



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL – AIRE

INFLUENCIA Y TRANSPORTE DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA EN LA
ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO EN LA CALIDAD DEL AIRE DE LA ZONA
METROPOLITANA DEL VALLE DE PUEBLA.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

OSIEL OSVALDO MENDOZA LARA

TUTOR PRINCIPAL:

M.C. VICENTE FUENTES GEA, FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM.

COMITÉ TUTOR:

DR. ARMANDO AGUILAR MÁRQUEZ, FES – CUAUTILÁN UNAM
DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA, CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA UNAM

MÉXICO, CD.MX. NOVIEMBRE 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Sosa Echeverría Rodolfo

Secretario: Dr. Aguilar Márquez Armando

Vocal: Dr. García Reynoso José Agustín

1 er. Suplente: M. en I. Sepúlveda Hirose Rodrigo T.

2 d o. Suplente: M. C. Fuentes Gea Vicente

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria.

TUTOR DE TESIS:

NOMBRE

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Quiero agradecerle infinitamente por tener la dicha de estar vivo y por siempre tratar de rodearme de tantas personas tan extraordinarias para acompañarme y ayudarme a trazar este hermoso camino.

A mi familia

Madre, Padre, Fer, Lupita†, Paty, Ulises y a mis Abuelos: los amo con toda mi alma, ustedes son mi motivo de seguir adelante, de aprender cosas nuevas, el de tratar de dejar una pequeña huella en este mundo pero sobre todo de enseñarme a disfrutar los pequeños momentos de la vida.

A mis amigos y compañeros

A todos mis compañeros de maestría por el tiempo compartido, especialmente a Fidel, Jorge, Martín Zulma, Caro, Liz, Aurora y Ale. A M.I. Elia Luna Ceballos por todo el apoyo brindado tanto metodológicamente como personalmente en todo este tiempo. A mis amigos y compañeros de CFE por siempre apoyarme para sacar adelante esto: Dr. Luis Armando Martínez Romero, al Arq. Israel Moreno Valle, Aree y Germain. Mi amigo de la infancia Fer Alonzo por siempre estar ahí, a Cecy por el gran apoyo brindado desde la licenciatura y por todas las cosas buenas que has hecho por mí.

A mis profesores

A mis sinodales por las contribuciones durante cada tutorial y en el transcurso del estudio, pero sobre todo a mi asesor M.C. Vicente Fuentes Gea por darme la confianza y las enseñanzas a lo largo de esta gran etapa, un gran maestro.

A la UNAM

Por darme la oportunidad de formar parte de esta gran institución llena de conocimiento, deporte, arte y cultura.

BSC-CNS

Por abrirme las puertas y mostrarme lo grande y a su vez lo pequeño que puede ser el mundo: Al Dr. José Ma. Baldasano Recio y al Dr. Sergio Natan González por todo el tiempo y el apoyo brindado hacia mí, antes, durante y después de la estancia. Gracias al Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS) por haber aceptado la estancia de investigación y haberme facilitado el recurso computacional del supercomputador MareNostrum III con la disponibilidad de 128 procesadores.

Al CONACYT

Por otorgarme la beca 618374, y con esto darme la oportunidad de obtener más conocimientos dentro y fuera del país. Como una obligación pero sobre todo como un derecho, poder aplicarlos para contribuir con la grandeza de este país, mi México lindo y querido.

“Por mi raza hablará el espíritu”

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia el transporte de contaminantes atmosféricos de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) a la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (ZMVP).

La metodología se dividió en tres etapas: la primera se obtuvo, procesó y validó la base de datos de la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA) de la ciudad de Puebla (del 2001 al 2012), utilizando como herramientas para esta etapa, los manuales del Sistema Nacional de la Calidad del Aire (SINAICA), esta metodología permitió seleccionar la base de datos del año del 2012 para evaluar la calidad del aire en dicha ciudad; la segunda, se realizó un análisis estadístico de correlación de Spearman con las mediciones de las concentraciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) y de la REMA de Puebla para el año del 2012, los días con mayor correlación se asumió el que pudiera existir transporte de contaminantes atmosféricos de la ZMVM a la ZMVP; en la última etapa se corroboró el análisis estadístico con el apoyo de un sistema de modelización de la calidad del aire (CALPUFF) recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (*EPA por sus siglas en inglés*).

Los resultados de este estudio son: se encontró que hubo mala calidad del aire en la ciudad de Puebla para el año del 2012 por partículas menores a 10 micras y ozono; los seis días con mayor correlación de las mediciones de monitoreo de los contaminantes atmosféricos entre estas zonas metropolitanas fueron cuatro días de marzo (14, 19, 30 y 31) y dos días de mayo (18 y 27), correspondientes al año 2012; el sistema de modelización de la calidad del aire, con las condiciones e información utilizada, arrojó que sí existe transporte de contaminantes atmosféricos de la Zona Metropolitana del Valle de México a la Zona Metropolitana del Valle de Puebla para los días antes mencionados.

CONTENIDO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | Justificación..... | 2 |
| 1.2 | Objetivos..... | 3 |
| 2. | MARCO TEÓRICO | 4 |
| 2.1 | Conceptos básicos | 4 |
| 2.1.1 | Atmósfera y meteorología..... | 4 |
| 2.1.2 | Contaminación atmosférica..... | 9 |
| 2.1.3 | Monitoreo de la calidad del aire..... | 14 |
| 2.1.4 | Marco Jurídico..... | 16 |
| 2.2 | Sistemas de modelización de la calidad del aire | 20 |
| 2.2.1 | Clasificación de modelos..... | 21 |
| 2.2.2 | Sistema de Modelización tipo Eurliano..... | 24 |
| 2.2.3 | Sistema de Modelización tipo Langraniano..... | 24 |
| 2.2.4 | Sistema de Modelización tipo Gaussiano..... | 25 |
| 3. | Características de la zona de estudio | 26 |
| 3.1 | Características del Estado de Puebla | 26 |
| 3.1.1 | Clima en el Estado de Puebla..... | 27 |
| 3.1.2 | Topografía del Estado de Puebla..... | 29 |
| 3.1.3 | Flora y fauna..... | 31 |
| 3.1.4 | Uso de suelo..... | 31 |
| 3.1.5 | Actividades económicas..... | 33 |
| 3.2 | Contaminación atmosférica en la ciudad de Puebla | 33 |
| 3.2.1 | Emisiones de contaminantes atmosféricos..... | 33 |
| 3.2.2 | Ubicación de estaciones de monitoreo..... | 34 |
| 3.2.3 | Calidad del aire en la ciudad de Puebla..... | 36 |
| 4. | METODOLOGÍA | 37 |
| 4.1 | Obtención, procesamiento y validación de los datos de monitoreo para la evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Puebla | 38 |
| 4.1.1 | Disponibilidad, disposición, limpieza y verificación de los datos..... | 39 |
| 4.1.2 | Verificación del criterio de suficiencia de datos..... | 41 |
| 4.1.3 | Determinación de las características fundamentales de los datos..... | 42 |
| 4.1.4 | Normativa para evaluar la calidad del aire en México..... | 43 |
| 4.2 | Análisis estadístico de correlación de datos para localizar los posibles días de transporte de contaminación atmosférica de la ZMVM a la ZMVP | 44 |
| 4.2.1 | Identificación del tipo de distribución de los datos..... | 45 |
| 4.2.2 | Selección del contaminante trazador..... | 47 |
| 4.2.3 | Acotamiento de los datos, debido a características de la zona (cálculo teórico de la altura capa de mezcla)..... | 48 |
| 4.2.4 | Correlación tipo Spearman (selección de días de transporte de contaminantes atmosféricos)..... | 49 |
| 4.3 | Sistema de modelización meteorológica y de dispersión de contaminantes | 50 |
| 4.3.1 | Componentes del sistema de modelización CALPUFF..... | 52 |
| 4.3.2 | Características y descripción de los modelos CALPUFF - CALMET..... | 54 |
| 4.3.3 | Preparación de escenarios: modelización CALMET-CALPUFF..... | 61 |
| 1.1.1 | Preparación de escenarios: modelización WRF-CALPUFF..... | 67 |
| 5. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 76 |

| | |
|---|------------|
| 5.1 Obtención, procesamiento, validación y evaluación de los datos de monitoreo de la calidad del aire..... | 76 |
| 5.1.1 Disponibilidad y disposición de los datos del sistema de monitoreo atmosférico de la ciudad de Puebla..... | 77 |
| 5.1.2 Suficiencia de los datos del sistema de monitoreo atmosférico de la ciudad de Puebla.... | 78 |
| 5.1.3 Características fundamentales de los datos del sistema de monitoreo atmosférico de la ciudad de Puebla y evaluación de la calidad del aire..... | 81 |
| 5.2 Análisis estadístico de correlación de datos para localizar los posibles días de transporte entre las zonas metropolitanas | 85 |
| 5.2.1 Identificación del tipo de distribución de los datos | 85 |
| 5.2.2 Acotamiento de los datos de acuerdo a las características de la zona..... | 86 |
| 5.2.3 Correlación tipo Spearman | 87 |
| 5.3 Modelado de los días seleccionados | 87 |
| 5.3.1 Validación de modelos meteorológicos (CALMET-WRF)..... | 87 |
| 5.3.2 Modelización CALMET-CALPUFF, WRF-CALPUFF..... | 88 |
| 5.3.3 Discusión de resultados..... | 96 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 99 |
| Bibliografía..... | 101 |
| ANEXO 1.-MAPAS DE LA ZONA DE ESTUDIO | 105 |
| ANEXO 2.-GRÁFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA | 106 |
| ANEXO 3.- VIZUALIZACIÓN DE VARIABLES METEOROLÓGICAS (SINÓPTICA Y LOCAL), en OPEN GRADS y VAPOR..... | 111 |
| ANEXO 4.- GRÁFICAS DE LA METEOROLOGÍA (LOCAL) PARA LA VALIDACIÓN..... | 114 |
| ANEXO 5.- EJEMPLO DE ARCHIVOS DE ENTRADA DE CALPUFF, CALMET Y WRF | 117 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.- a) Perfil de la temperatura [°C] respecto a la altitud [km], en una atmósfera estándar. Fuente: Introducción a la ingeniería medioambiental (Masters et al. ,2008). b) Troposfera baja, de 850 Mb (hPa) (entre 1000 y 1600 m.), los sistemas son prácticamente idénticos a los de superficie, la diferencia es que el viento es paralelo a las isohipsas, imagen tomada de (NIMBUS, 2001).c) Componentes principales de la Capa Límite Planetaria (CLP) imagen tomada de (Buenestado, 2003)..... | 6 |
| Figura 2.- Escala planetaria y diversos sistemas de macroescala, escala sinóptica, mesoescala y microescala de acuerdo al tiempo[s] y su distribución espacial [m]. Fuente: (Laing & Evans, 2011), tomada de (Hidalgo, 2012). | 8 |
| Figura 3.- Mapa de promedio diario de altura geopotencial a 850 [hPa] para el 14 de marzo de 2012. Se observa que en la parte del Golfo de México existen sistemas de alta presión, esto quiere decir que la meteorología que influye corresponde a una escala meso o mayor, mientras que en la parte central del territorio de México, la meteorología local es la que predomina. Fuente: elaboración propia con base de datos NOAA. | 9 |
| Figura 4.- Insumos de los sistemas de modelización que se necesitan para calcular la concentración y distribución estimada de los contaminantes atmosféricos, imagen tomada de (INE, 2006)..... | 20 |
| Figura 5.- Mapa representativo de la ZMVP y la ZMVM. Base de datos de topografía y uso de suelo tipo urbano de INEGI (2010), mapa digital. | 26 |
| Figura 6.- Plano de climas, se observa que en la ciudad de Puebla se presenta un clima subhúmedo, al igual que en la ciudad de Tlaxcala y parte de la ZMVM. El 35 % de este clima está presente en el Estado de Puebla. | 28 |
| Figura 7.- Los vientos predominantes provienen del norte en la ciudad de Puebla. Tomada del programa de gestión de la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (2006-2011)..... | 29 |
| Figura 8.- Mapa hipsográfico de la zona de estudio. Se observa el complicado terreno entre la ZMVM y la ZMVP. Elaboración propia, base de datos de CONABIO (2010). | 30 |
| Figura 9.- Mapa del uso del suelo de la zona de estudio. Elaboración propia, base de datos de CONABIO (2010). La mancha urbana se presenta en color gris..... | 32 |
| Figura 10.- Mapa de la ubicación y nombre de las estaciones de monitoreo atmosférico del Estado de Puebla (REMA). Elaboración propia con base en datos de la CONABIO (2010). Topografía y zona urbana de la zona de estudio. | 35 |
| Figura 11.-Días que se excedieron los límites máximos permisibles establecidos en las normas oficiales mexicanas de la calidad del aire, para el periodo de 2001 al 2013. Fuente: Secretaria de Desarrollo Rural, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial del Estado de Puebla. | 36 |
| Figura 12.- En el portal de internet del SINAICA, se muestran las redes de monitoreo atmosférico de la calidad del aire del país en un mapa interactivo, aunque solamente las bases de datos de la Cd. de México (ZMVM) y la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), están validadas y disponibles: http://sinaica.inecc.gob.mx/magic/rmaval/null/_framework (última revisión 08/03/2016)..... | 38 |
| Figura 13.- Elevaciones en la zona de estudio. El Popocatepetl y la Iztaccíhuatl, segunda y tercera cumbres más altas del país (5,500y 5,220 msnm respectivamente). Elevaciones mínimas de las cumbres en donde podría haber transporte de contaminantes atmosféricos son el Paso de Cortés y Río Frío (3690 y 3250 msnm respectivamente)..... | 48 |
| Figura 14.- Proceso y división del sistema modelización CALPUFF. Insumos generales requeridos en el sistema. El modelo climático CALMET al igual visualizador de variables meteorológicas, mientras que CALPUFF generalmente es utilizado para conocer la concentración de contaminantes atmosféricos. | 51 |
| Figura 15.- Proceso de los programas de rutina y subrutina de cálculo, diagrama modificado de David Chuquer (2014)..... | 53 |
| Figura 16.- Diagrama de flujo del sistema de modelización meteorológico CALMET. | 56 |
| Figura 17.- Diagrama de flujo del sistema de modelización CALPUFF..... | 58 |
| Figura 18.- Topografía de la zona de estudio de 115 x 115 km, con un mallado de 1 km. Base de datos del Modelo Digital de Elevación del GTOPO30 (USGS, 2012)..... | 62 |
| Figura 19.-Visualización del archivo que contiene la información de topografía y uso de suelo. Este es usado en el sistema de modelización meteorológica CALMET..... | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 20.- Ubicación en la zona de estudio de las estaciones meteorológicas usadas en el sistema de modelización..... | 65 |
| Figura 21.- Ubicación de las fuentes hipotéticas de emisión de contaminantes atmosféricos en la zona de estudio..... | 66 |
| Figura 22.- Diagrama de flujo del sistema de modelización meteorológico WRF, imagen tomada de (Cipagauta, 2014), imagen original: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/ | 69 |
| Figura 23.- Diagrama de flujo del sistema de preprocesamiento WPS, tomada de (Cipagauta, 2014), adaptada de (Skamarock, y otros, 2008), imagen original de http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/users_guide_chap6.htm | 70 |
| Figura 24.- Configuración del dominio, (WRF v3.5), 4 dominios. El dominio 1, contiene información meteorologica de todo el territorio nacional a 27 km, resaltando que esta información toma en cuenta los fenomenos que suceden tanto en el Golfo de México así como paarte del Oceano Pacífico. | 73 |
| Figura 25.- Niveles en la vertical modelados (WRF v3.5)..... | 75 |
| Figura 26.- Visita a la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico de Puebla. La fotografía superior fue tomada en la oficina general de la REMA de Puebla, mientras que la fotografía inferior es la estación de monitoreo Velódromo..... | 77 |
| Figura 27.- Muestra del análisis del comportamiento de los datos de concentración de contaminantes de la REMA respecto al tiempo (horaria, diaria, semanal y mensual). | 82 |
| Figura 28.- Concentración mensual para ozono en la ciudad de Puebla. En contraste con el comportamiento de a) precipitación y b) radiación solar..... | 83 |
| Figura 29.- Correlograma y caja de bigotes..... | 84 |
| Figura 30.- Histograma para concentraciones de NO ₂ (ppb) en la estación tecnológico (2012)..... | 84 |
| Figura 31.- Distribución de la base de datos de 2012 para Agua Santa de SO ₂ (tipo gamma)..... | 86 |
| Figura 32.-Máximas alturas capas de mezcla en la Ciudad de México, datos tomados del Aeropuerto Internacional Benito. Método de Holzworth..... | 86 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1.- Composición de sustancias del aire limpio seco en porcentaje de volumen y partes por millón (troposfera idealizada, 2006)..... | 5 |
| Tabla 2.- Clasificación escala espacial y temporal de los fenómenos meteorológicos (Orlanski, 1975) tomada de (Hidalgo, 2012)..... | 8 |
| Tabla 3.- Eventos de contaminación atmosférica que motivaron a la investigación y aplicación de regulaciones para controlar la calidad del aire en zonas urbanas en el Reino Unido (1307,1952) y en los Estados Unidos de América (1948)..... | 10 |
| Tabla 4.- Límites Máximos Permisibles (LMP) de concentración de contaminantes atmosféricos en el aire y su método de medición, esto de acuerdo a la normativa de México. | 18 |
| Tabla 5.- Clasificación de modelos de acuerdo a su escala espacial y temporal (CIEMAT, 2015) | 23 |
| Tabla 6.- Elevaciones que se encuentran en el estado de Puebla CONABIO (2010). | 30 |
| Tabla 7 Fuentes y los contaminantes que emite [kg/año] el Estado de Puebla (SEMARNAT, 2008)..... | 34 |
| Tabla 8.- Ubicación actual de las estaciones de monitoreo de REMA Puebla..... | 35 |
| Tabla 9.- División del capítulo de metodología: numeración, nombre, meta y herramientas utilizadas para cada subcapítulo. | 37 |
| Tabla 10.- Banderas para la limpieza y la validación de los datos concentraciones de contaminantes atmosféricos, según el Ministerio de Medio Ambiente de España (MAM) (2000), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de México (INECC) (2010) y la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos de América (EPA) (2002) | 40 |
| Tabla 11.- Criterios para la limpieza y la validación de los datos de concentraciones de contaminantes atmosféricos, de acuerdo a cada contaminante atmosférico, según Castro E. (2008) y al Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (BSC) (2013). | 41 |
| Tabla 12.- Cálculo de la cantidad teórica de datos para verificar el criterio de suficiencia del 75% para un periodo anual..... | 42 |
| Tabla 13.-Límites Máximos Permisibles de concentración de los contaminantes atmosféricos, para la evaluar la calidad del aire en zonas urbanas en México (última revisión 09-05-2016). | 44 |
| Tabla 14.- Componentes del sistema de modelización CALMET y las características de archivos de entrada, de control y de salida, y programa de rutina. Tabla modificada de Chuquer 2014, información basada en (Scire, Robe, Fernau, & Yamartino, 2000). | 55 |
| Tabla 15.- Componentes del sistema de modelización CALPUFF y las características de archivos de entrada, de control y de salida, y programa de rutina. Tabla modificada de Chuquer 2014, información basada en (Scire, Robe, Fernau, & Yamartino, 2000). | 57 |
| Tabla 16.- Capacidades y características del sistema de modelización CALPUFF. Tabla tomada, modificada de (López, 2009) con base en (Scire et al, 2000) | 59 |
| Tabla 17.- Coordenadas de la zona de estudio a simular en el sistema de modelización. | 61 |
| Tabla 18.-Estaciones meteorológicas de las cuales se tomaron las observaciones mínimas necesarias para simular en el sistema de modelización meteorológica CALMET..... | 64 |
| Tabla 19.- Parámetros generales tomados para la emisión y las coordenadas de las fuentes de emisión hipotéticas..... | 66 |
| Tabla 20.- Investigaciones de contaminación atmosférica utilizando WRF en la ZMVM..... | 72 |
| Tabla 21.- Características de los dominios (WRF v3.5) | 73 |
| Tabla 22.- Ejemplo de variables que contiene la base de datos ds083.2 | 74 |
| Tabla 23.- Niveles y presión en la vertical. (WRF v3.5)..... | 75 |
| Tabla 24.- Subcapítulos del capítulo 4 (Resultados y discusión)..... | 76 |
| Tabla 25.- Tabla de suficiencia para la base de datos proporcionados por la REMA de Puebla (2001-2006). | 79 |
| Tabla 26.- Tabla de suficiencia para la base de datos proporcionados por la REMA de Puebla (2001-2006). | 80 |
| Tabla 27.- Días de incumplimiento para la ciudad de Puebla de acuerdo a la normativa Mexicana (evaluación de la calidad del aire para los años 2003 y 2012). | 85 |

| | |
|--|----|
| Tabla 28.- Resultados de correlación de Spearman para la base de datos de SO ₂ para el 2012..... | 87 |
| Tabla 29.- Evaluación de la sensibilidad de los sistemas de modelización meteorológica, para velocidad de viento y temperatura superficial, utilizando BIAS y RMSE. | 88 |
| Tabla 30.- Resultado de la modelización CALPUFF para el 14 de marzo de 2012. | 90 |
| Tabla 31.- Resultado de la modelización CALPUFF para el 19 de marzo de 2012. | 91 |
| Tabla 32 .- Resultado de la modelización CALPUFF para el 30 de marzo de 2012. | 92 |
| Tabla 33.- Resultado de la modelización CALPUFF para el 31 de marzo de 2012. | 93 |
| Tabla 34.- Resultado de la modelización CALPUFF para el 18 de mayo de 2012. | 94 |
| Tabla 35.- Resultado de la modelización CALPUFF para el 27 de mayo de 2012. | 95 |

1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de los problemas ambientales han sido provocados por el mal manejo y la sobreexplotación de los recursos naturales, la sobrepoblación, el consumismo y un sinnúmero de actividades antropogénicas. El crecimiento de las zonas urbanas y el desarrollo de las actividades humanas han propiciado un mayor incremento económico y mejoras en aspectos sociales (González, et al., 2015). Sin embargo, la urbanización ha traído múltiples problemas; entre ellos, la contaminación del aire, cuyas consecuencias están empezando a ser reconocidas (Baldasano et al., 2003). Por primera vez en la historia, más de la mitad de la población mundial vive en zonas urbanas. Si bien, el número de grandes aglomeraciones urbanas va en aumento, aproximadamente la mitad de los residentes urbanos vive en ciudades y localidades de menor tamaño (ONU, 2014). Para el año 2014 se estimó una población mundial de 7,300 millones de personas (UNFPA, 2014). En México, de acuerdo al Censo de Población y Vivienda 2010, se contaron 112 millones 336 mil 538 de habitantes (INEGI, 2015).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) hace mención que la contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. Según estimaciones de 2012, la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 3.7 millones de defunciones prematuras (OMS, 2014). La OMS dentro de sus directrices, propone medir la concentración de contaminantes atmosféricos para evaluar la calidad del aire tales como: partículas (PM), ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2). En México, la Secretaría de Salud, la Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en conjunto con las dependencias estatales, se coordinan para evaluar la calidad del aire de las ciudades y de las zonas metropolitanas, midiendo las concentraciones de los contaminantes atmosféricos antes mencionados, y además, monóxido de carbono (CO) y plomo (Pb).

La atmósfera es un sistema extremadamente complejo y reactivo donde tienen lugar de manera simultánea numerosos procesos físicos y químicos. Los contaminantes atmosféricos experimentan complejos procesos de transporte, mezcla y transformación química, que dan lugar a una distribución espacial y temporalmente variable (INE, 2006). La emisión de contaminantes generados en una zona metropolitana pueden transportarse a otras zonas de interés: social, económico, cultural o ambiental. El monitoreo de la calidad de aire, un

apropiado manejo de los datos emitidos por las estaciones de monitoreo, los inventarios de emisiones y el uso de sistemas de modelización, son elementos necesarios para conocer el comportamiento de contaminantes en la atmósfera. Con base en lo anterior es necesario que las zonas urbanas cuenten con esta información, esto para que se presenten adecuadas políticas preventivas y correctivas para la prevención y control de la contaminación atmosférica.

Una herramienta que resulta imprescindible para los estudios de contaminación atmosférica es el modelado matemático, al igual que en otras disciplinas, tiene como objetivo el analizar y estudiar los procesos implicados y su comportamiento (CIEMAT, 2015). Investigaciones anteriores, las cuales aplican modelos matemáticos, sugieren que la contaminación atmosférica que se genera en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), se transporta hacia las Zonas Metropolitanas de Toluca (Chuquer, 2014) y Cuernavaca (Luna, 2015), aunque cabe mencionar que la ZMVM también se ve afectada por SO₂ proveniente de la Zona Metropolitana de Tula (García et al., 2014), debido a la gran actividad industrial que existe en esta zona.

1.1 Justificación

Para hacer efectivas las políticas preventivas y correctivas de la calidad del aire que se establezcan en una ciudad o zona metropolitana, que está siendo influenciada por las emisiones de otra zona urbana relativamente próxima, se requiere conocer el nivel de contaminación aportado por dicha zona urbana.

La ciudad de Puebla posiblemente, debido a su cercanía con la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), pudiera ser influenciada por la emisiones de esta, de manera que resulta fundamental conocer la cantidad que está siendo exportada desde la ZMVM, para así implementar exitosamente planes y programas para la prevención y control de la contaminación atmosférica en la ciudad de Puebla; si un contaminante está siendo importado o en su caso contrario exportado a una región, de nada sirven las medidas que se pudieran implementar para controlar los niveles de la calidad del aire de ese contaminante atmosférico en el territorio considerado.

1.2 Objetivos

General

Estudiar la posible influencia que tiene la contaminación atmosférica generada en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) en los niveles de la calidad del aire registrados en la ciudad de Puebla.

Específicos

- Analizar la calidad del aire en la ciudad de Puebla para un año seleccionado.
- Conocer las condiciones meteorológicas y/o topográficas que conducen al transporte de contaminantes entre la ZMVM y la ZMVP.
- Determinar si existe transporte de contaminación atmosférica entre la ZMVM y la Zona Metropolitana de Puebla-Tlaxcala (ZMVP).

2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo se divide en dos subcapítulos; conceptos básicos y sistemas de modelización de la calidad del aire.

En la primera parte se aborda definiciones esenciales de las variables utilizadas en la metodología, esto para acotar el tema y ubicar al lector en materia de la contaminación atmosférica en zonas metropolitanas, mientras que en el último subcapítulo se describe de manera general la clasificación de los sistemas de modelización de la calidad del aire.

2.1 Conceptos básicos

El objetivo de este capítulo es adentrar al lector a que conozca las variables involucradas en la calidad del aire, el monitoreo y la legislación mexicana relacionada con la contaminación del aire.

2.1.1 *Atmósfera y meteorología*

2.1.1.1 *Atmósfera*

El planeta Tierra tiene cuatro capas principales: atmósfera, geosfera, hidrosfera y biosfera, en las cuales se llevan a cabo reacciones biogeoquímicas dando lugar a un gran número de ciclos que interaccionan entre sí. La atmósfera, es la capa de interés en este trabajo, esta está constituida casi en su totalidad de nitrógeno y oxígeno, no obstante, otros gases y partículas existentes en minúsculas concentraciones, las cuales determinan en gran medida la habitabilidad de nuestro planeta (Masters & Ela, 2008). Lo mencionado con antelación se ve en la tabla 1.

La atmósfera, a su vez, se divide en cuatro capas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. Las capas de la atmósfera tiene tres zonas de transición: tropopausa, estratopausa y mesopausa. La troposfera y la mesosfera se caracterizan por el descenso en las temperaturas con la altitud, mientras que la estratosfera y la termosfera muestran un incremento de las temperaturas (Masters & Ela., 2008).

Tabla 1.- Composición de sustancias del aire limpio seco en porcentaje de volumen y partes por millón (troposfera idealizada, 2006).

| Sustancia | Fórmula | Porcentaje por volumen | Partes por millón |
|--------------------|------------------|------------------------|-------------------|
| Nitrógeno | N ₂ | 78,08 | 780.800 |
| Oxígeno | O ₂ | 20,95 | 209.500 |
| Argón | Ar | 0,93 | 9.300 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 0,038 | 380 |
| Neón | Ne | 0,0018 | 18 |
| Helio | He | 0,0005 | 5,2 |
| Metano | CH ₄ | 0,00017 | 1,7 |
| Kriptón | Kr | 0,00011 | 1,1 |
| Oxido nitroso | N ₂ O | 0,00003 | 0,3 |
| Hidrógeno | H ₂ | 0,00005 | 0,5 |
| Ozono | O ₃ | 0,000004 | 0,04 |

Fuente: Introducción a la ingeniería mediambiental (Masters et al. ,2008)

La capa de la atmósfera que tiene mayor interacción con la actividad humana es la troposfera, esta tiene una altura idealizada de aproximadamente de 11 km con respecto al nivel del mar. La troposfera se divide en dos subcapas: la troposfera alta y la baja, esta última tiene una altura de nivel de presión de 850 hPa (entre 1000 y 1600 m.)(ver Figura 1), y aquí es donde se llevan la mayor parte de los fenómenos meteorológicos locales, ya que los sistemas de las variables meteorológicas son prácticamente idénticos a los de superficie (NIMBUS, 2001).

En la troposfera baja es donde se emiten y concentran la mayor cantidad de contaminantes atmosféricos, esto debido a tres aspectos generales: el primero, es la proximidad de esta capa con la actividad humana; el segundo, las particularidades fisicoquímicas, como la altura capa de mezcla (ACM) y/o capa límite planetaria (CLP), puesto que estas delimitan los procesos de transporte, forzando a que los contaminantes atmosféricos se mantengan en la troposfera; y por último, las características específicas de los contaminantes atmosféricos, como por ejemplo, su tiempo de residencia, su tamaño, en caso de las partículas suspendidas, o su reactividad con otros elementos en el aire.

Es importante mencionar la diferencia entre ACM y CLP, esta última también es conocida como capa límite atmosférica y se define como la parte de la troposfera que está directamente influenciada por la presencia de la superficie terrestre y responde a los forzamientos superficiales en escalas de tiempo de una hora o menos (Zavala, 2014).

La CLP tiene tres componentes principales: la capa de mezcla, la capa residual y la capa estable nocturna, en otras palabras la ACM forma parte de la CLP, aunque en términos generales estas alturas son estrechamente parecidas. La CLP desarrolla una estructura bien definida que evoluciona con el ciclo diario (Buenestado, 2003), tal y como se observa en la figura 1 c.

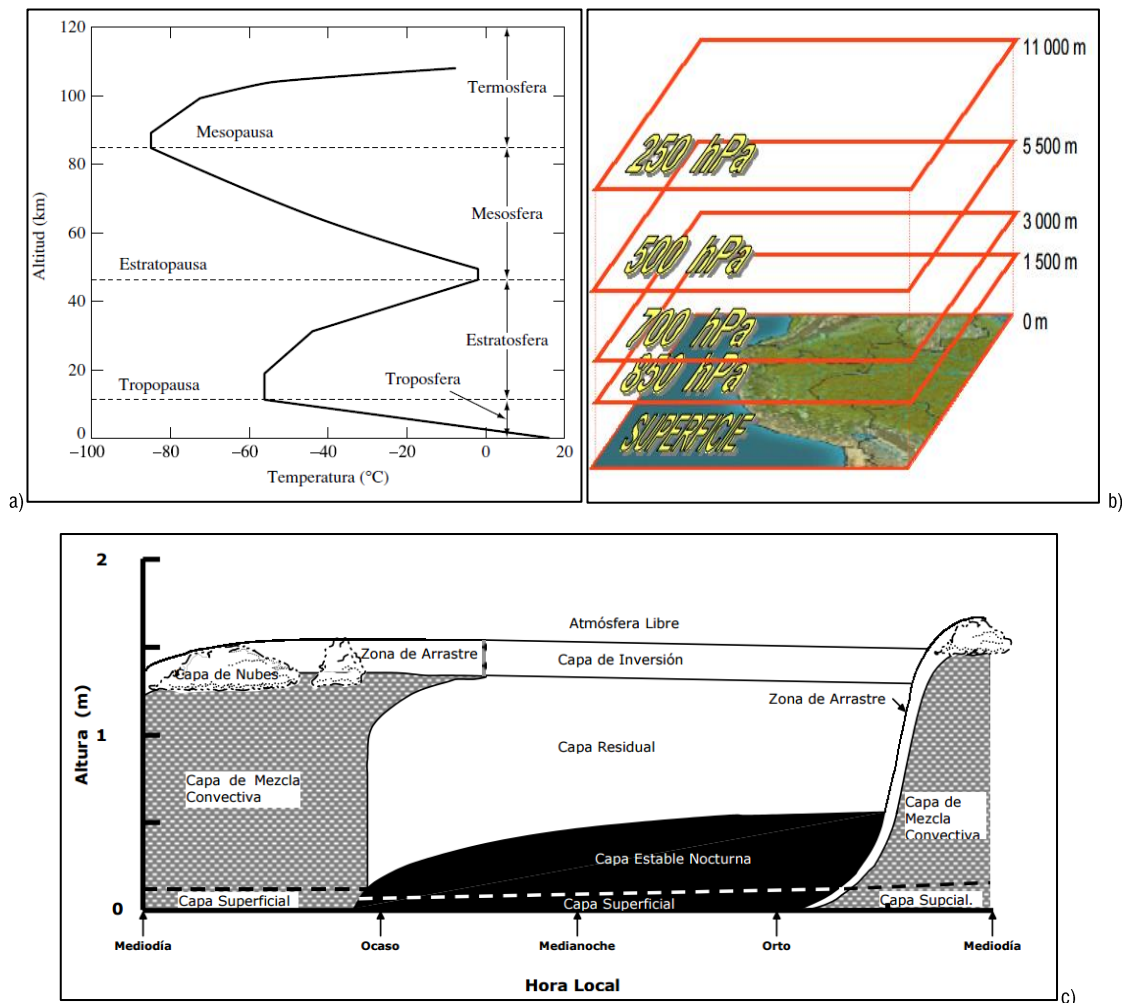


Figura 1.- a) Perfil de la temperatura [°C] respecto a la altitud [km], en una atmósfera estándar. Fuente: Introducción a la ingeniería medioambiental (Masters et al. ,2008). b) Troposfera baja, de 850 Mb (hPa) (entre 1000 y 1600 m.), los sistemas son prácticamente idénticos a los de superficie, la diferencia es que el viento es paralelo a las isohipsas, imagen tomada de (NIMBUS, 2001).c) Componentes principales de la Capa Límite Planetaria (CLP) imagen tomada de (Buenestado, 2003).

2.1.1.2 Meteorología

La meteorología es la ciencia que estudia la atmósfera, comprende del estudio del estado del tiempo y se ocupa del estudio físico, dinámico y químico de la atmósfera terrestre. Incluye el estudio de las variaciones diarias de las condiciones atmosféricas (meteorología sinóptica), el estudio de las propiedades eléctricas y ópticas de la atmósfera (meteorología física), la variación de los elementos meteorológicos cerca de la tierra en un área pequeña (micrometeorología) y otros muchos fenómenos.

Las variables meteorológicas más importantes para describir la dinámica de la atmósfera son: temperatura, presión atmosférica, viento (dirección y velocidad), radiación solar, humedad, precipitación y CLP, aunque cuando se refiere a contaminación atmosférica Wark & Warner (1994) consideran que las variables que más influyen en la calidad del aire de una zona, son el transporte convectivo horizontal, que depende de las velocidades y direcciones del viento y el transporte convectivo vertical, que depende de la estabilidad atmosférica y del fenómeno de la inversión térmica de las capas de la atmósfera.

Tener conocimiento general de estas variables ayuda a entender el comportamiento de los contaminantes atmosféricos que se emiten y se transportan en una zona de estudio. La información de las variables meteorológicas resulta necesaria para el análisis de la calidad del aire. La concentración de contaminantes en la atmósfera depende de un gran número de campos de la meteorología que ocurren en diferentes escalas, espaciales y temporales, en el cual todo está vinculado (Palau JL, 2005).

Resulta sustancial señalar que la meteorología es también moldeada por particularidades de la zona de estudio: características físicas, tales como la topografía (cuencas, elevaciones, etc.); biológicas, un ejemplo de ello es el tipo de ecosistema alrededor de la zona de estudio, ya que este influye directamente en la meteorología local; y abióticas como la presencia de un cuerpo de agua. En cualquier lugar, estas singularidades juegan un papel muy importante en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos.

Los fenómenos meteorológicos observados en un lugar determinado se generan por la particularidad regional, de la interacción de la circulación de la atmósfera en la escala planetaria y diversos sistemas de escala sinóptica, mesoescala y microescala (Hidalgo, 2012) (ver figura

2). Con base en la clasificación de Orlansky (1975), y utilizando la figura 2, a continuación en la tabla 2 se describe la clasificación de los fenómenos meteorológicos con rangos espaciales y temporales en diferentes escalas.

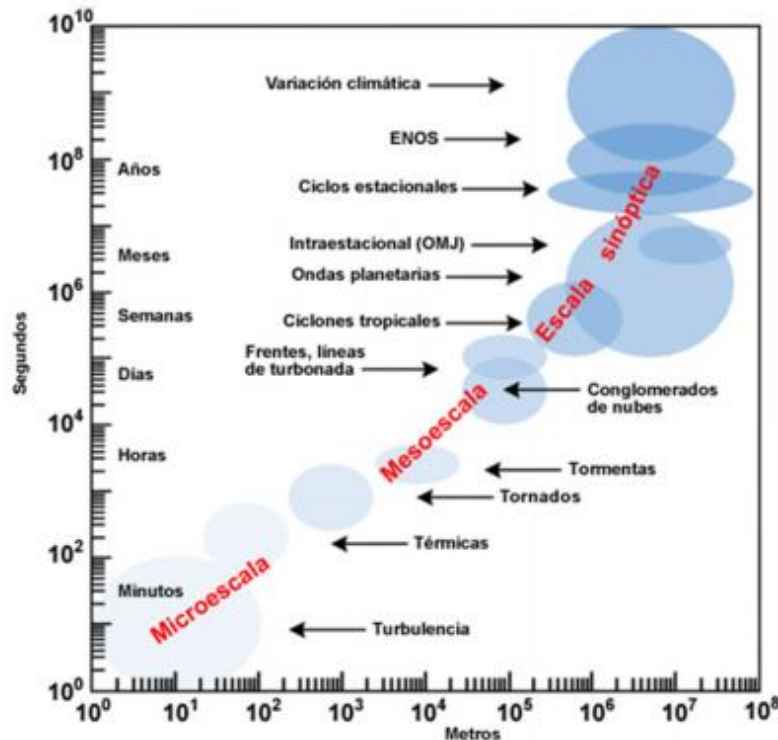


Figura 2.- Escala planetaria y diversos sistemas de macroescala, escala sinóptica, mesoescala y microescala de acuerdo al tiempo[s] y su distribución espacial [m]. Fuente: (Laing & Evans, 2011), tomada de (Hidalgo, 2012).

Tabla 2.- Clasificación escala espacial y temporal de los fenómenos meteorológicos (Orlanski, 1975) tomada de (Hidalgo, 2012).

| ESCALAS | COBERTURA ESPACIAL | COBERTURA TEMPORAL |
|-------------|--------------------------|--------------------|
| Planetaria | más de 8.000 kilómetros | semanas a meses |
| Sinóptica | 2.000 a 8.000 kilómetros | días a semanas |
| Mesoescala | 2 a 2.000 kilómetros | minutos a horas |
| Microescala | 0 a 2 kilómetros | segundos a minutos |

Tener en cuenta las escalas de los fenómenos meteorológicos que influyen a un lugar, nos permite conocer cuál de estas contribuye al transporte y distribución de los contaminantes atmosféricos. Un ejemplo de lo anterior, es determinar la variable meteorológica altura

geopotencial¹, tal como se presenta en la figura 3, en esta se observa que en la parte del Golfo de México existen sistemas de alta presión, esto quiere decir que la meteorología que influye corresponde a una escala meso o mayor, mientras que en la parte central del territorio de México, la meteorología local es la que predomina.

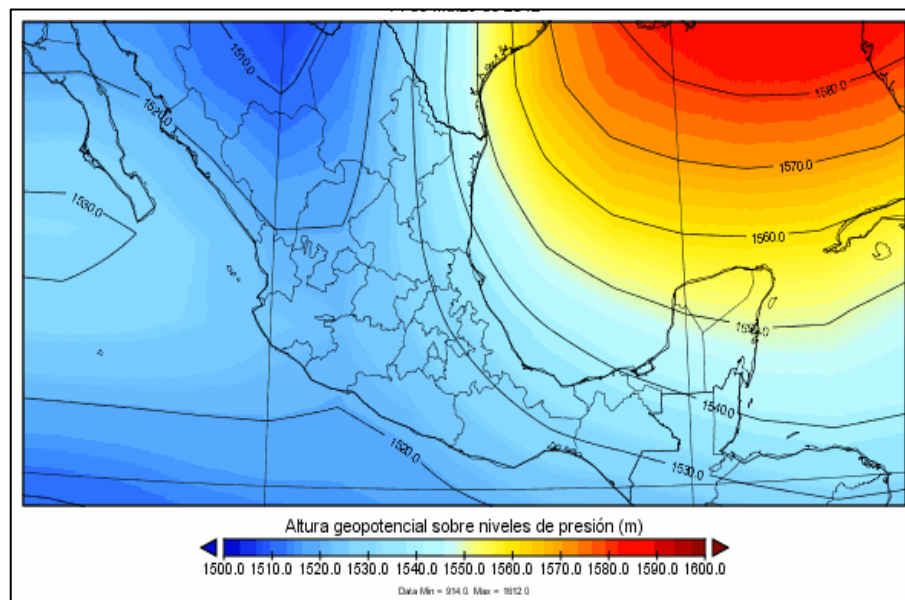


Figura 3.- Mapa de promedio diario de altura geopotencial a 850 [hPa] para el 14 de marzo de 2012. Se observa que en la parte del Golfo de México existen sistemas de alta presión, esto quiere decir que la meteorología que influye corresponde a una escala meso o mayor, mientras que en la parte central del territorio de México, la meteorología local es la que predomina. Fuente: elaboración propia con base de datos NOAA.

2.1.2 Contaminación atmosférica

2.1.2.1 Introducción

Una buena calidad del aire se puede definir como: el conjunto de concentraciones de componentes presentes en la atmósfera en un periodo de tiempo dado, que no causan daño a la salud, el bienestar de la población, el equilibrio ecológico, y los materiales con valor económico (PROAIRE, 2012).

¹ Es la distancia vertical desde el nivel del mar hasta un punto dado de presión atmosférica.

Mientras que a contaminación del aire puede ser definida como la situación en que la concentración de sustancias presentes en la atmosfera son lo suficientemente altas sobre los niveles normales en el ambiente y estos producen efectos nocivos en los seres humanos, animales, vegetación, o materiales (Seinfeld & Pandis, 2006). La calidad del aire depende de las emisiones naturales y antropogénicas, y de las características topográficas del área de estudio (Baldasano, Cremades, & Soriano, 1994). A lo largo de la historia de la humanidad han existido eventos de gran impacto de contaminación atmosférica, estos sucesos fueron parte importante para la elaboración e implementación de políticas a zonas urbanas para controlar la calidad del aire, principalmente en beneficio a la salud humana, tal como se muestra en la tabla 3 se presentan algunos de ellos.

Cada zona urbana, de acuerdo a sus emisiones, características físicas en su entorno y su meteorología tendrá una calidad del aire distinta a las demás, sin embargo, la contaminación atmosférica en muchas ciudades es causada por las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y varios compuestos orgánicos volátiles (Masters et al. ,2008). En la tabla 3 se describen algunos eventos de contaminación atmosférica que motivaron a realizar políticas para mejorar los niveles de calidad del aire de un sitio.

Tabla 3.- Eventos de contaminación atmosférica que motivaron a la investigación y aplicación de regulaciones para controlar la calidad del aire en zonas urbanas en el Reino Unido (1307,1952) y en los Estados Unidos de América (1948).

| Lugar y fecha | Descripción del evento | Tipo de contaminación |
|----------------------|---|---|
| Londres, 1307 | En la Edad Media, hay referencias que muestran que el humo procedente de la quema de carbón fue considerado un problema tan serio, que el Rey Edward prohibió su uso en los hornos de cal de Londres. | Altas concentraciones de óxido de azufre y partículas en suspensión por la combustión de combustibles fósiles |
| E.U.A, 1948 | Ocurrió durante un periodo de 4 días en 1948, en Donora, Pensilvania, cuando 20 muertes y al menos 6.000 enfermedades fueron atribuidas a la contaminación del aire. Al tiempo, Donora tenía una población de sólo 14.000 personas, haciendo de éste el índice de mortalidad per cápita más alto registrado para un episodio de contaminación | Altas concentraciones de óxido de azufre y partículas en suspensión por la combustión de combustibles fósiles |
| Londres, 1952 | Una semana de intensa niebla y humo tuvo como resultado más de 4.000 muertes, que fueron directamente atribuidas a la contaminación. | Altas concentraciones de óxido de azufre y partículas en suspensión por la combustión de combustibles fósiles |

Fuente: Introducción a la ingeniería mediambiental (Masters et al. ,2008)

En particular a continuación se describen los principales contaminantes del aire y en la salud humana.

2.1.2.2 Contaminantes criterio y efectos en la salud humana

La OMS dentro de sus directrices propone medir la concentración de los contaminantes atmosféricos para evaluar la calidad del aire tales como: partículas (PM), ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2).

En México la Secretaría de Salud, la SEMARNAT en conjunto con las dependencias estatales, se coordinan para evaluar la calidad del aire de ciudades y zonas metropolitanas, midiendo las concentraciones de los contaminantes atmosféricos antes mencionados y además incluyendo el monóxido de carbono (CO) y el plomo (Pb), mejor conocidos como contaminantes criterio. A continuación, según la OMS (2014) y el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT, 2015), se describen las características generales de los contaminantes criterio:

a) Partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$)

También conocidas como material particulado, estas son emitidas de manera natural o por las actividades humanas, también se pueden formar en la atmósfera a partir de reacciones químicas. Las partículas suspendidas representan un problema de salud pública, ya que sus efectos dependen de la concentración, composición química y tamaño. El riesgo es mayor a medida que se reduce el tamaño de la partícula, y el incremento en la concentración está relacionado con enfermedades respiratorias, cardiovasculares y un incremento en el riesgo de mortalidad.

b) Ozono troposférico (O_3)

El ozono troposférico, es el contaminante atmosférico más común en las zonas urbanas de gran tamaño, este se encuentra a nivel de superficie, se produce cuando los óxidos de

nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) reaccionan en la atmósfera en presencia de luz solar.

En altas concentraciones puede poner en riesgo la salud humana y la vegetación. El ozono es un fuerte oxidante que en altas concentraciones produce irritación en los ojos y en las vías respiratorias, disminuyendo la función respiratoria. Existe una relación directa entre la exposición crónica al contaminante y el aumento en los casos de morbilidad y mortalidad.

c) Dióxido de nitrógeno (NO_2)

Las principales fuentes de emisiones antropogénicas de NO_2 son los procesos de combustión (calefacción, generación de electricidad y motores de vehículos y barcos). Estudios epidemiológicos han revelado que los síntomas de bronquitis en niños asmáticos aumentan en relación con la exposición prolongada a la disminución del desarrollo de la función pulmonar también se asocia con las concentraciones de NO_2 registradas (u observadas) actualmente en ciudades europeas y norteamericanas.

d) Dióxido de azufre (SO_2)

El SO_2 es un gas incoloro con un olor penetrante que se genera de manera natural o por las actividades antropogénicas. La principal fuente de emisión de SO_2 es causado por la quema de combustibles fósiles que contienen azufre, estos son usados para: la calefacción doméstica, la generación de electricidad y los vehículos a motor. El dióxido de azufre es un gas irritante y tóxico; los efectos en la salud van desde irritación en las vías respiratorias hasta la agudización de síntomas de enfermedades respiratorias o cardiovasculares existentes.

e) Monóxido de carbono (CO)

Los autos son la fuente más importante de monóxido de carbono. En altas concentraciones el monóxido de carbono puede provocar intoxicación, puede inhabilitar el transporte de oxígeno hacia las células y provocar mareos, dolor de cabeza, náuseas, estados de inconsciencia e inclusive la muerte.

f) Plomo (Pb)

El plomo se emite en forma de partículas durante actividades industriales como la explotación minera, metalurgia, refinación de metales, fabricación de pintura y soldadura. El plomo es una potente neurotoxina que se acumula gradualmente en algunos tejidos del cuerpo humano, su exposición puede generar diversos daños en riñones, sistema hepático, sistema gastrointestinal y sistema óseo. Los niños son particularmente vulnerables al plomo, ya que puede dañar su desarrollo neurológico. El daño dependerá de la dosis, tiempo de exposición y estado de salud en que encuentra la persona expuesta.

2.1.2.3 Tipos de emisiones de contaminantes atmosféricos

La contaminación del aire en zonas urbanas proviene de una mezcla de miles de fuentes de emisión que van desde chimeneas industriales y vehículos automotores, hasta el uso de productos de limpieza y pinturas domésticos e incluso de forma natural como los volcanes (INE, 2005). De manera que resulta importante para evaluar la calidad del aire en una zona metropolitana, identificar las fuentes de contaminación atmosférica, teniendo como primera obligación, categorizar sus fuentes. De acuerdo con INE-SEMARNAT (2005) existen cuatro categorías principales de fuentes de emisión:

a) Fuentes puntuales o fijas

Esta categoría se refiere a sectores industriales tal como el químico, petrolero y petroquímico, automotriz, celulosa y papel, acero y hierro, vidrio, generación de energía eléctrica, asbestos; cemento y cal, así como tratamiento de aguas residuales.

b) Fuentes de área

Las fuentes de área representan aquellas que son demasiado numerosas y dispersas como para poder ser incluidas de manera eficiente en un inventario de fuentes puntuales, tales como: combustión en fuentes fijas, uso de solventes; almacenamiento y transporte de

derivados de petróleo, fuentes industriales, fuentes agrícolas, manejo de residuos, entre otras fuentes. Dentro de esta categoría entran empresas como gasolineras, restaurantes, almacenes u otras con actividades que involucren emisiones de contaminantes atmosféricos.

c) Fuentes móviles (de vehículos automotores)

Las fuentes móviles de emisión están constituidas por los vehículos automotores que incluyen automóviles, camiones y autobuses diseñados para circular en la vía pública. En la mayoría de las áreas urbanas, los vehículos automotores son los principales generadores de las emisiones de CO, NO_x, SO_x, PM, contaminantes tóxicos del aire y contaminantes que reducen la visibilidad.

d) Fuentes naturales

Además de las actividades humanas, los fenómenos naturales y la vida animal y vegetal pueden jugar un papel importante en el problema de la contaminación del aire. Es primordial comprender la contribución general de este tipo de fuentes, especialmente en las áreas en las que las emisiones de fuentes naturales pueden ser significativas para elaborar el inventario de emisiones. Emisiones de contaminantes atmosféricos por erupciones volcánicas.

2.1.3 Monitoreo de la calidad del aire

En las últimas décadas se ha desarrollado una preocupación creciente por los efectos de la contaminación del aire en la salud humana y el ambiente. La fuerte presión social junto con una legislación más rigurosa, requieren de información imparcial y confiable sobre la calidad del aire (Molina & Molina, 2004). De aquí la necesidad de contar con un sistema monitoreo de contaminantes atmosféricos en las zonas urbanas, este sirve de herramienta para la identificación y evaluación de problemas de la calidad del aire (WHO, 2000). El monitoreo atmosférico proporciona información acerca del estado que guarda el recurso aire en nuestras ciudades y, por lo tanto, constituye una herramienta indispensable en el desarrollo de los

Programas de Gestión de la Calidad del Aire que aplican las autoridades ambientales y demás sectores involucrados (PROAIRE, 2012).

Según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), denomina red de monitoreo al conjunto de dos o más estaciones de monitoreo. Es común que las estaciones de monitoreo se encuentren agrupadas en redes que puedan cubrir grandes extensiones geográficas. El monitoreo, junto con los modelos de predicción y los inventarios de emisiones, son parte integral de la gestión de la calidad del aire. La importancia del propósito del monitoreo de la calidad del aire es generar y proporcionar la información necesaria a científicos, legisladores y planificadores para que ellos tomen las decisiones adecuadas a favor de la gestión y mejora del medio ambiente (INE, 2010).

El Gobierno Federal es el responsable de establecer los estándares para la protección de la salud pública y vigilar su cumplimiento. Estos estándares se encuentran publicados en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y son de observación obligatoria en todo el país. Las NOM describen los límites permisibles para los contaminantes criterio. Estas normas están condicionadas a una revisión periódica para reflejar la información reciente sobre los efectos en la salud y la gestión de la calidad del aire (SIMAT, 2015).

De acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA *por sus siglas en inglés*) (EPA, 2013), la localización del sitio de monitoreo depende inicialmente en el objetivo de monitoreo. Una vez que se sabe que existe la necesidad de monitorear algún contaminante, de acuerdo a un apropiado análisis, se puede reducir el número sitios de monitoreo para áreas específicas. Por lo tanto, la primera tarea al evaluar una posible ubicación sitio, es determinar la escala, tomando los siguientes criterios: ubicación de fuentes de emisión, meteorología (como dirección del viento en la zona), uso de suelo y densidad de la población.

2.1.3.1 Escalas de monitoreo

La escala del monitoreo de la calidad del aire debe ser compatible con el objetivo del monitoreo en un lugar, a una escala espacial apropiada y representativa, para así facilitar la localización física de las estaciones de monitoreo. La escala de representatividad espacial

relativa a cada contaminante se define para establecer la relación entre los objetivos de monitoreo y localización física de la estación de monitoreo.

De acuerdo a la EPA se aplican seis escalas de representatividad espacial para ubicar los sistemas de monitoreo, donde cada escala espacial se diseña para cumplir con los objetivos específicos de monitoreo (USEPA, 1994) :

- *Microescala*: define las concentraciones en volúmenes de aire asociados con dimensiones de área de algunos metros hasta 100 metros.
- *Escala media*: define concentraciones típicas de áreas que pueden comprender dimensiones desde 100 metros hasta 0.5 kilómetros.
- *Escala local*: define concentraciones en un área con uso de suelo relativamente uniforme, cuyas dimensiones abarcan de 0.5 a 4.0 kilómetros.
- *Escala urbana*: define todas las condiciones de una ciudad con dimensiones en un rango de 4 a 50 kilómetros.
- *Escala regional*: Define generalmente un área rural de geografía razonablemente homogénea y se extiende desde decenas hasta cientos de kilómetros.
- *Escala nacional o global*: las mediciones que corresponden a esta escala representan concentraciones características de la nación o del mundo como un todo.

2.1.4 Marco Jurídico

Según el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española (2015), contaminar proviene del latín *contaminare* y lo define como alterar nocivamente la pureza o las condiciones normales de una cosa o un medio por agentes químicos o físicos. Conforme a lo anterior podemos mencionar que prácticamente toda la actividad antropogénica contamina, no obstante, desde el punto de vista de la legislación debe de existir un criterio para determinar si el aire está o no contaminado y en qué proporción. En México se tiene como marco jurídico lo siguiente:

- CONSTITUCIÓN POLÍTICA art. 4. ...Toda persona tiene derecho a la protección de la salud... Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar...
- LGEEPA art 111, fracc. VII.... Expedir las normas oficiales mexicanas para el establecimiento y operación de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire.
- LGEEPA art. 112, fracc. VI....los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios establecerán y operarán, con el apoyo técnico, en su caso, de la Secretaría, sistemas de monitoreo de la calidad del aire. ...los gobiernos locales remitirán a la Secretaría los reportes de monitoreo atmosférico, a fin de que aquélla los integre al Sistema Nacional de Información Ambiental.
- Reglamento de la Ley general del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera. Nuevo Reglamento publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de noviembre de 1988. TEXTO VIGENTE Última reforma publicada DOF 31-10-2014.

Este marco jurídico, pone las bases para la creación e implementación de leyes y normas en materia ambiental y por supuesto en tema de calidad del aire. En el monitoreo de la calidad del aire se emplean dos tipos de normas: las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental, que establecen los límites permisibles para los contaminantes criterio, y las NOM técnicas que definen los métodos de medición de los contaminantes criterio.

Las NOM técnicas definen los métodos de medición que deben seguirse para el monitoreo de los contaminantes criterio; estos métodos de medición, pueden ser de referencia o equivalentes (SIMAT, 2016). En la tabla 4 se presentan las NOM's en materia de salud (límites máximos permisibles) y las NOM técnicas vigentes (métodos de medición).

Tabla 4.- Límites Máximos Permisibles (LMP) de concentración de contaminantes atmosféricos en el aire y su método de medición, esto de acuerdo a la normativa de México.

| Contaminante | Límite máximo permisible | | Método de medición | |
|---|--------------------------|---|--|---|
| | NOM | Descripción | NOM | Método |
| Dióxido de azufre (SO ₂) | NOM-022-SSA1-2010 | <ul style="list-style-type: none"> 0.110 ppm, máximo promedio de 24 horas 0.200 ppm, segundo máximo anual como promedio móvil de 8 horas 0.025 ppm, promedio anual | NOM-038 SEMARNAT-1993 | Método equivalente: fluorescencia ultravioleta |
| Monóxido de carbono (CO) | NOM-021-SSA1-1993 | <ul style="list-style-type: none"> 11.0 ppm, máximo anual como promedio móvil de 8 horas | NOM-034-SEMARNAT-1993 | Método de referencia: absorción en el infrarrojo |
| Dióxido de nitrógeno (NO ₂) | NOM-023-SSA1-1993 | <ul style="list-style-type: none"> 0.210 ppm, promedio horario | NOM-037-SEMARNAT-1993 | Método equivalente: fluorescencia ultravioleta |
| Ozono (O ₃) | NOM-020-SSA1-2014 | <ul style="list-style-type: none"> 0.095 ppm, promedio horario 0.070 ppm, máximo anual del promedio móvil de 8 horas | NOM-036-SEMARNAT-1993 | Método de referencia: quimioluminiscencia en fase gaseosa |
| Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀) | NOM-025-SSA1-2014 | <ul style="list-style-type: none"> 75 µg/m³, promedio 24 horas 40 µg/m³, promedio anual | Se considera el método equivalente que recomienda la US EPA. | Gravimetría o atenuación de radiación beta |
| Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5}) | NOM-025-SSA1-2014 | <ul style="list-style-type: none"> 45 µg/m³, promedio 24 horas 12 µg/m³, promedio anual | | |
| Plomo (Pb) | NOM-026-SSA1-1993 | <ul style="list-style-type: none"> 1.5 µg/m³, en un periodo de tres meses como promedio aritmético | No se cuenta con una NOM de métodos de medición. | |

Además de las normas anteriormente mencionadas, en la actualidad existen dos normas adicionales, una que establece los requisitos para la elaboración del índice de calidad del aire publicada en 2006 por el Gobierno del Distrito Federal y la otra que regula el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire publicada en 2012 por el Gobierno Federal.

A continuación se mencionan dos normas referidas al monitoreo, la primera aplicada a la Ciudad de México y la segunda con jurisprudencia nacional.

2.1.4.1 Normativa de monitoreo de la calidad del aire

ADF-009-AIRE-2006 29 de noviembre de 2006 Establece los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire.

NOM-156-SEMARNAT-2012 16 de julio de 2012 Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Esta norma rige en todo el territorio nacional y es de observancia obligatoria para los gobiernos locales, según corresponda, en aquellas zonas o centros de población que cuenten con alguna de las condiciones siguientes:

1ª condición: Asentamientos humanos con más de quinientos mil habitantes;

2ª condición: Zonas metropolitanas;

3ª condición: Asentamientos humanos con emisiones superiores a veinte mil toneladas anuales de contaminantes criterio primarios a la atmósfera;

4ª condición: Conurbaciones; y

5ª condición: Actividad industrial que por sus características se requiera del establecimiento de estaciones de monitoreo de calidad del aire y/o de muestreo de contaminantes atmosféricos.

Según INEGI (2010) en la República Mexicana existen 36 localidades con más de 500 mil habitantes en México y 59 Zonas Metropolitanas, de las cuales no todas tienen un sistema de monitoreo atmosférico. En tema de calidad del aire en México, es un área donde aún como país falta mucho por hacer, sistemas como el de la ZMVM deberían de ser implementados en otras zonas ajustándose a las características de la población y al presupuesto de los gobiernos estatales, esto para que el Sistema Nacional de la Calidad del Aire (SINAICA) funcione de una manera adecuada y pertinente. Así como la población, el gobierno, los centros educativos y la iniciativa privada deberían de trabajar de manera integral para obtener buenos resultados en todo el sistema de gestión de la calidad del aire.

2.2 Sistemas de modelización de la calidad del aire

Un sistema de modelización de la calidad del aire tiene integrado un modelo de meteorología. Cualquier modelo meteorológico es un intento de simular los múltiples procesos que determinan el clima. Los modelos climáticos deben ser desarrollados a partir de principios fundamentales, utilizando leyes de la física tales como la conservación de masa, momento y energía. La implementación de los modelos puede ser lenta y costosa, incluso usando las computadoras más rápidas, y los resultados que se obtienen solo constituyen aproximaciones a la realidad (Cipagauta, 2014).

El estudio de la contaminación del aire puede ser tomado desde diferentes perspectivas. Históricamente, las mediciones de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos han sido ampliamente utilizadas para monitorear la calidad del aire (Valverde, 2016). La información que proporcionan los modelos de la calidad del aire es un complemento al monitoreo y caracterización de la contaminación del aire (Baldasano & Millán, 2000). Los modelos matemáticos de la calidad del aire son una herramienta de gran utilidad en la planeación y gestión de la política ambiental (INECC, 2014).

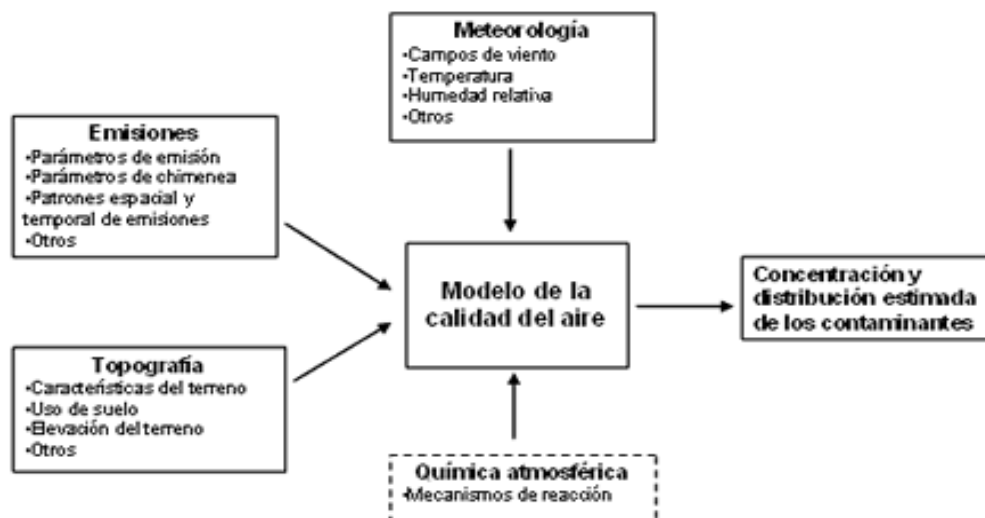


Figura 4.- Insumos de los sistemas de modelización que se necesitan para calcular la concentración y distribución estimada de los contaminantes atmosféricos, imagen tomada de (INE, 2006)

Los Modelos de la Calidad del Aire (MCA) son un sistema de códigos computarizado que representan a los procesos dinámicos, físicos, químicos y radiactivos en la atmosfera, proporcionando la concentración de contaminantes atmosféricos de manera que constituyen una herramienta útil para entender el transporte y emisión de los contaminantes atmosféricos desde su fuentes, reacciones químicas, transformaciones físicas y deposito (Jacobson, 2006). En la figura 4 se muestra los insumos, que la mayor parte de los sistemas de modelización de la calidad del aire necesitan, para calcular la concentración y distribución de los contaminantes atmosféricos.

Los modelos matemáticos utilizan ecuaciones basadas en leyes fundamentales que representan la dinámica de la atmósfera: transferencia radiactiva, momentum, energía, continuidad para aire y agua (en las tres fases), difusión, continuidad de especies químicas (Seinfeld et al. 2009).

Una ecuación general que describe los procesos de transporte y transformación de una sustancia en un sistema, es la ecuación de advección y difusión. Esta ecuación que describe la variación de la concentración de una sustancia (en este caso un contaminante atmosférico) respecto al tiempo (ver ecuación 1), tomando en cuenta el transporte advectivo y difusivo de los compuestos simulados.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\nabla^2 c - v \cdot \nabla c \quad (1)$$

donde:

c = concentración de la sustancia

D = constante de difusión molecular de la sustancia

v = velocidad

2.2.1 Clasificación de modelos

Los modelos de la calidad del aire se pueden clasificar de acuerdo a diferentes criterios, por ejemplo: se toma en cuenta la escala espacial, el objetivo del modelo o el planeamiento de la ecuación con la que trabaja el sistema de modelización atmosférica. A continuación se mencionan brevemente algunas de estas clasificaciones.

2.2.1.1 Clasificación EPA

Según la EPA (2015) los MCA se clasifican como:

- *Modelos de dispersión*, estos modelos usualmente son utilizados en procesos para estimar la concentración específica de contaminantes atmosféricos a nivel de suelo y fuentes de emisión.
- *Fotoquímicos*, son utilizados en para estimar la concentración de contaminantes atmosféricos y depósito para sustancias reactivas sobre grandes escalas espaciales.
- *Receptores*, son modelos que utilizan técnicas observacionales usando características física y químicas de los gases y partículas medidas en la fuente y receptos para identificar la presencia y cantidad de concentración de contribución de la fuente al receptor.

2.2.1.2 Clasificación por su planteamiento

De acuerdo a su planteamiento de ecuaciones, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en sus herramientas de análisis, distingue lo siguiente (INECC, 2014):

- Eulerianos (que usan un sistema de coordenadas fijo con respecto a la tierra) y
- Lagrangianos (que usan un sistema de coordenadas que sigue el movimiento de la atmósfera).

2.2.1.2 Clasificación por su escala espacial

El Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) es un organismo público español de investigación de excelencia en materias de energía y de medio ambiente, así como en múltiples tecnologías de vanguardia y en algunas áreas de investigación básica adscrito a la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Economía y Competitividad de España (2015), en su Web Ibérica sobre modelización de la contaminación atmosférica hacen una clasificación según su escala espacial (ver tabla 8).

Tabla 5.- Clasificación de modelos de acuerdo a su escala espacial y temporal (CIEMAT, 2015)

| Tipo | Escala espacial | Escala temporal | Características | Aplicación |
|--|--|---------------------------|--|---|
| Modelos 'street canyon' | < 1 Km con resolución de pocos metros | Resolución de segundos | Tratan de forma explícita el efecto de los edificios sobre flujos de aire y dispersión | Estimar las concentraciones de contaminantes a nivel de calle. |
| Modelos Urbanos | Resolución espacial de alrededor de 100 m y dominio habitual es de unos pocos Km | Resolución de minutos | Efecto de los edificios suele considerarse mediante parametrizaciones, | Estimar evolución de la contaminación en una ciudad entera. |
| Modelos de escala local | Unos 20-40 Km con resolución de unos 100 metros | Resolución de minutos | Posibilidad de tratar chimeneas individuales y fuentes de áreas urbanas | Zonas industriales y urbanas o grandes industrias individuales |
| Modelos de escala regional o mesoescala. | 20 y 500 km en horizontal, y de 5 a 10 km en altura Resolución de 0.5-5 km | Resolución minutos-1 hora | Simular fenómenos de rango espacial intermedio, tales como circulaciones de brisas, grandes valles, influencias topográficas. | Problemas de calidad del aire referidos al ozono |
| Modelos de escala sinóptica o nacional (continental). | 500 Km en horizontal y 10 o 20 Km en vertical resolución de 20-80 km. | Resolución pocas horas. | Fenómenos meteorológicos de gran escala y los efectos de depósito y transformación de contaminantes que producen lluvia acida. | Transporte de contaminantes a largas distancias. |
| Modelos globales. | Hemisférica o planetaria t resolución de 5° x 5° | Resolución pocas horas | Simulan el transporte de contaminante en toda la atmósfera terrestre | Gases de efecto invernadero y transporte de contaminantes a larga distancia |

2.2.2 Sistema de Modelización tipo Euleriano

De acuerdo al INECC (2014), los modelos eulerianos representan la clase más sofisticada de modelos atmosféricos. En ellos las ecuaciones que describen el movimiento y la transformación química de los contaminantes en la atmósfera se resuelven considerando un sistema fijo de coordenadas y la región a modelar se puede dividir en celdas o cajas, tanto horizontal como verticalmente.

Recomendaciones para la aplicación de este modelo según INECC: que la zona de estudio cuente con patrones complejos de emisión y de transformaciones químicas, cuando se tenga información suficiente de calidad del aire, emisiones y meteorología. Es recomendable usarlos a escalas del tipo urbano y regional. Algunos ejemplos de modelos eulerianos son:

- Urban Airshed Model - UAM
- Multiscale Climate Chemistry Model - MCCM
- Comprehensive Air Quality Model with Extensions – CAMx
- Third Generation Air Pollution Modeling System – CMAQ

2.2.3 Sistema de Modelización tipo Lagrangiano

En cuanto a los modelos Lagrangianos, éstos se caracterizan por hacer uso de un sistema de referencia que se ajusta al movimiento atmosférico. Estos modelos se pueden clasificar como modelos de trayectoria y modelos gaussianos, de acuerdo con la geometría del sistema de modelación (INECC, 2014).

En los modelos de trayectoria se define una columna hipotética de aire que se desplaza bajo la influencia de los vientos dominantes y se asume que no hay intercambio de masa entre la columna y sus alrededores, excepto por las emisiones que ingresan a la columna por la base durante su recorrido (Seinfeld y Pandis, 2006). Algunos ejemplos de modelos Lagrangianos del tipo de trayectoria son los siguientes:

- California Institute of Technology Model - CIT, versión de trayectoria
- Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model – HYSPLIT
- Advanced Statistical Trajectory Regional Air Pollution Model –ASTRAP

2.2.4 Sistema de Modelización tipo Gaussiano

En contraste, en los modelos gaussianos se describe el transporte y mezcla de los contaminantes asumiendo que la distribución de las concentraciones se presentan, en dirección horizontal y vertical, un comportamiento normal o de curva gaussiana.

Las aplicaciones más comunes de los modelos gaussianos son para evaluar la dispersión de contaminantes provenientes de fuentes puntuales, aunque en ocasiones también se aplican para simular emisiones de fuentes de área y de línea. Algunos de los ejemplos de modelos gaussianos son:

- Industrial Source Complex –ISC
- AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD
- The Calpuff Modeling System
- Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets -CALINE3
- Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations – CTDMPPLUS

Cada Sistema de modelización de la calidad del aire está diseñado con diferentes propósitos, de aquí la importancia de seleccionar un modelo adecuado para el problema que se requiera resolver, otros factores involucrados son: los requisitos computacionales, el costo del programa y la validación de los datos que se generan.

3. Características de la zona de estudio

En este capítulo se divide en dos secciones, en la primera se presenta las características generales del estado de Puebla, tanto en lo físico y biótico. En la segunda sección aborda esencialmente el estado actual de la calidad del aire en la ciudad de Puebla.

3.1 Características del estado de Puebla

Es importante señalar que de acuerdo a la Comisión Nacional de Población de México (CONAPO), la Zona Metropolitana a la que pertenece la ciudad de Puebla es nombrada como Zona Metropolitana Puebla-Tlaxcala (CONAPO, 2010), las ciudades de Puebla y de Tlaxcala forman parte de esta. En este trabajo, dicha zona se está refiriendo como la Zona Metropolitana del Valle de Puebla. Como se vio en la justificación de este trabajo, debido a la distancia en la que se encuentran estas zonas, posiblemente, la contaminación que se genera en la ZMVM pudiera influenciar en los niveles de calidad del aire de la ZMVP. En la figura 5 se observa que la ZMVM con respecto a la ZMVP se encuentra al Oeste.

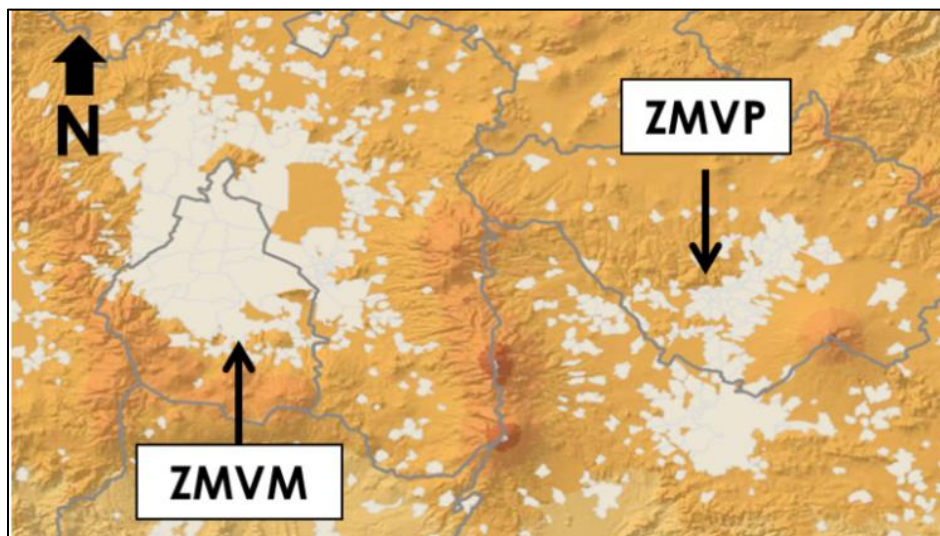


Figura 5.- Mapa representativo de la ZMVP y la ZMVM. Base de datos de topografía y uso de suelo tipo urbano de INEGI (2010), mapa digital.

El estado de Puebla, está constituido por 217 municipios. Su capital es Puebla de Zaragoza. Entre las poblaciones más importantes del estado figuran La Heroica Puebla de

Zaragoza, Tehuacán, Atlixco, Texmelucan de Labastida, Cholula de Rivadavia, Teziutlán, Libres, Huauchinango, Izúcar de Matamoros, Xicotepec de Juárez, Amozoc de Mota, Zacatlán, San Andrés Cholula (PROAIRE, 2012).

El estado de Puebla está localizado al sureste del Altiplano de la República, entre la Sierra Nevada y la Sierra Madre Oriental. Se ubica entre los paralelos 17°52' y 20°52' de latitud norte, y los meridianos 96°43' y 99°04' de longitud oeste. Colinda con los estados de Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Morelos, Estado de México, Tlaxcala e Hidalgo. La entidad tiene una superficie total de 33,919 km², que representa el 1.7% del territorio nacional; y posee una población de 5, 779,829 habitantes (INEGI, 2010).

La siguiente información fue tomada en su mayor porcentaje del Anuario Estadístico del estado de Puebla (2010) elaborado por INEGI, en los siguientes puntos: Clima en el estado de Puebla, topografía del estado de Puebla y actividades económicas. Mientras en las secciones de Flora y fauna y Uso de suelo, se extrajo la información de la Comisión Nacional de Biología (CONABIO, 2010), al igual que la base de datos para realizar los mapas.

3.1.1 Clima en el estado de Puebla.

Conforme al Anuario Estadístico del estado de Puebla (INEGI, 2010), el 35% de la superficie del estado presenta clima templado subhúmedo presente en la región central y sureste el 25% presenta clima cálido subhúmedo en la parte norte y sureste, el 19% presenta clima seco y semiseco hacia el sur y centro oeste, el 14% presenta clima cálido húmedo localiza en el norte y sureste, el 7% presenta clima templado húmedo en la región norte y una pequeña área hacia el sureste, también encontramos un pequeño porcentaje (0.2) de clima frío en la cumbre de los volcanes. En la figura 6 se observa que la mayor parte de la ciudad de Puebla, muestra un clima templado.

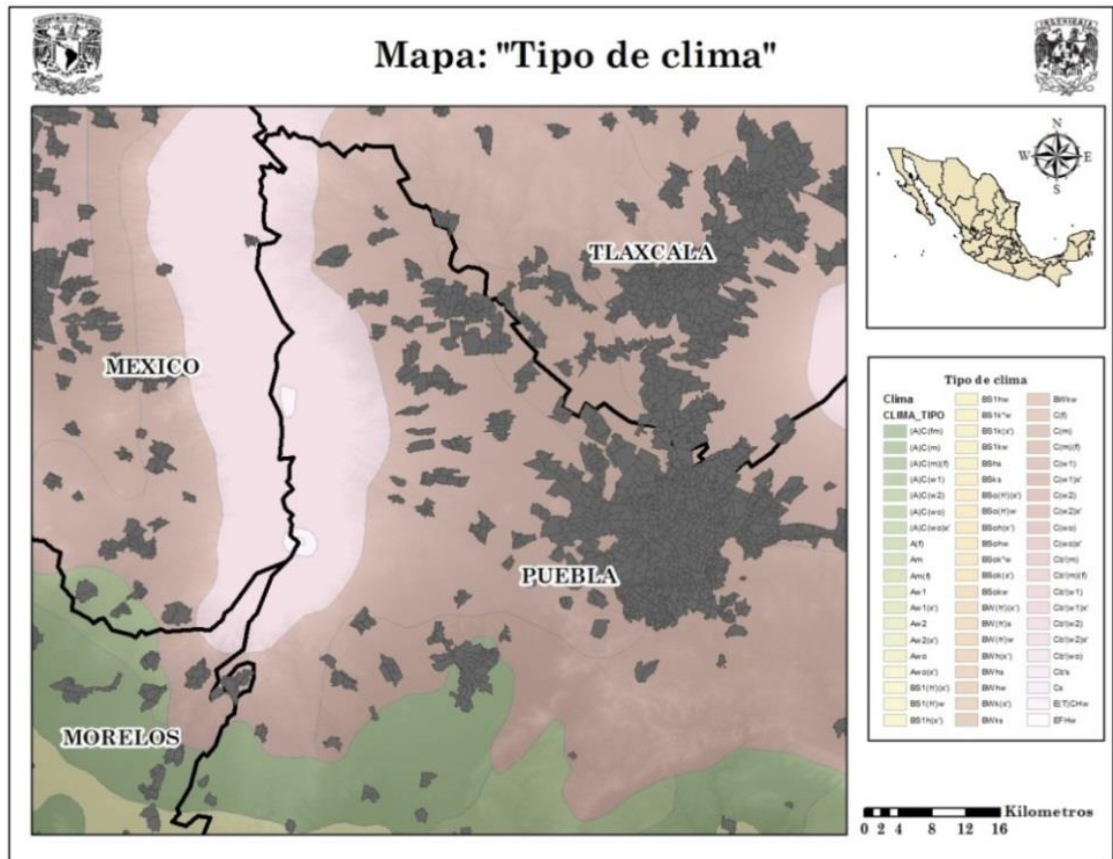


Figura 6.- Plano de climas, se observa que en la ciudad de Puebla se presenta un clima subhúmedo, al igual que en la ciudad de Tlaxcala y parte de la ZMVM. El 35 % de este clima está presente en el Estado de Puebla.

La temperatura media anual del estado es de 17.5°C, la temperatura máxima promedio es de 28.5°C y se presenta en los meses de abril y mayo, la temperatura mínima promedio es de 6.5°C durante el mes de enero. La temporada de lluvias son en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, la precipitación media estatal es de 1 270 mm anuales, las lluvias se presentan en verano en los meses de junio a octubre. Las áreas agrícolas en la entidad se encuentran principalmente en las regiones con clima templado subhúmedo, el maíz aún es el cultivo principal; también se produce cacahuate, papa, ajo y frijol, entre otros. Las frutas son: manzana, perón, aguacate, café y naranja.

Como se vio antes, las variables meteorológicas son importantes en el análisis de transporte de contaminantes atmosféricos, una de estas variables es conocer la velocidad y dirección de los vientos de la zona de estudio. De acuerdo al programa de gestión de la calidad

del aire de la ZMVP los vientos predominantes son del Norte (N), tal como se muestra en la figura 7.

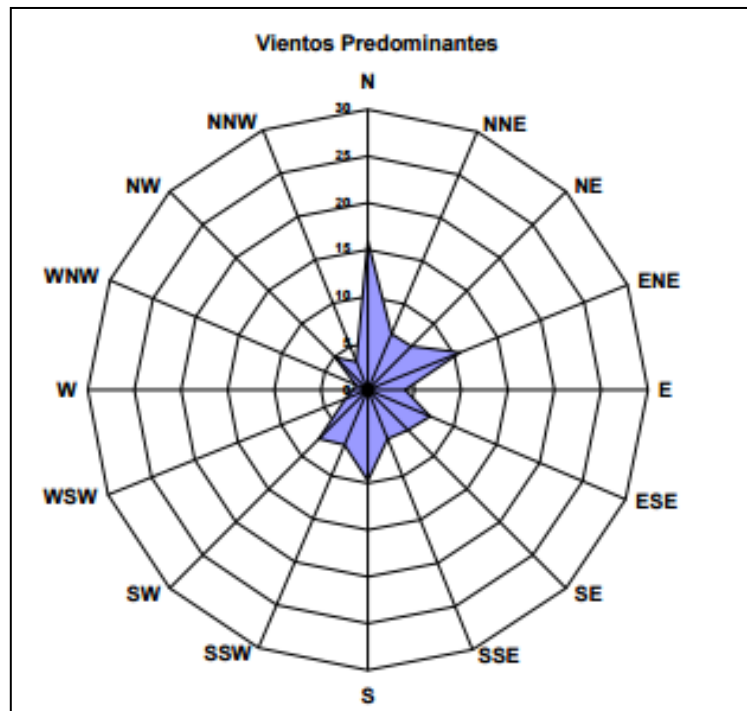


Figura 7.- Los vientos predominantes provienen del norte en la ciudad de Puebla. Tomada del programa de gestión de la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (2006-2011).

3.1.2 Topografía del estado de Puebla

Conforme al Anuario Estadístico del estado de Puebla (INEGI, 2010), la superficie estatal forma parte de las provincias: Sierra Madre del Sur, Eje Neovolcánico, Sierra Madre Oriental y Llanura Costera del Golfo Norte. En el centro predominan llanuras y lomeríos que separan a sierras en dirección noroeste-sureste con altitudes de 4 580 msnm como la Sierra Negra y cerro Zizintépetl con 3 260 msnm, en esta zona también se localiza la altura más baja con 100 m, en el cañón que ha desarrollado el Río Tonto. Hacia el norte hay llanuras y lomeríos con los volcanes Popocatepetl, Malinche y Pico de Orizaba o Citlaltépetl, este último con una altitud de 5 610 msnm. Existe la presencia de la depresión (zona que se encuentra en un nivel más bajo que la mayor parte de la tierra que la rodea) Teziutlán y en la parte norte se localizan valles

Es conveniente resaltar la topografía de la zona de estudio, ya que existe una barrera natural entre la ZMVM y la ZMVP, con elevaciones considerables. De las 5 elevaciones más importantes que forman parte del territorio poblano, dos de ellas se encuentran entre éstas

zonas metropolitanas: Popocatépetl e Iztaccíhuatl (tabla 5). En la figura 8 se observa la hipsografía de la zona de estudio, destacando las elevaciones de los volcanes antes mencionados, encontrándose al oeste de la ciudad de Puebla.

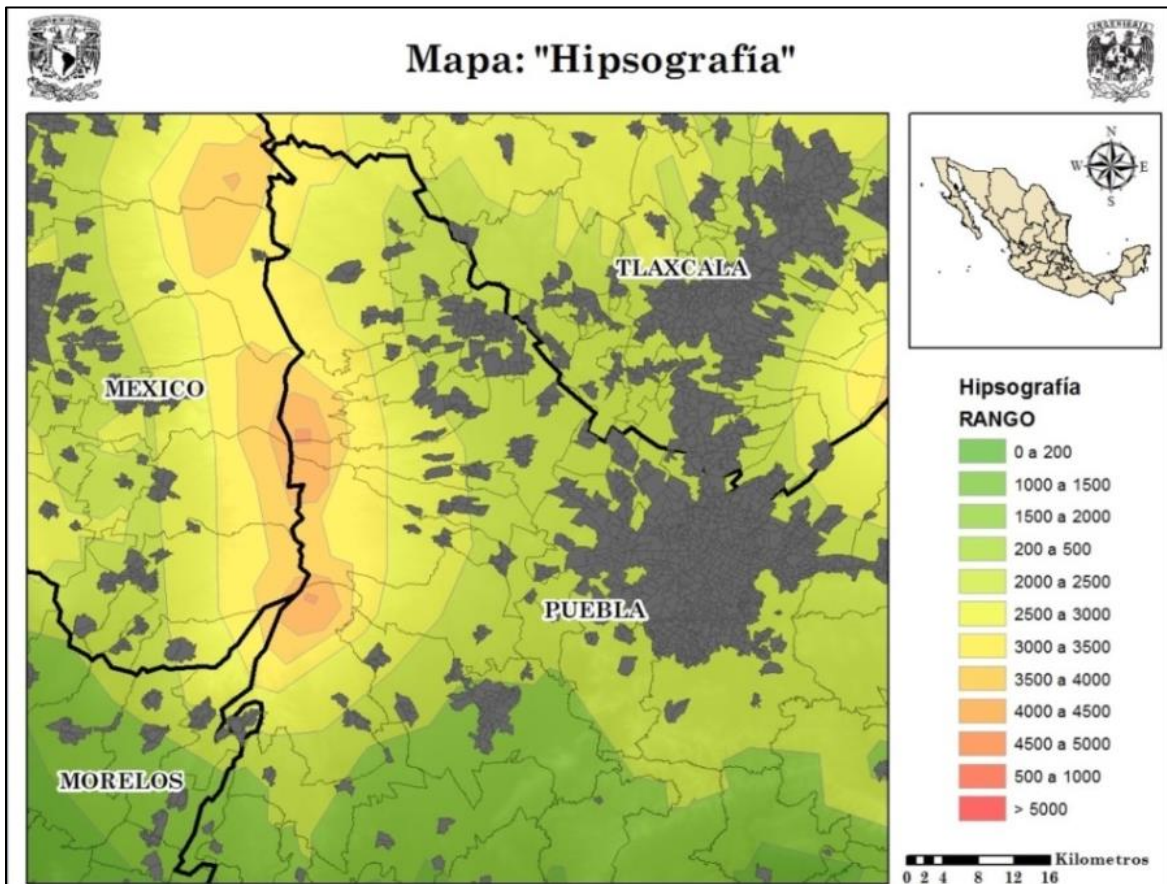


Figura 8.- Mapa hipsográfico de la zona de estudio. Se observa el complicado terreno entre la ZMVM y la ZMVP. Elaboración propia, base de datos de CONABIO (2010).

Tabla 6.- Elevaciones que se encuentran en el estado de Puebla CONABIO (2010).

| Nombre de elevación. | Altitud (msnm) |
|----------------------|----------------|
| Pico de Orizaba | 5 610 |
| Popocatépetl | 5 500 |
| Iztaccíhuatl | 5 220 |
| La Negra | 4 580 |
| La Malinche | 4 420 |

3.1.3 Flora y fauna

De acuerdo con la CONABIO (2010) menciona que el estado de Puebla predominan los bosques de coníferas y encinos y las selvas de diferentes tipos; matorrales en el norte, sur y sureste de la entidad, así como pastizales, bosques de montaña y bosques templados en la porción central. En las zonas altas de los volcanes se encuentra la pradera. En el bosque de coníferas y encinos: falso escorpión, ranita verde, salamandra, lagartija de collar, culebras parda y de agua, codorniz, halcón, tecolote, tlalcoyote y musaraña. En la selva seca: tejón, mapache, zorrillo, coatí, venado cola blanca, gavilán, colibrí, gato montés y murciélago. En el matorral: zorra gris, lagarto de Gila, pájaro carpintero, aguililla, víbora de cascabel y búho. Animal en peligro de extinción: guacamaya.

3.1.4 Uso de suelo

En el estado de Puebla, según la CONABIO (2010), se tiene que aproximadamente el 70% del territorio estatal es apto para uso agrícola; de este el 55% está ubicado en el centro y sureste de la entidad, es apto para la agricultura tecnificada, debido a que el suelo es plano o con pequeñas ondulaciones; el 15% restante es apto para la agricultura mediante tracción animal, y se ubica indistintamente en todo el estado. Los cultivos cíclicos más abundantes son maíz, frijol, sorgo, elote, papa, calabaza y cebolla. En cuanto a cultivos perennes se produce café cereza, naranja, alfalfa verde y caña de azúcar. Con respecto al potencial pecuario, las tierras más aptas para el desarrollo de la actividad ganadera intensiva se ubican en la misma zona apta para la agricultura tecnificada debido a las extensas superficies llanas existentes.

En la figura 9 se observa que en la zona de estudio, destaca el uso de suelo tipo urbano, esta zona metropolitana que abarca territorio de Tlaxcala y de Puebla. Dentro del sistema de modelización es importante conocer el uso de suelo, ya que de acuerdo con el modelo, la rugosidad que ejerce sobre el viento es diferente dependiendo del tipo del uso de suelo además otro factor que influye es la disponibilidad de humedad. En terrenos donde no es posible construir establos se practica la ganadería semiextensiva o la extensiva, sustentadas por numerosos terrenos de pastos, bosques, selvas o matorrales aptos para ser aprovechados por este tipo de ganadería. En el caso del pastoreo de caprinos, un alto porcentaje de la superficie

estatal es apta para la actividad, debido a que cuenta con una topografía accidentada donde no se recomienda la introducción de otro tipo de ganado.

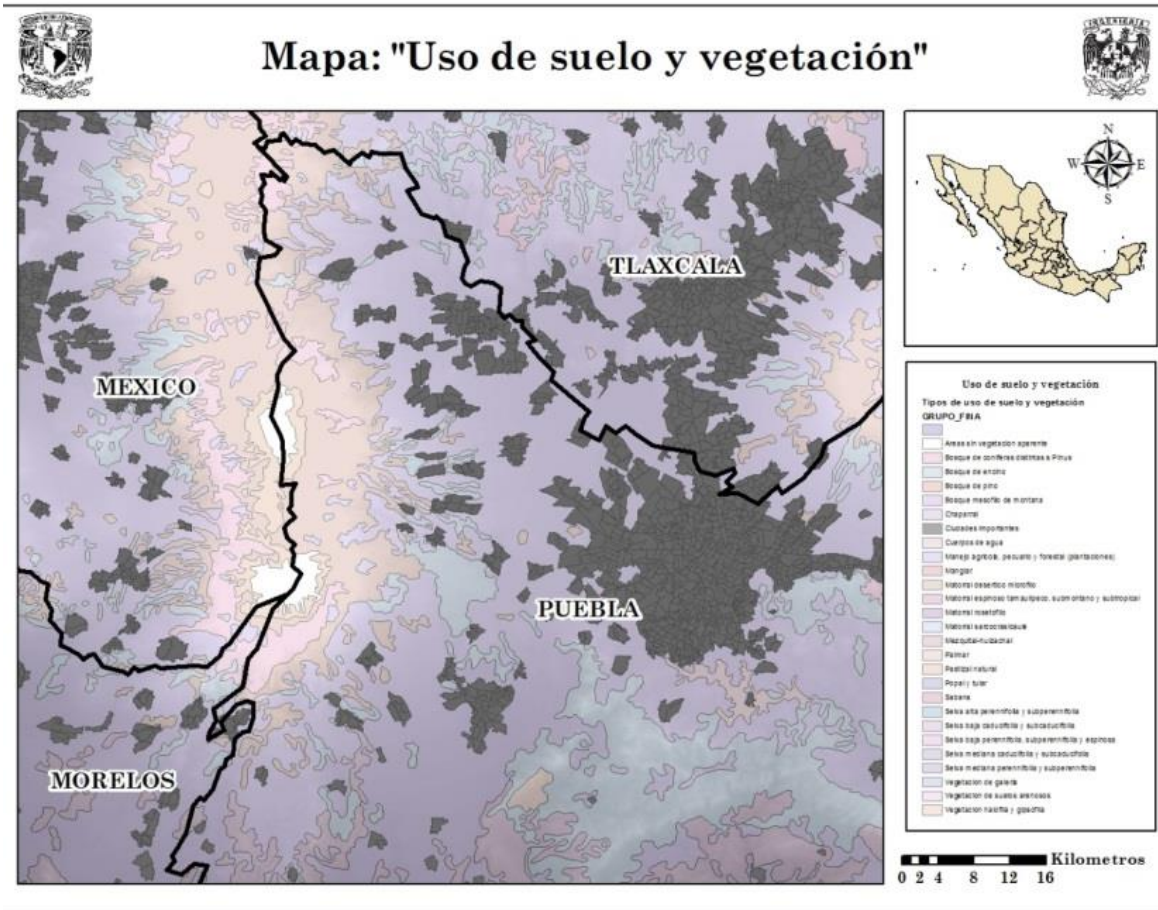


Figura 9.- Mapa del uso del suelo de la zona de estudio. Elaboración propia, base de datos de CONABIO (2010). La mancha urbana se presenta en color gris.

El aprovechamiento forestal con fines comerciales se realiza en zonas altas de relieve irregular, donde las condiciones ecológicas y climáticas permiten el crecimiento de coníferas. Tal es el caso de las faldas de los volcanes, donde pueden obtenerse recursos maderables y no maderables. Las selvas, por su lado, están distribuidas al norte del estado y pueden aprovecharse también con fines económicos y conservación de áreas naturales así como servicios ambientales. Hay también numerosas zonas de bosques, selvas o matorrales con flora cuyo uso es exclusivamente doméstico, debido a que la vegetación natural ha sido alterada. En el estado de Puebla, al año 2007, se registran 1160 comunidades que se rigen por

propiedad ejidal, por lo que la actividad agrícola, ganadera y forestal en estas tierras se desarrolla en forma colectiva.

3.1.5 Actividades económicas

Según INEGI (2015), de acuerdo a la Encuesta Intercensal, el estado de Puebla: cuenta con 215 288 unidades económicas, el 5.8 % del país; emplea 826 688 personas, el 4.1 % del personal ocupado de México; del total del personal ocupado en la entidad, el 57% (474 408) son hombres y el 43% (352 280) son mujeres; en promedio, las remuneraciones que recibe cada trabajador al año en Puebla son de \$81 835, el promedio nacional es de \$99 114; aportación al Producto Interno Bruto (PIB) nacional del 3.3 %.

3.2 Contaminación atmosférica en la ciudad de Puebla

Resulta sustancial, revisar primeramente los inventarios de emisión según SEMARNAT, para conocer qué es lo que emite y cuánto es lo que se emite dentro de una zona urbana, sin embargo, lamentablemente en México los inventarios no están actualizados y estos son basados en metodologías de otros países, añadiéndole que la información que proporcionan las industrias a dichos inventarios tienen incongruencias, por lo tanto los datos son poco confiables. Aunque cabe mencionar que estos inventarios proporcionan una primera aproximación sobre las emisiones a la atmósfera que se genera en una zona metropolitana. Por otra parte es importante ubicar las estaciones de monitoreo de la calidad del aire para el presente estudio y como parte de los objetivos es conocer los niveles de calidad del aire que se reportan en la Zona Metropolitana de Puebla, esto para contrastar los resultados que se generaron en este presente trabajo.

3.2.1 Emisiones de contaminantes atmosféricos.

El inventario nacional de emisiones del 2008, para el estado de Puebla, de acuerdo con su clasificación de fuentes (área, fijas, móviles y naturales) y el contaminante que emite (partículas, dióxido de azufre, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, amonio y carbono negro), presenta la concentración en kg por año (ver tabla 7).

Al año 2011, las industrias automotriz y textil fueron las más importantes en el Estado, llegando esta última a 75 unidades de producción detectadas y presentando ingresos de más de 74 millones de pesos en 2011. El estado cuenta con 16 parques industriales: Huauchinango, Zacatlán-Chignahuapan, Tehueya y Oriental, en la región norte del estado; Chachicomula, Esperanza y Valle de Tehuacán en el Este; y los parques Área 1, El Carmen, 5 de Mayo, FINSA, Nopalucan, Chachapa, San Jerónimo, Resurrección y Puebla 2000 en el centro. En el año 2009, en el estado de Puebla se reportó un parque vehicular de 1, 138, 679 unidades. Con estas condiciones pudimos inferir que el ozono se encuentra presente en la calidad del aire de la zona metropolitana.

Tabla 7 Fuentes y los contaminantes que emite [kg/año] el Estado de Puebla (SEMARNAT, 2008)

| Contaminante | Fuentes | | | |
|-------------------|---------|-------|---------|-----------|
| | Área | Fijas | Móviles | Naturales |
| PM ₁₀ | 30,210 | 4,555 | 2,933 | 0 |
| PM _{2.5} | 25,424 | 2,673 | 2,563 | 0 |
| SO ₂ | 727 | 4,558 | 1,205 | 0 |
| CO | 182,603 | 2,576 | 811,029 | 0 |
| NOX | 11,566 | 6,335 | 180,441 | 35,860 |
| COV | 219,869 | 3,684 | 82,814 | 111,085 |
| NH ₃ | 54,172 | 53. | 2,705 | 0 |
| Carbón Negro | 3,250 | 552 | 1,072 | 0 |

3.2.2 Ubicación de estaciones de monitoreo

La Red Estatal de Monitoreo Atmosférico del Estado de Puebla (REMA) está administrada por la Dirección de la Calidad del Aire y Cambio Climático (CACC) del Estado de Puebla, perteneciente a la Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial. Las variables que miden esta red son las siguientes: concentraciones reportadas de los contaminantes criterio de acuerdo a la Normas Oficiales Mexicanas tal como Ozono (O₃), Monóxido de Carbono(CO), Dióxido de Azufre(SO₂), Dióxido de Nitrógeno(NO₂) y Partículas (PM); datos Meteorológicos, como velocidad y dirección de los vientos, humedad relativa, presión, precipitación y radiación solar.

La REMA de Puebla actualmente cuenta con cinco estaciones de monitoreo atmosférico distribuidas a lo largo de la Zona Metropolitana del Valle de Puebla. Está red inició sus operaciones en el año 2000 con cuatro estaciones automáticas midiendo contaminantes

criterio y otros contaminantes atmosféricos como hidrocarburos totales y ácido sulfhídrico. En la figura 10, se observa la ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Puebla, mientras que en la tabla 8 se presentan, los nombres y las coordenadas geográficas en sistema UTM de las estaciones y una pequeña descripción del sitio donde se encuentran.

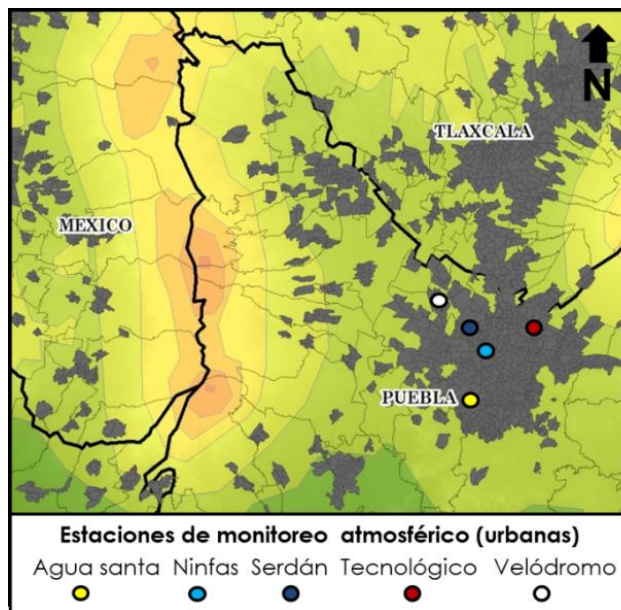


Figura 10.- Mapa de la ubicación y nombre de las estaciones de monitoreo atmosférico del Estado de Puebla (REMA). Elaboración propia con base en datos de la CONABIO (2010). Topografía y zona urbana de la zona de estudio.

Tabla 8.- Ubicación actual de las estaciones de monitoreo de REMA Puebla

| Nombre | Ubicación | Coordenadas UTM | | |
|---------------|---|-----------------|----------------|------|
| | | E | N | Q |
| Tecnológico | Avenida Tecnológico No. 420, a una altitud de 2,216.5 msnm ¹ , en una zona con actividades industriales, habitacionales y escolares. | 589322.12 m E | 2107306.87 m N | 14 Q |
| Ninfas | Se localiza en el sector centro-poniente, a una altitud de 2,136 msnm, en una zona habitacional. | 582677.09 m E | 2105584.71 m N | 14 Q |
| Serdán (BINE) | Está a un costado del Monumento a los Hermanos Serdán, a una altitud de 2,180 msnm. | 581580.47 m E | 2108461.94 m N | 14 Q |
| Agua Santa | Se encuentra al suroeste de la ciudad a una altitud de 2,182 msnm, dentro de una zona habitacional y escolar. | 578980.52 m E | 2099600.34 m N | 14 Q |
| Velódromo | Se encuentra al noroeste del Valle de Puebla, cerca de una zona habitacional y del periférico. | 575980.00 m E | 2113814.00 m N | 14 Q |

3.2.3 Calidad del aire en la ciudad de Puebla

De acuerdo a los reportes de los programas de gestión de la calidad del aire del Estado de Puebla para el periodo de 2005 al 2009 la situación fue la siguiente: los contaminantes que incumplieron por lo menos una vez con los límites máximos permisibles permitidos por las normas oficiales mexicanas fueron dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀), partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) y plomo (Pb). En otras palabras solo el contaminante atmosférico monóxido de carbono (CO) cumplió con los límites máximos permisibles. En dicho reporte solo se muestran los periodos en los que se incumplió o cumplió, sin embargo no se presentan los días y la frecuencia en los que acontecieron dichos eventos.

Mientras que en el año 2014 la Secretaría de Desarrollo Rural, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial del estado de Puebla, presentó los días que se excedieron los límites máximos permisibles establecidos en las normas oficiales mexicanas de la calidad del aire, para el periodo de 2001 al 2013, solo se presentan los días de incumplimiento mas no los contaminantes responsables, tampoco en que época del año y la periodicidad en la que se incumplió. Por lo tanto es obvio que la anterior información está incompleta. En la figura 11 se presenta dichos resultados.

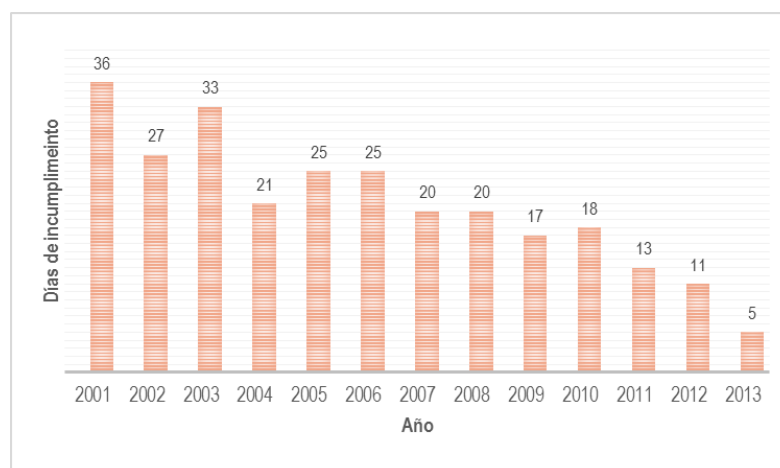


Figura 11.-Días que se excedieron los límites máximos permisibles establecidos en las normas oficiales mexicanas de la calidad del aire, para el periodo de 2001 al 2013. Fuente: Secretaria de Desarrollo Rural, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial del Estado de Puebla.

4. METODOLOGÍA

La metodología que se siguió en este trabajo, se divide en tres etapas: la primera es la obtención, procesamiento, validación y evaluación de los datos de monitoreo de la calidad del aire; la segunda es realizar un análisis estadístico de correlación, que nos permita encontrar los posibles días de transporte de contaminantes atmosféricos entre las zonas metropolitanas; y por último corroborar este análisis estadístico, con un sistema de modelización de la calidad del aire. En la tabla 9 se muestra como se divide este capítulo:

Tabla 9.- División del capítulo de metodología: numeración, nombre, meta y herramientas utilizadas para cada subcapítulo.

| Subcap. | Nombre | Meta | Herramienta (s) |
|---------|--|---|---|
| 4.1 | Obtención, procesamiento y validación de los datos de monitoreo para la evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Puebla. | Validar los datos y evaluar la calidad del aire de la ciudad de Puebla | Manuales de Monitoreo del SINAICA ² y método propuesto por Hidalgo N. (2011). |
| 4.2 | Análisis estadístico de correlación de datos, para localizar los posibles días de transporte de contaminantes atmosféricos entre las zonas metropolitanas. | Encontrar los posibles días de transporte de contaminantes atmosféricos entre estas las zonas metropolitanas. | Análisis estadístico, método propuesto: correlación de Spearman. |
| 4.3 | Sistema de modelización meteorológica y de dispersión de contaminantes atmosféricos. | Corroborar el análisis estadístico. | Sistema de modelización de la calidad del aire, método propuesto CALMET-CALPUFF v6 y WRF v3.5-CALPUFF v6. |

² Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire de México (SINAICA)

4.1 Obtención, procesamiento y validación de los datos de monitoreo para la evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Puebla

Cabe señalar que el Gobierno de México cuenta con el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), sin embargo, no existe en este sistema, datos validados que emite la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA) de Puebla (ver figura 12). En contra parte, el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SMA) de la Ciudad de México, cuenta con un proceso de validación de su información, esta base de datos puede ser consultada en su portal de internet <http://www.aire.df.gob.mx/default.php>.

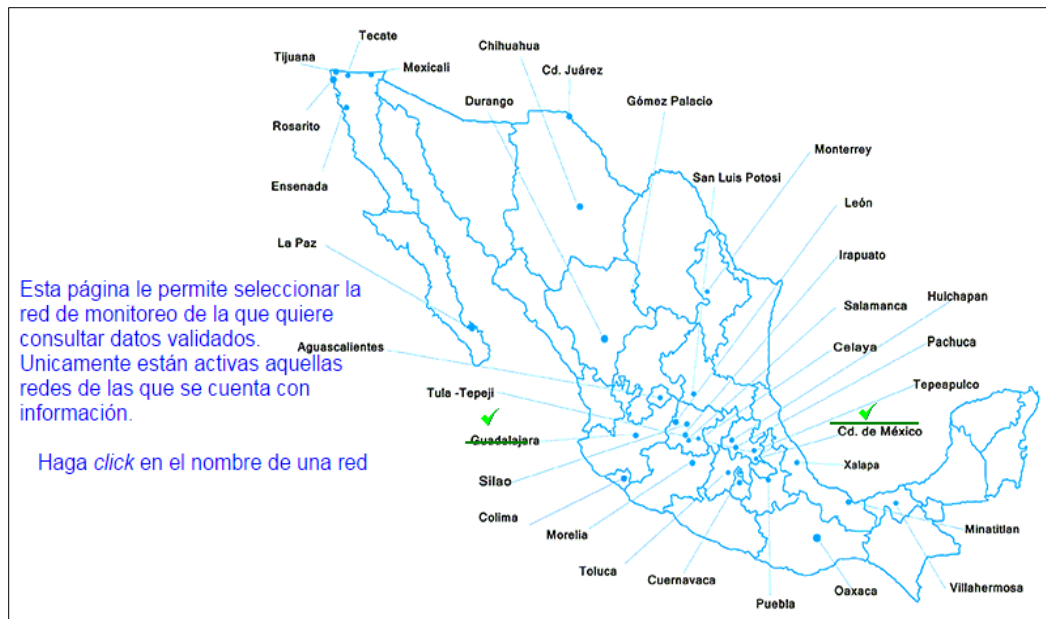


Figura 12.- En el portal de internet del SINAICA, se muestran las redes de monitoreo atmosférico de la calidad del aire del país en un mapa interactivo, aunque solamente las bases de datos de la Cd. de México (ZMVM) y la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), están validadas y disponibles: <http://sinaica.inecc.gob.mx/magic/rmaval/null/framework> (última revisión 08/03/2016).

Debido a lo anterior, la base de datos de la REMA de Puebla tuvo que ser validada, para ello se optó por aplicar una metodología con el apoyo del manual 5 “Protocolo de Manejo de Datos de la Calidad del Aire” (2010) del INECC, este método se describe en tres secciones generales: consideraciones respecto a la disponibilidad, disposición, limpieza y verificación de

los datos; verificación del criterio de suficiencia de datos; determinación de las características fundamentales de los datos. A continuación se describe la metodología mencionada.

4.1.1 Disponibilidad, disposición, limpieza y verificación de los datos.

4.1.1.1 Disponibilidad y disposición de los datos.

Como primer paso, se debe iniciar considerando algunos aspectos y características de los datos que son de fundamental importancia, tales como: tipo de datos, disponibilidad, disposición, forma de acceso y cantidad; lo anterior debe ser homogéneo en toda la base de datos, tanto a través del tiempo como entre estaciones de monitoreo (Hidalgo N. , 2011). En este caso, se solicitó la base de datos las mediciones de la calidad del aire de la REMA de Puebla.

4.1.1.2 Limpieza y validación de los datos

En caso de no contar con datos validados, se debe realizar la limpieza y validación de la base de datos crudos. Como primer término la limpieza de los datos consiste, entre otras cosas, en la asignación automática de códigos/avisos para la identificación de valores nulos y fuera de intervalo según la experiencia o el análisis de los datos (BSC-CNS, 2013). Como lo menciona INECC en su manual, es la etapa inicial del manejo de datos. En esta se aplican una serie de criterios, de forma manual, semiautomática o automática en algunos casos, para diferenciar los datos correctos de los falsos o incorrectos. Es decir, aquellos valores que no corresponden a mediciones de calidad del aire (INE, 2010). Un dato no debidamente medido da información incorrecta sobre la concentración y el comportamiento de un contaminante atmosférico.

En la mayor parte de los casos el uso de criterios depende del sistema de monitoreo, ya que este determina: la cantidad y tipo de banderas para la limpieza de datos, los límites máximos y mínimos de la medición de concentración de los contaminantes atmosféricos, entre otros criterios. Algunos ejemplos sobre banderas y criterios utilizados para la limpieza de los datos se muestran en las tablas 10 (banderas de limpieza) y 11 respectivamente (criterios).

Tabla 10.- Banderas³ para la limpieza y la validación de los datos concentraciones de contaminantes atmosféricos, según el Ministerio de Medio Ambiente de España (MAM) (2000), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de México (INECC) (2010) y la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos de América (EPA) (2002)

| MAM | | INECC y EPA | |
|--------------|--|--------------------|--|
| Clave | Descripción | Clave | Descripción |
| V | Válido | IR | Dato inválido por rango de operación. En esta categoría se incluyen valores fuera de los límites superior e inferior fijados. |
| R | Reelaborado por medios adecuados | VZ | Dato válido igualado al límite de detección o a cero. Este código se aplica a datos con valores negativos que deberán ser igualados a cero |
| C | Perturbado por el procedimiento de calibración | IO | Invalidado por operador por otras razones no específicas |
| Z | Perturbado por el procedimiento de chequeo de cero | VC | Válido calculado |
| M | Perturbado por el mantenimiento | VE | Válido con evento extraordinario |
| D | Erróneo debido a fallo técnico | DS | Dato sospechoso |
| E | Erróneo por fallo técnico | VI | Valor interpolado |
| F | Erróneo por razón desconocida | | |
| N | Dato no valido | | |
| P | Analizador fuera de servicio | | |
| T | Dato que no ha sufrido el procedimiento de validación adecuado | | |

³ Códigos utilizados en el monitoreo de la calidad del aire para la identificación de valores nulos y fuera de intervalo.

Tabla 11.- Criterios para la limpieza y la validación de los datos de concentraciones de contaminantes atmosféricos, de acuerdo a cada contaminante atmosférico, según Castro E. (2008) y al Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (BSC) (2013).

| Contaminante | Criterios de acuerdo a Castro E. (2008) | Criterios de acuerdo al BSC (2013) | | | |
|--|---|------------------------------------|-----------------------------------|--|--------------------|
| | | Mín. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] | Máx. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] | Diferencia máxima entre dos datos consecutivos | Valores constantes |
| Dióxido de azufre (SO₂) | 1. Si el dato es ≤ 0.4 ppb 2. Si el dato anterior es ≤ 0.4 ppb 3. Si el dato es < 500 ppb 4. Si hay cuatro datos seguidos iguales | 1 | 600 | 200 | 10 |
| Monóxido de carbono (CO) | 1. Si el dato es < 0.04 ppm 2. Si el dato anterior es < 0.04 ppm 3. Si hay cuatro datos seguidos iguales 4. Si el dato es mayor a $50 \text{ ppm} + 2.5 \text{ ppm}$ | SP | SP | SP | 10 |
| Dióxido de nitrógeno (NO₂) | 1. Si el dato es ≤ 0.4 ppb 2. Si el dato anterior es ≤ 0.4 ppb 3. Si hay cuatro datos seguidos iguales 4. Si la suma NO+NO ₂ diferente de 0 con margen ± 0.2 5. Si el dato es mayor a $50 \text{ ppb} + 2.5 \text{ ppb}$ | 1 | 300 | 150 | 10 |
| Ozono (O₃) | 1. Si el dato es > 500 ppb 2. Si el dato es ≤ 0.6 ppb 3. Si el dato anterior es ≤ 0.6 ppb 4. Si hay cuatro datos seguidos iguales | 1 | 250 | 150 | 10 |
| Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀) | 1. Si el dato es $> 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 2. Si el dato es $\leq 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 3. Si el dato anterior es $\leq 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; NAN 4. Si hay cuatro datos seguidos iguales | 1 | 600 | 120 | 10 |
| Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) | SP | 1 | 600 | 80 | 10 |

*Nota: Sin propuesta (SP).

Resulta fundamental resaltar la importancia de la etapa de validación, ya que esta se concibe como un proceso para determinar la calidad de un conjunto de datos de acuerdo con las necesidades particulares (por ejemplo, un plan de calidad de datos (BSC-CNS, 2013).

4.1.2 Verificación del criterio de suficiencia de datos

La verificación del criterio de suficiencia de datos de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana 156-SEMARNAT-2012 así como lo propuesto por la EPA (1998), se debe tener al

menos del 75% de compleción en los datos disponibles, para estar en posibilidad de obtener un estadístico, tanto de evaluación contra normas, como de tendencia (Hidalgo N. , 2011). Para verificar la suficiencia de datos se debe calcular el número teórico y el número real de datos arrojados o generados por los sistemas de medición. Lo cual se divide en el siguiente método, cálculo de la cantidad teórica y real de los datos para conocer el porcentaje total de datos monitoreados. Es importante señalar, que este criterio se puede acotar a un análisis de tiempo diferente, por ejemplo: mensual, semanal, e inclusive diario.

Tabla 12.- Cálculo de la cantidad teórica de datos para verificar el criterio de suficiencia del 75% para un periodo anual.

| Días por mes | No. Datos | Días por año | No. Datos horarios (100%) |
|--------------|-----------|--------------|---------------------------|
| 28 | 672 | 365 | 8760 |
| 29 | 696 | 366 | 8784 |
| 30 | 720 | | |
| 31 | 744 | | |

Nota: Usualmente las base de datos de monitoreo emiten información de concentraciones horarias, esto quiere decir que al día se obtendrán 24 datos. Tabla tomada y modificada de Hidalgo N. (2011).

4.1.3 Determinación de las características fundamentales de los datos

Para la determinación de las características fundamentales de los datos, como su comportamiento general a través del tiempo, se recomienda utilizar gráficas de series de tiempo, de dispersión e histogramas, a continuación se hace una breve descripción de cada una de estas herramientas.

4.1.3.1 Series de tiempo

Algunas representaciones gráficas específicas para los datos temporales son las series de tiempo, más simples de generar y proporcionan una gran cantidad de información. Este gráfico hace fácil identificar tendencias a gran y a pequeña escala sobre el tiempo (EPA, 2000).

También, al utilizar esta herramienta nos permite identificar fácilmente los posibles datos dudosos usando un gráfico de tiempo. El tiempo se traza en el eje horizontal y la observación correspondiente se traza en el eje vertical. Los puntos trazados en un gráfico de tiempo pueden

ser unidos por líneas; sin embargo, se recomienda que los puntos trazados no se conecten, esto para evitar crear un sentido falso de continuidad, a menos que se conozca de antemano un patrón bien definido (Hidalgo N. , 2011).

4.1.3.2 Dispersión de los datos

Un diagrama de caja y bigotes, es un gráfico basado en cuartiles, mediante el cual se visualiza un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo, la "caja", y dos brazos, los "bigotes". Es un gráfico que suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución. Primero es necesario encontrar la mediana para luego encontrar los 2 cuartiles restantes (Wikipedia, 2016). Este tipo de gráficos también son conocidos como caja de bigotes o por su término en inglés bloxplot.

Esta herramienta es muy útil para conocer estadísticamente los datos atípicos, para un estudio de transporte de contaminantes atmosféricos, este comportamiento lo podemos relacionar como una posible atribución de algún fenómeno natural o antropogénico, tanto de manera local o mesoescalar. También podemos referirlo a un problema en los equipos durante la medición de las concentraciones.

4.3.1.3 Histogramas

. El uso de histogramas es una excelente herramienta estadística para observar la posible distribución que tienen los datos analizados. Las distribuciones estadísticas de muchas variables atmosféricas son claramente asimétricas y sesgadas a la derecha, existe un límite físico a la izquierda, las cuales no pueden tomar valores negativos (Wilks, 2006)

4.1.4 Normativa para evaluar la calidad del aire en México

Como se mencionó en el marco jurídico del presente trabajo, en México la normativa que establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) de contaminantes atmosféricos, son Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que son desarrolladas entre la Secretaría de Salud y la

SEMARNAT, dependencias de gobierno a nivel federal, sin embargo, la jurisprudencia sobre la medición es a nivel estatal, y la evaluación a nivel estatal y federal. En la tabla 13 se muestran los LMP de los contaminantes atmosféricos con los que se evaluó la calidad del aire en la ciudad de Puebla y su clave de identificación correspondiente. Según el contaminante atmosférico, este se comparó con el LMP de su norma para así determinar si hubo mala calidad del aire.

Tabla 13.-Límites Máximos Permisibles de concentración de los contaminantes atmosféricos, para la evaluar la calidad del aire en zonas urbanas en México (última revisión 09-05-2016).

| Contaminante | Límite máximo permisible | |
|---|--------------------------|---|
| | NOM | Descripción |
| Dióxido de azufre (SO ₂) | 022-SSA1-2010 | <ul style="list-style-type: none"> • 0.110 ppm, máximo promedio de 24 horas • 0.200 ppm, segundo máximo anual como promedio móvil de 8 horas • 0.025 ppm, promedio anual |
| Monóxido de carbono (CO) | 021-SSA1-1993 | <ul style="list-style-type: none"> • 11.0 ppm, máximo anual como promedio móvil de 8 horas |
| Dióxido de nitrógeno (NO ₂) | 023-SSA1-1993 | <ul style="list-style-type: none"> • 0.210 ppm, promedio horario |
| Ozono (O ₃) | 020-SSA1-2014 | <ul style="list-style-type: none"> • 0.095 ppm, promedio horario • 0.070 ppm, máximo anual del promedio móvil de 8 horas |
| Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀) | 025-SSA1-2014 | <ul style="list-style-type: none"> • 75 µg/m³, promedio 24 horas • 40 µg/m³, promedio anual |
| Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5}) | 025-SSA1-2014 | <ul style="list-style-type: none"> • 45 µg/m³, promedio 24 horas • 12 µg/m³, promedio anual |
| Plomo (Pb) | 026-SSA1-1993 | <ul style="list-style-type: none"> • 1.5 µg/m³, en un periodo de tres meses como promedio aritmético |

4.2 Análisis estadístico de correlación de datos, para localizar los posibles días de transporte entre las zonas metropolitanas

Conforme a lo que se vio en el inicio de esta sección, se propuso realizar una correlación de las mediciones de concentraciones de los contaminantes atmosféricos. De acuerdo con la naturaleza de los datos, se recomienda utilizar el coeficiente de correlación de Spearman, este se utiliza para identificar y poner a prueba la fuerza de una relación entre dos conjuntos de datos. Teniendo en cuenta lo anterior, el método para localizar los días de posible transporte

de contaminantes atmosférico entre las zonas metropolitanas del Valle de México y Puebla, se propone lo siguiente:

1. Identificar el tipo de distribución de los datos.
2. Seleccionar el contaminante trazador de acuerdo al resultado la validación de los datos, es decir, aquel contaminante que sus datos de concentración presente mejor comportamiento respecto a su validación.
3. Acotar los datos, debido a características de la zona: cálculo teórico de la altura capa de mezcla. Dada la existencia del complejo terreno que existe en la zona de estudio, para que haya transporte la altura de capa de mezcla deber ser superior a la altura de los volcanes.
4. Realizar la correlación tipo Spearman (selección de días de transporte de contaminantes atmosféricos).

4.2.1 Identificación del tipo de distribución de los datos

4.2.1.1 Prueba Kolmogorov-Smirnov

La prueba Kolmogorov-Smirnov permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica; el objetivo de aplicar esta prueba al presente trabajo es señalar si los datos de interés provienen de una población que se comporte como la distribución teórica específica (Hidalgo N. , 2011). En este sentido, este método se utiliza para saber si los datos corresponden a una distribución normal o no. Al corroborar que la naturaleza de los datos no tienen una distribución normal se aplica una herramienta estadística como Matlab, esto para que nos permita confirmar que la distribución que se ajusta mejor a los datos de concentración de contaminantes es del tipo gamma.

Para aplicar la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, se recomienda un tamaño de muestra mínimo de $n=50$. Esta prueba es más apropiada que la prueba chi cuadrada para muestras grandes ($n > 50$), pues en la construcción de grupos o intervalos de datos, la chi cuadrada requiere que cada grupo contenga al menos 5 elementos. El procedimiento para

realizar la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov- Smirnov es el siguiente (Mc. Bean et al., 1998):

a) Con el fin de obtener los estadísticos necesarios para la construcción de la prueba se construye un histograma de los datos

b) Planteamiento de la hipótesis:

- Hipótesis nula (Ho). Las diferencias entre los valores observados y los valores de la distribución teórica se deben al azar.
- Hipótesis alterna (Ha). Los valores observados de las frecuencias para cada clase son diferentes de las frecuencias teóricas.

c) Definición del nivel de significancia α

- Para todo valor de probabilidad igual o menor que α , se rechaza Ho y se acepta Ha.

d) Definición de la región de rechazo

- Para todo valor D' mayor que el valor crítico D , se rechaza la hipótesis nula.

e) Cálculo de las frecuencias observadas acumuladas (F_{obs}).

f) Cálculo de las frecuencias esperadas acumuladas de la distribución teórica a considerar (F_t).

g) Cálculo del estadístico D' , máxima discrepancia entre las frecuencias observadas F_{obs} y las frecuencias teóricas F_t , así:

$$D' = \frac{F_t - F_{obs}}{n} \quad (2)$$

En donde n es el número total de observaciones de la muestra.

h) Comparación del estadístico D' con el valor crítico del estadístico de Kolmogorov-Smirnov (D).

En donde D se calcula con la ecuación (3) para $\alpha=0.05$

$$D = \frac{1.358}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

En esta, n es el número total de observaciones de la muestra.

i) Criterios para la aceptación o rechazo de hipótesis

- Si $D' < D$ entonces no se rechaza Ho
- Si $D' > D$ entonces se rechaza Ho y se acepta Ha

El procedimiento para aplicar la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov- Smirnov es muy simple, quizá la parte que requiere mayor cuidado corresponde al cálculo de las frecuencias esperadas de cada tipo de distribución teórica.

4.2.1.2 Programa computacional (Matlab ®)

Para confirmar la literatura y la prueba de K-S sobre el ajuste de la distribución, se utilizó un paquete computacional llamado Matlab®, este contiene una sección de probabilidad de distribuciones, en donde modela la frecuencia de los datos y estima parámetros. Este programa ajusta la distribución para una muestra de datos, y evalúa tanto la función densidad de probabilidad (pdf) y la función de distribución acumulada (cdf). Calcula estadísticos tal como media y mediana, y se puede visualizar la distribución con diferentes tipos de distribución (Matlab, 2016).

4.2.2 Selección del contaminante trazador

Como ya se ha dicho, los modelos tratan de simular los fenómenos que suceden en la atmósfera, tomando en cuenta un gran número variables, sin embargo estos fenómenos resultan ser tan complejos que al final siempre se va a tener un error, de aquí la importancia de conocer el porcentaje de este. Para la calidad del aire, la modelización de la meteorología y los contaminantes atmosféricos no es la excepción, se necesita conocer el mayor número variables involucradas. De este modo resulta de suma importancia, de acuerdo con los objetivos del trabajo, seleccionar un contaminante atmosférico relativamente no reactivo y que tengan una vida medianamente larga en la atmósfera, esto con el fin de tener menos variables a considerar. El propósito de esta sección es seleccionar un contaminante atmosférico que cumpla con la validación de datos y que funcione como trazador en el sistema de modelización.

4.2.2.1 Función del trazador

Las mediciones de la concentración del contaminante que se seleccionó como trazador, son utilizadas en el análisis estadístico para encontrar los días posibles de transporte de contaminación atmosférica entre estas zonas metropolitanas. Pero además se puede utilizar en el modelo matemático, para observar la posible trayectoria en la que se transportan los contaminantes de la ZMVM a la ZMVP.

Por otra parte se presentan los criterios para la selección del contaminante trazador: conviene que el trazador sea un contaminante criterio: PM_{10} , O_3 , SO_2 , NO_2 y CO ; sus

concentraciones deben ser validadas y cumplir el criterio de suficiencia del 75; se recomienda que se un contaminante primario y relativamente poco reactivo, como el CO o el SO₂. La ventaja de que el trazador seleccionado sea contaminante primario y relativamente poco reactivo en la atmósfera, es que existen menos variables involucradas en el sistema de modelización de la calidad del aire, por lo que el resultado de este tiene menores errores de cálculo. De acuerdo con la base de datos proporcionada por la red de monitoreo de la calidad del aire de la ciudad de Puebla, el contaminante atmosférico que cumplió con los criterios anteriores fue el SO₂.

4.2.3 Acotamiento de los datos, debido a características de la zona (cálculo teórico de la altura capa de mezcla)

Como se vio en el marco teórico, en las características de la zona de estudio, observamos una característica que resulta ser un factor muy importante: existe una barrera natural entre estas zonas metropolitanas, el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl, segunda y tercera cumbres más altas del país (5,500y 5,220 msnm respectivamente). Esto quiere decir que la altura de capa de mezcla entre estas zonas debe superar la elevación mínima de estas elevaciones, que son el Paso de Cortés y Río Frío (3690 y 3250 msnm respectivamente) (ver figura 13), por lo tanto se debe de acotar aquellos días en donde la altura capa de mezcla supere estas elevaciones.

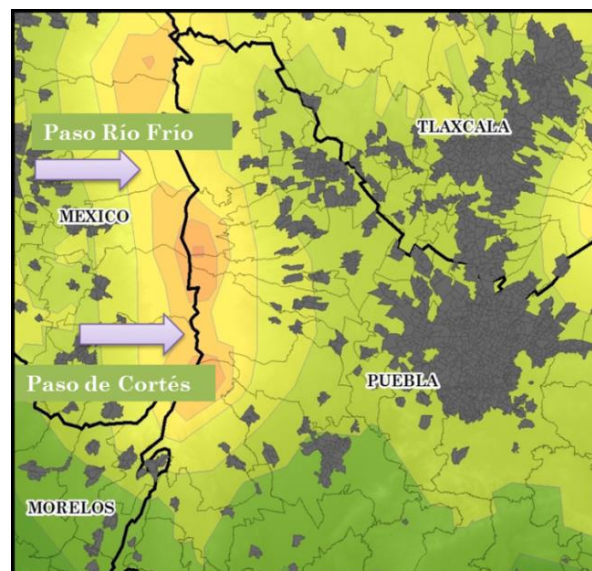


Figura 13.- Elevaciones en la zona de estudio. El Popocatepetl y la Iztaccíhuatl, segunda y tercera cumbres más altas del país (5,500y 5,220 msnm respectivamente). Elevaciones mínimas de las cumbres en donde podría haber transporte de contaminantes atmosféricos son el Paso de Cortés y Río Frío (3690 y 3250 msnm respectivamente).

4.2.3.1 Cálculo de la estimación de la altura máxima de la capa de mezcla (MACM)

El cálculo propuesto por la EPA para calcular la Altura de la Capa de Mezcla, es conocido como el método de Holzworth (1972). Este método provee dos estimaciones de alturas de capa de mezcla usando datos de radio sondeo, una por la mañana y otra por la tarde, esta es considerada la altura máxima de capa de mezcla.

a) Cálculo de la Mínima Altura de la Capa de Mezcla

Esta altura se calcula desde el nivel de piso, a partir de una adiabática seca, se toma en cuenta la temperatura promedio mínima de la mañana, a esta medida se le suma 5 °C. Esto se hace en el perfil vertical de temperaturas del radiosondeo observado a las 1200 del Meridiano de Greenwich. La temperatura mínima se determina entre las 0200 hasta 0600 la hora local. El haberle agregado los 5°C a la temperatura mínima tiene como propósito permitir los efectos de la noche y la mañana por la isla de calor que se genera en las zonas urbanas.

b) Cálculo de la Máxima Altura de la Capa de Mezcla

La máxima altura capa de mezcla se calcula de la misma manera, sin embargo el dato de la temperatura es el promedio de la temperatura máxima registrada entre las 1200 hasta las 1600 del horario local.

4.2.4 Correlación tipo Spearman (selección de días de transporte de contaminantes atmosféricos)

Coeficiente de correlación de Spearman es una prueba estadística no paramétrica y se utiliza para identificar y probar la fuerza de una relación entre dos conjuntos de datos. Es de uso frecuente como un método estadístico para probar o refutar una hipótesis. Este coeficiente es una medida de asociación lineal que utiliza los rangos, números de orden, de cada grupo de sujetos y compara dichos rangos (UA, 2004). La fórmula usada para el cálculo de la siguiente:

$$r = 1 - \frac{6\sum d^2}{n^3 - n} \quad (4)$$

Donde:

d = es la diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden de $x - y$.

n = es el número de parejas.

*Se tiene que considerar la existencia de datos idénticos a la hora de ordenarlos, aunque si éstos son pocos, se puede ignorar tal circunstancia.

*El conjunto de datos debe incluir un mínimo de 15 para ser válido.

De acuerdo al coeficiente obtenido en el cálculo existe un rango que determina la relación de las variables:

- 0 – 0.25 = escasa o nula, 0.26-0.50 = débil, 0.51- 0.75= entre moderada y fuerte, 0.76- 1.00= entre fuerte y perfecta

4.2.4.1 Método

Para calcular la r de Spearman hay que realizar los siguientes pasos:

- Ordenar los pares de datos en función del valor de x y asignar rangos a x .
- Repetir la ordenación en función de y y asignar rangos a y .

Para comprobar la significación estadística del índice de correlación se consulta en la tabla correspondiente el valor crítico de r_s para n pares de datos, para $p=0.05$ o inferior y para el número de colas acorde con la hipótesis. Si r_s calculada es mayor o igual a r_s crítica se rechaza H_0 .

4.3 Sistema de modelización meteorológica y de dispersión de contaminantes

De acuerdo a la clasificación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA *por sus siglas en inglés*), los modelos de evaluación de la calidad del aire se clasifican en tres grandes grupos: dispersión, fotoquímicos y receptores. Dentro de sus sistemas recomendados de modelización de dispersión, se encuentra CALPUFF: es un sistema de modelización que está integrado esencialmente por tres módulos, el modelo de diagnóstico meteorológico CALMET, el modelo de dispersión CALPUFF y el modelo de Postprocesamiento (López, 2009).

El módulo Calpuff utiliza un modelo lagrangiano de nubes aisladas que simula el efecto de las condiciones meteorológicas (simuladas con CALMET) variando en el tiempo y en el espacio sobre el transporte, transformación y eliminación de los contaminantes atmosféricos. Puede aplicarse a escalas desde decenas a centenas de kilómetros. Incluye algoritmos para tratar procesos a escala subgrid, así como, efectos a gran escala (CIEMAT, 2015). Se ha llegado a la conclusión de que el sistema CALPUFF tiene resultados satisfactorios sin aparente sesgo por encima o debajo de la predicción, siempre y cuando la distancia de transporte se limite entre 50 y 300 km (US Government Printing Office, 2005).

Los insumos de este sistema de modelación se dividen en tres áreas importantes: topografía (datos de entrada como el uso de suelo, elevaciones y características del terreno); meteorología (variables como la dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, presión, radio sondeo, precipitación); emisiones, (parámetros de la fuente y características del contaminante) (ver figura 14).

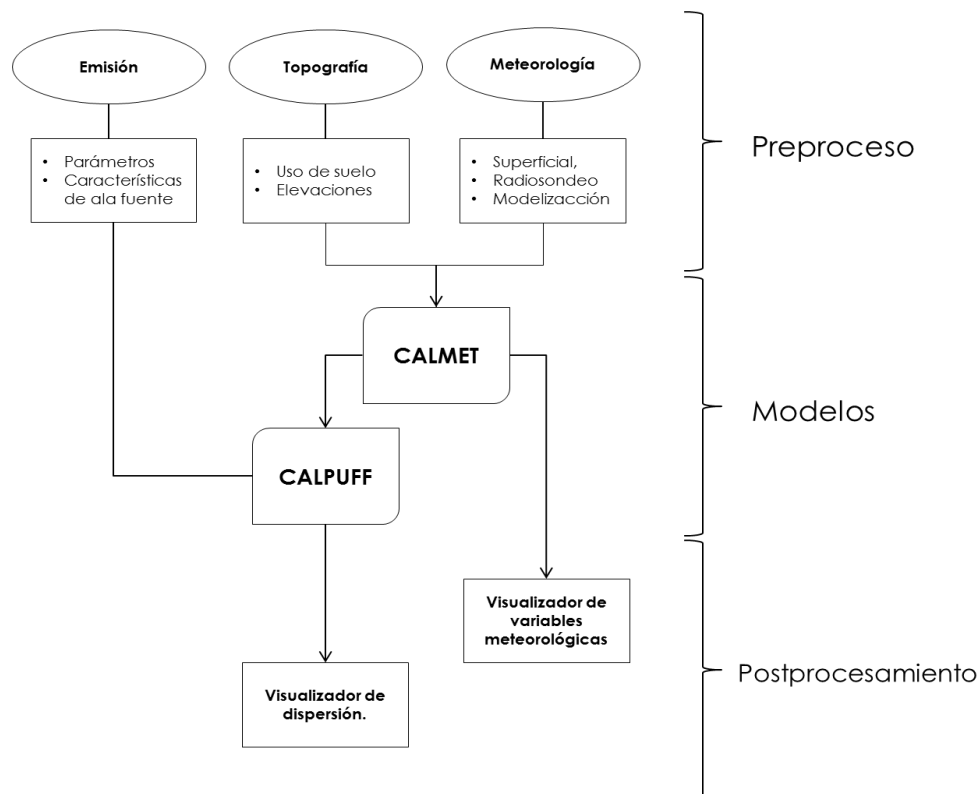


Figura 14.- Proceso y división del sistema modelización CALPUFF. Insumos generales requeridos en el sistema. El modelo climático CALMET al igual visualizador de variables meteorológicas, mientras que CALPUFF generalmente es utilizado para conocer la concentración de contaminantes atmosféricos.

4.3.1 Componentes del sistema de modelización CALPUFF

El sistema de modelización contiene los siguientes programas de rutina:

4.3.1.1 Procesadores geofísicos

- TERREL: Combina y genera grids de datos de terreno. Datos de terreno.
- CTGCOMP: Descomprime archivos de datos del uso del suelo de la USGS. Datos de uso de suelo de la CTG.
- CTGPROC: Procesos y grids de datos de uso de suelo.
- MAKEGEO: Combina datos de terreno y uso de suelo para producir el archivo de datos geofísicos para CALMET.

4.3.1.2 Preproceso meteorológico:

- SMERGE: Combina y formateos de archivos de datos meteorológicos superficiales para producir un único archivo para su uso en CALMET.
- PEXTRACT: Extrae datos de precipitación de los conjuntos de datos de NCDC.
- PMERGE: Procesa y combina los datos de precipitación para producir un único archivo para su uso en CALMET.
- READ62: Procesos de datos meteorológicos de NCDC de radiosondeo para producir archivos de aire superior para CALMET.
- BUOY: Procesos de boya de datos para producir los archivos sobre el agua para CALMET.
- CALMM5: Lee los datos de salida de MM5 y cambia el formato en 3D. Adecuado para entrada en CALMET en formato DAT.

4.3.1.3 Modelos principales

- CALMET: Modelo de diagnóstico meteorológico 3-D
- CALPUFF: Modelo de transporte, dispersión y depósito no estacionario.

a) Postprocesamiento

- CALPOST: Postprocesado de CALPUFF, realiza cálculos de visibilidad, promedios de las concentraciones y flujos de depósito, visualiza la concentración de la pluma y flujos.
- PRTMET: Listas de seleccionados datos meteorológicos CALMET y crea archivos de trama.
- APPEND: Agrega dos o más archivos de concentraciones de CALPUFF, flujo húmedo/seco, humedad relativa (visibilidad).

- CALSUM: Suma y escala las concentraciones o flujos húmedo/seco de dos o más grupos de origen, de diferentes de corridas de CALPUFF.
- POSTUTIL: Procesa los archivos de flujo de concentración húmedo/seco de CALPUFF. Crea nuevas especies como combinaciones ponderadas de las especies modeladas; combina especies de pruebas diferentes, en un archivo de salida única; suma los resultados de diferentes corrida; particiones de ácido nítrico/nitrato en amoniaco y sulfato disponible total base.

b) Componentes de los programas de rutina

Los programas de rutina necesitan un archivo de entrada de datos y un archivo de control para ser ejecutado, este a su vez genera un archivo de salida y datos de salida para ser usado en otro programa de rutina o visualizador.

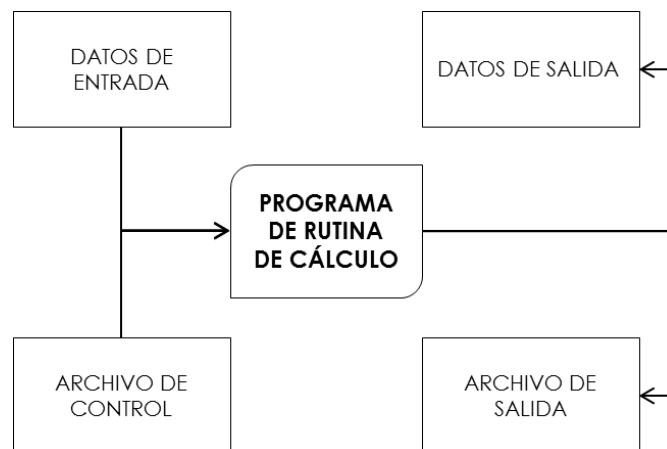


Figura 15.- Proceso de los programas de rutina y subrutina de cálculo, diagrama modificado de David Chuquer (2014).

Los programas de rutina se explican a continuación de acuerdo a lo descrito por David Chuquer (2014):

○ *Datos de entrada*

Se refieren a datos o archivos con información que va a servir para ejecutar el programa de rutina. Estos pueden ser archivos de salidas de otros programas de rutina.

○ *Archivo de control*

Es un archivo que indica al programa de rutinas y subrutinas de cálculo, las opciones de cálculo con las que se va a ejecutar, la metodología utilizada y los archivos o datos de entrada a usarse.

- *Programa de rutinas y subrutinas de cálculo*

Contiene todas las opciones matemáticas y de cálculo con el cual se va a ejecutar el con base en lo establecido en el archivo de control. Una vez procesada la información de entrada se generan dos tipos de archivos.

- *Archivo de salida*

Registra la información de los cálculos realizados por el programa y usualmente cuando hay errores, son detallados.

- *Datos de salida*

Archivo en el que se obtienen resultados para cierto lugar bajo las condiciones a las que se ejecutó. La calidad de los resultados producidos depende de la coherencia y disponibilidad de los datos de entrada y la capacidad del programa de rutina.

4.3.2 Características y descripción de los modelos CALPUFF - CALMET

4.3.2.1 CALMET

Conviene observar que CALMET es un modelo meteorológico de diagnóstico. De acuerdo en el manual del modelo, CALMET incluye un generador de vientos que utiliza los datos del viento disponibles en el dominio de modelación o la salidas del modelo MM5, WRF o ambos para generar un arreglo tridimensional regular (o malla) de las componentes vectoriales del viento a través de la interpolación espacial de estos datos con el método de análisis objetivo llamados campos de viento (López, 2009). Los insumos meteorológicos e información del terreno se presentan en la tabla 14.

CALMET trabaja con su base de cálculo en dos pasos, de acuerdo a la guía de usuario de CALMET versión 5 (Scire et al, 2000), estas dos etapas son: primero hace un cálculo del campo de vientos inicial basándose únicamente en los efectos cinemáticos del terreno y en el segundo paso ajusta ese campo de vientos a la información observada, esto es, que ajusta el campo de vientos a la información que entra de las estaciones de superficie y de radiosondeo (Luna, 2015).

El esquema de interpolación utilizado por CALMET denominado análisis objetivo permite calcular las componentes del viento sobre un arreglo equidistante de puntos de una malla

regular a partir de los datos medidos disponibles en el dominio de modelación y tiene la peculiaridad de asignarle mayor peso a las predicciones cercanas a las estaciones de mediciones, de acuerdo a lo que describe López Villegas (2009), basándose en la guía de usuario; este procedimiento se aplica independientemente en cada una de las capas verticales mediante la Ecuación 5.

$$(u, v)'_2 = \frac{\frac{(u,v)_1}{R^2} + \sum_k \frac{(u_{obs}, v_{obs})_k}{R_k^2}}{\frac{1}{R^2} + \sum \frac{1}{R_k^2}} \quad (5)$$

Donde:

$(u_{obs}, v_{obs})'_k$ = son los componentes de viento medido en la estación k,

$(u, v)_1$ = son los componentes del viento de la primera etapa en un punto particular de la malla,

$(u, v)_2$ = son los componentes del viento inicial de la segunda etapa,

R_k = es la distancia de las estación de medición k al punto de la malla,

R = es el parámetro de ponderación especificado por el usuario para el campo de vientos de la primera etapa.

4.3.2.2 Insumos del módulo de modelización meteorológica CALMET

En la tabla 14 se presentan los componentes del sistema de modelización CALMET, así como las características de los archivos de entrada, de control y de salida. En la figura 16 se muestra el diagrama de flujo del este módulo de modelización meteorológica, que presenta la información mínima para que el modelo funcione adecuadamente.

Tabla 14.- Componentes del sistema de modelización CALMET y las características de archivos de entrada, de control y de salida, y programa de rutina. Tabla modificada de Chuquer 2014, información basada en (Scire, Robe, Fernau, & Yamartino, 2000).

| Tipo de archivo | Características | Observaciones |
|-------------------------------|--|--|
| geo.dat / Archivo de entrada | Contiene toda la información topográfica y de uso de suelo | Campos grillados |
| surf.dat / Archivo de entrada | Contiene información meteorológica de velocidad y dirección del viento, cobertura de nubes, altura de base de nubes, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y código de precipitación. | Meteorología Superficial Observaciones horarias |

| | | |
|--|--|---|
| up1.dat / Archivo de entrada | Contiene información de radiosondeo de presión atmosférica, altura, temperatura, dirección del viento y velocidad del viento. | Se necesitan como mínimo dos datos al día |
| MM5.dat, WRF.dat | Información meteorológica | Las variables son tomadas de observaciones, estimaciones y modeladas. |
| calmet.inp / Archivo de control | Contiene toda la información meteorológica, mallado y ubicación del dominio de modelación, además de todas las opciones de cálculo con las que se ejecuta el modelo. | Sin observación |
| calmetl.exe / Programas con rutinas y subrutinas de cálculo. | Programa que ejecuta calmet.inp. | Sin observación |
| calmet.lst / Archivo de salida | Contiene toda la información de modelación una vez que se ha ejecutado en calmetl.exe. En caso de que existan errores en el archivo o datos de entrada este archivo lo especificará. | Sin observación |
| calmet.dat / Datos de salida | Archivo que contiene todos los datos de salida de la modelación. | Datos utilizados para CALPUFF y/o ver las variables de meteorología |

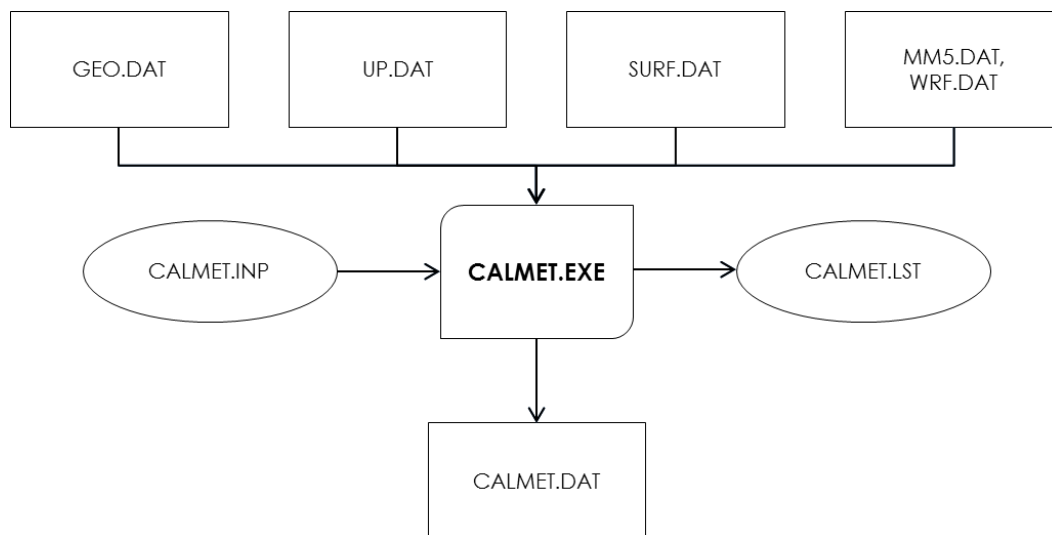


Figura 16.- Diagrama de flujo del sistema de modelización meteorológico CALMET.

4.3.2.3 CALPUFF

El modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos CALPUFF (California Puff Model). Es un modelo de nubes aisladas (puffs) del tipo Gaussiano-Lagrangiano, no estacionario de transporte y dispersión, que consiste en simular emisiones mediante un conjunto de nubes liberadas en un tiempo consecutivo. CALPUFF está diseñado para modelar

la dispersión de gases y partículas variando espacial y temporalmente las condiciones meteorológicas, asimismo simula los procesos de dispersión, transformación y remoción de los contaminantes de aire durante su transporte, en la tabla 15 se presenta los insumos necesarios para este modelo. Tiene la capacidad de calcular las concentraciones de varios contaminantes a diferentes alturas en una sola ejecución (Scire, Robe, Fernau, & Yamartino, 2000).

CALPUFF contiene algoritmos para simular los efectos físicos de la pluma de dispersión cercana a la fuente, como el arrastre de la pluma de contaminantes hacia abajo (building downwash) causado por la interacción con construcciones u obstáculos cercanos, transición de la elevación de la pluma, penetración parcial de la pluma en una capa de inversión elevada, interacciones con la topografía a una escala de submalla (López, 2009). Teniendo las características anteriores, el uso de este sistema de modelización de dispersión de contaminantes es adecuado para el objetivo del presente trabajo, principalmente es utilizado en zona de estudios con topografía compleja.

Tabla 15.- Componentes del sistema de modelización CALPUFF y las características de archivos de entrada, de control y de salida, y programa de rutina. Tabla modificada de Chuquer 2014, información basada en (Scire, Robe, Fernau, & Yamartino, 2000).

| Tipo de archivo | Características | Observaciones |
|---|--|---|
| calmet.dat / Archivo de entrada | Contiene toda la información meteorológica del dominio de la modelación. | El tiempo que se pretende modelar en dispersión debe de ser menor a lo modelado en este archivo de datos, |
| calpuff.inp / Archivo de control | Contiene información de dispersión de contaminantes, número y ubicación de fuentes, tipos y emisión de cada fuente, y más parámetros de cómo se ejecuta la modelación. | La impresión de concentración de contaminantes se indica desde aquí. |
| calpuffl.exe / Programas con rutinas y subrutinas de cálculo. | Programa que ejecuta calpuff.inp | Sin observación |

| | | |
|---------------------------------|--|-----------------|
| calpuff.lst / Archivo de salida | Contiene toda la información de modelación una vez que se ha ejecutado en calpuffl.exe. En caso de que exista errores en el archivo o datos de entrada este archivo lo especificará. | Sin observación |
| calpuff.con / Datos de salida | Archivo binario que contiene todos los datos de salida de la modelación. | Sin observación |

En la figura 17 se presenta el diagrama de flujo del sistema de modelización CALPUFF. En este sistema se puede describir a grande rasgos que se necesita el resultado de la modelización meteorológica, el cual depende diferentes fuentes de datos y además la información de la(s) fuente(s) de emisión.

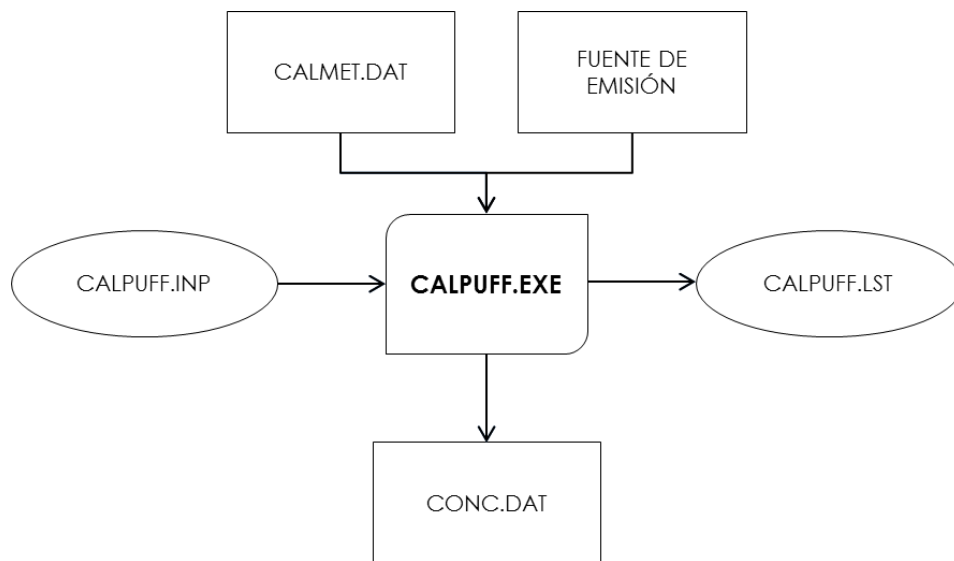


Figura 17.- Diagrama de flujo del sistema de modelización CALPUFF.

La ecuación básica para la contribución de una nube en un receptor es (Scire et al, 2000):

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} (g) * e^{\left[-\frac{d_a^2}{2\sigma_x^2}\right]} * e^{\left[-\frac{d_c^2}{2\sigma_y^2}\right]} \quad (6)$$

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{\frac{1}{2}} * \sigma_z} * \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-\left[\frac{(H_e+2nh)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \quad (7)$$

Donde

- C = es la concentración a nivel del suelo (g/m^3),
- Q = es la masa de contaminante en la nube (g),
- σ_x = es la desviación estándar de la distribución Gaussiana en dirección paralela a viento (m),
- σ_y = es la desviación estándar de la distribución Gaussiana en dirección contraria al viento (m),
- σ_z = es la desviación estándar de la distribución Gaussiana en la dirección vertical (m),
- d_a = es la distancia desde el centro de la nube al receptor en dirección paralela al viento (m),
- d_c =es la distancia desde el centro de la nube al receptor en dirección contraria al viento (m),
- g =es el término vertical (m) de la ecuación Gaussiana,
- H_e =es la altura efectiva sobre el suelo del centro de la nube; y,
- h =es la altura de la capa de mezcla (m).
- n = número de nube

Cada *nube* es seguida en su trayectoria por el dominio de modelación, evaluándose en trayecto su tamaño, ubicación y concentración a medida que es transportado por los campos de vientos. La concentración de contaminantes en un receptor dado se evalúa agregando las contribuciones de todas las nubes cercanas, usando las dos ecuaciones anteriores. En la tabla 16 se presenta algunas de las capacidades y características del sistema de modelización CALPUFF, las cuales se ajustan con los objetivos del trabajo, tales como el simular las emisiones de fuentes fijas y de contaminantes atmosféricos primarios y secundarios.

Tabla 16.- Capacidades y características del sistema de modelización CALPUFF. Tabla tomada, modificada de (López, 2009) con base en (Scire et al, 2000)

| Capacidades y características | Opciones |
|---|--|
| Emisiones de diferentes tipos de fuentes de emisiones | Emisiones constantes o variables de la categorías de: <ul style="list-style-type: none"> • Fuentes puntuales • Fuentes de línea • Fuentes de volumen • Fuentes de área |
| Uso de diferentes condiciones meteorológicas y de las emisiones en estado no estacionario | <ul style="list-style-type: none"> • Uso de variables meteorológicas (vientos y temperatura) de campos tridimensionales en formato de malla. |

| | |
|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Uso de los campos de altura de la capa de mezcla, la velocidad de fricción, la escala de la velocidad convectiva, la longitud Monin-Obukhov y la tasa de precipitación, variables en el espacio. • Uso de tasas de dispersión y turbulencia variables horizontalmente y verticalmente. • Uso de datos de la emisión y de la fuente dependientes del tiempo |
| Uso de funciones eficientes de muestreo de puff | <ul style="list-style-type: none"> • Formulación Puff integrada • Formulación Puff alargada (slug) |
| Diferentes opciones para el cálculo de los coeficientes de dispersión lateral y vertical(σ_y , σ_z) | <ul style="list-style-type: none"> • Mediciones directas de σ_y y σ_z • Valores estimados de σ_y y σ_z basados en la teoría de semejanza • Coeficientes de dispersión de Pasquill-Gifford (PG) (áreas rurales) • Coeficientes de dispersión de McElroy-Pooler (MP) (áreas urbanas) • Coeficientes de dispersión del modelo de dispersión en terreno complejo (CTDM, por sus siglas en inglés) (neutral/estable) • Formulación de Función de Densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) para la capa límite convectiva |
| Efectos en los puff por esfuerzos cortantes del viento en la vertical | <ul style="list-style-type: none"> • División de los puffs, dispersión y advección diferencial |
| Diferentes efectos de la elevación de la pluma | <ul style="list-style-type: none"> • Penetración parcial de la pluma en una capa de inversión elevada • Elevación por impulso y por flotación • Efectos en la cima de la chimenea • Cortante de viento vertical • Efectos building downwash |
| Dos esquemas de cálculo del efecto de arrastre de la pluma hacia abajo por construcciones u obstáculos cercanos (Building downwash) | <ul style="list-style-type: none"> • Método de Huber y Snyder • Método Schulman y Scire |
| Efectos del terreno complejo en el transporte de puffs a escala de submallá | <ul style="list-style-type: none"> • Módulo de flujo del CTDM • División de las líneas de flujo, Hd: • Por arriba, los puff fluyen sobre los cerros y las tasas de difusión pueden ser modificadas por la experiencia • Por debajo, los puff se desvían de puff alrededor de los cerros, se dividen y envuelven al cerro |
| Interface para el Modelo de Producción de Emisiones (MPE) | <ul style="list-style-type: none"> • Emisiones y flujos de calor variante de quemas controladas e incendios |
| Remoción seca | <ul style="list-style-type: none"> • Para partículas y gases, se cuentan con 3 opciones: • Tratamiento completo de las variaciones temporales y espaciales del depósito con un modelo de resistencias • Ciclos diurnos especificados por el usuario para cada contaminante. • Ninguna remoción |
| Efectos de interacción costera y sobre agua | <ul style="list-style-type: none"> • Parámetros de capa límite sobre agua • Cambios abruptos en las condiciones meteorológicas, dispersión de la pluma en los límites costeros. • Fumigación de la pluma. |

| | |
|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> Opciones para introducir a escala de submalla campos límites internas térmicas (TIBLs) dentro de las celdas de malla que delimita la costa |
| Cuatro opciones de transformación química | <p>Mecanismo químico de pseudos-primer orden para SO₂, SO₄</p> <ul style="list-style-type: none"> 2 NO_x, HNO₃ y NO₃₋₁ (Método MESOPUFF II). <p>Mecanismos químicos de pseudo primer orden para SO₂, SO₄</p> <ul style="list-style-type: none"> 2, NO, NO₂, HNO₃ y NO₃₋₁ (Método RIVAD/ARM3). <p>Tasas de transformación de los ciclos diurnos especificados por el usuario. No hay conversión química.</p> |
| Remoción húmeda | <ul style="list-style-type: none"> Aproximación de los coeficientes de lavado Tasa de remoción en función de la intensidad de precipitación y del tipo de precipitación |

4.3.3 Preparación de escenarios: modelización CALMET-CALPUFF.

4.3.3.1 Delimitación del área de estudio, topografía y uso de suelo

a) Área de estudio y mallado.

Para la preparación de los escenarios se procedió a delimitar la mayor superficie posible, así para el área de estudio se tuvo que recopilar información respecto a topografía, usos de suelo que caracteriza a la zona. El dato de las coordenadas de origen está dado en el sistema WGS-84⁴. Las coordenadas de referencia son las siguientes: Este 489 km; Norte 2057 km. Esta área de estudio se dividió en un mallado de 115 celdas (X o Este) y 115 (Y o Norte) con espaciado de 1 km. Las coordenadas que delimitan a la zona de estudio son las siguientes:

Tabla 17.- Coordenadas de la zona de estudio a simular en el sistema de modelización.

| Punto | Coordenada Este | Coordenada Norte | Zona |
|-------|-----------------|------------------|------|
| 1 | 489000.00 m E | 2172000.00 m N | 14 Q |
| 2 | 604000.01 m E | 2172000.00 m N | 14 Q |
| 3 | 489000.00 m E | 2057000.00 m N | 14 Q |
| 4 | 604000.05 m E | 2056999.96 m N | 14 |

b) Topografía

Con la recomendación en su trabajo de tesis de Chuquer (2014) y a la página del sistema de modelización CALPUFF, <http://www.src.com/calpuff/data/>, la base de datos de la topografía

⁴ Es un sistema de coordenadas geográficas mundial que permite localizar cualquier punto de la Tierra (sin necesitar otro de referencia) por medio de tres unidades dadas. WGS84 son las siglas en inglés de World Geodetic System 84 que significa Sistema Geodésico Mundial 1984.

del área de estudio se obtuvo de la página web del departamento de Inspección Geológica de los Estados Unidos (USGS) mediante el archivo w100n40.dem.zip en el formato GTOPO30 (USGS, 2012). GTOPO30 es un modelo digital mundial de elevación (DEM) con un espaciado de malla horizontal de 30 arcsegundos (aproximadamente 900 metros) (SRC, 2016). El resultado de la construcción de los escenarios en cuestión de topografía se observa en la figura 18.

c) Uso del suelo

La información de uso de suelo del área de estudio se obtuvo del archivo glc2000_v1_1 de formato GLCC de la página de SRC http://www.src.com/calpuff/data/land_use.html. La base de datos Global de Características de Cobertura de Suelo (GLCC), contiene información de uso de suelo con una resolución de 1km. Su clasificación comprende de 100 grupos, un ejemplo de ellos, el valor uno corresponde a un tipo de suelo urbano, mientras que el valor 15 se refiere al agua de mar. En la figura 18 se visualiza la topografía en 3D de la zona de estudio con un mallado de 1 km, en la figura 19 se combina la topografía en 2D con el uso de suelo.

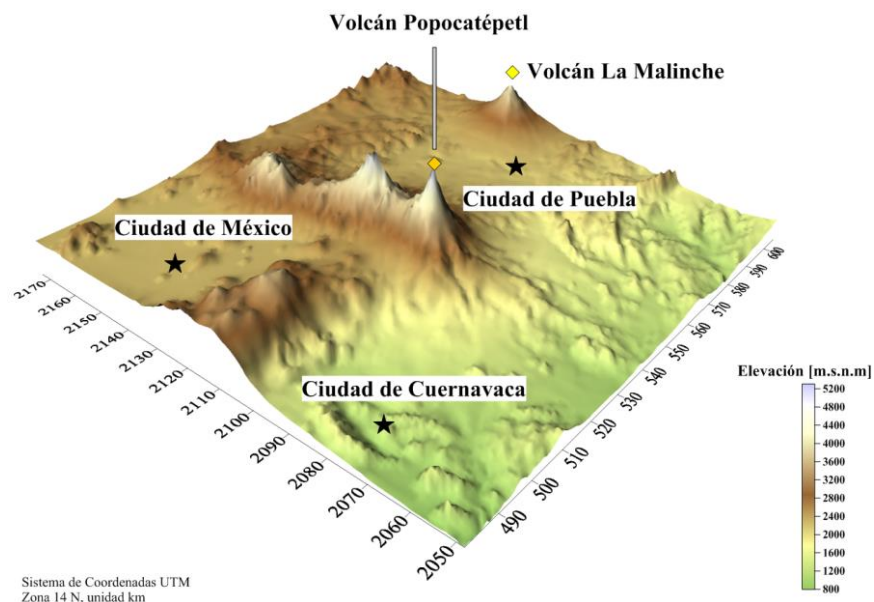


Figura 18.- Topografía de la zona de estudio de 115 x 115 km, con un mallado de 1 km. Base de datos del Modelo Digital de Elevación del GTOPO30 (USGS, 2012)

En el proceso de modelación se genera lu.dat que contiene la información de los valores otorgados para la clasificación de esta base de datos. Como antes mencionado el programa de rutina Makegeo.exe, genera un archivo (geo.dat) que contiene toda la información topográfica y de uso del suelo y que puede usarse en el programa de modelización meteorológica CALMET.

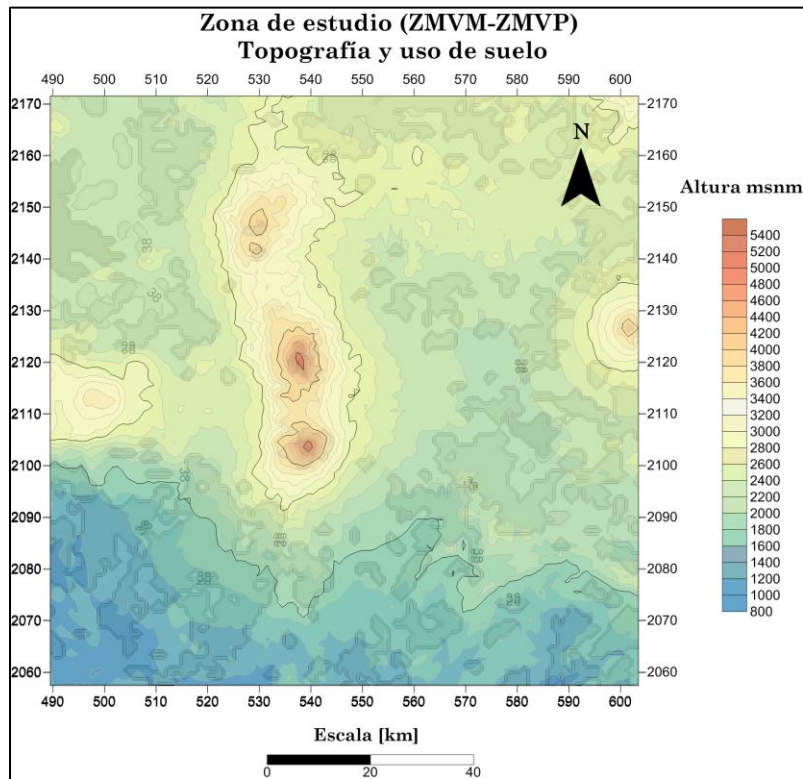


Figura 19.-Visualización del archivo que contiene la información de topografía y uso de suelo. Este es usado en el sistema de modelización meteorológica CALMET.

4.3.3.2 Base de datos de variables meteorológicas

En el pre procesamiento del sistema de modelización meteorológica CALMET, es importante generar un archivo de superficie que contenga información meteorológica de estaciones, en el cual como mínimo debe de tener las siguientes variables (promedios horarios): temperatura [°C], precipitación [mm], presión [mb], humedad relativa [%], dirección de viento [°] y velocidad de viento [m/s]. También un requerimiento mínimo es el archivo *up1.dat*, el cual contiene la información de una estación de radiosondeo ubicada en la estación de México, D.F. (ID: 76679). En la tabla 18 se presentan las estaciones meteorológicas

superficiales y una en la vertical utilizadas en modelo, mientras que en la figura 20 se presenta su ubicación en la zona de estudio.

Tabla 18.-Estaciones meteorológicas de las cuales se tomaron las observaciones mínimas necesarias para simular en el sistema de modelización meteorológica CALMET.

| N° | Nombre | Ubicación (Estado) | Nick | ID | Base de datos de | E [km] | N [km] | Zona | msnm |
|----|-------------------|--------------------|------|-------|--------------------|---------|----------|------|------|
| 1 | Acolman | México | ACO | 1201 | SIMAT ⁵ | 509.223 | 2171.151 | 14Q | 2269 |
| 2 | San Agustín | México | SAG | 1202 | SIMAT | 496.823 | 2159.812 | 14Q | 2239 |
| 3 | Montecillo | México | MON | 1203 | SIMAT | 510.196 | 2151.776 | 14Q | 2254 |
| 4 | Neza | México | NEZ | 1204 | SIMAT | 497.038 | 2144.394 | 14Q | 2237 |
| 5 | Tláhuac | Cd. de México | TAH | 1205 | SIMAT | 498.890 | 2128.098 | 14Q | 2245 |
| 6 | Chalco | México | CHO | 1206 | SIMAT | 511.968 | 2130.369 | 14Q | 2246 |
| 7 | Tepoztlán | Morelos | TPO | 1207 | SMN ⁶ | 490.093 | 2098.875 | 14Q | 2075 |
| 8 | Tlaxcala | Tlaxcala | TLA | 1208 | SMN | 580.282 | 2134.552 | 14Q | 2304 |
| 9 | Ixta-Popo | Puebla | IXT | 1209 | SMN | 538.540 | 2108.678 | 14Q | 3865 |
| 10 | Izúca | Puebla | IZU | 1210 | SMN | 556.378 | 2056.739 | 14Q | 1320 |
| 11 | Cholula | Puebla | CHL | 1211 | RAMM ⁷ | 573.238 | 2106.596 | 14Q | 2211 |
| 12 | Centro | Puebla | CEN | 1212 | RAMM | 584.657 | 2105.658 | 14Q | 2190 |
| 13 | Africam | Puebla | AFR | 1213 | RAMM | 591.187 | 2093.926 | 14Q | 2210 |
| 14 | Ocuituco | Morelos | OCU | 1215 | IMTA ⁸ | 519.023 | 2086.630 | 14Q | 1737 |
| 15 | El Hospital | Morelos | HOS | 1216 | IMTA | 501.254 | 2082.228 | 14Q | 1237 |
| 16 | Jonatepec | Morelos | JON | 1217 | IMTA | 517.745 | 2067.321 | 14Q | 1363 |
| 17 | AIBJ ⁹ | Cd. de México | ACM | 76679 | WU ¹⁰ | 492.425 | 2148.853 | 14Q | 2231 |

⁵ **SIMAT**: Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, a través de su portal de internet <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBhnmM=%27>

⁶ **SMN**: Servicio Meteorológico Nacional. (Turno No. 1385 y 581)

⁷ **RAMM**: Red Automática de Monitoreo Meteorológico del Valle de Puebla de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) a través de su portal de internet <http://urban.diau.buap.mx/ramm.html>

⁸ **IMTA**: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, a través de su portal de internet <http://galileo.imta.mx/mx/index.php>

⁹ Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (Benito Juárez), es importante señalar que la base de datos se genera en la estación de México, D.F. (ID: 76679), a unos 15 km del aeropuerto.

¹⁰ **WU**: Universidad de Wyoming a través de su portal de internet <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

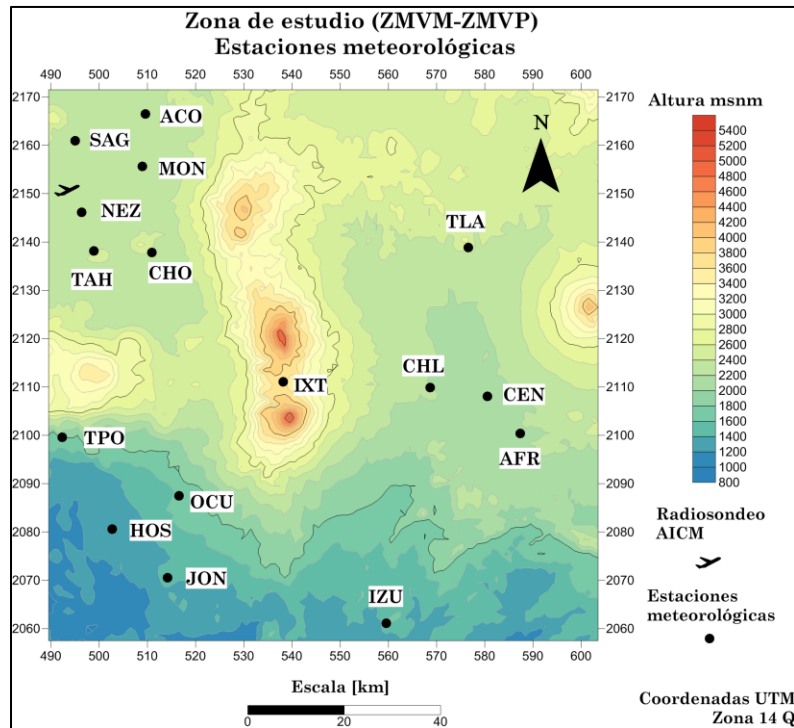


Figura 20.- Ubicación en la zona de estudio de las estaciones meteorológicas usadas en el sistema de modelización.

4.3.3.3 Observaciones para la ejecución en el sistema de modelización CALPUFF

1) Con respecto al módulo CALMET

En el módulo de CALMET, un diseño importante en el archivo de control este módulo es asignar los valores en eje z, que en combinación del mallado, genera un volumen de cálculo mejor conocido como parcelas. Los niveles en eje z se fueron en total 11 con las siguientes alturas: 0m, 20m, 40m, 80m, 160m, 300m, 600m, 1000m, 1500m, 2200m, 5000m. Dentro del archivo de control existe un dato por default utilizado como la máxima altura de capa de mezcla que es de 3000 m, pero acuerdo al análisis sobre la altura máxima de capa de mezcla en la ZMVM, se optó por modificar el valor a 5000 m.

2) Con respecto al módulo CALPUFF

Dentro de las emisiones modeladas, se tomó de referencia emisiones puntuales hipotéticas (chimeneas). Dentro de las especies modeladas se tomaron en cuenta las siguientes especies químicas: SO_2 , SO_4 , NO , NO_2 , HNO_3 , NO_3 , PM_{10} . De acuerdo al objetivo del estudio, solo se modeló el SO_2 , por las características ya antes mencionadas. En la siguiente

tabla (tabla 19) se muestran los parámetros generales tomados para la emisión y las coordenadas de las fuentes, mientras que en la figura 21 se observa la ubicación estratégica para observar el posible transporte de contaminantes atmosféricos entre las zonas metropolitanas del presente estudio.

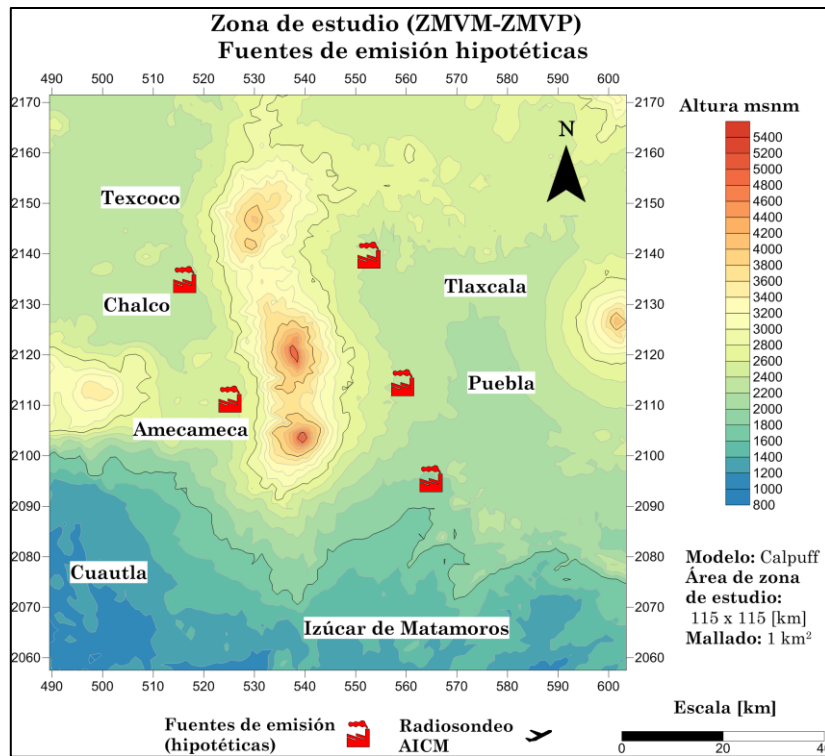


Figura 21.- Ubicación de las fuentes hipotéticas de emisión de contaminantes atmosféricos en la zona de estudio.

Tabla 19.- Parámetros generales tomados para la emisión y las coordenadas de las fuentes de emisión hipotéticas.

| N° | X [km] | Y [km] | Altura de chimenea [m] | Elevación de la base [m] | Diámetro de chimenea [m] | Velocidad de salida [m/s] | Temperatura de salida [K] |
|----|--------|--------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 515.5 | 2132.3 | 40.0 | 160.0 | 5.0 | 6.0 | 420.0 |
| 2 | 553.8 | 2133.6 | 40.0 | 160.0 | 5.0 | 6.0 | 420.0 |
| 3 | 526.0 | 2113.7 | 40.0 | 160.0 | 5.0 | 6.0 | 420.0 |
| 4 | 560.0 | 2116.9 | 40.0 | 160.0 | 5.0 | 6.0 | 420.0 |
| 5 | 565.9 | 2099.5 | 40.0 | 160.0 | 5.0 | 6.0 | 420.0 |

4.3.4. Preparación de escenarios: modelización WRF-CALPUFF

Como se mencionó CALMET permite la incorporación de resultados de modelos meteorológicos de pronóstico de escala mayor como el modelo MM5. Este tipo de información puede ser incorporada de tres modos (López, 2009):

1) Como iniciador del campo de viento

El campo de viento final reflejará las alteraciones al campo de escala mayor en los niveles próximos a la superficie, por efecto del relieve y la influencia de las observaciones de superficie y de altura.

2) Como campo de vientos ya ajustado a los efectos del relieve

El procedimiento de cálculo no ejecuta las rutinas que introducen las perturbaciones debidas al relieve, pues supone que el campo inicial ya considera esos efectos. De este modo el campo inicial sólo será perturbado por la influencia de las observaciones de superficie y de altura.

3) Como pseudo observaciones

Consiste en que el campo resultado final se construye considerando los resultados del modelo de escala mayor a partir de pseudo observaciones, junto con las observaciones de superficie y altura. La desventaja de este esquema es que si el modelo de escala mayor, por su resolución no captura la influencia de los accidentes del relieve, el campo de vientos final tampoco lo hará.

El modelo numérico Advanced Research Weather Research and Forecasting Model (WRF-ARW), es un modelo de sexta generación, de mesoescala no hidrostático, que puede ser usado tanto para el pronóstico operativo del estado del tiempo como para hacer investigación. Varias instituciones apoyan el desarrollo de este modelo con el objetivo de lograr un avance en el entendimiento de los procesos atmosféricos y la predicción del estado del tiempo (Skamarock, y otros, 2008). Las principales instituciones encargadas de su desarrollo son (Wang, y otros, 2008):

- National Center for Atmospheric Research (NCAR),
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA),
- National Center for Environmental Prediction (NCEP),
- Earth System Research Laboratory (ESRL),
- Air Force Weather Agency (AFWA),
- Naval Research Laboratory (NRL),
- Center for Analysis and Prediction Storms (CAPS) y
- Federal Aviation Administration (FAA)

El modelo WRF-ARW contiene varios programas de inicialización, un programa de integración numérica y un programa de anidamiento. De acuerdo con las necesidades del usuario el modelo permite ya sea correr casos idealizados, reales o reales con análisis variacional:

- a) Si se planea correr casos idealizados, se necesita *Modelo WRF ARW+ PostProcessing*
- b) Si se planea correr casos reales, se necesita *WPS + Modelo WRF ARW+ PostProcessing*
- c) Si se planea correr casos reales con análisis variacional, se necesita *WPS +WRF-Var + Modelo WRF ARW+ PostProcessing*

4.3.4.1 Componentes del sistema WRF

El sistema WRF consiste de los siguientes componentes:

- a) Sistema de Preprocesamiento (WPS)
- b) Modelo WRF-ARW
- c) WRF
- d) Post Procesamiento y herramientas de visualización

A continuación se presenta el diagrama de flujo del sistema WRF y la descripción de los módulos mencionados (figura 22):

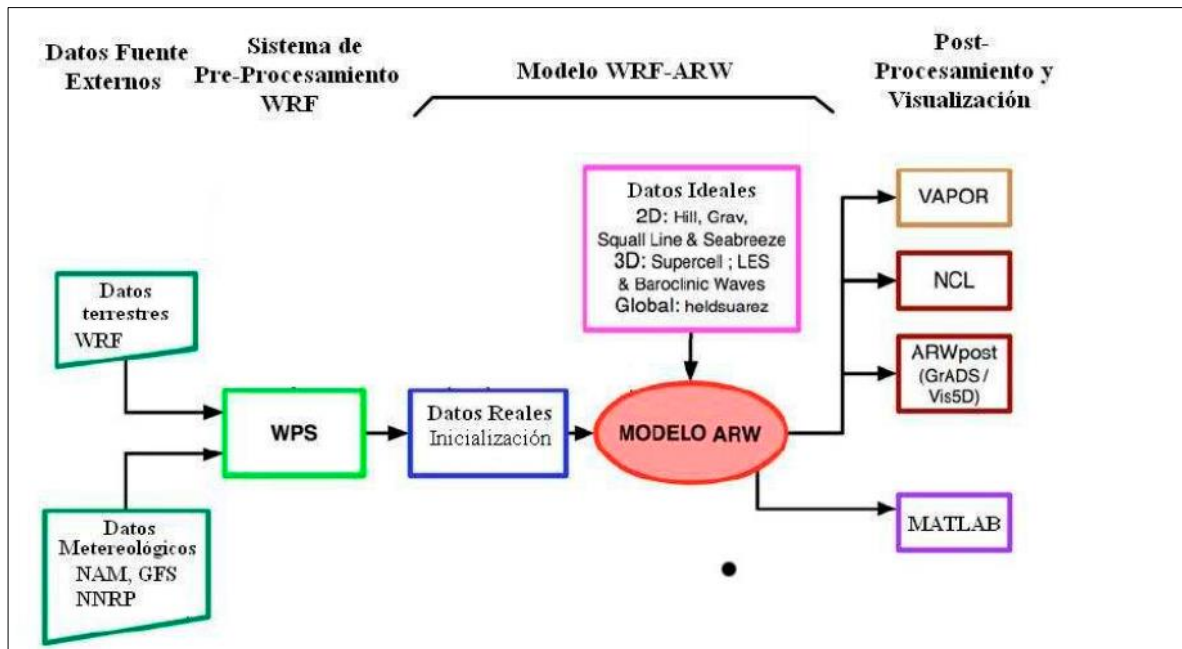


Figura 22.- Diagrama de flujo del sistema de modelización meteorológico WRF, imagen tomada de (Cipagauta, 2014), imagen original: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/>

a) El Sistema de Preprocesamiento (WPS)

Este programa es usado primariamente para simulaciones de casos reales. Sus funciones básicamente son:

1. Definición del dominio de la simulación,
2. Interpolación de datos terrestres al dominio de la simulación,
3. Interpolación de datos meteorológicos desde otro modelo a este dominio de simulación.

El WPS es un conjunto de 3 programas (ver figura 23) cuyo papel colectivo es preparar la entrada para las simulaciones de datos reales (Wang et al., 2008). A continuación se hace una pequeña descripción de dichos programas:

- Geogrid:

Este módulo define el dominio de la simulación e interpola datos geográficos fijos a las mallas. Los dominios de la simulación se definen usando la información específica de cada usuario en el registro “share” y “geogrid” en el archivo WPS namelist. Además de calcular la latitud y la longitud en cada punto de la malla, geogrid interpola categoría de suelos, categoría

de usos de la tierra, altura del terreno, fracción de vegetación mensual y albedo mensual. Los datos globales para cada uno de estos campos son proporcionados a través de la página del WRF (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/>).

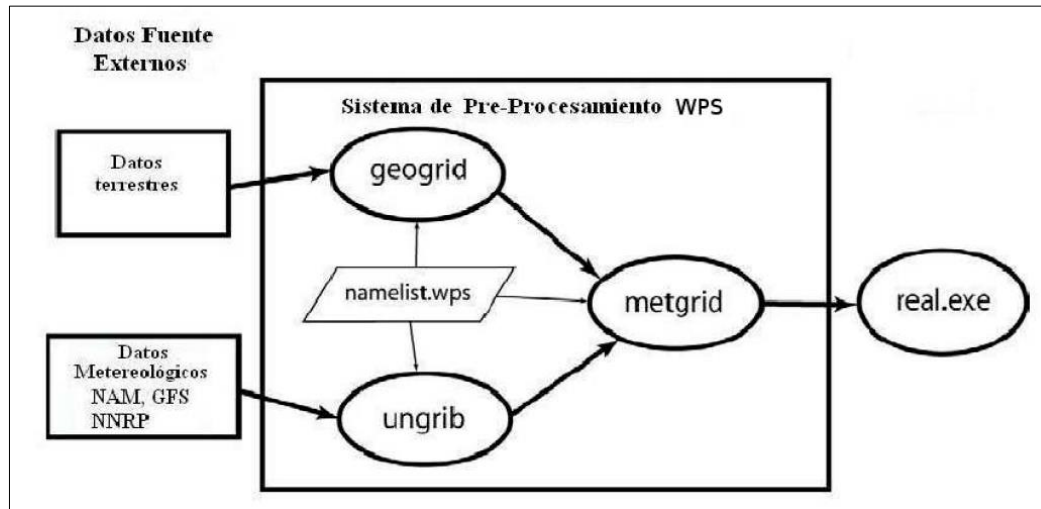


Figura 23.- Diagrama de flujo del sistema de preprocesamiento WPS, tomada de (Cipagauta, 2014), adaptada de (Skamarock, y otros, 2008), imagen original de http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/users_guide_chap6.htm

- Ungrib:

Este módulo extrae campos meteorológicos de archivos con formato GRIB y los escribe en un formato simple. Los archivos GRIB contienen campos meteorológicos y son típicamente de otro modelo regional o global, tal como los modelos NCEP'S NAMo GFS. Estos archivos GRIB contienen más campos que no son necesarios para inicializar el WRF.

- Metgrib:

Este módulo interpola horizontalmente los datos meteorológicos de formato intermedio que son extraídos por el programa ungrid en el dominio de la simulación definida por el programa geogrid. La salida del metgrid interpolada es utilizada por el programa real.exe. Los rangos de datos que son interpolados por metgrid son definidos en el "share" del archivo namelist.wps y los rangos de datos deben ser especificados individualmente en el namelist para cada dominio de simulación.

b) Modelo WRF-ARW

En esta parte es donde se realiza la modelización meteorológica, este modelo tiene dos clases de simulación, una inicialización ideal y otra que usa datos reales. De acuerdo con la guía de usuario de WRF, menciona que la simulación inicial tiene un archivo de condición inicial para el modelo WRF de un sondeo existente en 1D o 2D y supone una orografía simplificada. Los datos reales usualmente requieren un preprocesamiento mediante el paquete WPS, el cual proporciona cada campo atmosférico y estacionario apropiado para buscar la solución de malla para el modelo. Los programas ideal.exe y real.exe nunca son usados juntos y se ejecutan justo antes de compilar el modelo WRF (Cipagauta, 2014).

c) WRF-Var

Este es un programa opcional que se encarga de introducir observaciones a los análisis interpolados que fueron creados con el WPS (por ejemplo, datos de superficie, radio-sondeos, datos de radar, etc.), generando así una actualización en las condiciones iniciales que utilizará el modelo (Cipagauta, 2014).

d) Post Procesamiento y herramientas de visualización

Esta componente es independiente de los códigos del modelo y queda a consideración del usuario. Existe una gran cantidad de herramientas gráficas que pueden ser utilizadas para visualizar las simulaciones numéricas. Algunas de estas opciones son: NCAR Command Language (NCL), Read/Interpolate/Plot (RIP4), Grid Analysis and Display System (GrADS), Vis5D, Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers (VAPOR), General Equilibrium Modelling Software (GEMPAK) y MATrix LABORatory (MATLAB) (Cipagauta, 2014). En el presente trabajo en el anexo 3 se presentan algunas de las visualizaciones, en OpenGrads y Vapor.

4.3.4.2 Configuración de WRF para la zona de estudio.

La configuración del sistema se basó en estudios anteriores, los cuales tienen diferentes objetivos respecto al presente, así como en el recurso computacional disponible y el tiempo de ejecución (tabla 20).

Tabla 20.- Investigaciones de contaminación atmosférica utilizando WRF en la ZMVM.

| Nombre del artículo | Autores | Año | Resolución, dominio y niveles verticales | | | Base de datos |
|---|--|------|--|------|----|---------------|
| | | | | | | |
| Comparisons of WRF/Chem simulated O ₃ concentrations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the MILAGRO period | Yongxin Zhang, Manvendra K. Dubey b | 2009 | 1° | 3 km | 31 | NCEP |
| Characterizations of chemical oxidants in Mexico City: A regional chemical dynamical model (WRF-Chem) study | Xuexi Tiea,, Sasha Madronicha, GuoHui Lib, Zhuming Yingc, Renyi Zhangb, Agustin R. García, Julia Lee-Taylora, Yubao Liua | 2007 | NM | 3 km | 31 | NCEP |
| Sensitivity of ozone concentrations to diurnal variations of surface emissions in Mexico City: A WRF/Chem modeling study | Zhuming Ying, Xuexi Tie , Guohui Li | 2009 | 1° | 6 km | 26 | NCAR |
| The influence of the Tula, Hidalgo complex on the air quality of Mexico City Metropolitan Area. | García, J., García, J., Jazcilevich, A., & Ruiz, L. | 2014 | 32 km. | 3 km | 24 | NARR |
| Simulation of regional dust and its effect on photochemistry min the Mexico City area during MILAGRO experiment | Zhuming Ying, Xuexi Tie, Sasha Madronich, Guohui Li, Steven Massie | 2011 | NE | 6 km | NE | NCEP |
| Impacts of Stabilized Criegee Intermediates, surface uptake processes and higher aromatic secondary organic aerosol yields on predicted PM _{2.5} concentrations in the Mexico City Metropolitan Zone | Qi Ying , Iris V. Cureño, Gang Chen, Sajjad Ali, Hongliang Zhang, Meagan Malloy, Humberto A. Bravo, Rodolfo Sosa | 2014 | 32 km. | NE | 18 | NARR |

NM: No mencionado.

Con base en lo anterior se determinaron las siguientes características para la ejecución del sistema de modelización meteorológica WRF: limitación del área de estudio, la base de datos y configuración de los niveles en la vertical, las cuales se comentan enseguida.

4.3.4.3 Delimitación del área de estudio (dominio)

De acuerdo con lo visto anteriormente, es necesario definir el dominio de simulación, el cual se delimitó de la siguiente manera (ver tabla 21 y figura 27):

- Dominios: 4.
- Proyección de mapa tipo: Lambert
- Coordenadas de referencia central: latitud 19.124, longitud 98.556.
- Coordenadas de referencia de inicio: Truelat 19.124, Stand lon = -101.608

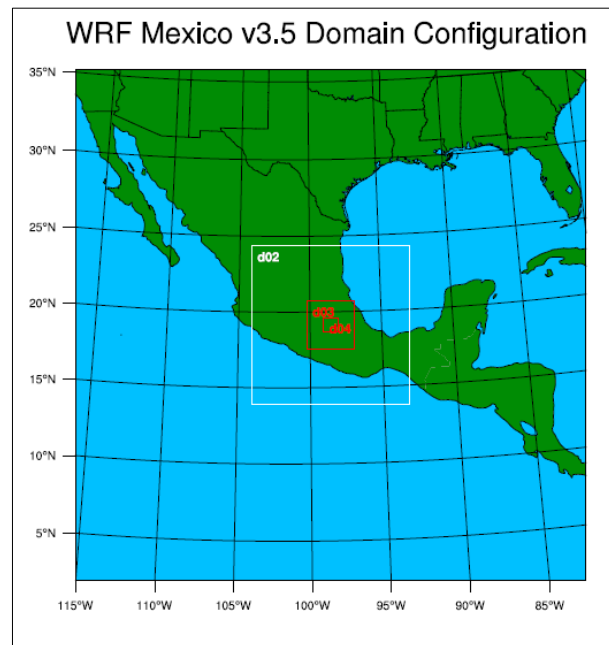


Figura 24.- Configuración del dominio, (WRF v3.5), 4 dominios. El dominio 1, contiene información meteorológica de todo el territorio nacional a 27 km, resaltando que esta información toma en cuenta los fenómenos que suceden tanto en el Golfo de México así como parte del Océano Pacífico.

Tabla 21.- Características de los dominios (WRF v3.5)

| Característica | Dominio | | | |
|--|---------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| ID | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Ratio | 1 | 3 | 3 | 3 |
| Mallado | 168 | 148 | 136 | 124 |
| Distancia | 27 km | 9 km | 3 km | 1 km |
| Resolución de los datos geográficos | 10m | 5 m | 2 m | 30 s |

4.3.4.4 Base de datos de variables meteorológicas

Los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental (NCEP por sus siglas en inglés) cuentan con un Sistema de Pronóstico Climático (CFS por sus siglas en inglés), tomado 4 veces al día ((0000, 0600, 1200, y1800 UTC). El NCEP actualizó su versión de su sistema operacional (CFS versión 2) el 30 de marzo de 2011.

Este mismo modelo fue utilizado para crear el NCEP Sistema de Re análisis de Pronostico Climático (CFSR por sus siglas en ingles), y su propósito es extender este conjunto de datos al CFSR. Esta base de datos contiene mediciones de variables meteorológicas analizadas y de pronóstico, datos promedio de 6 horas de información atmosférica, oceánica y de superficie. Está disponible en diferentes resoluciones horizontales (0.2, 0.5, 1.0, y 2.5 grados).

Para este proyecto se simularon los días seleccionados del análisis estadístico que se mencionó en la metodología. La base de datos se tomó del NCEP del sistema CFSv2 en colaboración del departamento de comercio (DOC), Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), Servicio Nacional de Clima (NES) y el Centro de Modelización Ambiental (EMC), de los Estados Unidos de América (Saha, et al., 2011). De esta base de datos se trabajó con la base de datos ds083.2 (<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html#sfol-wl/data/ds083.2?g=2201>) (NOOA, 2016) con las siguientes variables meteorológicas (ver tabla 22):

Tabla 22.- Ejemplo de variables que contiene la base de datos ds083.2

| Variable | Unidad |
|---|--------|
| Temperatura de rocío | K |
| Altura geopotencial | gpm |
| Altura de la Capa Límite Planetaria (CLP) | m |
| Presión | Pa |
| Velocidad vertical (presión) | Pa s-1 |
| Presión atmosférica | Pa |
| u-componente de viento | m s-1 |
| v-componente de viento | m s-1 |
| Temperatura | K |
| Humedad relativa | % |

4.3.4.5 Configuración de los niveles en la vertical.

Por la complejidad del terreno que caracteriza el área de estudio, se optó por configurar a 50 niveles en la vertical. En la figura 25 se presenta el comportamiento de la altura con

respecto a la presión y en la tabla 23 los valores para cada nivel, por lo cual se aumentó la resolución.

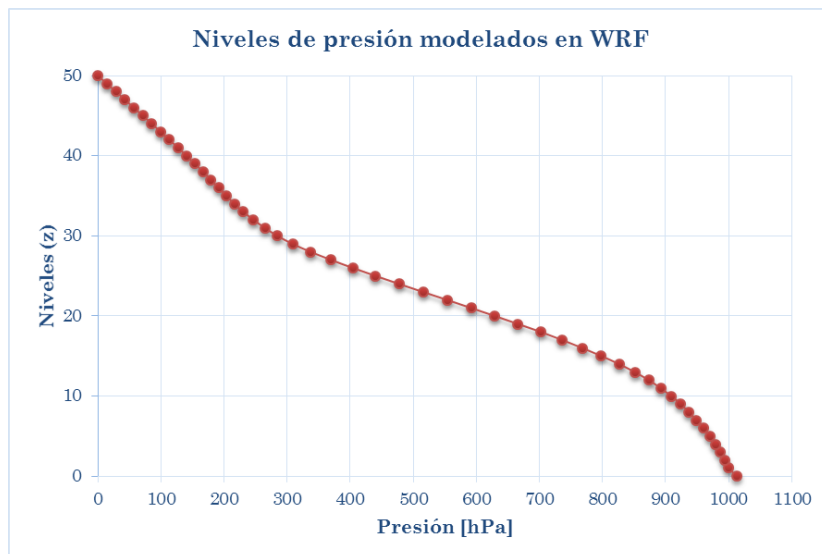


Figura 25.- Niveles en la vertical modelados (WRF v3.5)

Tabla 23.- Niveles y presión en la vertical. (WRF v3.5)

| N. | hPa | N. | hPa | N. | hPa | N. | hPa | N. | hPa |
|----|------|----|-----|----|-------|----|-------|----|-------|
| 1 | 1000 | 11 | 892 | 21 | 591.5 | 31 | 264.5 | 41 | 127.2 |
| 2 | 994 | 12 | 873 | 22 | 553.6 | 32 | 246.5 | 42 | 113.4 |
| 3 | 987 | 13 | 851 | 23 | 515.3 | 33 | 230.5 | 43 | 99.5 |
| 4 | 979 | 14 | 826 | 24 | 477.3 | 34 | 216.5 | 44 | 85.5 |
| 5 | 970 | 15 | 798 | 25 | 440 | 35 | 203.5 | 45 | 71.3 |
| 6 | 960 | 16 | 768 | 26 | 404 | 36 | 191.5 | 46 | 57.1 |
| 7 | 949 | 17 | 736 | 27 | 369.5 | 37 | 179.2 | 47 | 42.9 |
| 8 | 937 | 18 | 702 | 28 | 337.5 | 38 | 166.7 | 48 | 28.7 |
| 9 | 924 | 19 | 666 | 29 | 308.5 | 39 | 153.9 | 49 | 14.5 |
| 10 | 909 | 20 | 629 | 30 | 284.5 | 40 | 140.7 | 50 | 0 |

Los archivos de entrada de los modelos meteorológicos (CALMET y WRF) así como el de calidad del aire CALPUFF, se adjuntan en el anexo 5 del presente trabajo. Estos archivos contienen la información de la caracterización y parámetros de terrenos, meteorológicos y emisiones utilizados en el modelado matemático.

Estos modelos se corrieron en el Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS) de Barcelona, en el supercomputador MareNostrum III con la disponibilidad de 128 procesadores.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo se divide en tres subcapítulos, basados en los tres objetivos específicos propuestos en este trabajo. En la tabla 24 se muestra el nombre, la meta y los resultados generales de cada uno de estos.

Tabla 24.- Subcapítulos del capítulo 4 (Resultados y discusión)

| Subcap. | Nombre | Meta | Resultado(s) |
|---------|---|---|---|
| 5.1 | Obtención, procesamiento, validación y evaluación de los datos de monitoreo de la calidad del aire | Validar los datos y evaluar la calidad del aire de la ciudad de Puebla | Se incumplió para el año 2012, 46 días para O_3 y en 143 días para PM_{10} |
| 5.2 | Análisis estadístico de correlación de datos, para localizar los posibles días de contaminación atmosférica de la ZMVM a la ZMVP. | Encontrar los posibles días de transporte de contaminantes atmosféricos de la ZMVM a la ZMVP. | 14, 19, 30, y 31 marzo; 19 y 27 de mayo de 2012; días de posible transporte. |
| 5.3 | Modelado de los días seleccionados. | Corroborar el análisis estadístico | Se confirmó el análisis estadístico con el modelo CALPUFF, el cual muestra un aparente transporte entre las ZM. |

5.1 Obtención, procesamiento, validación y evaluación de los datos de monitoreo de la calidad del aire

Se hizo una visita a la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico de Puebla, con el objetivo de conocer el funcionamiento, infraestructura y la operación de esta red de monitoreo. En la figura 26 se presenta dos fotografías de la visita.



Figura 26.- Visita a la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico de Puebla. La fotografía superior fue tomada en la oficina general de la REMA de Puebla, mientras que la fotografía inferior es la estación de monitoreo Velódromo.

Se confirmó que las instalaciones de la red de monitoreo cuenta con equipos de medición de contaminantes atmosféricos que recomienda la OMS, conocidos también como contaminantes criterio. A pesar de que cuentan equipos de medición de variables meteorológicas cada una de las estaciones de la REMA de Puebla, en el tiempo de la visita no se encontraban en operación.

5.1.1 Disponibilidad y disposición de los datos del sistema de monitoreo atmosférico de la ciudad de Puebla

Se obtuvo la base de datos de las cinco estaciones de la Red Monitoreo Atmosférico de Puebla desde el año que inició operación (2001) hasta el año 2012. La información que se

proporcionó fue de los siguientes contaminantes criterio: partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) y menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), Ozono (O_3), bióxido de azufre (SO_2), bióxido de nitrógeno (NO_2) y monóxido de carbono (CO).

5.1.2 Suficiencia de los datos del sistema de monitoreo atmosférico de la ciudad de Puebla.

En la base de datos de las mediciones de la concentración de los contaminantes atmosféricos, se identificaron tres tipos de valores en las celdas en el archivo de Excel: numéricos, de texto y fechas. Una vez identificados los tipos de valores y su distribución también se reconocieron las unidades de las concentraciones del monitoreo atmosférico: partes por millón (ppm), partes por billón (ppb) y microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$).

En la etapa de la limpieza de los datos, se encontraron banderas de valores numéricos: -99.999 y valores menores a 0.000, en el primer caso corresponde a una bandera que no tuvo mediciones y en el segundo caso, significa que hubo un error en el momento de medición, muy probablemente al no adecuado mantenimiento o de calibración de los equipos de medición del sistema de monitoreo atmosférico del Estado de Puebla.

En la tabla 25 se presenta la suficiencia de la base de datos proporcionados por la REMA de Puebla (2001-2006), en este primer bloque, se seleccionó como base de datos más completa la del año de 2003 para su análisis estadístico, a pesar de que la base de datos del año de 2001 en todas las estaciones cumplieron con el criterio de suficiencia del 75 %, también se tomó como requisito que el año fuera el más reciente posible.

Se puede observar que existe una tendencia a no cumplir con la norma de suficiencia conforme pasan los años, se desconoce el motivo pero generalmente se debe a problemas administrativos, de mantenimiento o falla del equipo.

Tabla 25.- Tabla de suficiencia para la base de datos proporcionados por la REMA de Puebla (2001-2006).

| Suficiencia 75% de datos | | | | | | |
|--------------------------|-------------|----------------|-----------------|-----------------|------|------------------|
| Año | Estación | O ₃ | NO ₂ | SO ₂ | CO | PM ₁₀ |
| 2001 | Tecnológico | 88.6 | 88.5 | 81.0 | 88.4 | 81.0 |
| | Ninfas | 95.4 | 95.7 | 94.9 | 96.0 | 89.4 |
| | Serdán | 87.6 | 86.8 | 86.9 | 85.7 | 89.8 |
| | Agua Santa | 96.7 | 96.7 | 95.5 | 95.5 | 98.2 |
| | Velódromo | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2002 | Tecnológico | 95.7 | 91.6 | 93.4 | 94.9 | 98.0 |
| | Ninfas | 85.8 | 81.3 | 89.8 | 93.7 | 77.2 |
| | Serdán | 87.5 | 71.8 | 92.5 | 66.7 | 73.8 |
| | Agua Santa | 92.4 | 91.1 | 84.1 | 91.5 | 98.0 |
| | Velódromo | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2003 | Tecnológico | 97.2 | 59.1 | 94.3 | 99.1 | 98.7 |
| | Ninfas | 78.8 | 81.6 | 92.0 | 93.9 | 81.6 |
| | Serdán | 94.2 | 96.2 | 97.7 | 95.1 | 87.6 |
| | Agua Santa | 95.5 | 85.5 | 88.7 | 92.1 | 96.1 |
| | Velódromo | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2004 | Tecnológico | 98.5 | 73.1 | 98.9 | 98.2 | 99.6 |
| | Ninfas | 94.3 | 80.3 | 98.1 | 98.9 | 86.7 |
| | Serdán | 75.1 | 71.9 | 77.4 | 79.8 | 73.6 |
| | Agua Santa | 90.6 | 96.6 | 91.9 | 99.4 | 98.0 |
| | Velódromo | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2005 | Tecnológico | 87.4 | 20.3 | 86.3 | 80.0 | 89.9 |
| | Ninfas | 85.6 | 60.7 | 93.9 | 75.8 | 69.5 |
| | Serdán | 90.5 | 61.9 | 75.7 | 84.8 | 53.6 |
| | Agua Santa | 67.7 | 15.9 | 66.5 | 65.0 | 16.7 |
| | Velódromo | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2006 | Tecnológico | 88.2 | 60.0 | 95.1 | 78.6 | 95.2 |
| | Ninfas | 55.3 | 25.0 | 70.0 | 0.0 | 52.0 |
| | Serdán | 90.7 | 22.5 | 66.1 | 23.4 | 41.0 |
| | Agua Santa | 96.3 | 89.9 | 82.9 | 92.7 | 92.2 |
| | Velódromo | ND | ND | ND | ND | ND |

ND: Estación sin datos.

En el segundo bloque (ver tabla 26) la base de datos que se seleccionó para analizarlo fue el de la del año 2012, en este mismo año la estación Velódromo empezó a funcionar, sin embargo por la cantidad de datos no pudo cumplir con la norma de suficiencia. Cabe señalar que el año 2012 no tiene datos meteorológicos medidos en ninguna de las estaciones, por lo tanto estos pueden ser tomados del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Tabla 26.- Tabla de suficiencia para la base de datos proporcionados por la REMA de Puebla (2001-2006).

| Suficiencia 75% de datos | | | | | | |
|--------------------------|-------------|----------------|-----------------|-----------------|------|------------------|
| Año | Estación | O ₃ | NO ₂ | SO ₂ | CO | PM ₁₀ |
| 2007 | Tecnológico | 61.7 | 0.0 | 58.2 | 41.4 | 56.0 |
| | Ninfas | 56.8 | 56.8 | 56.8 | 27.8 | 31.7 |
| | Serdán | 0.0 | 0.0 | 56.9 | 82.8 | 82.8 |
| | Agua Santa | 83.0 | 56.2 | 56.2 | 56.2 | 56.2 |
| | Velódromo | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2008 | Tecnológico | 90.5 | 38.9 | 91.8 | 88.8 | 28.1 |
| | Ninfas | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | Serdán | 2.0 | 38.8 | 62.8 | 73.5 | 73.7 |
| | Agua Santa | 37.5 | 31.2 | 37.2 | 22.9 | 34.6 |
| | Velódromo | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2009 | Tecnológico | 73.7 | 0.7 | 73.0 | 27.7 | 25.2 |
| | Ninfas | 0.0 | 0.0 | 71.9 | 82.9 | 82.0 |
| | Serdán | 0.0 | 51.0 | 41.4 | 0.0 | 15.1 |
| | Agua Santa | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | Velódromo | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2010 | Tecnológico | 51.8 | 63.2 | 58.6 | 65.4 | 59.5 |
| | Ninfas | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | Serdán | 57.5 | 52.9 | 62.6 | 64.6 | 60.9 |
| | Agua Santa | 55.7 | 62.1 | 63.0 | 62.5 | 59.5 |
| | Velódromo | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2011 | Tecnológico | 92.7 | 92.0 | 85.6 | 91.6 | 93.0 |
| | Ninfas | 94.7 | 88.1 | 97.2 | 95.0 | 90.6 |
| | Serdán | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | Agua Santa | 95.3 | 90.5 | 96.2 | 94.8 | 96.0 |
| | Velódromo | ND | ND | ND | ND | ND |
| 2012 | Tecnológico | 98.0 | 93.5 | 95.6 | 95.8 | 98.8 |
| | Ninfas | 92.5 | 99.6 | 98.2 | 94.1 | 95.9 |
| | Serdán | 95.8 | 90.2 | 95.3 | 96.3 | 98.2 |
| | Agua Santa | 91.6 | 94.4 | 91.5 | 94.9 | 91.0 |
| | Velódromo | 55.8 | 51.0 | 57.1 | 57.1 | 11.6 |

ND: Estación sin datos.

Para las bases de datos del año 2003 y 2012 se les aplicó un análisis estadístico para conocer sus características y comportamientos de los valores de medición de concentración de contaminantes atmosféricos, sin embargo la base de datos del año del 2012 fue seleccionada por ser el año más reciente además de cumplir con el criterio de suficiencia de un mínimo 75%, Velódromo en ese año estaba en su etapa de calentamiento, por lo cual sus concentraciones se omitieron.

5.1.3 Características fundamentales de los datos del sistema de monitoreo atmosférico de la ciudad de Puebla y evaluación de la calidad del aire

Las siguientes gráficas son solo una muestra del análisis de las características fundamentales de los datos del sistema de monitoreo de la ciudad Puebla, el análisis se hizo para cada contaminante atmosférico, para cada estación de la red de monitoreo y para cada tipo de gráfico presentado.

5.1.3.1 Comportamiento general de los datos a través del tiempo

Una manera de validar datos de un sistema de monitoreo de la calidad del aire que mide concentraciones de contaminantes atmosféricos, es analizar de manera cualitativa el comportamiento de estos a través del tiempo.

En la figura 27 a) se muestra el promedio de las concentraciones de ozono en las 4 estaciones de monitoreo para el año 2012, donde su mayor concentración se da entre las horas del día de 12 a 15, esta información corresponde al comportamiento típico del ozono en las ciudades, por lo tanto el ozono es un buen indicador para la validación de datos de monitoreo. En la figura 27 b) las concentraciones promedio diaria de PM_{10} para el año 2012, muestran una tendencia con respecto a la temporalidad, en época de lluvia las concentraciones bajan, mientras que en la temporada de estiaje sucede lo contrario. Este mismo comportamiento lo presenta la concentración semanal diaria de PM_{10} (ver figura 27 c). En la figura 27 d) la concentración mensual del CO, presenta un comportamiento con mayor presencia en la temporada de estiaje.

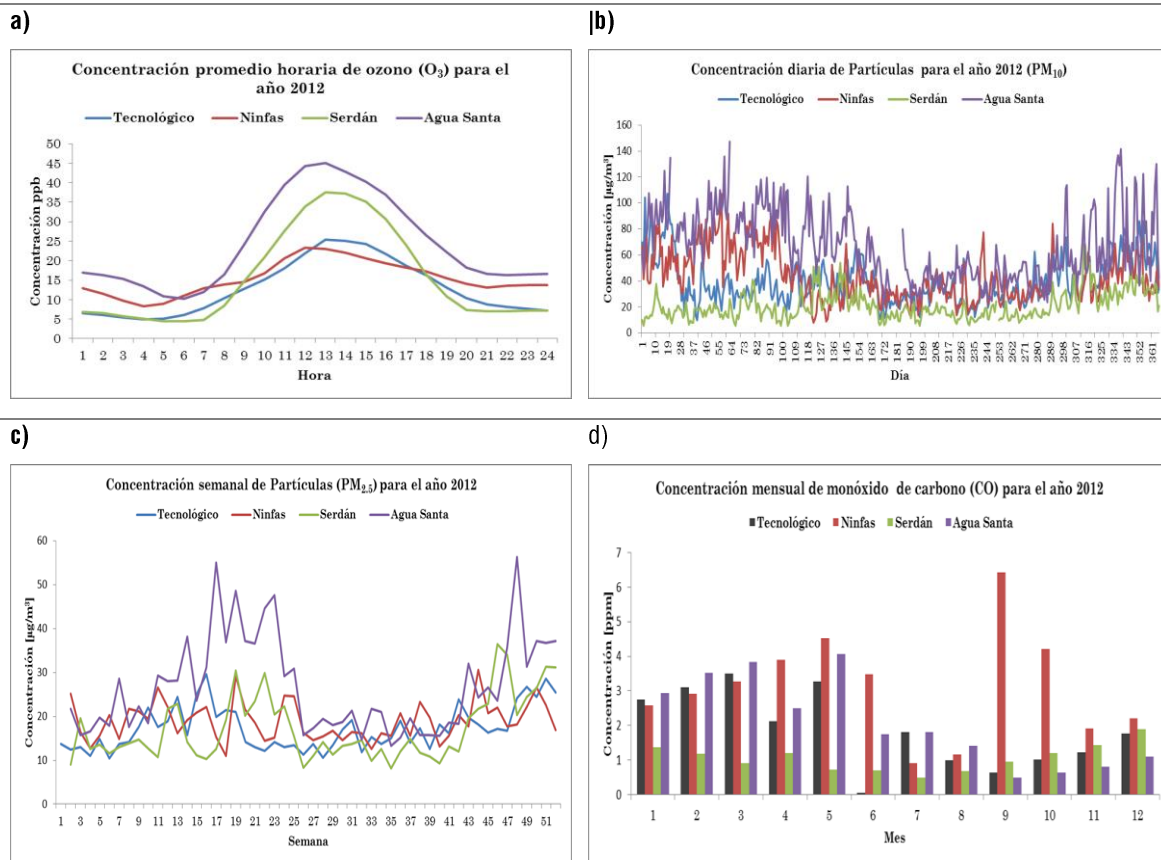


Figura 27.- Muestra del análisis del comportamiento de los datos de concentración de contaminantes de la REMA respecto al tiempo (horaria, diaria, semanal y mensual).

5.1.3.2 Comportamiento general de los datos a través del tiempo y meteorología local

En esta sección se analizó y comparó las concentraciones de los contaminantes atmosféricos con las variables meteorológicas, con el fin de identificar los principales factores que afecta su comportamiento. Para el presente trabajo sólo se muestra las concentraciones mensuales del ozono, esto por ser un buen indicador para validar mediciones. En la figura 28 a) y b) la mayor concentración de ozono se da cuando hay menor precipitación y mayor actividad de radiación solar, esto es un comportamiento que presenta el ozono de acuerdo sus características, una de estas es que es un contaminante atmosférico fotoquímico, por lo que se produce con la presencia de radiación solar y en combinación de la reacción con otros compuestos presentes en la atmósfera.

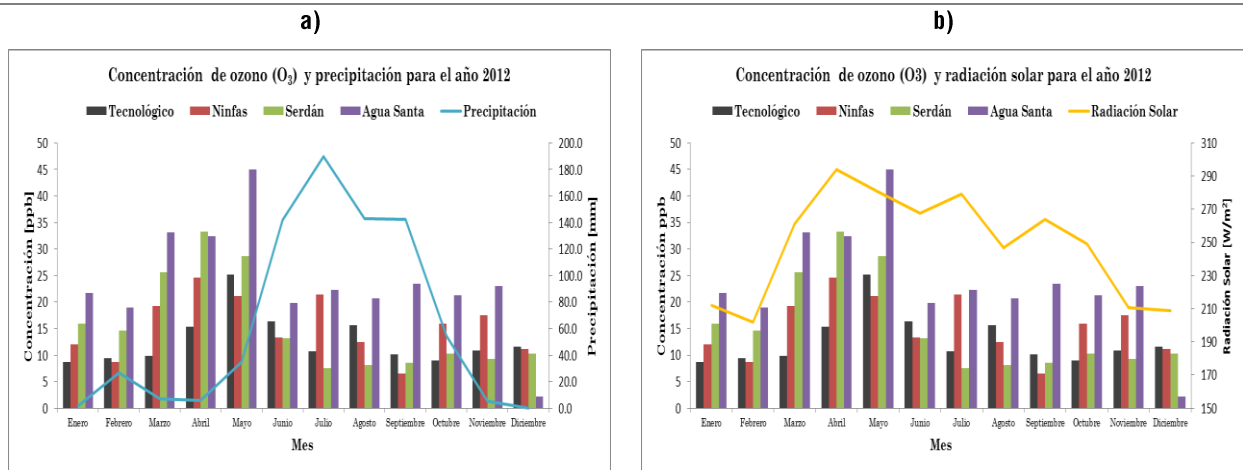


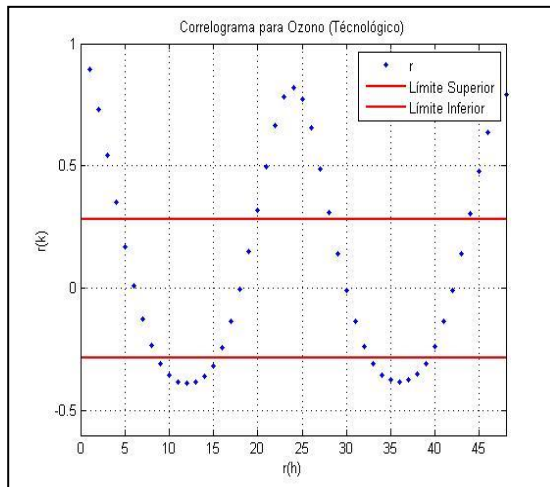
Figura 28.- Concentración mensual para ozono en la ciudad de Puebla. En contraste con el comportamiento de a) precipitación y b) radiación solar.

5.1.3.3 Comportamiento y particularidades de la dispersión de los datos

De la función de autocorrelación o correlograma (ver figura 29 a), se obtuvieron tres características del comportamiento general de los datos a través del tiempo (Hidalgo N. , 2011): datos de un sistema no aleatorios, pues los coeficientes r_1, r_2, \dots, r_k son estadísticamente diferentes a cero; el diseño del muestreo para la medición de contaminantes atmosféricos, como el ozono, se realiza de manera sistemática y programada en función del tiempo, lo cual convierte a la determinación o medición en una variable con carácter no aleatorio. Tiene un componente cíclico en su comportamiento a través del tiempo; todas las series o periodos de datos presentaron autocorrelación significativa, pues existen máximos r_k que sobrepasan los límites establecidos, el comportamiento de datos recientes tiene relación con el comportamiento de los datos pasados.

Para el análisis de dispersión se obtuvo dos resultados importantes: se encontraron días que no se habían tomado como datos no válidos en la base de datos para el 2012, por lo que se volvió a realizar la limpieza y regresar a este paso, segundo se identificaron días donde los datos fueron atípicos y así conocer si la concentración fue causa de algún fenómeno natural o tal vez por la perturbación de una fuente antropogénica. Para el análisis del comportamiento del SO_2 , ya que este se ve afectado por la actividad volcánica del Popocatepetl.

a) Correlograma



b) Caja de Bigotes.

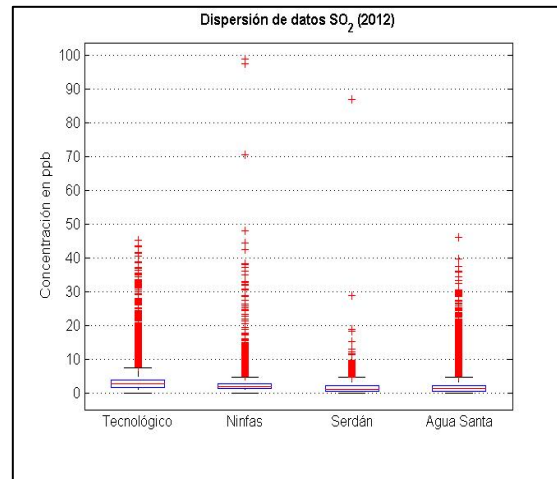


Figura 29.- Correlograma y caja de bigotes.

5.1.3.4 Evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Puebla.

La herramienta que se utilizó para la identificación de los días de incumplimiento fue la herramienta estadística conocida como histograma (ver ejemplo figura 30). Los Límites máximos permisibles fueron con base a las Normas Oficiales Mexicanas para cada contaminante criterio.

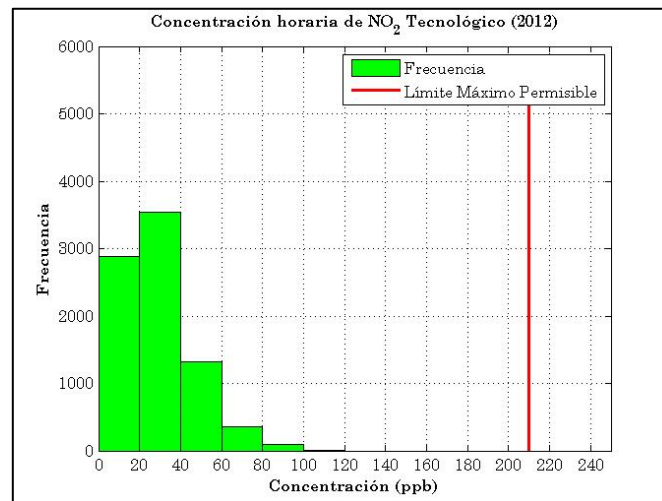


Figura 30.- Histograma para concentraciones de NO_2 (ppb) en la estación tecnológico (2012).

La ciudad de Puebla para el año 2003 y 2012, de acuerdo con la base de datos proporcionada y analizada, presenta problemas de contaminación por O₃ y PM₁₀. En la tabla 28 se observa los días de incumplimiento para el año 2003 y 2012.

Tabla 27.- Días de incumplimiento para la ciudad de Puebla de acuerdo a la normativa Mexicana (evaluación de la calidad del aire para los años 2003 y 2012).

| CC | NOM | LMP | Días de Incumplimiento 2003 | Días de Incumplimiento 2012 |
|------------------|---------------|--|-----------------------------|-----------------------------|
| SO ₂ | 022-SSA1-2010 | 0.110 ppm promedio de 24 horas | 0 | 0 |
| CO | 021-SSA1-1993 | 11.0 ppm promedio móvil de 8 horas. | 1 | 0 |
| NO ₂ | 023-SSA1-1993 | 0.21 ppm promedio horario | 0 | 1 |
| O ₃ | 020-SSA1-2014 | 0.095 ppm promedio horario | 58 | 46 |
| PM ₁₀ | 025-SSA1-2014 | 75 µg/m ³ promedio 24 horas | 174 | 143 |

El contaminante seleccionado para el análisis de correlación y para el sistema de modelización es el SO₂, por presentar mejor resultados en cuestión de criterios de suficiencia y por las características mencionadas en la metodología, en la que se buscaba un contaminante relativamente que su vida en la atmosfera fuera larga.

Se incumplió 46 y 143 días en las NOM para O₃ y PM₁₀ respectivamente, por lo que se considera que la Ciudad de Puebla el 39.07% del año del 2012 tuvo mala calidad del aire.

5.2 Análisis estadístico de correlación de datos, para localizar los posibles días de transporte entre las zonas metropolitanas

5.2.1 Identificación del tipo de distribución de los datos

Antes de hacer cualquier prueba estadística es necesario conocer la naturaleza de los datos, esto para aplicar pruebas paramétricas o no paramétricas. Como ya se había mencionado antes, las variables meteorológicas entre ellas la concentraciones de contaminantes atmosféricos no tienen una distribución normal.

Al seleccionar la base de datos del SO₂, aplicando prueba K-S y corroborando con Matlab® (ver figura 31), esta presentó una distribución del tipo gamma.

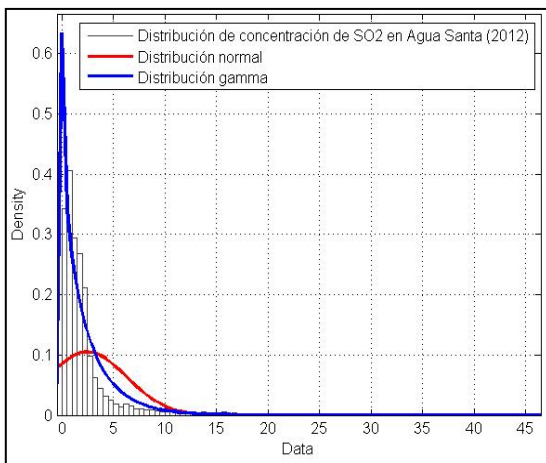


Figura 31.- Distribución de la base de datos de 2012 para Agua Santa de SO₂ (tipo gamma).

5.2.2 Acotamiento de los datos de acuerdo a las características de la zona

El acotamiento de la base de datos tuvo sustento en la variable Altura Capa de Mezcla la cual debe sobrepasar la altura mínima de los volcanes para que pudiera haber un transporte de contaminantes entre las zonas metropolitanas, sin perder de vista otros factores que puede influir en este transporte que es la velocidad y dirección del viento también afecta la dispersión de los contaminantes en una zona de estudio. En la figura 32 de acuerdo con el método de cálculo de la altura máxima de capa de mezcla, se observa que en los meses de marzo, abril y mayo esta altura supera las elevaciones de los volcanes. Tomando lo anterior, se acotó la correlación a estos meses.

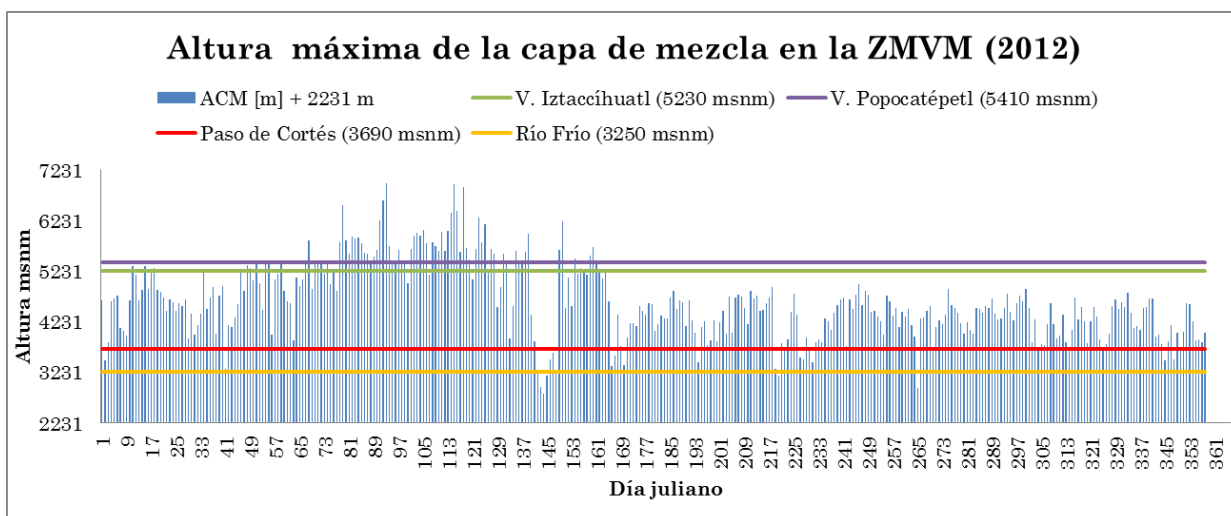


Figura 32.-Máximas alturas capas de mezcla en la Ciudad de México, datos tomados del Aeropuerto Internacional Benito. Método de Holzworth.

De acuerdo al cálculo de la altura máxima de capa de mezcla, utilizando el método de Holzworth, con la base de datos del aeropuerto de la Ciudad de México, el tiempo acotado son los meses de marzo, abril y mayo.

5.2.3 Correlación tipo Spearman

Se seleccionaron las estaciones de monitoreo de concentraciones de contaminantes atmosférico entre la zona de estudio: Acolman para ZMVM y Agua Santa para ZMVP. De acuerdo al análisis de correlación de Spearman, se seleccionaron 6 días. En la tabla 28 se muestran los días con correlación más alta para el año 2012.

Tabla 28.- Resultados de correlación de Spearman para la base de datos de SO₂ para el 2012.

| Día Juliano | Fecha (2012) | Correlación | Clasificación |
|-------------|--------------|-------------|---------------|
| 91 | 14 de Marzo | 0.7622 | Fuerte |
| 90 | 19 de Marzo | 0.6952 | Moderada |
| 79 | 30 de Marzo | 0.6751 | Moderada |
| 148 | 31 de Marzo | 0.6639 | Moderada |
| 74 | 18 de Mayo | 0.6298 | Moderada |
| 139 | 27 de Mayo | 0.6296 | Moderada |

5.3 Modelado de los días seleccionados

5.3.1 Validación de modelos meteorológicos (CALMET-WRF)

Es necesario evaluar la sensibilidad de los modelos meteorológicos, en el presente trabajo se seleccionaron las variables velocidad del viento y temperatura para los días seleccionados. Estos se contrastaron con la estación del Informe meteorológico aeronáutico de rutina (METAR por sus siglas en inglés) con código MMMX, que corresponde a los datos meteorológicos superficiales del Aeropuerto de la Ciudad de México.

Se utilizaron el error promedio conocido como BIAS y el error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés). En el cual los resultados arrojaron que el sistema de modelización meteorológico de diagnóstico CALMET presentó mejor rendimiento en temperatura, en contra

parte, respecto a velocidad del viento presentó mejor rendimiento el sistema de modelización meteorológico de pronóstico WRF. En velocidad del viento el BIAS presentó valores de 1.22 (mínimo) y 2.34 (máximo) en los diferentes dominios (D1, D2 y D3) los valores de RMSE fueron de 2.04 (mínimo) and 3.19 (máximo) correspondiente a D3 (ver tabla 30).

Tabla 29.- Evaluación de la sensibilidad de los sistemas de modelización meteorológica, para velocidad de viento y temperatura superficial, utilizando BIAS y RMSE.

| Temperatura [K] | | | | | | | | | Velocidad del viento [m/s] | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|------|-----------------|-----------------|-----------------|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Date | BIAS | | | | RMSE | | | | Date | BIAS | | | | RMSE | | | |
| | CM | WD ₁ | WD ₂ | WD ₃ | CM | WD ₁ | WD ₂ | WD ₃ | | CM | WD ₁ | WD ₂ | WD ₃ | CM | WD ₁ | WD ₂ | WD ₃ |
| 1 | 0.01 | 1.42 | 2.03 | -0.87 | 3.33 | 2.30 | 1.42 | 2.76 | 1 | 2.05 | 1.72 | 1.69 | 1.71 | 2.55 | 2.07 | 2.09 | 2.11 |
| 2 | 2.33 | 1.42 | 1.30 | 1.46 | 3.53 | 1.58 | 1.14 | 1.65 | 2 | 1.45 | 1.73 | 1.29 | 1.22 | 2.17 | 2.39 | 2.21 | 2.23 |
| 3 | -0.06 | 1.16 | 1.20 | 1.32 | 2.58 | 2.55 | 1.10 | 2.58 | 3 | 3.09 | 2.02 | 2.10 | 2.08 | 3.82 | 2.93 | 3.05 | 3.14 |
| 4 | 0.03 | 1.31 | 1.46 | 1.61 | 2.69 | 2.13 | 1.21 | 2.37 | 4 | 2.81 | 2.34 | 2.19 | 2.07 | 3.60 | 3.16 | 3.17 | 3.19 |
| 5 | -0.45 | 1.71 | 1.75 | 2.07 | 3.00 | 2.02 | 1.38 | 2.25 | 5 | 2.54 | 1.65 | 1.60 | 1.58 | 3.32 | 2.08 | 2.08 | 2.04 |
| 6 | 0.08 | 1.65 | 1.66 | 1.64 | 3.33 | 1.85 | 1.29 | 1.88 | 6 | 2.03 | 1.83 | 1.82 | 1.73 | 2.87 | 2.49 | 2.52 | 2.44 |

CM: CALMET. WD1: WRF dominio 1. WD2: WRF dominio 2. WD3: WRF dominio 3.

En el anexo 4 se muestran los comportamientos de estas variables en gráficos así como de su BIAS y RMSE. Los días de modelización fueron: 14, 19, 30 y 31 de marzo, 18 y 27 de mayo de 2012 y si presentan en la siguiente sección.

5.3.2 Modelización CALMET-CALPUFF, WRF-CALPUFF

Para el siguiente análisis, (tablas 31-36), están divididas en 5 secciones, la primera es para la descripción del modelo CALPUFF así como para el acoplamiento de la meteorología modelada en CALMET así como WRF. En la parte superior se describe el resultado de las modelizaciones, mientras que en el apartado a) muestra la imagen de la hora donde presentó aparente transporte el sistema de modelización, en el apartado b) se muestra la Altura Capa de Mezcla (ACM) calculada por CALMET en cuatro puntos estratégicos, esto para ver el comportamiento de esta variable. Los puntos son el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (Benito Juárez) (AICM), el Aeropuerto Internacional de Puebla (AIP), y dos pasos entre los volcanes: Río Frío y Paso de Cortés.

En el apartado c) se muestra la imagen de dispersión en la misma hora pero con datos meteorológicos provenientes de WRF, mientras que en el apartado d) se presenta el cálculo de la Capa Límite Planetaria (CLP) que arroja WRF.

Lo anterior con el fin de comparar los resultados obtenidos los dos acoplamientos. Resulta conveniente resaltar, que la ACM y CLP son variables diferentes, pero como se vio el marco teórico, en la práctica estas alturas son muy parecidas y pueden ser comparadas.

Para el sistema de modelación de la calidad del aire se trabajó con 5 fuentes hipotéticas emitiendo SO₂ ubicadas a lo largo de la zona de estudio.

Como se vio en la sección 5.2.3 del presente trabajo (correlación de Spearman), los días con mayor correlación fueron:

- 14 de marzo de 2012
- 19 de marzo de 2012
- 30 de marzo de 2012
- 31 de marzo de 2012
- 18 de mayo de 2012
- 27 de mayo de 2012

Por lo que estos días fueron seleccionados para simularlos en el sistema de modelización de la calidad del aire CALPUFF para corroborar el transporte de contaminación atmosférica de la ZMVM a la ZMVP.

Tabla 30.- Resultado de la modelización CALPUFF para el 14 de marzo de 2012.

| 14 de marzo de 2012 | |
|---|--|
| Descripción | |
| <p>Para este día, en el sistema de modelización CALMET-CALPUFF, el máximo aparente transporte se da a las 14 horas, el cálculo de su ACM superó la altura de los picos de los volcanes. La pluma de dispersión es de oeste a este, la contaminación atmosférica está cruzando el eje volcánico por el paso de Río Frío. El acoplamiento WRF-CALPUFF, para esta misma hora indica que no hay transporte de contaminación a esa hora, el cálculo de la CLP llega a un máximo nivel que es de 5000 msnm. Un dato interesante es que la CPL en la Ciudad de México es alta en comparación del dato calculado de ACM en el sistema CALMET.</p> | |
| <p>a) Modelización CALMET-CALPUFF</p> <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAR-14-12, 14-hrs. Modelación de SO₂ (CALMET v6-CALPUFF v6)</p> | <p>b) ACM calculada desde CALMET</p> <p>Comportamiento de la ACM (Marzo 14, 2012) CALMET v6</p> |
| <p>c) Modelización WRF-CALPUFF</p> <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAR-14-12, 20-hrs. Modelación de SO₂ (WRF v3.5-CALPUFF v6)</p> | <p>e) CLP calculada desde WRF</p> <p>Comportamiento de la ACM (Marzo 14, 2012) WRF v3.5</p> |

Tabla 31.- Resultado de la modelización CALPUFF para el 19 de marzo de 2012.

| 19 de marzo de 2012 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---|------|------|------|------|---|------|------|------|------|---|------|------|------|------|---|------|------|------|------|---|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|
| Descripción | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Para las 19 horas de este día, en el sistema CALMET-CALPUFF, el aparente transporte se da de la ZMVM a ZMVP por el paso de Cortés, las ACM calculadas, superan los picos de los volcanes, excepto la ACM de la Ciudad de México. Mientras que para el sistema WRF-CALPUFF, la pluma de dispersión tiene el mismo sentido (de ZMVM a ZMVP), sin embargo el transporte se da por el paso del Río Frío. En los dos sistemas, se puede observar que la contaminación atmosférica proveniente de la ZMVM se dirige a la ciudad de Tlaxcala (al norte de ciudad de Puebla), así como la contaminación atmosférica proveniente de la ZMVP.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| a) Modelización CALMET-CALPUFF | b) ACM calculada desde CALMET | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAR-19-12, 19-hrs. Modelación de SO₂ (CALMET v6-CALPUFF v6)</p> | <p>Comportamiento de la ACM (Marzo 19, 2012) CALMET v6</p> <table border="1"> <caption>Datos estimados del gráfico de ACM (CALMET v6)</caption> <thead> <tr> <th>Tiempo [hora]</th> <th>Cd. de México (m)</th> <th>Río Frío (m)</th> <th>Paso de Cortés (m)</th> <th>Cd. de Puebla (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>2</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>4</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>6</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>8</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>10</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>12</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>14</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>16</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>18</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>20</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>22</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> </tbody> </table> | Tiempo [hora] | Cd. de México (m) | Río Frío (m) | Paso de Cortés (m) | Cd. de Puebla (m) | 0 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 2 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 4 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 6 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 8 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 10 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 12 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 14 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 16 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 18 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 20 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 22 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 |
| Tiempo [hora] | Cd. de México (m) | Río Frío (m) | Paso de Cortés (m) | Cd. de Puebla (m) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| c) Modelización WRF-CALPUFF | d) CLP calculada desde WRF | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAR-19-12, 19-hrs. Modelación de SO₂ (WRF v3.5-CALPUFF v6)</p> | <p>Comportamiento de la ACM (Marzo 19, 2012) WRF v3.5</p> <table border="1"> <caption>Datos estimados del gráfico de ACM (WRF v3.5)</caption> <thead> <tr> <th>Tiempo [hora]</th> <th>Cd. de México (m)</th> <th>Río Frío (m)</th> <th>Paso de Cortés (m)</th> <th>Cd. de Puebla (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>2</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>4</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>6</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>8</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>10</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>12</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>14</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>16</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>18</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>20</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> <tr><td>22</td><td>2300</td><td>3300</td><td>4300</td><td>3800</td></tr> </tbody> </table> | Tiempo [hora] | Cd. de México (m) | Río Frío (m) | Paso de Cortés (m) | Cd. de Puebla (m) | 0 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 2 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 4 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 6 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 8 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 10 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 12 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 14 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 16 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 18 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 20 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | 22 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 |
| Tiempo [hora] | Cd. de México (m) | Río Frío (m) | Paso de Cortés (m) | Cd. de Puebla (m) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 2300 | 3300 | 4300 | 3800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 32 .- Resultado de la modelización CALPUFF para el 30 de marzo de 2012.

| 30 de marzo de 2012 | |
|--|--|
| Descripción | |
| <p>En este día se presentó un transporte de contaminación atmosférica de la ZMVM a ZMVP a las 13 horas en los dos sistemas de modelización. El lugar donde pasó la pluma de dispersión de contaminación atmosférica fue por encima de los volcanes, teniendo mayor concentración en el Paso de Cortés. Al igual que el día 19 de marzo, se aprecia que esta pluma se conduce hacia la ciudad de Tlaxcala. El cálculo de ACM superó la altura de los pasos e inclusive el punto de referencia del paso de Cortés su altura supero el pico de los volcanes, esto indica porque el paso de contaminación atmosférica se dio en ese punto, mientras que la CPL en los cuatro puntos de referencias superan los pasos entre volcanes.</p> | |
| <p>a) Modelización CALMET-CALPUFF</p> <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAR-30-12, 13-hrs. Modelación de SO₂ (CALMET v6-CALPUFF v6)</p> | <p>b) ACM calculada desde CALMET</p> <p>Comportamiento de la ACM (Marzo 30, 2012) CALMET v6</p> |
| <p>c) Modelización WRF-CALPUFF</p> <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAR-30-12, 13-hrs. Modelación de SO₂ (WRF v3.5-CALPUFF v6)</p> | <p>d) CLP calculada desde WRF</p> <p>Comportamiento de la ACM (Marzo 30, 2012) WRF v3.5</p> |

Tabla 33.- Resultado de la modelización CALPUFF para el 31 de marzo de 2012.

| 31 de marzo de 2012 | |
|--|--|
| Descripción | |
| <p>La pluma de dispersión de contaminación atmosférica en este día para el sistema de modelización CALMET-CALPUFF, se da a las 19 horas, en dirección de oeste a este por el paso de Cortés, las ACM superan las alturas de los volcanes excepto la calculada de la Ciudad de México. La pluma en el sistema WRF-CALPUFF conduce la contaminación atmosférica por el paso de Río Frío. En este sistema los datos de referencias de la CPL superan las alturas mínimas que son los pasos de Cortés y del Río Frío, sin embargo en comparación al otro sistema de modelización el transporte no se dio en el mismo paso.</p> | |
| <p>a) Modelización CALMET-CALPUFF</p> <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAR-31-12, 19-hrs. Modelación de SO₂ (CALMET v6-CALPUFF v6)</p> | <p>b) ACM calculada desde CALMET</p> <p>Comportamiento de la ACM (Marzo 31, 2012) CALMET v6</p> |
| <p>c) Modelización WRF-CALPUFF</p> <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAR-31-12, 19-hrs. Modelación de SO₂ (WRF v3.5-CALPUFF v6)</p> | <p>d) CLP calculada desde WRF</p> <p>Comportamiento de la ACM (Marzo 31, 2012) WRF v3.5</p> |

Tabla 34.- Resultado de la modelización CALPUFF para el 18 de mayo de 2012.

| 18 de mayo de 2012 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---|------|------|------|------|---|------|------|------|------|---|------|------|------|------|---|------|------|------|------|---|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|
| Descripción | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>En este día el proceso de transporte entre zonas metropolitanas también se dio de ZMVM a ZMVP, en el sistema de modelización CALMET-CALPUFF, teniendo mayor influencia el transporte por los pasos. El comportamiento de la ACM, fue muy similar a los demás días simulados, donde la altura de ACM en la ciudad de México no sobrepasó las alturas, sin embargo en los otros puntos sí. Para el acoplamiento WRF-CALPUFF, en esa hora no hubo aparente transporte, mientras que la CLP en los cuatro puntos de referencias, las cuales estas alturas sobrepasaron las elevaciones de los pasos.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>a) Modelización CALMET-CALPUFF</p> <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAY-18-12, 12-hrs. Modelación de SO₂ (CALMET v6-CALPUFF v6)</p> | <p>b) ACM calculada desde CALMET</p> <p>Comportamiento de la ACM (Mayo 18, 2012) CALMET v6</p> <table border="1"> <caption>Resumen de datos para el gráfico b)</caption> <thead> <tr> <th>Tiempo [hora]</th> <th>Cd. de México [ms.nm]</th> <th>Río Frio [ms.nm]</th> <th>Paso de Cortés [ms.nm]</th> <th>Cd. de Puebla [ms.nm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>2</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>4</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>6</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>8</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>10</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>12</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>14</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>16</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>18</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>20</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>22</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> </tbody> </table> | Tiempo [hora] | Cd. de México [ms.nm] | Río Frio [ms.nm] | Paso de Cortés [ms.nm] | Cd. de Puebla [ms.nm] | 0 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 2 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 4 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 6 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 8 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 10 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 12 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 14 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 16 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 18 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 20 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 22 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 |
| Tiempo [hora] | Cd. de México [ms.nm] | Río Frio [ms.nm] | Paso de Cortés [ms.nm] | Cd. de Puebla [ms.nm] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>c) Modelización WRF-CALPUFF</p> <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAY-18-12, 12-hrs. Modelación de SO₂ (WRF v3.5-CALPUFF v6)</p> | <p>d) CLP calculada desde WRF</p> <p>Comportamiento de la ACM (Mayo 18, 2012) WRF v3.5</p> <table border="1"> <caption>Resumen de datos para el gráfico d)</caption> <thead> <tr> <th>Tiempo [hora]</th> <th>Cd. de México [ms.nm]</th> <th>Río Frio [ms.nm]</th> <th>Paso de Cortés [ms.nm]</th> <th>Cd. de Puebla [ms.nm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>2</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>4</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>6</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>8</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>10</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>12</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>14</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>16</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>18</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>20</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> <tr><td>22</td><td>2300</td><td>3400</td><td>4200</td><td>2300</td></tr> </tbody> </table> | Tiempo [hora] | Cd. de México [ms.nm] | Río Frio [ms.nm] | Paso de Cortés [ms.nm] | Cd. de Puebla [ms.nm] | 0 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 2 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 4 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 6 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 8 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 10 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 12 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 14 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 16 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 18 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 20 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | 22 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 |
| Tiempo [hora] | Cd. de México [ms.nm] | Río Frio [ms.nm] | Paso de Cortés [ms.nm] | Cd. de Puebla [ms.nm] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 2300 | 3400 | 4200 | 2300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 35.- Resultado de la modelización CALPUFF para el 27 de mayo de 2012.

| 27 de mayo de 2012 | |
|---|--|
| Descripción | |
| <p>El aparente transporte se da a las 11 horas, en dirección de ZMVM a ZMVP, tanto en el paso de cortés así como en el paso del rio Frio para el sistema de modelización CALMET-CALPUFF, el comportamiento de la ACM se repitió, en el cual la altura de referencia tomada en la ciudad de México no sobrepasó la altura de los pasos. En el acoplamiento WRF-CALPUFF las alturas de la CPL sobrepasan las alturas de los pasos, sin embargo en el modelo de dispersión para esa hora no hubo aparente transporte entre zonas metropolitanas.</p> | |
| <p>a) Modelización CALMET-CALPUFF</p> <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAY-27-12, 11-hrs. Modelación de SO₂ (CALMET v6-CALPUFF v6)</p> | <p>b) ACM calculada desde CALMET</p> <p style="text-align: center;">Comportamiento de la ACM (Mayo 27, 2012) CALMET v6</p> |
| <p>c) Modelización WRF-CALPUFF</p> <p>Zona de estudio (ZMVM-ZMVP) MAY-27-12, 11-hrs. Modelación de SO₂ (WRF v3.5-CALPUFF v6)</p> | <p>d) CLP calculada desde WRF</p> <p style="text-align: center;">Comportamiento de la ACM (Mayo 27, 2012) WRF v3.5</p> |

5.3.3 Discusión de resultados

5.3.3.1 Resultados

En los seis días de modelización: 14, 19, 30, 31 de marzo y 18, 27 de mayo de 2012, utilizando los sistemas CALMET-CALPUFF y el acoplamiento WRF-CALPUFF, con la base de datos de observaciones de 16 estaciones meteorológicas distribuidas en la zona de estudio y una estación de radiosondeo para el modelo de diagnóstico CALMET v6, mientras que el modelo de pronóstico WRF v3.5 usando la base de datos NCEP del sistema GFSv2 (ds083.0.), dio como resultado un aparente transporte de contaminación atmosférica de la ZMVM a la ZMVP, usando como trazador el SO₂ de 5 fuentes hipotéticas.

El transporte se da entre las 11:00-19:00 para los dos sistemas de modelización (CALMET-CALPUFF y WRF-CALPUFF), cabe mencionar que el transporte se da a diferentes horas para cada modelo, pero corresponde al comportamiento de la ACM o CLP calculada o estimada para cada modelo, se da cuando la altura de la ACM o CLP sobrepasa las elevaciones mínimas de los volcanes, dando lugar a que exista un transporte o intercambio de contaminantes atmosféricos entre estas zonas metropolitanas.

También es importante señalar que los resultados de la modelización arrojaron que hay transporte de contaminación atmosférica de ZMVP a ZMVM, además de que estas simulaciones también dan como resultado que: las zonas metropolitanas del Valle de México y Puebla influyen en los niveles de la calidad del aire de la ciudad de Tlaxcala (al norte de la ciudad de Puebla); y a las Zonas Metropolitanas de Cuernavaca y Cuautla del estado de Morelos (al sur de la Ciudad de México y Puebla).

5.3.3.2 Discusión de la modelización meteorológica

Los resultados de las modelizaciones meteorológicas aplicados en el modelo CALPUFF, presentan en ciertas horas comportamientos diferentes, en cuestión de concentración y dirección de la pluma, debido a lo siguiente:

CALMET como modelo de diagnóstico, trabajó con 16 estaciones meteorológicas distribuidas en las zona de estudio y una estación de radio sondeo ubicada en la estación de

México, D.F. (ID: 76679) , sin embargo estas estaciones están cargadas hacia el noroeste del mallado (mayor presencia en ZMVM), debido a que existe mayor información de meteorología superficial en esta región, además que en el noreste de la Ciudad de México se genera la información meteorológica en la vertical, ya que son los datos del radiosondeo que son medidos desde el la estación de México, D.F. (ID: 76679).

En contraparte en el área correspondiente a la Ciudad de Puebla existe una menor presencia de estaciones superficiales y no hay información de radiosondeo, esta faltante de información hace que CALMET se vea forzado a dar los resultados tanto en la meteorología vertical así como en la meteorología superficial en toda el área de estudio. El modelo matemático hace el cálculo con estas estaciones, interpolando y extrapolando la información meteorológica tanto superficial como en la vertical en toda la zona de estudio; por lo que, sería conveniente tener información en la vertical en varios puntos de la malla, así como contar con mayores número estaciones de meteorología superficial en la ZMVP, para que la simulación presentara mejores resultados.

WRF, es un modelo de pronóstico, ha sido desarrollado para resolver las limitaciones de los modelos de diagnóstico. Estos predicen las variables meteorológicas resolviendo las ecuaciones dinámicas de la atmosfera. (Rincón, 2012). Esta contiene mayor información meteorológica de observaciones, satélites, radiosondeos para así obtener este modelo meteorológico de pronóstico, sin embargo, hay que resaltar un punto sobre la aplicación de este modelo:

Es necesario realizar parametrizaciones en la zona de estudio, ya que cuenta con diferentes ecuaciones de cálculo para la física y micro física, la altura máxima de la CLP, entre otras variables, también resulta conveniente evaluar la sensibilidad de las parametrizaciones para así poder acoplarlo a un sistema de modelización de la calidad del aire, esto porque, la Zona Metropolitana del Valle de México es una compleja área de estudio. La ZMVM está ubicada a 2220 msnm; 5 millones de vehículos; 22 millones de habitantes; cuenta con una topografía peculiar, los volcanes (Popocatepetl e Iztaccíhuatl) y así como las emisiones generadas en la ZMVM (Molina & Molina, 2004).

El objetivo de evaluar la sensibilidad de las parametrizaciones de WRF es obtener información confiable del sistema de modelización meteorológico y acoplarlo a un sistema de modelización de calidad del aire para tener un mejor ajuste de las características de la Ciudad de México. El modelo meteorológico CALMET tiene una buena aproximación a pesar de la información meteorológica con la que trabaja, el costo y recurso computacional en comparación de WRF, sin embargo se podría obtener mejor aproximación en los resultados utilizando el modelo de pronóstico y acoplándolo con uno de diagnóstico, esto para complementar tanto la información meteorológica superficial y sinóptica así como en la vertical.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al analizar la base de datos de la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico de Puebla para el año 2012, se observa que se incumplió en los límites máximos permisibles en 46 días para ozono (12.6 % del año) mientras que para PM_{10} 143 días sobrepasó con la norma (39.07 % del año), por lo tanto hubo mala calidad del aire en la Ciudad de Puebla.

Las condiciones meteorológicas que propician el transporte de contaminantes entre la ZMVM y la ZMVP son principalmente: que la altura capa de mezcla sea mayor a 3250 msnm, que no haya precipitación y que la dirección del viento provenga de la Zona Metropolitana del Valle de México.

De acuerdo con la compleja topografía de la zona de estudio, resulta importante resaltar que el paso del Río Frío y el paso de Cortés por sus características fisiográficas, conducen a que se promueva el transporte de contaminantes atmosféricos de la Zona Metropolitana del Valle de México y a la Zona Metropolitana del Valle de Puebla. Debido a que estos pasos son las elevaciones mínimas de los Volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, siempre y cuando la altura de la capa de mezcla supere estos niveles así como la dirección del viento antes mencionada.

De acuerdo a la metodología aplicada y la base de datos usados, los resultados del sistema de modelación Calpuff para los 6 días seleccionados (14, 19, 30, 31 de marzo y 18 y 27 de mayo de 2012):

Sugiere que existe transporte de contaminantes atmosféricos de la ZMVM a la ZMVP, por lo que el hecho de que haya transporte, permite concluir que la calidad del aire de la Ciudad de Puebla está siendo afectada por la contaminación atmosférica proveniente de ZMVM para el período de este estudio. Este transporte se da entre las 11:00 hrs y las 19:00 hrs, donde

Es importante señalar que los resultados del sistema de modelación Calpuff también indican que las emisiones que se originan en la ciudad de Puebla, pudieran impactar en los niveles de la calidad del aire de las Zonas Metropolitanas del Valle de México, de Cuautla y de Cuernavaca.

Para conocer el porcentaje de contaminación atmosférica que está siendo exportada de la Zona Metropolitana del Valle de México a la ciudad de Puebla resulta indispensable contar con un buen inventario de emisiones en estas dos metrópolis (y en todo México).

Es necesario que se ponga mucha atención en los sistemas de monitoreo atmosférico de Puebla así como de todos los sistemas del país, ya que es un derecho como ciudadano mexicano y una obligación de los gobiernos estatales el tener una buena calidad del aire para toda la población, y si no existe un monitoreo adecuado además como se mencionó antes un inventario confiable; no se puede prevenir, minimizar o controlar la contaminación atmosférica.

Para trabajos posteriores, sería interesante analizar el comportamiento y transporte de la contaminación atmosférica de toda la megalópolis ya que está integrada por zonas urbanas de los estados de la Ciudad de México, Morelos, Puebla, México, Tlaxcala e Hidalgo. Esto con el fin de que la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAM) pueda aplicar adecuadamente políticas ambientales.

Bibliografía

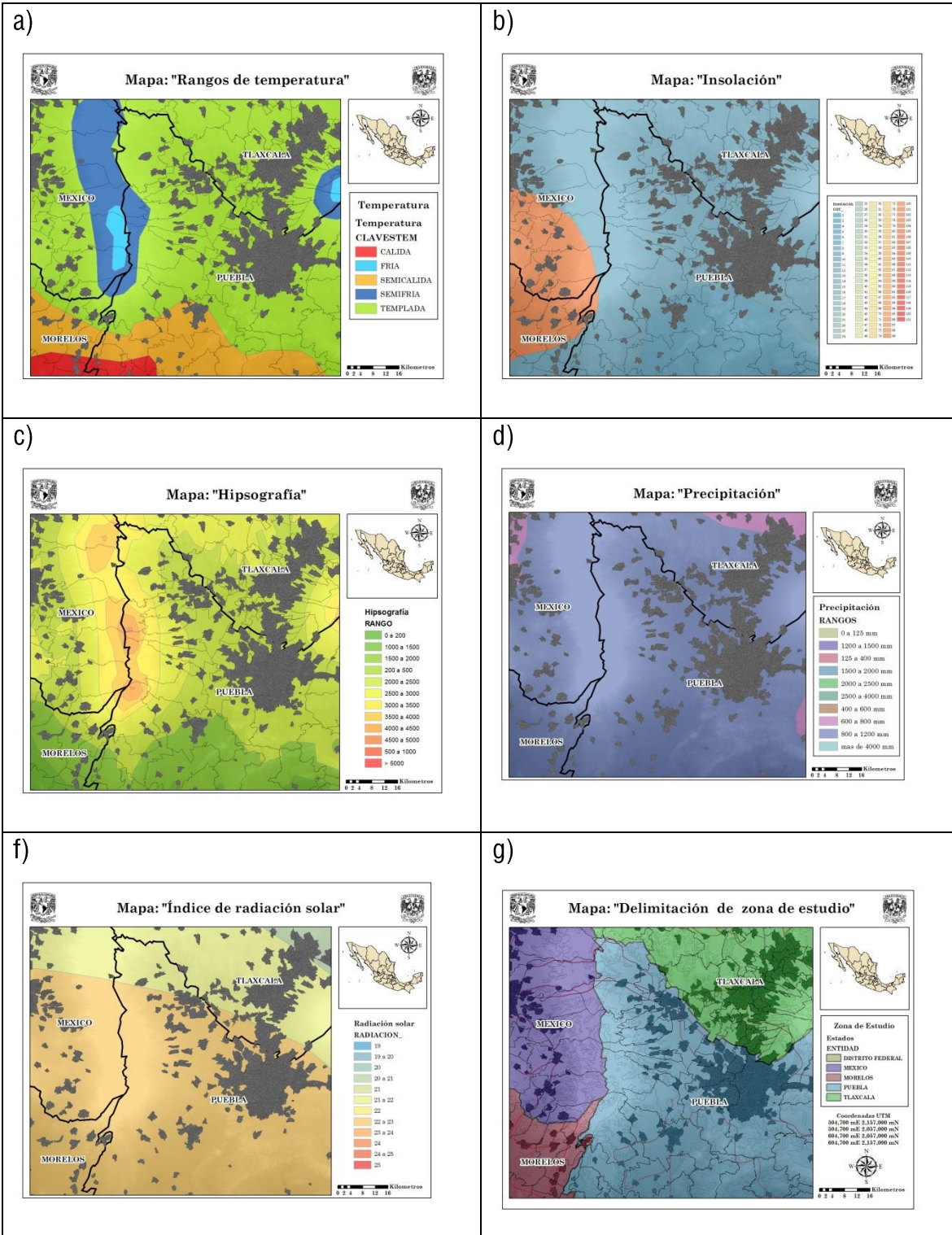
- Baldasano, & Millán. (2000). *Guide for the application of Air Quality Models. IV Seminario sobre la Calidad del Aire en España*. España.
- Baldasano, J. M., Cremades, L., & Soriano, C. (1994). *Circulation of air pollutants over the Barcelona geographical area in summer*. Varese, Italia: Proceedings of Sixth European Symposium Physico-Chemical Behaviour of atmospheric Pollutants.
- Baldasano, J., Valera, E., & Jiménez, P. (2003). Air quality data from large cities. *The Science of the Total Environment*, ELSEVIER, 141-165.
- Bean, M. E., & Frank, R. (1998). *Statistical Procedures for Analysis of Environmental Monitoring Data and Risk Assessment; vol 3; Prentice Hall PTR*.
- BSC-CNS. (2013). Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación, Departamento Ciencias de la Tierra. In G. A. Roa, *Sistema CALIOPE Base de datos filtrado de observaciones de calidad del aire* (pp. 1-8). Barcelona, España.
- Buenestado, C. (2003, Septiembre). Análisis y Caracterización de la Capa Superficial Atmosférica. Barcelona, Barcelona, España: Tesis de Doctorado, Departament d'Astronomia i Meteorologia, UNIVERSITAT DE BARCELONA. Retrieved from http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/738/2.Cap_1.pdf?sequence=4
- Castro, E. (2008, Mayo). *Manual de Procedimientos para las Estaciones Meteorológicas de Organización para Estudios Tropicales*. Retrieved from <http://www.ots.ac.cr>
- Chuquer, D. (2014). Transporte de contaminantes atmosféricos entre la Zona Metropolitana del Valle de México y la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Ciudad de México, México: Tesis de maestría, UNAM.
- CIEMAT. (2015). *Modelización de la contaminación atmosférica*. Retrieved from Introducción a modelos: <http://www.ciemat.es/MCAportal/portal.do?IDM=10&NM=2>
- Cipagauta, E. C. (2014, Septiembre). Sensibilidad del modelo WRF en el Atlántico Norte ante cambios de la Radiación Solar Total. Ciudad de México, México: Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de México.
- CONABIO. (2010). Flora y fauna del Estado de Puebla. *Cuéntame*. INEGI; Comisión Nacional de Biología.
- CONAPO. (2010). Comisión Nacional de Población. *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010*. Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- DGCENICA. (2006). Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. In *Validación de datos generados en la Estación Automática de Monitoreo Atmosférico de la DGCENICA (CE1), ubicada en la UAM Iztapalapa*. DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL EN CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.
- EPA. (1998). United States Environmental Protection Agency. In "Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems Vol II Part. Ambient Air Quality Monitoring Program. Quality System Development". EPA-454/R-98-004.
- EPA. (2000). U.S. Environmental Protection Agency. Guidance For Data Quality Assessment; Practical Methods for Data Analysis; EPA QA/G9. Estados Unidos de América.
- EPA. (2002). Environmental Protection Agency Guide on Environmental, data Verification and data Validation. EPA/240/R-.
- EPA. (2013, Mayo). Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume II, Ambient Air Quality, Monitoring Program. Estados Unidos de América.
- EPA. (2015). U.S. Environmental Protection Agency. Retrieved 2015, from Air Quality Models: <https://www3.epa.gov/ttn/scram/aqmindex.htm>
- García, J., García, J., Jazcilevich, A., & Ruiz, L. (2014). The influence of the Tula, Hidalgo complex on the air quality of Mexico City Metropolitan Area. *Atmósfera*, Vol. 27, N° 2, 215-225.
- González, S., Oseguera, J., Zúñiga, M., Palomino, I., Ríos, L., Vega, L., . . . Ángeles, M. (2015). Contaminación ambiental por ruido urbano en la ciudad de poza rica, Veracruz, México. *Exploratoris, Revista de la Realidad Global*, Vol. 4, No. 1, ISSN 2153-3318, *Academiajournals.com*, 1-11.

- Hidalgo, N. (2011). Metodología para la validación de datos de calidad del aire generados por una red de monitoreo automático. Ciudad de México, México: Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hidalgo. (2012). Identificación de patrones de circulación atmosférica para el ecuador y su influencia para la ciudad de Quito. *Tesis de magister*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Holzworth, G. C. (1972). *Mixing Heights, Wind Speeds, and Potential for Urban Air Pollution Throughout the Contiguous United States. AP-101*. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- IMTA. (2009, Noviembre). *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. Retrieved Diciembre 2015, from Coordinación de Hidrología. Subcoordinación de Hidrometeorología: http://galileo.imta.mx/FUPROGRO/doc_eventos/c01_LobatoR_MB1.pdf
- INE. (2010). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Manual 1 Principios de Medición de la Calidad del Aire. México.
- INE. (2005, Marzo). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. Ciudad de México: Western Governors' Association, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ISBN 968-817-569-2.
- INE. (2006). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México*. Ciudad de México: ISBN:968-817-804-7.
- INE. (2010). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático Manual 5 Protocolo de manejo de datos de la calidad del aire. Ciudad de México.
- INECC. (2014, Mayo) a). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Tipos de modelos atmosféricos*. Retrieved 2015, from <http://www.inecc.gob.mx/calair-herramientas-analisis/582-calair-tipos-modelos>
- INECC. (2014, Mayo) b). *SEMARNAT*. Retrieved Noviembre 2015, from Modelos de la Calidad del Aire: <http://www.inecc.gob.mx/calair-herramientas-analisis/557-calair-modelos>
- INECC. (2014, Mayo) c). *Tipos de modelos atmosféricos*. Retrieved Noviembre 2015, from <http://www.inecc.gob.mx/calair-herramientas-analisis/582-calair-tipos-modelos>
- INECC-SEMARNAT. (2005, 05 23). Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. D.F., México: ISBN 968-817-569-2.
- INEGI. (2010) a). Anuario Estadístico del estado de Puebla (2010). Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2010) b). Cuéntame. *Puebla, Clima*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2010) c). Cuéntame. Estado de Puebla. México.
- INEGI. (2010) d). Sistema de Cuentas Nacionales de México. *Producto Interno Bruto por Entidad Federativa (2005-2009)*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2015). *Cuéntame, Población*. Retrieved from Número de habitantes en México, de acuerdo a la Encuesta Intercensal 2015: <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>
- Jacobson. (2006). *Fundamentals of Atmospheric Modelling 2nd Edition*. Cambridge University Press. 828 pp.
- Laing, & Evans. (2011). *Introducción a la Meteorología Tropical*. The COMET verioB 2.0 Program and National Center for Atmospheric Research.
- López, M. (2009). Aplicación del modelo de dispersión CALPUFF para la estimación de concentraciones del PM2.5. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México: Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Luna, C. (2015). Estudio de calidad del aire de la Zona Metropolitana de Cuernavaca y la posible aportación de contaminación proveniente de la Zona Metropolitana del Valle de México. Ciudad de México, México: Tesis de maestría, UNAM.
- MAM. (2000). Ministerio de Medio Ambiente de España. *Formato de Transmisión de datos versión 2.2*. Madrid, España.
- Masters, & Ela. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Matlab. (2016). *Documentation Probability Distributions*. Retrieved from © 1994-2016 The MathWorks, Inc.: <http://es.mathworks.com/help/stats/probability-distributions-1.html>
- Molina, L., & Molina, M. (2004). Megacities and Atmospheric Pollution. *ISSN 1047-3289. Air & Waste Management Association. 54*, 644-680.

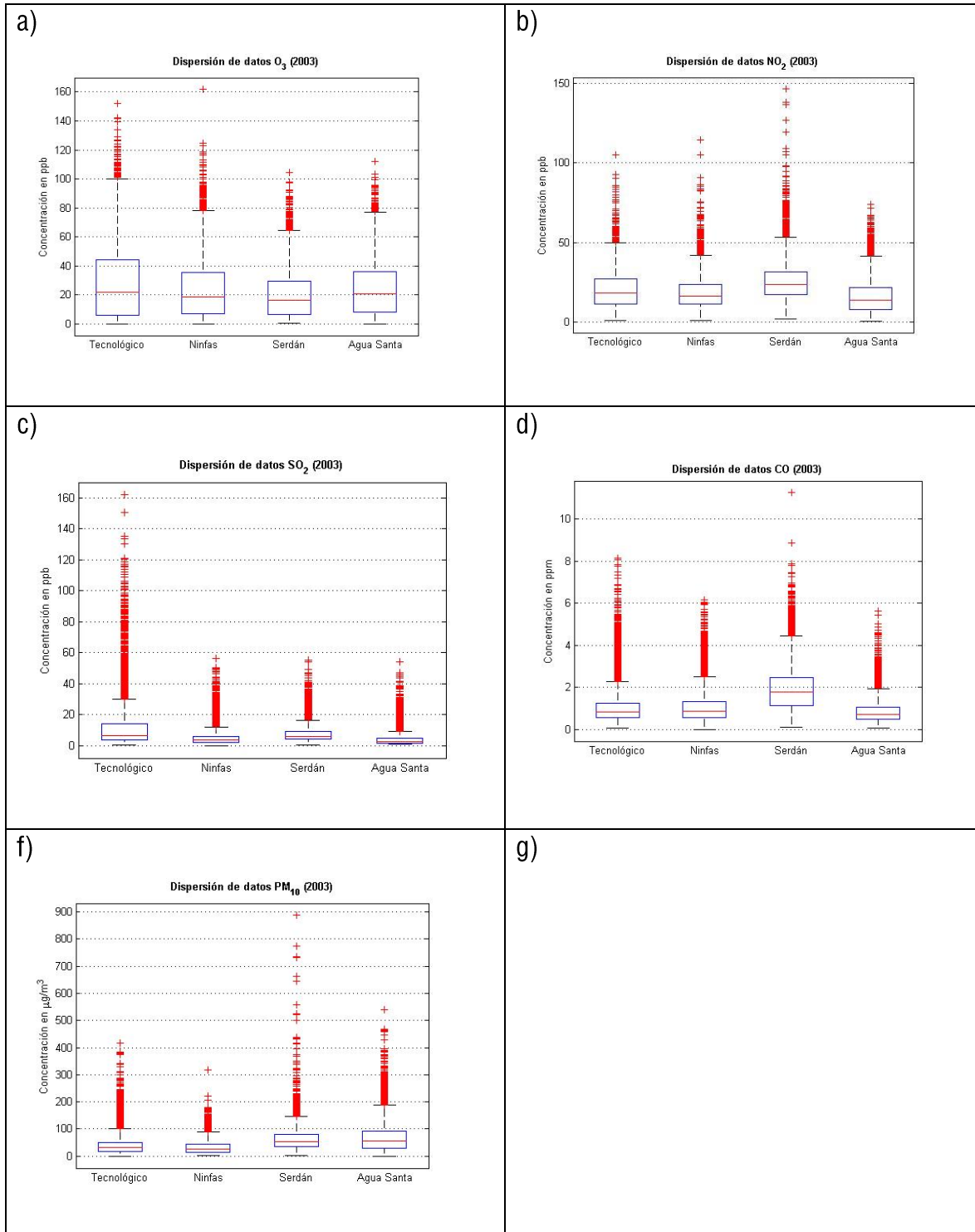
- NOAA. (2016). *National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce* (2000), NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999, <http://dx.doi.org/10.5065/D6M043C6>, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, Colo. (Updated daily.) Accessed† 07 03 2016.
- NIMBUS. (2001). *Nimbus Weather Services*. Retrieved Diciembre 2015, from Escalas Meteorológicas, capítulo 11: <http://200.58.146.28/nimbus/weather/pdf/cap11.pdf>
- OMS. (2000). Air Quality Guidelines for Europe. *WHO Regional Publications*.
- OMS. (2014, Marzo). *World Health Organization*. Retrieved from Calidad del aire (exterior) y salud. Nota descriptiva N°313: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
- ONU. (2014). Organización Mundial de laas Naciones Unidas. *Asuntos económicos y sociales. La situación demográfica en el mundo*. Nueva York, Estados Unidos de América.
- Orlanski. (1975). *A rational subdivision of scales for atmospheric processes*. Bulletin of the American Meteorological Society, 56(5):527–530.
- Palau JL, P.-L. G. (2005). The importance of meteorological scales to forecast air pollution scenarios on coastal complex terrain. In *Atmospheric Chemistry and Physics* (pp. 2771-2785). DOI.10.5194/acp-5-2771-2005.
- PROAIRE. (2012). Gestión de la Calidad del Aire del Estado de Puebla 2012-2020, Gobierno del Estado de Puebla. Puebla, Puebla, México: Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial Dirección de Calidad del Aire y Cambio Climático.
- Rincón, M. (2012, Enero). ACOPLAMIENTO DEL MODELO DE MESOESCALA WRF AL MODELO DE CALIDAD DEL AIRE CALPUFF. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias, Tesis de Maestría.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., . . . Becker, E. (2011). *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products*. *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5065/D61C1TXF>
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., . . . Becker, E. (2011). *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products*. *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5065/D61C1TXF>
- Scire, J. S., Robe, F. R., Fernau, M. E., & Yamartino, R. J. (2000). A User's Guide gor the CALMET Meteorological Model. Estados Unidos de América: 196 Baker Avenue Concord, MA: Earth Tech Inc. .
- Seinfeld, J., & Pandis, S. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 2da. Edición. Jhon Wiley & Sons, Inc: NewYork (USA).1232 pp.
- SEMARNAT. (2008). Sub-sistema del Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera de México. *Puebla*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales .
- SIMAT. (2015). *Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. La contaminación del aire*. Retrieved 2015, from <http://www.aire.df.gob.mx/default.php?opc=%27Y6BhnmKkYQ==%27>
- SIMAT. (2015). *Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Normatividad*. Retrieved 2015, from <http://www.aire.df.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Yw==>
- SIMAT. (2016). *Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México*. Retrieved Febrero 2016, from Normatividad: <http://www.aire.df.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Yw==>
- Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M., . . . Powers, J. (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR TECHNICAL NOTE*.
- SRC. (2016, Marzo 17). *Exponent*. Retrieved from Terrain Data: <http://www.src.com/calpuff/data/terrain.html>
- UA. (2004). *Universidad de Alcalá, Departamento de Ecología*. Retrieved from Método de Análisis de datos de ecología. Prácticas de Ecología. Licenciaturas de Biología y Ciencias Ambientales: <https://www.uco.es/servicios/informatica/windows/filemgr/download/ecolog/Metodos%20analisis%20datos.pdf>

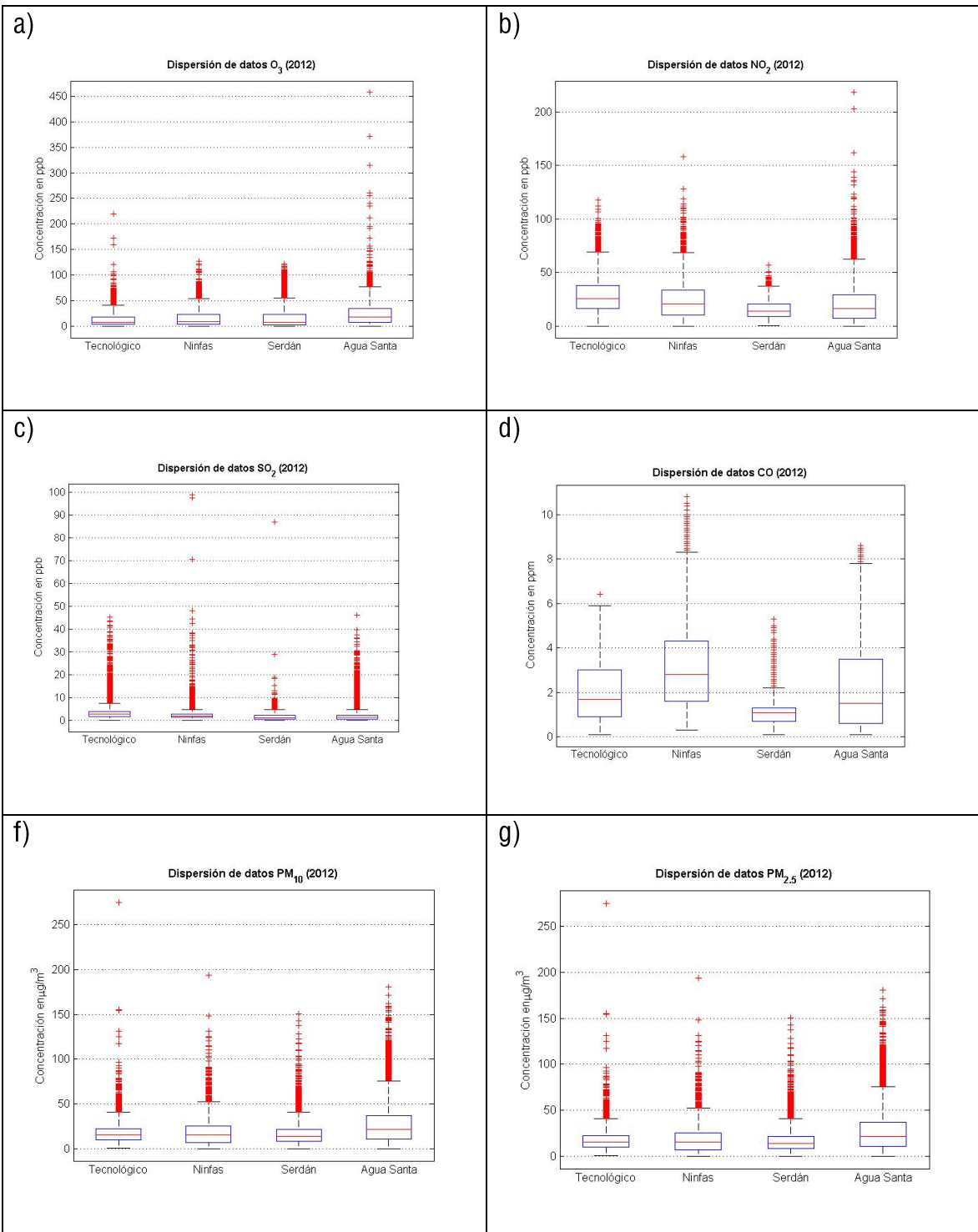
- UNFPA. (2014). Fondo de Población de las Naciones Unidas. Reporte "Estado de la población mundial 2014". *El poder de 1,800 millones. Los adolescentes, los jóvenes y la transformación del futuro*. New York, Estados Unidos de América: ISBN 978-0-89714-979-2.
- US Government Printing Office. (2005, Noviembre Miércoles 9). 40 CFR Part 51 Appendix W. *Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions*.
- USEPA. (1994). . Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume I: A Field Guide to Environment Quality Assurance. *Office of Research and Development*. . . Washington: IBSNEPA/600/R-94/038a.
- USGS. (2012). *US Geological Survey*. Retrieved from Index of /srtm/version2_1/SRTM30/w100n40 GTOPO30 modelo digital mundial de elevación (DEM) con un espaciado de malla horizontal de 30 arcsegundos.: http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM30/w100n40/
- Valverde. (2016). Characterization of atmospheric pollution dynamics in Spain by means of air quality modelling,. *Ph.D.Thesis*. Barcelona, Cataluña, España: UPC-BSC (Universidad Politécnica de Cataluña-Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación).
- Wang, W., Bruyere, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Lin, H., . . . Zhang, X. (2008). Weather Research and Forecasting Version 3. . *NCAR TECHNICAL NOTE*.
- Wark, K., & Warner, C. (1994). *Contaminación del Aire, Origen y Control*. México: Limusa.
- WHO. (2014, Marzo). *Organización Mundial de la Salud Calidad del aire (exterior) y Salud*. Retrieved 2015, from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- Wikipedia. (2016, Febrero). *Diagrama de caja*. Retrieved from https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_caja
- Wilks, D. (2006). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. *Department of Earth and Atmospheric Sciences, Cornell University*. Estados Unidos de América : Elsevier ISBN 13: 978-0-12-751966-1.
- Zavala, J. (2014). *Energía Cinética Turbulenta*. Retrieved from Apuntes: <http://www.atmosfera.unam.mx/jzavala/OceanoAtmosfera/2014/EnergiaCineticaTurbulenta.pdf>

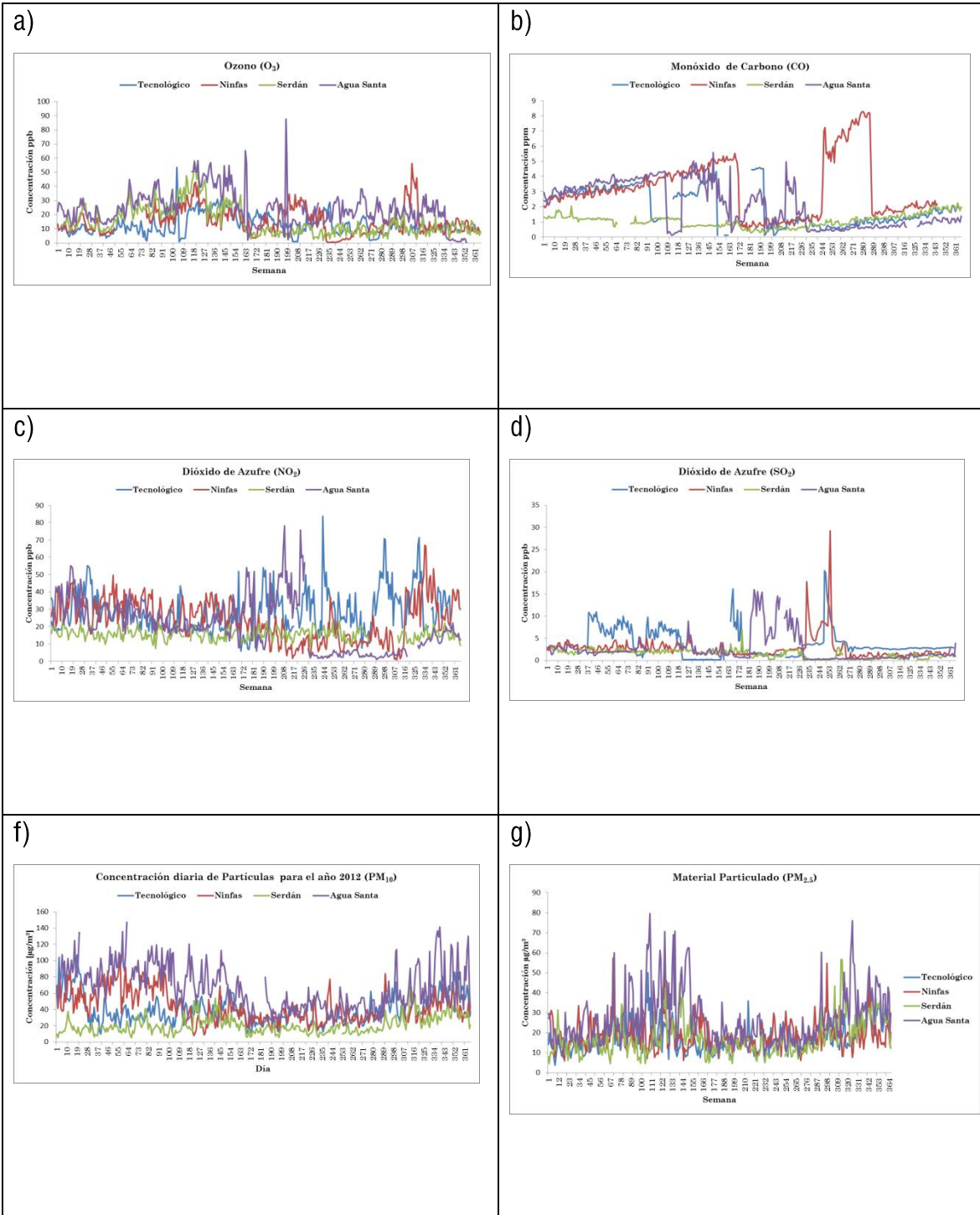
ANEXO 1.-MAPAS DE LA ZONA DE ESTUDIO



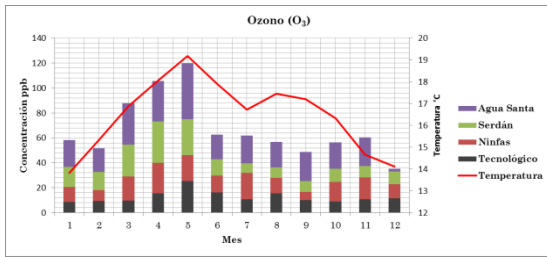
ANEXO 2.-GRÁFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA



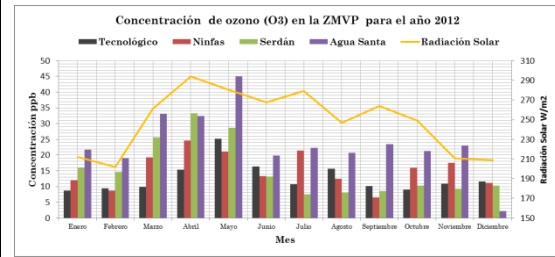




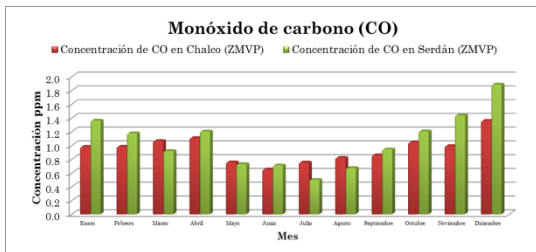
a)



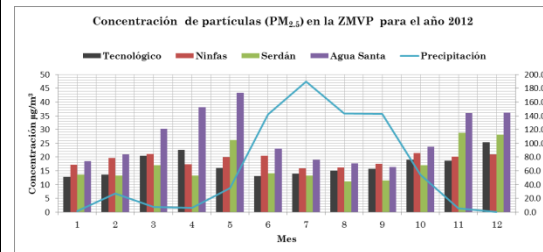
b)



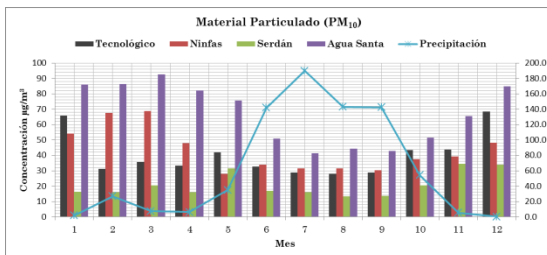
c)



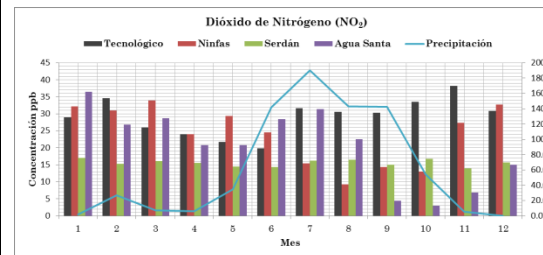
d)



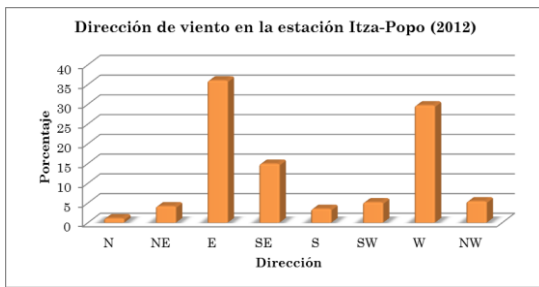
f)



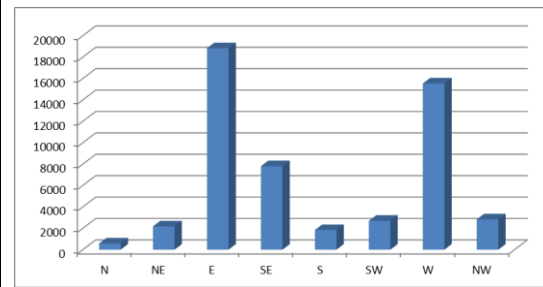
g)



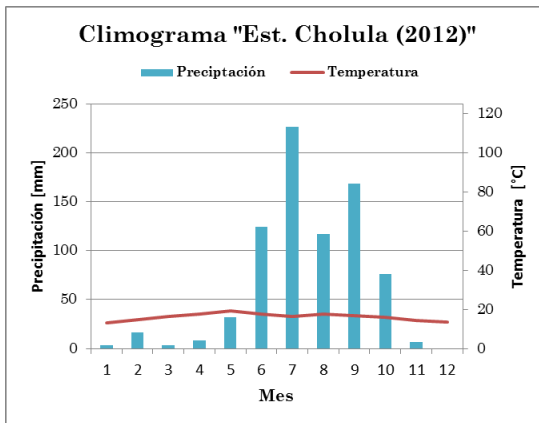
a)



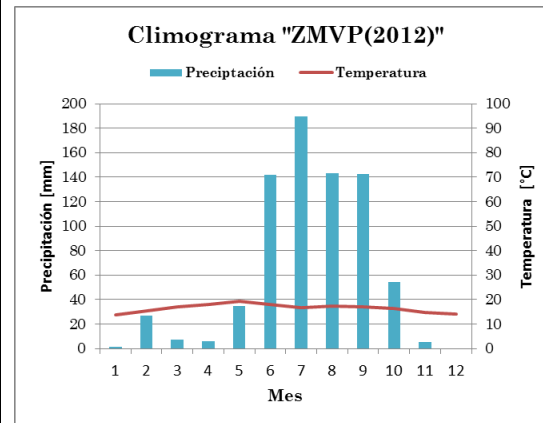
b)



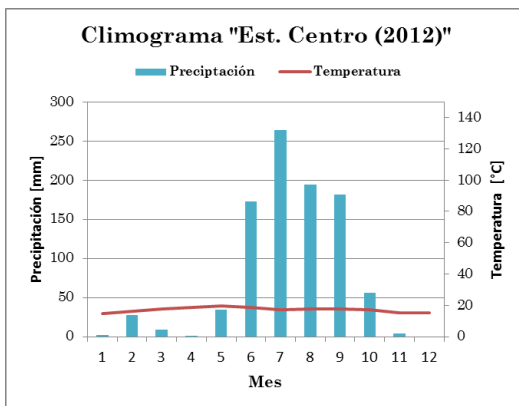
c)



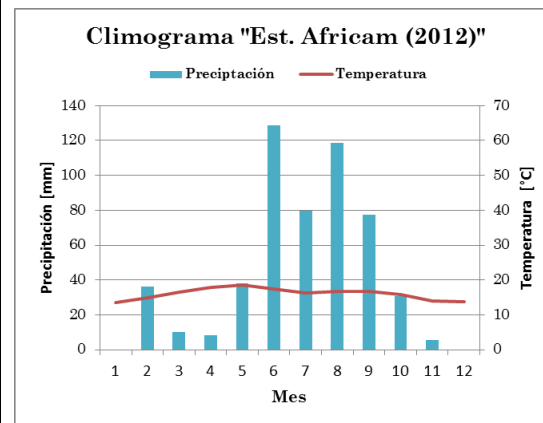
d)



f)

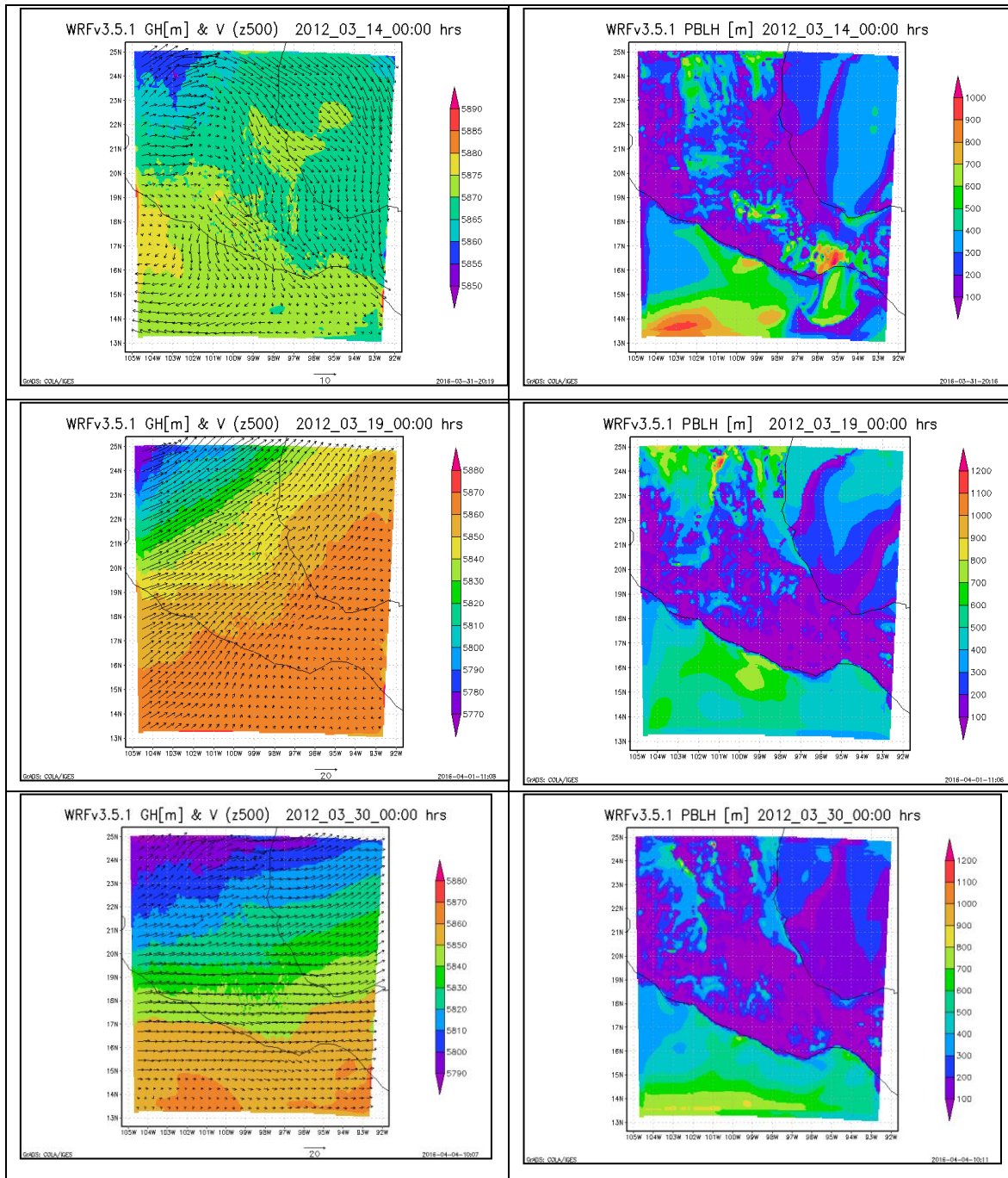


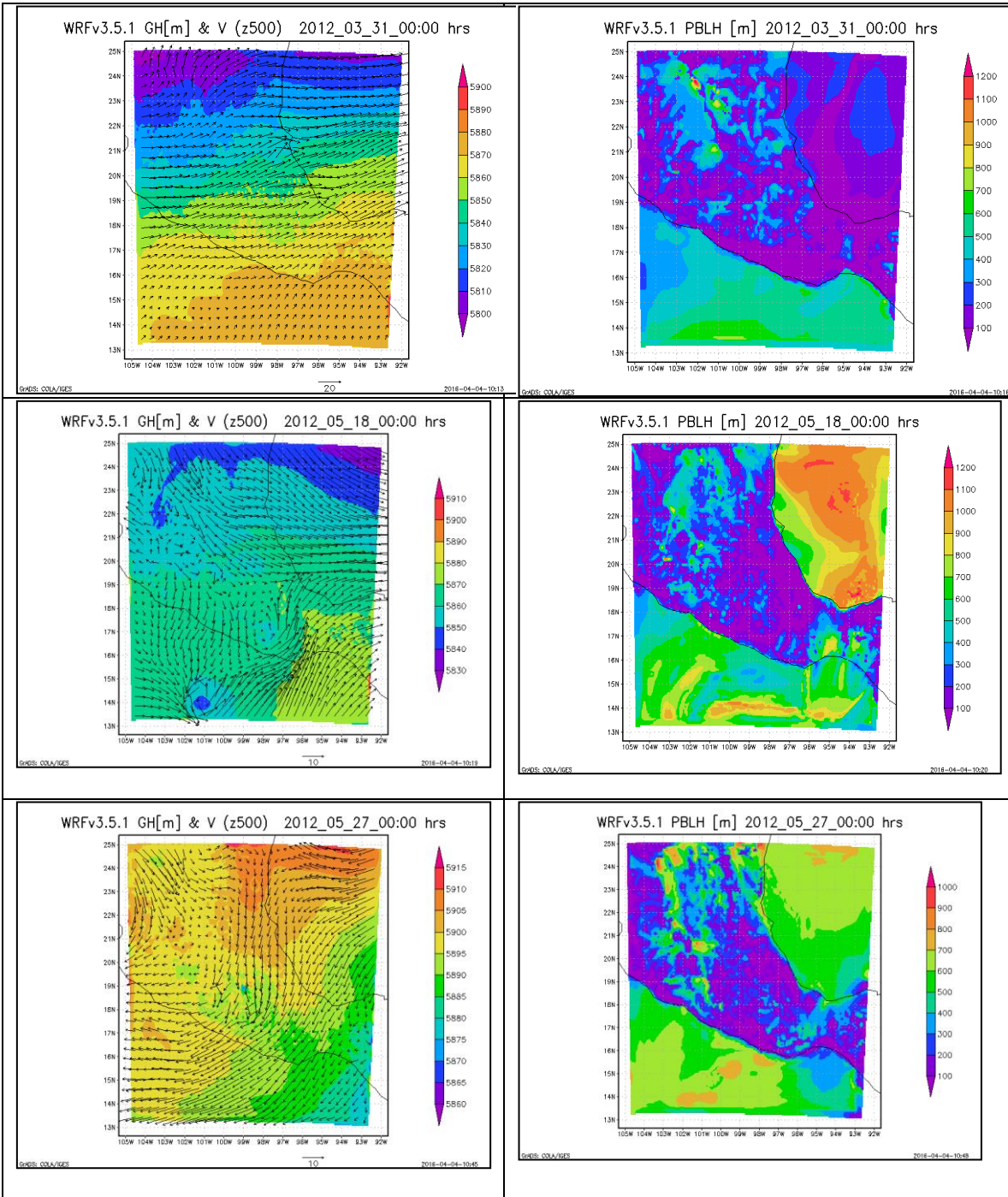
g)



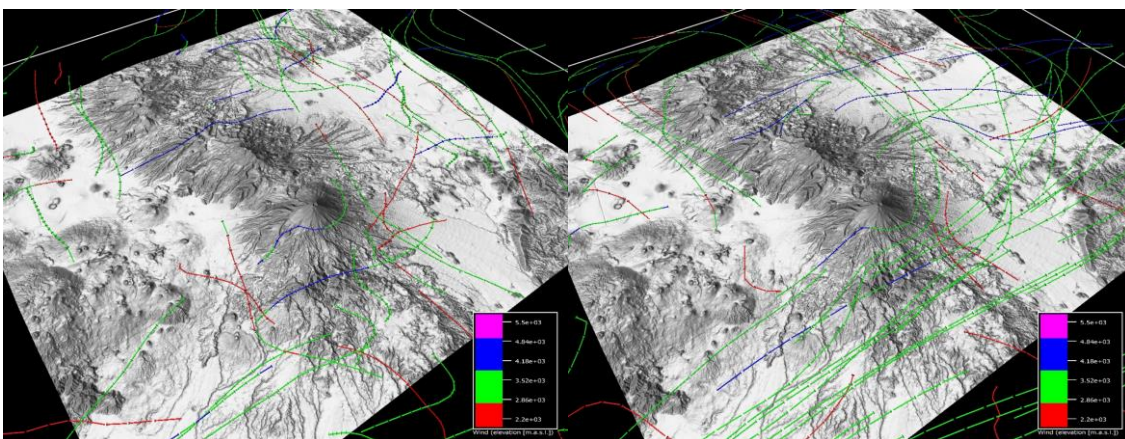
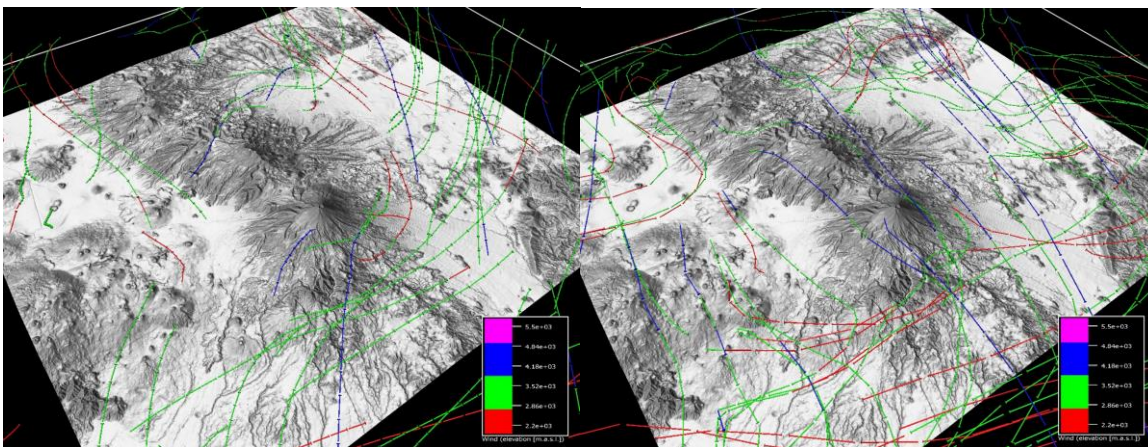
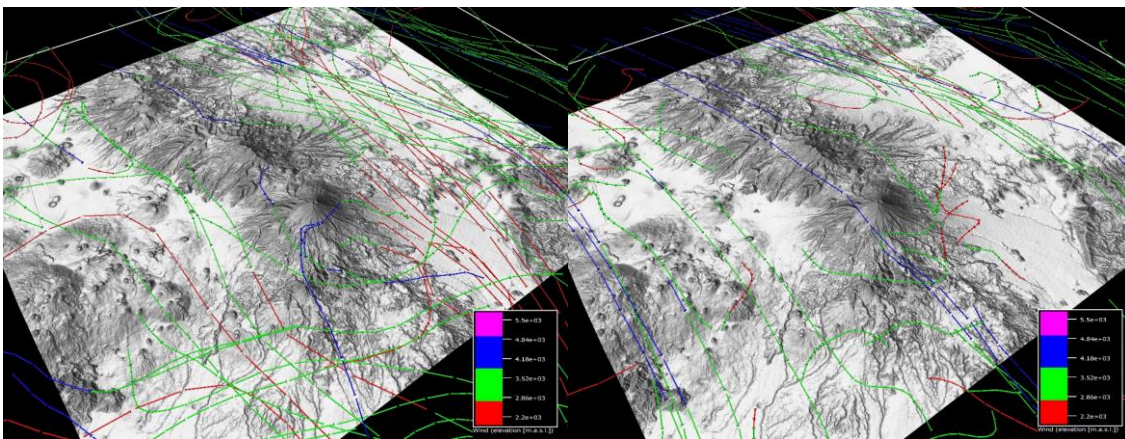
ANEXO 3.- VIZUALIZACIÓN DE VARIABLES METEOROLÓGICAS (SINÓPTICA Y LOCAL), en OPEN GRADS y VAPOR.

Visualización en OpenGrads.

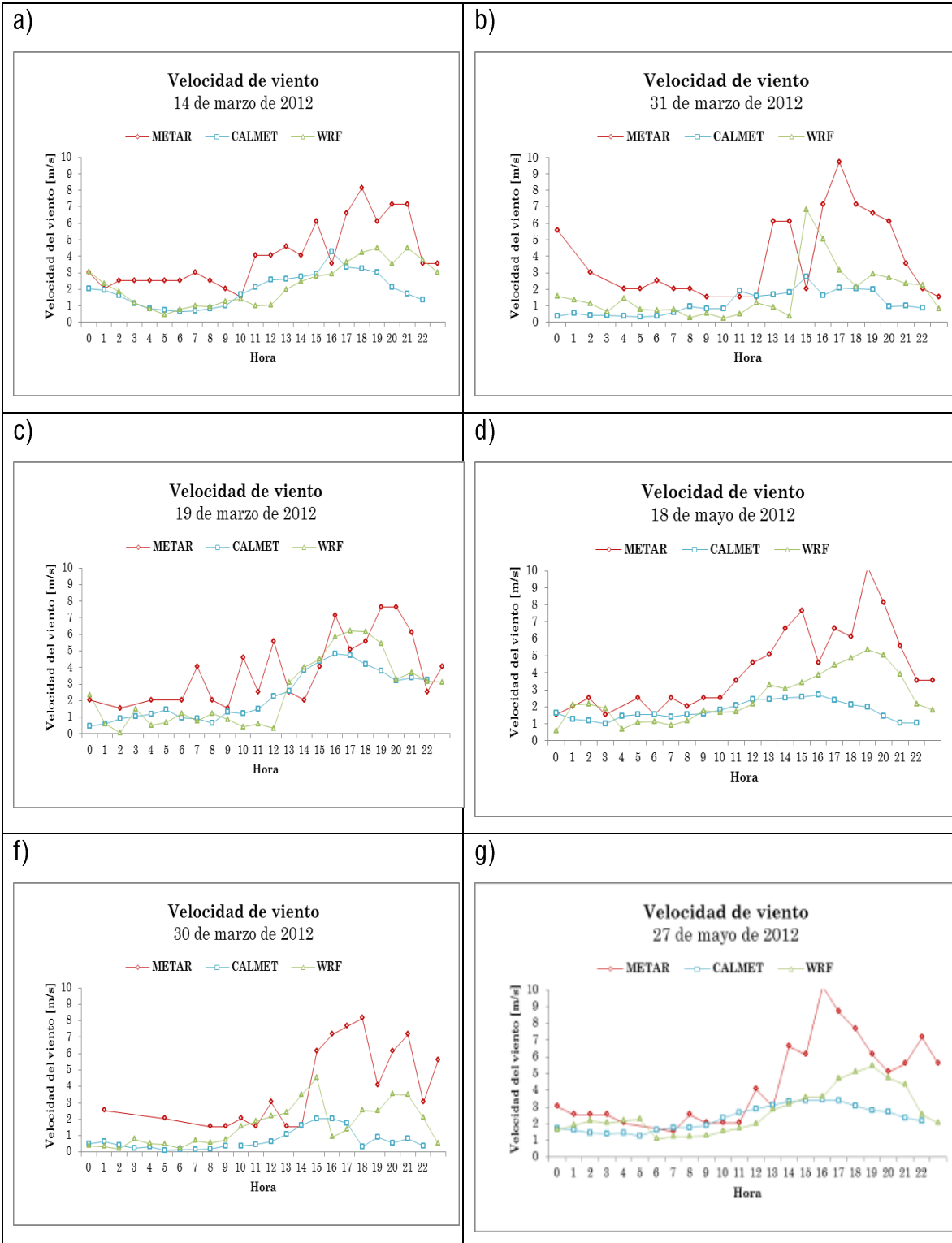


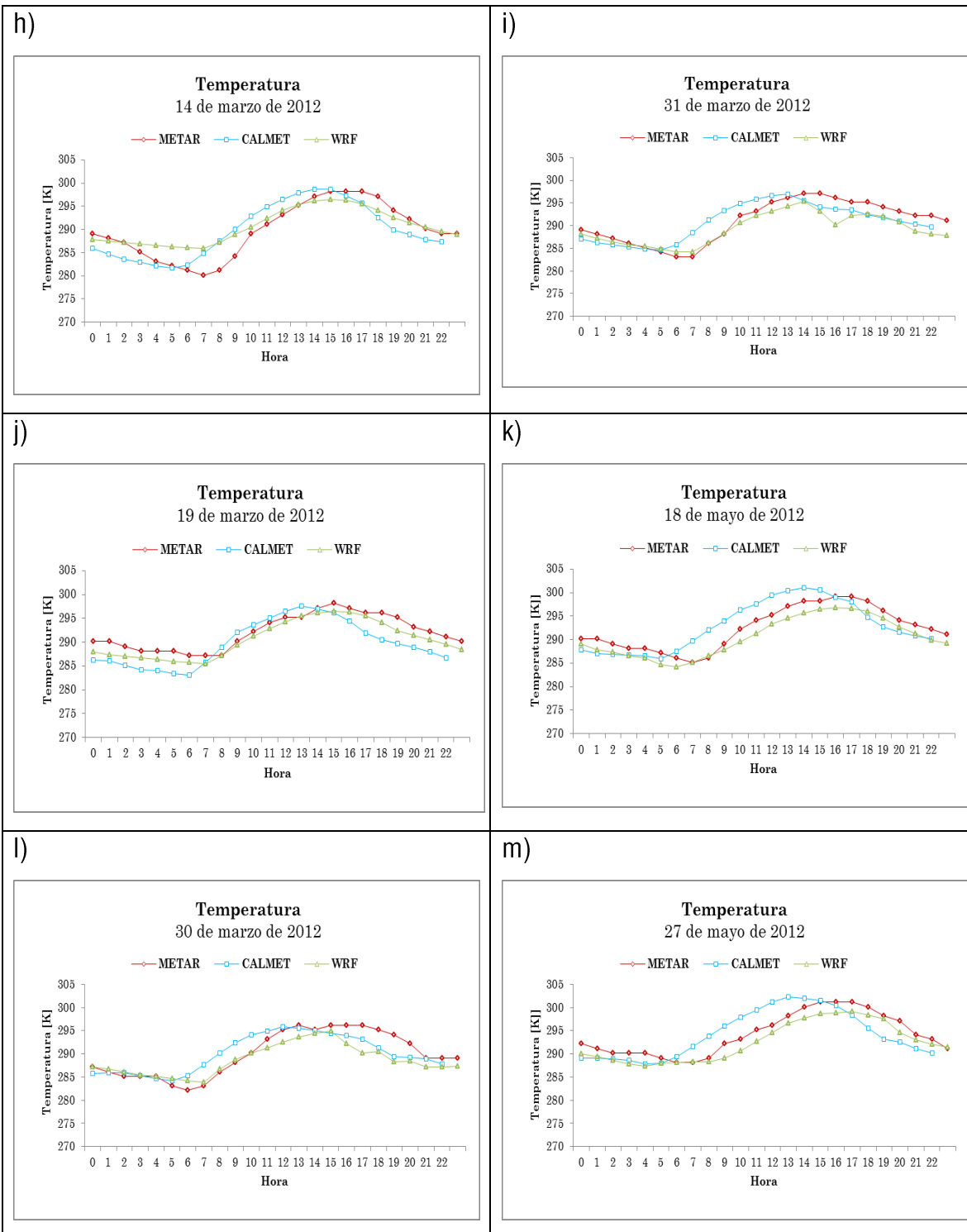


Visualización en VAPOR.

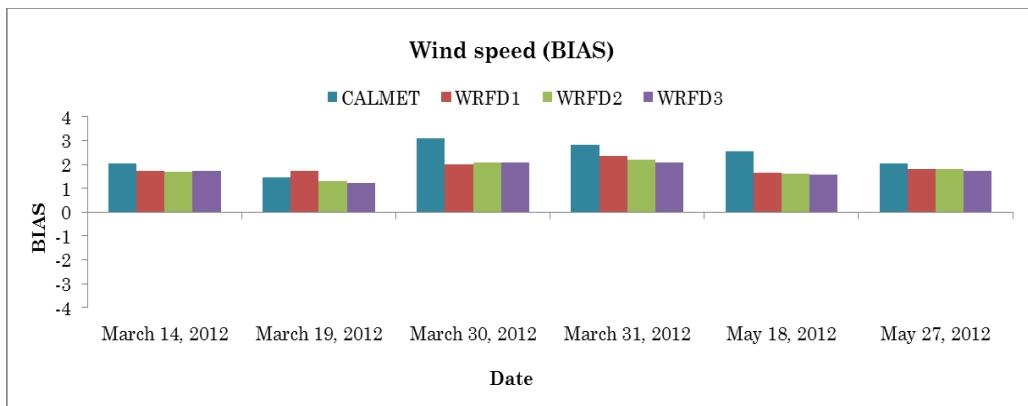
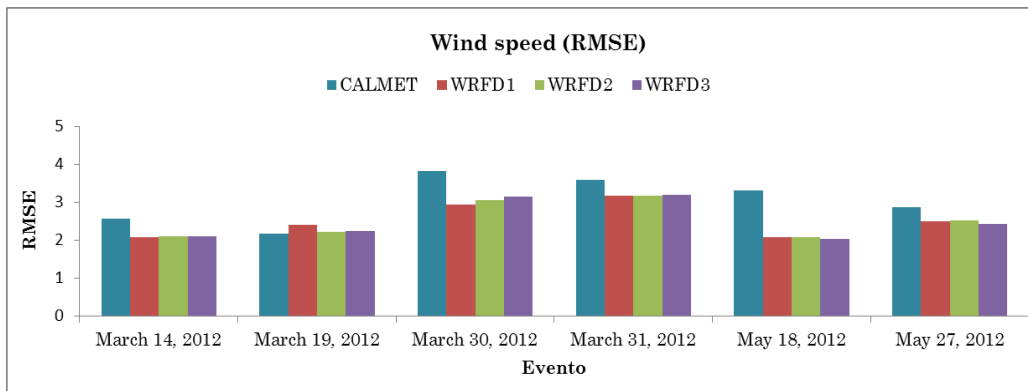
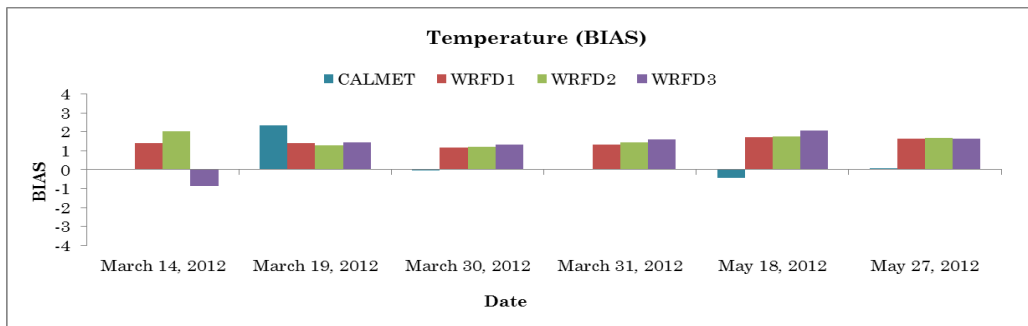
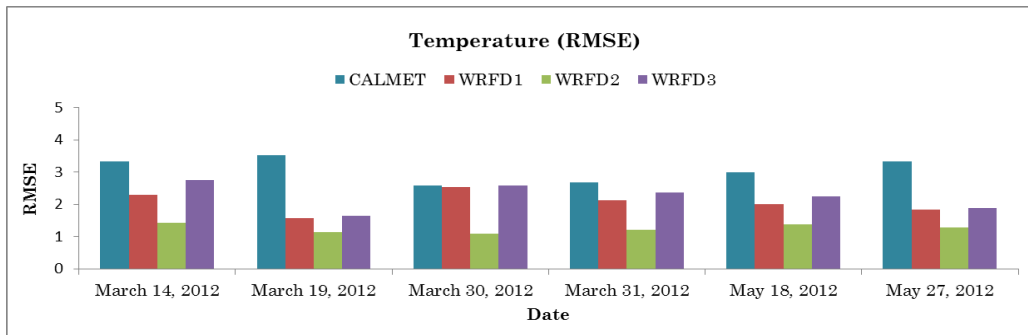


ANEXO 4.- GRÁFICAS DE LA METEOROLOGÍA (LOCAL) PARA LA VALIDACIÓN.





Validación de la modelización meteorológica de WRF y CALMET.



ANEXO 5.- EJEMPLO DE ARCHIVOS DE ENTRADA DE CALPUFF, CALMET Y WRF.

namelist_WRF.input

```
&time_control
run_days           = 0,
run_hours          = 36,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2012, 2012, 2012, 2012,
start_month        = 05, 05, 05, 05,
start_day          = 27, 27, 27, 27,
start_hour         = 00, 00, 00, 00,
start_minute       = 00, 00, 00, 00,
start_second       = 00, 00, 00, 00,
end_year           = 2012, 2012, 2012, 2012,
end_month          = 05, 05, 05, 05,
end_day            = 28, 28, 28, 28,
end_hour           = 06, 06, 06, 06,
end_minute         = 00, 00, 00, 00,
end_second         = 00, 00, 00, 00,
interval_seconds   = 3600
input_from_file    = .true.,.true.,.true.,.true.,
history_interval   = 60, 60, 60, 60,
frames_per_outfile = 38, 38, 38, 38,
restart            = .false.,
restart_interval   = 5000,
io_form_history    = 2
```

```
io_form_restart      = 2
io_form_input        = 2
io_form_boundary     = 2
debug_level         = 0
/

&domains
time_step            = 18,
time_step_fract_num  = 0,
time_step_fract_den  = 1,
max_dom              = 3,
s_we                 = 1, 1, 1, 1,
e_we                 = 100, 88, 76, 64,
s_sn                 = 1, 1, 1, 1,
e_sn                 = 100, 88, 76, 64,
e_vert               = 50, 50, 50, 50,
p_top_requested      = 5000,
num_metgrid_levels   = 27,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                   = 3000, 1000, 333.333,
dy                   = 3000, 1000, 333.333,
grid_id              = 1, 2, 3, 4,
parent_id             = 1, 1, 2, 3,
i_parent_start        = 1, 36, 32, 28,
j_parent_start        = 1, 36, 32, 28,
parent_grid_ratio     = 1, 3, 3, 3,
parent_time_step_ratio = 1, 3, 3, 3,
feedback              = 1,
smooth_option         = 0
```


eta_levels = 1.000, 0.994, 0.987, 0.979, 0.970,
 0.960, 0.949, 0.937, 0.924, 0.909,
 0.892, 0.873, 0.851, 0.826, 0.798,
 0.768, 0.736, 0.702, 0.666, 0.629,
 0.592, 0.554, 0.515, 0.477, 0.440,
 0.404, 0.370, 0.338, 0.309, 0.285,
 0.265, 0.247, 0.231, 0.217, 0.204,
 0.192, 0.179, 0.167, 0.154, 0.141,
 0.127, 0.113, 0.100, 0.086, 0.071,
 0.057, 0.043, 0.029, 0.015, 0

/

&physics

mp_physics = 8, 8, 8,
 ra_lw_physics = 1, 1, 1,
 ra_sw_physics = 1, 1, 1,
 radt = 10, 10, 10,
 sf_sfclay_physics = 1, 1, 1,
 sf_surface_physics = 2, 2, 2,
 bl_pbl_physics = 1, 1, 1,
 bldt = 0, 0, 0,
 cu_physics = 1, 0, 0,
 cudt = 5, 5, 5,
 isfflx = 1,
 ifsnow = 0,
 icloud = 1,
 surface_input_source = 1,
 num_soil_layers = 4,
 sf_urban_physics = 0, 0, 0,

```
/

&fdda
/

&dynamics
w_damping          = 0,
diff_opt           = 1,
km_opt            = 4,
diff_6th_opt       = 0, 0, 0,
diff_6th_factor    = 0.12, 0.12, 0.12,
base_temp          = 290.
damp_opt          = 0,
zdamp             = 5000., 5000., 5000.,
dampcoef          = 0.2, 0.2, 0.2,
khdif             = 0, 0, 0,
kvdif             = 0, 0, 0,
non_hydrostatic    = .true., .true., .true.,
moist_adv_opt      = 1, 1, 1,
scalar_adv_opt     = 1, 1, 1,
/

&bdy_control
spec_bdy_width     = 5,
spec_zone          = 1,
relax_zone         = 4,
specified          = .true., .false., .false., .false.,
nested            = .false., .true., .true., .true.,
/
```

```
&grib2
```

```
/
```

```
&namelist_quilt
```

```
nio_tasks_per_group = 0,
```

```
nio_groups = 1,
```

```
/
```

namelist_WPS.wps

```
&share
```

```
wrf_core = 'ARW',
```

```
max_dom = 4,
```

```
start_date = '2012-03-13_12:00:00', '2012-03-13_12:00:00', '2012-03-13_12:00:00',  
'2012-03-13_12:00:00',
```

```
end_date = '2012-03-14_18:00:00', '2012-03-14_18:00:00', '2012-03-14_18:00:00',  
'2012-03-14_18:00:00',
```

```
interval_seconds = 21600,
```

```
io_form_geogrid = 2,
```

```
opt_output_from_geogrid_path = '/gpfs/scratch/bsc32/bsc32257/OUT/Mexico-  
Puebla/ZMVM/ZMVMP/',
```

```
debug_level = 0,
```

```
/
```

```
&geogrid
```

```
parent_id = 1,1,2,3,
```

```
parent_grid_ratio = 1,3,3,3,
```

```
i_parent_start = 1,56,52,48,
```

```
j_parent_start = 1,56,52,48,
```

```
e_we      = 160,148,136,124,
e_sn      = 160,148,136,124,
geog_data_res = '10m','5m','2m','30s',
dx = 27000,
dy = 27000,
map_proj = 'lambert',
ref_lat  = 19.124,
ref_lon  = -98.556,
truelat1 = 19.124,
truelat2 = 19.124,
stand_lon = -101.608,
geog_data_path      =          '/gpfs/projects/bsc32/bsc32359/CMAQ-
mat/FORECAST/METEO/IN/geog',
opt_geogrid_tbl_path =          '/gpfs/scratch/bsc32/bsc32257/OUT/Mexico-
Puebla/ZMVM/ZMVMP/',
ref_x = 80.0,
ref_y = 80.0,
/

&ungrib
out_format = 'WPS',
prefix = 'FILE',
/

&metgrid
fg_name = 'FILE',
io_form_metgrid = 2,
opt_output_from_metgrid_path =  '/gpfs/scratch/bsc32/bsc32257/OUT/Mexico-
Puebla/ZMVM/ZMVMP/',
```

```
opt_metgrid_tbl_path      =      '/gpfs/scratch/bsc32/bsc32257/OUT/Mexico-  
Puebla/ZMVM/ZMVMP',  
/  

```

```
&mod_levs
```

```
press_pa = 201300 , 200100 , 100000 ,  
          95000 , 90000 ,  
          85000 , 80000 ,  
          75000 , 70000 ,  
          65000 , 60000 ,  
          55000 , 50000 ,  
          45000 , 40000 ,  
          35000 , 30000 ,  
          25000 , 20000 ,  
          15000 , 10000 ,  
          5000 , 1000
```

```
/  

```

```
&domain_wizard
```

```
grib_data_path = '/gpfs/projects/bsc32/bsc32257/nWRF/FNL/MEX',  
grib_vtable = 'Vtable.GFS',  
dwiz_name     =ZMVMP  
dwiz_desc     =Mexico-Puebla  
dwiz_user_rect_x1 =1461  
dwiz_user_rect_y1 =1258  
dwiz_user_rect_x2 =2206  
dwiz_user_rect_y2 =1932  
dwiz_show_political =true
```

```
dwiz_center_over_gmt =true  
dwiz_latlon_space_in_deg =10  
dwiz_latlon_linecolor =-8355712  
dwiz_map_scale_pct =50.0  
dwiz_map_vert_scrollbar_pos =0  
dwiz_map_horiz_scrollbar_pos =0  
dwiz_gridpt_dist_km =27.0  
dwiz_mpi_command =  
dwiz_tcvitals =null  
dwiz_bigmap =Y  
/
```

CALMET.INP 2.2 Hour Start and End Times with Seconds
CALMET simulation

----- Run title (3 lines) -----

CALMET MODEL CONTROL FILE

INPUT GROUP: 0 -- Input and Output File Names

Subgroup (a)

```

-----
Default Name  Type      File Name
-----
GEO.DAT      input  ! GEODAT=geo.DAT  !
SURF.DAT     input  ! SRFDAT=surf1.DAT !
CLOUD.DAT    input  * CLDDAT=          *
PRECIP.DAT   input  * PRCDAT=PRECIP.DAT *
WT.DAT       input  * WTDAT=           *

CALMET.LST   output ! METLST=CALMET1.LST !
CALMET.DAT   output ! METDAT=CALMET1.DAT !
PACOUT.DAT   output * PACDAT=          *
    
```

All file names will be converted to lower case if LCFILES = T
 Otherwise, if LCFILES = F, file names will be converted to UPPER CASE
 T = lower case ! LCFILES = T !
 F = UPPER CASE

NUMBER OF UPPER AIR & OVERWATER STATIONS:

Number of upper air stations (NUSTA) No default ! NUSTA = 1 !
 Number of overwater met stations
 (NOWSTA) No default ! NOWSTA = 0 !

NUMBER OF PROGNOSTIC and IGF-CALMET FILES:

Number of MM4/MM5/3D.DAT files
 (NM3D) No default ! NM3D = 0 !
 Number of IGF-CALMET.DAT files
 (NIGF) No default ! NIGF = 0 !

!END!

Subgroup (b)

Upper air files (one per station)

Maestría en Ingeniería Ambiental-Aire

```

-----
Default Name Type   File Name
-----
UP.DAT   input   1 ! UPDAT=up1.DAT! !END!
-----

```

Subgroup (c)

Overwater station files (one per station)

```

-----
Default Name Type   File Name
-----
SEA1.DAT   input   1 * SEADAT=4007.DAT* *END*
-----

```

Subgroup (d)

MM4/MM5/3D.DAT files (consecutive or overlapping)

```

-----
Default Name Type   File Name
-----
MM51.DAT   input   1 * M3DDAT=MM4.DAT* *END*
-----

```

Subgroup (e)

IGF-CALMET.DAT files (consecutive or overlapping)

```

-----
Default Name Type   File Name
-----
IGFn.DAT   input   1 * IGFDAT=CALMET0.DAT * *END*
-----

```

Subgroup (f)

Other file names

```

-----
Default Name Type   File Name
-----
DIAG.DAT   input   * DIADAT=          *
PROG.DAT   input   * PRGDAT=          *

TEST.PRT   output  * TSTPRT=          *
TEST.OUT   output  * TSTOUT=          *
TEST.KIN   output  * TSTKIN=          *
TEST.FRD   output  * TSTFRD=          *
TEST.SLP   output  * TSTSLP=          *
DCST.GRD   output  * DCSTGD=          *
-----

```

- NOTES: (1) File/path names can be up to 70 characters in length
(2) Subgroups (a) and (f) must have ONE 'END' (surrounded by delimiters) at the end of the group
(3) Subgroups (b) through (e) are included ONLY if the corresponding

number of files (NUSTA, NOWSTA, NM3D, NIGF) is not 0, and each must have an 'END' (surround by delimiters) at the end of EACH LINE

!END!

 INPUT GROUP: 1 -- General run control parameters

Starting date: Year (IBYR) -- No default !IBYR = 2012 !
 Month (IBMO) -- No default !IBMO = 3 !
 Day (IBDY) -- No default !IBDY = 14 !
 Starting time: Hour (IBHR) -- No default !IBHR = 0 !
 Second (IBSEC) -- No default !IBSEC = 0 !

Ending date: Year (IEYR) -- No default !IEYR = 2012 !
 Month (IEMO) -- No default !IEMO = 3 !
 Day (IEDY) -- No default !IEDY = 14 !
 Ending time: Hour (IEHR) -- No default !IEHR = 23 !
 Second (IESEC) -- No default !IESEC = 0 !

UTC time zone (ABTZ) -- No default !ABTZ= UTC-0600 !
 (character*8)
 PST = UTC-0800, MST = UTC-0700 , GMT = UTC-0000
 CST = UTC-0600, EST = UTC-0500

Length of modeling time-step (seconds)
 Must divide evenly into 3600 (1 hour)
 (NSECDT) Default:3600 !NSECDT = 3600 !
 Units: seconds

Run type (IRTYPE) -- Default: 1 !IRTYPE= 1 !

 0 = Computes wind fields only
 1 = Computes wind fields and micrometeorological variables
 (u*, w*, L, zi, etc.)
 (IRTYPE must be 1 to run CALPUFF or CALGRID)

Compute special data fields required
 by CALGRID (i.e., 3-D fields of W wind
 components and temperature)
 in additional to regular Default: T !LCALGRD = T !
 fields ? (LCALGRD)
 (LCALGRD must be T to run CALGRID)

Flag to stop run after
 SETUP phase (ITEST) Default: 2 !ITEST= 2 !
 (Used to allow checking
 of the model inputs, files, etc.)

Maestría en Ingeniería Ambiental-Aire

ITEST = 1 - STOPS program after SETUP phase
 ITEST = 2 - Continues with execution of
 COMPUTATIONAL phase after SETUP

Test options specified to see if
 they conform to regulatory
 values? (MREG) No Default ! MREG = 0 !

0 = NO checks are made

1 = Technical options must conform to USEPA guidance

- IMIXH -1 Maul-Carson convective mixing height
 over land; OCD mixing height overwater
- ICOARE 0 OCD deltaT method for overwater fluxes
- THRESHL 0.0 Threshold buoyancy flux over land needed
 to sustain convective mixing height growth
- ISURFT > 0 in OBS mode (pick one representative station)
 -2 in NOOBS mode (itprog=2) (average all
 surface prognostic temperatures to get
 a single representative sf. temp)
- IUPT > 0 in OBS mode (pick one representative station)
 -2 in NOOBS mode (ITPROG>0) (average all surface
 prognostic temperatures to get a single
 representative sf. temp)
- IZICRLX 0 Do NOT use convective mixing height relaxation
 to equilibrium value

!END!

 INPUT GROUP: 2 -- Map Projection and Grid control parameters

Projection for all (X,Y):

Map projection

(PMAP) Default: UTM ! PMAP = UTM !

- UTM : Universal Transverse Mercator
- TTM : Tangential Transverse Mercator
- LCC : Lambert Conformal Conic
- PS : Polar Stereographic
- EM : Equatorial Mercator
- LAZA : Lambert Azimuthal Equal Area

False Easting and Northing (km) at the projection origin

(Used only if PMAP= TTM, LCC, or LAZA)

(FEAST) Default=0.0 ! FEAST = 0.000 !

(FNORTH) Default=0.0 ! FNORTH = 0.000 !

UTM zone (1 to 60)
 (Used only if PMAP=UTM)
 (IUTMZN) No Default ! IUTMZN = 14 !

Hemisphere for UTM projection?
 (Used only if PMAP=UTM)
 (UTMHEM) Default: N ! UTMHEM = N !
 N : Northern hemisphere projection
 S : Southern hemisphere projection

Latitude and Longitude (decimal degrees) of projection origin
 (Used only if PMAP= TTM, LCC, PS, EM, or LAZA)
 (RLAT0) No Default ! RLAT0 = 0N !
 (RLON0) No Default ! RLON0 = 0W !

TTM : RLON0 identifies central (true N/S) meridian of projection
 RLAT0 selected for convenience
 LCC : RLON0 identifies central (true N/S) meridian of projection
 RLAT0 selected for convenience
 PS : RLON0 identifies central (grid N/S) meridian of projection
 RLAT0 selected for convenience
 EM : RLON0 identifies central meridian of projection
 RLAT0 is REPLACED by 0.0N (Equator)
 LAZA: RLON0 identifies longitude of tangent-point of mapping plane
 RLAT0 identifies latitude of tangent-point of mapping plane

Matching parallel(s) of latitude (decimal degrees) for projection
 (Used only if PMAP= LCC or PS)
 (XLAT1) No Default ! XLAT1 = 0N !
 (XLAT2) No Default ! XLAT2 = 0N !

LCC : Projection cone slices through Earth's surface at XLAT1 and XLAT2
 PS : Projection plane slices through Earth at XLAT1
 (XLAT2 is not used)

 Note: Latitudes and longitudes should be positive, and include a
 letter N,S,E, or W indicating north or south latitude, and
 east or west longitude. For example,
 35.9 N Latitude = 35.9N
 118.7 E Longitude = 118.7E

Datum-region

The Datum-Region for the coordinates is identified by a character
 string. Many mapping products currently available use the model of the
 Earth known as the World Geodetic System 1984 (WGS-84). Other local
 models may be in use, and their selection in CALMET will make its output

consistent with local mapping products. The list of Datum-Regions with official transformation parameters is provided by the National Imagery and Mapping Agency (NIMA).

NIMA Datum - Regions(Examples)

-
- WGS-84 WGS-84 Reference Ellipsoid and Geoid, Global coverage (WGS84)
 - NAS-C NORTH AMERICAN 1927 Clarke 1866 Spheroid, MEAN FOR CONUS (NAD27)
 - NAR-C NORTH AMERICAN 1983 GRS 80 Spheroid, MEAN FOR CONUS (NAD83)
 - NWS-84 NWS 6370KM Radius, Sphere
 - ESR-S ESRI REFERENCE 6371KM Radius, Sphere

Datum-region for output coordinates
 (DATUM) Default: WGS-84 ! DATUM = WGS-84 !

Horizontal grid definition:

Rectangular grid defined for projection PMAP,
 with X the Easting and Y the Northing coordinate

No. X grid cells (NX) No default ! NX = 115 !
 No. Y grid cells (NY) No default ! NY = 115 !

Grid spacing (DGRIDKM) No default ! DGRIDKM = 1. !
 Units: km

Reference grid coordinate of
 SOUTHWEST corner of grid cell (1,1)

X coordinate (XORIGKM) No default ! XORIGKM = 489.000 !
 Y coordinate (YORIGKM) No default ! YORIGKM = 2057.000 !
 Units: km

Vertical grid definition:

No. of vertical layers (NZ) No default ! NZ = 10 !

Cell face heights in arbitrary
 vertical grid (ZFACE(NZ+1)) No defaults
 Units: m
 ! ZFACE = 0.,20.,40.,80.,160.,300.,600.,1000.,1500.,2200.,5000. !

!END!

INPUT GROUP: 3 -- Output Options

DISK OUTPUT OPTION

Save met. fields in an unformatted
output file ? (LSAVE) Default: T ! LSAVE = T !
(F = Do not save, T = Save)

Type of unformatted output file:
(IFORMO) Default: 1 ! IFORMO = 1 !

- 1 = CALPUFF/CALGRID type file (CALMET.DAT)
- 2 = MESOPUFF-II type file (PACOUT.DAT)

LINE PRINTER OUTPUT OPTIONS:

Print met. fields ? (LPRINT) Default: F ! LPRINT = F !
(F = Do not print, T = Print)
(NOTE: parameters below control which
met. variables are printed)

Print interval
(IPRINF) in hours Default: 1 ! IPRINF = 1 !
(Meteorological fields are printed
every 1 hours)

Specify which layers of U, V wind component
to print (IUUVOUT(NZ)) -- NOTE: NZ values must be entered
(0=Do not print, 1=Print)
(used only if LPRINT=T) Defaults: NZ*0
! IUUVOUT = 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 !

Specify which levels of the W wind component to print
(NOTE: W defined at TOP cell face -- 10 values)
(IWOUT(NZ)) -- NOTE: NZ values must be entered
(0=Do not print, 1=Print)
(used only if LPRINT=T & LCALGRD=T)

Defaults: NZ*0
! IWOUT = 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 !

Specify which levels of the 3-D temperature field to print
(ITOUT(NZ)) -- NOTE: NZ values must be entered
(0=Do not print, 1=Print)

(used only if LPRINT=T & LCALGRD=T)

 Defaults: NZ*0
 ! ITOUT = 0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0 !

Specify which meteorological fields
 to print
 (used only if LPRINT=T) Defaults: 0 (all variables)

| Variable | Print ? | |
|---------------|----------------------------------|-------------------------------|
| | (0 = do not print, 1 = print) | |
| ----- | ----- | |
| ! STABILITY = | 0 | ! - PGT stability class |
| ! USTAR = | 0 | ! - Friction velocity |
| ! MONIN = | 0 | ! - Monin-Obukhov length |
| ! MIXHT = | 1 | ! - Mixing height |
| ! WSTAR = | 0 | ! - Convective velocity scale |
| ! PRECIP = | 0 | ! - Precipitation rate |
| ! SENSHEAT = | 0 | ! - Sensible heat flux |
| ! CONVZI = | 0 | ! - Convective mixing ht. |

Testing and debug print options for micrometeorological module

Print input meteorological data and
 internal variables (LDB) Default: F ! LDB = F !
 (F = Do not print, T = print)
 (NOTE: this option produces large amounts of output)

First time step for which debug data
 are printed (NN1) Default: 1 ! NN1 = 1 !

Last time step for which debug data
 are printed (NN2) Default: 1 ! NN2 = 1 !

Print distance to land
 internal variables (LDBCST) Default: F ! LDBCST = F !
 (F = Do not print, T = print)
 (Output in .GRD file DCST.GRD, defined in input group 0)

Testing and debug print options for wind field module
 (all of the following print options control output to
 wind field module's output files: TEST.PRT, TEST.OUT,
 TEST.KIN, TEST.FRD, and TEST.SLP)

Control variable for writing the test/debug
 wind fields to disk files (IOUTD)

(0=Do not write, 1=write) Default: 0 ! IOUTD = 0 !

Number of levels, starting at the surface,
to print (NZPRN2) Default: 1 ! NZPRN2 = 0 !

Print the INTERPOLATED wind components ?
(IPR0) (0=no, 1=yes) Default: 0 ! IPR0 = 0 !

Print the TERRAIN ADJUSTED surface wind
components ?
(IPR1) (0=no, 1=yes) Default: 0 ! IPR1 = 0 !

Print the SMOOTHED wind components and
the INITIAL DIVERGENCE fields ?
(IPR2) (0=no, 1=yes) Default: 0 ! IPR2 = 0 !

Print the FINAL wind speed and direction
fields ?
(IPR3) (0=no, 1=yes) Default: 0 ! IPR3 = 0 !

Print the FINAL DIVERGENCE fields ?
(IPR4) (0=no, 1=yes) Default: 0 ! IPR4 = 0 !

Print the winds after KINEMATIC effects
are added ?
(IPR5) (0=no, 1=yes) Default: 0 ! IPR5 = 0 !

Print the winds after the FROUDE NUMBER
adjustment is made ?
(IPR6) (0=no, 1=yes) Default: 0 ! IPR6 = 0 !

Print the winds after SLOPE FLOWS
are added ?
(IPR7) (0=no, 1=yes) Default: 0 ! IPR7 = 0 !

Print the FINAL wind field components ?
(IPR8) (0=no, 1=yes) Default: 0 ! IPR8 = 0 !

!END!

INPUT GROUP: 4 -- Meteorological data options

NO OBSERVATION MODE (NOOBS) Default: 0 ! NOOBS = 0 !
0 = Use surface, overwater, and upper air stations
1 = Use surface and overwater stations (no upper air observations)
 Use MM4/MM5/3D for upper air data
2 = No surface, overwater, or upper air observations

Use MM4/MM5/3D for surface, overwater, and upper air data

NUMBER OF SURFACE & PRECIP. METEOROLOGICAL STATIONS

Number of surface stations (NSSTA) No default ! NSSTA = 16 !

Number of precipitation stations
 (NPSTA=-1: flag for use of MM5/3D precip data)
 (NPSTA) No default ! NPSTA = 0 !

CLOUD DATA OPTIONS

Output option - output a CLOUD.DAT file (yes or no)
 0=no, 1=yes
 (ICLDOUT) Default:999 ! ICLDOUT = 0 !

Method to compute cloud fields:
 (MCLLOUD) Default: 999 ! MCLLOUD = 1 !
 MCLLOUD = 1 - Clouds data generated from surface observations
 MCLLOUD = 2 - Gridded CLOUD.DAT read from CLOUD.DAT file (no output
 is possible since already exist)
 MCLLOUD = 3 - Gridded cloud cover from Prognostic Rel. Humidity
 at 850mb (Teixera)
 MCLLOUD = 4 - Gridded cloud cover from Prognostic Rel. Humidity
 at all levels (MM5toGrads algorithm)

FILE FORMATS

Surface meteorological data file format
 (IFORMS) Default: 2 ! IFORMS = 2 !
 (1 = unformatted (e.g., SMERGE output))
 (2 = formatted (free-formatted user input))

Precipitation data file format
 (IFORMP) Default: 2 ! IFORMP = 2 !
 (1 = unformatted (e.g., PMERGE output))
 (2 = formatted (free-formatted user input))

Cloud data file format
 (IFORMC) Default: 2 ! IFORMC = 2 !
 (1 = unformatted - CALMET unformatted output)
 (2 = formatted - free-formatted CALMET output or user input)

!END!

 INPUT GROUP: 5 -- Wind Field Options and Parameters

WIND FIELD MODEL OPTIONS

Model selection variable (IWFCOD) Default: 1 ! IWFCOD = 1 !

0 = Objective analysis only

1 = Diagnostic wind module

Compute Froude number adjustment

effects ? (IFRADJ) Default: 1 ! IFRADJ = 1 !

(0 = NO, 1 = YES)

Compute kinematic effects ? (IKINE) Default: 0 ! IKINE = 0 !

(0 = NO, 1 = YES)

Use O'Brien procedure for adjustment

of the vertical velocity ? (IOBR) Default: 0 ! IOBR = 0 !

(0 = NO, 1 = YES)

Compute slope flow effects ? (ISLOPE) Default: 1 ! ISLOPE = 1 !

(0 = NO, 1 = YES)

Extrapolate surface wind observations

to upper layers ? (IEXTRP) Default: -4 ! IEXTRP = 4 !

(1 = no extrapolation is done,

2 = power law extrapolation used,

3 = user input multiplicative factors

for layers 2 - NZ used (see FEXTRP array)

4 = similarity theory used

-1, -2, -3, -4 = same as above except layer 1 data

at upper air stations are ignored

Extrapolate surface winds even

if calm? (ICALM) Default: 0 ! ICALM = 0 !

(0 = NO, 1 = YES)

Layer-dependent biases modifying the weights of
surface and upper air stations (BIAS(NZ))

-1<=BIAS<=1

Negative BIAS reduces the weight of upper air stations

(e.g. BIAS=-0.1 reduces the weight of upper air stations

by 10%; BIAS= -1, reduces their weight by 100 %)

Positive BIAS reduces the weight of surface stations

(e.g. BIAS= 0.2 reduces the weight of surface stations

by 20%; BIAS=1 reduces their weight by 100%)

Zero BIAS leaves weights unchanged (1/R**2 interpolation)

Default: NZ*0

! BIAS = -1 !

Minimum distance from nearest upper air station

to surface station for which extrapolation

of surface winds at surface station will be allowed

(RMIN2: Set to -1 for IEXTRP = 4 or other situations

where all surface stations should be extrapolated)

Default: 4. ! RMIN2 = -1 !

Use gridded prognostic wind field model
output fields as input to the diagnostic
wind field model (IPROG) Default: 0 ! IPROG = 0 !
(0 = No, [IWFCOD = 0 or 1]
1 = Yes, use CSUMM prog. winds as Step 1 field, [IWFCOD = 0]
2 = Yes, use CSUMM prog. winds as initial guess field [IWFCOD = 1]
3 = Yes, use winds from MM4.DAT file as Step 1 field [IWFCOD = 0]
4 = Yes, use winds from MM4.DAT file as initial guess field [IWFCOD = 1]
5 = Yes, use winds from MM4.DAT file as observations [IWFCOD = 1]
13 = Yes, use winds from MM5/3D.DAT file as Step 1 field [IWFCOD = 0]
14 = Yes, use winds from MM5/3D.DAT file as initial guess field [IWFCOD = 1]
15 = Yes, use winds from MM5/3D.DAT file as observations [IWFCOD = 1]

Timestep (seconds) of the prognostic
model input data (ISTEPPGS) Default: 3600 ! ISTEPPGS = 3600 !

Use coarse CALMET fields as initial guess fields (IGFMET)
(overwrites IGF based on prognostic wind fields if any)
Default: 0 ! IGFMET = 0 !

RADIUS OF INFLUENCE PARAMETERS

Use varying radius of influence Default: F ! LVARY = F!
(if no stations are found within RMAX1, RMAX2,
or RMAX3, then the closest station will be used)

Maximum radius of influence over land
in the surface layer (RMAX1) No default ! RMAX1 = 30. !
Units: km

Maximum radius of influence over land
aloft (RMAX2) No default ! RMAX2 = 30. !
Units: km

Maximum radius of influence over water
(RMAX3) No default ! RMAX3 = 50. !
Units: km

OTHER WIND FIELD INPUT PARAMETERS

Minimum radius of influence used in
the wind field interpolation (RMIN) Default: 0.1 ! RMIN = 0.1 !
Units: km

Radius of influence of terrain
features (TERRAD) No default ! TERRAD = 12. !
Units: km

Relative weighting of the first
guess field and observations in the
SURFACE layer (R1) No default ! R1 = 1. !

(R1 is the distance from an observational station at which the observation and first guess field are equally weighted) Units: km

Relative weighting of the first guess field and observations in the layers ALOFT (R2) No default ! R2 = 1. !
 (R2 is applied in the upper layers in the same manner as R1 is used in the surface layer). Units: km

Relative weighting parameter of the prognostic wind field data (RPROG) No default ! RPROG = 0. !
 (Used only if IPROG = 1) Units: km

Maximum acceptable divergence in the divergence minimization procedure (DIVLIM) Default: 5.E-6 ! DIVLIM= 5.0E-06 !

Maximum number of iterations in the divergence min. procedure (NITER) Default: 50 ! NITER = 50 !

Number of passes in the smoothing procedure (NSMTH(NZ))
 NOTE: NZ values must be entered
 Default: 2,(mxnz-1)*4 ! NSMTH =
 2 , 4 , 4 , 4 , 4 , 4 , 4 , 4 , 4 , 4 !

Maximum number of stations used in each layer for the interpolation of data to a grid point (NINTR2(NZ))
 NOTE: NZ values must be entered Default: 99. ! NINTR2 =
 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 , 5 !

Critical Froude number (CRITFN) Default: 1.0 ! CRITFN = 1. !

Empirical factor controlling the influence of kinematic effects (ALPHA) Default: 0.1 ! ALPHA = 0.1 !

Multiplicative scaling factor for extrapolation of surface observations to upper layers (FEXTR2(NZ)) Default: NZ*0.0
 ! FEXTR2 = 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0. !
 (Used only if IEXTRP = 3 or -3)

BARRIER INFORMATION

Number of barriers to interpolation
of the wind fields (NBAR) Default: 0 ! NBAR = 0 !

Level (1 to NZ) up to which barriers
apply (KBAR) Default: NZ ! KBAR = 10 !

THE FOLLOWING 4 VARIABLES ARE INCLUDED
ONLY IF NBAR > 0

NOTE: NBAR values must be entered No defaults
for each variable Units: km

X coordinate of BEGINNING
of each barrier (XBBAR(NBAR)) ! XBBAR = 0. !
Y coordinate of BEGINNING
of each barrier (YBBAR(NBAR)) ! YBBAR = 0. !

X coordinate of ENDING
of each barrier (XEBAR(NBAR)) ! XEBAR = 0. !
Y coordinate of ENDING
of each barrier (YEBAR(NBAR)) ! YEBAR = 0. !

DIAGNOSTIC MODULE DATA INPUT OPTIONS

Surface temperature (IDIOPT1) Default: 0 ! IDIOPT1 = 0 !
0 = Compute internally from
hourly surface observations or prognostic fields
1 = Read preprocessed values from
a data file (DIAG.DAT)

Surface met. station to use for
the surface temperature (ISURFT) Default: -1 ! ISURFT = 16 !
(Must be a value from 1 to NSSTA
or -1 to use 2-D spatially varying
surface temperatures).
or -2 to use a domain-average prognostic
lapse rate (only with ITPROG=2)
(Used only if IDIOPT1 = 0)

Temperature lapse rate used in the Default: 0 ! IDIOPT2 = 0 !
computation of terrain-induced
circulations (IDIOPT2)
0 = Compute internally from (at least) twice-daily
upper air observations or prognostic fields
1 = Read hourly preprocessed values
from a data file (DIAG.DAT)

Upper air station to use for
the domain-scale lapse rate (IUPT) Default: -1 ! IUPT = -1 !
(Must be a value from 1 to NUSTA)

or -1 to use 2-D spatially varying lapse rate)
 or -2 to use a domain-average prognostic
 lapse rate (only with ITPROG>0)
 (Used only if IDIOPT2 = 0)

Depth through which the domain-scale
 lapse rate is computed (ZUPT) Default: 200. ! ZUPT = 200. !
 (Used only if IDIOPT2 = 0) Units: meters

Initial Guess Field Winds
 (IDIOPT3) Default: 0 ! IDIOPT3 = 0 !
 0 = Compute internally from
 observations or prognostic wind fields
 1 = Read hourly preprocessed domain-average wind values
 from a data file (DIAG.DAT)

Upper air station to use for
 the initial guess winds (IUPWND) Default: -1 ! IUPWND = -1 !
 (Must be a value from -1 to NUSTA, with
 -1 indicating 3-D initial guess fields,
 and IUPWND>1 domain-scaled (i.e. constant) IGF
 (Used only if IDIOPT3 = 0 and noobs=0)

Bottom and top of layer through
 which the domain-scale winds
 are computed
 (ZUPWND(1), ZUPWND(2)) Defaults: 1., 1000. ! ZUPWND= 1., 1000. !
 (Used only if IDIOPT3 = 0, NOOBS>0 and IUPWND>0) Units: meters

Observed surface wind components
 for wind field module (IDIOPT4) Default: 0 ! IDIOPT4 = 0 !
 0 = Read WS, WD from a surface
 data file (SURF.DAT)
 1 = Read hourly preprocessed U, V from
 a data file (DIAG.DAT)

Observed upper air wind components
 for wind field module (IDIOPT5) Default: 0 ! IDIOPT5 = 0 !
 0 = Read WS, WD from an upper
 air data file (UP1.DAT, UP2.DAT, etc.)
 1 = Read hourly preprocessed U, V from
 a data file (DIAG.DAT)

LAKE BREEZE INFORMATION

Use Lake Breeze Module (LLBREEZE)
 Default: F ! LLBREEZE = F !

Number of lake breeze regions (NBOX) ! NBOX = 0 !
 X Grid line 1 defining the region of interest ! XG1 = 0. !
 X Grid line 2 defining the region of interest ! XG2 = 0. !
 Y Grid line 1 defining the region of interest ! YG1 = 0. !
 Y Grid line 2 defining the region of interest ! YG2 = 0. !

 X Point defining the coastline (Straight line)
 (XBCST) (KM) Default: none ! XBCST = 0. !

 Y Point defining the coastline (Straight line)
 (YBCST) (KM) Default: none ! YBCST = 0. !

 X Point defining the coastline (Straight line)
 (XECST) (KM) Default: none ! XECST = 0. !

 Y Point defining the coastline (Straight line)
 (YECST) (KM) Default: none ! YECST = 0. !

 Number of stations in the region Default: none ! NLB = 0 !
 (Surface stations + upper air stations)

 Station ID's in the region (METBXID(NLB))
 (Surface stations first, then upper air stations)
 ! METBXID = 0 !

 !END!

 INPUT GROUP: 6 -- Mixing Height, Temperature and Precipitation Parameters

 EMPIRICAL MIXING HEIGHT CONSTANTS

 Neutral, mechanical equation
 (CONSTB) Default: 1.41 ! CONSTB = 1.41 !
 Convective mixing ht. equation
 (CONSTE) Default: 0.15 ! CONSTE = 0.15 !
 Stable mixing ht. equation
 (CONSTN) Default: 2400. ! CONSTN = 2400. !
 Overwater mixing ht. equation
 (CONSTW) Default: 0.16 ! CONSTW = 0.16 !
 Absolute value of Coriolis

parameter (FCORIOIOL) Default: 1.E-4 ! FCORIOIOL = 1.0E-04!
 Units: (1/s)

SPATIAL AVERAGING OF MIXING HEIGHTS

Conduct spatial averaging
 (IAVEZI) (0=no, 1=yes) Default: 1 ! IAVEZI = 1 !

Max. search radius in averaging
 process (MNMDAV) Default: 1 ! MNMDAV = 10 !
 Units: Grid
 cells

Half-angle of upwind looking cone
 for averaging (HAFANG) Default: 30. ! HAFANG = 30. !
 Units: deg.

Layer of winds used in upwind
 averaging (ILEVZI) Default: 1 ! ILEVZI = 1 !
 (must be between 1 and NZ)

CONVECTIVE MIXING HEIGHT OPTIONS:

Method to compute the convective
 mixing height(IMIHXH) Default: 1 ! IMIXH = 1 !

- 1: Maul-Carson for land and water cells
- 1: Maul-Carson for land cells only -
 OCD mixing height overwater
- 2: Batchvarova and Gryning for land and water cells
- 2: Batchvarova and Gryning for land cells only
 OCD mixing height overwater

Threshold buoyancy flux required to
 sustain convective mixing height growth
 overland (THRESHL) Default: 0.0 ! THRESHL = 0.0 !
 (expressed as a heat flux units: W/m3
 per meter of boundary layer)

Threshold buoyancy flux required to
 sustain convective mixing height growth
 overwater (THRESHW) Default: 0.05 ! THRESHW = 0.05 !
 (expressed as a heat flux units: W/m3
 per meter of boundary layer)

Flag to allow relaxation of convective mixing height
 to equilibrium value when $0 < QH < THRESHL$ (overland)
 or $0 < QH < THRESHW$ (overwater)
 (IZICRLX) Default: 1 ! IZICRLX = 1 !
 0 : do NOT use convective mixing height relaxation
 to equilibrium value (treatment identical to CALMET v5.8)
 1 : use convective mixing height relaxation

to equilibrium value

Relaxation time of convective mixing height to
equilibrium value when $0 < QH < THRESHL$ (overland)

or $0 < QH < THRESHW$ (overwater)

(Used only if IZICRLX = 1 and TZICRLX must be ≥ 1 .)

(TZICRLX) Default: 800. ! TZICRLX = 800. !

Units: seconds

Option for overwater lapse rates used

in convective mixing height growth

(ITWPROG) Default: 0 ! ITWPROG = 0 !

0 : use SEA.DAT lapse rates and deltaT (or assume neutral
conditions if missing)

1 : use prognostic lapse rates (only if IPROG>2)
and SEA.DAT deltaT (or neutral if missing)

2 : use prognostic lapse rates and prognostic delta T
(only if iprog>12 and 3D.DAT version# 2.0 or higher)

Land Use category ocean in 3D.DAT datasets

(ILUOC3D) Default: 16 ! ILUOC3D = 16 !

Note: if 3D.DAT from MM5 version 3.0, iluoc3d = 16

if MM4.DAT, typically iluoc3d = 7

OTHER MIXING HEIGHT VARIABLES

Minimum potential temperature lapse

rate in the stable layer above the

current convective mixing ht. Default: 0.001 ! DPTMIN = 0.001 !

(DPTMIN) Units: deg. K/m

Depth of layer above current conv.

mixing height through which lapse Default: 200. ! DZZI = 200. !

rate is computed (DZZI) Units: meters

Minimum overland mixing height Default: 50. ! ZIMIN = 50. !

(ZIMIN) Units: meters

Maximum overland mixing height Default: 3000. ! ZIMAX = 5000. !

(ZIMAX) Units: meters

Minimum overwater mixing height Default: 50. ! ZIMINW = 50. !

(ZIMINW) -- (Not used if observed Units: meters

overwater mixing hts. are used)

Maximum overwater mixing height Default: 3000. ! ZIMAXW = 5000. !

(ZIMAXW) -- (Not used if observed Units: meters

overwater mixing hts. are used)

OVERWATER SURFACE FLUXES METHOD and PARAMETERS

(ICOARE) Default: 10 ! ICOARE = 10 !

0: original deltaT method (OCD)

10: COARE with no wave parameterization (jwave=0, Charnock)

- 11: COARE with wave option jwave=1 (Oost et al.)
and default wave properties
- 11: COARE with wave option jwave=1 (Oost et al.)
and observed wave properties (must be in SEA.DAT files)
- 12: COARE with wave option 2 (Taylor and Yelland)
and default wave properties
- 12: COARE with wave option 2 (Taylor and Yelland)
and observed wave properties (must be in SEA.DAT files)

Note: When ICOARE=0, similarity wind profile stability PSI functions based on Van Ulden and Holtslag (1985) are substituted for later formulations used with the COARE module, and temperatures used for surface layer parameters are obtained from either the nearest surface station temperature or prognostic model 2D temperatures (if ITPROG=2).

Coastal/Shallow water length scale (DSHELF)
(for modified z0 in shallow water)
(COARE fluxes only)

Default : 0. ! DSHELF = 0. !
units: km

COARE warm layer computation (IWARM) ! IWARM = 0 !
1: on - 0: off (must be off if SST measured with
IR radiometer) Default: 0

COARE cool skin layer computation (ICOOOL) ! ICOOOL = 0 !
1: on - 0: off (must be off if SST measured with
IR radiometer) Default: 0

RELATIVE HUMIDITY PARAMETERS

3D relative humidity from observations or
from prognostic data? (IRHPROG) Default:0 ! IRHPROG = 0 !

- 0 = Use RH from SURF.DAT file
(only if NOOBS = 0,1)
- 1 = Use prognostic RH
(only if NOOBS = 0,1,2)

TEMPERATURE PARAMETERS

3D temperature from observations or
from prognostic data? (ITPROG) Default:0 ! ITPROG = 0 !

- 0 = Use Surface and upper air stations
(only if NOOBS = 0)
- 1 = Use Surface stations (no upper air observations)

Use MM5/3D for upper air data
 (only if NOOBS = 0,1)
 2 = No surface or upper air observations
 Use MM5/3D for surface and upper air data
 (only if NOOBS = 0,1,2)

Interpolation type
 (1 = 1/R ; 2 = 1/R**2) Default:1 ! IRAD = 1 !

Radius of influence for temperature
 interpolation (TRADKM) Default: 500. ! TRADKM = 20. !
 Units: km

Maximum Number of stations to include
 in temperature interpolation (NUMTS) Default: 5 ! NUMTS = 5 !

Conduct spatial averaging of temp-
 eratures (IAVET) (0=no, 1=yes) Default: 1 ! IAVET = 1 !
 (will use mixing ht MNMDAV,HAFANG
 so make sure they are correct)

Default temperature gradient Default: -.0098 ! TGDEFB = -0.0098 !
 below the mixing height over Units: K/m
 water (TGDEFB)

Default temperature gradient Default: -.0045 ! TGDEFA = -0.0045 !
 above the mixing height over Units: K/m
 water (TGDEFA)

Beginning (JWAT1) and ending (JWAT2)
 land use categories for temperature ! JWAT1 = 55 !
 interpolation over water -- Make ! JWAT2 = 55 !
 bigger than largest land use to disable

PRECIP INTERPOLATION PARAMETERS

Method of interpolation (NFLAGP) Default: 2 ! NFLAGP = 2 !
 (1=1/R,2=1/R**2,3=EXP/R**2)

Radius of Influence (SIGMAP) Default: 100.0 ! SIGMAP = 50. !
 (0.0 => use half dist. btwn Units: km
 nearest stns w & w/out
 precip when NFLAGP = 3)

Minimum Precip. Rate Cutoff (CUTP) Default: 0.01 ! CUTP = 0.01 !
 (values < CUTP = 0.0 mm/hr) Units: mm/hr

!END!

 INPUT GROUP: 7 -- Surface meteorological station parameters

SURFACE STATION VARIABLES

(One record per station -- 5 records in all)

| 1 | 2 | | | | | |
|--------|--------|----------|----------|-----------|-------|--------|
| Name | ID | X coord. | Y coord. | Time zone | Anem. | Ht.(m) |
| | | (km) | (km) | | | |
| ! SS1 | 'ACO ' | 1201 | 509.223 | 2171.151 | 6 | 10 ! |
| ! SS2 | 'SAG ' | 1202 | 496.823 | 2159.812 | 6 | 10 ! |
| ! SS3 | 'MON ' | 1203 | 510.196 | 2151.776 | 6 | 10 ! |
| ! SS4 | 'NEZ ' | 1204 | 497.038 | 2144.394 | 6 | 10 ! |
| ! SS5 | 'TAH ' | 1205 | 498.890 | 2128.098 | 6 | 10 ! |
| ! SS6 | 'CHO ' | 1206 | 511.968 | 2130.369 | 6 | 10 ! |
| ! SS7 | 'TPO ' | 1207 | 490.093 | 2098.875 | 6 | 10 ! |
| ! SS8 | 'TLA ' | 1208 | 580.282 | 2134.552 | 6 | 10 ! |
| ! SS9 | 'IXT ' | 1209 | 538.540 | 2108.678 | 6 | 10 ! |
| ! SS10 | 'IZU ' | 1210 | 556.378 | 2056.739 | 6 | 10 ! |
| ! SS11 | 'CHL ' | 1211 | 573.238 | 2106.586 | 6 | 10 ! |
| ! SS12 | 'GEN ' | 1212 | 584.657 | 2105.658 | 6 | 10 ! |
| ! SS13 | 'AFR ' | 1213 | 591.187 | 2093.926 | 6 | 10 ! |
| ! SS14 | 'OCU ' | 1214 | 519.023 | 2086.630 | 6 | 10 ! |
| ! SS15 | 'HOS ' | 1215 | 501.254 | 2082.228 | 6 | 10 ! |
| ! SS16 | 'JON ' | 1216 | 517.745 | 2067.321 | 6 | 10 ! |

1

Four character string for station name
(MUST START IN COLUMN 9)

2

Six digit integer for station ID

!END!

INPUT GROUP: 8 -- Upper air meteorological station parameters

UPPER AIR STATION VARIABLES

(One record per station -- 3 records in all)

| 1 | 2 | | | | |
|-------|--------|----------|----------|-----------|-----|
| Name | ID | X coord. | Y coord. | Time zone | |
| | | (km) | (km) | | |
| ! US1 | 'MEX ' | 11903 | 492.242 | 2148.583 | 6 ! |

1

Maestría en Ingeniería Ambiental-Aire

Four character string for station name
(MUST START IN COLUMN 9)

2

Five digit integer for station ID

!END!

INPUT GROUP: 9 -- Precipitation station parameters

PRECIPITATION STATION VARIABLES
(One record per station -- 16 records in all)
(NOT INCLUDED IF NPSTA = 0)

| 1 | 2 | | |
|------|---------|----------|----------|
| Name | Station | X coord. | Y coord. |
| Code | | (km) | (km) |

1

Four character string for station name
(MUST START IN COLUMN 9)

2

Six digit station code composed of state
code (first 2 digits) and station ID (last
4 digits)

!END!

CALPUFF.INP 2.0 File version record

----- Run title (3 lines) -----

CALPUFF MODEL CONTROL FILE

INPUT GROUP: 0 -- Input and Output File Names

| Default Name | Type | File Name |
|--------------|-------|-------------------------|
| CALMET.DAT | input | ! METDAT =CALMET1.DAT ! |
| or | | |
| ISCMET.DAT | input | * ISCDAT = * |
| or | | |
| PLMMET.DAT | input | * PLMDAT = * |
| or | | |
| PROFILE.DAT | input | * PRFDAT = * |
| SURFACE.DAT | input | * SFCDAT = * |
| RESTARTB.DAT | input | * RSTARTB= * |

| | | |
|-------------|--------|--------------------------|
| CALPUFF.LST | output | ! PUFLST =CALPUFF1.LST ! |
| CONC.DAT | output | ! CONDAT =CALPUFF1.CON ! |
| DFLX.DAT | output | * DFDAT =CALPUFF.DRY * |
| WFLX.DAT | output | * WFDAT =CALPUFF.WET * |

| | | |
|--------------|--------|-------------------------|
| VISB.DAT | output | * VISDAT =CALPUFF.VIS * |
| TK2D.DAT | output | * T2DDAT = * |
| RHO2D.DAT | output | * RHODAT = * |
| RESTARTE.DAT | output | * RSTARTE= * |

Emission Files

| | | |
|--------------|-------|--------------|
| PTEMARB.DAT | input | * PTDAT = * |
| VOLEMARB.DAT | input | * VOLDAT = * |
| BAEMARB.DAT | input | * ARDAT = * |
| LNEMARB.DAT | input | * LNDAT = * |

Other Files

| | | |
|-----------|-------|----------------------|
| OZONE.DAT | input | * OZDAT =OZONE.DAT * |
| VD.DAT | input | * VDDAT = * |
| CHEM.DAT | input | * CHEMDAT= * |
| AUX | input | ! AUXEXT =AUX ! |

(Extension added to METDAT filename(s) for files with auxiliary 2D and 3D data)

Maestría en Ingeniería Ambiental-Aire

```

H2O2.DAT  input  * H2O2DAT=      *
NH3Z.DAT  input  * NH3ZDAT=      *
HILL.DAT  input  * HILDAT=       *
HILLRCT.DAT input * RCTDAT=       *
COASTLN.DAT input * CSTDAT=       *
FLUXBDY.DAT input * BDYDAT=       *
BCON.DAT  input  * BCNDAT=       *
DEBUG.DAT output * DEBUG =       *
MASSFLX.DAT output * FLXDAT=       *
MASSBAL.DAT output * BALDAT=       *
FOG.DAT   output * FOGDAT=       *
RISE.DAT  output * RISDAT=       *
    
```

All file names will be converted to lower case if LCFILES = T
 Otherwise, if LCFILES = F, file names will be converted to UPPER CASE
 T = lower case ! LCFILES = F !
 F = UPPER CASE

NOTE: (1) file/path names can be up to 132 characters in length

Provision for multiple input files

```

Number of Modeling Domains (NMETDOM)
      Default: 1   ! NMETDOM = 1 !

Number of CALMET.DAT files for run (NMETDAT)
      Default: 1   ! NMETDAT = 1 !

Number of PTEMARB.DAT files for run (NPTDAT)
      Default: 0   ! NPTDAT = 0 !

Number of BAEMARB.DAT files for run (NARDAT)
      Default: 0   ! NARDAT = 0 !

Number of VOLEMARB.DAT files for run (NVOLDAT)
      Default: 0   ! NVOLDAT = 0 !
    
```

!END!

Subgroup (0a)

Provide a name for each CALMET domain if NMETDOM > 1
 Enter NMETDOM lines.

```

          a,b
Default Name    Domain Name
-----
none           * DOMAIN1=   * *END*
none           * DOMAIN2=   * *END*
    
```

none * DOMAIN3= * *END*

The following CALMET.DAT filenames are processed in sequence if NMETDAT > 1

Enter NMETDAT lines, 1 line for each file name.

| Default Name | Type | a,c,d File Name |
|--------------|-------|--------------------|
| none | input | * METDAT1= * *END* |
| none | input | * METDAT2= * *END* |
| none | input | * METDAT3= * *END* |

a

The name for each CALMET domain and each CALMET.DAT file is treated as a separate input subgroup and therefore must end with an input group terminator.

b

Use DOMAIN1= to assign the name for the outermost CALMET domain.
 Use DOMAIN2= to assign the name for the next inner CALMET domain.
 Use DOMAIN3= to assign the name for the next inner CALMET domain, etc.

 | When inner domains with equal resolution (grid-cell size) |
 | overlap, the data from the FIRST such domain in the list will |
 | be used if all other criteria for choosing the controlling |
 | grid domain are inconclusive. |

c

Use METDAT1= to assign the file names for the outermost CALMET domain.
 Use METDAT2= to assign the file names for the next inner CALMET domain.
 Use METDAT3= to assign the file names for the next inner CALMET domain, etc.

d

The filenames for each domain must be provided in sequential order

 Subgroup (0b)

The following PTEMARB.DAT filenames are processed if NPTDAT>0
 (Each file contains a subset of the sources, for the entire simulation)

| Default Name | Type | File Name |
|--------------|-------|------------------|
| none | input | * PTDAT= * *END* |

 Subgroup (0c)

 The following BAEMARB.DAT filenames are processed if NARDAT>0
 (Each file contains a subset of the sources, for the entire simulation)

| Default Name | Type | File Name |
|--------------|-------|------------------|
| ----- | ---- | ----- |
| none | input | * ARDAT= * *END* |

 Subgroup (0d)

The following VOLEMARB.DAT filenames are processed if NVOLDAT>0
 (Each file contains a subset of the sources, for the entire simulation)

| Default Name | Type | File Name |
|--------------|-------|-------------------|
| ----- | ---- | ----- |
| none | input | * VOLDAT= * *END* |

 INPUT GROUP: 1 -- General run control parameters

Option to run all periods found
 in the met. file (METRUN) Default: 0 ! METRUN = 0 !

METRUN = 0 - Run period explicitly defined below
 METRUN = 1 - Run all periods in met. file

Starting date: Year (IBYR) -- No default ! IBYR = 2012 !
 Month (IBMO) -- No default ! IBMO = 3 !
 Day (IBDY) -- No default ! IBDY = 14 !
 Starting time: Hour (IBHR) -- No default ! IBHR = 0 !
 Minute (IBMIN) -- No default ! IBMIN = 0 !
 Second (IBSEC) -- No default ! IBSEC = 0 !

Ending date: Year (IEYR) -- No default ! IEYR = 2012 !
 Month (IEMO) -- No default ! IEMO = 3 !
 Day (IEDY) -- No default ! IEDY = 14 !
 Ending time: Hour (IEHR) -- No default ! IEHR = 23 !
 Minute (IEMIN) -- No default ! IEMIN = 0 !
 Second (IESEC) -- No default ! IESEC = 0 !

(These are only used if METRUN = 0)

Base time zone: (ABTZ) -- No default ! ABTZ= UTC-0600 !
 (character*8)

The modeling domain may span multiple time zones. ABTZ defines the base time zone used for the entire simulation. This must match the base time zone of the meteorological data.

Examples:

Los Angeles, USA = UTC-0800
 New York, USA = UTC-0500
 Santiago, Chile = UTC-0400
 Greenwich Mean Time (GMT) = UTC+0000
 Rome, Italy = UTC+0100
 Cape Town, S.Africa = UTC+0200
 Sydney, Australia = UTC+1000

Length of modeling time-step (seconds)

Equal to update period in the primary meteorological data files, or an integer fraction of it (1/2, 1/3 ...)

Must be no larger than 1 hour

(NSECDT) Default: 3600 ! NSECDT = 3600 !

Units: seconds

Number of chemical species (NSPEC)

Default: 5 ! NSPEC = 7 !

Number of chemical species

to be emitted (NSE) Default: 3 ! NSE = 4 !

Flag to stop run after

SETUP phase (ITEST) Default: 2 ! ITEST = 2 !

(Used to allow checking of the model inputs, files, etc.)

ITEST = 1 - STOPS program after SETUP phase

ITEST = 2 - Continues with execution of program after SETUP

Restart Configuration:

Control flag (MRESTART) Default: 0 ! MRESTART = 0 !

0 = Do not read or write a restart file

1 = Read a restart file at the beginning of the run

2 = Write a restart file during run

3 = Read a restart file at beginning of run and write a restart file during run

Number of periods in Restart

output cycle (NRESPD) Default: 0 ! NRESPD = 0 !

0 = File written only at last period

>0 = File updated every NRESPD periods

Meteorological Data Format (METFM)

Default: 1 ! METFM = 1 !

- METFM = 1 - CALMET binary file (CALMET.MET)
- METFM = 2 - ISC ASCII file (ISCMET.MET)
- METFM = 3 - AUSPLUME ASCII file (PLMMET.MET)
- METFM = 4 - CTDM plus tower file (PROFILE.DAT) and surface parameters file (SURFACE.DAT)
- METFM = 5 - AERMET tower file (PROFILE.DAT) and surface parameters file (SURFACE.DAT)

Meteorological Profile Data Format (MPRFFM)

(used only for METFM = 1, 2, 3)

Default: 1 ! MPRFFM = 1 !

- MPRFFM = 1 - CTDM plus tower file (PROFILE.DAT)
- MPRFFM = 2 - AERMET tower file (PROFILE.DAT)

PG sigma-y is adjusted by the factor (AVET/PGTIME)**0.2

Averaging Time (minutes) (AVET)

Default: 60.0 ! AVET = 60. !

PG Averaging Time (minutes) (PGTIME)

Default: 60.0 ! PGTIME = 60. !

Output units for binary concentration and flux files
written in Dataset v2.2 or later formats

(IOUTU) Default: 1 ! IOUTU = 1 !

- 1 = mass - g/m3 (conc) or g/m2/s (dep)
- 2 = odour - odour_units (conc)
- 3 = radiation - Bq/m3 (conc) or Bq/m2/s (dep)

Output Dataset format for binary concentration
and flux files (e.g., CONC.DAT)

(IOVERS) Default: 2 ! IOVERS = 2 !

- 1 = Dataset Version 2.1
- 2 = Dataset Version 2.2

!END!

INPUT GROUP: 2 -- Technical options
-----Vertical distribution used in the
near field (MGAUSS)

Default: 1 ! MGAUSS = 1 !

0 = uniform
1 = Gaussian

Terrain adjustment method
(MCTADJ) Default: 3 ! MCTADJ = 3 !

0 = no adjustment
1 = ISC-type of terrain adjustment
2 = simple, CALPUFF-type of terrain
adjustment
3 = partial plume path adjustment

Subgrid-scale complex terrain
flag (MCTSG) Default: 0 ! MCTSG = 0 !

0 = not modeled
1 = modeled

Near-field puffs modeled as
elongated slugs? (MSLUG) Default: 0 ! MSLUG = 1 !

0 = no
1 = yes (slug model used)

Transitional plume rise modeled?
(MTRANS) Default: 1 ! MTRANS = 1 !

0 = no (i.e., final rise only)
1 = yes (i.e., transitional rise computed)

Stack tip downwash? (MTIP) Default: 1 ! MTIP = 1 !

0 = no (i.e., no stack tip downwash)
1 = yes (i.e., use stack tip downwash)

Method used to compute plume rise for
point sources not subject to building
downwash? (MRISE) Default: 1 ! MRISE = 1 !

1 = Briggs plume rise
2 = Numerical plume rise

Method used to simulate building
downwash? (MBDW) Default: 1 ! MBDW = 1 !

1 = ISC method
2 = PRIME method

Vertical wind shear modeled above
stack top (modified Briggs plume rise)?
(MSHEAR) Default: 0 ! MSHEAR = 0 !

0 = no (i.e., vertical wind shear not modeled)
1 = yes (i.e., vertical wind shear modeled)

Puff splitting allowed? (MSPLIT) Default: 0 ! MSPLIT = 0 !

0 = no (i.e., puffs not split)
1 = yes (i.e., puffs are split)

Chemical mechanism flag (MCHEM) Default: 1 ! MCHEM = 0 !

- 0 = chemical transformation not modeled
- 1 = transformation rates computed internally (MESOPUFF II scheme)
- 2 = user-specified transformation rates used
- 3 = transformation rates computed internally (RIVAD/ARM3 scheme)
- 4 = secondary organic aerosol formation computed (MESOPUFF II scheme for OH)
- 5 = user-specified half-life with or without transfer to child species
- 6 = transformation rates computed internally (Updated RIVAD scheme with ISORROPIA equilibrium)
- 7 = transformation rates computed internally (Updated RIVAD scheme with ISORROPIA equilibrium and CalTech SOA)

Aqueous phase transformation flag (MAQCHEM)

(Used only if MCHEM = 6, or 7) Default: 0 ! MAQCHEM = 0 !

- 0 = aqueous phase transformation not modeled
- 1 = transformation rates and wet scavenging coefficients adjusted for in-cloud aqueous phase reactions (adapted from RADM cloud model implementation in CMAQ/SCICHEM)

Liquid Water Content flag (MLWC)

(Used only if MAQCHEM = 1) Default: 1 ! MLWC = 1 !

- 0 = water content estimated from cloud cover and presence of precipitation
- 1 = gridded cloud water data read from CALMET water content output files (filenames are the CALMET.DAT names PLUS the extension AUXEXT provided in Input Group 0)

Wet removal modeled ? (MWET) Default: 1 ! MWET = 1 !

- 0 = no
- 1 = yes

Dry deposition modeled ? (MDRY) Default: 1 ! MDRY = 0 !

- 0 = no
- 1 = yes
- (dry deposition method specified for each species in Input Group 3)

Gravitational settling (plume tilt)

modeled ? (MTILT) Default: 0 ! MTILT = 0 !

0 = no

1 = yes

(puff center falls at the gravitational settling velocity for 1 particle species)

Restrictions:

- MDRY = 1

- NSPEC = 1 (must be particle species as well)

- sg = 0 GEOMETRIC STANDARD DEVIATION in Group 8 is set to zero for a single particle diameter

Method used to compute dispersion

coefficients (MDISP) Default: 3 ! MDISP = 3 !

1 = dispersion coefficients computed from measured values of turbulence, sigma v, sigma w

2 = dispersion coefficients from internally calculated sigma v, sigma w using micrometeorological variables (u*, w*, L, etc.)

3 = PG dispersion coefficients for RURAL areas (computed using the ISCST multi-segment approximation) and MP coefficients in urban areas

4 = same as 3 except PG coefficients computed using the MESOPUFF II eqns.

5 = CTDM sigmas used for stable and neutral conditions. For unstable conditions, sigmas are computed as in MDISP = 3, described above. MDISP = 5 assumes that measured values are read

Sigma-v/sigma-theta, sigma-w measurements used? (MTURBVW)

(Used only if MDISP = 1 or 5) Default: 3 ! MTURBVW = 3 !

1 = use sigma-v or sigma-theta measurements from PROFILE.DAT to compute sigma-y (valid for METFM = 1, 2, 3, 4, 5)

2 = use sigma-w measurements from PROFILE.DAT to compute sigma-z (valid for METFM = 1, 2, 3, 4, 5)

3 = use both sigma-(v/theta) and sigma-w from PROFILE.DAT to compute sigma-y and sigma-z (valid for METFM = 1, 2, 3, 4, 5)

4 = use sigma-theta measurements from PLMMET.DAT to compute sigma-y (valid only if METFM = 3)

Back-up method used to compute dispersion

when measured turbulence data are

missing (MDISP2) Default: 3 ! MDISP2 = 3 !

(used only if MDISP = 1 or 5)

2 = dispersion coefficients from internally calculated sigma v, sigma w using micrometeorological variables

(u^* , w^* , L , etc.)

3 = PG dispersion coefficients for RURAL areas (computed using the ISCST multi-segment approximation) and MP coefficients in urban areas

4 = same as 3 except PG coefficients computed using the MESOPUFF II eqns.

[DIAGNOSTIC FEATURE]

Method used for Lagrangian timescale for Sigma-y

(used only if MDISP=1,2 or MDISP2=1,2)

(MTAULY) Default: 0 ! MTAULY = 0 !

0 = Draxler default 617.284 (s)

1 = Computed as Lag. Length / (.75 q) -- after SCIPUFF

10 < Direct user input (s) -- e.g., 306.9

[DIAGNOSTIC FEATURE]

Method used for Advective-Decay timescale for Turbulence

(used only if MDISP=2 or MDISP2=2)

(MTAUADV) Default: 0 ! MTAUADV = 0 !

0 = No turbulence advection

1 = Computed (OPTION NOT IMPLEMENTED)

10 < Direct user input (s) -- e.g., 800

Method used to compute turbulence sigma-v & sigma-w using micrometeorological variables

(Used only if MDISP = 2 or MDISP2 = 2)

(MCTURB) Default: 1 ! MCTURB = 1 !

1 = Standard CALPUFF subroutines

2 = AERMOD subroutines

PG sigma-y,z adj. for roughness? Default: 0 ! MROUGH = 0 !

(MROUGH)

0 = no

1 = yes

Partial plume penetration of Default: 1 ! MPARTL = 1 !

elevated inversion modeled for point sources?

(MPARTL)

0 = no

1 = yes

Partial plume penetration of Default: 1 ! MPARTLBA = 1 !

elevated inversion modeled for buoyant area sources?

(MPARTLBA)

0 = no

1 = yes

Strength of temperature inversion Default: 0 ! MTINV = 0 !
provided in PROFILE.DAT extended records?

(MTINV)

0 = no (computed from measured/default gradients)

1 = yes

PDF used for dispersion under convective conditions?

Default: 0 ! MPDF = 0 !

(MPDF)

0 = no

1 = yes

Sub-Grid TIBL module used for shore line?

Default: 0 ! MSGTIBL = 0 !

(MSGTIBL)

0 = no

1 = yes

Boundary conditions (concentration) modeled?

Default: 0 ! MBCON = 0 !

(MBCON)

0 = no

1 = yes, using formatted BCON.DAT file

2 = yes, using unformatted CONC.DAT file

Note: MBCON > 0 requires that the last species modeled be 'BCON'. Mass is placed in species BCON when generating boundary condition puffs so that clean air entering the modeling domain can be simulated in the same way as polluted air. Specify zero emission of species BCON for all regular sources.

Individual source contributions saved?

Default: 0 ! MSOURCE = 0 !

(MSOURCE)

0 = no

1 = yes

Analyses of fogging and icing impacts due to emissions from arrays of mechanically-forced cooling towers can be performed using CALPUFF in conjunction with a cooling tower emissions processor (CTEMISS) and its associated postprocessors. Hourly emissions of water vapor and temperature from each cooling tower cell are computed for the current cell configuration and ambient conditions by CTEMISS. CALPUFF models the dispersion of these emissions and provides cloud information in a specialized format for further analysis. Output to FOG.DAT is provided in either 'plume mode' or 'receptor mode' format.

Configure for FOG Model output?

Default: 0 ! MFOG = 0 !

(MFOG)

0 = no

1 = yes - report results in PLUME Mode format

2 = yes - report results in RECEPTOR Mode format

Test options specified to see if
they conform to regulatory
values? (MREG)

Default: 1 ! MREG = 0 !

0 = NO checks are made

1 = Technical options must conform to USEPA

Long Range Transport (LRT) guidance

METFM 1 or 2

AVET 60. (min)

PGTIME 60. (min)

MGAUSS 1

MCTADJ 3

MTRANS 1

MTIP 1

MRISE 1

MCHEM 1 or 3 (if modeling SOx, NOx)

MWET 1

MDRY 1

MDISP 2 or 3

MPDF 0 if MDISP=3

1 if MDISP=2

MROUGH 0

MPARTL 1

MPARTLBA 0

SYTDEP 550. (m)

MHFTSZ 0

SVMIN 0.5 (m/s)

!END!

INPUT GROUP: 3a, 3b -- Species list

Subgroup (3a)

The following species are modeled:

! CSPEC = SO2 ! !END!

Maestría en Ingeniería Ambiental-Aire

```

! CSPEC =   SO4 !   !END!
! CSPEC =   NO !   !END!
! CSPEC =  NO2 !   !END!
! CSPEC =  HNO3 !  !END!
! CSPEC =   NO3 !  !END!
! CSPEC =  PM10 !  !END!

          Dry      OUTPUT GROUP
SPECIES   MODELED  EMITTED  DEPOSITED  NUMBER
NAME      (0=NO, 1=YES) (0=NO, 1=YES) (0=NO,    (0=NONE,
(Limit: 12 1=COMPUTED-GAS 1=1st CGRUP,
Characters 2=COMPUTED-PARTICLE 2=2nd CGRUP,
in length) 3=USER-SPECIFIED) 3= etc.)

!   SO2 =   1,      1,      1,      0 !
!   SO4 =   1,      0,      2,      0 !
!   NO  =   1,      1,      1,      0 !
!   NO2 =   1,      1,      1,      0 !
!   HNO3 =  1,      0,      1,      0 !
!   NO3 =   1,      0,      2,      0 !
!   PM10 =  1,      1,      2,      0 !

```

!END!

Note: The last species in (3a) must be 'BCON' when using the boundary condition option (MBCON > 0). Species BCON should typically be modeled as inert (no chem transformation or removal).

Subgroup (3b)

The following names are used for Species-Groups in which results for certain species are combined (added) prior to output. The CGRUP name will be used as the species name in output files. Use this feature to model specific particle-size distributions by treating each size-range as a separate species. Order must be consistent with 3(a) above.

INPUT GROUP: 4 -- Map Projection and Grid control parameters

Projection for all (X,Y):

Map projection

(PMAP) Default: UTM ! PMAP = UTM !

UTM : Universal Transverse Mercator
 TTM : Tangential Transverse Mercator
 LCC : Lambert Conformal Conic
 PS : Polar Stereographic
 EM : Equatorial Mercator
 LAZA : Lambert Azimuthal Equal Area

False Easting and Northing (km) at the projection origin

(Used only if PMAP= TTM, LCC, or LAZA)

(FEAST) Default=0.0 ! FEAST = 0.000 !

(FNORTH) Default=0.0 ! FNORTH = 0.000 !

UTM zone (1 to 60)

(Used only if PMAP=UTM)

(IUTMZN) No Default ! IUTMZN = 14 !

Hemisphere for UTM projection?

(Used only if PMAP=UTM)

(UTMHEM) Default: N ! UTMHEM = N !

N : Northern hemisphere projection

S : Southern hemisphere projection

Latitude and Longitude (decimal degrees) of projection origin

(Used only if PMAP= TTM, LCC, PS, EM, or LAZA)

(RLAT0) No Default ! RLAT0 = 0N !

(RLON0) No Default ! RLON0 = 0E !

TTM : RLON0 identifies central (true N/S) meridian of projection

RLAT0 selected for convenience

LCC : RLON0 identifies central (true N/S) meridian of projection

RLAT0 selected for convenience

PS : RLON0 identifies central (grid N/S) meridian of projection

RLAT0 selected for convenience

EM : RLON0 identifies central meridian of projection

RLAT0 is REPLACED by 0.0N (Equator)

LAZA: RLON0 identifies longitude of tangent-point of mapping plane

RLAT0 identifies latitude of tangent-point of mapping plane

Matching parallel(s) of latitude (decimal degrees) for projection

(Used only if PMAP= LCC or PS)

(XLAT1) No Default ! XLAT1 = 0N !

(XLAT2) No Default ! XLAT2 = 0N !

LCC : Projection cone slices through Earth's surface at XLAT1 and XLAT2

PS : Projection plane slices through Earth at XLAT1

(XLAT2 is not used)

Note: Latitudes and longitudes should be positive, and include a

letter N,S,E, or W indicating north or south latitude, and east or west longitude. For example,
 35.9 N Latitude = 35.9N
 118.7 E Longitude = 118.7E

Datum-region

The Datum-Region for the coordinates is identified by a character string. Many mapping products currently available use the model of the Earth known as the World Geodetic System 1984 (WGS-84). Other local models may be in use, and their selection in CALMET will make its output consistent with local mapping products. The list of Datum-Regions with official transformation parameters is provided by the National Imagery and Mapping Agency (NIMA).

NIMA Datum - Regions(Examples)

WGS-84 WGS-84 Reference Ellipsoid and Geoid, Global coverage (WGS84)
 NAS-C NORTH AMERICAN 1927 Clarke 1866 Spheroid, MEAN FOR CONUS (NAD27)
 NAR-C NORTH AMERICAN 1983 GRS 80 Spheroid, MEAN FOR CONUS (NAD83)
 NWS-84 NWS 6370KM Radius, Sphere
 ESR-S ESRI REFERENCE 6371KM Radius, Sphere

Datum-region for output coordinates
 (DATUM) Default: WGS-84 ! DATUM = WGS-84 !

METEOROLOGICAL Grid:

Rectangular grid defined for projection PMAP,
 with X the Easting and Y the Northing coordinate

No. X grid cells (NX) No default ! NX = 115 !
 No. Y grid cells (NY) No default ! NY = 115 !
 No. vertical layers (NZ) No default ! NZ = 10 !

Grid spacing (DGRIDKM) No default ! DGRIDKM = 1.0 !
 Units: km

Cell face heights
 (ZFACE(nz+1)) No defaults
 Units: m
 ! ZFACE = .0, 20.0, 40.0, 80.0, 160.0, 300.0, 600.0, 1000.0, 1500.0, 2200.0,
 5000.0 !

Reference Coordinates
 of SOUTHWEST corner of
 grid cell(1, 1):

X coordinate (XORIGKM) No default ! XORIGKM = 489.0 !
 Y coordinate (YORIGKM) No default ! YORIGKM = 2057.0 !
 Units: km

COMPUTATIONAL Grid:

The computational grid is identical to or a subset of the MET. grid.
 The lower left (LL) corner of the computational grid is at grid point (IBCOMP, JBCOMP) of the MET. grid. The upper right (UR) corner of the computational grid is at grid point (IECOMP, JECOMP) of the MET. grid. The grid spacing of the computational grid is the same as the MET. grid.

X index of LL corner (IBCOMP) No default ! IBCOMP = 1 !
 (1 <= IBCOMP <= NX)
 Y index of LL corner (JBCOMP) No default ! JBCOMP = 1 !
 (1 <= JBCOMP <= NY)
 X index of UR corner (IECOMP) No default ! IECOMP = 115 !
 (1 <= IECOMP <= NX)
 Y index of UR corner (JECOMP) No default ! JECOMP = 115 !
 (1 <= JECOMP <= NY)

SAMPLING Grid (GRIDDED RECEPTORS):

The lower left (LL) corner of the sampling grid is at grid point (IBSAMP, JBSAMP) of the MET. grid. The upper right (UR) corner of the sampling grid is at grid point (IESAMP, JESAMP) of the MET. grid. The sampling grid must be identical to or a subset of the computational grid. It may be a nested grid inside the computational grid. The grid spacing of the sampling grid is DGRIDKM/MESH DN.

Logical flag indicating if gridded receptors are used (LSAMP) Default: T ! LSAMP = T !
 (T=yes, F=no)
 X index of LL corner (IBSAMP) No default ! IBSAMP = 1 !
 (IBCOMP <= IBSAMP <= IECOMP)
 Y index of LL corner (JBSAMP) No default ! JBSAMP = 1 !
 (JBCOMP <= JBSAMP <= JECOMP)
 X index of UR corner (IESAMP) No default ! IESAMP = 115 !
 (IBCOMP <= IESAMP <= IECOMP)

Maestría en Ingeniería Ambiental-Aire

Y index of UR corner (JESAMP) No default ! JESAMP = 115 !
 (JBCOMP <= JESAMP <= JECOMP)

Nesting factor of the sampling
 grid (MESH DN) Default: 1 ! MESH DN = 1 !
 (MESH DN is an integer >= 1)

!END!

INPUT GROUP: 5 -- Output Options

| FILE | * DEFAULT VALUE | * VALUE THIS RUN |
|--|--------------------|---------------------|
| ---- | ----- | ----- |
| Concentrations (ICON) | 1 | ! ICON = 1 ! |
| Dry Fluxes (IDRY) | 1 | ! IDRY = 0 ! |
| Wet Fluxes (IWET) | 1 | ! IWET = 0 ! |
| 2D Temperature (IT2D) | 0 | ! IT2D = 0 ! |
| 2D Density (IRHO) | 0 | ! IRHO = 0 ! |
| Relative Humidity (IVIS) (relative humidity file is required for visibility analysis) | 1 | ! IVIS = 0 ! |
| Use data compression option in output file? (LCOMPRS) | Default: T | ! LCOMPRS = T ! |

*
 0 = Do not create file, 1 = create file

QA PLOT FILE OUTPUT OPTION:

Create a standard series of output files (e.g.
 locations of sources, receptors, grids ...)
 suitable for plotting?
 (IQAPLOT) Default: 1 ! IQAPLOT = 1 !
 0 = no
 1 = yes

DIAGNOSTIC PUFF-TRACKING OUTPUT OPTION:

Puff locations and properties reported to
 PFTRAK.DAT file for postprocessing?
 (IPFTRAK) Default: 0 ! IPFTRAK = 0 !
 0 = no

- 1 = yes, update puff output at end of each timestep
- 2 = yes, update puff output at end of each sampling step

DIAGNOSTIC MASS FLUX OUTPUT OPTIONS:

Mass flux across specified boundaries
for selected species reported?

- (IMFLX) Default: 0 ! IMFLX = 0 !
0 = no
1 = yes (FLUXBDY.DAT and MASSFLX.DAT filenames
are specified in Input Group 0)

Mass balance for each species
reported?

- (IMBAL) Default: 0 ! IMBAL = 0 !
0 = no
1 = yes (MASSBAL.DAT filename is
specified in Input Group 0)

NUMERICAL RISE OUTPUT OPTION:

Create a file with plume properties for each rise
increment, for each model timestep?
This applies to sources modeled with numerical rise
and is limited to ONE source in the run.

- (INRISE) Default: 0 ! INRISE = 0 !
0 = no
1 = yes (RISE.DAT filename is
specified in Input Group 0)

LINE PRINTER OUTPUT OPTIONS:

- Print concentrations (ICPRT) Default: 0 ! ICPRT = 1 !
Print dry fluxes (IDPRT) Default: 0 ! IDPRT = 0 !
Print wet fluxes (IWPRT) Default: 0 ! IWPRT = 0 !
(0 = Do not print, 1 = Print)

- Concentration print interval
(ICFRQ) in timesteps Default: 1 ! ICFRQ = 1 !
Dry flux print interval
(IDFRQ) in timesteps Default: 1 ! IDFRQ = 1 !
Wet flux print interval
(IWFRQ) in timesteps Default: 1 ! IWFRQ = 1 !

Units for Line Printer Output

- (IPRTU) Default: 1 ! IPRTU = 3 !
for for
Concentration Deposition
1 = g/m**3 g/m**2/s

Maestría en Ingeniería Ambiental-Aire

- 2 = mg/m**3 mg/m**2/s
- 3 = ug/m**3 ug/m**2/s
- 4 = ng/m**3 ng/m**2/s
- 5 = Odour Units

Messages tracking progress of run
written to the screen ?

- (IMESG) Default: 2 ! IMESG = 2 !
- 0 = no
 - 1 = yes (advection step, puff ID)
 - 2 = yes (YYYYJJHH, # old puffs, # emitted puffs)

SPECIES (or GROUP for combined species) LIST FOR OUTPUT OPTIONS

| | ---- | CONCENTRATIONS | ---- | DRY FLUXES | ----- | WET FLUXES | ----- | MASS FLUX |
|----------|--------|----------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|----------------|
| SPECIES | /GROUP | PRINTED? | SAVED ON DISK? | PRINTED? | SAVED ON DISK? | PRINTED? | SAVED ON DISK? | SAVED ON DISK? |
| ! SO2 = | 1, | 1, | 0, | 1, | 0, | 1, | 0 ! | |
| ! SO4 = | 0, | 1, | 0, | 1, | 0, | 1, | 0 ! | |
| ! NO = | 0, | 1, | 0, | 1, | 0, | 1, | 0 ! | |
| ! NO2 = | 0, | 1, | 0, | 1, | 0, | 1, | 0 ! | |
| ! HNO3 = | 0, | 1, | 0, | 1, | 0, | 1, | 0 ! | |
| ! NO3 = | 0, | 1, | 0, | 1, | 0, | 1, | 0 ! | |
| ! PM10 = | 0, | 1, | 0, | 1, | 0, | 1, | 0 ! | |

Note: Species BCON (for MBCON > 0) does not need to be saved on disk.

OPTIONS FOR PRINTING "DEBUG" QUANTITIES (much output)

- Logical for debug output
(LDEBUG) Default: F ! LDEBUG = F !
- First puff to track
(IPFDEB) Default: 1 ! IPFDEB = 1 !
- Number of puffs to track
(NPFDEB) Default: 1 ! NPFDEB = 1 !
- Met. period to start output
(NN1) Default: 1 ! NN1 = 1 !
- Met. period to end output
(NN2) Default: 10 ! NN2 = 10 !

!END!

 INPUT GROUP: 6a, 6b, & 6c -- Subgrid scale complex terrain inputs

 Subgroup (6a)

Number of terrain features (NHILL) Default: 0 ! NHILL = 0 !

Number of special complex terrain
 receptors (NCTREC) Default: 0 ! NCTREC = 0 !

Terrain and CTSG Receptor data for
 CTSG hills input in CTDM format ?
 (MHILL) No Default ! MHILL = 2 !

- 1 = Hill and Receptor data created
 by CTDM processors & read from
 HILL.DAT and HILLRCT.DAT files
- 2 = Hill data created by OPTHILL &
 input below in Subgroup (6b);
 Receptor data in Subgroup (6c)

Factor to convert horizontal dimensions Default: 1.0 ! XHILL2M = 1.0 !
 to meters (MHILL=1)

Factor to convert vertical dimensions Default: 1.0 ! ZHILL2M = 1.0 !
 to meters (MHILL=1)

X-origin of CTDM system relative to No Default ! XCTDMKM = 0 !
 CALPUFF coordinate system, in Kilometers (MHILL=1)

Y-origin of CTDM system relative to No Default ! YCTDMKM = 0 !
 CALPUFF coordinate system, in Kilometers (MHILL=1)

! END !

 Subgroup (6b)

1 **

HILL information

| HILL AMAX2 NO. | XC (km) | YC (km) | THETAH (deg.) | ZGRID (m) | RELIEF (m) | EXPO 1 (m) | EXPO 2 (m) | SCALE 1 (m) | SCALE 2 (m) | AMAX1 |
|----------------------|------------|------------|------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-------|
| ---- | ---- | ---- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |

 Subgroup (6c)

COMPLEX TERRAIN RECEPTOR INFORMATION

| | | | |
|-------|-------|-------|------|
| XRCT | YRCT | ZRCT | XHH |
| (km) | (km) | (m) | |
| ----- | ----- | ----- | ---- |

 1

Description of Complex Terrain Variables:

- XC, YC = Coordinates of center of hill
- THETAH = Orientation of major axis of hill (clockwise from North)
- ZGRID = Height of the 0 of the grid above mean sea level
- RELIEF = Height of the crest of the hill above the grid elevation
- EXPO 1 = Hill-shape exponent for the major axis
- EXPO 2 = Hill-shape exponent for the minor axis
- SCALE 1 = Horizontal length scale along the major axis
- SCALE 2 = Horizontal length scale along the minor axis
- AMAX = Maximum allowed axis length for the major axis
- BMAX = Maximum allowed axis length for the minor axis

- XRCT, YRCT = Coordinates of the complex terrain receptors
- ZRCT = Height of the ground (MSL) at the complex terrain Receptor
- XHH = Hill number associated with each complex terrain receptor (NOTE: MUST BE ENTERED AS A REAL NUMBER)

**

NOTE: DATA for each hill and CTSG receptor are treated as a separate input subgroup and therefore must end with an input group terminator.

 INPUT GROUP: 7 -- Chemical parameters for dry deposition of gases

| SPECIES | DIFFUSIVITY | ALPHA STAR | REACTIVITY | MESOPHYLL RESISTANCE | HENRY'S LAW |
|-------------|-------------|------------|------------|----------------------|-------------|
| COEFFICIENT | | | | | |
| NAME | (cm**2/s) | | (s/cm) | (dimensionless) | |
| ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ! SO2 = | .1509, | 1000.0, | 8.0, | .0, | .04 ! |
| ! NO = | .1345, | 1.0, | 2.0, | 25.0, | 18.0 ! |
| ! NO2 = | .1656, | 1.0, | 8.0, | 5.0, | 3.5 ! |

Maestría en Ingeniería Ambiental-Aire

! HNO3 = .1628, 1.0, 18.0, .0, .0000001 !

!END!

 INPUT GROUP: 8 -- Size parameters for dry deposition of particles

For SINGLE SPECIES, the mean and standard deviation are used to compute a deposition velocity for NINT (see group 9) size-ranges, and these are then averaged to obtain a mean deposition velocity.

For GROUPED SPECIES, the size distribution should be explicitly specified (by the 'species' in the group), and the standard deviation for each should be entered as 0. The model will then use the deposition velocity for the stated mean diameter.

| SPECIES NAME | GEOMETRIC MASS MEAN DIAMETER (microns) | GEOMETRIC STANDARD DEVIATION (microns) |
|--------------|--|--|
| ! SO4 = | .48, | 2.0 ! |
| ! NO3 = | .48, | 2.0 ! |
| ! PM10 = | .48, | 2.0 ! |

!END!

 INPUT GROUP: 9 -- Miscellaneous dry deposition parameters

Reference cuticle resistance (s/cm)
 (RCUTR) Default: 30 ! RCUTR = 30.0 !
 Reference ground resistance (s/cm)
 (RGR) Default: 10 ! RGR = 10.0 !
 Reference pollutant reactivity
 (REACTR) Default: 8 ! REACTR = 8.0 !

Number of particle-size intervals used to evaluate effective particle deposition velocity
 (NINT) Default: 9 ! NINT = 9 !

Vegetation state in unirrigated areas
 (IVEG) Default: 1 ! IVEG = 1 !
 IVEG=1 for active and unstressed vegetation
 IVEG=2 for active and stressed vegetation

IVEG=3 for inactive vegetation

!END!

INPUT GROUP: 10 -- Wet Deposition Parameters

Scavenging Coefficient -- Units: (sec)**(-1)

| Pollutant | Liquid Precip. | Frozen Precip. |
|-----------|----------------|----------------|
| ! SO2 = | 3.0E-05, | 0.0E00 ! |
| ! SO4 = | 1.0E-04, | 3.0E-05 ! |
| ! HNO3 = | 6.0E-05, | 0.0E00 ! |
| ! NO3 = | 1.0E-04, | 3.0E-05 ! |
| ! PM10 = | 1.0E-04, | 3.0E-05 ! |

!END!

INPUT GROUP: 11a, 11b -- Chemistry Parameters

Subgroup (11a)

Several parameters are needed for one or more of the chemical transformation mechanisms. Those used for each mechanism are:

| | M | B | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|--|
| | A | B | R | R | R | C | B | N | | | | | | | | |
| | B | V | C | N | N | N | M | K | C | O | D | | | | | |
| | C | M | G | K | I | I | I | H | H | K | F | V | E | | | |
| | M | K | N | N | N | T | T | T | 2 | 2 | P | R | C | C | | |
| | O | O | H | H | H | E | E | E | O | O | M | A | N | A | | |
| Mechanism (MCHEM) | Z | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | F | C | X | Y | | |

| | |
|---------------------|-------------------------------|
| 0 None | |
| 1 MESOPUFF II | X X . . X X X X |
| 2 User Rates | |
| 3 RIVAD | X X . . X |
| 4 SOA | X X X X X . |
| 5 Radioactive Decay | X |
| 6 RIVAD/ISORRPIA | X X X X X X . . X X |

7 RIVAD/ISORRPIA/SOA X X X X X X . . X X X X . .

Ozone data input option (MOZ) Default: 1 ! MOZ = 0 !

(Used only if MCHEM = 1, 3, 4, 6, or 7)

0 = use a monthly background ozone value

1 = read hourly ozone concentrations from the OZONE.DAT data file

Monthly ozone concentrations in ppb (BCKO3)

(Used only if MCHEM = 1,3,4,6, or 7 and either

MOZ = 0, or

MOZ = 1 and all hourly O3 data missing)

Default: 12*80.

! BCKO3 = 40.00, 40.00, 40.00, 40.00, 40.00, 40.00, 40.00, 40.00, 40.00, 40.00, 40.00, 40.00 !

Ammonia data option (MNH3) Default: 0 ! MNH3 = 0 !

(Used only if MCHEM = 6 or 7)

0 = use monthly background ammonia values (BCKNH3) - no vertical variation

1 = read monthly background ammonia values for each layer from the NH3Z.DAT data file

Ammonia vertical averaging option (MAVGNH3)

(Used only if MCHEM = 6 or 7, and MNH3 = 1)

0 = use NH3 at puff center height (no averaging is done)

1 = average NH3 values over vertical extent of puff

Default: 1 ! MAVGNH3 = 1 !

Monthly ammonia concentrations in ppb (BCKNH3)

(Used only if MCHEM = 1 or 3, or

if MCHEM = 6 or 7, and MNH3 = 0)

Default: 12*10.

! BCKNH3 = 10.00, 10.00, 10.00, 10.00, 10.00, 10.00, 10.00, 10.00, 10.00, 10.00, 10.00, 10.00 !

Nighttime SO2 loss rate in %/hour (RNITE1)

(Used only if MCHEM = 1, 6 or 7)

This rate is used only at night for MCHEM=1

and is added to the computed rate both day and night for MCHEM=6,7 (heterogeneous reactions)

Default: 0.2 ! RNITE1 = .2 !

Nighttime NOx loss rate in %/hour (RNITE2)

(Used only if MCHEM = 1)

Default: 2.0 ! RNITE2 = 2.0 !

Nighttime HNO3 formation rate in %/hour (RNITE3)

(Used only if MCHEM = 1)

Default: 2.0 ! RNITE3 = 2.0 !

H2O2 data input option (MH2O2) Default: 1 ! MH2O2 = 1 !

(Used only if MCHEM = 6 or 7, and MAQCHEM = 1)

Maestría en Ingeniería Ambiental-Aire

0 = use a monthly background H2O2 value
 1 = read hourly H2O2 concentrations from
 the H2O2.DAT data file

Monthly H2O2 concentrations in ppb (BCKH2O2)
 (Used only if MQACHEM = 1 and either
 MH2O2 = 0 or
 MH2O2 = 1 and all hourly H2O2 data missing)
 Default: 12*1.

! BCKH2O2 = 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00 !

--- Data for SECONDARY ORGANIC AEROSOL (SOA) Options
 (used only if MCHEM = 4 or 7)

The MCHEM = 4 SOA module uses monthly values of:
 Fine particulate concentration in ug/m³ (BCKPMF)
 Organic fraction of fine particulate (OFRAC)
 VOC / NOX ratio (after reaction) (VCNX)

The MCHEM = 7 SOA module uses monthly values of:
 Fine particulate concentration in ug/m³ (BCKPMF)
 Organic fraction of fine particulate (OFRAC)

These characterize the air mass when computing
 the formation of SOA from VOC emissions.
 Typical values for several distinct air mass types are:

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Month | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |

Clean Continental
 BCKPMF 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1.
 OFRAC .15 .15 .20 .20 .20 .20 .20 .20 .20 .20 .20 .20 .15
 VCNX 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50.

Clean Marine (surface)
 BCKPMF .5 .5 .5 .5 .5 .5 .5 .5 .5 .5 .5 .5 .5
 OFRAC .25 .25 .30 .30 .30 .30 .30 .30 .30 .30 .30 .30 .25
 VCNX 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50. 50.

Urban - low biogenic (controls present)
 BCKPMF 30. 30. 30. 30. 30. 30. 30. 30. 30. 30. 30. 30. 30.
 OFRAC .20 .20 .25 .25 .25 .25 .25 .25 .20 .20 .20 .20 .20
 VCNX 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4.

Urban - high biogenic (controls present)
 BCKPMF 60. 60. 60. 60. 60. 60. 60. 60. 60. 60. 60. 60. 60.
 OFRAC .25 .25 .30 .30 .30 .55 .55 .55 .35 .35 .35 .25 .25
 VCNX 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15.

Maestría en Ingeniería Ambiental-Aire

Regional Plume

BCKPMF 20. 20. 20. 20. 20. 20. 20. 20. 20. 20. 20. 20.
 OFRAC .20 .20 .25 .35 .25 .40 .40 .40 .30 .30 .30 .20
 VCNX 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15. 15.

Urban - no controls present

BCKPMF 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100. 100.
 OFRAC .30 .30 .35 .35 .35 .55 .55 .55 .35 .35 .35 .30
 VCNX 2. 2. 2. 2. 2. 2. 2. 2. 2. 2. 2. 2.

Default: Clean Continental

! BCKPMF = 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00 !
 ! OFRAC = 0.15, 0.15, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.15 !
 ! VCNX = 50.00, 50.00, 50.00, 50.00, 50.00, 50.00, 50.00, 50.00, 50.00, 50.00, 50.00, 50.00 !

--- End Data for SECONDARY ORGANIC AEROSOL (SOA) Option

Number of half-life decay specification blocks provided in Subgroup 11b
 (Used only if MCHEM = 5)
 (NDECAY) Default: 0 ! NDECAY = 0 !

!END!

 Subgroup (11b)

Each species modeled may be assigned a decay half-life (sec), and the associated mass lost may be assigned to one or more other modeled species using a mass yield factor. This information is used only for MCHEM=5.

Provide NDECAY blocks assigning the half-life for a parent species and mass yield factors for each child species (if any) produced by the decay.
 Set HALF_LIFE=0.0 for NO decay (infinite half-life).

| | a | b | |
|---------|-----------|------------|------------|
| SPECIES | Half-Life | Mass Yield | |
| NAME | (sec) | Factor | |
| ----- | ----- | ----- | |
| * SPEC1 | = 3600., | -1.0 | * (Parent) |
| * SPEC2 | = -1.0, | 0.0 | * (Child) |
| *END* | | | |

 a
 Specify a half life that is greater than or equal to zero for 1 parent species in each block, and set the yield factor for this species to -1

b

Specify a yield factor that is greater than or equal to zero for 1 or more child species in each block, and set the half-life for each of these species to -1

NOTE: Assignments in each block are treated as a separate input subgroup and therefore must end with an input group terminator.
If NDECAY=0, no assignments and input group terminators should appear.

INPUT GROUP: 12 -- Misc. Dispersion and Computational Parameters

Horizontal size of puff (m) beyond which
time-dependent dispersion equations (Heffter)
are used to determine sigma-y and
sigma-z (SYTDEP) Default: 550. ! SYTDEP = 5.5E02 !

Switch for using Heffter equation for sigma z
as above (0 = Not use Heffter; 1 = use Heffter
(MHFTSZ) Default: 0 ! MHFTSZ = 0 !

Stability class used to determine plume
growth rates for puffs above the boundary
layer (JSUP) Default: 5 ! JSUP = 5 !

Vertical dispersion constant for stable
conditions (k1 in Eqn. 2.7-3) (CONK1) Default: 0.01 ! CONK1 = .01 !

Vertical dispersion constant for neutral/
unstable conditions (k2 in Eqn. 2.7-4)
(CONK2) Default: 0.1 ! CONK2 = .1 !

Factor for determining Transition-point from
Schulman-Scire to Huber-Snyder Building Downwash
scheme (SS used for $H_s < H_b + TBD * HL$)
(TBD) Default: 0.5 ! TBD = .5 !
TBD < 0 ==> always use Huber-Snyder
TBD = 1.5 ==> always use Schulman-Scire
TBD = 0.5 ==> ISC Transition-point

Range of land use categories for which
urban dispersion is assumed
(IURB1, IURB2) Default: 10 ! IURB1 = 10 !
19 ! IURB2 = 19 !

Site characterization parameters for single-point Met data files -----
(needed for METFM = 2,3,4,5)

Land use category for modeling domain

(ILANDUIN) Default: 20 ! ILANDUIN = 20 !

Roughness length (m) for modeling domain
(Z0IN) Default: 0.25 ! Z0IN = .25 !

Leaf area index for modeling domain
(XLAIIN) Default: 3.0 ! XLAIIN = 3.0 !

Elevation above sea level (m)
(ELEVIN) Default: 0.0 ! ELEVIN = .0 !

Latitude (degrees) for met location
(XLATIN) Default: -999. ! XLATIN = .0 !

Longitude (degrees) for met location
(XLONIN) Default: -999. ! XLONIN = .0 !

Specialized information for interpreting single-point Met data files -----

Anemometer height (m) (Used only if METFM = 2,3)
(ANEMHT) Default: 10. ! ANEMHT = 10.0 !

Form of lateral turbulence data in PROFILE.DAT file
(Used only if METFM = 4,5 or MTURBVW = 1 or 3)
(ISIGMAV) Default: 1 ! ISIGMAV = 1 !
0 = read sigma-theta
1 = read sigma-v

Choice of mixing heights (Used only if METFM = 4)
(IMIXCTDM) Default: 0 ! IMIXCTDM = 0 !
0 = read PREDICTED mixing heights
1 = read OBSERVED mixing heights

Maximum length of a slug (met. grid units)
(MXMLEN) Default: 1.0 ! MXMLEN = 1.0 !

Maximum travel distance of a puff/slug (in
grid units) during one sampling step
(XSAMLEN) Default: 1.0 ! XSAMLEN = 1.0 !

Maximum Number of slugs/puffs release from
one source during one time step
(MXNEW) Default: 99 ! MXNEW = 99 !

Maximum Number of sampling steps for
one puff/slug during one time step
(MXSAM) Default: 99 ! MXSAM = 99 !

Number of iterations used when computing
the transport wind for a sampling step
that includes gradual rise (for CALMET

and PROFILE winds)
(NCOUNT) Default: 2 ! NCOUNT = 2 !

Minimum sigma y for a new puff/slug (m)
(SYMIN) Default: 1.0 ! SYMIN = 1.0 !

Minimum sigma z for a new puff/slug (m)
(SZMIN) Default: 1.0 ! SZMIN = 1.0 !

Maximum sigma z (m) allowed to avoid numerical problem in calculating virtual time or distance. Cap should be large enough to have no influence on normal events. Enter a negative cap to disable.
(SZCAP_M) Default: 5.0e06 ! SZCAP_M = 5.0E06 !

Default minimum turbulence velocities sigma-v and sigma-w for each stability class over land and over water (m/s)
(SVMIN(12) and SWMIN(12))

| ----- LAND ----- | | | | | | ----- WATER ----- | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|-------------------------------|---|---|---|---|---|
| A | B | C | D | E | F | A | B | C | D | E | F |
| ----- | | | | | | ----- | | | | | |
| Default SVMIN : .50, .50, .50, .50, .50, .50, | | | | | | .37, .37, .37, .37, .37, .37 | | | | | |
| Default SWMIN : .20, .12, .08, .06, .03, .016, | | | | | | .20, .12, .08, .06, .03, .016 | | | | | |

! SVMIN = 0.500, 0.500, 0.500, 0.500, 0.500, 0.500, 0.370, 0.370, 0.370, 0.370, 0.370, 0.370!
! SWMIN = 0.200, 0.120, 0.080, 0.060, 0.030, 0.016, 0.200, 0.120, 0.080, 0.060, 0.030, 0.016!

Divergence criterion for dw/dz across puff used to initiate adjustment for horizontal convergence (1/s)
Partial adjustment starts at CDIV(1), and full adjustment is reached at CDIV(2)
(CDIV(2)) Default: 0.0,0.0 ! CDIV = .0, .0 !

Search radius (number of cells) for nearest land and water cells used in the subgrid
TIBL module
(NLUTIBL) Default: 4 ! NLUTIBL = 4 !

Minimum wind speed (m/s) allowed for non-calm conditions. Also used as minimum speed returned when using power-law extrapolation toward surface
(WSCALM) Default: 0.5 ! WSCALM = .5 !

Maximum mixing height (m)
(XMAXZI) Default: 3000. ! XMAXZI = 5000.0 !

Minimum mixing height (m)

(XMINZI) Default: 50. ! XMINZI = 50.0 !

Default wind speed classes --
 5 upper bounds (m/s) are entered;
 the 6th class has no upper limit

(WSCAT(5)) Default :
 ISC RURAL : 1.54, 3.09, 5.14, 8.23, 10.8 (10.8+)

Wind Speed Class : 1 2 3 4 5
 --- --- --- --- ---
 ! WSCAT = 1.54, 3.09, 5.14, 8.23, 10.80 !

Default wind speed profile power-law
 exponents for stabilities 1-6

(PLX0(6)) Default : ISC RURAL values
 ISC RURAL : .07, .07, .10, .15, .35, .55
 ISC URBAN : .15, .15, .20, .25, .30, .30

Stability Class : A B C D E F
 --- --- --- --- --- ---
 ! PLX0 = 0.07, 0.07, 0.10, 0.15, 0.35, 0.55 !

Default potential temperature gradient
 for stable classes E, F (degK/m)

(PTG0(2)) Default: 0.020, 0.035
 ! PTG0 = 0.020, 0.035 !

Default plume path coefficients for
 each stability class (used when option
 for partial plume height terrain adjustment
 is selected -- MCTADJ=3)

(PPC(6)) Stability Class : A B C D E F
 Default PPC : .50, .50, .50, .50, .35, .35
 --- --- --- --- --- ---
 ! PPC = 0.50, 0.50, 0.50, 0.50, 0.35, 0.35 !

Slug-to-puff transition criterion factor
 equal to sigma-y/length of slug

(SL2PF) Default: 10. ! SL2PF = 10.0 !

Puff-splitting control variables -----

VERTICAL SPLIT

Number of puffs that result every time a puff
 is split - nsplit=2 means that 1 puff splits
 into 2

(NSPLIT) Default: 3 ! NSPLIT = 3 !

Time(s) of a day when split puffs are eligible to

be split once again; this is typically set once per day, around sunset before nocturnal shear develops.
 24 values: 0 is midnight (00:00) and 23 is 11 PM (23:00)
 0=do not re-split 1=eligible for re-split
 (IRESPLIT(24)) Default: Hour 17 = 1
 ! IRESPLIT = 0,0 !

Split is allowed only if last hour's mixing height (m) exceeds a minimum value
 (ZISPLIT) Default: 100. ! ZISPLIT = 100.0 !

Split is allowed only if ratio of last hour's mixing ht to the maximum mixing ht experienced by the puff is less than a maximum value (this postpones a split until a nocturnal layer develops)
 (ROLDMAX) Default: 0.25 ! ROLDMAX = 0.25 !

HORIZONTAL SPLIT

Number of puffs that result every time a puff is split - nsplith=5 means that 1 puff splits into 5
 (NSPLITH) Default: 5 ! NSPLITH = 5 !

Minimum sigma-y (Grid Cells Units) of puff before it may be split
 (SYSPLITH) Default: 1.0 ! SYSPLITH = 1.0 !

Minimum puff elongation rate (SYSPLITH/hr) due to wind shear, before it may be split
 (SHSPLITH) Default: 2. ! SHSPLITH = 2.0 !

Minimum concentration (g/m³) of each species in puff before it may be split
 Enter array of NSPEC values; if a single value is entered, it will be used for ALL species
 (CNSPLITH) Default: 1.0E-07 ! CNSPLITH = 1.0E-07 !

Integration control variables -----

Fractional convergence criterion for numerical SLUG sampling integration
 (EPSSLUG) Default: 1.0e-04 ! EPSSLUG = 1.0E-04 !

Fractional convergence criterion for numerical AREA source integration
 (EPSAREA) Default: 1.0e-06 ! EPSAREA = 1.0E-06 !

Trajectory step-length (m) used for numerical rise

integration
(DSRISE) Default: 1.0 ! DSRISE = 1.0 !

Boundary Condition (BC) Puff control variables -----

Minimum height (m) to which BC puffs are mixed as they are emitted
(MBCON=2 ONLY). Actual height is reset to the current mixing height
at the release point if greater than this minimum.

(HTMINBC) Default: 500. ! HTMINBC = 500.0 !

Search radius (km) about a receptor for sampling nearest BC puff.
BC puffs are typically emitted with a spacing of one grid cell
length, so the search radius should be greater than DGRIDKM.

(RSAMPBC) Default: 10. ! RSAMPBC = 10.0 !

Near-Surface depletion adjustment to concentration profile used when
sampling BC puffs?

(MDEPBC) Default: 1 ! MDEPBC = 1 !

0 = Concentration is NOT adjusted for depletion

1 = Adjust Concentration for depletion

!END!

INPUT GROUPS: 13a, 13b, 13c, 13d -- Point source parameters

Subgroup (13a)

Number of point sources with
parameters provided below (NPT1) No default ! NPT1 = 5 !

Units used for point source
emissions below (IPTU) Default: 1 ! IPTU = 1 !

- 1 = g/s
- 2 = kg/hr
- 3 = lb/hr
- 4 = tons/yr
- 5 = Odour Unit * m**3/s (vol. flux of odour compound)
- 6 = Odour Unit * m**3/min
- 7 = metric tons/yr
- 8 = Bq/s (Bq = becquerel = disintegrations/s)
- 9 = GBq/yr

Number of source-species
combinations with variable

emissions scaling factors
 provided below in (13d) (NSPT1) Default: 0 ! NSPT1 = 0 !

Number of point sources with
 variable emission parameters
 provided in external file (NPT2) No default ! NPT2 = 0 !

(If NPT2 > 0, these point
 source emissions are read from
 the file: PTEMARB.DAT)

!END!

 Subgroup (13b)

a
 POINT SOURCE: CONSTANT DATA

| Source No. | X (km) | Y (km) | Stack (m) | Base (m) | b | | c | | Bldg. Emission | Dwash Rates |
|------------|----------------------------------|---------|-----------|----------|-----------|------------|---------------|-------|----------------|-----------------|
| | | | | | Stack (m) | Exit (m/s) | Exit (deg. K) | Temp. | | |
| ----- | | | | | | | | | | |
| 1 ! | SRCNAM = STK1 ! | | | | | | | | | |
| 1 ! | 515.5, | 2132.3, | 40.0, | 160.0, | 5.0, | 6.0, | 420.0, | .0, | 2.0E01, | 0.0E00, 0.0E00, |
| | 0.0E00, 0.0E00, 0.0E00, 0.0E01 ! | | | | | | | | | |
| 1 ! | ZPLTFM = .0 ! | | | | | | | | | |
| 1 ! | FMFAC = 1.0 ! !END! | | | | | | | | | |
| 2 ! | SRCNAM = STK2 ! | | | | | | | | | |
| 2 ! | 553.8, | 2133.6, | 40.0, | 160.0, | 5.0, | 6.0, | 420.0, | .0, | 2.0E01, | 0.0E00, 0.0E00, |
| | 0.0E00, 0.0E00, 0.0E00, 0.0E01 ! | | | | | | | | | |
| 2 ! | ZPLTFM = .0 ! | | | | | | | | | |
| 2 ! | FMFAC = 1.0 ! !END! | | | | | | | | | |
| 3 ! | SRCNAM = STK3 ! | | | | | | | | | |
| 3 ! | 526.0, | 2113.7, | 40.0, | 160.0, | 5.0, | 6.0, | 420.0, | .0, | 2.0E01, | 0.0E00, 0.0E00, |
| | 0.0E00, 0.0E00, 0.0E00, 0.0E01 ! | | | | | | | | | |
| 3 ! | ZPLTFM = .0 ! | | | | | | | | | |
| 3 ! | FMFAC = 1.0 ! !END! | | | | | | | | | |
| 4 ! | SRCNAM = STK4 ! | | | | | | | | | |
| 4 ! | 560.0, | 2116.9, | 40.0, | 160.0, | 5.0, | 6.0, | 420.0, | .0, | 2.0E01, | 0.0E00, 0.0E00, |
| | 0.0E00, 0.0E00, 0.0E00, 0.0E01 ! | | | | | | | | | |
| 4 ! | ZPLTFM = .0 ! | | | | | | | | | |
| 4 ! | FMFAC = 1.0 ! !END! | | | | | | | | | |
| 5 ! | SRCNAM = STK5 ! | | | | | | | | | |
| 5 ! | 565.9, | 2099.5, | 40.0, | 160.0, | 5.0, | 6.0, | 420.0, | .0, | 2.0E01, | 0.0E00, 0.0E00, |
| | 0.0E00, 0.0E00, 0.0E00, 0.0E01 ! | | | | | | | | | |

5 ! ZPLTFM = .0 !
 5 ! FMFAC = 1.0 ! !END!

a

Data for each source are treated as a separate input subgroup and therefore must end with an input group terminator.

SRCNAM is a 12-character name for a source
 (No default)

X is an array holding the source data listed by the column headings
 (No default)

SIGYZI is an array holding the initial sigma-y and sigma-z (m)
 (Default: 0.,0.)

FMFAC is a vertical momentum flux factor (0. or 1.0) used to represent the effect of rain-caps or other physical configurations that reduce momentum rise associated with the actual exit velocity.
 (Default: 1.0 -- full momentum used)

ZPLTFM is the platform height (m) for sources influenced by an isolated structure that has a significant open area between the surface and the bulk of the structure, such as an offshore oil platform. The Base Elevation is that of the surface (ground or ocean), and the Stack Height is the release height above the Base (not above the platform). Building heights entered in Subgroup 13c must be those of the buildings on the platform, measured from the platform deck. ZPLTFM is used only with MBDW=1 (ISC downwash method) for sources with building downwash.
 (Default: 0.0)

b

0. = No building downwash modeled

1. = Downwash modeled for buildings resting on the surface

2. = Downwash modeled for buildings raised above the surface (ZPLTFM > 0.)

NOTE: must be entered as a REAL number (i.e., with decimal point)

c

An emission rate must be entered for every pollutant modeled.

Enter emission rate of zero for secondary pollutants that are modeled, but not emitted. Units are specified by IPTU

(e.g. 1 for g/s).

 Subgroup (13c)

BUILDING DIMENSION DATA FOR SOURCES SUBJECT TO DOWNWASH

Source

a

No. Effective building height, width, length and X/Y offset (in meters) every 10 degrees. LENGTH, XBADJ, and YBADJ are only needed for MBDW=2 (PRIME downwash option)

a

Building height, width, length, and X/Y offset from the source are treated as a separate input subgroup for each source and therefore must end with an input group terminator. The X/Y offset is the position, relative to the stack, of the center of the upwind face of the projected building, with the x-axis pointing along the flow direction.

Subgroup (13d)

a
POINT SOURCE: VARIABLE EMISSIONS DATA

Use this subgroup to describe temporal variations in the emission rates given in 13b. Factors entered multiply the rates in 13b. Skip sources here that have constant emissions. For more elaborate variation in source parameters, use PTEMARB.DAT and NPT2 > 0.

IVARY determines the type of variation, and is source-specific:

- | | |
|---------|---|
| (IVARY) | Default: 0 |
| 0 = | Constant |
| 1 = | Diurnal cycle (24 scaling factors: hours 1-24) |
| 2 = | Monthly cycle (12 scaling factors: months 1-12) |
| 3 = | Hour & Season (4 groups of 24 hourly scaling factors, where first group is DEC-JAN-FEB) |
| 4 = | Speed & Stab. (6 groups of 6 scaling factors, where first group is Stability Class A, and the speed classes have upper bounds (m/s) defined in Group 12 |
| 5 = | Temperature (12 scaling factors, where temperature classes have upper bounds (C) of: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 50+) |

a

Data for each species are treated as a separate input subgroup and therefore must end with an input group terminator.

INPUT GROUPS: 14a, 14b, 14c, 14d -- Area source parameters

 Subgroup (14a)

Number of polygon area sources with parameters specified below (NAR1) No default ! NAR1 = 0 !

Units used for area source emissions below (IARU) Default: 1 ! IARU = 1 !

- 1 = g/m**2/s
- 2 = kg/m**2/hr
- 3 = lb/m**2/hr
- 4 = tons/m**2/yr
- 5 = Odour Unit * m/s (vol. flux/m**2 of odour compound)
- 6 = Odour Unit * m/min
- 7 = metric tons/m**2/yr
- 8 = Bq/m**2/s (Bq = becquerel = disintegrations/s)
- 9 = GBq/m**2/yr

Number of source-species combinations with variable emissions scaling factors provided below in (14d) (NSAR1) Default: 0 ! NSAR1 = 0 !

Number of buoyant polygon area sources with variable location and emission parameters (NAR2) No default ! NAR2 = 0 !
 (If NAR2 > 0, ALL parameter data for these sources are read from the file: BAEMARB.DAT)

!END!

 Subgroup (14b)

a
 AREA SOURCE: CONSTANT DATA

b

| Source No. | Effect. Height (m) | Base Elevation (m) | Initial Sigma z (m) | Emission Rates |
|------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------|
| ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |

 a
 Data for each source are treated as a separate input subgroup

and therefore must end with an input group terminator.

b

An emission rate must be entered for every pollutant modeled. Enter emission rate of zero for secondary pollutants that are modeled, but not emitted. Units are specified by IARU (e.g. 1 for g/m**2/s).

 Subgroup (14c)

COORDINATES (km) FOR EACH VERTEX(4) OF EACH POLYGON

Source a
 No. Ordered list of X followed by list of Y, grouped by source

a

Data for each source are treated as a separate input subgroup and therefore must end with an input group terminator.

 Subgroup (14d)

a
 AREA SOURCE: VARIABLE EMISSIONS DATA

Use this subgroup to describe temporal variations in the emission rates given in 14b. Factors entered multiply the rates in 14b. Skip sources here that have constant emissions. For more elaborate variation in source parameters, use BAEMARB.DAT and NAR2 > 0.

IVARY determines the type of variation, and is source-specific:

- (IVARY) Default: 0
- 0 = Constant
 - 1 = Diurnal cycle (24 scaling factors: hours 1-24)
 - 2 = Monthly cycle (12 scaling factors: months 1-12)
 - 3 = Hour & Season (4 groups of 24 hourly scaling factors, where first group is DEC-JAN-FEB)
 - 4 = Speed & Stab. (6 groups of 6 scaling factors, where first group is Stability Class A, and the speed classes have upper bounds (m/s) defined in Group 12)
 - 5 = Temperature (12 scaling factors, where temperature classes have upper bounds (C) of: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 50+)

a
Data for each species are treated as a separate input subgroup
and therefore must end with an input group terminator.

INPUT GROUPS: 15a, 15b, 15c -- Line source parameters

Subgroup (15a)

Number of buoyant line sources
with variable location and emission
parameters (NLN2) No default ! NLN2 = 0 !

(If NLN2 > 0, ALL parameter data for
these sources are read from the file: LNEMARB.DAT)

Number of buoyant line sources (NLINES) No default ! NLINES = 0 !

Units used for line source
emissions below (ILNU) Default: 1 ! ILNU = 1 !

- 1 = g/s
- 2 = kg/hr
- 3 = lb/hr
- 4 = tons/yr
- 5 = Odour Unit * m**3/s (vol. flux of odour compound)
- 6 = Odour Unit * m**3/min
- 7 = metric tons/yr
- 8 = Bq/s (Bq = becquerel = disintegrations/s)
- 9 = GBq/yr

Number of source-species
combinations with variable
emissions scaling factors
provided below in (15c) (NSLN1) Default: 0 ! NSLN1 = 0 !

Maximum number of segments used to model
each line (MXNSEG) Default: 7 ! MXNSEG = 7 !

The following variables are required only if NLINES > 0. They are
used in the buoyant line source plume rise calculations.

Number of distances at which Default: 6 ! NLRISE = 6 !

transitional rise is computed

Average building length (XL) No default ! XL = .0 !
(in meters)

Average building height (HBL) No default ! HBL = .0 !
(in meters)

Average building width (WBL) No default ! WBL = .0 !
(in meters)

Average line source width (WML) No default ! WML = .0 !
(in meters)

Average separation between buildings (DXL) No default ! DXL = .0 !
(in meters)

Average buoyancy parameter (FPRIMEL) No default ! FPRIMEL = .0 !
(in m**4/s**3)

!END!

Subgroup (15b)

BUOYANT LINE SOURCE: CONSTANT DATA

| Source No. | Beg. X Coordinate (km) | Beg. Y Coordinate (km) | End. X Coordinate (km) | End. Y Coordinate (km) | a | | |
|------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| | | | | | Release Height (m) | Base Elevation (m) | Emission Rates |
| ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |

a
Data for each source are treated as a separate input subgroup and therefore must end with an input group terminator.

b
An emission rate must be entered for every pollutant modeled. Enter emission rate of zero for secondary pollutants that are modeled, but not emitted. Units are specified by ILNTU (e.g. 1 for g/s).

Subgroup (15c)

a
BUOYANT LINE SOURCE: VARIABLE EMISSIONS DATA

Use this subgroup to describe temporal variations in the emission rates given in 15b. Factors entered multiply the rates in 15b. Skip sources here that have constant emissions.

IVARY determines the type of variation, and is source-specific:

- (IVARY) Default: 0
- 0 = Constant
 - 1 = Diurnal cycle (24 scaling factors: hours 1-24)
 - 2 = Monthly cycle (12 scaling factors: months 1-12)
 - 3 = Hour & Season (4 groups of 24 hourly scaling factors, where first group is DEC-JAN-FEB)
 - 4 = Speed & Stab. (6 groups of 6 scaling factors, where first group is Stability Class A, and the speed classes have upper bounds (m/s) defined in Group 12)
 - 5 = Temperature (12 scaling factors, where temperature classes have upper bounds (C) of: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 50+)

a

Data for each species are treated as a separate input subgroup and therefore must end with an input group terminator.

INPUT GROUPS: 16a, 16b, 16c -- Volume source parameters

Subgroup (16a)

Number of volume sources with parameters provided in 16b,c (NVL1) No default ! NVL1 = 0 !

Units used for volume source emissions below in 16b (IVLU) Default: 1 ! IVLU = 1 !

- 1 = g/s
- 2 = kg/hr
- 3 = lb/hr
- 4 = tons/yr
- 5 = Odour Unit * m**3/s (vol. flux of odour compound)
- 6 = Odour Unit * m**3/min

Maestría en Ingeniería Ambiental-Aire

- 7 = metric tons/yr
- 8 = Bq/s (Bq = becquerel = disintegrations/s)
- 9 = GBq/yr

Number of source-species combinations with variable emissions scaling factors provided below in (16c) (NSVL1) Default: 0 ! NSVL1 = 0 !

Number of volume sources with variable location and emission parameters (NVL2) No default ! NVL2 = 0 !

(If NVL2 > 0, ALL parameter data for these sources are read from the VOLEMARB.DAT file(s))

!END!

 Subgroup (16b)

a

VOLUME SOURCE: CONSTANT DATA

| X | Y | Effect. | Base | Initial | Initial | Emission | Rates |
|------------|------------|---------|-----------|---------|---------|----------|-------|
| Coordinate | Coordinate | Height | Elevation | Sigma y | Sigma z | | |
| (km) | (km) | (m) | (m) | (m) | (m) | | |
| ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |

 a
 Data for each source are treated as a separate input subgroup and therefore must end with an input group terminator.

b
 An emission rate must be entered for every pollutant modeled. Enter emission rate of zero for secondary pollutants that are modeled, but not emitted. Units are specified by IVLU (e.g. 1 for g/s).

 Subgroup (16c)

a

VOLUME SOURCE: VARIABLE EMISSIONS DATA

Use this subgroup to describe temporal variations in the emission rates given in 16b. Factors entered multiply the rates in 16b.

Skip sources here that have constant emissions. For more elaborate variation in source parameters, use VOLEMARB.DAT and NVL2 > 0.

IVARY determines the type of variation, and is source-specific:

- (IVARY) Default: 0
- 0 = Constant
 - 1 = Diurnal cycle (24 scaling factors: hours 1-24)
 - 2 = Monthly cycle (12 scaling factors: months 1-12)
 - 3 = Hour & Season (4 groups of 24 hourly scaling factors, where first group is DEC-JAN-FEB)
 - 4 = Speed & Stab. (6 groups of 6 scaling factors, where first group is Stability Class A, and the speed classes have upper bounds (m/s) defined in Group 12)
 - 5 = Temperature (12 scaling factors, where temperature classes have upper bounds (C) of: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 50+)

a
Data for each species are treated as a separate input subgroup and therefore must end with an input group terminator.

INPUT GROUPS: 17a & 17b -- Non-gridded (discrete) receptor information

Subgroup (17a)

Number of non-gridded receptors (NREC) No default ! NREC = 0 !

!END!

Subgroup (17b)

a
NON-GRIDDED (DISCRETE) RECEPTOR DATA

| Receptor No. | X Coordinate (km) | Y Coordinate (km) | Ground Coordinate (m) | Height Elevation Above Ground (m) |
|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|---|
| ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |

a

Data for each receptor are treated as a separate input subgroup and therefore must end with an input group terminator.

b

Receptor height above ground is optional. If no value is entered, the receptor is placed on the ground.