



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**DETERMINACIÓN DE LAS EXCEDENCIAS DEL NIVEL CRÍTICO DEL  
AOT40 EN LA ZONA DE LA MEGALÓPOLIS DEL CENTRO DE  
MÉXICO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**Miguel Ángel Vázquez García**



**CD.MX.**

**AÑO 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**                   **Profesor: José Agustín García Reynoso**

**VOCAL:**                           **Profesor: Sergio Adrián García González**

**SECRETARIO:**               **Profesor: Gema Luz Andraca Ayala**

**1er. SUPLENTE:**               **Profesor: Alejandra Mendoza Campos**

**2° SUPLENTE:**               **Profesor: Claudia Inés Rivera Cárdenas**

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

### **ASESOR DEL TEMA:**

**Dra. Gema Luz Andraca Ayala**

---

### **SUPERVISOR TÉCNICO:**

**M. en C. Bertha Eugenia Mar Morales**

---

### **SUSTENTANTE (S):**

**Miguel Ángel Vázquez García**

---

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, así como a la Facultad de Química por ser mi casa de estudios y brindarme las instalaciones para poder realizar mi desarrollo académico.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera por abrirme las puertas y brindarme el equipo necesario para realizar este proyecto.

A la Dra. Gema Luz Andraca Ayala por todo el tiempo que me ayudo y los consejos dados para llevar a cabo este proyecto.

A la Maestra Bertha Eugenia Mar Morales por la gran ayuda y tiempo que me brindo en este proyecto.

Al Dr. Luis Gerardo Ruíz Suárez por permitirme trabajar en este proyecto y en algunos otros.

Al Dr. José Agustín García Reynoso por el tiempo, los consejos y ayuda en las dudas surgidas durante la realización de este proyecto.

Al CONACYT por la ayuda recibida durante la elaboración de este proyecto.

Al Dr. Sergio Adrián García González por tomarse el tiempo para revisar y corregir este trabajo.

## Contenido

Índice de figuras .....	i
Índice de Tablas .....	i
RESUMEN .....	1
Introducción.....	2
1. OBJETIVO: .....	4
1.1. Objetivos particulares .....	4
2. ANTECEDENTES.....	5
2.1. Atmósfera.....	5
2.2. Contaminación Atmosférica .....	6
2.3. Megalópolis de México .....	7
2.4. Calidad del Aire en la Ciudad de México .....	10
2.5. Ozono e importancia .....	14
2.6. Nivel Crítico .....	15
2.7. AOT40 .....	16
2.8. Daño Económico del Ozono en Cultivos .....	17
2.9. Modelo WRF-CHEM .....	19
2.10. Lenguaje NCL .....	20
3. METODOLOGÍA .....	22
3.1. Modelo de la calidad del aire .....	22
3.2. Desarrollo del programa NCL .....	22
3.3. Metodología para cálculo de las excedencias de ozono al nivel crítico AOT40... ..	24
3.4. Cálculo de pérdidas económicas en cultivos de maíz.....	25
4. RESULTADOS .....	27
4.1. Caso de estudio.....	27

4.2. Aplicación de los resultados de excedencias de ozono al nivel crítico AOT40 en el área determinada (Caso de estudio).....	31
5. CONCLUSIONES .....	40
Bibliografía .....	42
Anexo 1 .....	a

## Índice de figuras

FIGURA 2.2.1 COMPORTAMIENTO DE ESPECIES EN SMOG FOTOQUÍMICO.....	7
FIGURA 2.3.1 MEGALÓPOLIS DEL CENTRO DE MÉXICO (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM).....	8
FIGURA 3.2.1 UBICACIÓN ESPACIAL DE LOS SITIOS DE EXTRACCIÓN DE DATOS (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM). ....	23
FIGURA 4.1.1 SUPERFICIE INTERPOLADA DE LA MÉTRICA AOT40 Y ÁREA DE CULTIVOS (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM).....	30
FIGURA 4.2.1 RENDIMIENTO DE MAÍZ EN EL ÁREA DE ESTUDIO, SIAP, 2011 (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM). ....	32
FIGURA 4.2.2 PRODUCCIÓN TOTAL DE MAÍZ EN EL ÁREA DE ESTUDIO, SIAP, 2011 (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM).....	33
FIGURA 4.2.3 PÉRDIDA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN EL ÁREA DE ESTUDIO. (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM). ....	34
FIGURA 4.2.4 PÉRDIDA EN EL RENDIMIENTO RELATIVO EN EL ÁREA DE ESTUDIO (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM). ....	35
FIGURA 4.2.5 VALOR DE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN EL ÁREA DE ESTUDIO (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM). ....	36
FIGURA 4.2.6 PÉRDIDA EN EL VALOR DE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN EL ÁREA DE ESTUDIO (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM).....	37

## Índice de Tablas

TABLA 2.4.1 INVENTARIO DE EMISIONES DE LA ZMVM, 2008. ....	12
TABLA 2.4.2 FLOTA VEHICULAR REGISTRADA EN LA ZMVM, 2008. ....	13
TABLA 2.5.1 ESQUEMA DE FORMACIÓN DE OZONO TROPOSFÉRICO.....	15
TABLA 4.1.1 EJEMPLO DE ALGUNOS RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE APLICAR EL FACTOR DE CORRECCION, ECUACIÓN 1.....	27
TABLA 4.1.2 MUESTRA DE ALGUNOS RESULTADOS OBTENIDOS DESPUES DE RESTAR EL VALOR 40.....	28
TABLA 4.1.3 EJEMPLOS DE VALORES DEL FACTOR AOT40 OBTENIDOS PARA 4 SITIOS DE MUESTREO. ....	29
TABLA 4.1.4 EJEMPLOS DE VALORES FINALES DE EXCEDENTES EN EL PERIODOD PARA ALGUNOS SITIOS....	29
TABLA 4.2.1 RENDIMIENTO AGRICOLA EN LOS VEINTE MUNICIPIOS MÁS AFECTADOS DEL CENTRO DE MÉXICO. ....	39

## RESUMEN

En este trabajo se presenta la metodología para calcular las excedencias en las concentraciones de ozono para el parámetro AOT40 obtenidos a través de la comparación de datos reales medidos in situ y los datos del modelo WRF-Chem, al ser una gran cantidad de datos generados en diversos archivos de texto, fue necesario la unificación de todos en uno solo para facilitar la manipulación de estos mismos, después de realizar la unificación de archivos se ajusta con el factor de corrección obtenido en el Centro de Ciencias de la Atmósfera para coincidir el modelo con los datos reales, y de esta manera calcular las excedencias de valores sobre el AOT40. Con los resultados obtenidos se generaron mapas de distribución espacial del valor crítico AOT40, en los cuales se observa que el Estado de México es la región con mayor daño a cultivos por exposición a altas concentraciones de ozono, generando pérdidas económicas importantes en la zona. Los resultados obtenidos en este trabajo permitirán generar medidas para contrarrestar estos efectos y prevenir altas concentraciones de contaminantes atmosféricos.

## Introducción

La contaminación ambiental es un problema importante para la sociedad, ya que afecta la salud de todas las especies tanto animales como vegetales, el ozono es una sustancia que se encuentra presente de manera natural en la atmósfera. El ozono estratosférico, funciona como protección ya que absorbe los rayos ultravioleta provenientes del sol sin embargo el ser humano en sus actividades cotidianas produce una gran cantidad de contaminantes precursores de ozono el cual es perjudicial en la troposfera. Al ser una molécula de oxígeno altamente reactiva oxida los tejidos con los que entra en contacto produciendo daños, por lo cual es importante tomar medidas para prevenir la generación de este contaminante y su acumulación en la troposfera.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido niveles máximos recomendados a partir de los cuales la presencia de contaminantes puede ser perjudicial a la salud de la población, vegetación y animales; así surgen medidas como el valor AOT40, el cual tiene como fin establecer un nivel crítico a partir del cual las especies vegetales empiezan a tener un daño en su organismo. Esto es importante ya que en etapas tempranas de crecimiento de los cultivos al estar expuestas a altas concentraciones de ozono pueden conducir a dos posibles caminos, uno la muerte temprana del organismo o bien un menor crecimiento.

Estos daños son de vital importancia ya que al tener una mayor cantidad de cultivos expuestos a altas concentraciones de ozono se obtendrá una menor producción generando no solo pérdidas económicas, sino que también se puede llegar a generar un desabastecimiento en las poblaciones, asimismo, es de vital importancia tomar en cuenta que esta afectación depende de la especie en cuestión, si bien, el ozono si afecta a algunas especies, otras son más sensibles a cambios bruscos de temperatura como puede ser el maíz, mientras que especies como el trigo si es altamente sensible a esta especie química.

El valor obtenido de AOT40 en este trabajo se calculó utilizando un factor de corrección para ajustar diferencias entre el modelo y los valores reales medidos *in*

*situ*, usando el valor de este promedio se hace una diferencia con el valor de 40 ppb, obteniendo el número total en los que se excedió este valor recomendado y estimar la pérdida económica aproximada debido a la exposición de ozono en los cultivos.

## 1. OBJETIVO:

Determinar las excedencias en el nivel crítico AOT40 para la zona de la Megalópolis del Centro de México para cuantificar las pérdidas de producción agrícola y la pérdida del valor económico de la misma.

### 1.1. Objetivos particulares

- a) Selección de 100 sitios distribuidos uniformemente en la zona de estudio.
- b) Desarrollo del programa computacional para la extracción de las concentraciones de ozono reportadas por el modelo WRF-Chem en los 100 sitios de la zona de estudio.
  - a. Evaluación de las bibliotecas disponibles para la extracción de datos.
  - b. Selección de bibliotecas para extracción de datos.
  - c. Desarrollo de programa para extracción de datos.
- c) Elaboración de archivo general de datos de las concentraciones de ozono.
- d) Estimación de las pérdidas en producción agrícola.
- e) Estimación del valor económico de la pérdida.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Atmósfera

La atmósfera consiste en una capa de gases mezclados que cubren la superficie de la Tierra. Excluyendo el agua, el aire atmosférico está constituido por 78.1% (en volumen) de nitrógeno, 21.0% de oxígeno, 0.9% de argón y 0.03% de dióxido de carbono. Normalmente el aire contiene 1-3% de vapor de agua en volumen. Además, el aire contiene una gran variedad de gases a niveles de trazas por debajo de 0.002%, como neón, helio, metano, kriptón, óxido nitroso, hidrógeno, xenón, dióxido de azufre, ozono, dióxido de nitrógeno, amoníaco y monóxido de carbono. El comportamiento químico de la atmósfera es consecuencia de los gases que contiene, tanto procedentes de fuentes naturales como antropogénicas y de las fuerzas físicas que actúan en ella.

Dependiendo de la temperatura, la atmósfera se divide en varias capas. De éstas, las más importantes son la troposfera, que se extiende en altitud desde la superficie de la tierra hasta aproximadamente 11 kilómetros y la estratosfera desde los 11 kilómetros hasta aproximadamente 50 kilómetros.

La atmósfera es una capa protectora que hace posible la vida en la tierra y la protege del ambiente hostil del espacio exterior. La atmósfera es la fuente de dióxido de carbono para la fotosíntesis de las plantas y de oxígeno para la respiración. Proporciona el nitrógeno que las bacterias fijadoras de nitrógeno y las plantas productoras de amoníaco emplean para producir el nitrógeno enlazado químicamente, que es un componente esencial de las moléculas de los seres vivos. Como parte básica del ciclo hidrológico, la atmósfera transporta el agua de los océanos a la tierra, actuando, así como condensador en una inmensa destilería alimentada por la energía solar.

En su papel esencial como un escudo protector, la atmósfera absorbe la mayoría de los rayos cósmicos del espacio exterior y protege a los organismos de sus efectos. También absorbe la mayoría de la radiación electromagnética del sol, permitiendo la transmisión de cantidades significantes de radiación sólo en las

regiones de 300-2500 nm (radiación del ultravioleta cercano, del visible y del infrarrojo cercano) y de 0.01-40 m (ondas de radio). Al absorber la radiación electromagnética, de longitudes de onda menores de 300 nm, la atmósfera filtra la radiación ultravioleta dañina que sería por otra parte, muy perjudicial para los organismos vivos. Además, debido a que reabsorbe mucha de la radiación infrarroja que es reemitida al espacio, la atmósfera estabiliza la temperatura de la Tierra, impidiendo las temperaturas extremas que ocurren en planetas y lunas que carecen de atmósferas sustanciales (Manahan, 2007).

## **2.2. Contaminación Atmosférica**

En los ciclos “nitrógeno-oxígeno” se encuentra la base para la formación del smog fotoquímico en la que ocurren una serie de reacciones de manera natural en la atmósfera. Ésta contiene siempre una cierta cantidad de óxidos de nitrógeno y una parte de éstos se encuentra presente bajo la forma de dióxido ( $\text{NO}_2$ ), la radiación solar por más que llegue filtrada por la capa de ozono contiene radiaciones cuya longitud de onda es tal, que puede descomponer el dióxido de nitrógeno en óxido nítrico y átomos de oxígeno. En ausencia de sustancias más reactivas como los hidrocarburos, los átomos de oxígeno forman ozono ( $\text{O}_3$ ) reaccionando con el oxígeno molecular. El ozono a su vez puede reaccionar con NO para formar  $\text{NO}_2$ .

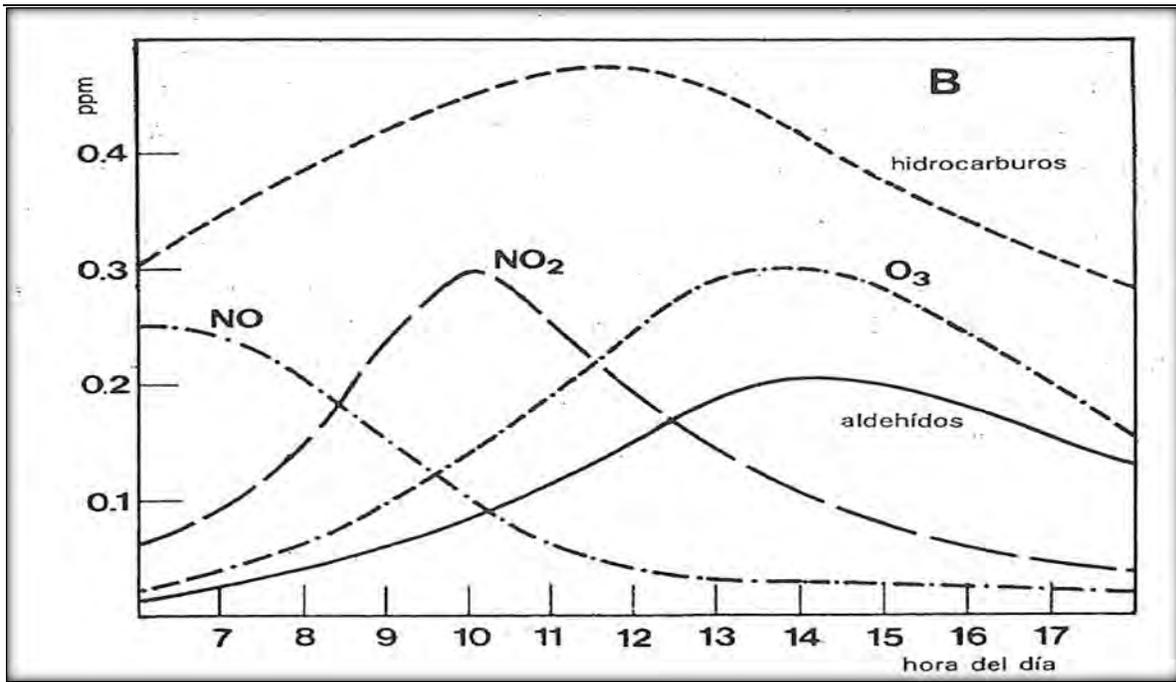


FIGURA 2.2.1 COMPORTAMIENTO DE ESPECIES EN SMOG FOTOQUÍMICO.

En la Fig. 2.2.1 se muestra el comportamiento típico en la atmósfera de las especies químicas presentes en el smog fotoquímico. En una atmósfera no contaminada el efecto de estas reacciones es simplemente el de mantener el porcentaje de NO<sub>2</sub> un poco más alto durante la noche, con respecto a los valores que alcanza en el día (Caselli 1992).

### 2.3. Megalópolis de México

La Corona Regional del Centro de México, también denominada Megalópolis de México, es un grupo de áreas metropolitanas en el centro de México. La primera vez que se usó este término fue en 1996.

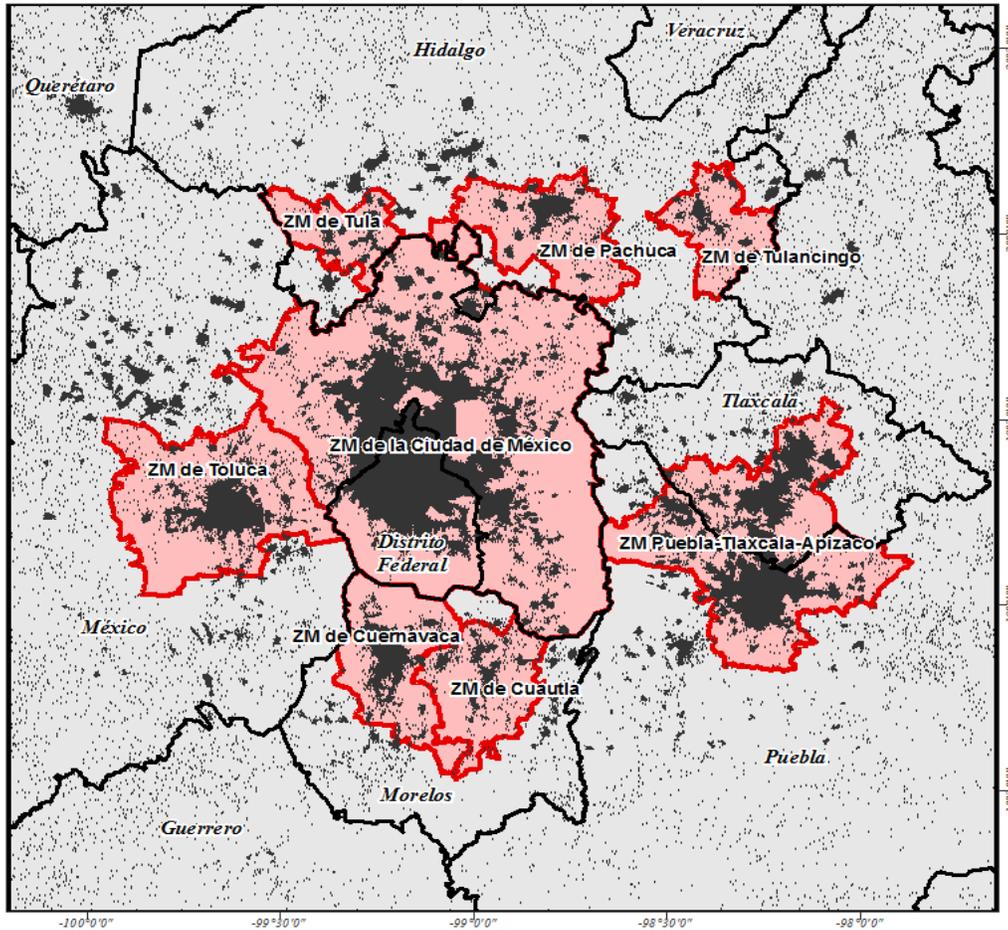


FIGURA 2.3.1 MEGALÓPOLIS DEL CENTRO DE MÉXICO (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM)

Está integrada por 184 municipios (76 de la zona metropolitana del valle de México, 15 de la zona metropolitana de Toluca, 8 de la zona metropolitana de Cuernavaca, 6 de la zona metropolitana de Cuautla, 39 de la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala, 19 de la zona metropolitana Tlaxcala-Apizaco, 3 de la zona metropolitana de Tulancingo, 7 de la zona metropolitana de Pachuca, 5 de la zona metropolitana de Tula, 6 de la zona metropolitana de Santiago Tianguistenco), figura 2.3.1. Es la zona más poblada del país y una de las regiones con mayor población del planeta. La población estimada en dicha región es aproximadamente 28 millones de habitantes.

El proceso de crecimiento de la megalópolis se ha dado desde la década de los sesenta a nivel mundial, en México entre 1950 y 1995 se dieron cambios

importantes de urbanización a lo largo del país. Este desarrollo fue continuo y acelerado pero concentrado en determinados territorios y ciudades, marcando sus procesos en las zonas metropolitanas tradicionales y emergentes. Para el caso de la región del centro del país es la que concentra mayor cantidad de población, el desarrollo de vivienda, servicios públicos, infraestructura urbano-regional, así como concentra la mayor cantidad del comercio, empleo y producción.

La mayoría de los autores coinciden en la existencia de esta gran red de ciudades en el centro del país, las cuales han conformado una gran ciudad, una megalópolis en la región centro del país. Sin embargo se parte de la Zona Metropolitana del Valle de México, la cual ha integrado a otras Zonas Metropolitanas en diversas relaciones funcionales y que se encuentran relativamente cerca y enlazadas en amplias redes carreteras y vías de comunicación. Estas Zonas Metropolitanas son la ZM de Toluca, Querétaro, Pachuca, Tulancingo, Tula, Cuernavaca, Cuautla, Puebla-Tlaxcala, Apizaco y San Martín Texmelucan.

En México la delimitación de las zonas urbanas, metrópolis o aglomeraciones urbanas, ha sido desarrollada por diversas instituciones y han dado forma a un Sistema Urbano Nacional (SUN), el cual ha posibilitado tener diversos instrumentos de clasificación y orden que posibilite la homogeneización de criterios y términos para el diseño de políticas públicas este Sistema ha clasificado a las ciudades del país como:

- **Megalópolis del centro:** La megalópolis del centro es el resultado de la “metropolización” de varias zonas metropolitanas y aglomeraciones urbanas en la región centro del país. Está integrada por: las Zonas Metropolitanas del Valle de México; de Puebla-Tlaxcala; de Toluca-Lerma, así como por las aglomeraciones de Cuernavaca-Jiutepec, Cuautla, Pachuca y Tlaxcala.
- **Zonas Metropolitanas:** Son todas aquellas redes de ciudades, donde los procesos de “metropolización” involucran a ciudades de México y de Estados Unidos o a ciudades de dos o más entidades federativas, así como aquellas grandes ciudades que tienen más de un millón de habitantes.

- Aglomeraciones urbanas: Son las ciudades que han tenido procesos de expansión urbana hacia municipios adyacentes en la misma entidad federativa y tienen en conjunto una población inferior a un millón de habitantes.
- Ciudades. Son aquellas localidades cuya expansión urbana no ha sobrepasado los límites del municipio donde se localiza. Esta clase se subdivide en 75 ciudades con más de 50 mil habitantes y en 244 ciudades entre 15 mil y 49 mil 999 habitantes. Las ciudades con más de 50 mil habitantes.
- Centros de población. Son las restantes 2 mil 139 localidades del país entre 2 mil 500 y 15 mil habitantes.

(CONAPO 2010).

#### **2.4. Calidad del Aire en la Ciudad de México**

Aparentemente la percepción colectiva del estado de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), no corresponde a la gravedad de los efectos negativos que la contaminación atmosférica ha ido provocando sobre la salud de la población. Las personas que viven en la ZMVM generalmente no identifican a la contaminación como algo cercano sino como un fenómeno ajeno, que afecta a los otros, pero no necesariamente a sí mismas o a otras personas de su entorno. Esto probablemente se debe a que las tendencias de los contaminantes denominados “criterio” se han mantenido a la baja en los últimos lustros y a que se tiene una historia de pocos episodios de contingencias ambientales, lo cual ha contribuido a generar un estado de cierta tranquilidad entre la población que no ayuda a posicionar, en su verdadera dimensión, el tema de los efectos de la contaminación del aire como un problema serio de salud pública.

Los efectos de la contaminación del aire en la salud de la población de la ZMVM deben ser considerados seriamente, y al igual que en otras zonas urbanas del país, su atención merece un lugar prioritario en el diseño de las políticas públicas dirigidas a mejorar la calidad de vida a largo plazo. Dichos efectos han sido suficientemente estudiados para algunos contaminantes, pero hay una larga lista

de otros para cuyos efectos tenemos al día de hoy poca o nula evidencia científica, a pesar de que éstos sean considerados como un factor que eleva sensiblemente las tasas de mortalidad y de morbilidad en las áreas urbanas.

En efecto y como parte del contexto que permite ubicar adecuadamente el problema de la contaminación atmosférica, es conveniente mencionar algunos datos que entidades como la Organización Mundial de la Salud (OMS, WHO por sus siglas en inglés) obtienen y publican regularmente. Con respecto a la carga regional de enfermedades debidas a la contaminación del aire la misma OMS establece que hay aproximadamente 4.2 millones de muertes prematuras al año son atribuidas a la contaminación del aire exterior urbano y a la contaminación del aire intramuros por la combustión de biomasa, y más de la mitad de esta carga corresponde a poblaciones de países en vías de desarrollo (WHO, 2016).

Los contaminantes criterio fueron los primeros en ser estudiados sistemáticamente en varios países, debido a la evidencia que empezó a obtenerse sobre sus efectos dañinos a la salud humana. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés) los llamó “contaminantes criterio” porque sus normas de calidad del aire se basaban en el conocimiento plasmado en documentos llamados “documentos criterio.” Actualmente el término se ha adoptado en muchos países y es convencionalmente aceptado para referirse a los contaminantes siguientes: Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), partículas o material particulado (MP), Plomo (Pb), Monóxido de Carbono (CO), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Compuestos Orgánicos Totales (COT) y ozono (O<sub>3</sub>).

Los inventarios de emisiones que se han elaborado para la ZMVM incluyen, además de la cuantificación desagregada de las emisiones por tipo de fuente, categoría o subsector, la variación temporal y la distribución espacial de las emisiones contaminantes.

**TABLA 2.4.1 INVENTARIO DE EMISIONES DE LA ZMVM, 2008.**

Contaminante		Promedio de emisiones (Mg/semana)	Promedio de emisiones (Mg/día)		
			Entre semana	Sábado	Domingo
Partículas menores a 10 micrómetros	PM <sub>10</sub>	452	67	63	54
Partículas menores a 2.5 micrómetros	PM <sub>2.5</sub>	102	15	14	13
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	130	21	14	11
Monóxido de carbono	CO	30,135	4,284	4,571	4,144
Óxidos de nitrógeno	NO <sub>x</sub>	3,622	519	541	486
Compuestos orgánicos volátiles	COV	11,217	1,666	1,557	1,330

En la tabla 2.4.1 se muestra el inventario de emisiones de la ZMVM por tipo de día de la semana, 2008. No se incluyen emisiones por incendios forestales y estructurales, así como las emisiones de partículas provenientes de la erosión eólica del suelo. Fuente: Inventario de Emisiones Criterio de la ZMVM-2008.

Una fuente puntual es una fuente estacionaria, única y fácilmente identificable. Se define como toda instalación en la que se desarrollan procesos industriales, comerciales, de servicios o, en general, actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. En lo que se refiere a los establecimientos industriales, el Censo Económico 2004 realizado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) registra más de 328 mil unidades económicas de manufactura a nivel nacional, de las cuales el 16% se encuentra ubicado en la ZMVM.

La flota vehicular registrada en la ZMVM se estima en más de 4.5 millones de vehículos, de los cuales el 81% corresponde a autos particulares. El 95% de la flota vehicular de la ZMVM utiliza gasolina como combustible, el 4 por ciento son unidades a diésel, los vehículos restantes utilizan principalmente gas licuado de petróleo (GLP) y en menor cantidad gas natural comprimido

Debido a que a la flota vehicular de la ZMVM se le aplican restricciones de circulación con base en la edad y niveles de emisión, es importante analizarla por año modelo. Asimismo, este análisis permite diferenciar el potencial de emisiones por estrato vehicular y con ello proponer acciones para reducir las emisiones en forma específica.

**TABLA 2.4.2 FLOTA VEHICULAR REGISTRADA EN LA ZMVM, 2008.**

Tipo de Vehículo	Vehículos	
	Número	%
Autos particulares	3'693,531	81.4
Taxis	156,627	3.5
Vagonetas y combis	29,863	0.7
Microbuses	34,096	0.8
Pick up	118,441	2.6
Vehículos de carga hasta 3 ton	71,157	1.6
Tracto camiones	71,055	1.6
Autobuses	43,706	1.0
Vehículos de carga de más de 3 ton	80,589	1.8
Motocicletas	23,808	5.2
Metrobús	221	NS
Total	4'536,914	100%

En la Tabla 2.4.2 se muestra la Flota vehicular registrada en la ZMVM, 2008. NS: No Significativo, Fuente: Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM-2008 (Secretaria De Medio Ambiente y Recursos Naturales 2011).

La concentración promedio de ozono medido en todas las estaciones de monitoreo de la Ciudad de México del 10 al 17 de abril de 2007 tienen una concentración máxima durante el fin de semana del 14 y 15 de abril por encima de los 140 ppb en contraste con los días de trabajo que las concentraciones se encuentran por debajo de 100 ppb.

Sin embargo hay un máximo inusual de ozono durante el fin de semana, el análisis de los datos de ozono para 2007 muestra que en promedio la concentración de los sábados fue en general 0.06% mayor que en días de trabajo. Para domingos el promedio fue 9.7% mayor conforme a previos análisis que muestran que no hay diferencia entre semana y fin de semana. Sin embargo, en el caso específico del sábado 14 de abril de 2007 las concentraciones de ozono fueron 71% más altas

que cualquier promedio de día laboral y para el domingo 15 de abril las concentraciones fueron 57% mayores. (García-Reynoso, y otros 2009)

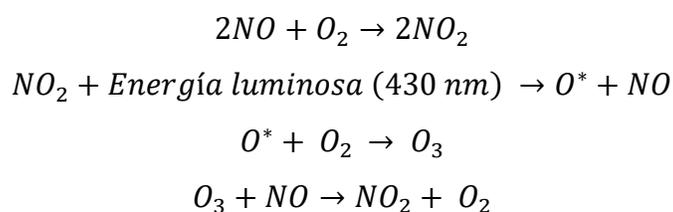
## 2.5. Ozono e importancia

El ozono es un gas incoloro altamente reactivo formado por tres átomos de oxígeno ( $O_3$ ). Este gas es un componente natural de la atmósfera presente en sus dos capas inferiores: la troposfera (desde la superficie terrestre hasta 10 km de altura) y la estratosfera (entre 10-50 km por encima de la superficie terrestre). Al ozono se le conoce principalmente por su papel protector frente a la radiación ultravioleta en la estratosfera, donde se localiza el 90% del ozono atmosférico, formando la llamada “capa de ozono”. Esta capa filtra la mayor parte de la radiación solar ultravioleta (longitudes de onda inferiores a 300 nm) que es perjudicial para los seres vivos, permitiendo el mantenimiento de la vida sobre la Tierra.

El ozono también es un componente natural de la troposfera, donde se encuentra generalmente en concentraciones bajas. El ozono troposférico natural procede tanto del transporte desde la estratosfera, como de la propia formación fotoquímica que ocurre en la troposfera. La generación de ozono en la atmósfera se produce mediante reacciones químicas entre compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) en presencia de la radiación solar. Estos compuestos se conocen como los precursores de la formación de ozono. En una atmósfera no alterada por la actividad humana, estas reacciones forman parte del ciclo del carbono al transformar los COV (Compuestos Orgánicos Volátiles) que se emiten de forma natural (por la vegetación, la actividad biológica de las zonas húmedas, etc.) en dióxido de carbono y vapor de agua. Pero en las regiones directamente influenciadas por las emisiones antropogénicas, los altos niveles emitidos de  $NO_x$  actúan como catalizadores para la formación de ozono (tabla 2.5.1) a partir de los COV, cuyos niveles a su vez también se elevan como consecuencia de la actividad urbana e industrial. De esta manera, las concentraciones de ozono en la troposfera pueden alcanzar valores elevados, por encima del fondo natural, constituyendo un problema de contaminación atmosférica.

El ozono troposférico no ejerce la función protectora que cumple en la estratósfera, sino que, por el contrario, dada su alta reactividad y su fuerte capacidad oxidante, cuando sus niveles se elevan por encima del fondo natural, puede provocar efectos adversos en los materiales (derivados de sus efectos corrosivos), en la salud humana (relacionados con problemas en las vías respiratorias), y en la vegetación y los ecosistemas. (Larka Abellán & González Ortiz).

TABLA 2.5.1 ESQUEMA DE FORMACIÓN DE OZONO TROPOSFÉRICO



## 2.6. Nivel Crítico

El potencial dañino del ozono sobre la vegetación es conocido desde hace aproximadamente 30 años, recientemente se convertido en una preocupación importante en la zona europea, ahora está claramente establecido que algunas concentraciones en Europa pueden causar daños incluyendo daño visible en las hojas así como reducción en el crecimiento. Además, dado que el ozono es un contaminante secundario con una distribución regional, estos efectos pueden ocurrir en grandes áreas de la Europa rural. Investigaciones en años recientes han avanzado en el entendimiento de los mecanismos fundamentales de los efectos del ozono en cultivos agrícolas y en menor medida sobre árboles y especies de plantas nativas. Ahora es posible determinar índices biológicamente significativos, pero simples, para caracterizar la exposición al ozono e identificar los niveles críticos de exposición.

Los niveles críticos de ozono fueron definidos por primera vez en un taller en Bad Hazburg, Alemania en 1988, donde los valores fueron expresados como una concentración estacional. Subsecuentemente en Reino Unido en 1992, se propuso remplazar esta base de expresión por una exposición acumulativa sobre una

concentración umbral durante un periodo de tiempo determinado. En un tercer taller en Bern, Suiza, este concepto fue adoptado y la concentración umbral se estableció en 40 partes por billón, el índice resultante fue nombrado AOT40 (Accumulated exposure over threshold of 40 ppb). Finalmente, en Kuopio, Finlandia en 1996, el uso del índice AOT40 fue aceptado y se estableció un conjunto revisado de valores de nivel crítico basados en este índice para cultivos, árboles forestales y vegetación seminatural, este índice también es considerado por la organización mundial de la salud (OMS) para establecer guías de calidad del aire en Europa para impactos ecológicos de ozono (Fuhrer, Skärby y Ashmore s.f.).

## 2.7. AOT40

Durante los 90's, el concepto de "Niveles Críticos de Ozono" fue introducido por la UNECE y definido como el índice de exposición de AOT40 ("accumulated exposure to ozone a threshold of 40 nl O<sub>3</sub> l<sup>-1</sup>"). Se asumió que el excedente podría causar que la producción de biomasa de plantas declinara más 10% con respecto a la que se manejaba bajo los regímenes de ozono preindustriales. También se examinó el inicio de lesión de la hoja macroscópica en plantas leñosas por el enfoque AOT40. El objetivo de AOT40 era predecir los riesgos mediante la exposición al O<sub>3</sub> en lugar de validar las relaciones reales de causa-efecto relacionadas con O<sub>3</sub> en las plantas. Con respecto a los árboles forestales, el nivel crítico de AOT40 se estableció en 10 µL O<sub>3</sub>l<sup>-1</sup>h (independientemente de la especie y región), suponiendo una exposición de O<sub>3</sub> por debajo de 40 nl L<sup>-1</sup> y por la noche se considera insignificante. Tales suposiciones deben considerarse, dada su derivación de algunos experimentos con árboles jóvenes cultivados en cámaras de exposición y el hecho de que, en contraste con la absorción real de ozono, la exposición al ozono per se (representado como AOT40) no necesariamente se vuelve efectiva en el rendimiento de los árboles. Por lo tanto, no es sorprendente que las distribuciones regionales de AOT40 sean bastante inconsistentes con la condición del bosque, ya que el concepto AOT40 no tiene en cuenta los diferentes tipos de especies de árboles, genotipos, tipos de bosques y condiciones de sitio. Por lo tanto a largo plazo el termino AOT40 debería ser remplazado, con los conceptos de flujo de absorción real de ozono en las hojas, ya que este último

enfoque tiene el potencial de proporcionar dosis de ozono fisiológicamente significativas que son relevantes para el estrés de ozono real experimentado por los árboles, en particular, si se combina con medidas de desintoxicación que modifican el impacto del ozono (Matyssek, y otros, 2004).

## **2.8. Daño Económico del Ozono en Cultivos**

El ozono superficial ( $O_3$ ) es un componente principal del smog, producido en la troposfera por las reacciones catalíticas de los óxidos de nitrógeno. Además de tener un efecto perjudicial sobre la salud humana, los experimentos de campo en Estados Unidos, Europa y Asia demuestran que el ozono superficial causa daños sustanciales a muchas plantas y cultivos agrícolas, incluida una mayor susceptibilidad a las enfermedades, menor crecimiento y capacidad reproductiva, mayor senescencia y reducciones en la producción de los cultivos.

El ozono penetra las hojas a través de los estomas, donde reacciona con diversos compuestos para producir especies reactivas de oxígeno sobrante que oxidan el tejido vegetal y dan como resultado una expresión genética alterada, fotosíntesis deteriorada, degradación de proteínas y clorofila y cambios en la actividad metabólica. Con base en los estudios experimentales a gran escala de la Red Nacional de Evaluación de Pérdidas de Cultivos (NCLAN) llevada a cabo en los Estados Unidos en la década de 1980, la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. estimó que los rendimientos de aproximadamente uno la tercera parte de los cultivos de EE. UU. Se redujeron en un 10% debido a las concentraciones de  $O_3$  durante este tiempo. Los resultados del programa europeo de cámara abierta en la década de los noventa sugieren similarmente que la Unión Europea puede estar perdiendo más del 5% de su producción de trigo debido a la exposición al ozono. Aunque no se han llevado a cabo estudios comparables a gran escala en países en desarrollo, el riesgo potencial de exposición al ozono ambiental a la producción agrícola se ha documentado a través de estudios de campo a pequeña escala y los esfuerzos de modelado en Asia Oriental, India, Egipto y el sur de África.

Se estima que actualmente hay más de mil millones de personas desnutridas en el mundo, el impacto de la contaminación de ozono en la actual y futura producción mundial de alimentos merece atención.

Esto es especialmente cierto, ya que se prevé que tanto la población como las emisiones de precursores de ozono aumentarán en la mayoría de las naciones en desarrollo en las próximas décadas. La creciente emisión de precursores del ozono en estos países plantea un riesgo no sólo para su seguridad alimentaria nacional y regional, sino también para la producción mundial como el ozono, y algunos de sus precursores son suficientemente longevos para ser transportados entre continentes. (Avnery, Mauzerall, Liu, & Horowitz, 2010)

En Europa y los Estados Unidos, se han establecido lineamientos sobre la calidad del aire para el ozono a fin de proteger la salud humana y la vegetación.

En Europa, el estándar para la protección de la vegetación contra el daño por ozono se expresa como un nivel crítico de concentración de ozono acumulado por encima de un umbral de 40 ppb (AOT40) que no debe excederse durante la temporada de crecimiento (3 ppmh para cultivos agrícolas, 5 ppmh para los bosques). En los EE. UU. se ha propuesto que el estándar secundario actual de ozono diseñado para proteger el bienestar humano (que incluye la vegetación) se iguale a los estándares para proteger la salud humana (la concentración promedio máxima de ozono de 75 ppbV no debe superarse más de 3 veces por año, con la cuarta concentración promedio más alta durante un período de 3 años).

Los intentos de cumplir con estas pautas han llevado a una reducción en la ocurrencia de niveles máximos de ozono desde la década de 1990. Las economías de rápido crecimiento, en particular las de Asia oriental, sudoriental y meridional, han experimentado un continuo deterioro de la calidad del aire debido al aumento de las emisiones de óxidos de nitrógeno y otros contaminantes, y se espera que estas tendencias continúen a medida que las economías continúen expandiéndose.

Holland y otros estiman que las pérdidas de cultivos y las pérdidas económicas asociadas en Europa para 23 cultivos de horticultura y agricultura para el año base

2000, así como un conjunto de escenarios de emisiones para el año 2020, indicaron que en los resultados para el año 2000 hubo una pérdida total del 3% de todas las especies de cultivos consideradas (el equivalente a € 6.7 mil millones de daño económico), reduciéndose al 2% bajo un escenario de "implementación de legislación actual" (CLE) para el 2020 (€ 4.5 mil millones de daños).

Estos estudios indican que se puede esperar un beneficio económico sustancial de una reducción en la contaminación del aire. Sin embargo, debido a la falta de consistencia en la metodología utilizada para calcular el daño a los cultivos, así como por el impacto económico, los resultados regionales mencionados son difíciles de comparar entre sí. No se ha llevado a cabo, a nuestro entender, una estimación globalmente coherente de las pérdidas de cultivos debidas a la contaminación del aire, en todas las regiones mundiales pertinentes, sobre la base de un inventario de emisiones y un método de modelado coherente. (Dingenen, y otros, 2008)

## **2.9. Modelo WRF-CHEM**

La simulación y predicción de la calidad del aire es un problema complicado, que involucra tanto factores meteorológicos (como son velocidad del viento y dirección, turbulencia, radiación, nubes y precipitación) como procesos químicos (como son deposición, y transformaciones). En la atmósfera real, los procesos físicos y químicos están acoplados. La química puede afectar la meteorología, por ejemplo, a través de su efecto en la radiación presupuestada, así como la interacción de aerosoles con núcleos de condensación de nubes. Del mismo modo, las nubes y la precipitación influyen fuertemente en los procesos de transformación y remoción química, y los cambios localizados en el viento o en los campos de turbulencia afectan continuamente al transporte químico.

Hasta hace poco los procesos químicos en los sistemas de modelado de calidad del aire fueron tratados independientemente del modelo meteorológico. Este enfoque es computacionalmente muy atractivo ya que las simulaciones retrospectivas de transporte químico offline sólo requieren un solo conjunto de datos meteorológicos para producir muchas simulaciones de transporte químico. Sin embargo, esta separación de meteorología y química pueden causar una

pérdida importante de información sobre los procesos atmosféricos que a menudo tienen un tiempo de salida mucho menor que el modelo meteorológico.

En los últimos años varios institutos han colaborado en el desarrollo del estado del arte. Weather Research and Forecasting (WRF), WRF es un modelo no hidrostático, con varios núcleos dinámicos, así como muchas opciones diferentes para parametrizaciones físicas a procesos representativos que no pueden ser resueltos por el modelo. Esto permite a este modelo ser aplicado en diferentes escalas (G. A. Grell, y otros 2005).

## 2.10. Lenguaje NCL

NCL (lenguaje de comandos NCAR) es un lenguaje interpretado de código abierto, diseñado específicamente para el procesamiento y visualización de datos científicos. Es un lenguaje poderoso para leer, escribir, manipular y visualizar datos científicos. Usa un modelo interno de la variable netCDF. Además, admite una variedad de formatos de archivos de entrada: netCDF3, netCDF4, GRIB1, GRIB2, HDF-SDS, HDF-EOS, HDF5, Fortran / c binary, shapefiles y ASCII.

Similar a fortran, C, Matlab, IDL, etc., NCL tiene muchas características de lenguajes de programación modernos como variables, tipos de datos, constantes, funciones, procedimientos, operadores (aritmético, relacional y lógico), expresiones, declaraciones condicionales, bucles, funciones y procedimientos.

Comandos utilizados en el desarrollo de un programa en lenguaje NCL:

**ncl\_filedump** - imprime los contenidos de los archivos compatibles (*netCDF*, *HDF4 / 5*, *GRIB1*, *GRIB2*, *HDF-EOS2 / 5*, *shapefile* y *CCM History Tape*)

**ncl\_convert2nc**: convierte uno o más archivos *GRIB1*, *GRIB2*, *HDF4 / 5*, *HDF-EOS2 / 5* o *shapefile* en archivos con formato *netCDF*.

**WRAPIT**: le permite ajustar rutinas Fortran 77/90 y llamarlas desde ncl.

Los gráficos NCL y NCAR se ejecutan en sistemas operativos basados en UNIX, incluidos Linux, MacOSX y Cygwin / X que se ejecutan en Windows.

NCL se puede ejecutar en modo interactivo, donde cada línea se interpreta tal como se ingresa en su estación de trabajo, o puede ejecutarse en modo batch como un intérprete de scripts completos. También puede usar opciones de línea de comando para establecer opciones o variables en la línea de comando de NCL. El poder y la utilidad del lenguaje son evidentes en tres componentes principales:

- entrada y salida de archivos
- análisis de los datos
- visualización

NCL tiene muchas características comunes a los lenguajes de programación modernos, incluidos tipos, variables, operadores, expresiones, declaraciones condicionales, bucles y funciones y procedimientos.  
(<https://www.ncl.ucar.edu/overview.shtml>)

### **3. METODOLOGÍA**

Para estimar las excedencias se empleo un modelo de calidad del aire con el objeto de estimar las concentraciones en regiones donde no se tiene mediciones, se comparó contra mediciones donde se obtuvo un factor de corrección. Se identificaron 100 puntos para la extracción de datos de concentraciones de ozono para lo cual se emplearon las funciones de NCL, para el cálculo de la pérdida de cultivo se utilizaron funciones de exposición-respuesta compiladas por Mills y otros (2007), las cuales tienen una relación lineal y las pérdidas económicas fueron calculadas con las ecuaciones de Van Dingenen (2009) que también tienen una relación lineal.

#### **3.1. Modelo de la calidad del aire**

El modelo de calidad del aire usado fue el WRF-chem en su modo no hidrostático. El modelo químico es consistente con el modelo meteorológico, utilizando ambos los mismos esquemas de transporte y la misma cuadrícula horizontal y vertical. El mecanismo químico fue RADM2. La información meteorológica fue obtenida del pronóstico global (GFS). El dominio del modelo tiene 90x90 celdas de 3x3 km y 22 niveles verticales.

#### **3.2. Desarrollo del programa NCL**

Se realizó una revisión bibliográfica de la importancia del ozono y su influencia en la Megalópolis de México. Se delimitó la zona de estudio además de que se seleccionaron los sitios geográficos para la extracción de datos del modelo WRF, se elaboró un programa en el lenguaje NCL para la extracción de los datos a partir del modelo WRF, donde la variable utilizada es el Ozono nombrada como O<sub>3</sub>. Los resultados de salida se obtienen en unidades “ppmv”. La variable lon2d es usada para introducir los valores de la longitud en valor decimal, mientras que en la variable lat2d, se ingresan los valores de latitud en valor decimal; esto se realiza en las horas del día seleccionadas. El periodo horario es de las 7 a las 19 h., ya que es el periodo de luz al que los cultivos están expuestos y ocurre la fotosíntesis.





### 3.3. Metodología para cálculo de las excedencias de ozono al nivel crítico AOT40

Los archivos con los datos se generaron después de unificar los archivos TXT en uno solo, importándose a un documento en EXCEL, posteriormente estos datos fueron tratados para los horarios seleccionados. Para realizar el cálculo del parámetro AOT40, primero se convirtieron las unidades de **ppm** a **ppb** al multiplicar el valor de salida del modelo WRF-Chem por mil (ec. 1), como el modelo calcula la concentración a una altura menor de 20 metros no fue necesario realizar una corrección por altura. Una vez realizado esto el dato es multiplicado por un factor igual a 2.06 (ec. 2) calculado previamente (Alvarado González, 2015), este factor indica la diferencia determinada entre la comparación de los datos de muestreos reales de monitores pasivos y la simulación de la concentración de ozono obtenida a través del modelo WRF-Chem. cabe mencionar que esta ecuación hace una discriminación en cuanto

al horario pues para este estudio solo es importante el periodo solar por lo cual se toman las horas en el periodo de 7-19 horas. Al resultado después de aplicar el factor de escalamiento se le resta un valor de 40 (ec. 3), si el valor es mayor a 40 entonces ese dato excede el valor crítico determinado por el parámetro AOT40, para facilitar el tratamiento de datos se realizó otro discriminante en el cual se mostraban estrictamente los valores que superaban los 40 ppb en concentración (ec. 4), finalmente se sumaron todos los valores excedidos (ec. 5), este tratamiento fue realizado para 362,400 datos obtenidos en el periodo comprendido de junio a octubre del 2011 en los 100 sitios seleccionados previamente.

$= PPM! C4 * 1000$	( ec. 1)
$= SI(Y(\$A4 \geq 7, \$A4 \leq 18), ppv! B4 * 2.06, 0)$	( ec. 2)
$= ' Factor de correccion'! B4 - 40$	( ec. 3)
$= SI(Hoja6! B4 > 40, Hoja6! B4, 0)$	(ec. 4)
$= SUMA(B4: B3627)$	(ec. 5)

### 3.4. Cálculo de pérdidas económicas en cultivos de maíz

Las Funciones Exposición-Respuesta (FERs) se derivan a través de estudios en cámara abierta en los cuales se mide el efecto en el crecimiento de la planta expuesta a diferentes concentraciones de ozono. 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.

<b>PRR=-0.0035*AOT40(ppm.h) (ec. 6)</b>
<b>Nivel Crítico=13.9 ppm h (reduccion5%)</b>
<b>(ec. 7)</b>

Para el cálculo de pérdidas económicas se utilizaron las siguientes ecuaciones (Van Dingenen, y otros 2009).

$$PPC = \frac{PRR}{1-PRR} * PC \text{ (ec.8)}$$

$$PE = PPC * PMR \text{ (ec. 9)}$$

Donde:

- PRR= Pérdida de rendimiento relativo
- PPC= Pérdida de producción de cultivo (Mg/ha)
- PC= Producción de cultivo (Mg/ha)
- PE= Pérdida económica (\$/ha)
- PMR = Precio medio rural (\$/Mg)

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Caso de estudio

Los resultados extraídos del modelo WRF-Chem a través del programa NCL fueron utilizados en conjunto con otros datos para obtener la distribución espacial del indicador AOT40.

A continuación, se muestra un ejemplo de resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología descrita en el capítulo anterior a 4 de los 100 sitios distribuidos en la región de estudio, tabla 4.1.1 No se muestran los cálculos para los 100 sitios ya que se realizó automáticamente con EXCEL con la aplicación de discriminantes asociados a la hoja de cálculo.

TABLA 4.1.1 EJEMPLO DE ALGUNOS RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE APLICAR EL FACTOR DE CORRECCION, ECUACIÓN 1.

Sitios				
LAT	18.753	18.749	18.744	18.739
LONG	-99.897	-99.612	-99.327	-99.042
Hora	[O <sub>3</sub> ]ppb	[O <sub>3</sub> ]ppb	[O <sub>3</sub> ]ppb	[O <sub>3</sub> ]ppb
7	56.93	57.02	24.10	49.99
8	55.41	55.27	22.35	49.27
9	51.99	49.58	34.81	42.17
10	57.98	55.97	58.67	61.07
11	73.61	73.71	81.35	82.96
12	83.28	93.29	113.81	95.23
13	83.06	120.78	159.69	99.60
14	77.04	153.96	193.12	106.17
15	74.30	188.38	175.41	126.52
16	74.94	151.53	74.46	160.14
17	74.84	118.49	72.22	107.38
18	74.49	120.20	70.01	74.86

En la tabla 4.1.2 se muestran algunos resultados de la metodología desarrollada para la resta del nivel crítico, 40 ppb, a los datos corregidos del modelo WRF-Chem obtenidos en la tabla 4.1.1

**TABLA 4.1.2 MUESTRA DE ALGUNOS RESULTADOS OBTENIDOS DESPUES DE RESTAR EL VALOR 40.**

SITIOS				
LAT	18.753	18.749	18.744	18.739
LONG	-99.897	-99.612	-99.327	-99.042
Hora	[O <sub>3</sub> ]ppb	[O <sub>3</sub> ] ppb	[O <sub>3</sub> ] ppb	[O <sub>3</sub> ] ppb
7	16.9	17.0	-15.8	9.9
8	15.4	15.2	-17.6	9.2
9	11.9	9.58	-5.18	2.1
10	17.9	15.9	18.6	21.0
11	33.6	33.7	41.3	42.9
12	43.2	53.2	73.8	55.2
13	43.0	80.7	119.6	59.6
14	37.0	113.9	153.1	66.1
15	34.3	148.3	135.4	86.5
16	34.9	111.5	34.4	120.1
17	34.8	78.4	32.2	67.3
18	34.4	80.2	30.0	34.8

El cálculo de excedencias se muestra en la tabla 4.1.3, los datos son obtenidos una vez que se aplicó el discriminante de valores mayores a 40 ppb, referenciados a la tabla 4.1.2 En esta tabla los valores 0 significa que no hubo una excedencia a 40 ppb. Solo se manejan las concentraciones de 7 a 18 h, ya que es el periodo de radiación solar.

**TABLA 4.1.3 EJEMPLOS DE VALORES DEL FACTOR AOT40 OBTENIDOS PARA 4 SITIOS DE MUESTREO.**

	Sitios			
LAT	18.753	18.749	18.744	18.739
LONG	-99.897	-99.612	-99.327	-99.042
Hora	AOT40 (ppb.h)	AOT40 (ppb.h)	AOT40 (ppb.h)	AOT40 (ppb.h)
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	40.5
12	40.8	50.5	70.5	52.4
13	40.6	77.2	115.0	56.7
14	0	109.4	147.5	63.0
15	0	142.9	130.3	82.8
16	0	107.1	0	115.4
17	0	75.0	0	64.2
18	0	76.7	0	0

Finalmente, en la tabla 4.1.4 se muestran las sumas de todos los valores diarios de ozono durante el periodo de lluvias para los 4 sitios de ejemplo en el periodo de 7 a 18 h.

**TABLA 4.1.4 EJEMPLOS DE VALORES FINALES DE EXCEDENTES EN EL PERIODOS PARA ALGUNOS SITIOS.**

	Sitios			
LAT	18.75	18.74	18.74	18.73
LONG	-99.89	-99.61	-99.32	-99.04
AOT40 (ppb.h)	6312.9	29170.6	18141.0	17046.9
AOT40 (ppm.h)	6.3	29.1	18.1	17.0

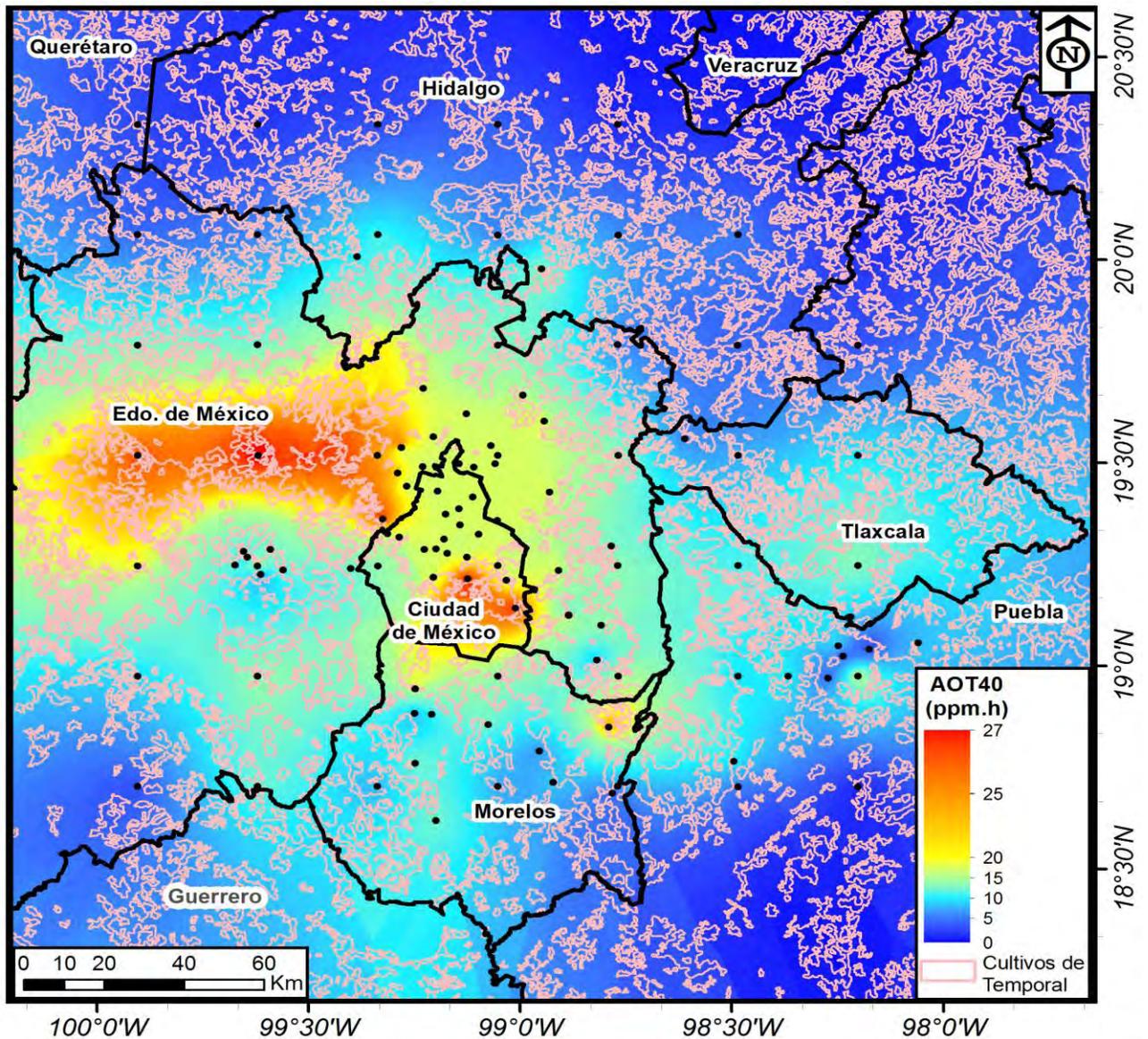


FIGURA 4.1.1 SUPERFICIE INTERPOLADA DE LA MÉTRICA AOT40 Y ÁREA DE CULTIVOS (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM).

En la figura 4.1.1 se observa la distribución espacial del indicador AOT40 en colores y en polígonos delimitado con líneas rosas las áreas de cultivos de temporal, dentro del área de estudio. Los puntos negros representan los sitios utilizados por el modelo, las estaciones de monitoreo continuo y sitios de campañas de monitoreo intensivo en zonas rurales.

Se demostró la utilidad de los datos obtenidos mediante la aplicación en un caso de estudio para el maíz en el área determinada del Centro de México para el año

2011, donde se obtiene la pérdida económica por la reducción de producción de este cultivo en la zona afectada por el ozono.

#### **4.2. Aplicación de los resultados de excedencias de ozono al nivel crítico AOT40 en el área determinada (Caso de estudio)**

Para realizar el caso de estudio fue necesario construir mapas de distribución de las áreas de cultivo para maíz durante la temporada de crecimiento del 2011 en la región del Centro de México.

Los mapas de las figuras 4.2.1 a 4.2.6 fueron creados usando el software ArcGis v10.2 por ESRI, Redlands, CA, USA, éstos están integrados de 5 capas en formato shapefile, con proyección Conforme Cónica de Lambert (CCL). Estas capas consisten de lo siguiente: límites administrativos de estados y municipios, capa de uso del suelo, el límite de área de estudio, y la capa final con la información estadística del cultivo (maíz) del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera del 2011 o la información de pérdidas obtenidas con los resultados de las ecuaciones 7-9.

Los mapas se realizaron en escala de una hectárea. Esto excede la resolución espacial de la información disponible sobre la producción agrícola. También excede la resolución espacial de las ejecuciones del WRF-Chem (3km x 3km). Sin embargo, se mantiene esta resolución porque se espera que las agencias gubernamentales que tienen información a nivel de parcelas eventualmente la hagan disponible.

En la figura 4.2.1 se puede observar el rendimiento de maíz expresado en toneladas por hectárea de cultivo, las zonas más oscuras son las que presentan un mayor rendimiento, las zonas más claras son las que muestran un menor rendimiento de producción de cultivo por hectárea. El mapa indica que en el estado de Morelos se tiene un mayor rendimiento por hectárea mientras que en la Ciudad de México es menor.

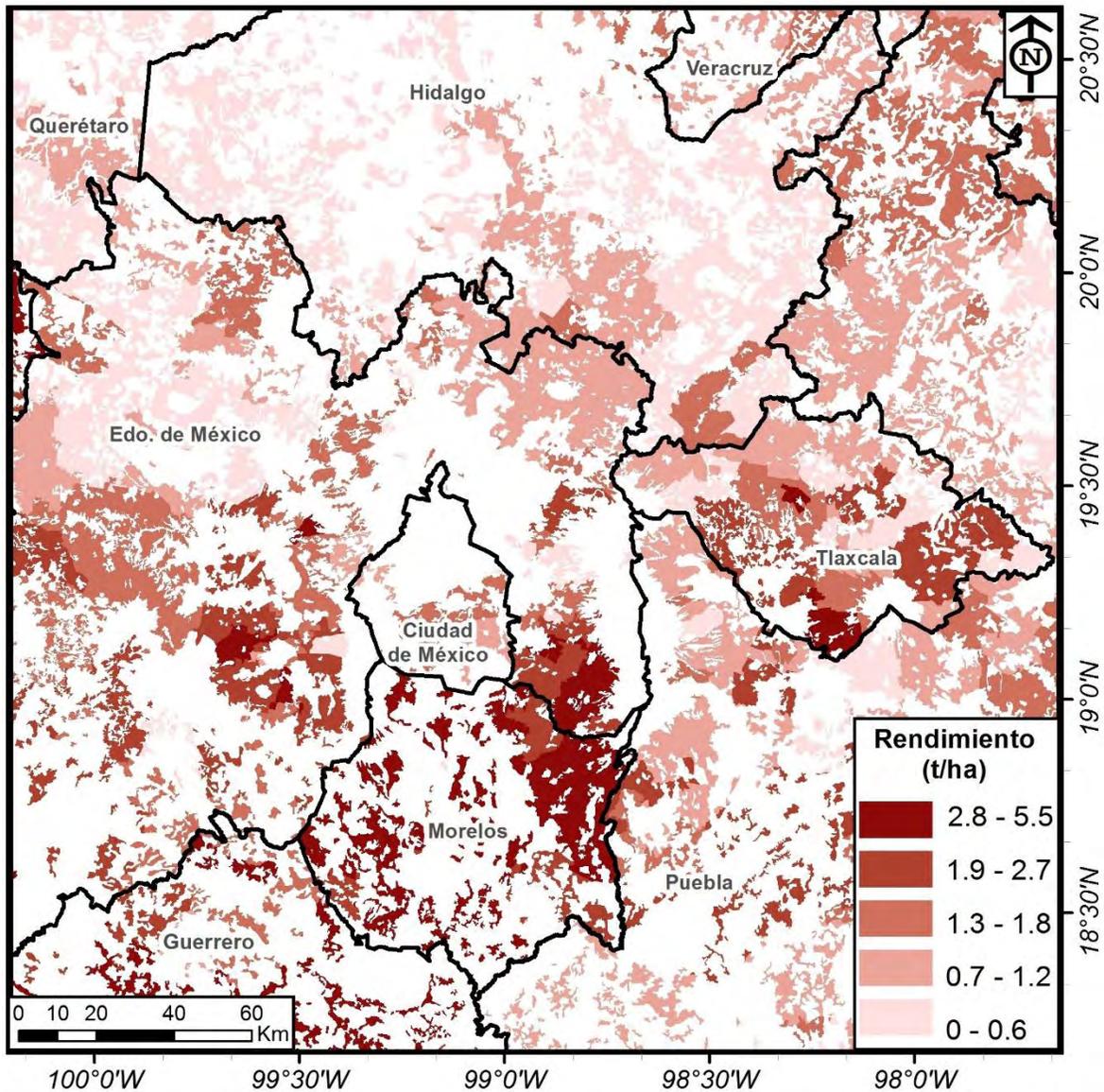


FIGURA 4.2.1 RENDIMIENTO DE MAÍZ EN EL ÁREA DE ESTUDIO, SIAP, 2011 (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM).

En lo referente a la producción total de maíz en la zona de estudio figura 4.2.2 se muestra en las zonas más claras una menor producción de maíz, mientras que en las zonas oscuras se tiene una mayor producción total, obteniendo que el Estado de México es el de mayor producción y el estado de Hidalgo el de menor.

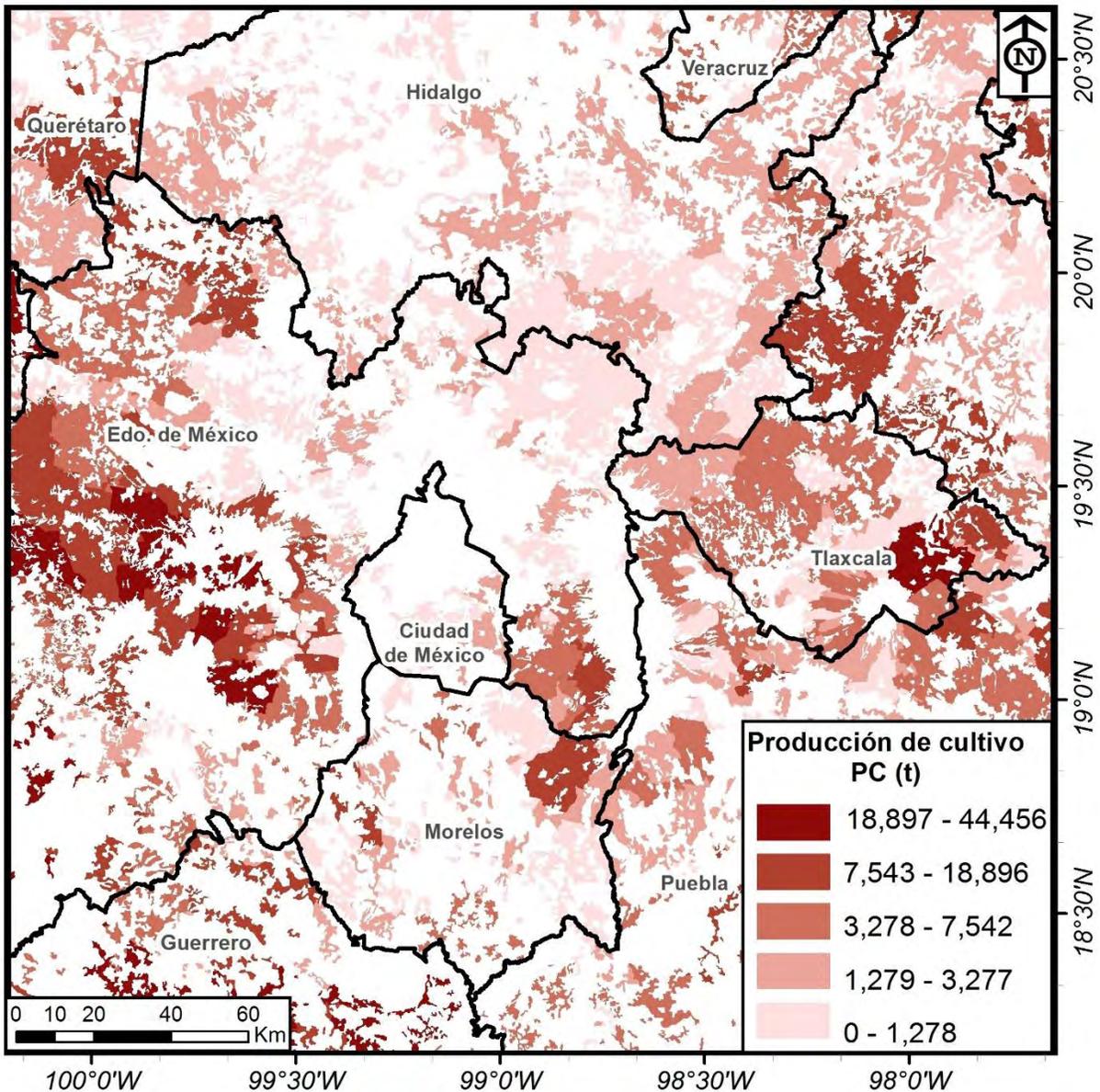


FIGURA 4.2.2 PRODUCCIÓN TOTAL DE MAÍZ EN EL ÁREA DE ESTUDIO, SIAP, 2011 (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM).

Las mayores pérdidas por exposición a ozono se muestran con una coloración más oscura, es decir son las zonas donde se tiene un mayor impacto y en color claro se muestran las zonas con menor daño figura 4.2.3. El intervalo de 1336-2397 toneladas es el de mayor pérdida (zona más oscura), siendo el Estado de México la entidad que muestra una mayor pérdida en la producción.

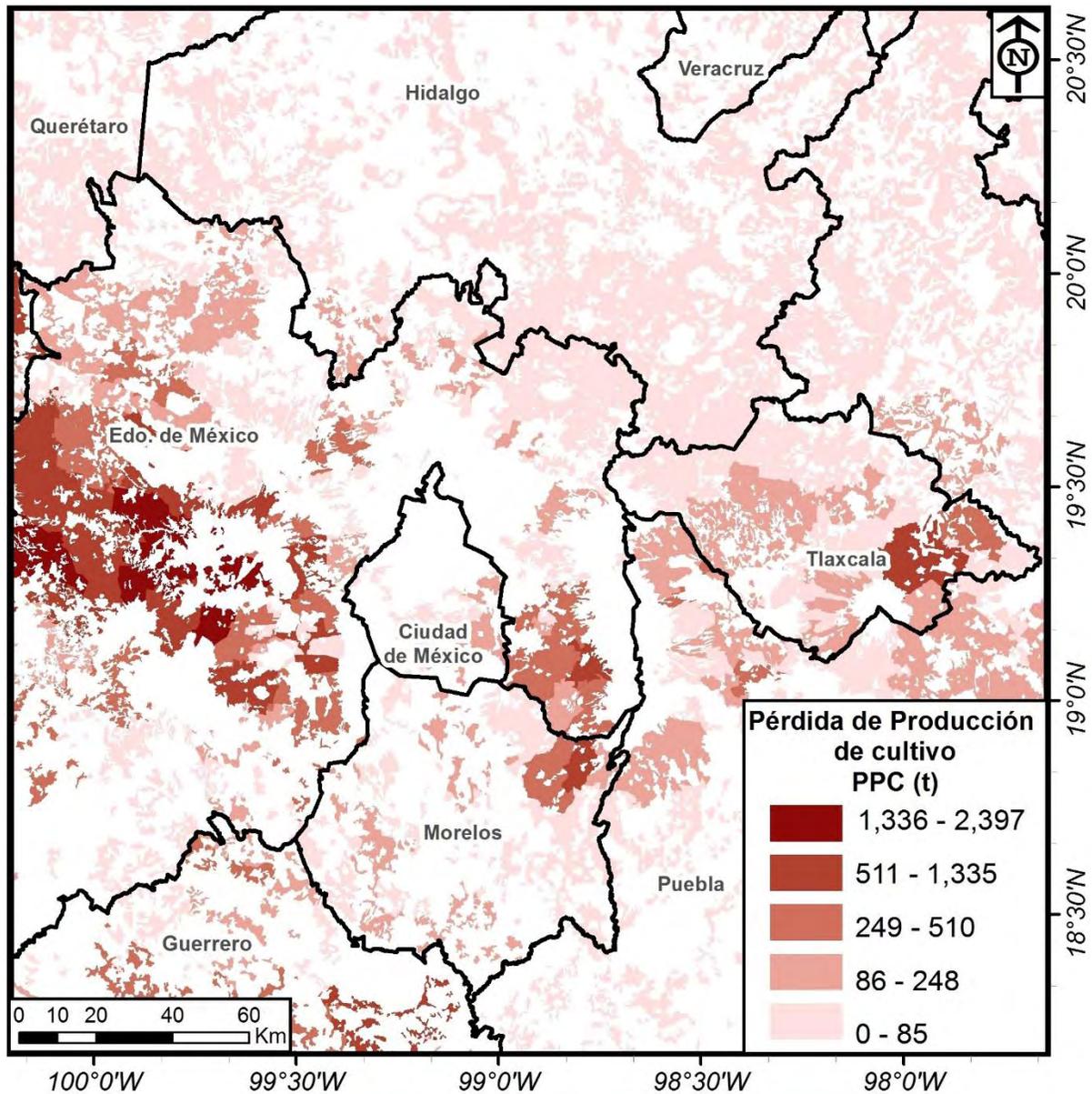


FIGURA 4.2.3 PÉRDIDA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN EL ÁREA DE ESTUDIO. (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM).

Con los datos obtenidos se puede determinar la reducción en el rendimiento de la producción, donde las reducciones más drásticas oscilan entre 7.1-9% de la producción, figura 4.2.4 siendo nuevamente el Estado de México el que tiene una mayor pérdida en el rendimiento relativo de los cultivos al igual que la ciudad de México mientras el estado de Morelos es el que tiene una menor afectación en el rendimiento relativo.

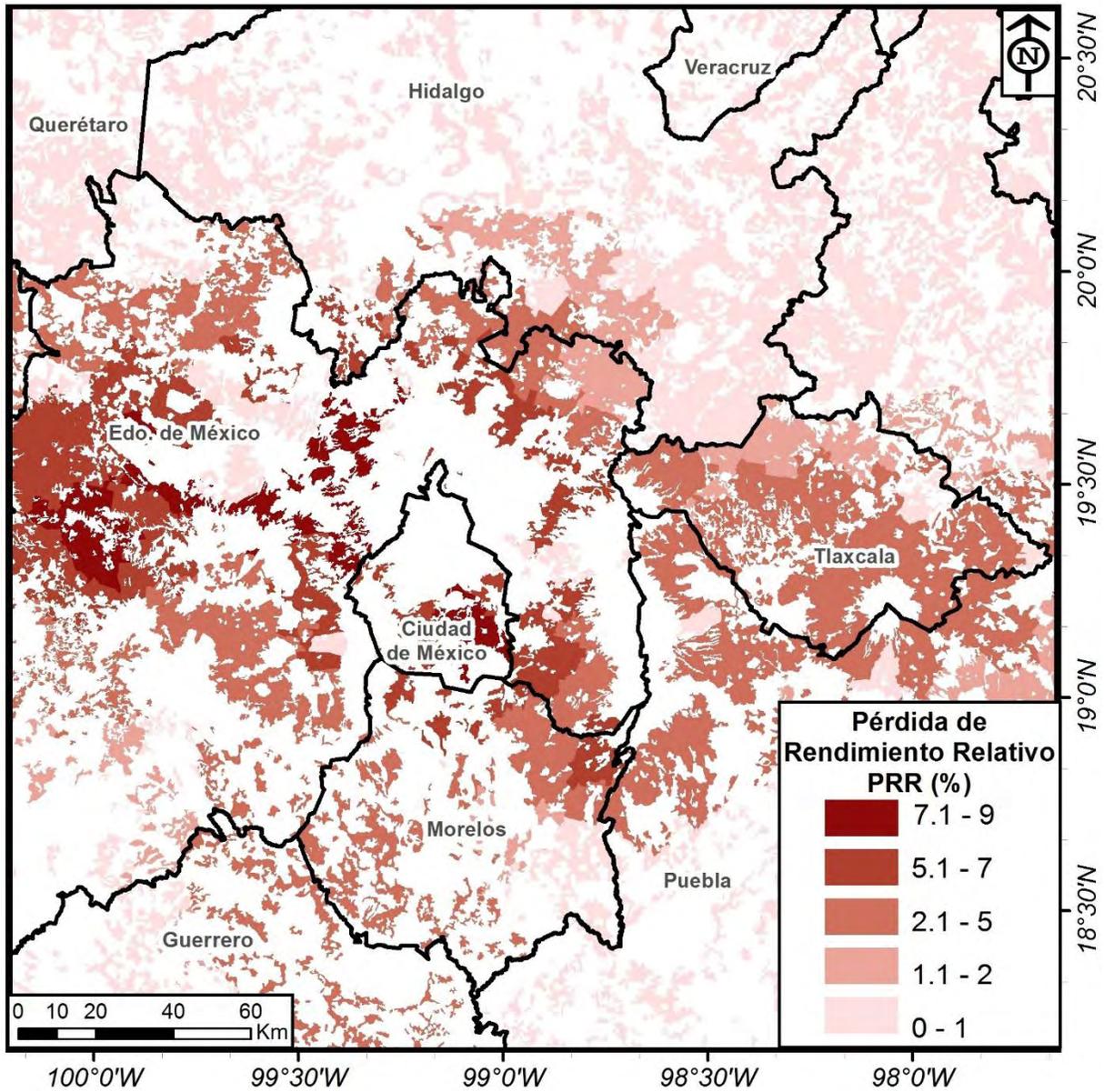


FIGURA 4.2.4 PÉRDIDA EN EL RENDIMIENTO RELATIVO EN EL ÁREA DE ESTUDIO (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM).

En la figura 4.2.5 se muestra el valor de producción de maíz en miles de pesos por región. El Estado de México presenta la zona con mayor producción económica mientras que el estado de Hidalgo y la Ciudad de México cuentan con una menor producción.

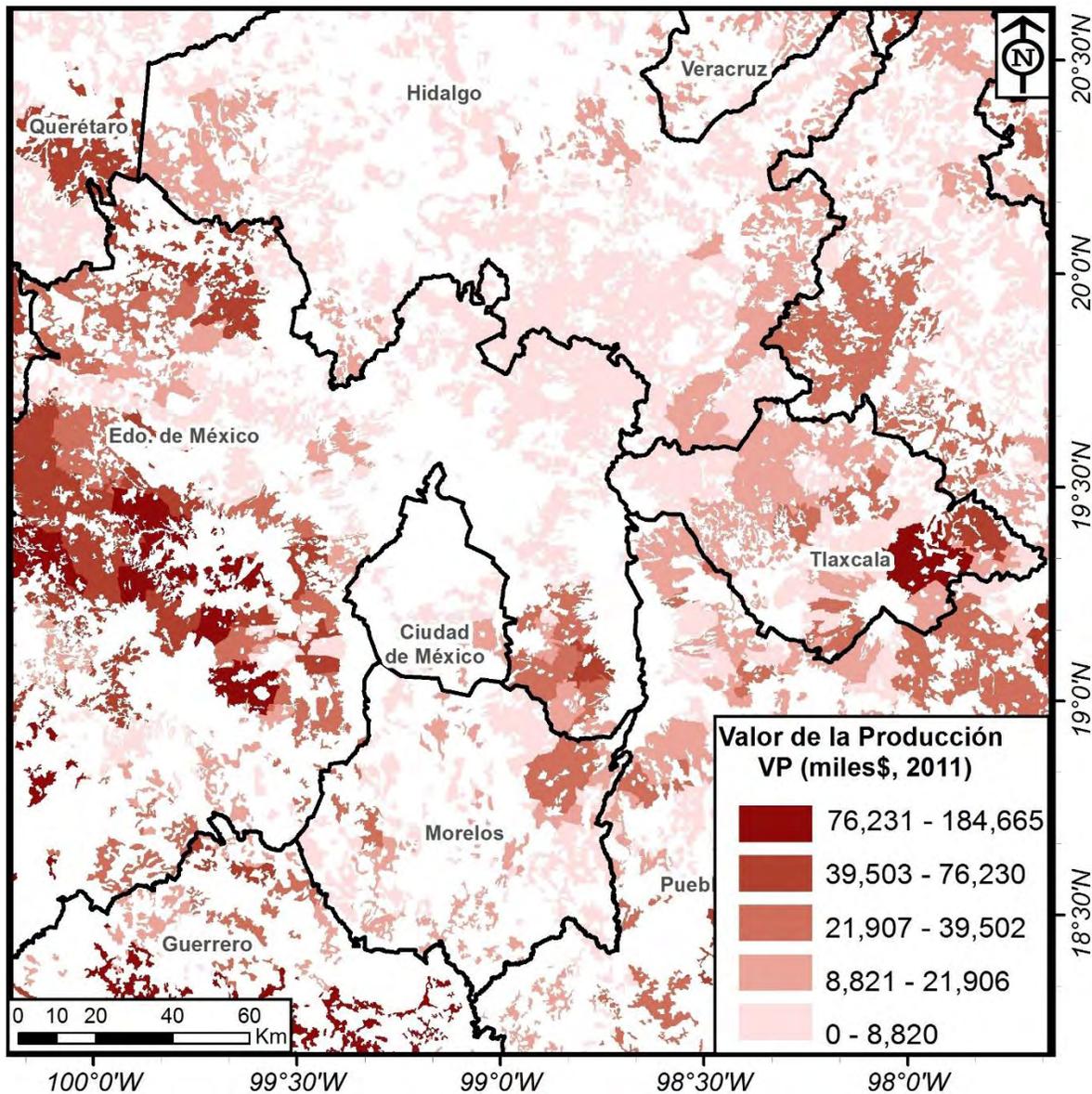


FIGURA 4.2.5 VALOR DE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN EL ÁREA DE ESTUDIO (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM).

En la figura 4.1.1 se observa que es el Estado de México donde se tiene una mayor exposición de ozono, lo que se ve reflejado en la pérdida del valor económico de la producción de maíz como se aprecia en la figura 4.2.6. De acuerdo a los mapas presentados en las figuras 4.2.1 a 4.2.6 las afectaciones a los cultivos por exposición a ozono durante la temporada de crecimiento pueden ser cuantificada utilizando producción y rendimiento del cultivo en las áreas de estudio. Aun cuando es el Estado de México el que tiene la mayor pérdida económica debido al exceso de ozono, la ciudad de México y el estado de Morelos

también cuentan con una importante pérdida económica, mientras que el estado de Hidalgo tiene la menor pérdida (figura 4.2.6), si bien es cierto que también tiene una menor producción, el complejo industrial de Tula podría afectar de manera importante a las zonas antes mencionadas, debido a que es una fuente generadora de precursores de ozono. Los vientos al favorecer su movimiento hacia el área metropolitana de la Ciudad de México exponen de esta manera a los cultivos a mayores concentraciones de ozono.

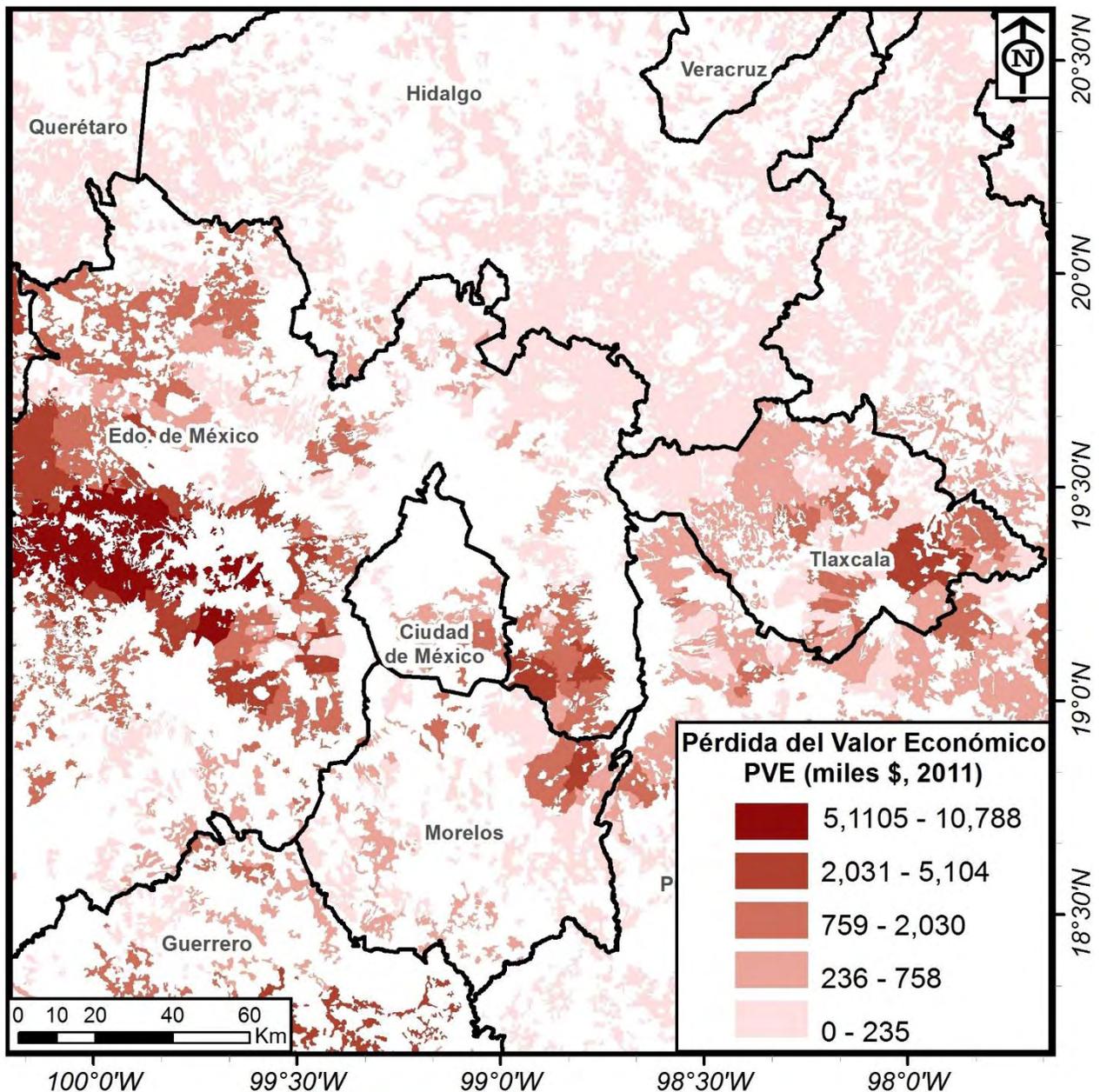


FIGURA 4.2.6 PÉRDIDA EN EL VALOR DE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN EL ÁREA DE ESTUDIO (ELABORÓ M. C. BERTHA E. MAR MORALES, CCA-UNAM).

Los valores numéricos (tabla 4.2.1) obtenidos del mapa de distribución espacial AOT40 (Figura 4.1.1) son aplicados a los valores de rendimiento agrícola y pérdida de rendimiento utilizando las funciones exposición-respuesta obtenidas por Mills y colaboradores, 2007. De esta forma se puede obtener el rendimiento atribuido a la exposición de ozono por el cultivo de maíz. En la última columna se observa el valor total de la pérdida de producción.

**TABLA 4.2.1 RENDIMIENTO AGRICOLA EN LOS VEINTE MUNICIPIOS MÁS AFECTADOS DEL CENTRO DE MÉXICO.**

Estado	Municipio	AOT40 (ppm.h)	Pérdida relativa (%)	Rendimiento (Mg/ha)	Pérdida de rendimiento (Mg/ha)	Pérdida económica/ha (MXN/ha)	Pérdida de cultivo (Mg)	Área Sembrada (ha)	Valor de la producción (millones \$)	Pérdida Económica (millones \$)
México	Villa de Allende	23.98	7	2.50	0.18	799	2430	13,500	152	11
México	Toluca	18.28	5	2.50	0.12	497	2139	17,822	185	9
México	Almoloya de Juárez	24.95	7	1.34	0.10	382	2100	21,000	107	8
México	Villa Victoria	25.84	7	1.40	0.11	496	1331	12,100	76	6
Tlaxcala	Huamantla	14.33	3	2.40	0.08	352	1158	14,480	156	5
México	Tenango del Valle	18.05	4	2.60	0.12	520	1067	8891	98	5
México	Ixtlahuaca	27.40	8	0.80	0.07	313	903	12,903	47	4
México	Lerma	21.83	6	1.50	0.09	355	899	9989	57	4
México	San José del Rincón	23.25	6	0.85	0.06	246	790	13,173	48	3
México	Amecameca	18.31	5	3.27	0.16	699	128	4553	66	3
México	Temoaya	26.28	7	1.94	0.16	556	896	5600	39	3
México	Zinacantepec	18.95	5	1.66	0.08	320	765	9557	60	3
México	Tianguistenco	19.76	5	2.50	0.13	579	683	5251	56	3
México	Amanalco	22.16	6	1.60	0.10	458	650	6500	47	3
Guerrero	Huitzucó	13.84	3	3.00	0.09	322	807	8971	94	3
México	Donato Guerra	22.81	6	1.32	0.09	394	648	7200	43	3
Michoacán	Zitácuaro	23.74	7	1.75	0.12	359	906	7550	39	3
Morelos	Ocuituco	23.60	6	3.18	0.22	838	662	3010	36	3
Guerrero	Iguala	11.32	2	5.50	0.12	560	520	4337	114	2
Michoacán	Contepec	14.55	3	3.00	0.10	271	855	8545	69	2
	Total						20938	194,932	1590	85

## 5. CONCLUSIONES

- Se lograron cumplir los objetivos al obtener el cálculo de los excedentes al nivel crítico AOT40 en la zona de estudio, la importancia de estos datos nos ayuda a generar un mapa de distribución espacial, es importante esto ya que puede ser aplicable para modelar otros contaminantes atmosféricos no solamente ozono (AOT40).
- El modelo de simulación WRF-Chem es una herramienta muy importante para obtener las concentraciones de ozono en una determinada zona de estudio, ya que el WRF-Chem nos proporciona un perfil horario del comportamiento de un contaminante sin la necesidad de muestreo ambiental.
- Los modelos de simulación deben ser validados con muestreos ambientales de tal forma que puedan ser escalados en caso necesario como se realizó en este proyecto.
- Es importante el manejo del lenguaje de programación, en este caso JAVA, para facilitar el tratamiento de datos debido a que se maneja una gran cantidad de información que tomaría un mayor tiempo procesarla manualmente.
- La obtención de la concentración diaria del ozono en una determinada región nos permite la aplicación de indicadores como el nivel crítico AOT40, con el cual podemos calcular la pérdida de cultivo y el daño económico en un área específica.
- Los sistemas de información geográfica son indispensables para la elaboración de mapas de distribución de contaminantes en regiones establecidas.
- La metodología desarrollada no sólo es aplicable para el cálculo del daño a cultivos, también puede ser utilizada para determinar daño en la salud humana, efectos en materiales (monumentos históricos como edificios coloniales y prehispánicos) y a la fauna por exposición a ozono.

- Para el caso de estudio se estima que la pérdida de maíz debido a la alta exposición de ozono asciende a 20938 ton ~ 85 millones de \$(<sub>2011</sub>). Es por esto que si se reducen las concentraciones de ozono se puede incrementar el rendimiento por hectárea y por lo tanto la producción total de maíz sería mayor en la zona.
- Es necesario mencionar que las pérdidas de producción de cultivos también dependen de otros factores como sequías, inundaciones y plagas.

## Bibliografía

- Alvarado González, Dulce Jaquelin. «Desarrollar un método para determinar las excedencias d niveles críticos de ozono para estimar daño a cultivos.» Tesis, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, 2015, 47.
- Avnery, Shiri, Denise L. Mauzerall, Junfeng Liu, y Larry W. Horowitz. «Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage.» *Atmospheric Environment*, 2010: 2284-2296.
- Caselli, Maurizio. *La contaminación atmosférica*. México: siglo veintiuno, 1992.
- CONAPO. «Delimitación de las zonas metropolitanas de México.» Reporte, 2010.
- Dingenen, Rita Van, Frank J. Dentener, Frank Raes, Maarten C. Krol, Lisa Emberson, y Janusz Cofala. «The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation.» *Atmospheric Environment*, 2008: 604–618.
- Fernandez, R., D. Allende, F. Castro, P. Cremades, y E. Puliafito. «MODELADO REGIONAL DE LA CALIDAD DE AIRE UTILIZANDO EL MODELO WRF/CHEM: IMPLEMENTACIÓN DE DATOS GLOBALES Y LOCALES PARA MENDOZA.» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 14, 2010*. (Instituto de Ciencias Básicas– Universidad Nacional de Cuyo), 2010.
- Fuhrer, J., L. Skärby, y M. R. Ashmore. «Critical Levels for ozone Effects on Vegetation in Europe.» s.f.
- García-Escalante, Jennifer Sandra, José Agustín García-Reynoso, Arón Jazcilevich-Diamant, y Luis Gerardo Ruiz-Suárez. «The influence of the Tula, Hidalgo complex on the air quality of the México City Metropolitan Area.» *Atmósfera*, 2014: 215-225.
- García-Reynoso, José Agustín, Arón Jazcilevich-Diamant, Luis Gerardo Ruiz-Suárez, Ricardo Torres-Jardón, M. Suárez-Lastra, y N. A. Reséndiz-Juárez. «Ozone Weekend effect analysis in México City.» *Atmósfera*, 2009: 281-297.
- Grell, G., S. Peckham, R. Schmitz, S. Mckeen, y G. Frost. «Fully coupled “online” chemistry within the WRF model.» *Atmospheric Environment*, 2005.
- Grell, George A., y otros. «Fully coupled “online” chemistry within the WRF model.» *Atmospheric Environment*, 2005: 6597-6598.
- Holland, Mike, y otros. *Development of a framework for probabilistic assessment of the economic losses caused by ozone damage to crops in Europe*. CENTRE FOR ECOLOGY AND HYDROLOGY (Natural Environment Research Council) CEH Project No. C02309NEW , 2006.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). « Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación Escala 1:250,000; Serie IV (2007–2010).» Aguascalientes, México, 2010.

- Larka Abellán, Maj-Britt , y Alberto González Ortiz. *El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación*. s.f.
- López Pérez, S. «DIAGNÓSTICO SOCIODEMOGRÁFICO DE LA MEGALÓPOLIS DEL CENTRO DEL PAÍS.» Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ISBN: 978-607-482-040-9, 2009.
- Manahan, Stanley E. «Introducción a la Química Ambiental.» 353-356. Reverte, 2007.
- Matyssek, Rainer, y otros. «Comparison between AOT40 and ozone uptake in forest trees.» *Atmospheric environment*, 2004: 2271–2281.
- Meiyun , L., T. Oki, T. Holloway, D. Streets, M. Bengtsson, y S. Kanae. « Long-range transport of acidifying substances in East Asia--Part I: Model evaluation and sensitivity studies.» *Atmospheric Environment*, 2008.
- Michalakes, J.G. , M. McAtee, y J. Wegiel. «"Software Infrastructure for the Weather Research and Forecast Model", in proceedings of UGC 2002.» 2002.
- Mills, G, y otros. «A synthesis of AOT40-bases response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops.» *Atmospheric Environment* 41 (2007): 2630-2643.
- Palomares Palacios, A. «Niveles de ozono y riesgos para la vegetación en la comunidad Valenciana.» Tesis, Universidad Politécnica de Valencia,, Valencia, España, 2010.
- Peckham, S., G. Grell, S. McKeen, J. Fast, y W. Gustafson. «WRF/Chem Version 3.2 Users Guide.» National Center for Atmospheric Research (NCAR), s.f.
- Schürman , G., A. Algieri, I. Hedgcock, G. Manna, y N. Pirrone. «Modelling local and synoptic scale influences on ozone concentrations in a topographically complex region of Southern Italy.» *Atmospheric Environment*, 2009.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). «Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).» Ciudad de México,México, 2011.
- Secretaria De Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Secretaria del Medio Ambiente Gobierno del Estado de México*. 15 de Diciembre de 2011.  
[http://sma.edomex.gob.mx/mejorar\\_calidad\\_aire\\_zona\\_metropolitanavallemexico](http://sma.edomex.gob.mx/mejorar_calidad_aire_zona_metropolitanavallemexico)  
(último acceso: 01 de 05 de 2018).
- Van Dingenen, Rita, Frank J. Dentener, Frank Raes, Maarten C. Krol, Lisa Emberson, y Janusz Cofala. «The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation.» *Atmospheric Environment*, 2009: 604-618.
- Vlachokostas, Ch., y otros. «Economic damages of ozone air pollution to crops using combined air quality and GIS modelling.» *Atmospheric Environment*, 2010: 3352–3361.

Wang, W., C. Bruyère, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, y J. Michalakes. «Advance Research WRF (ARW) Version 3 Modeling User's Guide, Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National.» National Center for Atmospheric Research (NCAR), s.f.

Ying, Z., T. Xuexi, y L Guohui. « Sensitivity of ozone concentrations to diurnal variations of surface emissions in Mexico City: A WRF/Chem modeling study.» *Atmospheric Environment*, 2009.

## Anexo 1

Se anexa el código fuente en Java para unificación de archivos TXT y crear la base de datos de concentración de ozono en los 100 sitios seleccionados por hora durante el periodo de cinco meses de información.

```
10 import java.io.BufferedWriter;
11 import java.io.File;
12 import java.io.FileReader;
13 import java.io.FileWriter;
14 import java.io.PrintWriter;
15 import java.util.StringTokenizer;
16
17 /**
18  *
19  * @author inter_02
20  */
21 public class Ozono_Script {
22
23     /**
24      * @param args the command line arguments
25      */
26     public static void main(String[] args) {
27         // TODO code application logic here
28
29         String nombre="..\AOT40_2/wrfinterp_d01_2014-";
30         String nombre2="_12_00_00.txt";
31         int dia=0,mes=0;
32         String dia2="",mes2="";
33         String salida = "..\\AOT40_2/Aot40.txt";
34
35         try{
36             PrintWriter pr = new PrintWriter(new BufferedWriter(new FileWriter(salida,true))); // Escritor de archivo
37
```

```

41     for(mes=6;mes<11;mes++){
42         try{
43             mes2="0"+mes;
44             if(mes==6){
45                 for(dia=1;dia<31;dia++){
46                     if(dia<10){
47                         dia2="0"+dia;
48                         System.out.println(nombre+mes2+""+dia2+nombre2);
49
50             BufferedReader bf = new BufferedReader(new FileReader(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2)); // Lector del archivo
51             String line = bf.readLine(); // Lee una linea completa a la vez
52
53             while (line != null){
54                 pr.println(line); // Escribe en el archivo
55                 System.out.println(line);
56                 line = bf.readLine(); // Lee la siguiente linea
57             }
58             bf.close();
59             }
60             if(dia>9){
61                 dia2=dia+"";
62                 System.out.println(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2);
63
64             BufferedReader bf = new BufferedReader(new FileReader(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2)); // Lector del archivo
65             String line = bf.readLine(); // Lee una linea completa a la vez
66
67             while (line != null){
68                 pr.println(line); // Escribe en el archivo
69                 System.out.println(line);

```

```

69         System.out.println(line);
70         line = bf.readLine(); // Lee la siguiente linea
71     }
72     bf.close();
73     }
74     }}
75     if(mes==7){
76         for(dia=1;dia<32;dia++){
77             if(dia<10){
78                 dia2="0"+dia;
79                 System.out.println(nombre+mes2+""+dia2+nombre2);
80
81             BufferedReader bf = new BufferedReader(new FileReader(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2)); // Lector del archivo
82             String line = bf.readLine(); // Lee una linea completa a la vez
83
84             while (line != null){
85                 pr.println(line); // Escribe en el archivo
86                 System.out.println(line);
87                 line = bf.readLine(); // Lee la siguiente linea
88             }
89             bf.close();
90             }
91             if(dia>9){
92                 dia2=dia+"";
93                 System.out.println(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2);
94
95             BufferedReader bf = new BufferedReader(new FileReader(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2)); // Lector del archivo
96             String line = bf.readLine(); // Lee una linea completa a la vez

```

```

97
98     while (line != null){
99         pr.println(line); // Escribe en el archivo
100        System.out.println(line);
101        line = bf.readLine(); // Lee la siguiente linea
102    }
103    bf.close();
104    }
105    }}
106    if(mes==8){
107        for(dia=1;dia<32;dia++){
108            if(dia<10){
109                dia2="0"+dia;
110                System.out.println(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2);
111
112                BufferedReader bf = new BufferedReader(new FileReader(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2)); // Lector del archivo
113                String line = bf.readLine(); // Lee una linea completa a la vez
114
115                while (line != null){
116                    pr.println(line); // Escribe en el archivo
117                    System.out.println(line);
118                    line = bf.readLine(); // Lee la siguiente linea
119                }
120                bf.close();
121            }
122            if(dia>9){
123                dia2=dia+"";
124                System.out.println(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2);
125
126                BufferedReader bf = new BufferedReader(new FileReader(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2)); // Lector del archivo

```

```

127 String line = bf.readLine(); // Lee una línea completa a la vez
128
129 while (line != null){
130     pr.println(line); // Escribe en el archivo
131     System.out.println(line);
132     line = bf.readLine(); // Lee la siguiente línea
133 }
134 bf.close();
135 }
136 }}
137
138 if(mes==9){
139     for(dia=1;dia<31;dia++){
140         if(dia<10){
141             dia2="0"+dia;
142             System.out.println(nombre+mes2+""+dia2+nombre2);
143
144             BufferedReader bf = new BufferedReader(new FileReader(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2)); // Lector del archivo
145             String line = bf.readLine(); // Lee una línea completa a la vez
146
147             while (line != null){
148                 pr.println(line); // Escribe en el archivo
149                 System.out.println(line);
150                 line = bf.readLine(); // Lee la siguiente línea
151             }
152             bf.close();
153         }
154         if(dia>9){
155             dia2=dia+"";
156             System.out.println(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2);
157

```

```

157 BufferedReader bf = new BufferedReader(new FileReader(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2)); // Lector del archivo
158 String line = bf.readLine(); // Lee una línea completa a la vez
159
160 while (line != null){
161     pr.println(line); // Escribe en el archivo
162     System.out.println(line);
163     line = bf.readLine(); // Lee la siguiente línea
164 }
165 bf.close();
166 }
167 }}
168
169 if(mes==10){
170     mes2=mes+"";
171     for(dia=1;dia<32;dia++){
172         if(dia<10){
173
174             dia2="0"+dia;
175             System.out.println(nombre+mes2+""+dia2+nombre2);
176
177             BufferedReader bf = new BufferedReader(new FileReader(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2)); // Lector del archivo
178             String line = bf.readLine(); // Lee una línea completa a la vez
179
180             while (line != null){
181                 pr.println(line); // Escribe en el archivo
182                 System.out.println(line);
183                 line = bf.readLine(); // Lee la siguiente línea
184             }
185             bf.close();
186         }

```

```

187         if(dia>9){
188             if(dia==25){
189                 dia++;
190             }
191             if(dia==26){
192                 dia++;}
193         dia2=dia+"";
194         System.out.println(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2);
195
196         BufferedReader bf = new BufferedReader(new FileReader(nombre+mes2+"-"+dia2+nombre2)); // Lector del archivo
197         String line = bf.readLine(); // Lee una linea completa a la vez
198
199         while (line != null){
200             pr.println(line); // Escribe en el archivo
201             System.out.println(line);
202             line = bf.readLine(); // Lee la siguiente linea
203         }
204         bf.close();
205     }
206     } // Cierra archivo de lectura
207 }
208
209 catch(Exception E){
210     System.err.println("el archivo no se pudo abrir \n"+E);
211 }

```

```

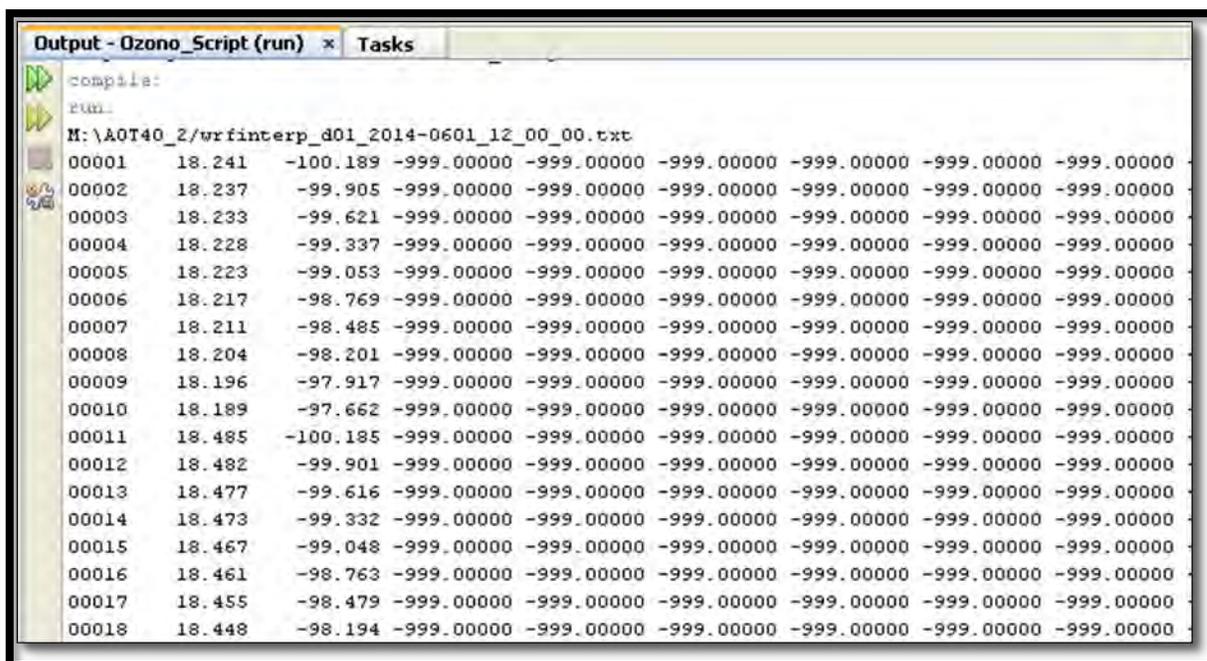
215
216         pr.close(); // Cierra archivo de salida
217
218     }
219     catch(Exception E){
220         System.err.println("el archivo no se pudo abrir \n"+E);
221     }
222 }
223
224 }
225

```

---

## Ejemplo de salida del código anterior

---



```
Output - Ozono_Script (run) x Tasks
-----
compila:
run:
M:\AOT40_2\wrfinterp_d01_2014-0601_12_00_00.txt
00001  18.241  -100.189 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00002  18.237   -99.905 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00003  18.233   -99.621 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00004  18.228   -99.337 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00005  18.223   -99.053 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00006  18.217   -98.769 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00007  18.211   -98.485 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00008  18.204   -98.201 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00009  18.196   -97.917 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00010  18.189   -97.662 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00011  18.485  -100.185 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00012  18.482   -99.901 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00013  18.477   -99.616 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00014  18.473   -99.332 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00015  18.467   -99.048 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00016  18.461   -98.763 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00017  18.455   -98.479 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
00018  18.448   -98.194 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000 -999.00000
```

Código Fuente de programa NCL para extracción de datos

```

begin
  fin=getenv("FIN");Salida de WRF/Chem en NetCDF
  fon=getenv("FON");archivo con datos de interpolacion NetCDF
  fi = addfile(fin+".nc","r")
  var = (/ "o3" /)
  units =(/ "ppmv" /)
  description=(/ "O3 mixing ratio"/)

  lon2d = fi->XLONG(0,:,:)
  lat2d = fi->XLAT(0,:,:)
  lonpnt =
(/ -100.1886719, -99.90468628, -99.62071708, -99.33676653, -99.05283687, -98.7689303, -98.4850
4907, -98.20119538, -97.91737145, -97.6619572, -100.1854379, -99.9009454, -99.61646939, -99.33
201214, -99.04757587, -98.76316284, -98.47877526, -98.19441538, -97.91008542, -97.65421589, -
100.1818311, -99.89677318, -99.61173192, -99.32670953, -99.04170826, -98.75673035, -98.471778
06, -98.18685362, -97.90195929, -97.64558198, -100.1782098, -99.89258434, -99.60697558, -99.32
138581, -99.03581728, -98.75027225, -98.46475299, -98.17926176, -97.89380081, -97.63691371, -
100.1745741, -99.88837878, -99.60220026, -99.31604084, -99.02990279, -98.74378838, -98.457699
9,-
98.17163961, -97.88560978, -97.62821086, -100.1709239, -99.8841564, -99.59740585, -99.3106745,-
99.02396466, -98.7372786, -98.45061862, -98.163987, -97.87738603, -97.61947324, -100.167259, -99.
87991711, -99.59259222, -99.30528666, -99.01800273, -98.73074273, -98.44350897, -98.15630374, -9
7.86912934, -97.61070064, -100.1635794, -99.87566079, -99.58775927, -99.2998772, -99.01201688, -9
8.72418064, -98.43637079, -98.14858964, -97.86083952, -97.60189283, -100.1598851, -99.87138735, -
99.58290688, -99.29444597, -99.00600695, -98.71759215, -98.4292039, -98.14084453, -97.85251637, -
97.59304962, -100.1561758, -99.86709669, -99.57803493, -99.28899285, -98.9999728, -98.71097711, -
98.42200814, -98.13306822, -97.84415969, -97.58417079/)
  latpnt =(/18.24101958, 18.23732357, 18.23309028, 18.22831979, 18.22301215, 18.21716745,
18.21078577, 18.20386719, 18.19641182, 18.18924312, 18.4852883,
18.48158438,18.47734204,18.47256135,18.46724237,18.46138517,18.45498984,18.44805647,18.4
4058515,18.4334011,18.75679589,18.75308323,18.74883089,18.74403893,18.7387074,18.7328363
8,18.72642596,18.71947622,18.71198727,18.70478627,19.02840082, 19.02467948, 19.02041719,
19.01561401, 19.01026999, 19.00438523, 18.9979598, 18.99099379, 18.9834873, 18.97626943,
19.30009718, 19.2963672, 19.292095, 19.28728066, 19.28192424, 19.27602581, 19.26958545,
19.26260325,
19.25507931,19.24784466,19.571879,19.56814042,19.56385839,19.55903295,19.55366418,19.547

```

```

6338604,20.35688679,20.34984074,20.34224798,20.33494715,20.65974122,20.65596875,20.65164
789,20.6467787,20.64136125,20.6353956,20.62888184,20.62182005,20.61421034,20.6068932/)
filename=fon+".txt"
;--- update ---
data =new(100, "string")
do i = 0, dimsizes(var)-1
  x = fi->$var(i)$
  xnew1= rcm2points (lat2d,lon2d,x,latpnt,lonpnt,2)
  xnew =xnew1(:,0,:)
  xnew@units = units(i)
  xnew@description = description(i)
  npt=-1
  do nl=0,99
    npt = npt +1
    data(npt) = sprinti("%0.5i", (npt+1) )
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.3f ",latpnt(nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.3f ",lonpnt(nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(13,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(14,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(15,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(16,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(17,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(18,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(19,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(20,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(21,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(22,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(23,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(24,nl))
    data(npt) = data(npt) + sprintf("%10.5f ",xnew(25,nl))
  end do
  asciwrite(filename, data)
  print(" updating ... "+var(i))
end do
end

```

```

#!/bin/csh -f

# run_interpola.csh
#
#|
#

# RULER  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 11 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
#-- 08T -----
set YRUDT = (14)
set MNUDT = (07)
set DYUDT = (01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
30 31)
set HRUDT = (12)
#01 02 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23)

set data_dir_in=/Volumes/Pronos

@ p = 1
while ($p <= 12)
@ d = 1
while ($d <= 31)
@ h = 1
#while ($h <= 24)

#-- setup ---
setenv DATE 20${YRUDT[$p]}-${MNUDT[$p]}-${DYUDT[$d]}
setenv HOUR ${HRUDT[$h]}_00_00
setenv FIN $data_dir_in/wrfout_d01_20${YRUDT[$p]}-${MNUDT[$p]}-
${DYUDT[$d]}_${HRUDT[$h]}:00:00
setenv FON wrfinterp_d01_20${YRUDT[$p]}-${MNUDT[$p]}-${DYUDT[$d]}_${HRUDT[$h]}_00_
00
setenv DH d01_20${YRUDT[$p]}-${MNUDT[$p]}-${DYUDT[$d]}_${HRUDT[$h]}_00_00

#echo $FIN
#-- interpola ---

```

```
@ p = 1
set data_dir_in=/Users/tesis/Desktop/Pruebas_2
while ( $p <= 16)
if( $p == 1) then
echo "hola"
csh enero2014_1.csh
else if( $p == 2) then
csh febrero2014_1.csh
else if( $p == 3) then
csh Marzo2014_1.csh
else if( $p == 4) then
csh Abril_2014.csh
else if( $p == 5) then
csh Mayo_2014.csh
else if( $p == 6) then
csh Junio_2014.csh
else if( $p == 7) then
csh Julio_2014.csh
else if( $p == 8) then
csh Agosto_2014.csh
else if( $p == 9) then
csh Septiembre_2014.csh
else if( $p == 10) then
csh Octubre_2014.csh
else if( $p == 11) then
csh Noviembre_2014.csh
else if( $p == 12) then
csh Diciembre_2014.csh
else if( $p == 13) then
csh Octubre2013.csh|
else if( $p == 14) then
csh Noviembre2013.csh
else if( $p == 15) then
csh Diciembre2013.csh
else
echo "No hay mes"
endif
@ p++
end
```