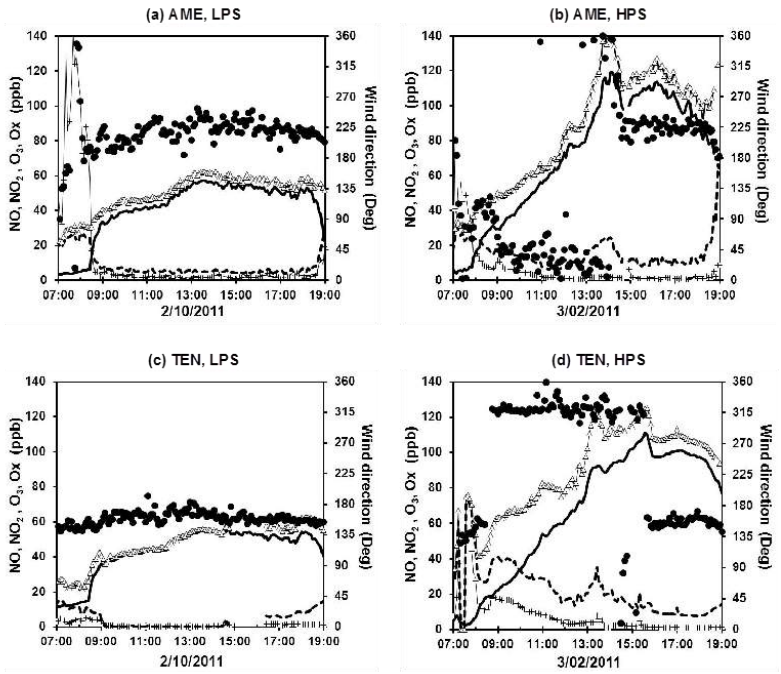


Figura 2. Perfil diurno de precursores y oxidantes O_3 y $Ox=O_3+NO_2$ para el Paso de Tenango del Aire para dos días típicos representando condiciones de baja y alta presión (Ruiz-Suárez et al., 2016).

En contraste, en condiciones de alta presión atmosférica (HPS), que corresponden al caso O_3-sur, durante la mañana el viento sopla del norte (ZMVM) y en la tarde del sur, regresando las parcelas de aire ya envejecidas fotoquímicamente y enriquecidas con emisiones del Valle Cuautla-Cuernavaca (NO_2 y CO que no se muestra). En este caso sí se exceden los dos umbrales de la norma de ozono incluso con viento del sur.

García-Yee et al (2016) mostraron que sitios periurbanos pueden comportarse como sitio urbano o como un sitio rural, dependiendo de las condiciones meteorológicas y de la hora del día. En la Figura 3, UIZ se porta igual en sistema de baja presión (LPS) o sistema de alta presión (HPS), solo cambian los máximos de NOx. TENango del Aire en LPSD es rural, mientras que bajo HP parece urbano. AMEcameca parece urbano temprano en la mañana bajo ambos sistemas, el resto del día se parece a TEN rural.

La Figura 4 muestra que durante una campaña de dos meses en el estado de Morelos (Salcedo et al., 2012), se observó que los sitios urbanos de monitoreo como CUErnavaca, en el centro de la ciudad y PREparatoria el ozono es sensible a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles. Los otros sitios, YAUtepec, CUAutla, Parque Industrial de Cuautla y JANtetelco están en situación de transición o son sensibles a los NOx.

Un estudio similar en la cuenca atmosférica Puebla-Tlaxcala (Figura 5) muestra las relaciones Ox vs. NOx para AMOZoc, CHPilo, HAQuechula, en Puebla ZaCaLTengo y CALpulalpan en Tlaxcala.

Tanto en las Figuras 3 como 5, valores altos de NOx y bajos en O_3 u Ox, que generalmente ocurren durante las mañanas indican contribuciones de emisiones locales al potencial oxidativo de la atmósfera, generalmente son sitios donde los NOx titulan el O_3 que empieza formarse y son sensibles a los COV. Valores altos de O_3 u Ox y bajos de NOx

indican zonas sensibles a NOx, generalmente el ozono es transportado de otros sitios en parcelas fotoquímicamente viejas. Este comportamiento es típicamente rural.

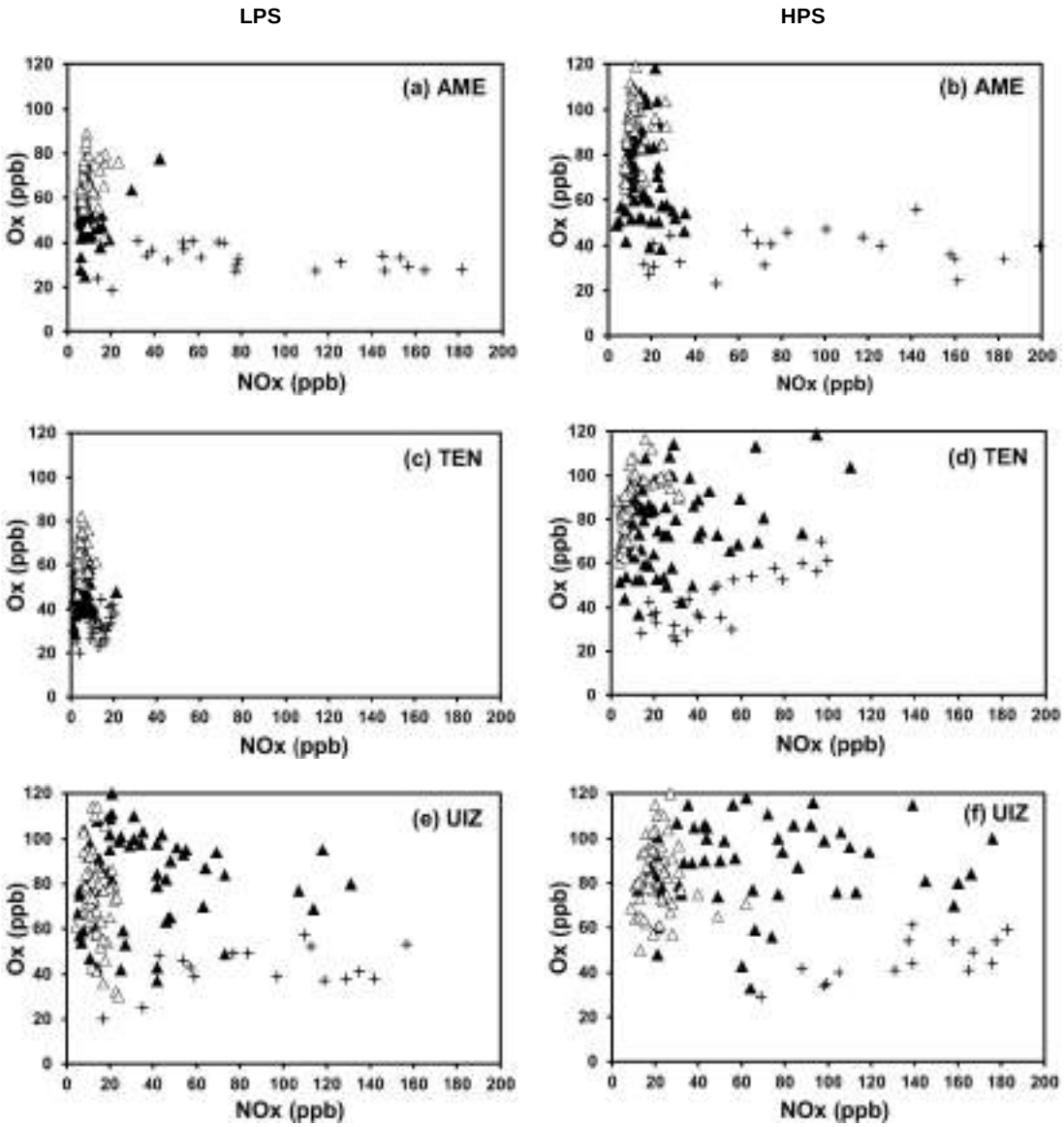


Figura 3. Relaciones Ox con NOx para sitios urbanos (UIZ) y periurbanos (Tenango del Aire y Amecameca)

mañana, muestra contribuciones locales a Ox, donde $Ox=O_3+NO_2$, indicando un carácter urbano o periurbano. Aun así, la Figura 5 y la Tabla 1 muestran que Amozoc y Calpulalpan alcanzan a rebasar los valores establecidos en la NOM-020-SSA1-2014 para ozono (SSA, 2014).

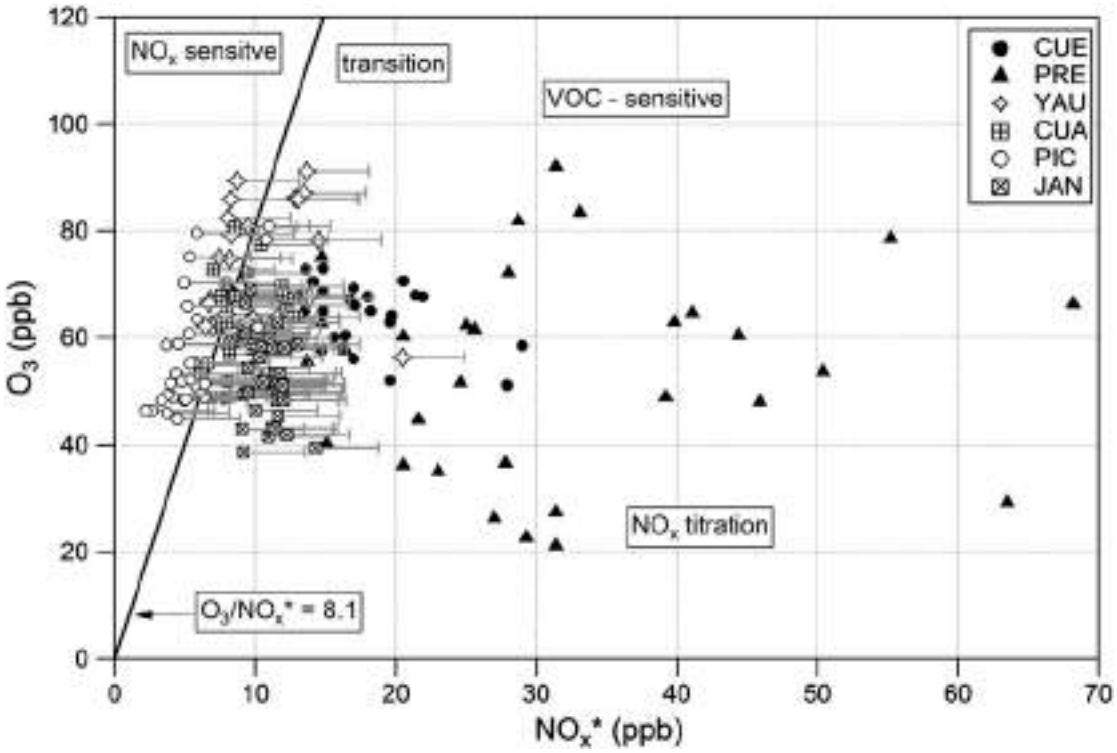


Figura 4.- Relaciones O3 vrs NOx* (proxi de NOy), en varios sitios de monitoreo en Morelos durante CARIEM, Feb-Mar 2009. ; CUErnavaca centro; PREpa 1; YAUtepec; CUAutla; Parque Ind. Cuautla (Salcedo et al., 2012)

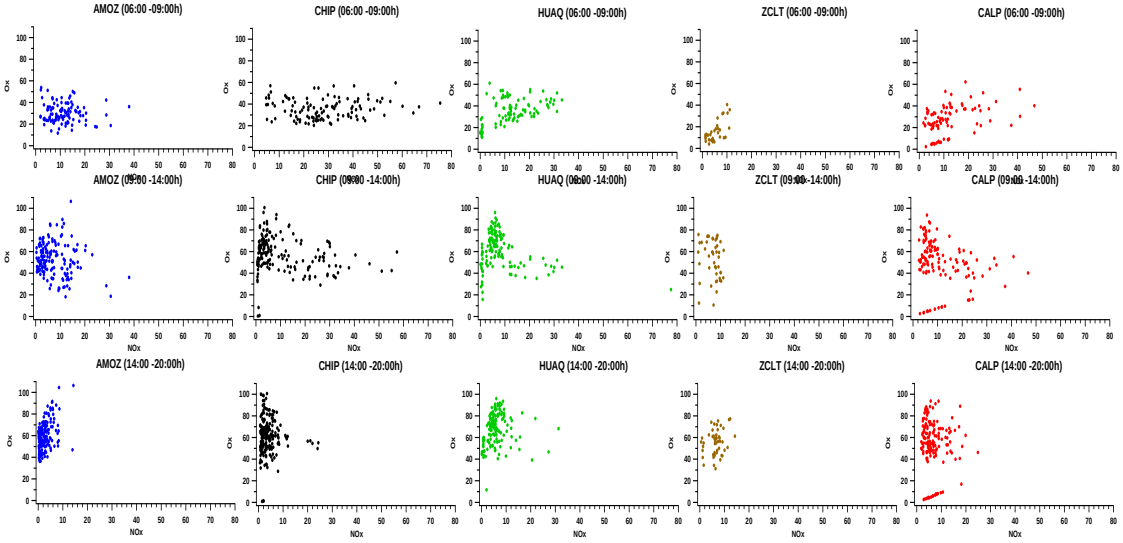


Figura 5.- Correlaciones Ox vrs NOx en varios sitios de la cuenca Puebla-Tlaxcala. AMOzoc, CHIPilo, HUAQuechula, ZalCaLTenango y CALpulalpan

En la Tabla 1 Se muestran estadísticas básicas de las observaciones realizadas en sitios periurbano y rurales en partes de la región CAMe. En el Estado de México en el Paso

de Tenango del Aire (febrero-marzo 2011) y en la Cuenca Puebla-Tlaxcala (Marzo-Abril 2012) En el estado de Puebla sólo Chipilo, localidad cercana a Puebla, y viento abajo de la misma muestra estadísticas básicas similares a las observadas en los sitios periurbanos de Estado de México. Las observaciones se realizaron durante un mes. Puede observarse que esos sitios, incluso los netamente rurales no están exentos de niveles nocivos de ozono. Como puede verse, las observaciones en estos sitios rurales y periurbanos son muy valiosas para evaluar inventarios de emisiones a escala local o regional.

Se puede concluir que en la región de la Megalópolis se cuenta con alguna información sobre la química atmosférica y el intercambio de contaminantes entre las cuencas atmosféricas que la conforman, pero que no es suficiente para construir una estrategia de prevención y control a largo plazo y que es importante iniciar y sostener el monitoreo en sitios rurales y periurbanos y diseñar políticas públicas para también reducir el ozono en esas zonas, lo que también beneficiará el rendimiento de cultivos y la salud de ANP.

Tabla 1. Estadísticos básicos de calidad del aire en sitios rurales y periurbanos en Estado de México, Puebla y Tlaxcala, el sitio urbano UAM-Iztapalapa en CdMx se incluye con fines de comparación.

O_3		AMECAMECA	TENANGO	OZUUMBA	UIZ	CHIPILO	HUAQUECHULA	AMOZOC	CALPULALPAN	ZACALTENGO
Promedio horario		35	41	32	34	41	46	40	40	33
Máximo horario		104	105	101	136	100	91	97	88	75
Número de horas > 95 ppb promedio horario (Secretaría de Salud, 2014)		9	6	1	26	5	0	1	0	0
Máximo del promedio móvil de 8 horas,		93	94	71	106	93	91	84	80	68
Número de horas > 70 ppb Promedio móvil de 8 horas (Secretaría de Salud, 2014)		47	31	9	66	39	52	13	36	0
Número de horas > 50 ppb promedio móvil de 8 horas (Organización Mundial de la Salud, 2006)		161	175	104	159	216	264	191	175	84
NO	Promedio horario	18	4	---	35	4	1	1	2	2
	Máximo horario	251	55	---	279	57	75	17	24	6
NO_2	Promedio horario	18	11	---	35	8	7	6	7	4
	Máximo horario	58	55	---	98	36	29	25	37	8

3. Transporte de contaminantes entre cuencas

Caetano y Magaña (2007) identificaron las cuencas atmosféricas en el centro de México mediante una análisis de transporte de partículas inertes con un modelo meteorológico de mesoescala (MM5). Por su parte García Reynoso et al (2009) brindo información detallada sobre el uso del modelo de calidad del aire MCCM para identificar cuencas atmosféricas alrededor de la ZMVM y estimar su capacidad de transporte de diferentes contaminantes. El modelo también fue utilizado para caracterizar el transporte y la interacción de diferentes cuencas atmosféricas que están en cercanía una con la otra. Los resultados de estos dos estudios son comparables. Los campos de concentración de ozono de García Reynoso, que delimitan la interacción de las cuencas atmosféricas en el centro de México, y que contienen a la Megalópolis de México, contienen también los campos de transporte de partículas inertes de Cateano y Magaña. Esto es, el área de influencia de las zonas metropolitanas es más amplio cuando se consideran contaminantes secundarios como ozono, que cuando solo se consideran contaminantes primarios, que serían equivalentes a las partículas inertes de Caetano y Magaña. Estos dos estudios constituyen antecedentes de la Megalópolis de México

Recientemente, el INECC encomendó al Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM (INECC, 2014, 2015) un estudio para caracterizar la región centro del país. El estudio analizó la climatología de las trayectorias en superficie en la vecindad de las zonas urbanas de la ciudad de México, Pachuca, Toluca, Cuernavaca-Cuautla y Puebla-Tlaxcala. En la Figura 6 se observa que la zona centro-norte de la CdMx es una zona de convergencia (líneas rojas) y convección (círculo rojo).

Para el mes de marzo de 2010 se observan convergencias en el Valle de México por la madrugada, localizadas al pie de la Sierra de las Cruces y el Ajusco y a lo largo de una línea que va de la Sierra de las cruces hacia el noreste. Durante el día continúa observándose la convergencia al pie de la Sierra de la Cruces y una zona de convección en el centro-norte del DF. A través del paso de Tenango del Aire dominan los vientos de Morelos hacia el Estado de México en su sector oriental, siendo más intensos estos flujos a las 18:00 horas GMT (12:00 hora local).

En la zona urbana Puebla-Tlaxcala los vientos cambian de dirección a lo largo del día: siendo hacia el sur y suroeste en la madrugada (12:00 hora GMT). Al pie oriental de la Sierra Nevada se observa una línea de convergencia. En Toluca se observa una línea de convergencia sobre la zona urbana que se desplaza hacia el suroeste-noreste a lo largo del día. En Cuernavaca los vientos están dominados por la señal diurna con brisas del Valle y de Montaña.

En el mes de septiembre de 2010 los patrones fueron muy diferentes a los de marzo de ese año, los flujos a través de Tenango del Aire son predominantemente hacia Morelos, se observa una zona frontal al pie occidental de la Sierra nevada en el Valle de México y otra al pie occidental de la Sierra de las Cruces. En el Valle de México se observa una zona de convergencia y una zona de convección en el centro-norte de la CdMx. En Morelos y en particular la zona de Cuernavaca está dominada por el ciclo diurno y la brisa valle-montaña hacia la Sierra del Ajusco-Chichinautzin.

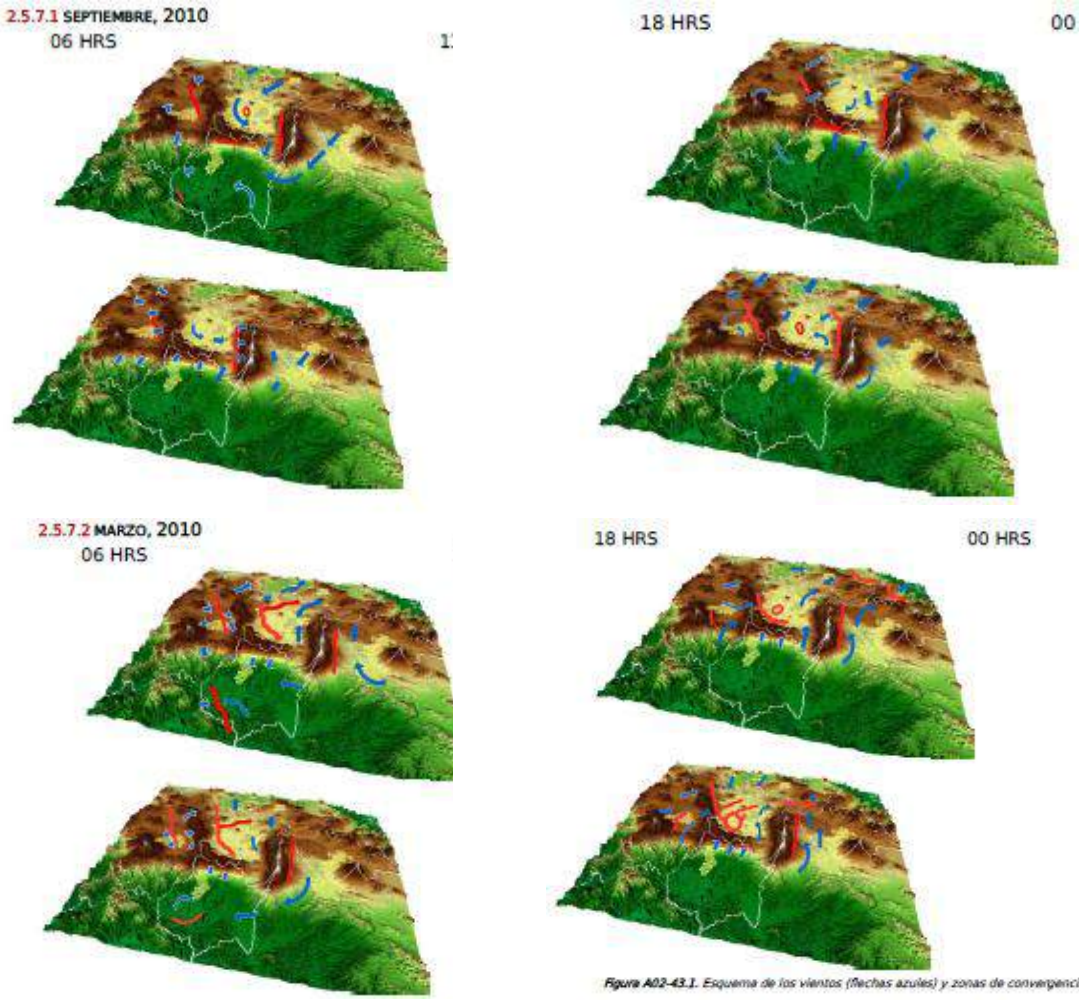


Figura 6.- Patrones de viento medio estacional a las 06,12,18 y 00 horas para marzo y septiembre (INECC, 2014)

El análisis realizado con cuatro años de simulaciones numéricas, con salidas horarias muestra que los vientos en superficie y en niveles bajos sobre la meseta central y los Valles de Cuernavaca-Cuautla son sumamente complejos. Mientras que, en niveles altos, a más de 3,000 m sobre el nivel del mar los vientos tienen una dirección e intensidad bastante similar en las localidades de la CRCM, en niveles bajos y en superficie los vientos son muy variables de una región a otra y a lo largo del ciclo diurno. Son varios los procesos que van afectando a los vientos en niveles bajos y se requieren estudios detallados para conocer los términos dominantes en cada región.

Es de esperarse que las brisas valle-montaña y montaña-valle, los gradientes de presión causados por diferencias de densidad reforzados por la variación del uso del suelo, las zonas de convergencia y convección y las restricciones orográficas sean factores fundamentales. También la interacción con la orografía de la meseta central de diferentes sistemas meteorológicos provenientes del Pacífico y del Golfo de México.

Los vientos en niveles altos tuvieron dirección opuesta en marzo de 2010 y en septiembre de 2010, siendo predominantemente del oeste en marzo y del este en septiembre. En marzo, la circulación en altura (500 hPa) está dominada por un patrón ciclónico sobre el sur de los Estados Unidos y en ocasiones un sistema de anticiclónico sobre el sur de México y/o Centroamérica. Estos patrones se modifican dependiendo del desplazamiento norte-sur y este-oeste de estos sistemas y de su intensidad. Se verificó que estos patrones también se observaron en los años 2011-2013.

En septiembre los vientos se ven afectados por la presencia de ciclones tropicales, por ejemplo, la presencia de un ciclón en la Bahía del Campeche en el Golfo de México provocó vientos del norte el día 16 de septiembre de 2010. La meseta central también se ve afectada por la llegada de frentes fríos que penetran hacia el sur en el Golfo de México, como ocurrió a finales de septiembre de 2010, aunque en esa ocasión también influyó en la región un ciclón sobre la península de Yucatán.

En superficie los vientos se ven influenciados tanto por lo que ocurre en altura como por los procesos cercanos a la superficie y la orografía. En este estudio se encontró que algunas regiones tienen más influencia de las variaciones en altura que otras, pero la respuesta es diferente cuando ocurren diferentes perturbaciones.

Aunque la respuesta a cambios en la intensidad y dirección de los vientos en altura varía dependiendo de las características del evento, en general Cuernavaca es el sitio con menor influencia, manteniendo su patrón diurno con poca variación. Tenango del Aire y Amecameca, así como Puebla-Tlaxcala también tuvieron poca respuesta a vientos de altura, Toluca y Aeropuerto respondieron a eventos con vientos de suroeste. En septiembre, Cuernavaca mantuvo poca respuesta a cambios en los vientos en altura y el resto de los sitios analizados presentaron cambios importantes en sus vientos cuando variaron los vientos en altura. En particular el Paso de Tenango del Aire, aunque casi no presentó variaciones en marzo, presenta cambios importantes de dirección según los vientos en escala sinóptica, pero manteniendo la modulación del ciclo diurno.

La ZMVM exporta partículas hacia el norte (Estado de México e Hidalgo) entre enero y marzo, hacia el estado de Morelos en mayo, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, hacia el este del Estado de México (Valle de Toluca) de septiembre a diciembre; en mayo permanecen en el Valle de México y zonas aledañas. Toluca exporta hacia Zumpango y CdMx, en septiembre-diciembre hacia el oeste del Ajusco.

Cuernavaca-Cuautla exportan hacia la ZMVM a través de la Sierra del Chichinautzin y el Paso de Tenango del Aire y hacia el Valle de Toluca a través del Paso de Tenango del Valle.

Pachuca exporta hacia el este del Estado de México, a través del corredor Texcoco-Amecameca y Ozumba, principalmente entre junio y diciembre.

Puebla-Tlaxcala exporta hacia el norte del estado de Puebla en enero-abril y noviembre-diciembre, mientras que lo hace hacia la frontera con Morelos en enero, hacia San Martín Texmelucan en enero-abril, en mayo hacia el suroeste, hacia el Valle de México a través del Paso de Tenango del Aire en junio-septiembre.

Las cuencas como tradicionalmente se han concebido, con base a los valles y las serranías, se ratifican del análisis de los patrones de viento, los cálculos de la divergencia y los intercambios de partículas.

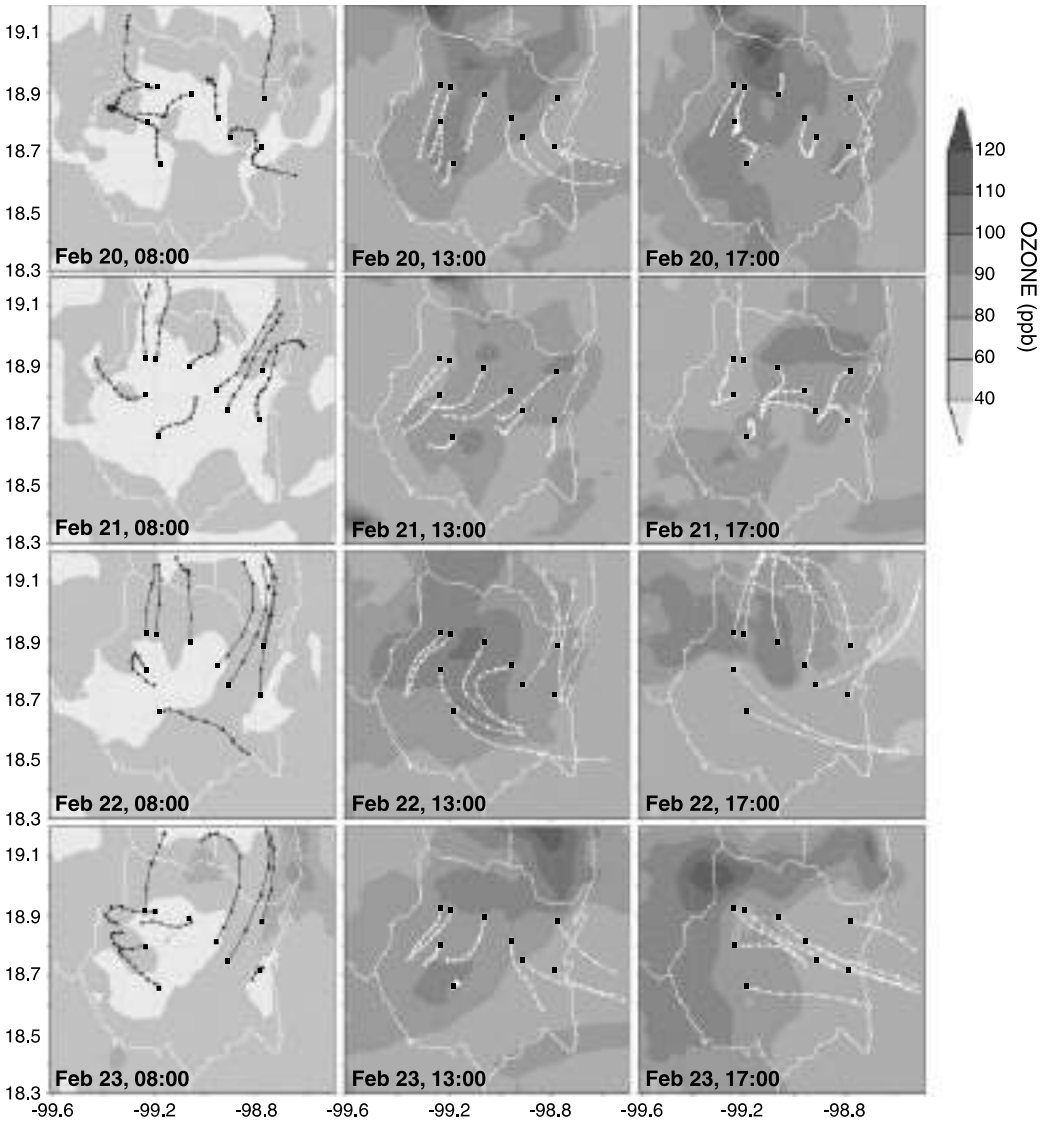


Figura 7.- Ozono y retro trayectorias de 9 horas en Morelos durante cuatro días, de lacampaña CARIEM 2009, Febrero-Marzo (Salcedo et al., 2012).

Se puede definir que la cuenca de la ZMVM está delimitada al sur por la Sierra del Ajusco- Chichinautzin, al oeste por la Sierra de las Cruces y al oriente por la Sierra Nevada. Al norte su delimitación es más difusa pues los intercambios de parcelas de aire se extienden hasta el estado de Hidalgo.

El valle de Toluca está incluido en otra cuenca delimitada al oriente por la Sierra de las Cruces, al sur por el Paso de Tenango del Valle sobre la serranía que une al Ajusco con el Nevado de Toluca y al norte por serranías discontinuas.

La zona urbana de Puebla-Tlaxcala se encuentra en otra cuenca delimitada al oeste por la Sierra Nevada y hacia el norte por las sierras ubicadas al norte de Tlaxcala. Hacia el este está la dominante presencia de la Malinche. Al sur no hay una delimitación precisa.

Cuernavaca se ubica en una región delimitada al norte por la Sierra del Ajusco-Chichinautzin, al este por la serranía del Cañón de Lobos que la separa del Valle de Cuautla. Estos dos valles, temprano en la mañana, con la capa de mezcla todavía a baja altura parecen dos cuencas atmosféricas bien delimitadas. Conforme avanza el día y la capa de mezcla se eleva esa separación desaparece. Intercambian parcelas de aire con el Valle de México a través del Paso de Tenango de Aire. En otras direcciones se encuentra poco delimitada por serranías hacia Guerrero. Los valles de Cuernavaca y Cuautla son el inicio de la Depresión del Rio Balsas

Aún bajo la influencia de los patrones sinópticos que modifican los patrones estacionales, debido a la compleja orografía y fuertes contrastes térmicos a lo largo del día, el patrón del comportamiento del viento cambia notablemente, dando lugar a un intercambio de masas de aire entre las cuencas atmosféricas adyacentes, en la Figura 7 se presenta el caso del Valle de Cuautla-Cuernavaca a lo largo de cuatro días, de febrero 20-23 en 2009 (Salcedo et al., 2012). El ozono es trasportado entre las cuencas atmosféricas de los Valles de Cuernavaca-Cuautla, El Valle de Toluca, el Valle de México y la Cuenca de Puebla-Tlaxcala.

3.1. Recomendaciones

Salta a la vista que en esta sección no se discuten los niveles de oxidantes ni la reactividad del aerosol fotoquímico en el Valle de Toluca, que la información es todavía muy limitada en Morelos y en la región Puebla-Tlaxcala, así como Pachuca. Por su parte, La región Tula-Tepeji ha sido estudiada casi siempre en relación a su efecto sobre la ZMVM (Almanza et al., 2012; Escalante García et al., 2014; Rivera et al., 2009; Sosa et al., 2013) , pero su calidad del aire no se ha caracterizado lo suficiente en relación la salud y bienestar de sus habitantes, o sobre su efecto en la calidad del aire de otras zonas vecinas aparte de la ZMVM.

Se recomienda realizar un esfuerzo para caracterizar la calidad del aire en todas las cuencas atmosféricas que contienen a la región CAMe y su área de influencia y que han sido muy poco estudiadas. Ante la ausencia de series de tiempo de largo aliento, y el limitado número de parámetros observados, se recomienda realizar campañas intensivas con todos los recursos que se puedan convocar. Combinando los recursos humanos e instrumentales de las universidades e instituciones de investigación, así como las dependencias de gobierno en cargo de la calidad del aire, se pueden realizar tales campañas siguiendo el modelo de las ya realizadas en la ZMVM y que han aportado un conocimiento muy detallado sobre ésta.

Es necesario establecer y sostener el monitoreo del transporte de contaminantes entre las cuencas atmosféricas en toda la región CAMe y su área de influencia. La calidad el aire en las ANP y las zonas agrícolas de la región debe ser también monitoreada, incluyendo el depósito de contaminantes.

Los altos niveles de oxidantes (Ox) observados en sitios periurbanos y rurales señalan la importancia de caracterizar la composición de COV en toda la región CAMe y su área de influencia.

4. VALIDACION DE INVENTARIOS DE EMISIONES

Una de las herramientas utilizadas para el desarrollo de programas de gestión de la calidad del aire es el inventario de emisiones (IE). El IE es un componente clave de cualquier programa de control de la contaminación del aire, debido a que permite identificar quiénes son los generadores de emisiones y su aporte de contaminantes a la atmósfera por sector o por fuente específica.

Incluye información sobre los tipos de fuentes de emisión, la cantidad emitida, las características temporales y espaciales de las emisiones, los procesos y en ocasiones los sistemas de control que son utilizados para su control. El uso de los inventarios de emisión permite: (1) la identificación de medidas potenciales de control y fuentes que podrían estar sujetas a control, (2) la evaluación de la efectividad de programas de control, y (3) como insumo en forma de un modelo de emisiones con alta resolución espacial y temporal acoplado a un modelo de calidad del aire.

El objetivo final de toda esta información es el desarrollo de planes para el mejoramiento de la calidad del aire en una región. De esta forma, la certidumbre del beneficio esperado de las proyecciones de la calidad del aire, resultante del uso de IE por los modelos de simulación numérica, se basa en la suposición de que estos inventarios son razonablemente completos y exactos. Sin embargo, en la mayoría de los casos la incertidumbre asociada con los inventarios de emisión no es cuantitativamente determinada, lo que demerita la confiabilidad de los planes propuestos (Fujita et al., 1992).

En esta sección se presenta la propuesta metodológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera para validar inventarios con un conjunto de herramientas disponibles en México. Se propone realizar comparaciones concurrentes e iterativas. Comparación de modelos de calidad del aire con observaciones en superficie; comparación con mediciones de columna usando métodos ópticos (Stremme et al., 2013); comparación de columna observada por satélite con columna calculada con modelo de calidad del aire y comparación de cocientes de contaminantes observados y estimados del inventario (INECC, 2014; Ruiz-Suárez et al., 2016), propuesta que se resume en la Figura 8. A continuación se describen los diferentes métodos.

4.1. Método 1

Se comparan resultados de un modelo de calidad del aire (WRF-Chem) con observaciones en superficie. En este caso particular se comparan con observaciones en sitios periurbanos a la ZMVM sobre el Paso de Tenango del Aire (García-Yee et al., 2016). Se observa que hay un problema de escasez de precursores (Figura 9). NO hay suficientes precursores para levantar la producción de ozono durante el día y para titular el ozono remanente durante la noche. El índice de concordancia muestra que durante alta presión el modelo se desempeña peor.

Luego se comparan las velocidades y direcciones del viento entre el modelo y las mediciones. Se observa que el modelo reproduce razonablemente bien las direcciones de viento (Figura 10). Cuando no hay registro de observaciones el viento está en calma.

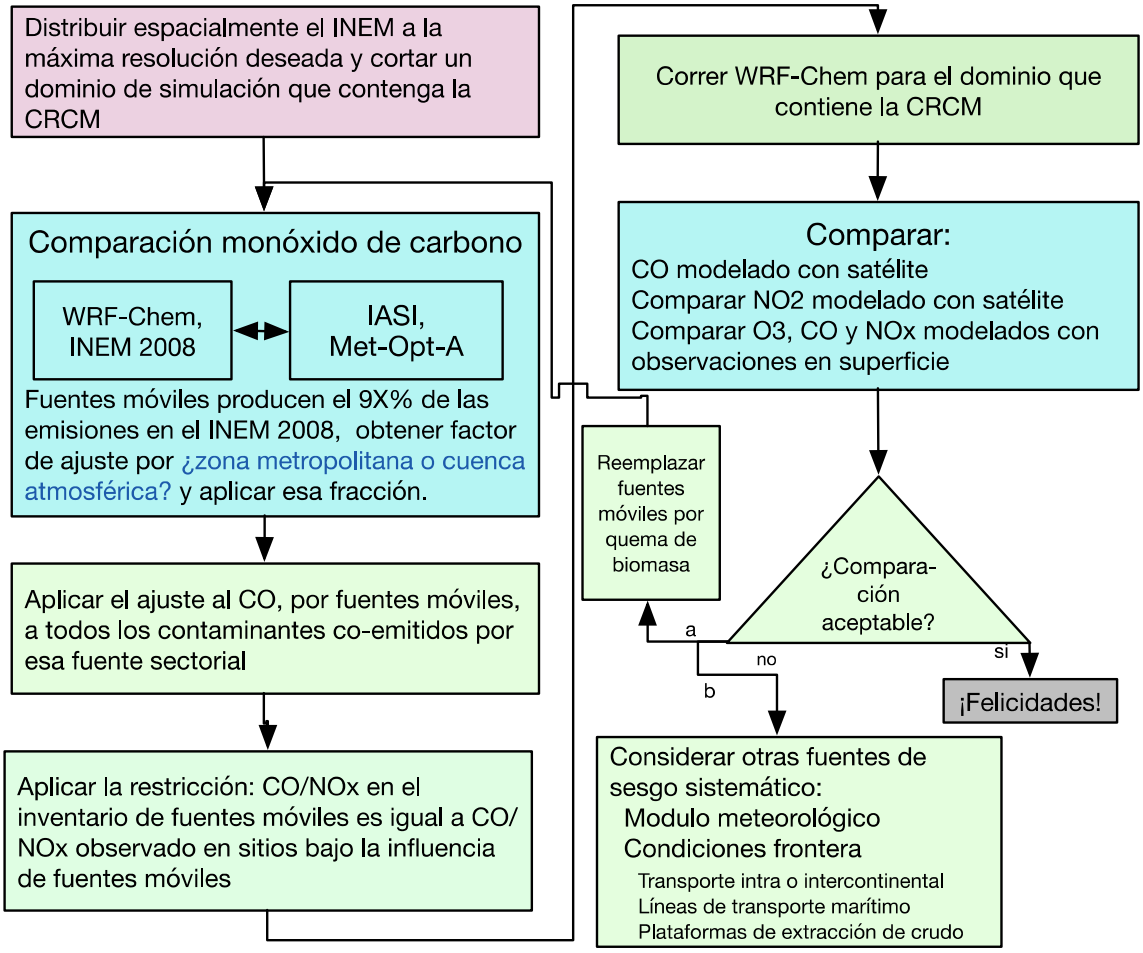


Figura 8.- Modelo de diagrama de flujo para la validación de inventarios de emisiones de alta resolución mediante el uso de observaciones y modelos, Fuente (INECC, 2014)

Se observa también que en la noche el modelo sobrestima la intensidad del viento. Las consecuencias para el modelo consisten en que temprano en la mañana al modelo le faltarán precursores para iniciar la fotoquímica. Entre 10 y 17 las comparaciones de intensidad de viento resultan aceptables.

Se obtienen luego los cocientes $CO_{observado}/CO_{modelo}$ y $NOx_{observado}/NOx_{modelo}$ (Figura 11), también se pueden obtener otros cocientes siempre que haya observaciones disponibles. Separando por segmentos del día se pueden comparar los inventarios de emisiones de la ZMVM y del VCC. Cuando el viento procede de la ZMVM las emisiones de CO y NOx pueden estar sobrestimadas por un factor cercano a 2 y cuando provienen del VCC pueden estar subestimadas por un factor de 2.5 y 3.2 respectivamente.

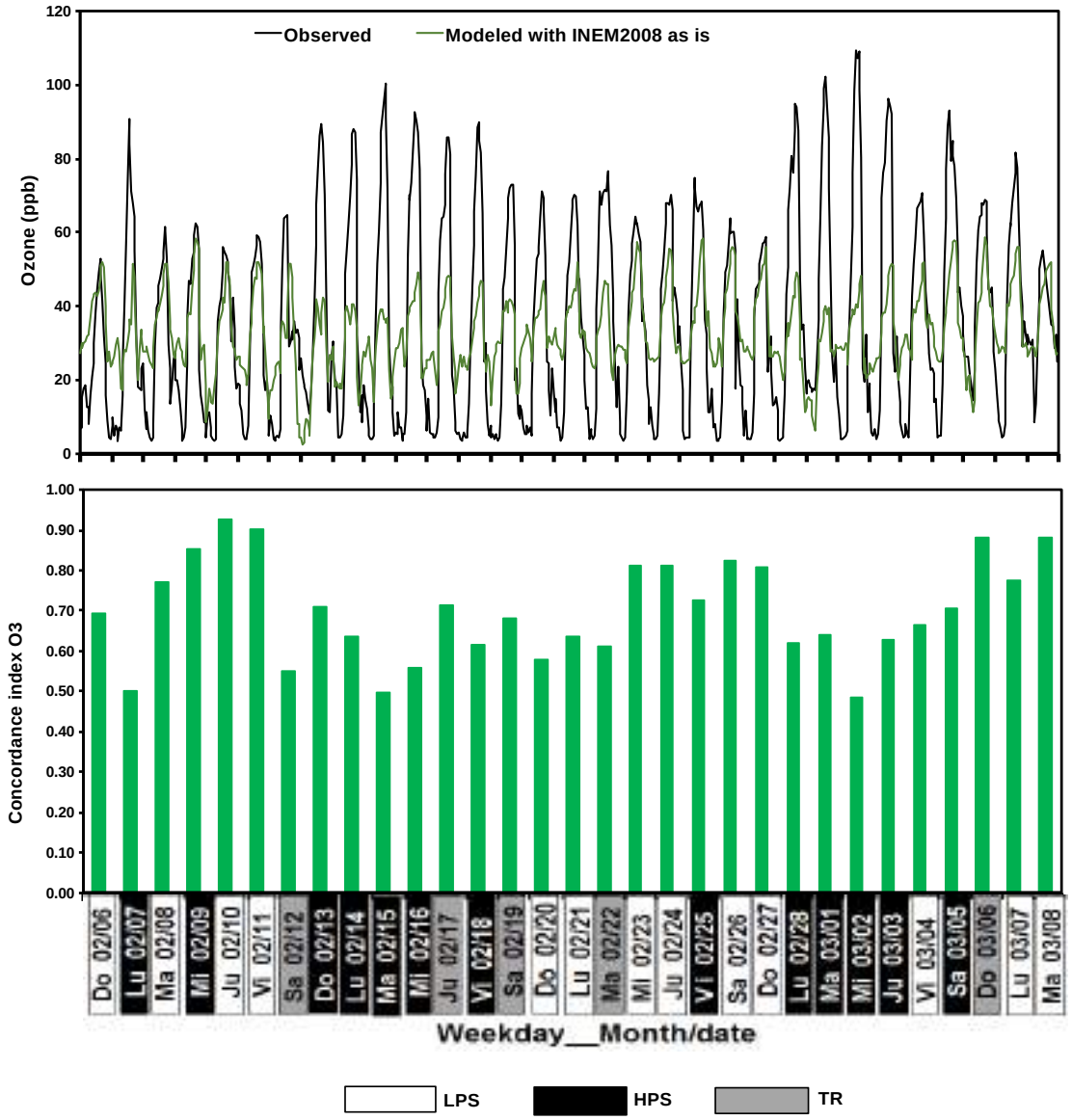


Figura 9.- Comparaciones de resultados del modelo WRF-Chem con observaciones en Amecameca entre el 2 de febrero y 3 de marzo 2011, con días clasificados en sistemas de alta y baja presión y transición. Las barras corresponden a los valores del coeficiente de concordancia entre modelo y observaciones.

4.2. Método 2

Se comparan luego las columnas de CO observadas por satélite con las reportadas por el modelo WRF-Chem (Figura 12). Resolviendo por región se puede ver que las diferencias son considerables (Tabla 2 y Figura 13). Para toda la región la subestimación del modelo es un factor de 3, pero para la ZMVM es un factor de 1.4, que se obtienen del inverso de la pendiente en la Tabla 2. Asumiendo que, en Amecameca, la mitad de los días a las 10 de la mañana, cuando pasa el satélite el viento sopla del sur y la otra mitad del norte, entonces el promedio del factor de discrepancia por la comparación con satélite es 1.75. El promedio de las discrepancias de la comparación modelo-observaciones en superficie es un factor de dos. Lo que parece ser un muy buen resultado.

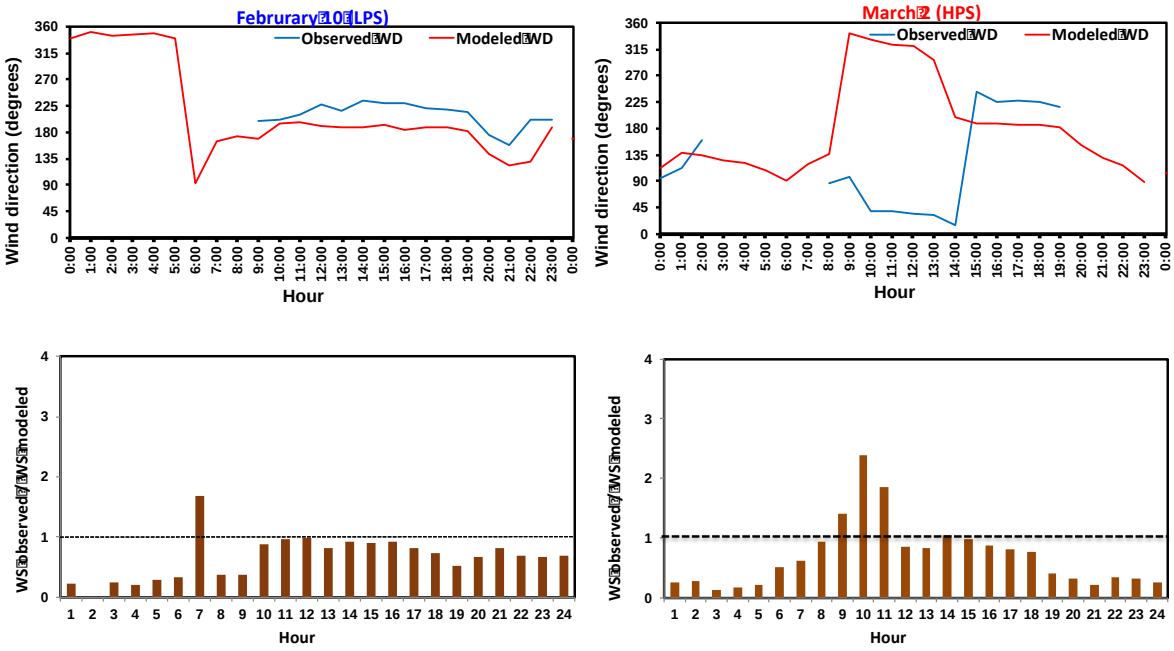


Figura 10 comparación de direcciones e intensidades de viento entre el modelo WRF-Chem y las observaciones.

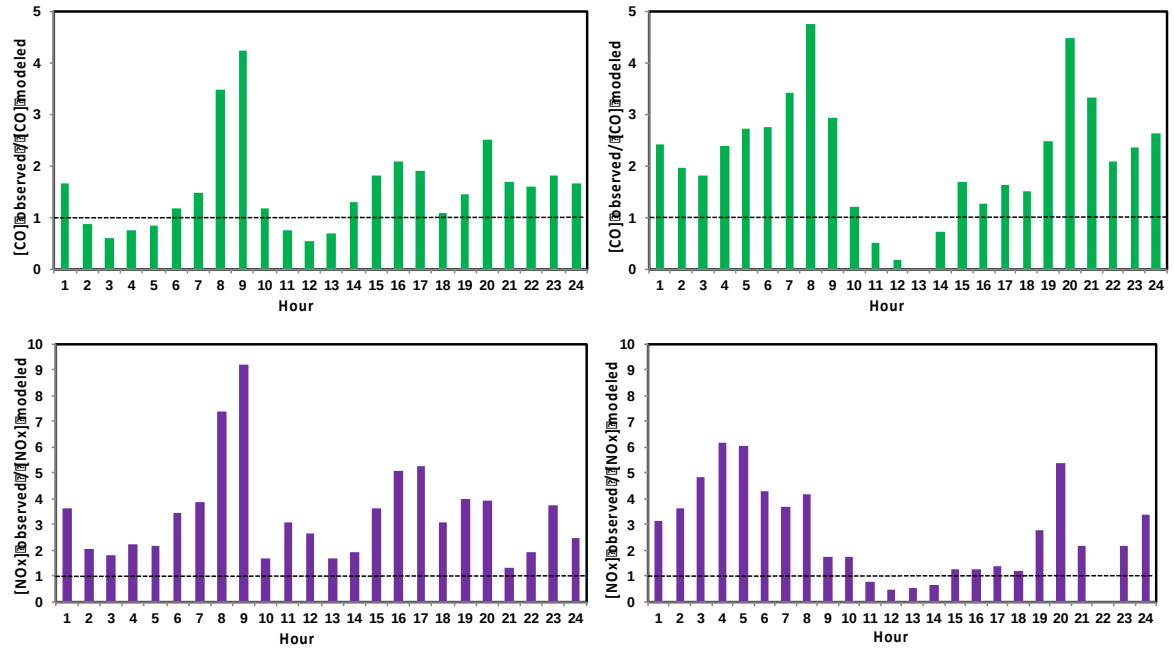


Figura 11, Cocientes entre valores observados y modelados de promedios horarios de CO y NOx.

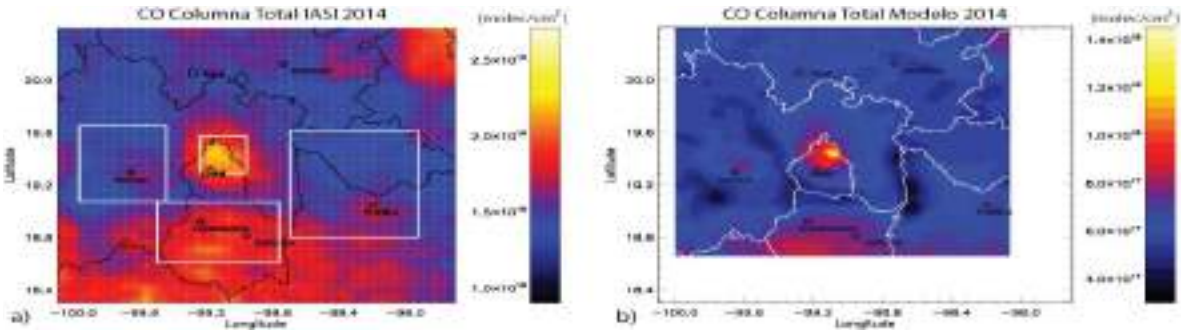


Figura 12.- Se comparan columnas de CO obtenidas por satelite (izq) y por el modelo WRF-Chem (der.).

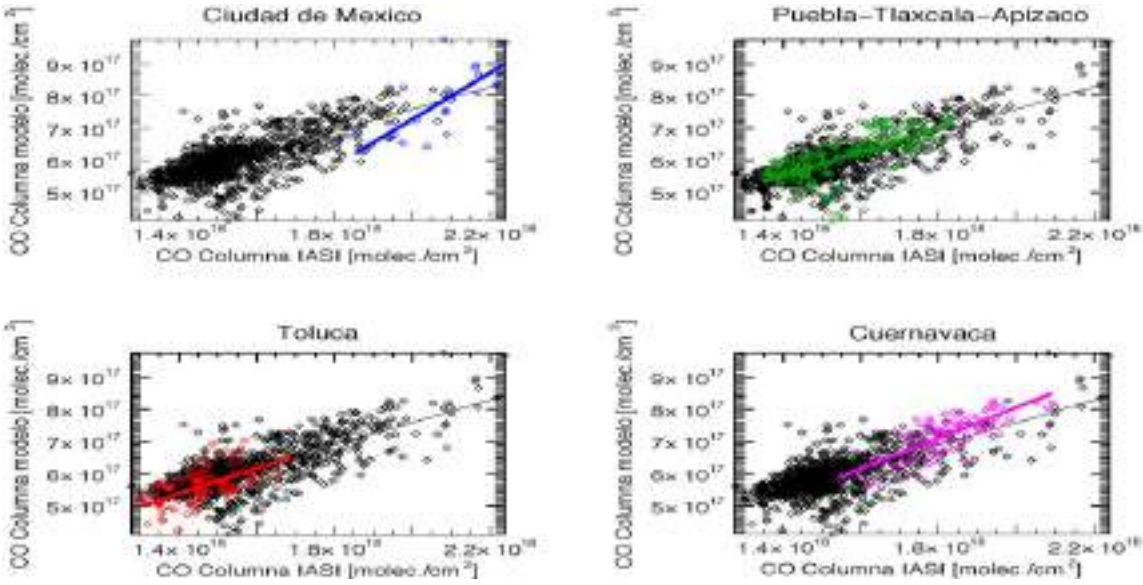


Figura 13.- Correlaciones entre columna de CO observada por satelite y del modelo WRF-Chem.

Tabla 2.- Datos de las regiones comparadas en Figura 13 y estadísticos básicos

Área	Latitud	Longitud	Coef. de correlación		Ajuste lineal	
	[grados]	[grados]	r	r²	offset	pendiente
Área completa	19.25 a 19.55	-99.25 a -98.95	0.76	0.57	6.57E+16	0.347
Ciudad de México	19.25 a 19.55	-99.25 a -98.95	0.70	0.50	-7.17E+17	0.722
Puebla-Tlax-Apiz.	18.65 a 19.60	-98.69 a -97.85	0.67	0.45	4.11E+16	0.366
Toluca	19.00 a 19.65	-100.00 a -99.45	0.60	0.36	-1.70E+16	0.396
Cuernavaca	18.50 a 19.00	-99.50 a -98.75	0.76	0.57	-1.46E+17	0.476

4.3. Método 3

Por otro lado, cualquier ajuste al inventario debe respetar los cocientes CO/NOx observados en superficie en las estaciones de monitoreo de las redes o en las campañas intensivas. La Figura 14 muestra cómo se comparan actualmente esos cocientes.

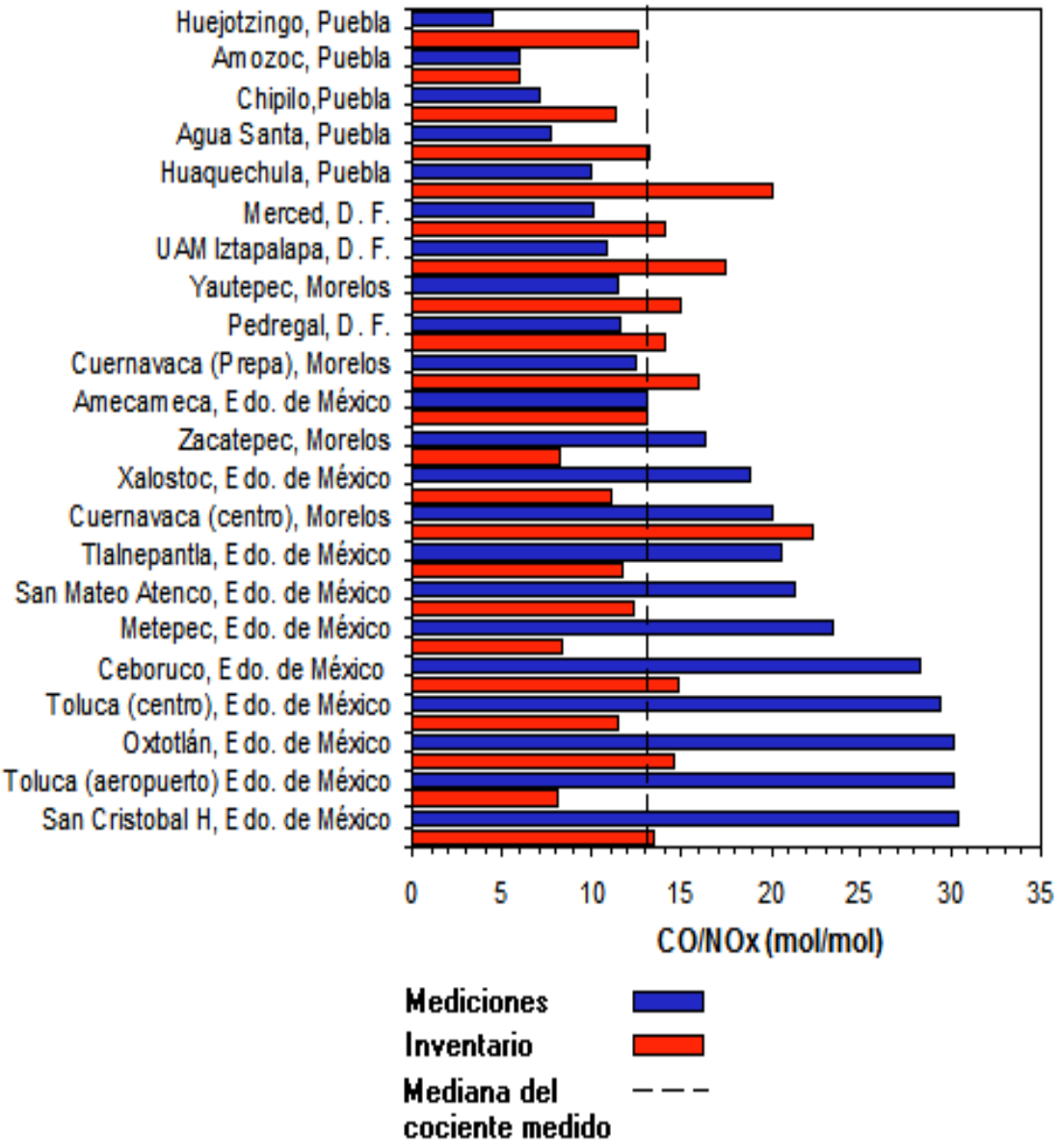


Figura 14. Cocientes CO/NOx observados y estimados del inventario de emisiones en un radio de 3 km a la redonda del sitio de monitoreo.

Los ajustes concurrentes al inventario deben respetar las restricciones impuestas por los tres métodos. Adicionalmente, es evidente, de la comparación, que el inventario de emisiones sistemáticamente sobrestima las emisiones en Puebla y las subestima en el Estado de México. Esto indica sesgos sistemáticos en sentido contrario en los inventarios de emisiones de las dos entidades y la necesidad de homologar los métodos de estimación.

4.4. Recomendaciones

Se recomienda realizar una evaluación de los métodos usados para estimar los inventarios de emisiones en todas las entidades que participan en la CAMe y homologar los métodos.

Se recomienda promover la creación de un sistema megalopolitano de inventarios de emisiones, el cual podría servir como prototipo de un sistema nacional de inventarios de emisiones.

El sistema de inventarios de emisiones debe contemplar la validación del inventario siguiendo buenas prácticas. Por ejemplo, las recomendadas por el IPCC para los inventarios nacionales de emisiones de GEI.

El sistema de inventarios de emisiones debe contemplar el desarrollo del modelo de inventarios de emisiones de alta resolución espacial y temporal.

El calendario del sistema de inventarios de emisiones debe contemplar actividades para evaluar y mejorar el inventario como parte integral de programa de actividades.

5. Emisiones de partículas por erosión eólica y vulcanismo

5.1. Erosión eólica

Históricamente se ha considerado que el lago de Texcoco es la fuente principal de emisiones de partículas suspendidas de origen mineral que afectan la ZMVM (Jáuregui, 1989; López et al., 1970). Estudios recientes (Díaz-Nigenda et al., 2010; Sheinbaum Pardo et al., 2014) muestran que otros dos sitios son fuente importante. La zona agrícola al norte de la ZMVM y la zona agrícola entre Chalco y Tenango del Aire (Fig. 15). Contrario al consenso habitual, Tenango del Aire resultó ser la zona que más impacta sobe los habitantes de La ZMVM.

A esta conclusión se llegó mediante el uso de modelos acoplados de calidad del aire y de erosión eólica, diseñados para estudiar la conservación de suelos y la desertificación. La erosión eólica se incrementa con la intensidad del viento y su dirección, relativa a algunos rasgos del suelo como la orientación de los surcos en suelos agrícolas. La atomización y abandono de suelos agrícolas provocado por la expansión periurbana también contribuye incrementar las emisiones.

Este resultado puede ser consecuencia de las medidas para reducir las emisiones de polvo en el lecho seco del Lago de Texcoco, estas incluyeron; la recuperación parcial del lago al construir el lago Nabor Carrillo y plantar vegetación adecuada al suelo y clima locales (Sánchez, 2007). Estas intervenciones redujeron notablemente los problemas de tormentas de polvo, pero como se muestra en la Figura 16, el Lago de Texcoco todavía es una fuente importante de PM10, pero que afecta más a los habitantes del norte este de la ZMVM. Por otro lado, Tenango del Aire-Chalco afecta la parte sur, sureste y centro de la ZMVM. Se observa en la figura 16 cómo las nubes de PM10 son algo estrechas y ligeros cambios en la dirección del viento pueden tener un fuerte efecto sobre las concentraciones en sitios específicos y que estaciones de monitoreo son capaces de detectar el episodio.

Figura 15. Zonas agrícolas y periurbanas: Norte, Texcoco y Tenango del Aire, fuentes de PM10 por erosión eólica.

Comparando cuatro escenarios para evaluar el impacto de mitigar emisiones en las tres zonas fuente mencionadas (Fig. 15), se observó que el cambio de cobertura en la ZFLT, modula la temperatura superficial en zonas densamente pobladas de la ZMVM, lo que puede modificar las líneas de flujo de viento provenientes del Paso de Tenango del Aire. Los escenarios a modelar fueron: escenario E1, los tres sitios activos; escenario E2, se desactiva Texcoco; escenario E3 se desactiva Tenango del Aire-Chalco; escenario E4 se desactiva la zona agrícola al norte. SE agrego luego un escenario E5 que consiste en implantar en la parte federal del lago de Texcoco una zona urbana, lo que sería equivalente a tener ya construido el NAICM.

Al desactivarse Texcoco, ya sea por humedecer el suelo como en E1 o por E5, se observa también una consecuencia inesperada. Esta consiste en un desplazamiento de las parcelas de aire cargadas de PM_{10} provenientes de Tenango del Aire-Chalco hacia zonas más densamente pobladas de la ZMVM (Fig. 17). Para mitigar el efecto del NAICM en los campos de viento superficial y los niveles de PM10 por erosión eólica en partes densamente pobladas de la ZMVM, habrá que intervenir en Tenango del Aire-Chalco para reducir sus emisiones.

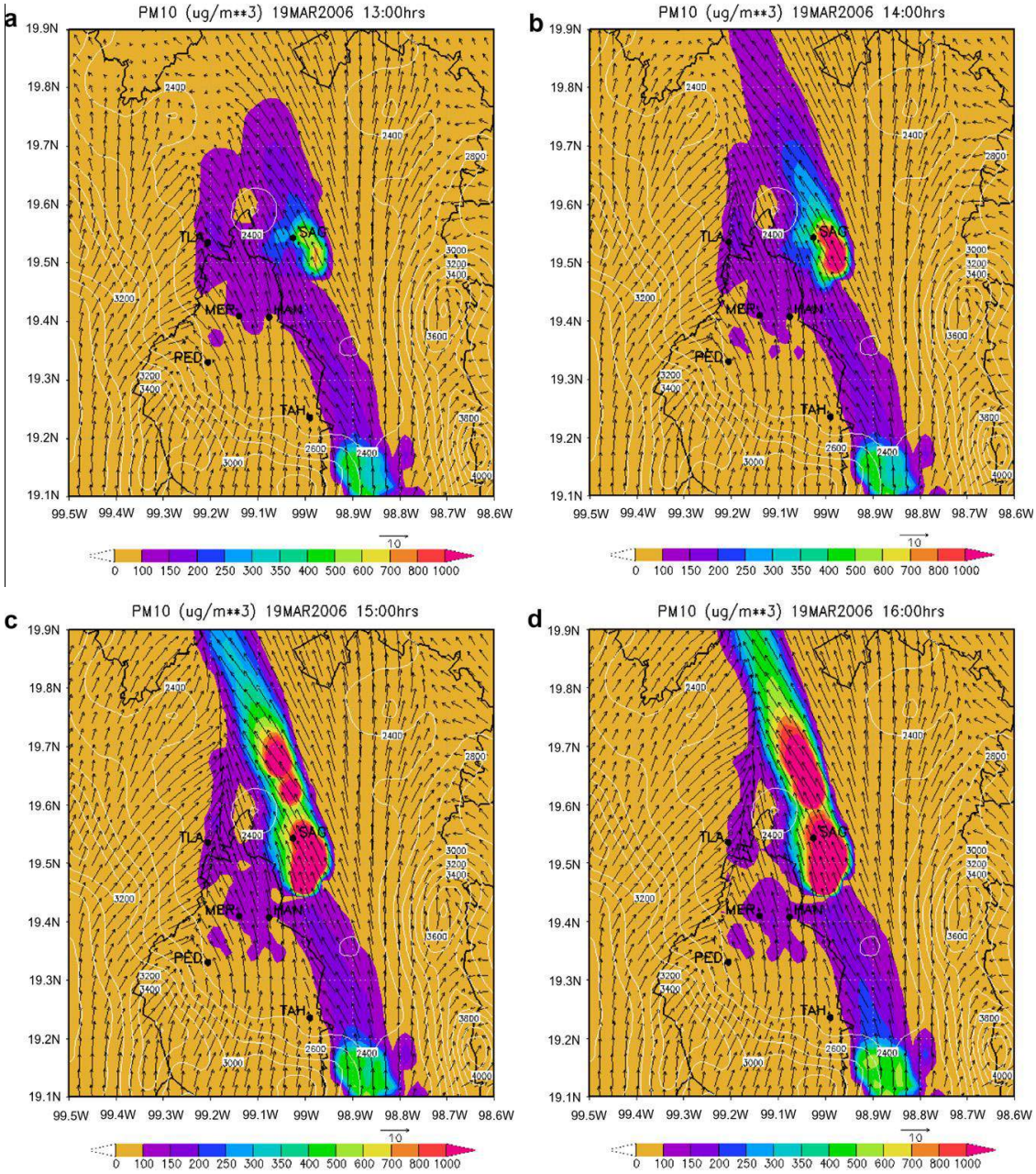
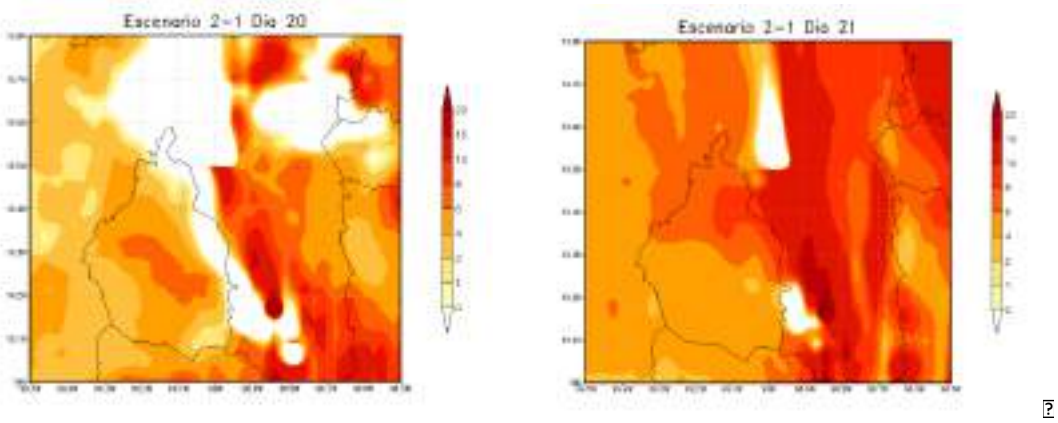


Figura 16. Campos de concentración de PM_{10} y líneas de flujo de viento en superficie en el Valle de México para episodio de PM10 en marzo 2006 durante MILAGRO. (Díaz-Nigenda et al., 2010)

Otros sitios en la región CAMe pueden compartir las condiciones que hacen de Tenango del Aire una fuente tan importante de partículas suspendidas, por ejemplo, Tenango de Valle al sur del Valle de Toluca y los municipios de Amanalco y Villa Victoria al oeste del mismo Valle.



(a) (b)

Figura 17.- Diferencia de concentraciones superficiales modeladas de PM_{10} en (a) el 20 de junio y en (b) para el 21 de junio, 2011. Nótese como la diferencia abarca zonas densamente pobladas de la ZMVM.

Los modelos acoplados (MCCM/WEPS) lograron explicar el origen de las parcelas de aire cargadas de partículas suspendidas en los episodios de precontingencia de PM10 en la ZMVM simulados numéricamente. Estos modelos acoplados pueden también evaluar escenarios de mitigación como prácticas agrícolas alternativas, programas de recuperación de suelos abandonados como nuevos cultivos o áreas recreativas. Pueden también aplicarse para estimar relaciones costo/beneficio de programas de mitigación de emisiones de partículas suspendidas, acoplados con programas de conservación y recuperación de suelos.

5.2. Influencia de Ceniza Volcánica

A partir de 1994 el volcán Popocatépetl ha reiniciado su actividad y alrededor de éste viven cerca de 25 millones de habitantes (Espinasa Pereña, 2012). Esto conlleva a que las emisiones de gases y partículas puedan afectar diversas zonas urbanas a su alrededor.

Por lo general, el viento en el Popocatépetl tiene una dirección hacia el este, aunque durante el verano los vientos también soplan hacia el oeste (Pozzo and Lillian, 2012), llevando así las cenizas a regiones urbanas. En algunos eventos la dispersión de cenizas ha llegado a la Ciudad de México, como fue en junio de 1997, lo que provocó el cierre temporal del aeropuerto internacional de la Ciudad de México.

Las poblaciones que han sido afectadas son Amecameca y la Ciudad de Puebla, como la de diciembre de 2005, cuando se generó una erupción que provocó una columna de ceniza de 5 km sobre el cráter.

Se han reportado múltiples exhalaciones desde el año 1994, y a partir del año 1996 al año 2012 se emplazaron 27 domos de lava en el interior del cráter; y estos emplazamientos son generalmente acompañados por eventos explosivos de destrucción.

La composición de la ceniza del volcán Popocatépetl es 65 al 68% de SiO_2, 5-6% de álcalis (óxidos de potasio y de calcio) y 3.5% de sílice libre; adicionalmente contiene azufre, manganeso, cobre, bromo, zinc y plomo en $PM_{2.5}$ (Narváez Porras and Cano Valle, 2004) Esta composición que puede ser dañina para los seres vivos.

Puede inducir una mayor susceptibilidad a una infección por *Listeria monocytogenes*, generando lo que puede dañar el tejido pulmonar. En estudios epidemiológicos se ha detectado incremento en la incidencia de fibrosis pulmonar y daños en el ADN. Ya que ciertas fibras contenidas en las rocas de origen volcánico poseen una reactividad que es similar al de las fibras de asbesto, i.e. son carcinogénicas (Rivera-Tapia et al., 2005).

En estudios relacionados a la dispersión y depósito de ceniza[2] se han elaborado mapas de riesgo anuales para el depósito de 1 kg/m^2 de ceniza. Estos mapas comprenden el periodo de mayo de 2015 a abril de 2016. Se consideran erupciones hipotéticas de 3 km, 5 km y 10 km que duran una hora y se dispersan durante 8 horas. Al tener mapas que abarcan todo un año, se puede observar a los estados de la República Mexicana que podrían tener la mayor probabilidad a estar expuestos al depósito de ceniza en un momento dado. Estos mapas se muestran a continuación

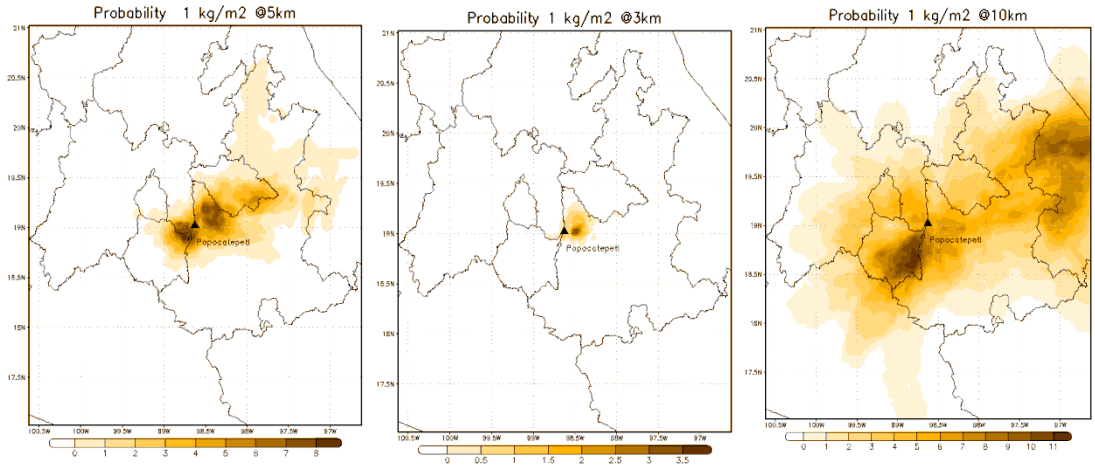


Figura 18.- Probabilidades de caída de ceniza para un período de 12 meses. Erupción con una altura de 3 km (izq.), de 5 km (centro) y de 10 km (der.) [3]

Como se puede observar de la figura 18 que una erupción de 10 km podría tener un impacto importante en las zonas urbanas que comprenden la CAMe.

5.3. Recomendaciones

Como se mostró, las fuentes naturales de partículas como la erosión eólica y erupciones pueden incrementar las concentraciones ambientales de partículas. Por lo que es importante investigar la influencia de las medidas de control de erosión y evaluar su beneficio a la salud por su reducción de concentraciones ambientales.

[2] Atlas de Riesgos del Volcán Popocatépetl actualización 2016. http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/app/BoletinPopo/BoletinPopo.php

[3] Comunicación personal de Alonso Ortega Salinas, trabajo de tesis Identificación de las Áreas de Riesgo por Depósito de Ceniza del Volcán Popocatépetl

Se prevé que la actividad intermitente del volcán continúe, por lo que es importante continuar estudiando las erupciones del Popocatépetl con el fin de poder predecir a futuro el comportamiento de las mismas y con ello desarrollar planes de acción en caso de presentarse un evento mayor.

Por otra parte, no es posible abatir las emisiones del volcán, pero si identificar las zonas de mayor probabilidad de caída de ceniza y con ello prevenir a la población por este efecto.

6. Impacto de la contaminación atmosférica en cultivos

6.1. Antecedentes

Con muchos años de retraso comparados con otros países, aún con economías menores a la nuestra, se realizó la primera estimación de los impactos de la contaminación atmosférica por ozono sobre un par de cultivos en la Corona Regional de Ciudades del Centro de México (Ruiz Suarez, 2014). El maíz se escogió por su importancia económica, y en nuestra dieta, así como por la extensión en que se cultiva. La planta del maíz es reportada como poco sensible al ozono. Para contrastar se eligió la avena por ser una planta más sensible al ozono. Las funciones exposición/respuesta se tomaron de la literatura (G. Mills et al., 2007). Las excedencias del nivel crítico AOT40 (CLRTAP, 2015) se estimaron mediante un método híbrido que permitió utilizar la escasa información sobre niveles de ozono en medios rurales en México, casi toda ella generada por investigadores del CCA-UNAM (Figura 19).

6.2. Método

El método para elaborar el mapa de excedencias se describe con detalle en otro lado (INECC, 2014), aquí se da una breve descripción. La poca información sobre niveles de ozono en ambientes rurales se divide en dos grupos. La obtenida por investigadores del CCA-UNAM mediante monitoreo pasivo se utiliza para obtener un factor de corrección para las salidas de un modelo de calidad del aire. La corrección se aplica uniformemente en todo el dominio de modelación. Se obtiene una matriz uniforme de excedencias del nivel AOT40. Para reducir la incertidumbre en zonas urbanas y su vecindad, a esta matriz se agregan, con el mismo peso, las excedencias obtenidas de las estaciones de la RAMA de la Ciudad de México y las que se pudieron rescatar del Estado de Puebla. Se obtuvo así un mapa parecido al presentado en la Figura 19. Ese mapa se vuelve a generar agregando ahora las excedencias obtenidas de las escasas mediciones rurales y periurbanas obtenidas también por investigadores del CCA-UNAM en campañas intensivas usando unidades móviles. De manera sistemática, el nuevo mapa muestra que, al agregar esta información, el área donde se localizan esas estaciones muestra excedencias más grandes.

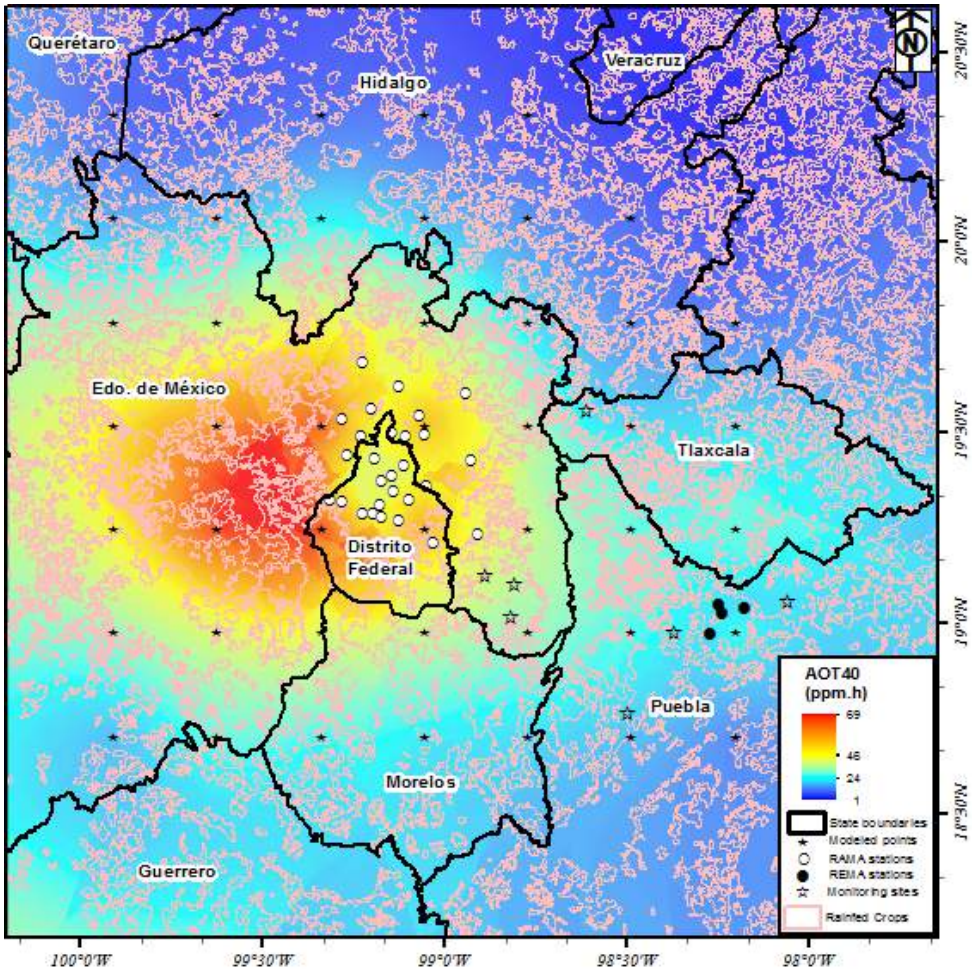


Figura 19- Mapa híbrido de excedencias del nivel crítico AOT40 para el centro de México par la temporada junio-septiembre 2011. Contiene puntos de resultados del modelo WRF-Chem, sitios de estaciones de monitoreo urbanos, y algunos sitios de campañas intensivas en áreas rurales y periurbanas.

Esto último demuestra que el mapa de excedencias así obtenido, es una subestimación de los niveles de concentración de ozono al que están expuestos los cultivo y bosques de la CRCM. Les corresponde a los tomadores de decisiones y a los productores afectados decidir si los subestimados impactos económicos, derivados de esa subestimada exposición ameritan decisiones de política pública para reducirlos.

La superficie interpolada del indicador AOT40 fue intersectada con las capas de municipios y uso de suelo (cultivos de riego), para así calcular el promedio de AOT40 de las celdas que cubren el área de cultivos en cada municipio.

Se utilizaron las funciones compiladas por Mills et al. (2007), las cuales dan una relación lineal Exposición-Respuesta como una función de la métrica AOT40 para los cultivos considerados (Tabla 3).

Tabla 3. Funciones exposición-respuesta al ozono de varios cultivos de importancia económica en el centro de México. Mills et al. (2007)

Cultivo	*RY*= rendimiento relativo, *x*=AOT40 [ppm-h]
maíz	*RY*= -0.0036*x* + 1.02
avena	*RY*= -0.0097*x* + 0.997
frijol (Familia *Poaceae*)	*RY*= -0.0165*x* + 0.96 (por similitud de familia)
sorgo (Familia *Fabaceae*)	*RY*= -0.0161*x* + 0.99 (por similitud de familia)

La gráfica siguiente muestra la comparación de la sensibilidad a la exposición del ozono (AOT40) de los cultivos analizados, siendo el maíz el menos sensible y el frijol y el sorgo altamente sensibles.

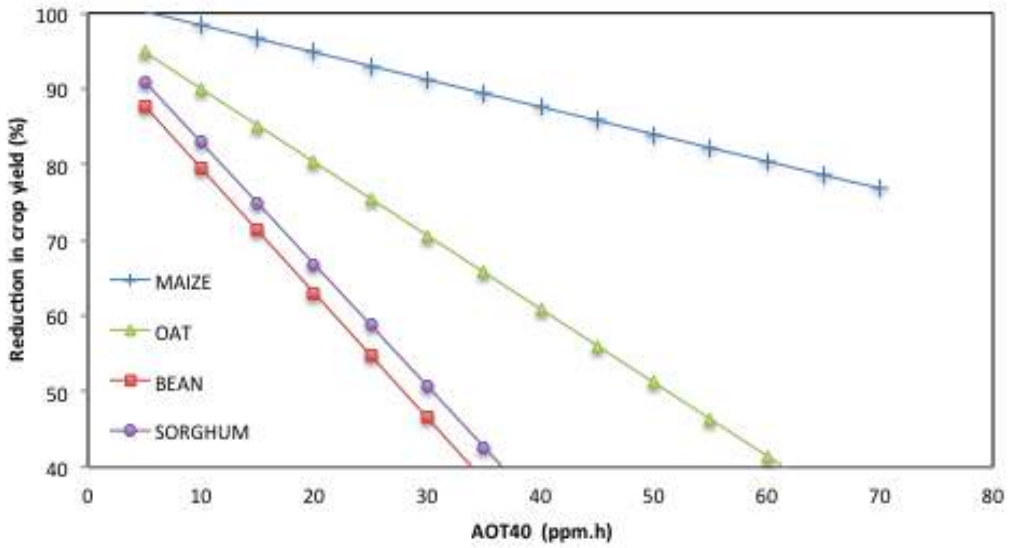


Figura 20.- Representación gráfica de las funciones exposición-respuesta dadas en la Tabla 3. Mills et al. (2007)

La pérdida de rendimiento relativo se calcula como *RYL*=1-*RY*, Y la pérdida de producción de cultivo por unidad de área se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$CPLi = \frac{RYLi}{1 - RYLi}\ CPi$$

Donde *CPLi* es la pérdida de producción de cultivo [t] por unidad de área, *i* [ha], *RYL* es la pérdida de rendimiento relativo, *CPi* es la producción real de cultivo [t/ha]; (Van Dingenen 2009).La pérdida de producción de cultivo por municipio fue determinada

calculando el promedio de la pérdida de producción de cultivo en todas las celdas de cultivos dentro de cada municipio.

Finalmente, el daño económico se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$EL = CPL * ARP_{(2011)}$$

Donde: *EL* es el valor de la pérdida económica [$/ha], *ARP* es el precio medio rural [$/t]

La información estadística de la producción agrícola por municipio, se obtuvo del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación) (SAGARPA. De esta base de datos se utilizó la siguiente información: superficie sembrada (ha), rendimiento (t/ha) y precio medio rural (PMR, $/t). Los datos alfanuméricos fueron relacionados con los datos georeferenciados de los 474 municipios que constituyen el área de estudio. Utilizando estos valores y las ecuaciones arriba mencionadas, se estimó el valor de la pérdida económica (*EL*).

6.3. Resultados

En la Figura 21 presenta gráficamente la secuencia de cálculo de la pérdida económica para el maíz. Los impactos no son homogéneos en la región, dependen de la producción de cultivo, del área sembrada, del AOT40 acumulado y del precio pagado al agricultor, el cual no es el mismo en todos los municipios. Por ejemplo, para el maíz, los agricultores del municipio de Huamantla en el estado de Tlaxcala pierden 6% de su producción por exposición al ozono. El valor estimado de su producción es de 156 MDP y la pérdida económica es de 9 MDP. Por su parte en el municipio de Villa de Allende en el Estado de México pierden un 11% de su producción por exposición al ozono. El valor estimado de producción es de 152 MDP, pierden 18 MDP. En términos de equidad se observa que el grado de marginación urbana para Huamantla es bajo y alto para Villa Allende, seguramente tal pérdida de ingreso posible representa un alto costo a esas comunidades.

El impacto de la exposición a ozono de los cultivos de maíz y avena en la región centro de México se calcularon en le estudio ECAIM (INECC, 2014), en este trabajo se calculó la pérdida económica por exposición a ozono de otros dos cultivos frijol y sorgo (Tabla 1). Hay cultivos relevantes económicamente para los cuales, con el conocimiento actual, no se puede calcular el impacto por exposición a ozono. Estos cultivos son: amaranto, nopalitos, agave y maguey pulquero. Estos cultivos son característicos de nuestro país, por lo cual no se les ha determinado su función exposición-respuesta en Europa o Estados Unidos, lugares de origen de la mayoría de estas funciones. Para hacer posible alguna estimación de la importancia de generar localmente dichas funciones se agregan a la

tabla resumen (Tabla 4) que presenta el área sembrada, el valor de la producción y la pérdida económica en los municipios y delegaciones que conforman la CAMe en millones de pesos. Debe hacerse notar que la pérdida económica en la CRCM que contiene a la CAMe y su área de influencia casi se duplica. También debe señalarse los cultivos para los cuales no existen funciones exposición-respuesta tienen un valor agregado por hectárea considerablemente más alto. Cultivos como las hortalizas son muy sensibles al ozono.

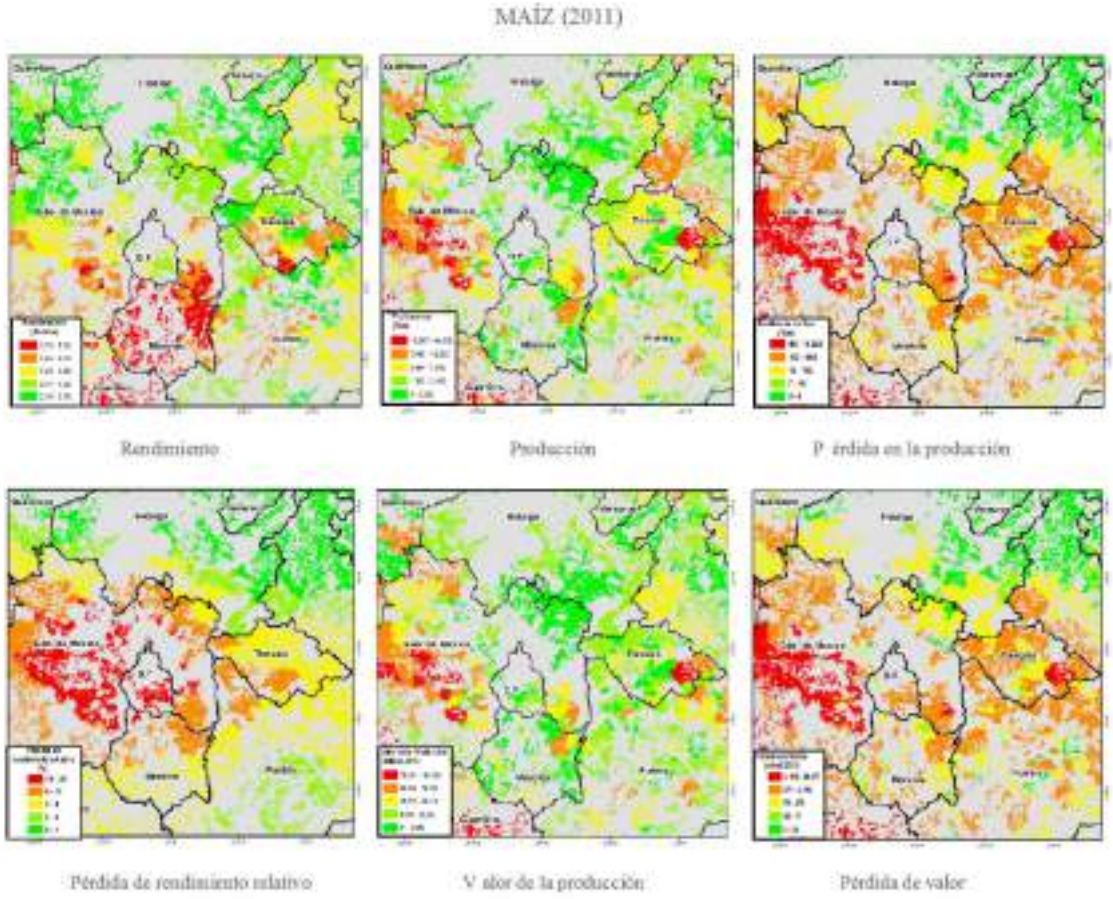


Figura 21. Maíz: a) Rendimiento (t/ha); b) Pérdida de Rendimiento Relativo (%); c) Producción (t); d) Pérdida de Producción de Cultivo (t); e) Valor de la Producción ($) y f) Pérdida Económica ($), para el 2011.

Tabla 4. Área cultivada, valor de la producción y pérdida económica de varios cultivos spor su exposición a ozono, para otros cultivos no es posible estimar ese costo por ausencia de funciones exposición-respuesta.

Cultivo	Área sembrada (Ha)	Valor de la producción (Millones de pesos)	Pérdida económica (Millones de pesos)
Maíz	361,999	2,461	287
Avena	81,984	479	291

Frijol	16,004	116	86
Sorgo	36,777	410	210
Nopalitos	7,642	951	
Agave	864	39	
Amaranto	1,235	13	
Maguey Pulquero	1,896	430	
Total			874

6.4. Recomendaciones

Para la agenda científica

Se propone que de manera prioritaria inicie en México la línea de investigación sobre el efecto de la contaminación por ozono en los cultivos originarios de nuestro país.

Es indispensable iniciar el monitoreo de la calidad del aire en zonas rurales

De política pública

Partiendo de reconocer que para garantizar la sustentabilidad de región centro del país, que contiene a las entidades participantes en la CAMe es necesario conservar el suelo agrícola se propone que los subsidios otorgados a los productores agrícolas en la región CAMe y su área de influencia incluya un componente adicional que tome en cuenta que esa actividad se realiza bajo condiciones adversas de contaminación atmosférica.

7. Afectación de bosques por exposición a ozono

7.1. Introducción

La métrica utilizada para la protección de la vegetación en las directivas europeas, la AOT40, no es una concentración media sino un valor acumulado para un periodo de crecimiento de la planta. El nivel crítico actualizado para la protección de los bosques se estableció en un valor de la AOT40=5,000 ppb.h, considerando los 6 meses de abril a septiembre, con una reducción del crecimiento del 5% (CLRTAP, 2015). Anteriormente era 10,000 ppb.h Las concentraciones de ozono que se presentan en la región de estudio pueden llegar a causar efectos adversos sobre la vegetación natural. Estos efectos se ven reflejados en la producción, vitalidad y tolerancia al estrés de los bosques.

7.2. Método

Los mapas de excedencias de AOT40 para se construyeron de manera similar que para cultivos. Pero a diferencia de los cultivos cuya distribución está más fragmentada e hizo necesario distribuirlos uniformemente en el área del municipio, y luego promediar en el municipio las excedencias del AOT40, para bosques se realizó la ubicación de los mismos dentro del área de estudio, utilizando la información de Uso de Suelo y Vegetación

de la Serie V de INEGI (INEGI, 2015). Esta capa se interceptó con las capas de estados, municipios y con la capa de información de la métrica de AOT40 (Fig. 22). Para así tener por municipio la distribución espacial de cada tipo de bosques y su afectación por ozono.

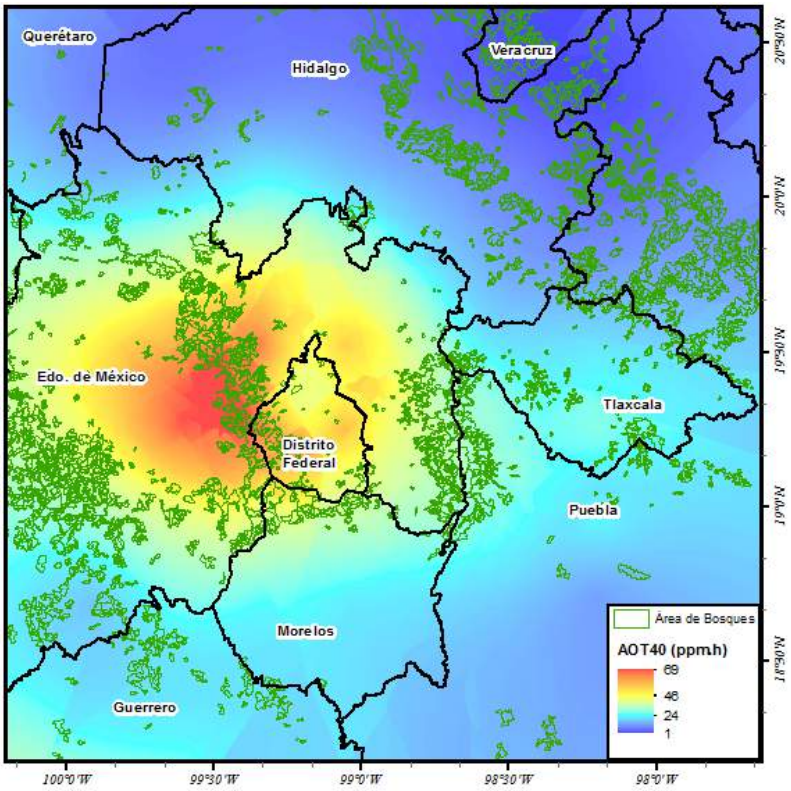


Figura. 22 Superficie interpolada de la métrica AOT40 con la distribución de bosques en la región

En el mapa generado para la AOT40 se observa que en las zonas altas se han obtenido valores por encima de las 50,000 ppb.h acumuladas, llegando algunas zonas a alcanzar las 69,000 ppb.h (7 veces el umbral). El AOT40 fue excedido en 82% de las áreas de bosque. Los valores de AOT40 más frecuentes (45%) estuvieron en el intervalo de 23,000 -44,000 ppb.h.

Dentro del área de estudio se tienen los siguientes tipos de bosques: bosque cultivado, bosque de cedro, bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque mesófilo de montaña, bosque de galería, bosque de mezquite y bosque de táscate, ocupando una superficie de 7,970 km^2 (Figura 23). En la Tabla 5 se reporta el área correspondiente a cada uno de estos bosques.

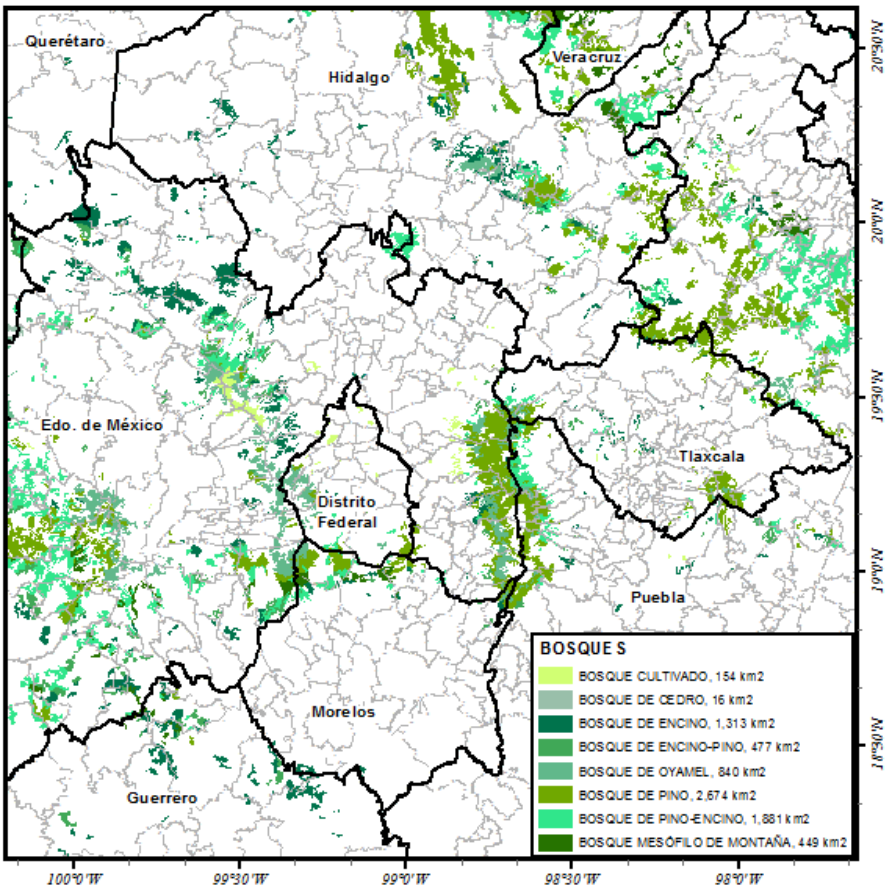


Figura 23 Distribución espacial de los Bosques dentro del área de estudio

Para calcular la pérdida de biomasa de los bosques debida a la afectación por ozono se utilizaron funciones dosis-respuesta basadas en experimentos OTC (cámaras de techo descubierto) realizados en Europa. Debido a que las especies de bosques en México no son las mismas que las encontradas en Europa, se dispuso a utilizar estas funciones por analogía en las Familias y promediando los valores encontrados para la misma Familia.

Tabla 5 Área de bosques en la región centro de México y su importancia relativa

Bosque	**Área (km^2)**	**%**
Bosque cultivado	153.52	1.93
Bosque de cedro	15.99	0.20
Bosque de encino	1312.64	16.47
Bosque de encino-pino	477.14	5.99
Bosque de oyamel	840.36	10.54
Bosque de pino	2674.14	33.55
Bosque de pino-encino	1881.40	23.60
Bosque mesóìfilo de montaña	448.84	5.63
Bosque de galería	2.11	0.03
Bosque de mezquite	2.77	0.03
Bosque de táscate	162.04	2.03

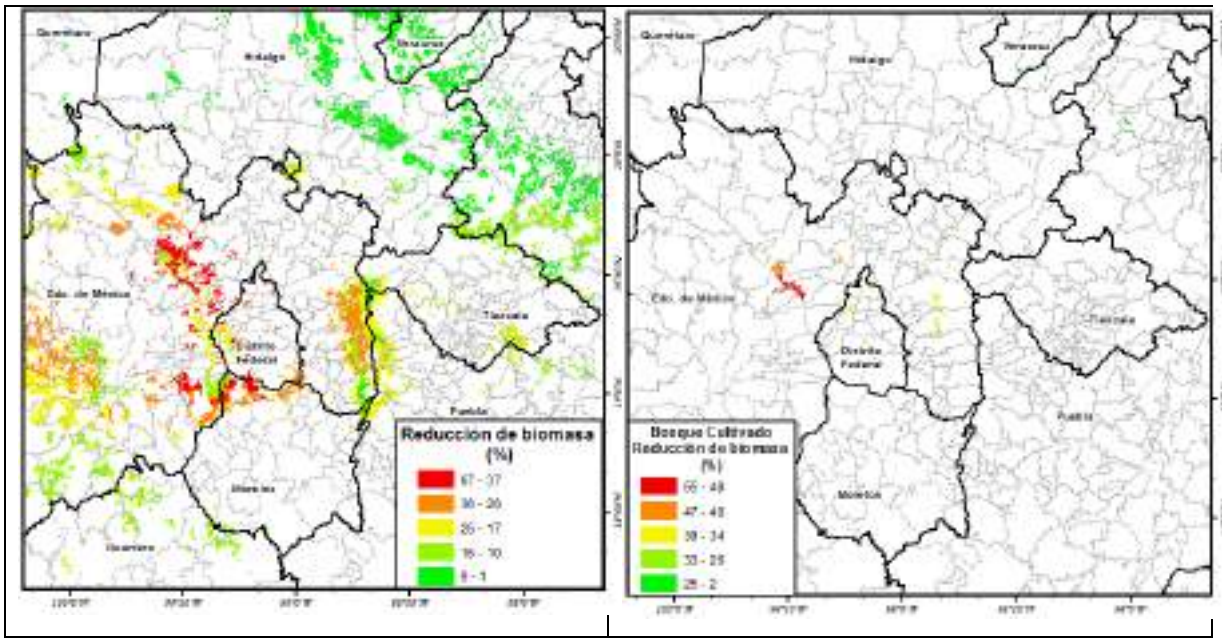
En la Tabla 6 se presenta la lista de especies de árboles con sus funciones exposición-respuesta, para una disminución en biomasa del 10%. Con y= ax + b, x: AOT40 en ppm.h. (Van Goethem et al., 2013)

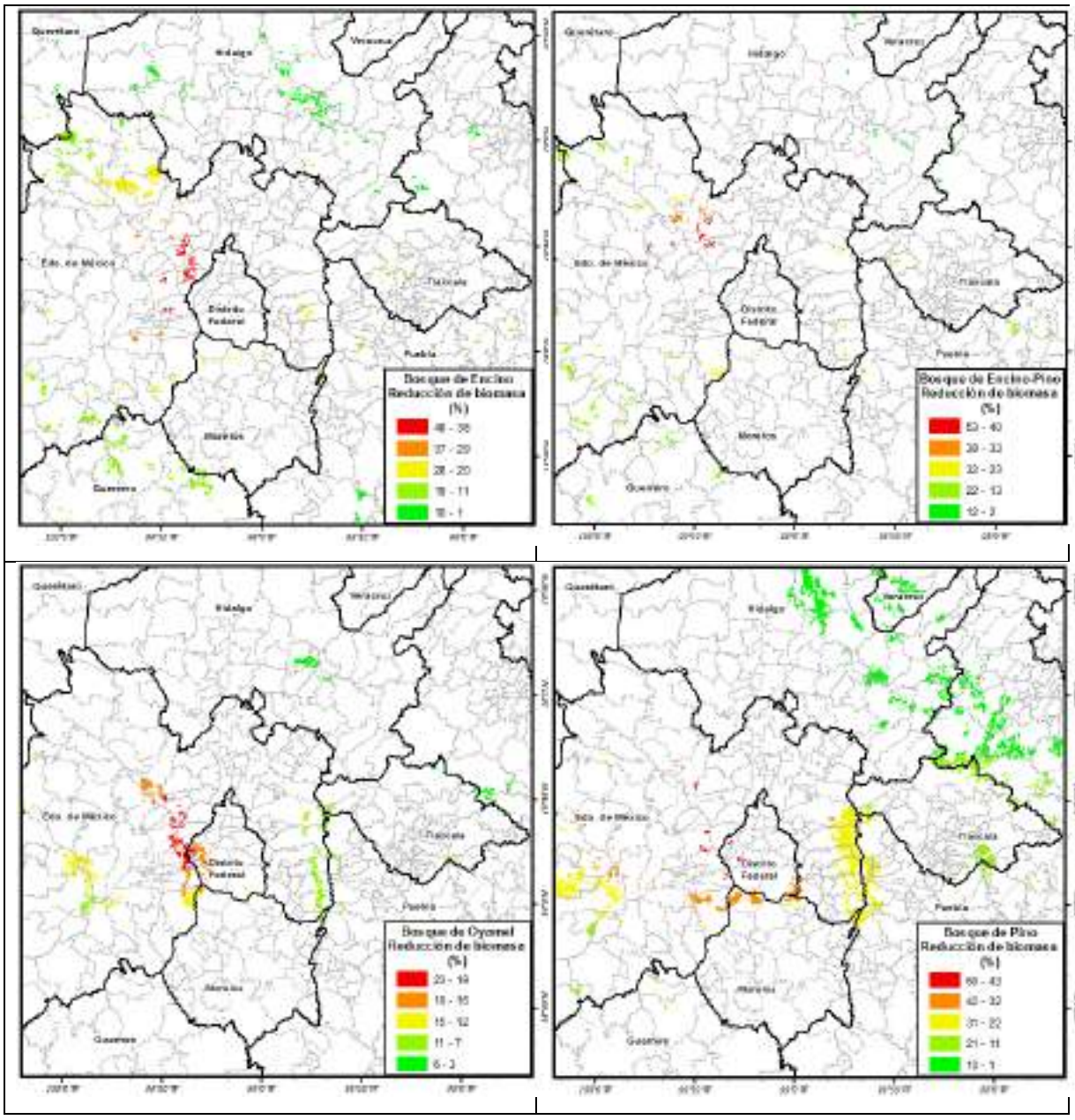
Tabla 6 Funciones exposición-respuesta para varias especies relacionadas con las dominantes en la región centro de México. . (Van Goethem et al., 2013)

Especies	Familia	a	b	EC_{10} (ppm.h)
Pinus sylvestris	Pinaceae	-0.0073	-	13.66
Quercus faginea	Fagaceae	-0.0073	-	13.66
Quercus pyrenaica	Fagaceae	-0.0061	-	16.38
Quercus robur	Fagaceae	-0.0056	-	17.74
Quercus petraea	Fagaceae	-0.0054	-	18.58
Picea abies	Pinaceae	-0.0028	-	35.72

7.3. Resultados

En la Figura 24 se presentan las pérdidas relativas de biomasa (nueva biomasa). El primer cuadro muestra todos los tipos de bosque juntos y los cuadros siguientes por cada tipo de bosque. Las bases de datos están en construcción. Para llegar a un costo económico hace falta obtener información sobre la distribución de la biomasa en diferentes compartimentos del árbol; raíces, tronco, ramas, corteza y hojas y evaluar esa biomasa no fijada en términos de biomasa maderable o tal vez por servicios ambientales. Este desarrollo está en proceso.




Bosque de Encino
Reducción de biomasa
(%)
48 - 38
37 - 29
28 - 20
19 - 11
10 - 1
Bosque de Encino-Pino
Reducción de biomasa
(%)
50 - 40
39 - 33
32 - 23
22 - 12
11 - 3
Bosque de Oyamel
Reducción de biomasa
(%)
23 - 19
18 - 16
15 - 12
11 - 7
6 - 3
Bosque de Pino
Reducción de biomasa
(%)
50 - 43
42 - 32
31 - 22
21 - 11
10 - 1

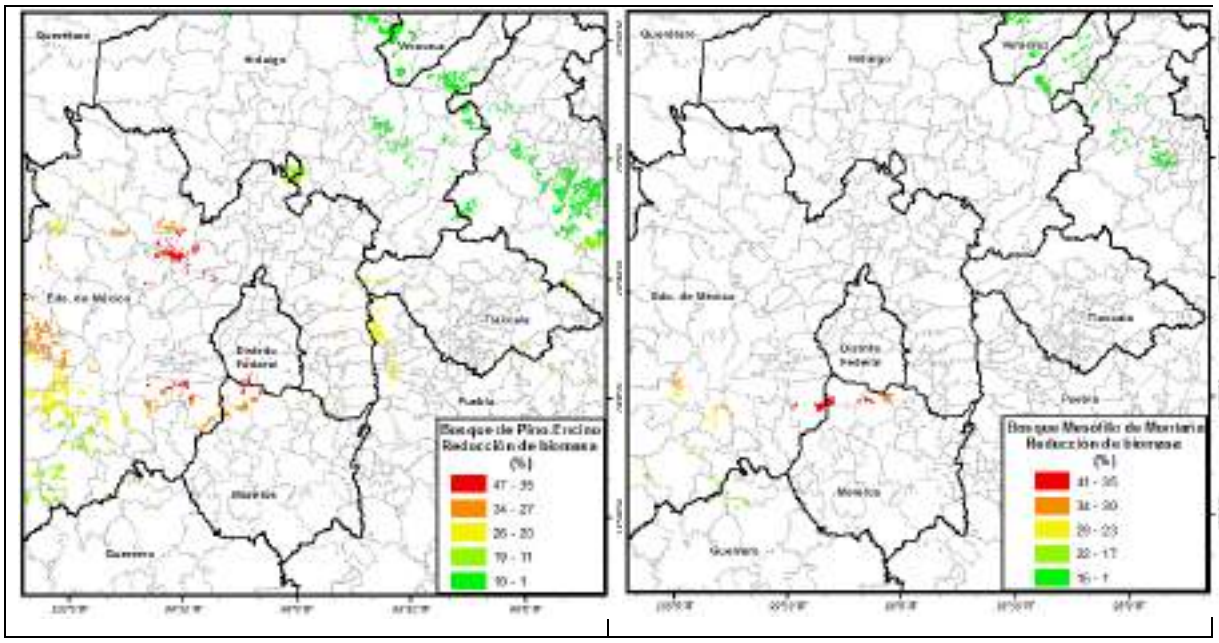


Fig. 24 Reducción de biomasa de los bosques dentro del área de estudio. El primer cuadro incluye todas las categoriás, los cuadros sigientes se presenta una categoría en cada cuadro,

7.4. Recomendaciones

Aun cuando el cálculo de costo económico por la exposición de los bosques en la región centro de México a ozono todavía está en proceso, es evidente que estos sufren importantes reducciones en su tasa de generación de biomasa. En este sentido el valor maderable y los servicios ambientales se ven afectados por externalidades generadas en otras actividades.

Por los valiosos servicios ambientales que prestan los bosques a los habitantes de la región, los subsidios y pagos por servicios ambientales a los ejidatarios y comuneros que los usufructúan y cuidan deben incluir un sobreprecio por la exposición a ozono.

8. Impactos en el patrimonio histórico-cultural

La contaminación atmosférica representa una amenaza para el patrimonio cultural al favorecer el deterioro natural de monumentos, palacios, iglesias, y ruinas arqueológicas que tienen un valor irremplazable. En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) hay 19,968 edificaciones registradas como monumentos arqueológicos, históricos o artísticos construidos con piedra caliza o volcánica. Es posible estimar el riesgo de deterioro mediante: la aplicación de funciones empíricas dosis-respuesta recomendadas por la Convection on Long-Range Transboundary Air Pollution (LTRAP) de la UNECE; datos de la red de monitoreo de calidad del aire; resultados de modelos de calidad del aire; datos de precipitación ácida y parámetros meteorológicos disponibles para esta región; y procedimientos de interpolación espacial SIG para el área de influencia de la ZMVM.

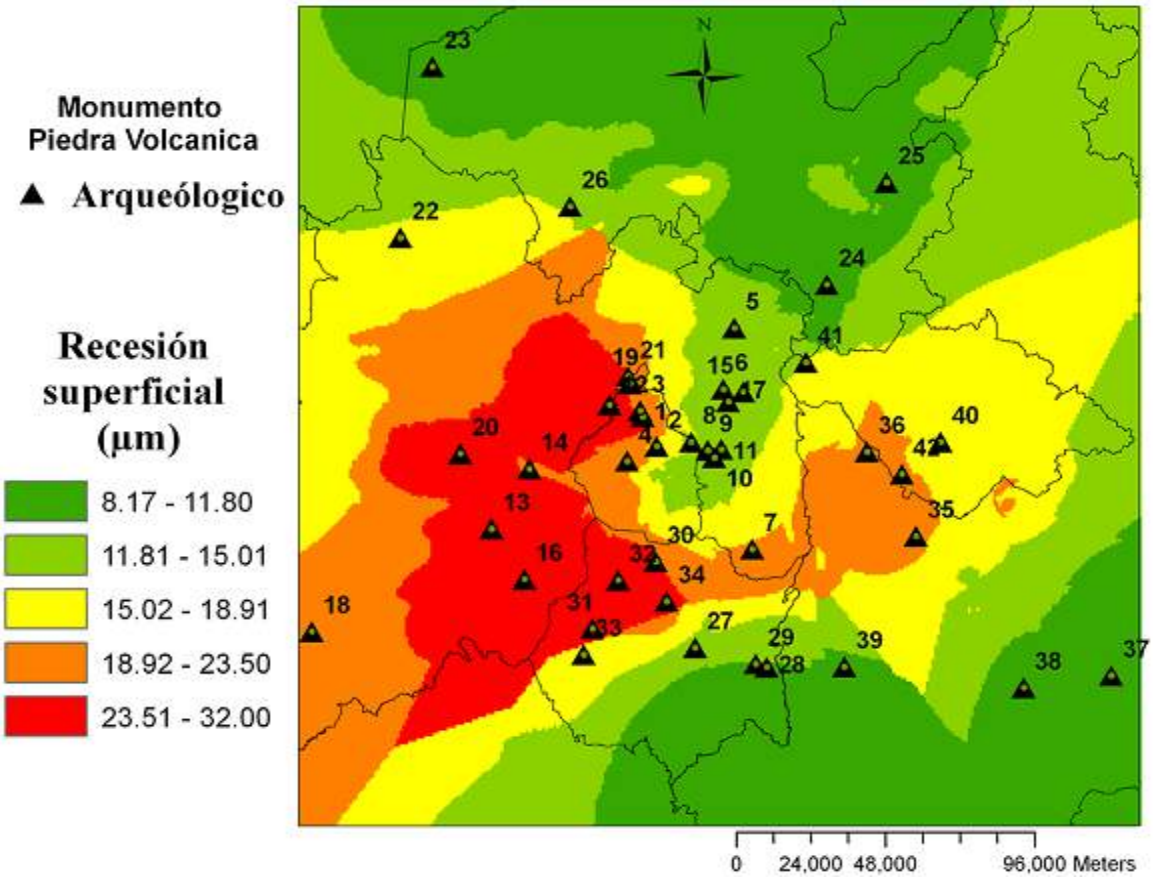


Figura 25.- Mapa de recesión para piedra volcánica de algunos monumentos arqueológicos en la CRCM, 2014

El estudio ECAIM (INECC 2014) genero los primeros mapas de tasas de recesión de piedras caliza y volcánica usadas en edificios del patrimonio arqueológico, histórico y cultural para toda la región centro de México (Figs. 25 y 26). Las tasas de recesión para piedra volcánica Tablas 7 y 8, seguramente están subestimadas porque se tomó prestada una función exposición respuesta de una piedra europea en algo parecida a la piedra volcánica pero más densa y menos porosa: a menor densidad mayor efecto y a mayor porosidad mayor efecto.

Es indispensable obtener las funciones exposición respuesta para la piedra volcánica con que se construyó una parte importante de nuestro patrimonio cultural.

La pérdida económica es invaluable, pero con mapas de afectación se puede optimizar el uso de los recursos para conservación. No debe pasarse por alto la contribución de nuestro patrimonio cultural, con sus singulares materiales de construcción, en la importante industria del turismo.

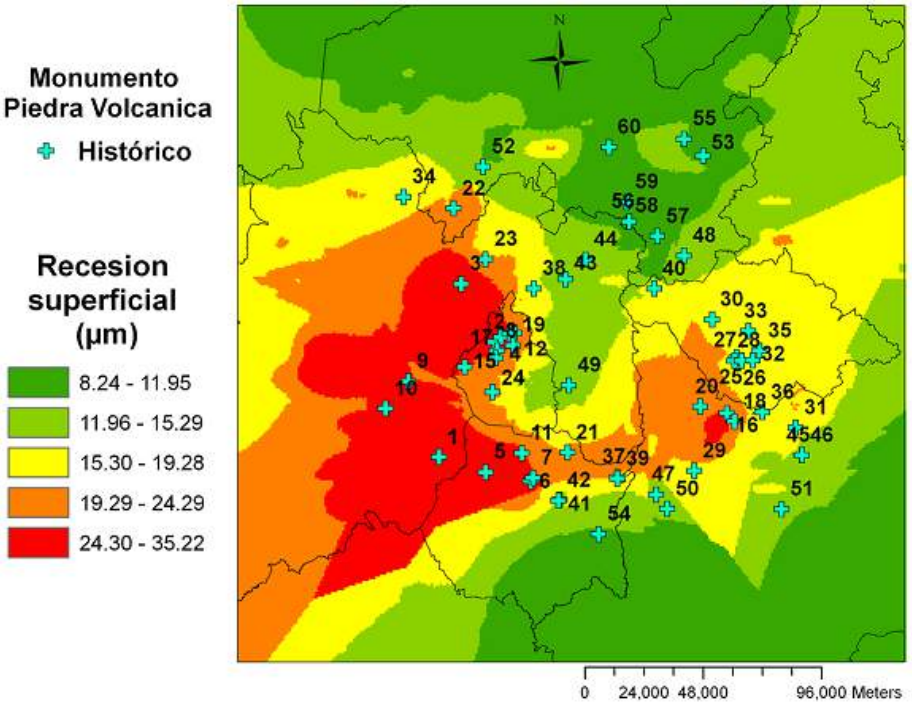


Figura 26.- Mapa de tasas de recesión de piedra volcánica "por proxi" con piedra calcárea en monumentos históricos

No es posible estimar el impacto económico de la contaminación atmosférica sobre nuestro patrimonio histórico-cultural. Los recursos destinados a su conservación no representan el valor perdido de ese activo invaluable e irremplazable. Esta contribución permite aplicar criterios de prioridad en términos de localización y exposición a niveles más altos de contaminantes.

Tabla 7- Estimación de la recesión para piedra volcánica de monumentos históricos en la CRCM, 2014.

Id	Monumento	ESTADO	Recesión natural	Recesión presente	% Aumento
3	Teatro Centenario	México	20.77	31.14	49.91
2	Museo Nacional de la Cartografía	D.F.	21.54	31.21	44.88
4	Acueducto de Chapultepec	D.F.	20.95	29.31	39.86
18	Templo de San Juan Bautista	Puebla	17.27	23.18	34.22
13	Academia Nacional de Medicina	D.F.	18.93	24.99	32.02
14	Catedral y Sagrario Metropolitano	D.F.	18.93	24.99	32.02
16	Templo de Santa María La Asunción	Puebla	17.85	23.51	31.67
8	Templo de Santo Domingo de Guzmán	D.F.	20.06	26.2	30.58
12	Palacio de Lecumberri	D.F.	19.79	25.13	26.96
1	Antiguo Convento de Santiago Apóstol	México	25.76	31.53	22.41
19	Templo y Antiguo Convento de San Matías Apóstol	D.F.	19.12	23.01	20.34
20	Templo de San Dieguito	Puebla	18.81	21.77	15.75
17	Ex Convento de El Carmen	D.F.	20.31	23.29	14.69
23	Ex-Colegios Jesuitas San Martín y San Francisco Javier, acequias de aguas rodada	México	17.43	19.95	14.42
15	Antiguo Convento del Desierto de los Leones	D.F.	22.02	24.66	11.98
6	Templo y Antiguo Convento de la Asunción	Morelos	24.32	27.15	11.64

Tabla 8.- Estimación de la recesión para piedra volcánica de monumentos arqueológicos en la CRCM, 2014

Id.	Nombre	Estado	Reccesón natural	Recesión presente	% incre-mento
10	Santa Cecilia	México	17.8	23.0	29.3
3	Zona de Monumentos Arq. El Conde	México	21.1	26.9	27.5
2	Zona De Monumentos Arq. de Calixtlahuaca-San Marcos	México	21.5	27.3	26.9
13	Zona de Monumentos Arq. de Cholula	Puebla	17.5	22.1	26.0
9	Zona Arq. de Templo Mayor	D.F.	19.9	24.1	21.2
12	Zona Arq. de Tlatelolco	D.F.	19.0	22.5	18.9
14	Zona Arq. de Tenayuca	México	18.0	21.3	18.5

8.1. Recomendaciones

Se debe incentivar y apoyar la investigación sobre tasas de recesión por exposición a la contaminación atmosférica de las piedras volcánicas características de nuestro patrimonio cultural. Se debe tomar en cuenta que el éxito de una política pública de control de la contaminación puede hacer que algún contaminante pierda relevancia dando lugar a que otros no controlados aumenten la suya.

9. Impactos en materiales

La corrosión atmosférica es la más visible de todos los procesos de corrosión, puentes oxidados, edificios y monumentos a la intemperie son ejemplo de este fenómeno. El comportamiento de la corrosión atmosférica debe interesar a ingenieros y arquitectos al seleccionar metales y aleaciones para las construcciones que se realizan al exterior (Tice, 1962). Se han realizado investigaciones sobre el papel de los factores ambientales y climáticos en la corrosión atmosférica de metales de construcción y edificios, así como la simulación de su comportamiento (Oesch and Faller, 1997). La corrosión atmosférica adquiere un interés general debido a que es posible relacionarla con el tiempo de vida de equipo y durabilidad de los materiales estructurales (Syed, 2006). Por lo tanto, la corrosión atmosférica es un fenómeno tan común con efectos destructivos, capaz de consumir recursos materiales (Castaño et al., 2007).

Figura 27. Fotografás que muestran una nave industrial y partes de la infraestructura pública con diferente grado de daño.

La contaminación atmosférica incrementa las tasas de corrosión atmosférica, afecta muchos materiales utilizados en la construcción de la infraestructura pública como edificios públicos, puentes postes de cableado eléctrico o telefónico, o del patrimonio privado como naves industriales, recubrimientos de exteriores, marcos metálicos y otros (Fig. 27). Por lo tanto, hay grandes efectos económicos asociados con el incremento de la contaminación atmosférica en áreas urbanas (Harker et al., 1982). Mikhailov et al. (1995) indicaron que los efectos dañinos de la contaminación, en específico el dióxido de azufre es responsable de incrementos bruscos en pérdidas debidas a la corrosión atmosférica.

En los Estados Unidos el costo directo estimado anual de la corrosión metálica son unos impactantes $276 billones de dólares que representaron aproximadamente un 3.1% del Producto Interno Bruto en 1998. Este costo fue determinado mediante el análisis de 26 sectores industriales en los que se conoce que la corrosión existe y se extrapolan los resultados a una estimado a nivel nacional. Los sectores se dividieron en cinco categorías principales: infraestructura, servicios públicos, transporte, producción y fabricación, y gobierno (Koch et al., 2002).

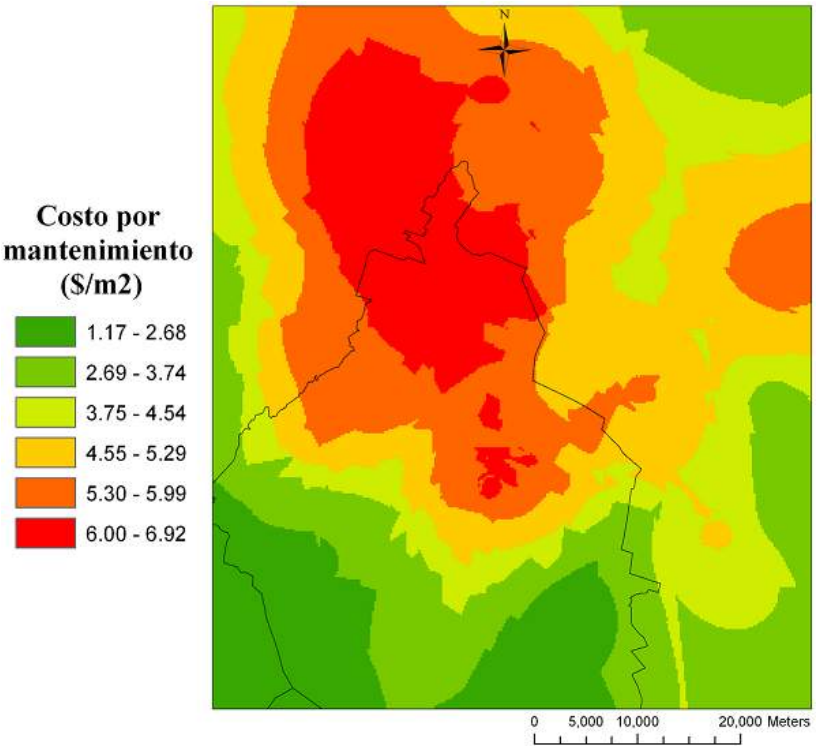


Fig. 28 Mapa de capa de costo por mantenimiento para lamina de zinc de la ZMVM, correspondiente al año 2007.

También, la corrosión representa aproximadamente el 40% de todas las fallas de los equipos en instalaciones industriales. Las consecuencias de la corrosión son muchas y variadas y los efectos de éstos sobre la operación segura, confiable y eficiente de los equipos o estructuras suelen ser más graves que la simple pérdida de una masa de metal (Kreislova, 2013).

En la literatura científica se pueden obtener funciones exposición-respuesta y ya se pueden elaborar en México mapas de las tasas de oxidación, recesión o incluso costos incrementales de mantenimiento de una variedad de materiales. Por ejemplo, la figura 28 muestra una estimación de la distribución espacial del costo adicional por mantenimiento/reemplazamiento en ($/m^2) que probablemente sufriría un edificio o estructura con techo de lámina de acero galvanizado localizado en la ZMVM. El área costo distribuida en el intervalo [6.00-6.92] se considera la zona de mayor riesgo. Este tipo de mapa de riesgo es un indicador preliminar útil para el desarrollo de políticas.

Actualmente, las funciones dosis-respuesta tienen al SO_2 como el principal contaminante causante de daño; al reducirse las concentraciones ambientales de SO_2 aparecen otros contaminantes como también importantes y será necesario desarrollar y aplicar nuevas funciones.

9.1. Recomendaciones

Incentivar y apoyar la investigación científica necesaria para estimar los costos de la contaminación atmosférica en materiales sensibles que forman parte de la infraestructura y el patrimonio público y privado.

Conforme se vaya desarrollando la capacidad de estimar los costos monetarios del impacto de la contaminación atmosférica en esos materiales, éstos costos deberían incorporarse en el cálculo del Producto Interno Neto Ecológico (Artículo 15. XIX, LEEGEPA) a cargo del INEGI.

10. Estructura urbano-regional

10.1. Indicadores de desempeño urbano-regional

Una dificultad para asociar el conocimiento sobre la estructura urbano-regional y sobre la expansión urbana y periurbana con el conocimiento sobre la química atmosférica y las emisiones de contaminantes atmosféricos en la región, es la ausencia de indicadores de actividad que permitan vincular cuantitativamente estos dos dominios de conocimiento. Esos indicadores también deben utilizarse para evaluar avances o retrocesos por la aplicación de políticas públicas, o por su ausencia. Aquí se presentan algunos indicadores que pueden ser de utilidad en ese sentido

Porcentaje de viajes que utilizan tres o más modos de transporte

Objetivo: Conocer el porcentaje de viajes que se realizan en tres o más modos de transporte.

Fórmula:

$$\frac{VM3_i}{VGtp_i}$$

Donde:

$VM3_i$= Número de viajes realizados de transporte público cuyo propósito no es el regreso a casa y cuyo origen es la delegación o distrito de tránsito *i*

$VGtp_i$= = Número total de viajes que se realizan en transporte público cuyo propósito no es el regreso a casa y cuyo origen es la delegación o distrito de tránsito *i*

Interpretación del indicador:

El indicador es el porcentaje de viajes que utilizan tres modos o más para ser realizados. Un sistema de transporte perfecto tendría que tener viajes que se realizan en un solo modo. Un buen sistema de transporte público, tendría que lograr que todos sus viajes se realicen en un máximo de dos modos ya que es el número de vectores necesarios para llegar de un lugar cualquiera a otro en una retícula, la forma más eficiente de para una red de transporte[2].

Fuentes de información necesarias para su cálculo: Encuesta Origen y Destino.

Periodicidad de la información para su cálculo: 13 años.

Periodicidad deseable de la información para su cálculo: Sexenal.

Kilómetros pasajero-recorridos promedio

Objetivo: Conocer la duración promedio de los traslados.

Fórmula: $\frac{\sum t}{V}$

Donde:

$\sum t$= Suma de tiempos de recorrido por viaje que se realizan en un día.

V= Número total de viajes que se realizan en un día.

Alternativamente, puede calcularse el indicador para cada modo de transporte t y por propósito de viaje.

Interpretación del indicador:

El indicador es el tiempo promedio en el que un viaje cualquiera se realiza. Con este indicador se pueden medir cambios temporales, y hacer comparaciones entre distintas áreas de la ciudad. Es deseable que este indicador se mantenga o reduzca. De acuerdo con la literatura, el tiempo promedio de viaje al trabajo, no debería exceder los 40 minutos.

Fuentes de información necesarias para su cálculo: Encuestas específicas en distintos sistemas de transporte.

Periodicidad de la información para su cálculo: Se recomienda realizar encuestas específicas por modo de transporte para realizar su cálculo.

Periodicidad deseable de la información para su cálculo: Sexenal

Tiempo de traslado en Transporte Público de Pasajeros

Objetivo: Generar un indicador que permita comparar por distrito, los recorridos que se realizan en más de 60 minutos[3] en el servicio de transporte público de pasajeros en la ZMVM.

Fórmula:

$I\,TR = \frac{T_{ij}}{60}$; Tij = tiempo de desplazamiento entre distrito i y j.

$IA\,TRi = \frac{\sum_{i=0}^{j} V_{ij} T_{ij}}{\sum_{i=0}^{j} V_{ij}}$; IA

TR= indicador agregado del tiempo de recorrido para todos los distritos.

$I_{TR} \leq 1$ Desplazamiento conveniente.

$I_{TR} > 1$ Desplazamiento a ser revisado.

Interpretación del indicador: La movilidad de los habitantes de la Ciudad de México se modifica de manera dinámica, de tal forma que para satisfacer de manera adecuada esta situación, sería necesario adaptar o construir sistemas de transporte asociados a

esta dinámica, que además permitan una movilidad que mejore los tiempos de traslado actuales (92 minutos por viaje-EOD-2007).

Una herramienta que permitiría conocer los tiempos de traslado, así como los volúmenes de usuarios asociados a estos tiempos, con apoyo de la información de la EOD, se construye a través de un indicador de tiempo de traslado en el transporte público de pasajeros para identificar los viajes entre distritos en la ciudad en los que se invierte mayor tiempo en transporte público, es decir, los desplazamientos que rebasan los 60 minutos establecidos a nivel internacional como límite máximo para que una persona llegue a su destino a ser productiva.

Fuentes de información necesarias para su cálculo: Encuesta Origen-Destino.

Considerando la información de la Encuesta Origen-Destino 2007, se construyen líneas de deseo de viaje, asociadas a los volúmenes desplazados, así como al indicador de tiempo de recorrido. Asimismo, se cuenta con una matriz de tiempos de viaje – con sus volúmenes correspondientes- de donde se obtiene el indicador de tiempo de recorrido, dividiendo el tiempo de viaje entre distritos entre 60. De esta operación, para un factor menor o igual a 1 se considera que el desplazamiento tiene un tiempo conveniente, y mayor a 1, ya requiere de análisis para mejorar el tiempo de recorrido. Este procedimiento permitirá identificar la movilidad en la que se requiere ampliar o modificar la oferta de transporte, es decir, es importante considerar que las decisiones de cambio en este sentido, deberán relacionarse con los volúmenes a ser atendidos.

También se incluye el cálculo de un indicador de tiempo medio ponderado por distrito para poder comparar el comportamiento de manera agregada.

Periodicidad de la información para su cálculo: 13 años.

Periodicidad deseable de la información para su cálculo: De 3 a 6 años.

11. CALIDAD BIOLÓGICA DEL AIRE

Los contaminantes criterio, no son los únicos contaminantes de la atmósfera. Se llaman así porque representan un conjunto más amplio de especies químicas que interactúan en un complejo mecanismo de reacciones fotoquímicas por cadena de radicales libres. Se considera que regulando los precursores de ozono como clases de contaminantes se pueden abatir los niveles, no solo de ozono, pero los otros contaminantes, más difíciles de monitorear de manera automática de forma 24x365.

Partículas como polen o esporas, que tendemos a considerarlas naturales, si las especies vegetales que las generan, son introducidas de otras regiones, o manejadas por el hombre, en programas de reforestación, forestación urbana o cultivos, deben ser consideradas antropogénas.

La capacidad para elaborar sus inventarios de emisiones, monitorear sus concentraciones ambientales y modelar su transporte y depositación, es incipiente. No hay masa crítica de personal capacitado para elaborar su climatología. A pesar de ello es

evidente que, el país no puede esperar a resolver los rezagos en el manejo de los contaminantes criterio, para ocuparse de estos otros contaminantes que afectan también la salud de la población.

Dentro de las partículas suspendidas en la atmósfera se encuentran las originadas de forma natural como son los granos de polen, que forman parte del proceso reproductivo de angiospermas y gimnospermas (de Weerd et al, 2002). Los pólenes constituyen una de las fuentes principales de alérgenos en el aire y una causa significativa de enfermedades alérgicas como el asma y la rinitis estacional, que afectan a 20%-30% de la población en ciudades industrializadas, producto de una respuesta de hipersensibilidad inmediata a componentes inocuos en el ambiente (Zuk et al., 2007).

En necesario determinar la prevalencia de los diversos tipos polínicos en la atmósfera a través del monitoreo continuo de granos de polen liberados y transportados en la atmósfera de manera local o regional permite identificar sus variaciones estacionales, a lo largo del tiempo, lo que apoya al sector público y al sector salud para que se tomen las medidas de prevención y control de enfermedades respiratorias causadas por la exposición a aeroalérgenos. Además, de la posibilidad de evaluar a los pólenes como bioindicadores de contaminación ambiental, ya que pueden acarrear en su exina partículas de tipo inorgánico, lo que puede potencializar sus efectos en la salud al ser inhalados por la población sensible. Asimismo, la generación de bases de datos de manera permanente permitirá a los 10 años de monitoreo continuo, determinar el posible efecto del cambio climático sobre la floración de las plantas y la alteración

Con apoyo del proyecto Ecaim (INECC, 2014, 2015) la Red Mexicana de Aerobiología, logró extender el monitoreo polen y esporas a las ciudades de Toluca, Cuernavaca y Puebla. La Tabla 9 presenta especies o familias vegetales en Toluca, Puebla y Cuernavaca identificadas por el registro de su polen. Por su parte La Tabla 10 presenta la abundancia relativa y su potencial alergénico de tipos polínicos de diversas familias vegetales en Toluca, Puebla y Cuernavaca

Tabla 9.- Presencia de diversas especies o familias vegetales en Toluca, Cuernavaca y Puebla, identificada por su polen en 2011 (INECC 2015).

(Presencia, verde; ausencia, rojo)			
Tipo polínico	**Toluca (10 meses)**	**Cuernavaca (7 meses)**	**Puebla (3 meses)**
Acer			
Acacia			
Alnus			
Amaranthaceae			
Ambrosia			
Apiaceae			
Artemisia			
Asteraceae			
Begonia			
Brassicaceae			
Buddleia			
Cecropia			
Carya			
Casuarina			
Castanea			
Celtis			
Corylus			
Citrus			
Cyperaceae			
Cupressaceae			
Ericaceae			
Fagus			
Ficus			
Fraxinus			
Grevillea			
Lamiaceae			
Jacaranda			
Juglans			
Liliaceae			
Ligustrum			

(Presencia, verde; ausencia, rojo)			
Tipo polínico	**Toluca (10 meses)**	**Cuernavaca (7 meses)**	**Puebla (3 meses)**
Liquidambar			
Moraceae			
Myrtaceae			
Olea			
Onagraceae			
Passiflora			
Palmae			
Pinus			
Plantago			
Platanus			
Poaceae			
Populus			
Prosopis			
Quercus			
Ricinus			
Rosaceae			
Rumex			
Salix			
Sapindaceae			
Schinus			
Solanaceae			
Tamarix			
Tilia			
Thypha			
Ulmus			
Urticaceae			
Wigandia			
Indeterminados			
Total	**48**	**47**	**33**

Tabla 10.- Tipos polínicos encontrados en Toluca, Cuernavaca y Puebla en 2014-2015, su importancia relativa y su potencial alergénico (INECC 2015).

Tipo polínico	Toluca %	Cuernavaca %	Puebla %
Cupressaceae*	50.43	21.48	49.36
Alnus*	9.94	11.73	21.98
Quercus*	4.15	5.04	1.11
Fraxinus*	3.45	19.26	18.05
Casuarina**	1.82	5.98	2.19
Tipo Pino	1.12	1.57	2.07
Urticaceae*	12.33	3.72	<1
Poaceae*	4.92	10.98	<1
Amaranthaceae*	1.23	2.7	<1
Asteraceae*	1.27	2.01	<1
Ricinus*	<1	3.11	<1
Solanaceae	<1	2.05	<1

* Altamente alergénicos; ** Moderadamente alergénicos

11.1. Recomendaciones

Extender el sistema de alerta polínica proporcionado por la Red Mexicana de Aerobiología (REMA) a toda la CRCM.

Elaborar tablas de datos acumulados (años) que permitan determinar los efectos del cambio climático en la fenología de las plantas, principalmente de las alergénicas.

Establecer estaciones aerobiológicas y monitorear de manera continua biopartículas (pólenes y esporas de hongos) en la atmósfera de diferentes zonas de la CRCM, permitirá estimar sus concentraciones y trayectorias de dispersión en el aire de manera local y regional, mediante la aplicación de modelos numéricos como el COSMO-ART.

12. Propuesta de agenda científica para la CAMe

Durante las últimas tres décadas la región centro de México conformada por los Estados de; Puebla, México, Hidalgo, Tlaxcala, Morelos y la Ciudad de México ha venido experimentando un crecimiento sustancial y con un ordenamiento territorial laxo. En estos estados se ha generado una expansión territorial difusa y poco densa. La excepción es la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que mantiene un aumento de la densidad población por hectárea. Los ejes principales del crecimiento obedecen principalmente a factores económicos. Sin embargo, se mantiene una fuerte dependencia del centralismo en la ZMVM. Estudios recientes (INECC, 2015; Suárez et al., 2011), muestran que la reconfiguración de los procesos productivos, principalmente la industria, hacia zonas periurbanas del valle de México, están fomentando la generación de "Ciudades Secundarias" dentro y fuera de la periferia de las principales ciudades que conforman la megalópolis, esta dinámica de crecimiento origina un flujo de habitantes en ambos sentidos entre las principales ciudades de la región y las ciudades secundarias.

Dentro del análisis se destaca la situación de la ZMVM, donde de manera continua se diluye la capacidad de considerar a los municipios como entidades intermedias entre ciudades grandes, ejemplo Naucalpan, Tlalnepantla, Cuautitlán en el Estado de México, debido a que su tasa de crecimiento se ha mantenido constante, incorporándose como un continuo dentro de la expansión urbana de la ZMVM. Es importante destacar que, en este contexto, municipios separados por barreras físicas orográficas como son puede ser el caso aquellas entre Puebla-Cuernavaca, aún mantienen una clara autonomía geográfica y espacial, en contraste el crecimiento poblacional y urbano en la zona norte de la Ciudad de México con el Estado de México, sus áreas de influencia y funcionales se traslapan.

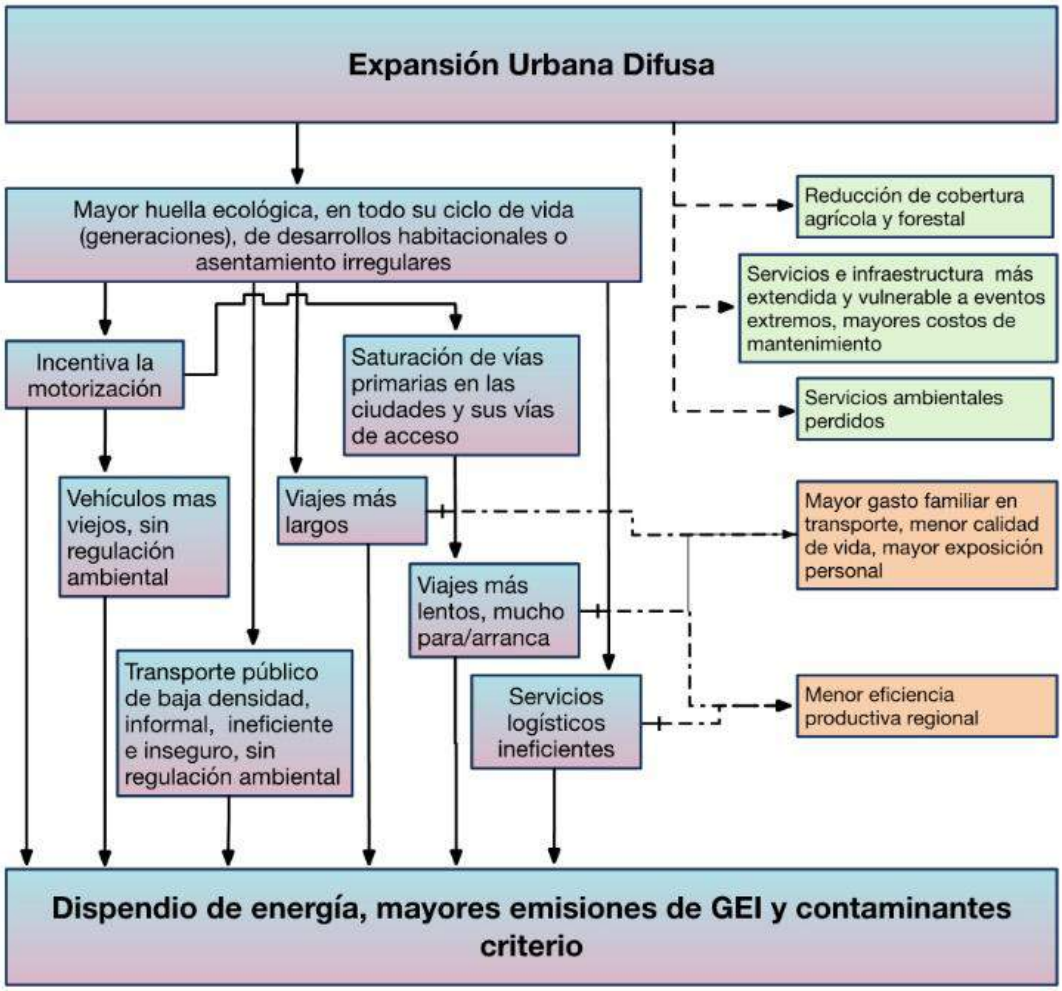


Figura 29.- Modelo conceptual sobre las consecuencias en cascada del modelo de urbanización vigente en la CRCM y que puede aplicarse a otras grandes ciudades del país fuera de la Corona (INECC, 2015).

En el contexto de flujos de población se debe tener claridad que existen dos tipos continuos y semicontinuos. Existen dos premisas para estos flujos; los económicos estrictamente orientados al crecimiento económicos de las zonas urbanas y el desarrollo económico de la población.

En este sentido los flujos continuos están asociados a procesos relacionados con el traslado de personas entre los sistemas urbanos y los semicontinuos al flujo de bienes. Con esta premisa es evidente que el flujo continuo contribuye de manera significativa a la motorización, el incremento de las distancias recorridas al trabajo, la saturación de las vialidades y otros procesos que en última instancia se traducen en mayores emisiones de compuestos de efecto invernadero y precursores del aerosol fotoquímico (Fig. 29).

Por otro lado el semicontinuo estará ligado a los procesos de abastecimiento de los bienes de consumo, con un comportamiento intermitente que es función de la demanda de bienes, sin embargo existe en este proceso un variante importante, ya que el transporte de bienes de consumo es mayoritariamente llevado a cabo por transporte medio y pesado carretero en la región a diferencia del transporte de personas que mantiene priorizado el uso de vehículos particulares y el transporte masivo como son los autobuses y microbuses.

La conjunción de estos dos flujos se da cuando los procesos dinámicos de la población y bienes se dan en las mismas vialidades, saturando el flujo vehicular y por lo tanto aumentando las emisiones por la baja eficiencia en el desplazamiento, generado principalmente por un nivel muy bajo de planeación urbana y ordenamiento territorial (Anexo 3 en INECC (2015).

Otro elemento que debe ser considerado como efecto de la expansión urbana sin control son los asociados al suministro de servicios básicos como, energía (Gas LP, Gas Natural, Eléctrica), drenaje, agua potable, manejo y disposición de residuos sólidos, los cuales contribuyen a la huella de emisiones y a otras externalidades asociadas que deben ser consideradas.

Por otra parte, la pérdida de las zonas agrícolas por efecto de la expansión urbana ha fomentado principalmente la fragmentación del suelo agrícola y su abandono, la cual se traduce en suelos que por efectos de erosión contribuyen a la emisión de partículas suspendidas (Sheinbaum Pardo et al., 2014). Las externalidades de esta forma de desarrollo se propagan en muchos ámbitos de la economía y la organización de la sociedad. Los costos económicos por la calidad de vida en la Megalópolis son acumulativos, aumentando de manera significativa los costos por la contaminación atmosférica en la población. Políticas públicas integrales encaminadas a garantizar la sustentabilidad de la región deben considerar todos estos elementos.

Una medida del atraso como nación, en asumir los problemas ambientales como prioridad nacional en todos los niveles de gobierno, son los temas centrales de esta propuesta de agenda científica. Los elementos básicos indispensables de una política pública efectiva para reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos son todavía elementos torales de la agenda científica de la CAMe.

- **Construir el Modelo Ecosistémico de la Megalópolis**
- **Reforzar el Sistema de Monitoreo Atmosférico Megalopolitano**
- **Construir el inventario único de la Megalópolis**
- **Química atmosférica y Transporte entre Cuencas Atmosféricas**

- **Recomendaciones sobre Patrimonio Cultural**
- **Recomendaciones sobre Cultivos y Bosques**

12.1. Construir el Modelo Ecosistémico de la Megalópolis

Por la dimensión del problema ambiental es evidente que el sistema Megalopolitano requiere de un análisis integral, desde diferentes aristas. Se ha demostrado que el manejo del problema desde una sola perspectiva no ha tenido los efectos ambientales esperados. En este sentido se considera relevante construir un modelo ecosistémico el cual permita desde una óptica científica analizar, desarrollar y conceptualizar los grandes retos ambientales de la Megalópolis.

La transversalidad en los ejes temáticos obliga a identificar los problemas comunes, que con llevan a incrementar las emisiones de los contaminantes atmosféricos, por ejemplo; la expansión urbana, movilidad y la demanda energética (Baklanov et al., 2016). Este análisis permitirá establecer las principales externalidades y los impactos en la calidad del aire, la salud humana y los ecosistemas.

Los *problemas* de la Megalópolis como; calidad del aire, congestionamiento vial, suministro de servicios básicos, vulnerabilidad a eventos extremos, comparten fuerzas o procesos guiadores transversales a estos problemas. Solo un enfoque ecosistémico puede hacer transparentes estas interconexiones entre problemas a través de sus fuerzas guiadoras compartidas. Solo la evidencia de los costos acumulativos de las externalidades generadas por un conjunto reducido de fuerzas guiadoras puede llevar los problemas ambientales que enfrenta la Megalópolis al primer plano de la agenda pública.

Las políticas públicas sobre contaminación atmosférica sin un sistema regional de monitoreo de calidad del aire; sin un inventario de emisiones científicamente robusto, sin un modelo de inventario de emisiones con alta resolución espacial; sin un modelo robusto y confiable de calidad del aire, necesario para estimar riesgos, costos y beneficios por su aplicación (Fig. 30), son golpes de ciego, desperdicio de los siempre escasos recursos públicos y de la crecientemente escasa credibilidad de todos los niveles de gobierno y poderes del Estado (Moreno Jaimes, 2007).

12.2. Reforzar el Sistema de Monitoreo Atmosférico Megalopolitano

El monitoreo atmosférico extensivo se ha convertido en un verdadero reto nacional. En la actualidad los sistemas están plenamente orientados al cumplimento de una normatividad con foco en la protección de la salud en la población. Aun así, con este enfoque limitado, los sistemas de monitoreo atmosférico están muy lejos todavía de poder cumplir esa meta.

Sin embargo, se ha demostrado que además de la salud, la contaminación atmosférica también afecta el rendimiento de cultivos, la salud de ecosistemas, la captura de carbono en bosques, el patrimonio cultural, la infraestructura pública y el patrimonio privado. De esta forma afecta toda la base material que sustenta el bienestar de la población actual y pone en riesgo el bienestar de las poblaciones futuras. Se requiere de un rediseño

normativo y de todo el monitoreo nacional, para ampliar los objetivos y cobertura de los sistemas de monitoreo.

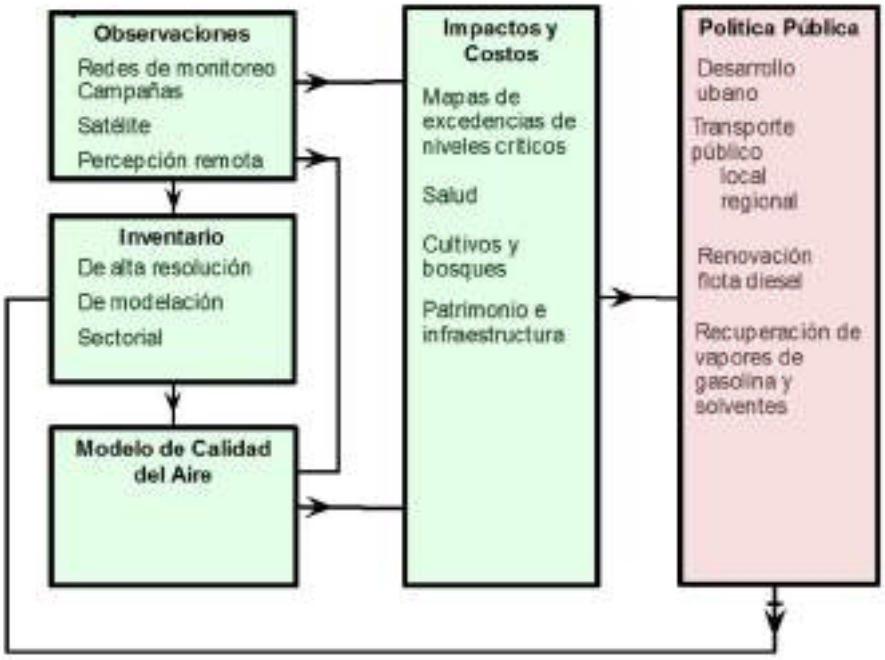


Figura 30.- Diagrama conceptual de la interacción entre los cuatro pilares de la política pública sobre calidad del aire: observaciones, inventario de emisiones, modelos de calidad del aire y la estimación de riesgos y costos de los diferentes receptores de la contaminación. Ilustra también sobre el carácter iterativo del proceso (INECC, 2015)´.

En este sentido la agenda científica debe contribuir a definir y construir los nuevos elementos que permitan registrar, documentar y analizar la presencia de contaminantes atmosféricos y climáticos en la atmósfera regional, su reactividad fotoquímica, el transporte entre cuencas, los efectos directos en los ecosistemas clave, cultivos, bosques y en el patrimonio cultural. Se deben evaluar las oportunidades que ofrecen, y sus limitaciones, los nuevos sistemas miniaturizados y satelital para el monitoreo de la calidad del aire. Su implementación y uso, junto con el uso de monitores pasivos, puede contribuir a registrar, documentar y analizar los campos de concentración de especies químicas de interés ambiental.

Sumándose a estos retos emergen otros contaminantes cuyo registro, documentación y análisis no pueden ser ignorados o postergados. Entre estos podemos contar; compuestos orgánicos volátiles, precursores de ozono, pero también tóxicos y cancerígenos, que deben ser monitoreados específicamente, mercurio, compuestos orgánicos persistentes, compuestos orgánicos policíclicos y sus derivados. Pólenes y esporas pueden afectar no solo a personas sensibles provocando alergias, pueden tener efectos sinérgicos con los oxidantes atmosféricos y patógenos oportunistas. Pueden también transportar plagas que afecten cultivos de importancia económica.

12.3. Construir el inventario único de la Megalópolis

Los inventarios de emisiones son herramientas fundamentales para la toma de decisiones en acciones de política pública para el control y mitigación de emisiones de contaminantes atmosféricos locales y globales. Son elemento indispensable en los modelos de calidad del aire, para evaluación de escenarios, investigación científica y el desarrollo del modelo de pronóstico de la calidad del aire.

En términos generales, el país ha ido construyendo las capacidades necesarias para elaborar sus inventarios de emisiones. Se han determinado localmente algunos factores de emisión. Se construye la capacidad de aplicar sofisticados modelos para estimar emisiones de fuentes vehiculares y se avanza en mejorar los datos de las actividades emisoras de contaminantes.

Sin embargo, aún se carece de una armonización y estandarización de los procesos generales para estimar las emisiones. Los criterios y métodos pueden variar entre los Estados de la región centro. La generación de inventarios de emisiones no hace uso óptimo de los desarrollos científicos y tecnológicos disponibles.

En las universidades y centros de investigación en la región CAMe existe la capacidad para obtener factores de emisión de fuentes clave en el inventario de emisiones, y la asimilación crítica de factores de emisión obtenidos en otros países. El desarrollo de los inventarios de emisiones está estrechamente vinculado al desarrollo en las ciencias de la información. Los avances en sistemas de información geográfica, de lenguajes de marcado y de minería de datos permite; estandarizar, automatizar, optimizar y avanzar en la resolución espacial y temporal de los inventarios de emisiones.

La construcción de un sistema único de inventarios de emisiones debe asumirse como una prioridad de política ambiental. En la región CAMe su necesidad es evidente, los avances que se logren en la CAMe seguramente servirán de base para un Sistema Nacional Único de Inventarios de Emisiones.

La creación de un sistema de inventarios de emisiones necesita de un subsistema de documentación del inventario, de otro subsistema de validación del inventario. La validación de inventarios requiere de un análisis de los procedimientos de control y aseguramiento de la calidad del inventario, de su transparencia y consistencia. Esta validación es de naturaleza interna pero el inventario debe también validarse externamente. Pare ello los resultados de los inventarios deben compararse con observaciones experimentales. Las observaciones de las redes de monitoreo pueden contribuir a esta validación (Zavala et al., 2009), así como las observaciones satelitales (Stremme et al., 2013) y las campañas intensivas de caracterización de cuencas.

Los modelos de calidad del aire requieren de inventarios con alta resolución espacial y temporal que implica el desarrollo de un modelo de inventario de alta resolución a partir del inventario base. Estos modelos también deben ser validados en su consistencia interna y por comparaciones con observaciones.

12.4. Química atmosférica y Transporte entre Cuencas Atmosféricas

El conocimiento de los procesos de emisión, la especiación química y física de las emisiones, su transporte a corta y mediana escala, su transformación química y destino final en el ambiente es indispensable para establecer la aportación de las diferentes fuentes en la calidad del aire de la megalópolis, localizar sitios receptores, estimar exposición y cargas críticas (Molina et al., 2010).

El reducido conjunto de mediciones que realizan las redes de monitoreo, parámetros meteorológicos básico y contaminantes criterio no permiten profundizar en ese conocimiento. Por lo cual se requiere de realizar periódicamente compañas de intensivas de mediciones con la finalidad de caracterizar las cuencas atmosféricas en su conjunto. Estas campañas deben incluir la más amplia gama de instrumentos que sea posible reunir en la región para el análisis y comprensión de los procesos arriba mencionados.

El monitoreo rural de oxidantes atmosféricos, en sitios de intercambio entre cuencas y el monitoreo del depósito atmosférico indispensables para la construcción de una política ambiental a escala de la Megalópolis de México y su área de influencia.

Es relevante conocer más de las especies químicas reactivas y tóxicas en la atmósfera. También es necesario profundizar en el conocimiento del aerosol fotoquímico de la región, debido a la importancia que tiene en los problemas de salud, formación de compuestos secundarios y forzantes climáticos. Los reportes recientes sobre la presencia de nanopartículas, de origen tecnogénico, en el cerebro de los habitantes de la ZMVM da lugar a importantes interrogantes que deben ser abordadas (Calderón-Garcidueñas and Torres-Jardón, 2015; Calderón-Garcidueñas et al., 2014).

Los modelos numéricos de calidad del aire se vuelven herramientas indispensables para pronosticar de la calidad del aire, analizar escenarios, para evaluar virtualmente el impacto de medidas de control, construir mapas de excedencias de niveles y cargas críticas. La capacidad nacional de modelación de calidad del aire es muy limitada. Es necesario incrementar y optimizar los recursos materiales y humanos para ese fin.

Es necesario asimilar y apropiarse cognitivamente de los modelos desarrollados por la comunidad científica internacional, pero también es necesario contribuir a su desarrollo en componentes como modelos físicos y parametrizaciones más adecuados a las latitudes y orografía compleja que caracterizan a gran parte del territorio nacional.

La calidad del aire en la megalópolis también está bajo la influencia de fuentes cercanas y remotas. Es necesario desarrollar la capacidad de identificar esas fuentes, cuantificarlas, monitorear y modelar el transporte de las masas de aire que transportan esos contaminantes. Estas constituyen la línea base sobre la cual se pueden estimar los efectos de las emisiones locales y los impactos de las medidas de mitigación que con esfuerzos asuman las comunidades locales.

Toda la información generada antes, durante y después de cualquier estudio o campaña deberá ser organizada y resguarda en un repositorio nacional de datos

ambientales, que permitan de manera costo-efectivo recuperar información ordenada y estandarizada que puede ser útil para desarrollar nuevo conocimiento de la Megalópolis, evitando que se tengan que fondear nuevos estudios para obtener la misma información (National Academies of Sciences, 2016).

12.5. Impactos en Salud

El foco de la política pública sobre contaminación atmosférica en México ha sido la protección de la salud de la población (Borrego-Hernández et al., 2014; Molina and Molina, 2002; Riojas-Rodríguez et al., 2013), con gran énfasis en ZMVM. Es necesario avanzar en la estimación del impacto en la salud y los costos acumulativos por la ausencia de una política pública a escala megapolitana. Es recomendable que los estudios para evaluar escenarios de mitigación de la contaminación atmosférica incluyan una estimación de los costos público y privados, así como beneficios en términos de salud pública y calidad de vida (Jazcilevich et al., 2011; Jazcilevich Diamant et al., 2012).

La expansión urbana sin control da lugar a una combinación acumulativa de externalidades (Fig. 18). Una de estas externalidades es el incremento en las distancias al trabajo (Anexo 3 en INECC (2015)). Es de esperarse que otros viajes, como asistir a la escuela o de negocios también presenten incrementos similares. Una consecuencia inmediata es una mayor exposición a concentraciones más altas y por más tiempo a nivel de calle que debe ser evaluada. Con excepción de la ZMVM, todas las ciudades en la CAMe presentan este fenómeno.

Por sus serias implicaciones en la salud de la población, los reportes sobre la presencia de PM < 1 μm en el cerebro humano (Calderón-Garcidueñas and Torres-Jardón, 2015; Garciduenas et al., 2015), deben generar la misma respuesta que los informes sobre la presencia de Plomo en la sangre de los habitantes de la Ciudad de México generaron en la década de los 80s del siglo pasado (Romieu et al., 1994).

12.6. Impactos sobre Cultivos y Bosques

En México se han realizado escasas observaciones de ozono y otros compuestos reactivos como los óxidos de nitrógeno en medios rurales (García-Yee et al., 2016; Ruiz-Suárez et al., 2016; Salcedo et al., 2012). Las pocas observaciones realizadas, y los pocos ejercicios computacionales realizados con ese fin, muestran que, en amplias zonas rurales del centro de México, se exceden por mucho los valores críticos aceptados por la comunidad científica como umbrales el daño a la vegetación expuesta a ozono (Tabla 1). Los cultivos, bosques, ANP y en general los ecosistemas de la región centro de México son la base material que sustentan la viabilidad de la Megalópolis de México. En adición a la presión que el crecimiento poblacional y expansión urbana ejercen, la contaminación atmosférica contribuye a su deterioro. Es indispensable el monitoreo rural de oxidantes atmosféricos y el depósito de contaminantes que afectan su crecimiento y el equilibrio entre especies vegetales en ecosistemas.

El impacto del ozono en vegetales se estima mediante el uso de funciones dosis-respuesta. En la literatura científica se encuentran reportadas estas funciones para un buen número de especies vegetales, incluyendo cultivos de importancia económica en México. No obstante, propias de nuestro suelo y cultura tenemos plantas como el maguey, nopales, amaranto cuyas funciones dosis-respuesta nos corresponde determinar por su importancia económica en la región.

12.7. Impactos sobre Patrimonio Cultural

La contaminación atmosférica no solo afecta la salud de personas y vegetales, afecta también una gran variedad de materiales importantes para el bienestar de la población, entre ellos de gran importancia son los que integran nuestro patrimonio cultural. Todos los materiales se degradan por el interperismo y su uso. Esta degradación es acelerada por la exposición a contaminantes como ozono, óxidos de azufre y nitrógeno. Desgaste prematuro implica gastos de mantenimiento y reposición más altos (Fig. 31).

Recubrimientos, grandes y pequeñas estructuras metálicas como marcos, puentes, torres de alto voltaje sufren un deterioro acelerado por su exposición a la contaminación atmosférica. También materiales como la piedra y el concreto. De particular interés son los materiales con los que fue construido nuestro patrimonio cultural, arqueológico e histórico. Algunos de estos materiales son específicos de nuestro suelo, impactado por actividad volcánica relativamente reciente. Para este tipo de materiales presente de forma dominante en muchas edificaciones en la Megalópolis no existen funciones dosis-respuesta. ES necesario obtenerlas para estimar el daño en estos materiales irremplazables y optimizar los recursos destinados a su conservación.

12.8. Ciencias jurídicas y sociales

Los grandes problemas ambientales que enfrenta la civilización contemporánea, y en particular la Megalópolis, son resultado de la actividad humana. Dependen de la forma específica de distribuir en el territorio a la población y las actividades productivas; de las tecnologías vigentes para la producción de energía, bienes y el transporte de mercancías y personas; de los marcos normativos que regulan estas actividades.

Por lo tanto, para la elaboración de política pública para controlar y reducir la contaminación atmosférica en la Megalópolis y su área de influencia se requiere de las ciencias que estudian el comportamiento de los individuos y los grupos sociales para identificar las barreras culturales e institucionales, así como los vacíos legales que limitan los alcances efectivos de las propuestas técnico/científicas de políticas públicas, encaminadas a reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos locales y climáticos.

Toluca

Catedral de Puebla

Tula

Catedral de Puebla

Figura 31.- Ejemplos de efectos de la contaminación atmosférica en monumentos del patrimonio cultural. Se observa la formación de yeso en algunas piedras y desgaste acelerado por fracturas en materiales

13. Reuniones de expertos

Se realizaron dos reuniones de expertos para presentar avances y discutir esta propuesta para la agenda científica de la CAMe. Sus contribuciones están incluidas en la propuesta de Agenda Científica y en otras partes de este informe, en donde sus aportaciones contribuyeron a calificar conceptos.

Se incluye un Anexo con materiales probatorios de la realización de las reuniones.

14. REFERENCIAS

Almanza, V.H., Molina, L.T., Sosa, G., 2012. Soot and SO2 contribution to the supersites in the MILAGRO campaign from elevated flares in the Tula Refinery. Atmos. Chem. Phys. 12, 10583-10599.

B. de Foy, N. A. Krotkov, N. Bei, S. C. Herndon, L. G. Huey, A.-P. Martínez, L. G. Ruiz-Suárez, E. C. Word, M. Zavala, Molina., L.T., 2009. Hit from both sides: tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO2 retrievals during the MILAGRO field campaign. Atmos. Chem. Phys. 9, 9599–9617.

Baklanov, A., Molina, L.T., Gauss, M., 2016. Megacities, air quality and climate. Atmospheric Environment 126, 235-249.

Borrego-Hernández, Ó., García-Reynoso, J.A., Ojeda-Ramírez, M.M., Suárez-Lastra, M., 2014. Retrospective health impact assessment for ozone pollution in Mexico City from 1991 to 2011. Atmósfera 27, 261-271.

Caetano, E., Magaña, V., 2007. Identificación de Cuencas Atmosféricas en México. Instituto Nacional de Ecología.

Calderón-Garcidueñas, L., Torres-Jardón, R., 2015. The Impact of Air Pollutants on the Brain. JAMA psychiatry 72, 529-530.

Calderón-Garcidueñas, L., Torres-Jardón, R., Kulesza, R.J., Park, S.-B., D'Angiulli, A., 2014. Air pollution and detrimental effects on children's brain. The need for a multidisciplinary approach to the issue complexity and challenges. Frontiers in human neuroscience 8.

Castaño, J.G., Botero, C.A., Peñaranda, S., 2007. Corrosión atmosférica del zinc en ambientes exteriores e interiores. Revista de metalurgia 43, 133-145.

CLRTAP, 2015. Mapping Critical Levels for Vegetation, Chapter III of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. , UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution.

de Foy, B., Caetano, E., Magaña, V., Zitácuaro, A., Cárdenas, B., Retama, A., Ramos, R., Molina, L.T., Molina, M.J., 2005. Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign. Atmos. Chem. Phys. 5, 2267-2288.

de Foy, B., Fast, J.D., Paech, S.J., Phillips, D., Walters, J.T., Coulter, R.L., Martin, T.J., Pekour, M.S., Shaw, W.J., Kastendeuch, P.P., Marley, N.A., Retama, A., Molina, L.T., 2008. Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis, Atmos. Chem. Phys., pp. 1209-1224.

Díaz-Nigenda, E., Tatarko, J., Jazcilevich, A.D., García, A.R., Caetano, E., Ruíz-Suárez, L.G., 2010. A modeling study of Aeolian erosion enhanced by surface wind confluences over Mexico City. Aeolian Research 2, 143-157.

Doran, J.C., Zhong, S., 2000. Thermally Driven Gap Winds into the Mexico City Basin. Journal of Applied Meteorology 39, 1330-1340.

Escalante García, J.S., García Reynoso, J.A., Jazcilevich Diamant, A., Ruiz-Suárez, L.G., 2014. The influence of the Tula, Hidalgo complex on the air quality of the Mexico City Metropolitan Area. Atmósfera 27, 215-225.

Espinasa Pereña, R., 2012. Historia de la actividad del Volcán Popocatépetl 17 años de erupciones. CENAPRED, Mexico.

Fujita, E.M., Bart E. Croes, Charles L. Bennett, Douglas R. Lawson, Frederick W. Lurmann, Main, H.H., 1992. Comparison of Emission Inventory and Ambient Concentration Ratios of CO, NMOG,

and NOx in California's South Coast Air Basin. Journal of the Air & Waste Management Association 42, 264-276.
G. Mills, A. Buse, B. Gimeno, V. Bermejo, M. Holland, L. Emberson, Pleijel, H., 2007. A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops. Atmospheric Environment 41, 2630–2643.
García Reynoso, J.A., Ruiz Suárez., L.G., García Escalante, S., N.A., R.J., 2009. Comportamiento de los contaminantes en cuencas atmosféricas: metodología y estudio de caso. Instituto Nacional de Economía, México, DF.
Garcia-Reynoso, A., Jazcilevich, A., Ruiz-Suarez, L.G., Torres-Jardon, R., Lastra, M.S., Juarez, N.A.R., 2009. Ozone weekend effect analysis in Mexico City. Atmosfera 22, 281-297.
García-Yee, J.S., R. Torres-Jardón, H. Barrera-Huertas, T. Castro, O. Peralta, M. García, W. Gutiérrez, M. Robles, A. Torres-Jaramillo, A. Ortínez, Ruiz-Suárez, L.G., 2016. Characterization of NOx-Ox relationships during daytime exchange of air masses over a mountain pass in the Mexico City Megalopolis. Atmos. Env. Sometido a arbitraje.
Garciduenas, L.C., Melo-Sanchez, G., Vargas-Martinez, J., Macias-Escobedo, E., Hernandez-Orona, V.L., Cano-Gutierrez, G., Avila-Ramirez, J., Torres-Jardon, R., 2015. Air pollution and children: barrier breakdown, inflammation, brain immunity and neurodegeneration. Journal of the Neurological Sciences 357, e509.
Harker, A.B., Haynie, F., Mansfeld, F., Strauss, D.R., Landis, D.A., 1982. Measurement of the sulfur dioxide and sulfuric acid aerosol induced corrosion of zinc in a dynamic flow system. Atmospheric Environment (1967) 16, 2691-2698.
INECC, 2014. Estudios de Calidad del Aire y su Impacto en la región Centro de México (Ecaim),. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México, Ciudad de México, p. 744.
INECC, 2015. Estudios de Calidad del Aire y su Impacto en la región Centro de México (Ecaim). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático., Ciudad de México, p. 303.
INEGI, 2015. Conjunto de datos vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Serie V (Capa Unión). Escala 1:250 000.
Jáuregui, E., 1989. The dust storms of Mexico City. International Journal of Climatology 9, 169-180.
Jazcilevich, A., Garcia, A., Ruiz-Suarez, L., 2003. A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico. Atmospheric Environment 37, 183-193.
Jazcilevich, A.D., Reynoso, A.G., Grutter, M., Delgado, J., Ayala, U.D., Lastra, M.S., Zuk, M., Oropeza, R.G., Lents, J., Davis, N., 2011. An evaluation of the hybrid car technology for the Mexico Mega City. Journal of Power Sources 196, 5704-5718.
Jazcilevich Diamant, A., Cruz Núñez, C., Rojas Rueda, A., Tripp Rivera, M.d.J., Ruiz Suárez, L.G., García Reynoso, J.A., 2012. PROGRAMA DE ACCIÓN PARA REDUCIR LAS EMISIONES EN LA FLOTA VEHICULAR DIÉSEL EN EL DISTRITO FEDERAL. UNAM.
Koch, G.H., Brongers, M.P.H., Thompson, N.G., Virmani, Y.P., Payer, J.H., 2002. Corrosion cost and preventive strategies in the United States.
Kreislova, K., 2013. CONTEMPORARY CONDITION OF CORROSION ATTACK OF METALLURGICAL PRODUCTS AND ITS EVALUATION.
Lei, W., de Foy, B., Zavala, M., Volkamer, R., Molina, L.T., 2007. Characterizing ozone production in the Mexico City Metropolitan Area: a case study using a chemical transport model. Atmospheric Chemistry and Physics 7, 1347-1366.
López, M.T., Villasenor, R., Qunitanar, A.I., Mora, V., 1970. Transport and dispersion of blowing dust in the Mexico Basin. WIT Transactions on Ecology and the Environment 51.
Mikhailov, A.A., Suloeva, M.N., Vasilieva, E.G., 1995. Environmental aspects of atmospheric corrosion. Water, Air, and Soil Pollution 85, 2673-2678.

Molina, L.T., Madronich, S., Gaffney, J.S., Apel, E., de Foy, B., Fast, J., Ferrare, R., Herndon, S., Jimenez, J.L., Lamb, B., Osornio-Vargas, A.R., Russell, P., Schauer, J.J., Stevens, P.S., Volkamer, R., Zavala, M., 2010. An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation, Atmos. Chem. Phys., pp. 8697-8760.
Molina, L.T., Molina, M.J., 2002. Air quality in the Mexico megacity: an integrated assessment. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
Moreno Jaimes, C., 2007. Los límites políticos de la capacidad institucional: un análisis de los gobiernos municipales en México. Revista de ciencia política (Santiago) 27, 131-153.
Narváez Porras, O., Cano Valle, F., 2004. CENIZAS VOLCÁNICAS: CONTAMINACIÓN AMBIENTAL. Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias 17, 232-238.
National Academies of Sciences, E., and Medicine, 2016. The Future of Atmospheric Chemistry Research: Remembering Yesterday, Understanding Today, Anticipating, Tomorrow National Academy Press, Washington, DC.
Oesch, S., Faller, M., 1997. Environmental effects on materials: The effect of the air pollutants SO2, NO2, NO and O3 on the corrosion of copper, zinc and aluminium. A short literature survey and results of laboratory exposures. Corrosion Science 39, 1505-1530.
Pozzo, M.-D., Lillian, A., 2012. Precursors to eruptions of Popocatépetl volcano, Mexico. Geofísica internacional 51, 87-107.
Riojas-Rodríguez, H., Schilmann, A., López-Carrillo, L., Finkelman, J., 2013. Environmental health in Mexico: current situation and future prospects. Salud Pública de México 55, 638-649.
Rivera, C., Sosa, G., Wöhrnschimmel, H., de Foy, B., Johansson, M., Galle, B., 2009. Tula industrial complex (Mexico) emissions of SO 2 and NO 2 during the MCMA 2006 field campaign using a mobile mini-DOAS system. Atmospheric Chemistry & Physics 9.
Rivera-Tapia, A., Yáñez-Santos, A., Cedillo-Ramírez, L., 2005. Emisión de ceniza volcánica y sus efectos. Revista Ecosistemas 14.
Romieu, I., Palazuelos, E., Avila, M.H., Rios, C., Muñoz, I., Jimenez, C., Cahero, G., 1994. Sources of lead exposure in Mexico City. Environmental Health Perspectives 102, 384.
Ruiz Suarez, L.G., Calderón Ezquerro M. C., Delgado Campos J.G., García Martínez R., García Reynoso J.A., Grutter de la Mora M., Molina L.T., Peralta Rosales O., Torres Jardón R., Zavala Hidalgo J., Adams D. K, Victor A., Andraca Ayala G.L., Barrera Huertas H- A., Carabali G-. Castillo J., Castro Romero T., De Foy B., Espinoza M.L., Gómes Ramos O., Guerrero Guerra C., Hernández M., Herrera Moro D.R., Hidalgo C., Liñan R., López Espinoza E.D., Martínez López B., Martínez Trejo K.A., Mendoza A., Ortínez A., Osorio Tai M.E., Pavia R., Pérez Hernámdez A.E., Plaza Medina E. F., Quintanar I.A., Gangel García M., Reyes García V., Rivera Cárdenas C., Romero Centeno R. L., Ruiz Angulo A., Saavedra I., Santiago López I., Stremme Eimer W., Suárez Lastra M., Téllez Unzueta F., Wellens Pumal A.G. , 2014. Estudios de Calidad del Aire y su Impacto en la región Centro de México (Ecaim),. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México, Ciudad de México, p. 744.
Ruiz-Suárez, L.G., García Yee, J.S., J. A. García Reynoso, M. Grutter de la Mora, Stremme, W., H. Barrera Huertas, J. A. Torres Jaramillo, Álvarez, J.A.O., 2016. Use of concurrent top down approaches to assess emissions inventories for the central mexico cities belt IGAC 2016, Breckenridge CO.
Ruiz-Suárez, L.G., R. Torres-Jardón, H. Woernschimmel, R. Steinbrecher, W.Junkerman, E. Nigenda, A. García-Reynoso, M. Melamed, A. Jazcilevich, B.E. Mar-Morales, M. Grutter, Molina, L., 2010. In depth analysis of the role of the mountain gap south of the Valley of Mexico on the air quality in Mexico City. EGU2010-14043-1., European Geosciences Union, General Assembly 2010, Viena, Austria.

Salcedo, D., Castro, T., Ruiz-Suárez, L.G., García-Reynoso, A., Torres-Jardón, R., Torres-Jaramillo, A., Mar-Morales, B.E., Salcido, A., Celada, A.T., Carreón-Sierra, S., Martínez, A.P., Fentanes-Arriaga, O.A., Deustúa, E., Ramos-Villegas, R., Retama-Hernández, A., Saavedra, M.I., Suárez-Lastra, M., 2012. Study of the regional air quality south of Mexico City (Morelos state). Science of The Total Environment 414, 417-432.

Sánchez, E.M., 2007. Características territoriales, ambientales y sociopolíticas del Municipio de Texcoco, Estado de México. Quivera 9, 177-206.

Sheinbaum Pardo, C., A. Jazcilevich Diamant, C. Siebe Grabach, García, E.C., 2014. Mitigación de fuentes de material particulado emitidos por erosión eólica que afectan la Zona Metropolitana del Valle de México. Universidad Nacional Autónoma de México.

Sosa, G., Vega, E., González-Avalos, E., Mora, V., López-Veneroni, D., 2013. Air Pollutant Characterization in Tula Industrial Corridor, Central Mexico, during the MILAGRO Study. BioMed Research International 2013, 13.

SSA, 2014. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-020-SSA1-2014, SALUD AMBIENTAL. VALOR LÍMITE PERMISIBLE PARA LA CONCENTRACIÓN DE OZONO (O3) EN EL AIRE AMBIENTE Y CRITERIOS PARA SU EVALUACIÓN. Secretaría de Salud, Mexico.

Streit, G.E., Guzmán, F., 1996. Mexico City Air quality: Progress of an international collaborative project to define air quality management options. Atmospheric Environment 30, 723-733.

Stremme, W., Grutter, M., Rivera, C., Bezanilla, A., Garcia, A.R., Ortega, I., George, M., Clerbaux, C., Coheur, P.F., Hurtmans, D., Hannigan, J.W., Coffey, M.T., 2013. Top-down estimation of carbon monoxide emissions from the Mexico Megacity based on FTIR measurements from ground and space. Atmos. Chem. Phys. 13, 1357-1376.

Suárez, M., Delgado, J., Galindo , C., 2011. Local Spatial-Autocorrelation and Urban Ring Identification: Explorations in Mexico City's Regional Belt. Investigaciones Geográficas In Press.

Tice, E.A., 1962. Effects of air pollution on the atmospheric corrosion behavior of some metals and alloys. Journal of the Air Pollution Control Association 12, 553-559.

Van Goethem, T., Azevedo, L.B., Van Zelm, R., Hayes, F., Ashmore, M.R., Huijbregts, M.A.J., 2013. Plant species sensitivity distributions for ozone exposure. Environmental pollution 178, 1-6.

Zavala, M., Herndon, S.C., Wood, E.C., Onasch, T.B., Knighton, W.B., Marr, L.C., Kolb, C.E., Molina, L.T., 2009. Evaluation of mobile emissions contributions to Mexico City's emissions inventory using on-road and cross-road emission measurements and ambient data. Atmos. Chem. Phys. 9, 6305-6317.

Anexo 1. Agenda y Evidencias de la primera reunión

Contiene:

Invitación a primera reunión del 6 de Diciembre

Lista de asistentes

Algunas fotos

Presentación comentada por el Dr. Omar Amador como ejemplo de varias. La presentación fue compartida con todos los participantes y algunos de ellos retroalimentaron la misma para contribuir a la agenda científica

Agenda

Primera reunión de expertos en calidad del aire para la revisión de una agenda científica

INECC

Ciudad de México, 06 de Diciembre de 2016

Objetivo: Crear un espacio de intercambio de conocimiento y experiencias —de expertos en calidad del aire— para la conformación de una agenda científica orientada a la generación de elementos útiles al diseño y evaluación de políticas públicas enfocadas a mejorar la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México.

Durante la reunión se realizarán tres sesiones temáticas, durante las cuales se abordarán los siguientes tópicos:

1.- Introducción a la propuesta de Agenda Científica

2.- Mecanismos de retroalimentación

3.- Propuesta de segunda reunión

Diagnóstico Sobre de la Calidad del Aire en Cuencas Atmosféricas de México

Primera reunión de expertos en calidad del aire para la revisión de una agenda científica

Ciudad de México, 06 de Diciembre de 2016

Nombre	Institución	Teléfono	E-mail
Omar Amador Muñoz	CCA- UNAM	5622 42 40 ext 81813 55 12 95 50 63	oam@atmosfera.unam.mx
Claudia Inés Rivera Cárdenas	Facultad de Química UNAM	56223899 ext 44451	claudia.rivera@ciencias.unam.mx
Jose Agustin Garcia Reynoso	CCA - UNAM	56224396	agustin@atmosfera.unam.mx
Azon Jazcilevich	CCA - UNAM	56224064	jazcilev@unam.mx
Carlos Ochoa	CCA - UNAM	56224600 ext 81875	carlos.ochoa@atmosfera.unam.mx
Oscar Peralta	CCA - UNAM	5622-4056	oscar@atmosfera.unam.mx
Wolfgang Stremme	"		Stremme@atmosfera.unam.mx
Becki Jimenez Gatica	INECC	56·13·38·21	becki.jimenez@inecc.gob.mx

Diagnóstico Sobre de la Calidad del Aire en Cuencas Atmosféricas de México

Primera reunión de expertos en calidad del aire para la revisión de una agenda científica

Ciudad de México, 06 de Diciembre de 2016

Nombre	Institución	Teléfono	E-mail
AGOSTÍN FERNÁNDEZ ESQUIVEL	CCA, UNAM	5622 4060	agustin@unam.mx
Arturo Gavilán García	INECC	5424-6425	arturo.gavilan@inecc.gob.mx
Telma Castro	CCA, UNAM	56224076	telma@unam.mx
Gerardo Ruiz	CCA, UNAM INECC	56224073	ruiz@unam.mx

Diagnóstico Sobre de la Calidad del Aire en Cuencas Atmosféricas de México

Primera reunión de expertos en calidad del aire para la revisión de una agenda científica

Ciudad de México, 06 de Diciembre de 2016

Nombre	Institución	Teléfono	E-mail
Michel Grutter	CCA - UNAM	56224055	grutter@unam.mx
Víctor Hugo Páramo	INECC	56243450	victor.paramo@inecc.gob.mx
Manuel García Espinosa	C.C.A.-UNAM	56224066	mgarcia@atmosfera.unam.mx
Wilfrido Gutiérrez L	C.C.A. UNAM	56224066	wili@unam.mx
Ma. de la Luz Espinosa	INECC	5517006007	maria.espinosa@inecc.gob.mx
Abraham Ortiz	CCA. UNAM.	56224064	abraham@atmosfera.unam.mx
Roberto Basaldud	INECC	5624 3450	roberto.basaldud@inecc.gob.mx
Sergio Zirath Adez	INECC	54246400 ext 13191	sergio.zirath@inecc.gob.mx

Anexo 2. Agenda y Evidencias de la segunda reunión

Contenido

Lista de asistentes

Dos presentaciones como guía de la discusión

INECC
INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

COORDINACIÓN GENERAL DE CONTAMINACIÓN Y SALUD AMBIENTAL

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE Y LOS CONTAMINANTES CLIMÁTICOS DE VIDA CORTA

13 de diciembre de 2016

Nombre	Institución	Cargo	Teléfono y correo electrónico	Firma
Sergio Zivath Hernández Villaseñor	INECC	Director.	54246400 ext 13191 sergio.zivath@inecc.gob.mx	
J. Andres Aguilar Gómez	INECC	Subdirector	54246400 ext. 13141 andres.aguilar@inecc.gob.mx	
Daniel López Vicuña	Semarnat DGGCARETC	Director	(55) 56243404 daniel.lopez@semarnat.gob.mx	
Gloria Yáñez Rodríguez	DGGCARETC/ SEMARNAT	Subdirectora	(01 55) 56243580 gloria.yanez@semarnat.gob.mx	
Leonardo Martínez	Aequum	Socio director	LMF@aequum.org 5518495563	

INECC
INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

COORDINACIÓN GENERAL DE CONTAMINACIÓN Y SALUD AMBIENTAL

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE Y LOS CONTAMINANTES CLIMÁTICOS DE VIDA CORTA

13 de diciembre de 2016

Nombre	Institución	Cargo	Teléfono y correo electrónico	Firma
Julissa Calva Cruz	Semarnat CAMe	Directora	julissa.calva@semarnat.gob.mx Ext. 12110	
María de la Luz Espinosa Fuentes	INECC	Subdirectora	54246400 ext. 13177 maria.espinosa@inecc.gob.mx	
César Raygoza de la Madrid	Semarnat CAMe	Director Gral. Adjunto Calidad Aire	54 Ext. 12315	
Rodolfo Iniestra Gómez	INECC	Subdirector	54-24-64-00 ext. 13248	
Víctor Hugo Páramo Figueroa	INECC	Coord. Gral.	54-24-64-00	

INECC
INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

COORDINACIÓN GENERAL DE CONTAMINACIÓN Y SALUD AMBIENTAL

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE Y LOS CONTAMINANTES CLIMÁTICOS DE VIDA CORTA

13 de diciembre de 2016

Nombre	Institución	Cargo	Teléfono y correo electrónico	Firma
Sergio Sánchez	CleanAir Institute/ Instituto de Aire Limpio AC	Director Ejecutivo	+1(202) 4683731	
Abraham Ortínez	CCA - UNAM	Est. Doctrado.	06-22-40-64	
Alejandro Noguez I.	INECC	Jefe de Depto.	54246400 - ext 13230 alejandro.noguez@inecc.gob.mx	
Víctor Menendez	Semarnat/CAME	DGA	semarnat.gob.mx victor.menendez@	
Horacio Riojas	INSP	Director Salud Ambiental	hriojas@insp.mx	

INECC
INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

COORDINACIÓN GENERAL DE CONTAMINACIÓN Y SALUD AMBIENTAL

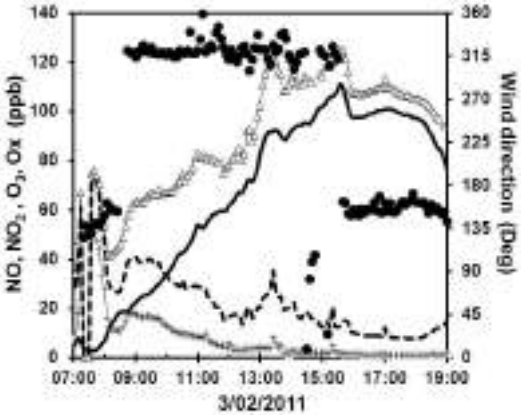
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE Y LOS CONTAMINANTES CLIMÁTICOS DE VIDA CORTA

13 de diciembre de 2016

Nombre	Institución	Cargo	Teléfono y correo electrónico	Firma
Ramiro Barrios C.	Instituto del Aire Limpio	Consultor	55 1696 5533 ramirobarrios2002@gmail.com	
Luis Gerardo Ruiz Suárez	CCA-UNAM INECC	investigador sabático	ruiz5@unam.mx	
Carmen Lizeth Huerta Gutiérrez	UAM-A	Estudiante	lizeth.mx@hotmail.com	
Saúl Rodríguez Rivera	IAL	Consultor	5527778675 slrodriguezrivera@gmail.com	

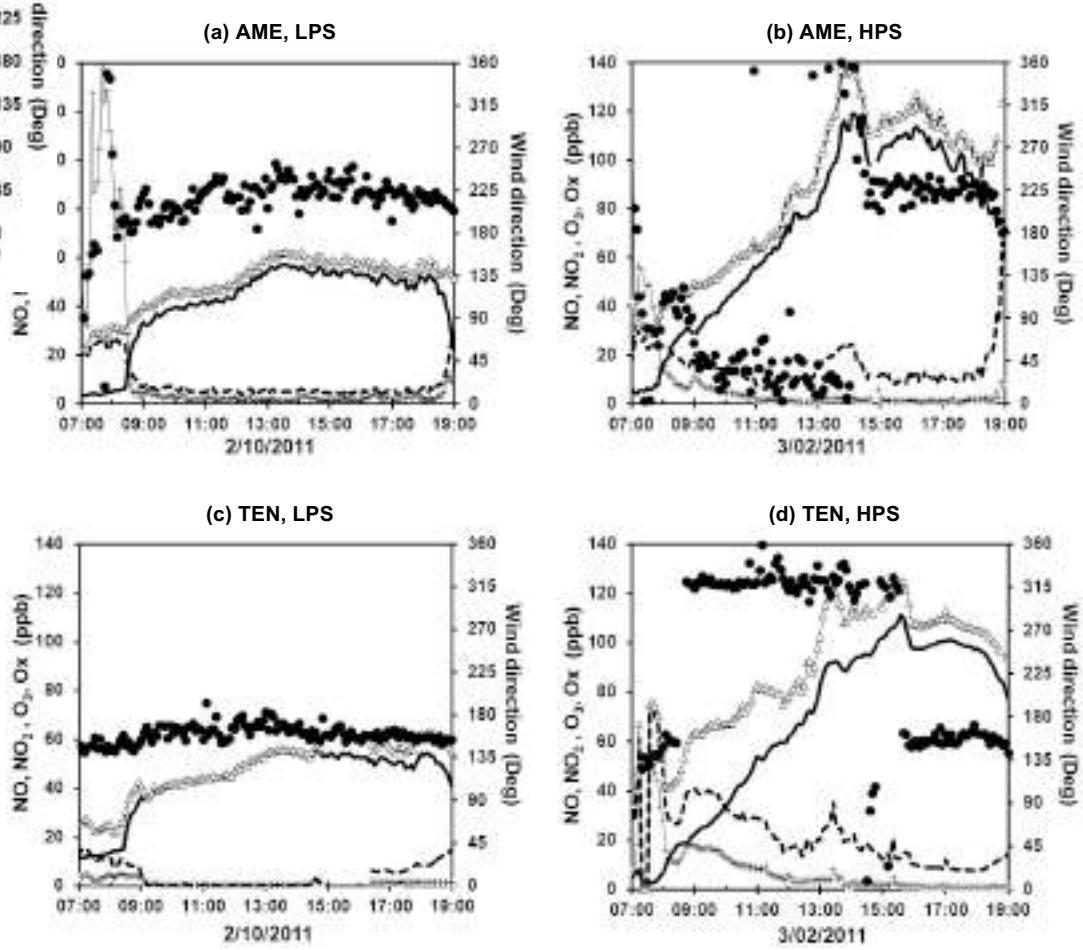
Química atmosférica y transporte entre cuencas

›xidantes O_3 y Ox= O_3+NO_2, sobre el Paso de Tenango del Aire para dos días típicos alta y baja presión



desde el sur (Valle de Cuautla-Cuernavaca, VCC) y tan lejos como el Océano Pacífico.

- No se exceden los dos umbrales de la NOM-020-SSA1-2014.
- Viento más intenso produce día de ozono norte en ZMVM



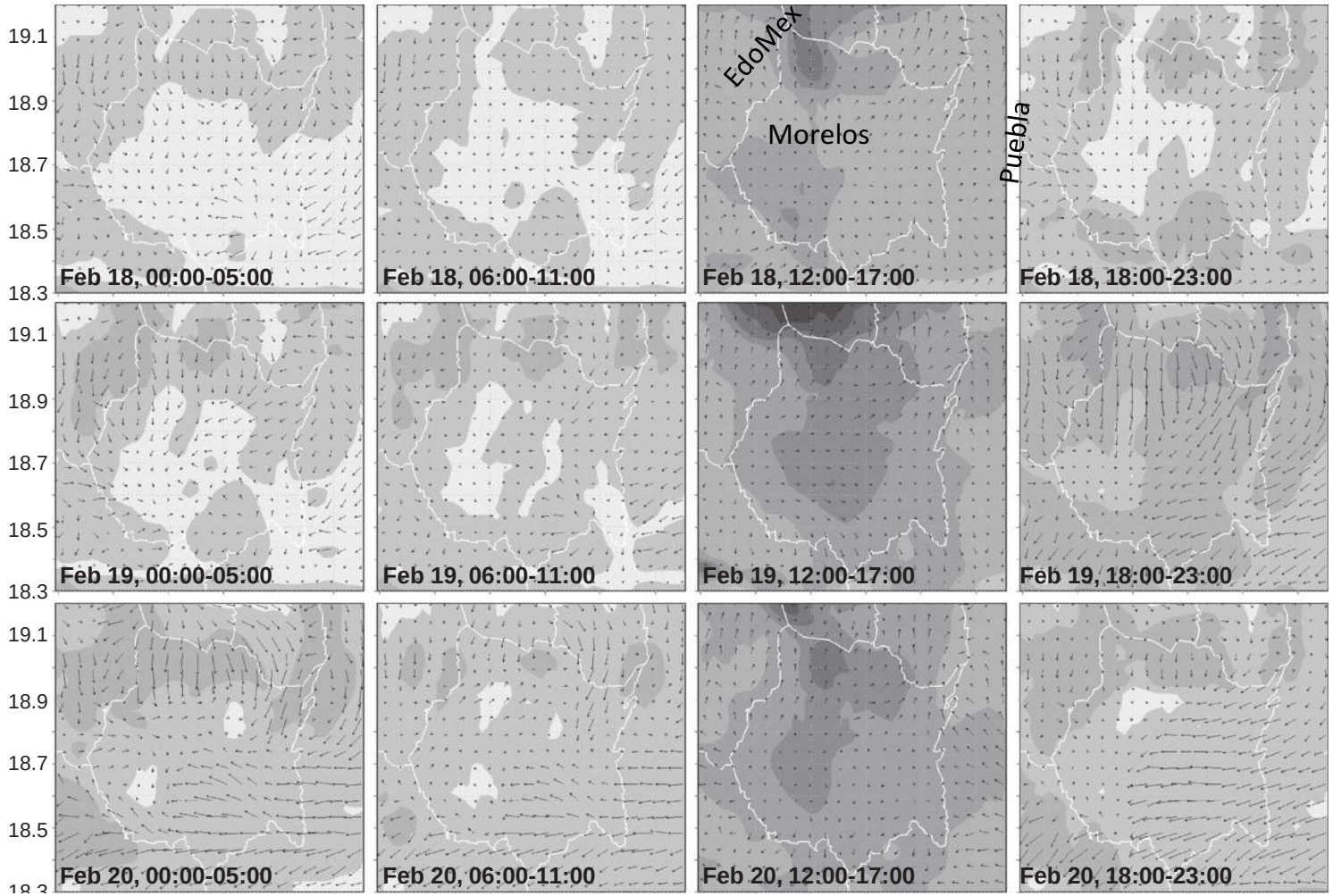
Fuente: Characterization of NO_x-O_x relationships during daytime exchange of air masses over a mountain pass in the Mexico City Megalopolis. García-Ye et al enviado a Atmos. Environ.

Alta presión

- Durante la mañana el viento sopla del norte (ZMVM) y en la tarde del sur, regresando las parcelas de aire ya envejecidas fotoquímicamente enriquecidas con emisiones del Valle Cuautla Cuernavaca (NO_2 y CO que no se muestra
- Se exceden los dos umbrales de la NOM-020-SSA1-2014 incluso con viento del sur.
- Viento más débil produce día de ozono sur en ZMVM

Ozono y vientos en Morelos durante campaña CARIEM 2009, Febrero-Marzo

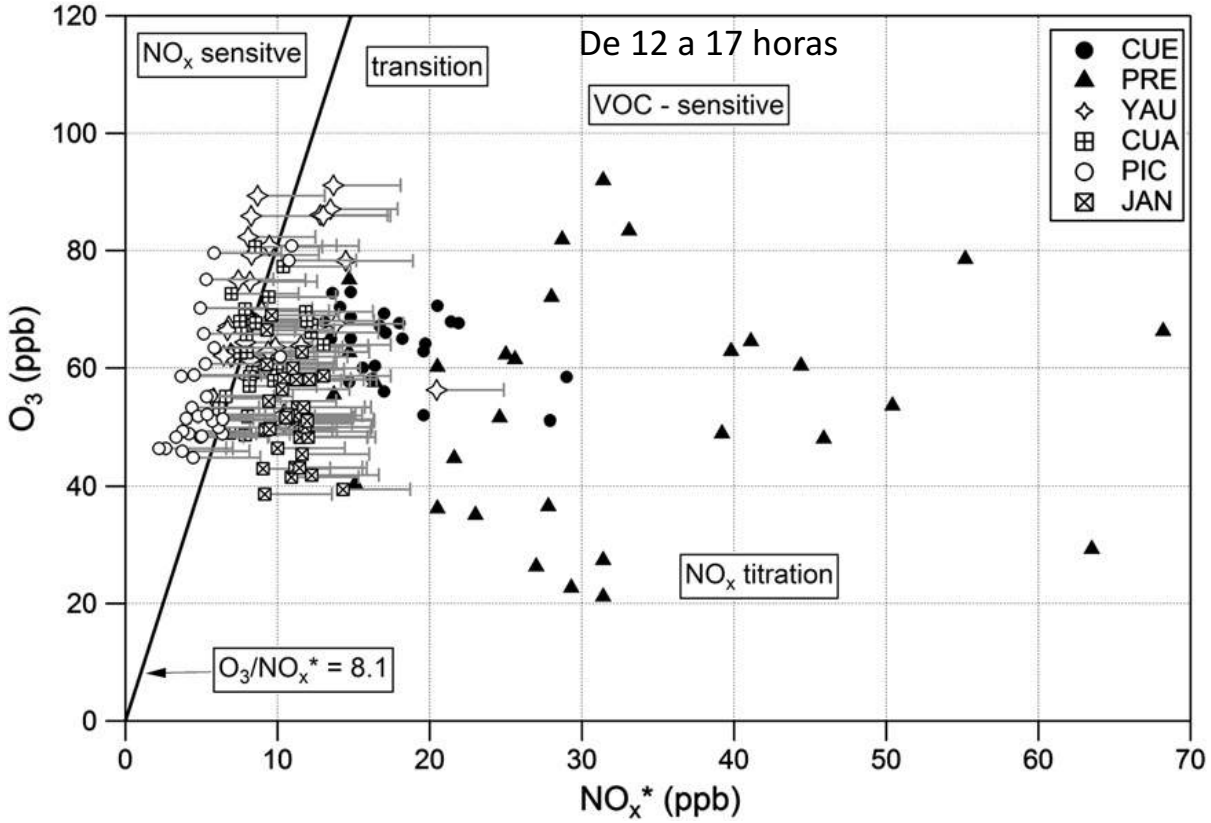
D. Salcedo et al. / Science of the Total Environment 414 (2012) 417–432



Patrones promedio de viento, en diferentes periodos del día, durante tres días.
Hay intercambio entre todas las cuencas

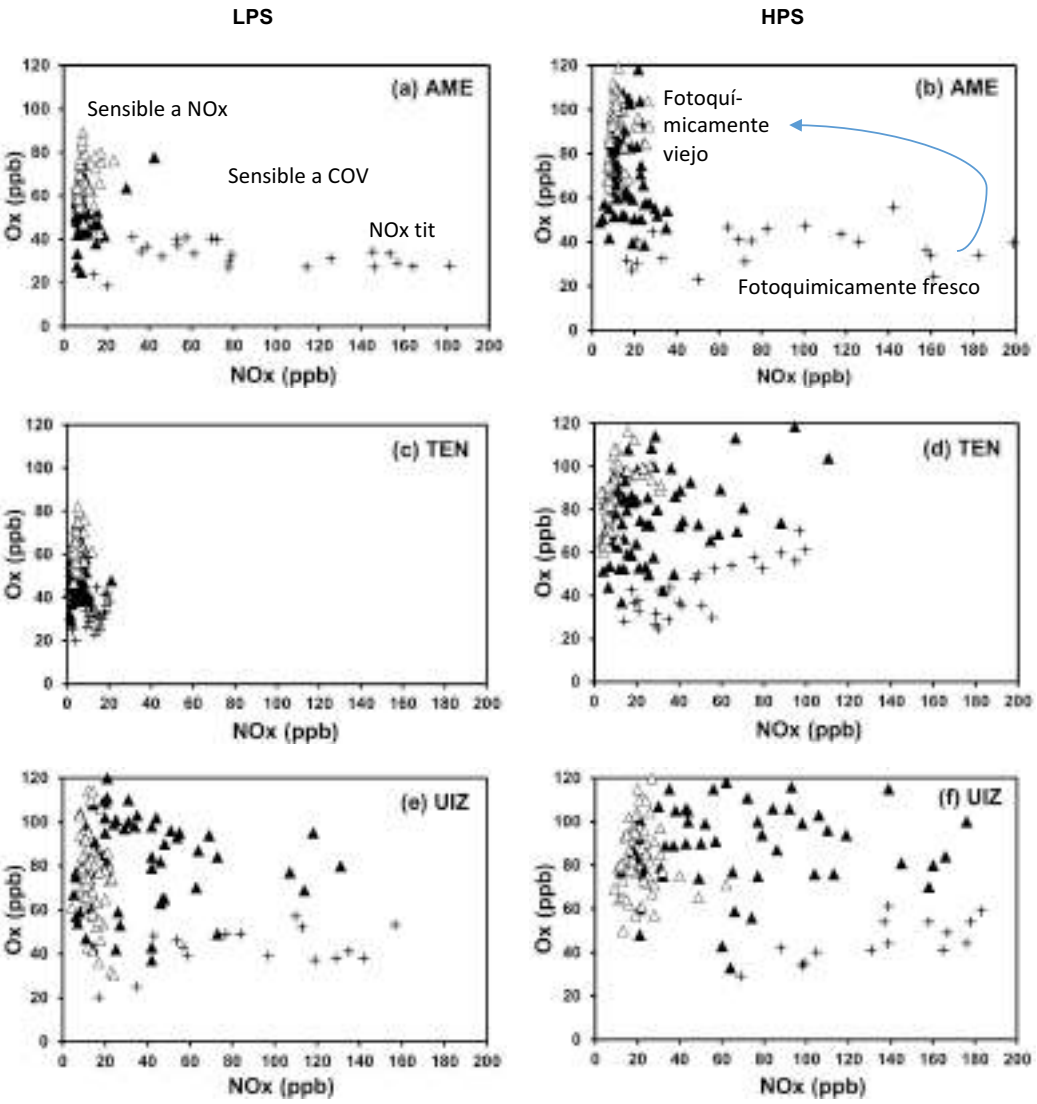
Relaciones O3 vrs NOx* (proxi de NOy), en Morelos durante CARIEM, Feb-Mar 2009

D. Salcedo et al. / Science of the Total Environment 414 (2012) 417–432



CUErnavaca centro
PREpa 1, Cuernavaca
YAUtepec
CUAutla
Parque **I**nd. **C**uautla
JANtetelco

Solo los sitios en Cuernavaca son sensibles a los COV, el resto de los sitios está en situación de transición o son sensibles a NOx



Relaciones Ox con NOx para sitios urbanos (UIZ) y periurbanos (Tenango del Aire y Amecameca)

UIZ se porta igual en Baja o Alta Presión, solo cambian los máximos de NOx.
TENango del Aire en Baja Presión es rural, en Alta Presión parece urbano
AMEcameca parece urbano temprano en la mañana en Baja y Alta Presión, el resto del día se parece a TEN rural

Datos de Puebla en proceso pero se parecen a los que aquí se presentan

En sitios rurales y periurbanos se rebasa la NOM-020-SSA1-2014, principalmente el promedio móvil de ocho horas.

Recomendaciones

- Indispensable monitoreo rural y entre cuencas
- Control de emisiones (propuesta en proceso)

Efecto en el patrimonio cultural

Efecto de la contaminación en el Patrimonio Cultural

Toluca

Catedral de Puebla

Tula

Catedral de Puebla

Las manchas blancas es yeso que se forma a partir de la reacción de carbonatos en la piedra con SO_2 y sulfatos en la atmósfera.

Al disolverse los sulfatos la piedra queda más expuesta a la contaminación dando lugar a que fragmente.

La pérdida económica es invaluable pero con mapas de afectación se puede optimizar el uso de los recursos para conservación

Mapa de recesión para piedra volcánica de algunos monumentos arqueológicos en la CRCM, 2014

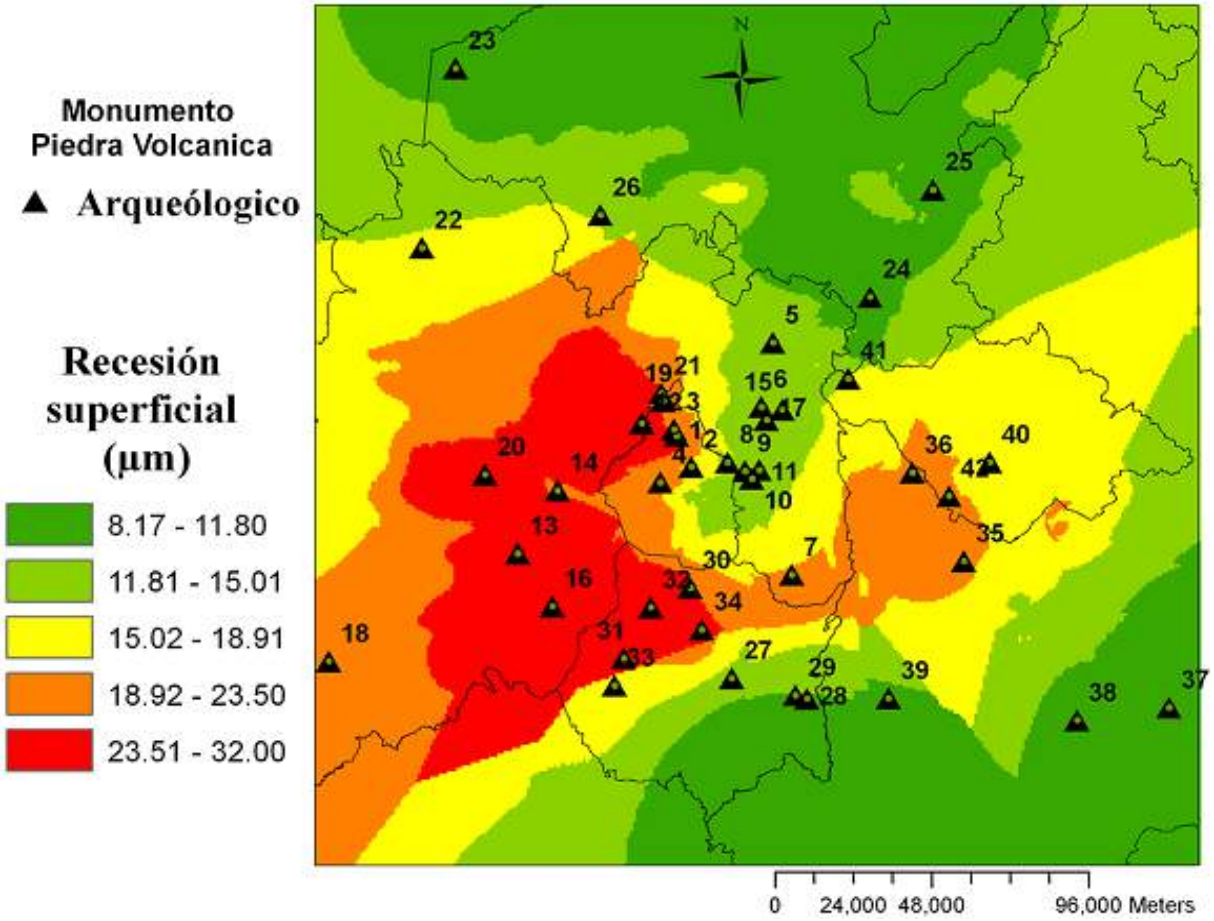


Tabla A01-16 Estimado preliminar de recesión (micras) de 2014, en Piedra volcánica

Id.	Nombre	Estado	Reccesón natural	Recesión presente	% Incre-mento
10	Santa Cecilia	México	17.8	23.0	29.3
3	Zona de Monumentos Arq. El Conde	México	21.1	26.9	27.5
2	Zona De Monumentos Arq. de Calixtlahuaca-San Marcos	México	21.5	27.3	26.9
13	Zona de Monumentos Arq. de Cholula	Puebla	17.5	22.1	26.0
9	Zona Arq. de Templo Mayor	D.F.	19.9	24.1	21.2
12	Zona Arq. de Tlatelolco	D.F.	19.0	22.5	18.9
14	Zona Arq. de Tenayuca	México	18.0	21.3	18.5

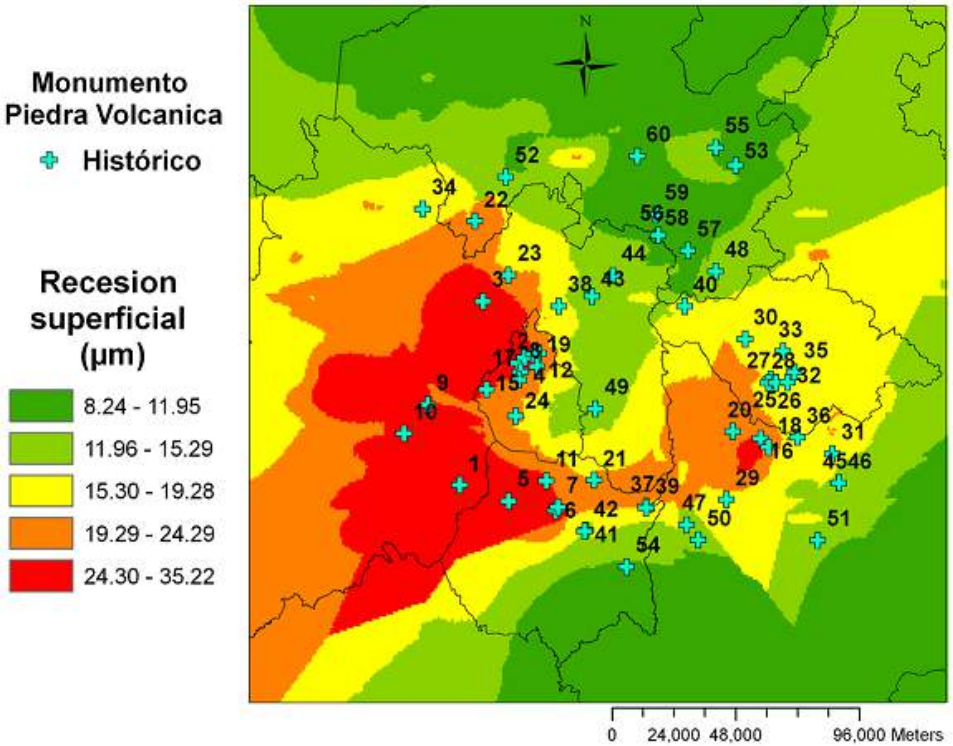


Figura A01-58 Mapa de recesión para piedra volcánica de monumentos arqueológicos de la zona ECACOR, correspondiente a 2014.

Tabla A01-17 Estimado preliminar de recesión (micras) de 2014, en piedra volcánica para monumentos históricos

Id	Monumento	ESTADO	Recesión natural	Recesión presente	% Aumento
3	Teatro Centenario	México	20.77	31.14	49.91
2	Museo Nacional de la Cartografía	D.F.	21.54	31.21	44.88
4	Acueducto de Chapultepec	D.F.	20.95	29.31	39.86
18	Templo de San Juan Bautista	Puebla	17.27	23.18	34.22
13	Academia Nacional de Medicina	D.F.	18.93	24.99	32.02
14	Catedral y Sagrario Metropolitano	D.F.	18.93	24.99	32.02
16	Templo de Santa María La Asunción	Puebla	17.85	23.51	31.67
8	Templo de Santo Domingo de Guzmán	D.F.	20.06	26.2	30.58
12	Palacio de Lecumberri	D.F.	19.79	25.13	26.96
1	Antiguo Convento de Santiago Apóstol	México	25.76	31.53	22.41
19	Templo y Antiguo Convento de San Matías Apóstol	D.F.	19.12	23.01	20.34
20	Templo de San Dieguito	Puebla	18.81	21.77	15.75
17	Ex Convento de El Carmen	D.F.	20.31	23.29	14.69
23	Ex-Colegios Jesuitas San Martín y San Francisco Javier, acequias de aguas rodada	México	17.43	19.95	14.42
15	Antiguo Convento del Desierto de los Leones	D.F.	22.02	24.66	11.98
6	Templo y Antiguo Convento de la Asunción	Morelos	24.32	27.15	11.64

La contaminación atmosférica afecta muchos materiales, se pueden obtener funciones exposición-respuesta y los mapas de las tasas de oxidación o recesión pero hace falt geolocalizar los materiales poder aplicar las funciones.

Las tasas de recesesión para piedra volcánica seguramente están subestimadas porque se tomo prestada una función exposición respuesta de una piedra europea en algo parecida a la piedra volcánica pero mas densa y menos porosa.

A menor densidad mayor efecto
A mayor porosidad mayor efecto

Es indispensable obtener las funciones exposición respuesta para la piedra volcánica con que se construyó una parte importante de nuestro patrimonio cultural

Agenda Científica para la CAMe

Propuesta que elabora el CCA/UNAM con la participación de la comunidad científica

Agenda Científica para la Megalópolis

- **Construir el Modelo Ecosistémico de la Megalópolis**
  - Estimar los costos reales de la contaminación atmosférica en la megalópolis.
  - Identificar otros problemas ambientales que comparten “drivers” con la contaminación atmosférica.
  - Estimar los costos reales de esos co-problemas ambientales impulsados por los “drivers” compartidos.
  - Identificar las barreras institucionales y huecos legales que limitan los alcances de las políticas públicas sobre contaminación atmosférica.
  - Enfocar el diseño de políticas públicas sobre contaminación atmosférica al ahorro de energía y materiales y el uso de energías limpias.
- **Reforzar el Sistema de Monitoreo Atmosférico Megalopolitano**
  - Ver abajo transporte entre cuencas y efectos en cultivos, bosques y materiales.
  - Debe incluir deposito atmosférico.
- **Construir el inventario único de la Megalópolis**
  - Revisar la representatividad espacial y temporal de la quema de biomasa en el inventario de emisiones de alta resolución .
  - Revisar la representatividad espacial y temporal del las emisiones asociadas a la expansión periurbana en el inventario de alta resolución.
  - Diseñar, probar e implementar mecanismos de validación de los inventarios apoyados en observaciones.

➢ Química atmosférica y Transporte entre Cuencas Atmosféricas

- Indispensable monitoreo rural y entre cuencas en la Región Centro de México.
- Control de emisiones (propuesta en proceso).
- Profundizar en el conocimiento del areosol fotoquímico de la región.
- Contribuir al desarrollo de modelos de procesos físicos y parametrizaciones, mas adecuadas a las latitudes y condiciones de terreno complejo características del territorio nacional, para su uso en modelos meteorológicos de mesoescala.
- Apoyar los estudios del impacto del transporte a gran escala sobre la contaminación atmosférica de la Megalópolis.
- Construir y mantener un repositorio de datos con los registros de las campañas intensivas en la región, pasadas y futuras.

➢ Recomendaciones sobre Cultivos y Bosques

- Es indispensable el monitoreo de calidad del aire en áreas rurales no sólo ozono (nitrógeno, ácidos, depósito atmosférico)
- Apoyar investigación sobre la sensibilidad al ozono de especies vegetales propias de México.

➢ Recomendaciones sobre Patrimonio Cultural

- Apoyar la investigación sobre la sensibilidad a la contaminación atmosférica de los materiales propios de nuestro patrimonio cultural

Adición a los temas planteados

- **Reforzar el Sistema de Monitoreo Atmosférico Megalopolitano**
- Monitoreo pasivo y activo del aerosol atmosférico
- Monitoreo de la masa del material particulado, 2.5 y 10 µm
- Caracterización de los principales grupos de conforman al aerosol.
- Hacer el diagnóstico para crear línea base.
- Encontrar marcadores primarios y secundarios.

- **Comenzar hacer estudios de morbilidad y mortalidad**
- Con el diagnóstico de las principales especies que conforman al aire contaminado se podrán hacer estudios en diferentes escalas espaciales y temporales para evaluar riesgo y los costos asociados a corto, mediano y largo plazo. Con ello se tomarán las medidas correspondientes para reducir enfermedades, muertes, daño a los ecosistemas, patrimonio y costos.
- Debe haber sinergismos entre toxicólogos, epidemiólogos, médicos, tecnólogos, tomadores de decisiones y científicos atmosféricos de todas las disciplinas.

- **Química atmosférica y Transporte entre Cuencas Atmosféricas**
- Profundizar en el conocimiento del aerosol primario y fotoquímico de la región.