



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química

**ESTUDIO DE LA TENDENCIA DE LOS CONTAMINANTES CRITERIO  
EN ALGUNAS CIUDADES DE LA ZONA DEL BAJÍO MEDIANTE EL  
MODELO NUMERICO HYSPLIT.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el  
grado de:

Maestro en Ciencias Ambientales

Presenta

Q. Esther Castro Galván

Dirigido por

M. en C. Gustavo Pedraza Aboytes

Querétaro, Qro. Diciembre del 2015



Facultad de Química  
Maestría en Ciencias Ambientales

**ESTUDIO DE LA TENDENCIA DE LOS CONTAMINANTES CRITERIO EN ALGUNAS CIUDADES DE LA ZONA DEL BAJÍO MEDIANTE EL MODELO NUMERICO HYSPLIT.**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias Ambientales

**Presenta:**

Q. Esther Castro Galván

**Dirigido por:**

M. en C. Gustavo Pedraza Aboytes

**SINODALES:**

M. en C. Gustavo Pedraza Aboytes  
Presidente

M. en C. María Eugenia Ortega Morín  
Secretario

M. en C. Rocío Arvizu Torres  
Vocal

Dra. Maricela Gonzalez Leal  
Suplente

Dra. Rocío García Martínez  
Suplente

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

M.S.P Sergio Pacheco Hernández  
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Querétaro  
Diciembre del 2015  
México



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química  
Maestría en Ciencias Ambientales

**ESTUDIO DE LA TENDENCIA DE LOS CONTAMINANTES CRITERIO EN ALGUNAS CIUDADES DE LA ZONA DEL BAJÍO MEDIANTE EL MODELO NUMERICO HYSPLIT.**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias Ambientales

**Presenta:**

Q. Esther Castro Galván

**Dirigido por:**

M. en C. Gustavo Pedraza Aboytes

**SINODALES:**

M. en C. Gustavo Pedraza Aboytes  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

M. en C. María Eugenia Ortega Morín  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

M. en C. Rocío Arvizu Torres  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dra. Maricela Gonzalez Leal  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dra. Rocío García Martínez  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
M.S.P Sergio Pacheco Hernández  
Director de la Facultad

\_\_\_\_\_  
Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Querétaro  
Diciembre del 2015  
México

## **Agradecimientos**

Se agradece al NOAA *Air Resources Laboratory* (ARL) por proporcionar a la comunidad científica las facilidades para utilizar el modelo de transporte y dispersión HYSPLIT a través de su sitio web (<http://www.ready.noaa.gov>) que fue usado en este trabajo y cuyos mapas de transporte y dispersión generados con el modelo se presentan.

Mi más sincero agradecimiento al Maestro Gustavo Pedraza Aboytes por su apoyo, disponibilidad y por la gran paciencia que tuvo durante todo el proceso, así como a la Dra. Maricela Gonzalez Leal, la M. en C. María Eugenia Ortega Morín, la M. en C. Rocío Arvizu Torres y la Dra. Rocío García Martínez.

Con todo cariño a mi esposo y compañero de vida, Ismael Castelazo, que siempre me ha apoyado de forma incondicional en todas las aventuras que he emprendido.

A mis padres, Turiano Castro y Teresa Galván *In memoriam*.

## RESUMEN

El modelo HYSPLIT permite tener aproximaciones de los patrones de dispersión y difusión de los contaminantes atmosféricos. El modelo permitió evaluar los patrones de masas de aire de las ciudades de Salamanca y Querétaro determinando las trayectorias de los contaminantes. Las difusiones analizadas para SO<sub>2</sub> en 1999 de Salamanca y en el 2004 para Querétaro de NO<sub>2</sub> permitieron conocer que las masas de aire de Salamanca van del sureste al noreste y de Querétaro del oeste hacia el noreste por lo que en teoría podrían en un momento interceptarse. La dispersión permite ver que aun a altitudes de 3000 - 4000 m se encuentran contaminantes en la atmosfera. El modelo es una herramienta útil y de fácil acceso para recrear situaciones de contaminación anteriores y evaluar cómo migran los contaminantes.

Palabras clave: contaminantes criterio, modelos numéricos, HYSPLIT.

## **ABSTRACT**

The HYSPLIT model is useful to obtain estimates of atmospheric patterns of dispersion and diffusion of contaminants. The model allowed to assess patterns of masses of air in the cities of Salamanca and Queretaro, determining trajectories of pollutants. Broadcasts analyzed for SO<sub>2</sub> in 1999 of Salamanca and in 2004 for Queretaro of NO<sub>2</sub> allowed to determine that Salamanca air masses flow from the Southeast to the Northeast and in Querétaro from the West to the Northeast so in theory the contaminants could meet at a certain point. The dispersion shows that even at altitudes of 3000 - 4000 m pollutants can be found in the atmosphere. The model is a useful and user-friendly tool to recreate previous pollution situations and to evaluate how contaminants migrate.

Key words: pollutant criteria, numerical models, HYSPLIT.

## Contenido

Índice de Cuadros .....	8
Índice de figuras .....	10
1.0 Introducción .....	14
2.0 Antecedentes.....	17
2.1 Teorías de difusión atmosférica .....	17
2.2 Métodos de estimación de contaminantes .....	17
2.3 Estimación de la dispersión de contaminantes mediante modelos .....	18
2.4 Modelo la Difusión turbulenta .....	22
2.5 Distribución <i>Gaussiana</i> o Normal.....	23
2.6 Modelos de análisis multivariado .....	27
2.7 Modelos estadísticos.....	29
2. 8 Modelos numéricos .....	30
2.8.1 AERMODE.....	31
2.8.2 MM5.....	32
2.9 HYSPLIT .....	32
2.10 Contaminantes atmosféricos .....	40
2.10.1 Descripción y establecimiento de los contaminantes criterio.....	40
2.11 Efectos en la salud .....	41
2.12 Partículas .....	45
2.13 Control atmosférico ambiental y programas de monitoreo .....	51
2.14 Normas nacionales.....	54
2.14.1 Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) .....	57
2.15 Factores que influyen en el incremento de la contaminación atmosférica .....	61
2.15.1 Química atmosférica .....	61

2.15.2 Influencia de las condiciones ambientales en la tendencia de dispersión de las partículas.....	62
2.15.3 Viento.....	63
2.15.4 Temperatura y humedad relativa.....	65
2.15.5 Perfil de la velocidad del viento.....	68
2.15.6 Efecto de la isla calórica.....	68
2.15.7 Radiación solar.....	69
2.16 Contaminación atmosférica a nivel mundial.....	70
2.17 Situación actual en la región de El Bajío.....	72
2.17.1 Incremento en el parque vehicular de las ciudades del Bajío.....	78
3. Hipótesis y objetivos.....	85
3.1 Hipótesis.....	85
3.2 Objetivo general.....	85
3.3 Objetivos específicos.....	85
4.0 Metodología.....	86
4.1 Materiales y Métodos.....	86
4.2 Caso de estudio.....	86
4.3 Clima.....	87
4.4 Archivos de datos meteorológicos.....	87
4.5 Modelo HYSPLIT.....	89
4.6 Procedimiento.....	90
5.0 Resultados.....	93
5.1 Análisis de trayectorias para el 2009.....	93
5.2 Dispersión y difusión.....	99
5.2.1 Salamanca.....	99
5.2.2 Querétaro.....	108
6.0 Discusión de resultados.....	112
7.0 Referencias bibliográficas.....	114



## Índice de Cuadros

No.	Título	Página
1	Resumen de métodos de estimación de contaminantes atmosféricos, Luna Rangel, 2004.	18
2	Clasificación de los modelos atmosféricos de acuerdo con su escala espacial (Seinfeld y Pandis, 1998).	31
3	Estándares de calidad del aire ambiente establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), Estados Unidos y México, (Molina <i>et al.</i> , 2002).	41
4	Definiciones de los términos que describen a las partículas suspendidas en el aire (Wark y Warner, 1992).	47
5	SEMARNAT. INE. Segundo almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en seis ciudades mexicanas. México D.F., 2003.	49
6	Emisiones de contaminantes atmosféricos en los procesos de producción de hidrocarburos de Petróleos Mexicanos, 1999 a 2008. <a href="http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&amp;c=21385">http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&amp;c=21385</a>	50
7	Principales estaciones de monitoreo de la calidad del aire y contaminantes monitoreados por entidad federativa y ciudad, 2004.	53
8	Valores normados para los contaminantes de aire en México	55
9	Normas Oficiales Mexicanas para el control de contaminantes atmosféricos por fuentes fijas. Fuente INE 2007.	56
10	Determinación de las concentraciones diarias por contaminante ( <a href="http://www.inecc.gob.mx/calair-presentacion/556-calair-metodologia">http://www.inecc.gob.mx/calair-presentacion/556-calair-metodologia</a> )	58
11	Método de cálculo de las concentraciones diarias por contaminante para evaluar su conformidad con los límites máximos de las NOM correspondientes. ( <a href="http://www.inecc.gob.mx/calair-presentacion/556-">http://www.inecc.gob.mx/calair-presentacion/556-</a>	59

calaire-metodologia).

12	Posición de Querétaro a nivel nacional de acuerdo al indicador trimestral de la actividad económica estatal ITAEE.	74
13	Número de estaciones de servicio en diferentes ciudades de la región de El Bajío.	81
14	Productos petroquímicos vendidos por PEMEX.	83
15	Cuentas nacionales por tipo de transporte en % miles de pesos durante 2003-2009.Comparación entre estos tres tipos de transporte. INEGI, Banco de Información económica.	84
16	Datos de latitud y longitud para diferentes ciudades del Bajío, INE 2011.	89
17	Identificación de estaciones de monitoreo en Salamanca.	93
18	Concentración de SO <sub>2</sub> en las estaciones de monitoreo de Salamanca para los días 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, promedios de 24h.	100

## Índice de figuras

No.	Título	Página
1	Distribuciones de concentración y límites de la pluma a diferentes tiempos promedio. Modelo Gaussiano de dispersión (Wark y Warner, 1985), (Seinfeld, 1985), (Buitron, 2003), (Zhao <i>et al.</i> ,2007).	24
2	Incidencia de neumonía y bronconeumonía 1978-2008. INEGI 2015.	45
3	Emisiones promedio anuales de PST en los procesos de producción de hidrocarburos de Petróleos Mexicanos, 1999 a 2008. PEMEX. Informe Desarrollo Sustentable.	49
4	Emisión nacional de contaminantes por entidad federativa en el año de 1999. Fuente: SEMARNAT, INE. Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999. México. 2006.	52
5	Equilibrios de las fuerzas en las regiones de alta y baja presión: $F_p$ , fuerza de la presión, $F_f$ , fuerza fricción, $F_C$ fuerza de Coriolis, $a_c$ aceleración centrípeta, $V$ , velocidad del viento (Wark y Warner, 1998).	64
6	Efecto de las fuerzas de fricción en la capa límite planetaria, sobre la dirección del viento a diversas alturas (Wark y Warner, 1998).	65
7	Variación con el ángulo de incidencia del espesor de la atmósfera atravesado por la radiación solar.	69
8	Clasificación de los problemas de contaminación en países en desarrollo de acuerdo al estudio <i>Global Burden of Diseases</i> .	70
9	Proyección de partículas PM10 en los años 2020 y 2050 para algunas regiones y países del mundo.	71

10	Valores de exportaciones en miles de millones de dólares (mmd) en el 2013. Posición anual nacional.	76
11	Densidad de población a nivel Nacional 200-2005. INEGI 2010.	77
12	Generación de residuos urbanos 1998-2008. INEGI 2010. <a href="http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biinegi/">http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biinegi/</a>	78
13	Automóviles registrados en los estados de Querétaro, Aguascalientes, Guanajuato y Jalisco en el periodo 1980-2014.	79
14	Camiones de pasajeros y motocicletas registradas en el estado de Querétaro en el periodo 1980-2012.	80
15	Número de vuelos en diferentes ciudades del Bajío 1994-2009	80
16	Tendencia de aumento en el número de estaciones de servicio en el periodo 1980-2012.	82
17	Bases de datos disponibles para el modelo HYSPLIT.	88
18	Datos solicitados por el modelo HYSPLIT para modelar una dispersión	91
19	Datos solicitados por el modelo HYSPLIT para modelar una dispersión	92
20	Análisis de trayectorias 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la ciudad de Querétaro	94
21	Análisis de trayectorias 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la ciudad de León.	95
22	Análisis de trayectorias 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la ciudad de Celaya.	96
23	Análisis de trayectorias 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la refinería de Salamanca Ing. Antonio M. Amor.	97
24	Análisis de trayectorias 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la ciudad de la refinería de Salamanca Ing. Antonio M. Amor, la ciudad de Querétaro y la refinería de Tula Hidalgo.	98
25	Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la	99

	ciudad de Salamanca. Modelación de una fuente de 50 m de altura.	
26	Monitoreo de concentración en tiempo casi real de SO <sub>2</sub> los días 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, para la ciudad de Salamanca. Promedio de 24h.	101
27	PM <sub>10</sub> µg/m <sup>3</sup> promedios trimestrales 2009 de las tres estaciones de Salamanca	101
28	Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 0h.	102
29	Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 4h.	103
30	Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 8h.	103
31	Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 12h.	104
32	Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 16h.	104
33	Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 20h.	105
34	Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca a 100 m, 10 de enero del 2009 a las 20h.	105
35	Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca a 100 m, 10 de enero del 2009 a las 20h.	107
36	Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 0 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.	108
37	Análisis de dispersión de concentración de contaminantes	109

	gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 2 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.	
38	Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 4 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.	110
39	Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 6 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.	110
40	Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 18 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.	111
41	Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 22 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.	111

## 1.0 Introducción

Debido a la necesidad de identificar fuentes de contaminantes y de proporcionar predicciones más exactas de dispersión de las plumas (término empleado para designar las masas de aire) de contaminantes a grandes y pequeñas distancias de las fuentes, en los últimos años se ha incrementado el interés de emplear modelos de trayectorias y de dispersión. El análisis y la descripción del transporte de las masas de aire y de los contaminantes atmosféricos en base a modelos de trayectorias atmosféricas ha resultado de gran utilidad cuando se estudia la relación fuente-receptor (Fink y Knippertz, 2003).

Por ejemplo uno de los principales problemas cuando se modelan trayectorias atmosféricas es la descripción correcta de los mecanismos por los cuáles los aerosoles son transportados en la atmósfera, estos mecanismos son muy complejos ya que los aerosoles experimentan procesos físicos y químicos durante su movimiento. Uno de los mecanismos que tiene lugar durante el transporte es la difusión, el cual ocurre cuando la concentración de masa ( $\text{g/m}^3$ ) y el número de partículas ( $\text{partículas/m}^3$ ) es mayor de un lado del límite (imaginario) que del otro. La difusión de las partículas difiere en los diferentes puntos del espacio, por lo cual existen diferentes modelos para explicarla.

Basándose en aproximaciones teóricas de la pluma, los modelos se clasifican en tres categorías: Eulerianos, Lagrangianos y Estadísticos de partículas. El modelo Euleriano trata a la pluma como si estuviese contenida en un volumen o célula de cuadrícula suponiendo que las partículas se mezclan en ella uniformemente. En un principio su concentración está definida y cuando inicia su movimiento ésta en función del espacio. El modelo Lagrangiano supone que las partículas se mueven a través del espacio y del tiempo y que la pluma es un conjunto de partículas individuales que viajan a lo largo de la trayectoria. El modelo estadístico de partículas considera a la pluma como una serie de partículas que se mueven individual y aleatoriamente a lo largo de la trayectoria.

El modelo HYSPLIT 4 (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories*) fue desarrollado en colaboración del *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* y el *Australia's Bureau of Meteorology* (NOAA, 2011). Es un modelo que además de calcular trayectorias de masas de aire puede recrear y calcular escenarios de deposición y por ende la concentración de partículas, mientras que las masas de aire se desplazan. Es considerado híbrido ya que utiliza una ecuación Lagrangiana para los marcos de referencia móviles y una ecuación Euleriana para la malla tridimensional que es considerada como marco de referencia fijo. Los cálculos de advección y difusión se realizan en el marco Lagrangiano seguido del transporte de la parcela de aire, donde las concentraciones de los contaminantes se calculan en una malla fija (Daxler, 98; [http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_info.php](http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php), 2015).

Para la realización de los diferentes cálculos utiliza como datos de entrada información meteorológica proveniente de diferentes bases de datos (EDAS, GDAS, FNL, NAMS, ERA entre otros), contenidos en una cuadrícula fija (datos para cada latitud y longitud) a intervalos de tiempo regulares ya que estos internamente son interpolados a subcuadrículas para reducir los requisitos de memoria e incrementar la rapidez de los cálculos.

- Los datos CDC son generados a través del proyecto “NCEP/NCAR Reanalysis” a cargo del *National Center of Environmental Prediction (NCEP, EE. UU.)* y el *National Center for Atmospheric Research (NCAR, EE. UU.)*, los datos se obtienen a partir del análisis de series históricas de datos y son proporcionados en una rejilla de  $2.5^\circ$  en latitud y longitud que cubre el área delimitada por  $90^\circ\text{N} - 90^\circ\text{S}$ ,  $0^\circ\text{E} - 357^\circ\text{E}$ , cada 6 horas para los siguientes niveles de presión: 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 y 10 hPa.
- Los datos GDAS (*Global Data Analysis System*) cuenta con datos disponibles desde el año 1997, cubre gran parte de Norteamérica y los datos se presenta cada 3 horas en archivos semanales con una resolución de  $1.5^\circ$  de latitud y longitud.



El objetivo de este trabajo es el de establecer la tendencia de dispersión de los contaminantes criterio en Salamanca y Querétaro, como ciudades representativas de la región del Bajío, a través del uso del modelo numérico HYSPLIT. Los resultados obtenidos proporcionaron información de cómo los contaminantes atmosféricos se dispersan en lugares donde no se han llevado a cabo las mediciones o donde los datos son escasos, también se pudo reproducir para el 2009 la dispersión de los días más contaminados de diciembre.

## 2.0 Antecedentes

### 2.1 Teorías de difusión atmosférica

La difusión de los contaminantes atmosféricos se ve afectada por diferentes factores que se correlacionan entre sí, éstos pueden ser las características físicas y químicas de las fuentes emisoras, las condiciones meteorológicas, la ubicación de las fuentes de emisión, ya sean fijas o móviles, la situación geográfica de la zona de emisión y la dirección del viento básicamente. Para hacer un estudio de la determinación de difusión se han desarrollado diferentes métodos matemáticos pero ninguno de ellos abarca completamente a todos los factores mencionados, sin embargo se pueden aplicar a diferentes situaciones y funcionar de manera correcta en la descripción de la difusión o dispersión de los contaminantes. Estos modelos pueden validarse con mediciones en tiempo real y comparar la predicción del modelo (EPA, 2004).

En el caso de las partículas hay que tomar en cuenta el tamaño de las mismas para poder utilizar los modelos matemáticas ya que si tienen diámetros internos  $< 20 \mu\text{m}$  o menores tienen una velocidad de sedimentación tan baja que básicamente se mueven con el gas en el que son emitidas y transportadas. Así los modelos desarrollados para evaluar la dispersión de los gases puede utilizarse con este tipo de partículas no así para aquellas con diámetros internos grandes ya que presentan una velocidad de sedimentación significativa, lo que implica una alta concentración por ejemplo a nivel de suelo cerca de una chimenea (Buitrago, 2003).

### 2.2 Métodos de estimación de contaminantes

Para estimar la tendencia de dispersión de los contaminantes atmosféricos es necesario contar con información de la concentración o fracción masa de los contaminantes emitidos y de las condiciones climatológicas a las cuales están sometidos. Dada la complejidad de las estimaciones se han desarrollado diferentes métodos de estimación de la dispersión y difusión de los contaminantes que pueden

ser en términos generales directos e indirectos. Las mediciones directas son costosas debido a los instrumentos de medición y al número de estaciones de monitoreo necesarias por lo que los métodos indirectos se utilizan en general con mayor frecuencia. Por otro lado el uso de modelos matemáticos se ha intensificado y mejorado debido a los avances tecnológicos pues es posible manejar una gran cantidad de datos. Estos últimos utilizan diferentes fuentes de información como datos históricos, balance de materiales, factores de emisión etc., cuadro 1.

Cuadro1. Resumen de métodos de estimación de contaminantes atmosféricos, Luna Rangel, 2004.

	Método de estimación
1	Medición directa o monitoreo
2	Factores de emisión
3	Estimación mediante datos históricos
4	Balance de materiales
5	Cálculos de ingeniería
6	Modelos matemáticos de emisión

### 2.3 Estimación de la dispersión de contaminantes mediante modelos

Los modelos describen y predicen mediante ecuaciones o expresiones matemáticas la contaminación o la dispersión de los contaminantes, dependiendo de las o la ecuación matemática que utilizan, proporcionan información de la concentración de contaminantes en diferentes lugares hasta donde no se han llevado a cabo las mediciones. Por lo que estos modelos se pueden usar para predecir el comportamiento de los contaminantes en una región dada. Sin embargo, su validación sólo puede llevarse a cabo con mediciones en tiempo real (Hertel *et al.*, 2007). Por ejemplo las directivas de la Unión Europea aceptan el uso de modelos como apoyo a las mediciones en campo donde no hay datos disponibles, para asegurar la calidad del aire. La Directiva 96/62/CE, 1996 menciona:

“La calidad del aire ambiente se controlará en todo el territorio de los Estados miembros. Esta evaluación se efectuará por distintos métodos: bien por medición,

bien por modelización matemática, bien por una combinación de ambos métodos, o bien por cálculo. Esta evaluación será obligatoria en las aglomeraciones de más de 250, 000 habitantes o en las zonas donde las concentraciones sean cercanas a los valores límite”

Hay diferentes y múltiples estudios de contaminación atmosférica a través de modelos numéricos cuyo principal objetivo es el de evaluar la trayectoria de los contaminantes o el de determinar su dispersión ya sea de un evento pasado como el caso de una tormenta de arena que afecta el número de partículas en el ambiente. Wang et al., (2011), utilizó el modelo HYSPLIT para simular las tormentas de arena ocurridas en el año 2008, las simulaciones se comprobaron con las trayectorias que se midieron en estaciones de monitoreo en China y España. Esta simulación permite tratar de evaluar eventos que pueden presentarse en otras regiones donde es menos evidente que ocurran tormentas de este tipo aún con las limitaciones que presentan los modelos de estimación alta o baja. En este mismo sentido y con la misma aplicación Zoldjoodi et al., (2013) usó HYSPLIT para evaluar la trayectoria de las tormentas de arena en el 2010 en Irán.

Otro ejemplo de la utilidad de la modelación es el efectuado por Alam et. al, (2011), que uso también el modelo HYSPLIT para reconstruir cómo se movían las masas de aire que afectaron las trayectorias de los aerosoles en Pakistan, de acuerdo a los datos obtenidos de los sensores de los satélites como el *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) o el *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) entre otros. Los datos que tienen los sensores de estos satélites son para diferentes años, TOMS (1997-2001), MODIS (2002-2008). La capacidad de los instrumentos con los que se cuenta, las computadoras que cada vez almacenan más datos hace que los modelos numéricos se hagan más sofisticados porque pueden manejar más datos y variables que permiten con mejor precisión entender los fenómenos de transporte y cómo afecta en ellos el clima.

La aplicación de los modelos es muy diversa ya que la atmosfera es muy activa y existen mezclas de contaminantes complejas sobre todo cuando hay alguna

emergencia meteorológica, como una explosión volcánica o la salida de material radiactivo como en Chernobyl (1986) o en Fukushima (2011). Por ejemplo, Chen et al., (2013) usó HYSPLIT con los modelos MM5 y el *Global Data Assimilation System* (GDAS), para simulaciones meteorológicas, y con varios escenarios evaluó la distribución de metales en aerosoles atmosféricos que provenían de un complejo industrial al sur de España. Encontró que la estimación del modelo HYSPLIT era consistente con la distribución temporal observada para diferentes metales en la atmosfera que se midió colectando partículas suspendidas totales (PST) e identificando los metales.

En Dinamarca Mahura et al., (2013) realizó un estudio utilizando HYSPLIT para las trayectorias y para la dispersión los modelos *High Resolution Limited Area Model* (HIRLAM) y el *Comprehensive Air Quality Model with Extensions* (CAMx). Evaluó el patrón de transporte atmosférico para la variación espacio-temporal del ozono en épocas de alta y baja concentración. Los estudios fueron para el periodo de 1990-2004. Estos estudios muestran como los modelos pueden ayudar a explicar y entender las variaciones de los contaminantes *a poste ori*, identificar sitios donde debido a la topografía y las condiciones climatológicas son susceptibles de acumulación de contaminantes. Estos estudios mostraron como el ozono, O<sub>3</sub>, en los episodios de alta concentración (> 180 µg/m<sup>3</sup>) puede viajar a través del continente llegando hasta Rusia y los países escandinavos. Es importante señalar que la precisión de las trayectorias puede ser del orden del 20% o mayores en algunos casos.

Los contaminantes más estudiados por su efecto en la salud humana son el O<sub>3</sub> y las partículas (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), sin embargo otros contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) contribuyen a que aumente o disminuya el O<sub>3</sub>. El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es un contaminante criterio que se estudia debido a su capacidad de contribuir a la producción de lluvia ácida y a los efectos adversos en la salud, pero en menor grado. También es considerado un marcador de la cantidad de combustibles fósiles que se usan en las ciudades. La India es uno de los países en desarrollo que tiene una población grande y problemas de contaminación altos. La evaluación de cómo

afectan la altitud y las zonas áridas a la trayectoria y dispersión son relevantes, Francis (2012), usando el modelo *Goddard Earth Observing System*, GEOS-Chem generó un perfil de trayectoria del SO<sub>2</sub> y lo correlacionó con los datos obtenidos por HYSPLIT.

Existen otras aproximaciones que pueden usarse para estudios de predicción de contaminación atmosférica por ejemplo el método *Multiple Linear Regression* (MRL) usa el método de mínimos cuadrados y con datos de mediciones se puede obtener una curva ajustada y determinar qué tan bien se ajustan los datos a través del cálculo de residuales y del coeficiente R<sup>2</sup>, Awang et. al, (2015) usó este modelo y funcionó para evaluaciones de O<sub>3</sub> durante las horas del día.

Otro ejemplo es el uso de métodos estadísticos es el estudio de Ozel et, al (2015). Aquí el investigador predijo la contaminación de PM<sub>10</sub> utilizando una distribución estadística gamma y de Poisson. Supusieron que el número de picos de PM<sub>10</sub> seguían una distribución de Poisson y la concentración una distribución gamma, para ello usaron los datos de monitoreo ambiental del ministerio de Turquía. Así mismo, calcularon la probabilidad de tener picos de concentración de O<sub>3</sub> que excedía la normatividad.

La aplicabilidad de los modelos va enfocada no sólo a entender fenómenos pasados y presentes sino a obtener información que ayude a predecir la efectividad de los programas de disminución de contaminantes; este es el caso del estudio que realizó Monteiro et al., (2015). Evaluaron que los programas de control ambiental implementados en Portugal serán efectivos hasta el año 2020 ya que la reducción de contaminantes será en su mayoría efectiva excepto para el O<sub>3</sub>.

Generalmente los modelos usan la suposición de que los contaminantes tienen una distribución Gaussiana por eso todas las modificaciones o creaciones de modelos se basan en esta distribución, agregan variables o cambian herramientas matemáticas para la solución de las ecuaciones diferenciales que describen los fenómenos y las variables que lo afectan, por ejemplo Abdel-Wahab et al., (2013) utilizando la ecuación del modelo Gaussiano estimó los parámetros de dispersión de la pluma en

dirección vertical y horizontal utilizando la ley de energía, la velocidad del viento y la difusividad de remolino y sus modelo funcionó al compararlo con otras aproximaciones Gaussianas.

## 2.4 Modelo la Difusión turbulenta

Este es uno de los modelos más completos e implica el concepto llamado “longitud de mezclado”. A continuación se presenta la ecuación simplificada de este modelo

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_{xx} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) + K_{yy} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + K_{zz} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Ecuación de difusión de Fick, donde: C= concentración, t= tiempo y  $K_{ij}$ = coeficientes de difusión turbulenta en los ejes x, y y z.

Como el cálculo es difícil de aplicar se hacen algunas suposiciones:

1. La concentración del contaminante emana de una fuente puntual continua
2. El proceso es de estado estacionario por lo que  $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$
3. La principal dirección de transporte debida al viento se considera en el eje de las x.
4. La velocidad del viento u, es constante en cualquier punto del sistema de coordenadas x, y y z.
5. El transporte del contaminante debido al tiempo en la dirección x predomina sobre la difusión descendente,

$$u \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) \gg \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)$$

Así la ecuación (1) se puede escribir como:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = K_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2)$$

La solución aproximada para esta ecuación dada por Lowry y Boyle se presenta en la ecuación (3)

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi r^{1/2}} \exp\left[\frac{-u}{4x} \left(\frac{y^2}{K_{yy}} + \frac{z^2}{K_{zz}}\right)\right] \quad (3)$$

Donde  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$

Sin embargo este modelo presenta grandes desviaciones cuando se aplican los resultados de mediciones experimentales. La ecuación a nivel del suelo se reduce a:

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{4\pi x (K_{yy} K_{zz})^{1/2}} \quad (4)$$

La solución aproximada de la ecuación teórica simplificada indica que el valor de C a nivel del suelo y a lo largo de la línea del centro de la pluma es inversamente proporcional a x e independiente de la velocidad del viento, u.

## 2.5 Distribución *Gaussiana* o Normal

Son posibles varios enfoques para resolver una ecuación que describa la difusión de los contaminantes en la atmósfera proveniente de una fuente de emisión fija, se necesitan un número de simplificaciones o suposiciones con el propósito de obtener una solución adecuada. Sin embargo, todas las teorías estudiadas tienden a llegar a la misma función de distribución para la concentración del contaminante, esto es una función de distribución *gaussiana*, figura1.



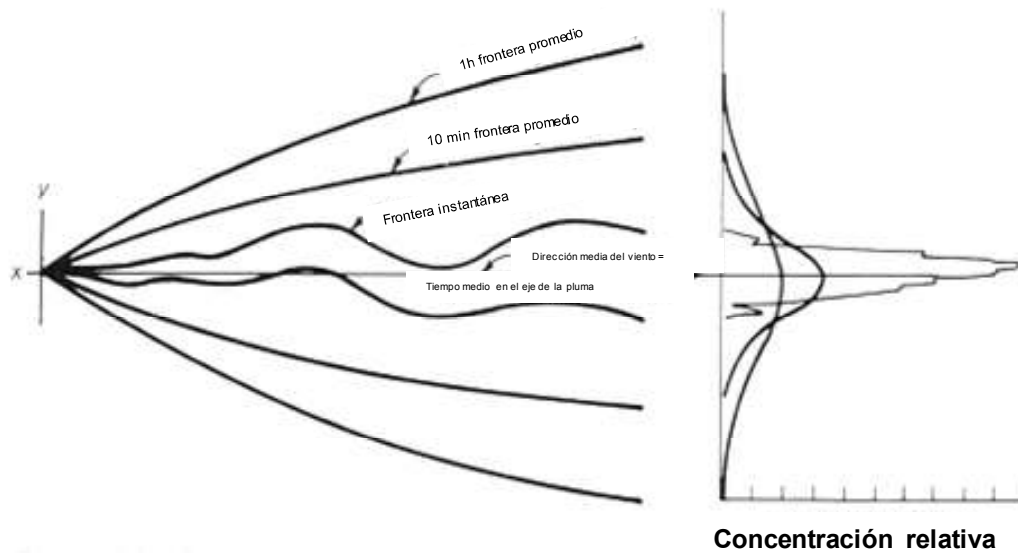


Figura 1. Distribuciones de concentración y límites de la pluma a diferentes tiempos promedio. Modelo Gaussiano de dispersión (Wark y Warner, 1985), (Seinfeld, 1985), (Buitron, 2003), (Zhao *et al.*,2007).

La magnitud  $\sigma$  se conoce como la desviación normal. El valor de  $f(x)$  es la altura en el eje horizontal. El valor de  $\mu$  establece la situación del valor máximo de  $f(x)$  sobre el eje  $x$ , y la curva es simétrica con respecto a la posición de  $\mu$ , ecuación 5.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

Cuando  $\mu=0$ , la curva es simétrica alrededor del eje  $x=0$ . La desviación normal,  $\sigma$  es una medida de la posición del punto de inflexión a cada lado de la curva. Cuando  $\sigma$  aumenta el valor máximo de  $f(x)$  disminuye pero  $f(x)$  mantiene un valor significativo sobre un rango más amplio más alrededor del eje mayor, ecuación 6.

$$C = Kx^{-1} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_x}\right)\frac{u}{4x}\right] \quad (6)$$

Para una fuente puntual individual, la expresión apropiada para K es:

$$K = \frac{Q}{2\pi(D_y D_z)^{1/2}} \quad (7)$$

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi x(D_y D_z)^{1/2}} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z}\right)\frac{u}{4x}\right] \quad (8)$$

Para una fuente a nivel de suelo la máxima concentración en las direcciones y y z deberá tener lugar a lo largo de la línea central a nivel del suelo, los valores de  $\mu_y$  y  $\mu_z$  en la ecuación 9 serán cero para esta situación física (Seinfeld, 1985), (Wark y Warner, 1998). Por tanto la ecuación 8 se reduce a la forma:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (9)$$

Si consideramos;

$$\sigma_y^2 \equiv \frac{2D_y x}{u} \quad (10) \quad y$$

$$\sigma_z^2 \equiv \frac{2D_z x}{u} \quad (11)$$

Sustituyendo (9) y (10) en (8), se llega a la siguiente relación para la concentración favor del viento desde una fuente puntual a nivel de suelo:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \quad (12)$$

Si se reordena la ecuación (12) para que el lado izquierdo sea igual a  $\frac{Cu}{2Q}$ , entonces el lado derecho tendrá el formato idéntico de la ecuación (9), que es del tipo gaussiano doble. Las unidades de la concentración C, están determinadas por las unidades utilizadas al expresar las magnitudes Q, u,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ . Si se desea el valor de C en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Q (tasa de emisión) se deberá expresar en  $\mu\text{g}/\text{s}$ . Si **y** y **z**, se toman con un valor de cero, la ecuación (12) se reduce a:

$$C(x,0,0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \quad (13)$$

Cuando se habla de una chimenea con una altura efectiva H, se altera el término exponencial que contiene a  $z^2$ , en la ecuación (12). Se sustituye z en la ecuación (13) por (z-H). Esta no es una simple sustitución pues se altera la ecuación (6) al hacer la reevaluación completa se tiene que K tiene la mitad del valor que se encontró para la ecuación (7), así como el coeficiente situado delante de los términos exponenciales, El resultado para una fuente en un punto elevado de un contaminante, sin reflexión la expresión de C será:

$$C = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right]\right\} \quad (14)$$

La ecuación 14 es adecuada cuando se evalúa la concentración en la dirección del viento, hasta llegar a un punto en la dirección x, donde sea significativa la concentración a nivel de suelo ( $z=0$ ). En este punto habrá una reflexión apreciable de los contaminantes. La ecuación de concentración para una fuente elevada con reflexión es:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left[ \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right] \left\{ \exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (15)$$

Otra ecuación importante es la que considera la reflexión a nivel del terreno y considera la concentración a nivel de suelo. En este caso  $z=0$  y la ecuación (15) se reduce a:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right) \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (16)$$

Si se requiere la concentración a nivel del suelo y en la línea central, el último término exponencial será igual a la unidad por lo que:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (17)$$

#### Desviaciones

Los valores de  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ , están relacionadas con los coeficientes de difusión de masa de un gas a través de otros medios en las direcciones **y** y **z**. Las desviaciones horizontales y verticales  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ , son función de la posición **x** en la dirección del viento y de la estabilidad atmosférica. Varias mediciones experimentales en la atmósfera han llevado a una evaluación y correlación de los valores de  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ . Las mediciones más aceptadas son las hechas por Turner (Wark y Warner, 1985), y Pasquill (Seinfeld, 1985), y se encuentran en graficas que sirven de referencia para éstas mediciones. Así mismo Turner preparó una serie de condiciones de estabilidad atmosférica que son útiles para evaluar cuáles condiciones de estabilidad son las más adecuadas para las mediciones que se van a realizar.

#### 2.6 Modelos de análisis multivariado

Este tipo de modelos se han utilizado para relacionar la composición química de las partículas con la distribución de sus tamaños. Estos estudios se basan en suponer

que la concentración total del material particulado es la suma lineal de perfiles constantes de todas las fuentes de contribución (Ogulei et al., 2006).

Si se supone un perfil constante de emisión, implica tener la misma localización y el mismo tiempo de tránsito, lo que resultaría en una distribución estacionaria o casi estacionaria. Con esta suposición el número medido de concentraciones en el sitio receptor tendría una relación lineal en el número y la masa de las fuentes emisoras. Si la relación existe, puede ser útil y funcional combinar la distribución del tamaño con la composición química de las partículas utilizando un análisis multivariado para evaluar la relación entre la fuente receptora y la de emisión.

Cuando las partículas se emiten de una determinada fuente, el tamaño, el número y su composición son cambiantes respecto a diferentes procesos físico-químicos hasta que son removidos por el viento, por ejemplo. Con esto podría esperarse que la distribución del tamaño de la partícula permanezca constante a cierta distancia de la fuente. Por lo que las propiedades observadas de tamaño de distribución en el sitio receptor se pueden suponer iguales a las presentadas en la emisión y usarse para establecer una relación entre la distribución del tamaño de partícula y la composición química suponiendo un modelo lineal (Ogulei et al., 2006).

La ecuación general que describe este modelo es la siguiente:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (18)$$

Donde,

$x_{ij}$  = la concentración medida de las especies  $j$  en la muestra  $i$

$f_{kj}$  = la concentración de las especies  $j$  en el material emitido por la fuente  $k$ ,

$g_{ij}$  = es la contribución de la  $k$ ésima fuente para la  $i$ ésima muestra

$e_{ij}$  = es la porción de las mediciones que no siguen un ajuste lineal

El uso de este modelo depende de las incertidumbres estimadas para cada valores de datos (Kim *et al.*, 2004).

## 2.7 Modelos estadísticos

Función de probabilidad condicional (FPC) (Kim *et al.*, 2004). Este modelo analiza el impacto de la fuente fija variando la dirección del viento, usando las contribuciones de la fuente, estimadas con un modelo paramétrico acoplado con los valores de la dirección del viento y medidos en sitio. El FPC estima la probabilidad de que la contribución de una fuente dada para una dirección del viento exceda un criterio predeterminado de “inicio” o de “fondo”. La misma contribución diaria se asigna a cada hora del día para ajustar los datos del viento. El FPC se define a través de la siguiente ecuación:

$$FPC_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}} \quad (19)$$

Donde,

$m_{\Delta\theta}$  = Número de ocurrencias de un sector de viento  $\Delta\theta$  que excede el criterio de fondo,

$n_{\Delta\theta}$  = Número total de datos del mismo sector del viento

Los periodos de viento en calma ( $< 1 \text{ ms}^{-1}$ ) se excluyen debido al comportamiento isotrópico del viento.

## 2. 8 Modelos numéricos

Como ya se mencionó la difusión de los contaminantes atmosféricos se ve afectada por diferentes factores que se correlacionan entre sí, éstos pueden ser las características físicas y químicas de las fuentes emisoras, básicamente las condiciones meteorológicas, la ubicación de las fuentes de emisión, ya sean fijas o móviles, la situación geográfica de la zona de emisión y la dirección del viento. Para hacer un estudio de determinación de difusión se han desarrollado diferentes métodos matemáticos pero ninguno de ellos abarca completamente todos los factores mencionados y se pueden aplicar a diferentes situaciones y funcionar de manera correcta en la descripción de la difusión o dispersión de los contaminantes (EPA, 2004).

Clasificación de los modelos de acuerdo a escalas espaciales.

De acuerdo con las escalas espaciales a las que se aplican, los modelos numéricos (de predicción meteorológica) se pueden clasificar en tres grandes bloques: los modelos globales, los modelos regionales (o de mesoescala) y los modelos de microescala. Los primeros se encargan fundamentalmente de la predicción numérica del tiempo a escala planetaria, los modelos regionales son los que sirven para reproducir fenómenos de mesoescala y predecir el "tiempo local" y los modelos de microescala se diseñan para simular fenómenos turbulentos y superficiales de especial interés en la simulación de dispersión de contaminantes. En el cuadro 2 se presentan las características de los modelos en cuanto a su dominio típico y resolución. Algunos de los modelos numéricos más utilizados para la predicción de la dispersión de contaminantes y que son de acceso libre son: AERMOD, (EPA-454/B-03-001, September 2004), MM5, (Meso-scale Model) (*Pennsylvania State University / National Center for Atmospheric Research numerical*) y el HYSPLIT (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) del *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) y el Australia's Bureau of Meteorology.

Cuadro 2. Clasificación de los modelos atmosféricos de acuerdo con su escala espacial (Seinfeld y Pandis, 1998).

<b>Modelo</b>	<b>Dominio típico</b>	<b>Resolución típica</b>
Microescala	200 x 200 x 100 m	5 m
Mesoescala (urbano)	100 x 100 x 5 km	2 km
Regional	1000 x 1000 x 10 km	20 km
Sinóptico (continental)	3000 x 3000 x 20 km	80 km
Global	65,000 x 65,000 x 20 km	5° x 5°

El uso de métodos numéricos para simular la historia en el tiempo de la concentración de los contaminantes en el aire, se puede dividir en dos categorías, los modelos Eulerianos y los Lagrangianos. Los modelos Eulerianos resuelven la ecuación de advección-difusión en una malla fija y los Lagrangianos los componentes de advección y difusión se calculan de manera separada. En general los modelos Eulerianos se usan en escenarios de emisiones complejas y requieren solución en todos los puntos de la malla mientras que los Lagrangianos cuando se trata de emisiones simples de un solo punto restringida a pocos puntos en la malla. Los modelos Eulerianos requieren que las emisiones se definan en una escala comparable al modelo de simulación de la malla y los Lagrangianos pueden definir las emisiones a cualquier resolución.

### 2.8.1 AERMODE

Es un modelo estacionario de pluma Gaussiana desarrollado por la Agencia de Protección al Ambiente (*Environmental Protection Agency, EPA*) y la Sociedad de Meteorología (*American Meteorological Society, AMS*) ambas de los Estados Unidos. Este modelo contiene algoritmos que describen los procesos turbulentos de mezcla que ocurren en la capa límite del planeta para condiciones de capas estratificadas estables y convectivas, (Barbon y Gomes 2010). De acuerdo a Comorelli *et al.*, 2004 el avance más importante es el hecho de que se puede llevar a cabo la formulación de la dispersión de los contaminantes en la capa límite



convectiva. Consiste de dos pre-procesadores y un modelo de dispersión. El pre-procesador AERMET le proporciona al modelo AERMODE los datos meteorológicos necesarios para caracterizar la capa límite y el pre-procesador AERMAP caracteriza el terreno y genera redes de receptores para el modelo de dispersión (AERMODE). AERMET usa los datos meteorológicos y de superficie para calcular los parámetros de la capa límite (por ejemplo altura de mezclado, velocidad de fricción etc.).

### 2.8.2 MM5

Es uno de los modelos numéricos de predicción a corto plazo y es la quinta generación del llamado *Mesoscale Model*, proyecto de colaboración entre la *Pennsylvania State University (PSU)* y el *National Center for Atmospheric Research (NCAR)* de los Estados Unidos. Las características principales del modelo son la capacidad de anidamiento múltiple con una interacción en ambas direcciones entre los dominios, así el estudio se puede realizar a distintas escalas espaciales y con una alta resolución. El modelo se puede usar para representar fenómenos a pocos km, tiene capacidad de trabajar en cuatro dimensiones, puede asimilar datos convencionales y de satélite, durante la predicción es capaz de incorporar esquemas de parametrización más realistas de los procesos físicos relacionados con la radiación atmosférica, la microfísica de las nubes y la precipitación, flujos de energía así como el momento sobre la superficie terrestre.

### 2.9 HYSPLIT

El modelo HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories*) fue desarrollado en colaboración del *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* y el *Australia's Bureau of Meteorology* (NOAA, 2011). Se usa principalmente para responder a emergencias atmosféricas que se encuentran en el rango de emisiones radiológicas accidentales o alguna operación aérea peligrosa de erupciones volcánicas.

Es un modelo global que modela trayectorias simples de parcelas de aire y realiza simulaciones complejas de dispersión y deposición. Es considerado híbrido ya que utiliza una ecuación Lagrangiana para los marcos de referencia móviles y una ecuación Euleriana para la malla tridimensional que es considerada como marco de referencia fijo.

Los cálculos de advección y difusión se realizan en el marco Lagrangiano seguido del transporte de la parcela de aire, donde las concentraciones de los contaminantes se calculan en una malla fija.

El modelo ha evolucionado desde su origen (Daxler y Taylor 1982) al inicio sólo usaba los datos de una sonda y la dispersión se suponía consistente con un mezclado uniforme durante el día sin mezcla en la noche.

En la última versión, la cuarta, los algoritmos de advección se actualizaron para incluir la interpolación temporal y la dispersión de los contaminantes se sigue calculando suponiendo una salida de una pluma, así mismo la pluma puede definir con una distribución Gaussiana o una distribución horizontal “*top-hat*”. Así como en versiones anteriores cuando la pluma se expande hasta un tamaño que excede la malla meteorológica se divide en nuevas pequeñas plumas. También se adicionó una rutina de dispersión de partícula en tres dimensiones [Daxler, 98; [http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_info.php](http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php), 2015].

Las bases de datos más usados se presentan a continuación:

#### América del Norte

- NAM (North American Mesoscale - 12 km, 3 hourly, 31 day rotating files),
- EDAS/NDAS (NAM Data Assimilation System - 40 km, 3 hourly, 2005-present),
- EDAS (Eta Data Assimilation System - 80 km, 3 hourly, 1997-2004),
- NGM (Nested Grid Model - 91 km, 2 hourly, 1991-1997),

## Global

- GDAS (Global Data Assimilation System - 1 degree lat/lon, 3 hourly, 2005-present),
- FNL (Global Data Assimilation System (Final) - 191 km, 6 hourly, 1997-2006),
- NCEP/NCAR Reanalysis 2.5 degree lat/lon, 6 hourly, 1948-present).

## Otros

- WORKSHOP - Meteorological data from HYSPLIT workshop,
- RESEARCH – serie de datos temporales

Existen algunos trabajos referidos a la imprecisión de HYSPLIT para reproducir trayectorias de las masas de aire compararon los resultados de varias configuraciones del modelo ejecutado en tres localidades diferentes durante un año completo. Encontraron cinco principales factores que causan desviaciones en las retrotrayectorias: diferencias en la metodología computacional (3% a 4%), interpolación temporal (9% a 25%), método de transporte vertical (18% a 34 %), bases de datos meteorológicos (30% a 40%) y diferencias combinadas entre los datos meteorológicos y el modelo de transporte vertical (39% a 47%). Estas desviaciones se calculan como una desviación cuadrática promedio de las distancias horizontales entre los puntos de las retrotrayectorias. Los valores se obtuvieron para un tiempo de simulación de 96 horas, evidentemente para un mayor tiempo de simulación los errores se acumulan y provocan mayores diferencias. Sin embargo, la mayoría de los estudios emplean retrotrayectorias de 5 días haciendo un compromiso entre precisión y necesidad.

## Aproximación Euleriana y Lagrangiana

Para tener una mejor idea de las características del modelo HYSPLIT describiremos brevemente las expresiones matemáticas de las aproximaciones tanto Euleriana como Lagrangiana en las que está basado el modelo.

Aproximación Euleriana, Seinfeld, (1985).

Si se considera  $N$  especies en un fluido, la concentración de cada especie, en cada instante debe satisfacer el balance de materiales en el volumen del elemento. Así que cualquier acumulación de material en el transcurso del tiempo, se sumara a la cantidad neta del material que presenta convección en el volumen. Debe balancearse por cualquier cantidad equivalente del material que se produce por reacciones químicas y que se emiten dentro de las fuentes y que entra por difusión molecular. Expresando matemáticamente la concentración de cada especie,  $c_i$ , se debe satisfacer la ecuación:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} u_j c_i = D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_i \partial x_j} + (c_1, \dots, c_N, T) + S(x, t) \quad (20)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

Donde  $u_j$ , es el  $u_{j\text{esimo}}$  componente de la velocidad del fluido,  $D_i$ , es la difusividad molecular de las especies  $i$  en el fluido de transporte,  $R_i$  es la velocidad de generación de las especies  $i$  debidas a reacciones químicas (las cuales dependen en general de la temperatura del fluido  $T$ ) y  $S$  es la velocidad de la suma de especies  $i$  en la posición  $x=(x_1, x_2, x_3)$  y el tiempo  $t$ . Adicionalmente la ecuación debe satisfacer las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuación de movimiento),<sup>21</sup> y de energía,<sup>22</sup> estas dos ecuaciones están relacionadas por los términos  $u_j$ ,  $c_j$  y  $T$  con la ecuación total de continuidad y la ley de los gases ideales.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho_0} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{g \tilde{T}}{T_0} \delta_{i3} \quad (21)$$

La ecuación de energía se refiere a la condición de equilibrio y se elige un caso adiabático en el cual:

$$\frac{\partial T_e}{\partial x_3} = -\frac{g}{C_p} \quad (22)$$

En general es necesaria una solución simultánea de la ecuación acoplada de masa, *momentum*, y conservación de energía para tener en cuenta de forma apropiada los cambios de  $u_j$  y  $T$  y  $c_i$  así como los efectos de los cambios entre cada una de estas variables. Al tratarse de contaminantes atmosféricos, ya que las especies se encuentran en concentraciones de ppm, se justifica suponer que la presencia de los contaminantes no afecta las condiciones meteorológicas como para que se detecten cambios así que la ecuación de continuidad se resuelve independientemente de las ecuaciones acopladas de *momentum* y energía. Como consecuencia las ecuaciones de la velocidad del fluido  $u_j$ , y la temperatura  $T$  se pueden considerar independientes de  $c_i$ . Desde este punto de vista no se indica explícitamente la dependencia de  $R$  con respecto a  $T$ .

La solución de la ecuación 20 describe completamente el comportamiento de los contaminantes. Sin embargo, ya que el fluido de interés es turbulento, la velocidad  $u_j$  es una función aleatoria del espacio y del tiempo. Las velocidades del viento  $u_j$  se pueden expresar como la suma de dos componentes, el determinístico y el estocástico,  $u_j + u_j'$ .

En ausencia de reacciones químicas y de otras variables, y si se supone una difusión molecular despreciable, la distribución de la concentración en un tiempo determinado se describe de acuerdo a la ecuación de advección 23,

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j c) = 0 \quad (23)$$

Cuando se resuelve la ecuación 23 con una velocidad precisa de flujo de campo  $u_j$ , se encuentra que la solución coincide exactamente con las observaciones, suponiendo despreciable la difusión molecular. Esto implica que si se conoce la velocidad de campo de forma precisa en todos los sitios y tiempos no habrá el fenómeno de difusión turbulenta. Por lo que la difusión turbulenta es una parte por falta de conocimiento completo de la velocidad verdadera de campo. Por otro lado

una de las tareas fundamentales en la teoría de difusión turbulenta es definir los componentes determinísticos y estocásticos de la velocidad de campo.

Si se reemplaza  $u_j$  por  $u_j + u_j'$  la ecuación 20 queda como:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(u_j + u_j') c_i] = D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_i \partial x_j} + (c_1, \dots, c_N, T) + S(x, t) \quad (24)$$

El término  $u_j'$  es una variable aleatoria y la solución de la ecuación 24 nos da  $c_i$ , debe también ser una variable aleatoria, debido a que las velocidades del viento son funciones aleatorias de espacio y tiempo. Entonces la determinación de  $c_i$ , en el sentido de una función especificada en espacio y tiempo, no es posible ya que no se puede determinar de forma precisa el valor de ninguna variable aleatoria en los experimentos. La mejor aproximación será la probabilidad de que en un lugar y tiempo la concentración de la especie  $i$  estará cercana entre dos valores de espacio. Como la función de distribución de probabilidad para un proceso aleatorio es compleja para la difusión atmosférica y casi imposible de resolver se puede adoptar la aproximación más cercana que es la determinación de cierta propiedad estadística de  $c_i$ , la media  $\langle c_i \rangle$ . Por lo que sí en cada espacio  $\mathbf{x}$  y tiempo  $\mathbf{t}$  se promedian los valores de concentración de un número infinito de experimentos se puede tener una concentración promedio teórica  $\langle c_i(x, t) \rangle$  pero en realidad la medición de la concentración de las especies  $i$  en un lugar y tiempo en particular se describe mejor como un conjunto hipotético infinito de posibles concentraciones. Es conveniente expresar  $c_i$  como  $\langle c_i \rangle + c_i'$ , donde por definición  $\langle c_i' \rangle = 0$ . Promediando la ecuación 24 para un conjunto infinito de realizaciones de turbulencia se obtiene la ecuación, 25, que gobierna  $\langle c_i \rangle$ :

$$\frac{\partial \langle c_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \langle c_i \rangle) + \frac{\partial}{\partial x_j} \langle u_j' c_i' \rangle = D_i \frac{\partial^2 \langle c_i \rangle}{\partial x_j \partial x_j} + \langle R(\langle c_i \rangle + c_1, \dots, c_N) + S_i(x, t) \rangle \quad (25)$$

La ecuación 25 tiene variables dependientes que son  $\langle c \rangle$  y  $\langle u_j c' \rangle$ , hay más variables dependientes que ecuaciones. Esto se conoce como el problema de “cierre” para la turbulencia. Si se vuelve a derivar la ecuación para  $\langle u_j c' \rangle$ , se generaran dos nuevas variables dependientes. El problema de “cierre” se vuelve peor cuando ocurren reacciones químicas no lineales. El problema de “cierre” en una descripción Euleriana presente en la difusión turbulenta no permite una solución exacta inclusive para la concentración media  $\langle c \rangle$ .

Aproximación Lagrangiana, Seinfeld, (1985).

Esta aproximación para una difusión turbulenta tiene que ver con el comportamiento representativo de un fluido de partículas. Para una aproximación inicial se considera una sola partícula en una posición  $x'$  al tiempo  $t'$  en un fluido turbulento. El siguiente movimiento de la partícula se describe a través de su trayectoria,  $X[x', t'; t]$  que es la posición de la partícula en cualquier tiempo posterior al tiempo  $t$ .

Si se expresa:

$\varphi(x_1, x_2, x_3, t) dx_1, dx_2, dx_3 = \varphi(x, t) dx$  = es la probabilidad de que la partícula en el tiempo  $t$ , este en un volumen  $x_1$  hasta  $x_1+dx_1$ ,  $x_2$  hasta  $x_2+dx_2$  y  $x_3+dx_3$  tal que  $x_1 \leq X < x_1 + dx_1$ , y así sucesivamente. Por lo que la expresión  $\varphi(x, t)$  es la función de densidad de probabilidad para la localización de la partícula en el tiempo  $t$ . De acuerdo a la definición de una función de densidad de probabilidad (fdp) se tiene:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x, t) dx = 1 \quad (26)$$

La función de densidad de probabilidad para encontrar una partícula en la posición  $x$  al tiempo  $t$ , se puede expresar como el producto de otras dos densidades de probabilidad; la fdp de una partícula en la posición inicial  $x'$ ,  $t'$  tiene un desplazamiento  $x$  y  $t$ . Esta función de probabilidad  $Q(x, t | X', t')$  puede llamarse la densidad de probabilidad de transición para la partícula. La densidad de probabilidad

en que la partícula fue en la posición  $x'$  al tiempo  $t'$ ,  $(x', t')$  integrado en todas los posibles puntos de inicio  $x'$ . Entonces la ecuación se puede expresar como:

$$\varphi(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(x, t | x', t') \varphi(x', t') dx' \quad (27)$$

La función de densidad  $\varphi(x, t)$  se define con respecto a una sola partícula. Por lo que de forma arbitraria se considera un número  $m$  de partículas presentes inicialmente y la posición de la  $i$ th partícula se da en la función de densidad  $\varphi(x, t)$ , se puede ver que un conjunto representa una concentración media en la posición  $x$  y se expresa como:

$$\langle c(x, t) \rangle = \sum_{i=1}^m \varphi_i(x, t) \text{ si se expresa la fdp en la ecuación anterior en términos de la}$$

distribución de la partícula inicial y de la distribución espacio-temporal de las fuentes de las partículas  $x', S(x, t)$ , en unidades de partículas por volumen, por tiempo y sustituyendo este resultado en la ecuación anterior, se obtiene la formula general para la concentración media:

$$\langle c(x, t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x', \int_{-\infty}^{\infty} Q(x, t | x_0, t_0) \langle c(x_0, t_0) \rangle dx_0 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(x, t | x', t') S(x', t') dt' dx' \quad (28)$$

El primer término de la izquierda representa a las partículas presentes en el tiempo  $t_0$  y el segundo término de la derecha representa a las partículas sumadas desde la fuente en el tiempo  $t'$  y  $t$ . Esta última ecuación es la relación Lagrangiana fundamental para expresar la concentración media de una especie en un fluido turbulento. Los problemas de esta expresión es que sólo se mantiene si no hay reacciones químicas y es necesario el completo conocimiento de las propiedades de turbulencia, que generalmente no está disponible excepto para el caso más simple.



## 2.10 Contaminantes atmosféricos

### 2.10.1 Descripción y establecimiento de los contaminantes criterio.

Existen varios contaminantes que tienen efectos adversos en los humanos, las plantas y en ciertos materiales. Los llamados, "*criteria pollutants*", son aquellos para los cuales se han establecido límites de concentración aceptables para proteger la salud y el bienestar público. Hay siete contaminantes de referencia en los Estados Unidos determinados en las normas nacionales de la calidad del aire *North American Air Quality Standards* (NAAQS) por la Agencia de Protección al Ambiente por sus siglas en inglés (EPA). En el cuadro 3 se muestran algunos valores recomendados para éstos contaminantes, dados por Estados Unidos, México y la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Los valores se expresan en términos de concentración del contaminante sobre un periodo determinado de tiempo. El concepto de dosis para cualquier contaminante es por lo tanto una parte integral de la evaluación así como la expresión de los niveles aceptables de la calidad del aire. Los dos contaminantes de mayor preocupación para la salud humana son el ozono (O<sub>3</sub>) y las partículas las cuales se dividen en partículas totales suspendidas (PTS), partículas de 10 micras (PM<sub>10</sub>) y partículas de 2.5 micras de diámetro (PM<sub>2.5</sub>). Sin embargo diferentes países establecen sus propios estándares o referencias de la calidad del aire. Algunos valores o criterios cambian a través del tiempo después de que se obtiene información basada en estudios epidemiológicos. Aún existen debates, por ejemplo, relacionados con qué nivel de concentración es seguro, especialmente en el caso de partículas finas (Molina *et al.*, 2002).

Cuadro 3. Estándares de calidad del aire ambiente establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), Estados Unidos y México, (Molina *et al.*, 2002).

	<b>CO (ppm)</b>	<b>SO<sub>2</sub> (ppm)</b>	<b>O<sub>3</sub> (ppm)</b>	<b>NO<sub>2</sub>(ppm)</b>	<b>PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Plomo (µg/m<sup>3</sup>)</b>
OMS	26 (1h)  9 (8h)	0.13 (24 h)	0.08 (1h)  0.06 (8h)	0.21 (1h)	20		0.5 -1 (1 año)
Estados Unidos	35 (1h)  9 (8h)	0.14 (24 h)	0.12 (1h)  0.08 (8h)	0.21 (1h)	150 (24h)	65 (24 h)	
México	11 (8h)	0.13 (24 h)	0.11 (1 h)	0.21 (1h)	150 (24 h)		1.5

Las fuentes importantes de contaminantes ambientales son causadas principalmente por las emisiones de la combustión de combustibles fósiles en vehículos de motor y de procesos industriales, así como para el calentamiento y la generación de electricidad. Otros contaminantes se producen por medio de incineradores, plantas petroquímicas y refinerías, fundidoras y por las industrias químicas.

### 2.11 Efectos en la salud

Hay dos categorías de los efectos de la salud de los contaminantes que se relacionan con el tiempo; éstas son la aguda y la crónica. Los efectos agudos tienden a actuar inmediatamente en un órgano específico o en un punto de entrada del cuerpo humano, en el caso de los contaminantes atmosféricos típicamente los ojos y los pulmones. Los efectos crónicos son aquellos para los cuales puede haber un periodo largo entre la exposición y el efecto a la salud resultante. Los efectos directos de los contaminantes sobre los humanos varían de acuerdo a la intensidad y a la duración de la exposición y también dependen del estado de salud de la

población expuesta. Ciertos sectores de la población son de mayor riesgo, como los niños y los adultos mayores.

Los contaminantes atmosféricos entran principalmente al cuerpo humano por las vías respiratorias. Más del 50% del material particulado con un tamaño de partícula entre  $0.01\ \mu\text{m}$  –  $0.1\ \mu\text{m}$  penetran en las cavidades de los pulmones y se depositan allí.

Existe evidencia que el material particulado conocido o clasificado como ultrafino ( $< 2.5\ \mu\text{m}$ ) es más dañino o tiene mayores efectos a la salud que el de tamaños de partícula de  $10\ \mu\text{m}$  (Shields et al., 2008).

Se han podido identificar diferentes efectos tóxicos causados por las partículas y se pueden agrupar en tres grandes categorías:

- 1) Intrínsecamente tóxicos debido a sus características físicas y químicas,
- 2) Pueden interferir en los procesos que despejan usualmente el aparato respiratorio, por ejemplo formación de expectoraciones.
- 3) Pueden actuar como conductores de sustancias tóxicas adsorbidas y absorbidas en el material particulado.

Diferentes estudios (Romero-Placeres et al., 2004) indican una relación entre los aumentos de la concentración de partículas y el aumento en el número de visitas a los hospitales debido a infecciones respiratorias, afecciones cardiacas, bronquitis, asma, pulmonía, enfisema etc... así como en las ciudades donde se han implementado programas de reducción de contaminantes a través de la restricción de tránsito a través de impuestos como en Londres, Estocolmo o Berlín (Johansson et al., 2009).

En algunos casos se ha asociado la mortalidad infantil con la exposición a niveles altos de  $\text{PM}_{2.5}$  que se presentaron días antes de su muerte., ellos indican que “La asociación más fuerte que se observó fue con el promedio de la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  durante un periodo de tres a cinco días previos: un incremento de  $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  en

el promedio de partículas finas durante esos tres días se asoció con 6.9% de incremento de muertes infantiles (IC 95% 2.5-11.3)", (Lacasaña-Navarro *et al.*, 2003).

Por ejemplo los óxidos de azufre en combinación con las partículas y la humedad de la atmósfera producen efectos nocivos; los aerosoles del ácido sulfúrico y otros sulfatos constituyen del 5% al 20 % de las partículas en suspensión del aire urbano y contribuyen significativamente en la disminución de visibilidad a través de la formación de aerosoles (Wark y Warner, 1992).

Se han encontrado que las partículas contienen por ejemplo alcaloides, ácidos dicarboxílicos (C<sub>2</sub>-C<sub>5</sub>) y ácido oxálico (Stone *et al.*, 2010). Otro grupo de compuestos de suma importancia son los compuestos aromáticos policíclicos que son carcinogénicos y se generan a través de la combustión de combustibles fósiles como el carbón y el combustóleo en hornos estacionarios y de gasolina, aceite, diesel, y combustibles para motores de turbina en fuentes móviles. Otros procesos como los de molido, fundición, trituración y molienda de granos contribuyen a la contaminación del aire (Molina *et al.*, 2002).

Análisis realizados en muestras de material particulado utilizando espectrometría de masas reportan composiciones muy complejas, obteniendo más de 1000 picos, de los cuales por ejemplo una fracción se identificó como ácido pirúvico, ácido glicólico y productos de oxidación del isopreno, (Nguyen *et al.*, 2010).

Algunos estudios realizados para evaluar la dispersión de los contaminantes en ciudades como Estocolmo, donde han establecido programas de disminución del parque vehicular en el centro de la ciudad, apuntan a la importancia de evaluar la relación de la concentración de los contaminantes con el impacto en la salud. Estas evaluaciones sirven como parámetro de apreciación de la eficacia de los programas de los gobiernos en cuanto a disminución de contaminantes. Este tipo de análisis no es muy común ya que la mayoría están enfocados a la medición de la tendencia de la dispersión de los contaminantes (Johansson *et al.*, 2009).

Las partículas al ser respiradas se van depositando en diferentes partes del aparato respiratorio de acuerdo a su tamaño. Phalen et al, 1991, generó curvas de deposición de partículas de acuerdo al modelo propuesto por el *National Council on Radiation Protection and Measurements*. Con estas curvas se puede observar que la mayoría de las partículas con un diámetro mayor a 10  $\mu\text{m}$  se remueven en la boca y en la nariz antes de entrar hacia órganos internos. Del 10 % - 60 % de las partículas que pasan a la tráquea son menores de 10  $\mu\text{m}$  y se depositan en los pulmones donde pueden causar daño: la curva de deposición en los pulmones es bimodal, con un pico al 20% para partículas < 3  $\mu\text{m}$  y al 60 % para partículas  $\approx$  0.03  $\mu\text{m}$ .

En México de acuerdo al INEGI la tendencia de la incidencia de neumonía y bronconeumonía desde 1978 hasta el 2008 ha ido aumentando significativamente, en la figura 2 se observa la tendencia para las ciudades de Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco, Querétaro y Nuevo León. Siendo en los primeros 15 años Querétaro el que más incidencias presentó. De estos datos no se tiene un reporte que indique que las incidencias se deben a aspectos de contaminación ambiental pero para las ciudades en crecimiento sería adecuado encontrar la relación entre el aumento de este tipo de enfermedades y la contaminación atmosférica como en otras ciudades como se mencionó anteriormente para el caso de Estocolmo (Johansson *et al.*, 2009).

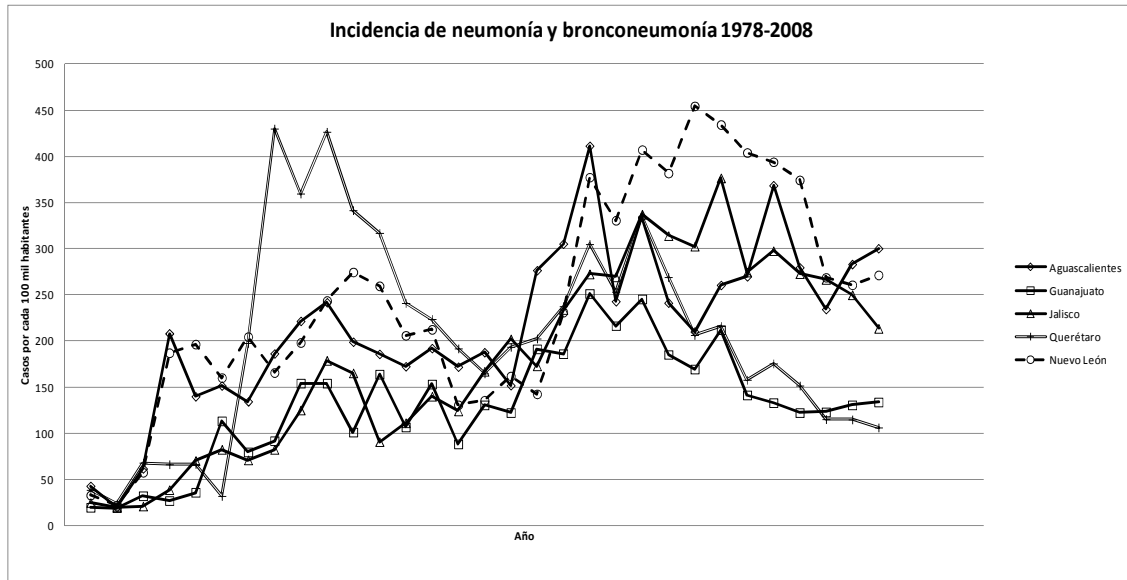


Figura 2. Incidencia de neumonía y bronconeumonía 1978-2008. INEGI 2015.

## 2.12 Partículas

Dentro de los contaminantes, criterio, se encuentran las partículas que incluyen las producidas por la sal de los océanos, las cenizas volcánicas, productos de erosión por el viento, polvo de las carreteras, desechos de incendios forestales, el polen y las semillas de las plantas. Existen diferentes clasificaciones o definiciones de las partículas que se encuentran en la atmósfera, en el cuadro 4 se presentan algunas definiciones generales.

Las partículas se pueden caracterizar de acuerdo a su tamaño, forma, composición, color, número y el equilibrio gas/partícula. Las partículas se encuentran distribuidas en diferentes tamaños, el intervalo de nucleación también conocido como partículas ultrafinas, son aquellas con diámetros alrededor de  $0.08 \mu\text{m}$ , que se emiten directamente de los procesos de combustión o son producto del proceso de enfriamiento rápido de los gases (Chow et al., 1998).

Las partículas conocidas como de nucleación permanecen en el aire menos de 1h debido a su dinámica de interacción con otras partículas o compuestos. Se pueden coagular rápidamente con otras de mayor tamaño o pueden servir como núcleos de nubes y neblinas. Estas sólo pueden detectarse cuando la emisión es reciente o recién se forman en la atmósfera. La siguiente fracción se conoce como de “acumulación” y está formada por partículas entre  $0.8 \mu\text{m}$  –  $2.0 \mu\text{m}$ . Son el resultado de la coagulación entre partículas pequeñas emitidas de fuentes de combustión, de conversiones de gas a partícula, de la condensación de especies volátiles, y de polvo finamente molido.

Las fracciones de partículas llamadas de nucleación y de acumulación conforman la fracción fina, dentro de éstos tamaños diámetros están otros contaminantes atmosféricos como el ácido sulfúrico, bisulfato de amonio, sulfato de amonio, nitrato de amonio, carbón orgánico y elemental. Partículas con un diámetro entre  $2 \mu\text{m}$  -  $3 \mu\text{m}$  se catalogan como gruesas, y principalmente son el resultado de los fenómenos de erosión con material predominantemente de origen geológico. También se considera al polen y a las esporas como parte de esta fracción.

En general las partículas arrastradas por el aire varían su tamaño desde  $0.001 \mu\text{m}$  hasta  $500 \mu\text{m}$ , con la mayor parte de la masa de partículas presentes en la atmósfera con una variación de  $0.1 \mu\text{m}$  a  $10 \mu\text{m}$ . Las partículas con un tamaño  $< 0.1 \mu\text{m}$  presentan un comportamiento similar al de las moléculas y están caracterizadas por grandes movimientos aleatorios causados por colisiones con las moléculas de gas. Las partículas  $> 1 \mu\text{m}$ , pero  $< 20 \mu\text{m}$ , tienden a seguir el movimiento del gas por el que son llevadas. Las partículas  $> 20 \mu\text{m}$  poseen velocidades de asentamiento significativas; por lo que, el aire las arrastra durante períodos relativamente cortos.

Cuadro 4. Definiciones de los términos que describen a las partículas suspendidas en el aire (Wark y Warner, 1992).

Partículas	Cualquier material, excepto agua no combinada, que existe en estado sólido o líquido que existe en la atmósfera o en una corriente de gas en condiciones normales.
Aerosol	Una dispersión de partículas microscópicas, sólidas o líquidas en medios gaseosos.
Polvo	Partículas sólidas de un tamaño mayor que el coloidal, capaces de estar en suspensión temporal en el aire.
Ceniza fina	Partículas de ceniza finamente divididas arrastradas por el gas de la combustión. Pueden contener combustible no quemado.
Niebla	Aerosol visible.
Vapores	Partículas formadas por condensación, sublimación o reacción química, predominantemente > 1 µm (humo o tabaco).
Neblina	Dispersión de pequeñas gotas de líquido de suficiente tamaño como para caer desde el aire.
Partícula	Masa discreta de materia sólida o líquida.
Humo	Partículas pequeñas arrastradas por los gases, que resultan de la combustión.
Hollín	Una aglomeración de partículas de carbón.

La concentración total de partículas se expresa usualmente como la masa total de las partículas en un volumen dado de gas. Las unidades básicas para la concentración de partículas son los microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Además de la concentración promedio de partículas en masa por unidad de volumen, es importante la distribución de tamaños por conteo de partículas y por volumen en la atmósfera urbana.

En diferentes caracterizaciones que se han realizado a las partículas presentan que los principales componentes y elementos químicos (Chow *et al.*, 1998) son:

- óxidos de aluminio, silicón, titanio y fierro, entre otros óxidos metálicos,
- sulfato: de amonio, bisulfito de amonio, y ácido sulfúrico,
- nitrato: de amonio,



- amonio, sulfato de amonio, bisulfito de amonio y nitrato de amonio.

En el estudio realizado durante el periodo de julio de 2005 a junio de 2006 en el municipio de Querétaro la caracterización del material particulado mostró que el cobre se encontraba en mayor proporción (33.3%) y el carbono elemental contribuyó con un 21.4%, en la zona industrial. Para la zona urbana el carbón elemental predominó (28.5%), el fierro (26.8%) y el cobre (19,4%), (Gasca, 2007). Durante este período de medición el valor promedio de concentración del material particulado fue de  $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , concentración que rebasa el límite máximo permisible de la norma con un 40%, (Gasca, 2007). En el cuadro 5 se observa que ciudades como Monterrey en el año 2003 se encontraban rebasando el límite máximo permisible pero con un 26%.

El análisis cuantitativo de las partículas ultrafinas ( $< 2.5 \mu\text{m}$ ) representa  $<$  del 20% en peso por lo que los estudios gravimétricos no ofrecen información de partículas de estas dimensiones (Shields, *et al.*, 2008).

En México, del total de partículas que se forman, aproximadamente del 85 % - 90% provienen de las fuentes de producción de energía (INEGI) y la gran mayoría de las fuentes de energía se deben al consumo de combustibles fósiles. Las partículas de combustión predominantemente contienen  $\text{PM}_{2.5}$  (Chow *et al.*, 1998).

La industria del petróleo en México ha producido PST (partículas totales suspendidas) durante el período de 1998 al 2008 del orden de  $1132 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en sus diferentes procesos como son refinación, exploración, gas y petroquímica básica y petroquímica, cuadro 6. Durante los años de 2001 al 2003 se produjeron la mayor cantidad de PST por procesos de producción de hidrocarburos, figura 3, y a partir del 2004 disminuyeron las emisiones aproximadamente 4.5 veces y se han mantenido constantes como lo reflejan los datos reportados hasta el 2008 (PEMEX, 2007).

Cuadro 5. SEMARNAT. INE. Segundo almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en seis ciudades mexicanas. México D.F., 2003.

Ciudad	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Ciudad de México	401
Guadalajara	652
Monterrey	189
Toluca	96
Ciudad Juárez	112
Puebla	11

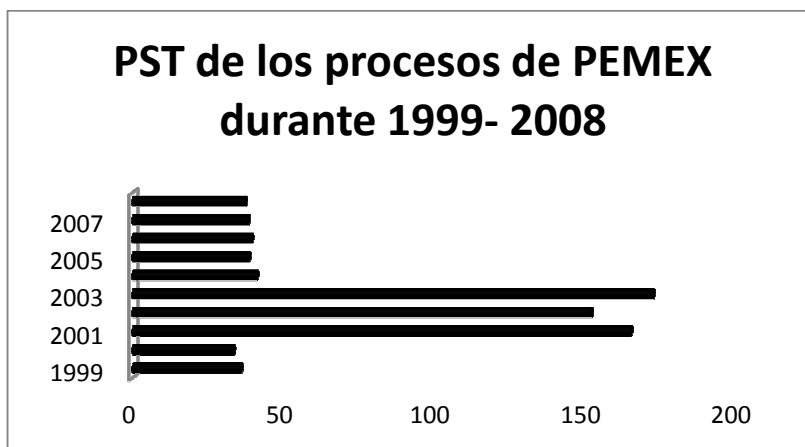


Figura 3. Emisiones promedio anuales de PST en los procesos de producción de hidrocarburos de Petróleos Mexicanos, 1999 a 2008. PEMEX. Informe Desarrollo Sustentable.

Cuadro 6. Emisiones de contaminantes atmosféricos en los procesos de producción de hidrocarburos de Petróleos Mexicanos, 1999 a 2008.

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=21385>

<b>Subsidiaria PEMEX</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
Emisiones										
Total	838.5	785.1	1042.5	796.7	925.9	773.3	714.8	707	704.3	1096
Sox	688.8	641.5	687.6	496.6	602.9	513.4	516.9	512	524.2	911.8
NOx	13.7	126.8	86.8	90.1	101.2	100.2	91	94	96.1	99.3
PST	18	16.8	82.8	76.2	86.5	20.8	19.3	19.8	19.2	18.8
COT	ND	ND	102.3	78.1	81.8	87.2	32.6	32.2	21.2	20.2
COV	ND	ND	83	55.7	53.5	51.7	55	49.1	43.6	45.6
Exploración										
SOx	518.4	495	307.5	199.4	243.9	116.1	143.9	220	460.2	1225
NOx	125.5	126.5	87.6	81.6	99	87.7	83.2	86.3	107	119.5
PST	1.6	1.4	3.3	3.8	3.4	2.9	2	1.7	2.3	1.9
COT	ND	ND	104	61.7	63.4	50.5	26.3	25	29.6	28.2
COV	ND	ND	78.5	30.6	31.7	22.7	26.9	26.5	22.2	25.9
Refinación										
SOx	530	487.5	752.9	676.1	892.1	927.6	791.8	744	586.8	597.4
NOx	60.4	53.3	50.3	65.2	71.2	68.6	66.7	69	68.7	62.3
PST	33.9	31.5	39.8	41.2	69.4	35.4	33.8	35.3	34.9	31.4
COT	ND	ND	77.6	74.3	71.5	71.2	8.1	8.4	8.6	8
COV	ND	ND	73.5	69.8	63.9	64.2	73.2	62.9	60.8	60.4
Gas y petroquímica básica										
SOx	329.2	300.4	313.5	117.5	64	70.4	79.1	58.1	0.9	0
NOx	21.2	25	19.2	19.3	18.4	19.3	17.9	18.1	1.1	0.8
PST	0	0	77.7	71.5	67.3	1.4	1.3	1.4	0	0
COT	ND	ND	10.7	9.5	18.4	33.7	27.3	27.5	0.8	0.6
COV	ND	ND	6.4	4.7	4.7	6.2	5.2	4.3	0	0
Petroquímica										
SOx	0	0	1.3	0.1	5.6	6.7	18.8	2.1	0.4	1.1
NOx	56.2	48.7	16.3	14	13.8	15.1	14.2	14.5	15.3	15.9
PST	0.4	0.6	44.6	35.8	32.7	1.4	1.4	1.1	1.1	1.1
COT	0	ND	12.3	10.6	10.2	10.6	3.4	3.3	3.4	3.4
COV	0	ND	7.5	6.1	6.5	6.3	4.7	4.4	4.1	4.7

La emisión neta en México, de gases de efecto invernadero para el año 2013 fue de 486.5 millones de toneladas, de las cuales 97.7% son generadas a partir de categoría la de energía. La emisión estimada de la categoría de procesos industriales fue del orden de 41 millones de toneladas e incluye principalmente emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por vías diferentes a la combustión y las emisiones de hidrofluorocarbonos (HFC) empleados en los sectores de refrigeración y aire acondicionado, (RAC). [Inventario de emisiones].

## 2.13 Control atmosférico ambiental y programas de monitoreo

De acuerdo a los datos de la SEMARNAT el estado de Querétaro cuenta con 7 unidades de monitoreo manual, cuadro 7. En el 2008 sólo se reportó el monitoreo de SO<sub>2</sub> y PTS (partículas totales suspendidas). Las unidades de monitoreo se concentran en el municipio de Querétaro. En la figura 4 se puede observar que en el año de 1999 Querétaro era uno de los estados con menor emisión de contaminantes representando un 0.96% de las emisiones totales del país. Como puede observarse en el año mencionado Querétaro era uno de los estados con menor contaminación atmosférica junto con Nayarit, y Tlaxcala entre otras. Sin embargo es necesario contar con mayor información ya que también es importante mencionar que en el estado no se cuenta con una red de monitoreo continua para los contaminantes como CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc.

Otro tipo de estudios de suma importancia para la evaluación del impacto de la contaminación atmosférica, especialmente el caso de las partículas son los estudios de caracterización. De estos estudios se ha encontrado que las partículas son sistemas dinámicos que pueden absorber o adsorber compuestos como diferentes tipos de hidrocarburos (Shields et al., 2008) o de metales pesados en partículas (Gasca, 2007).

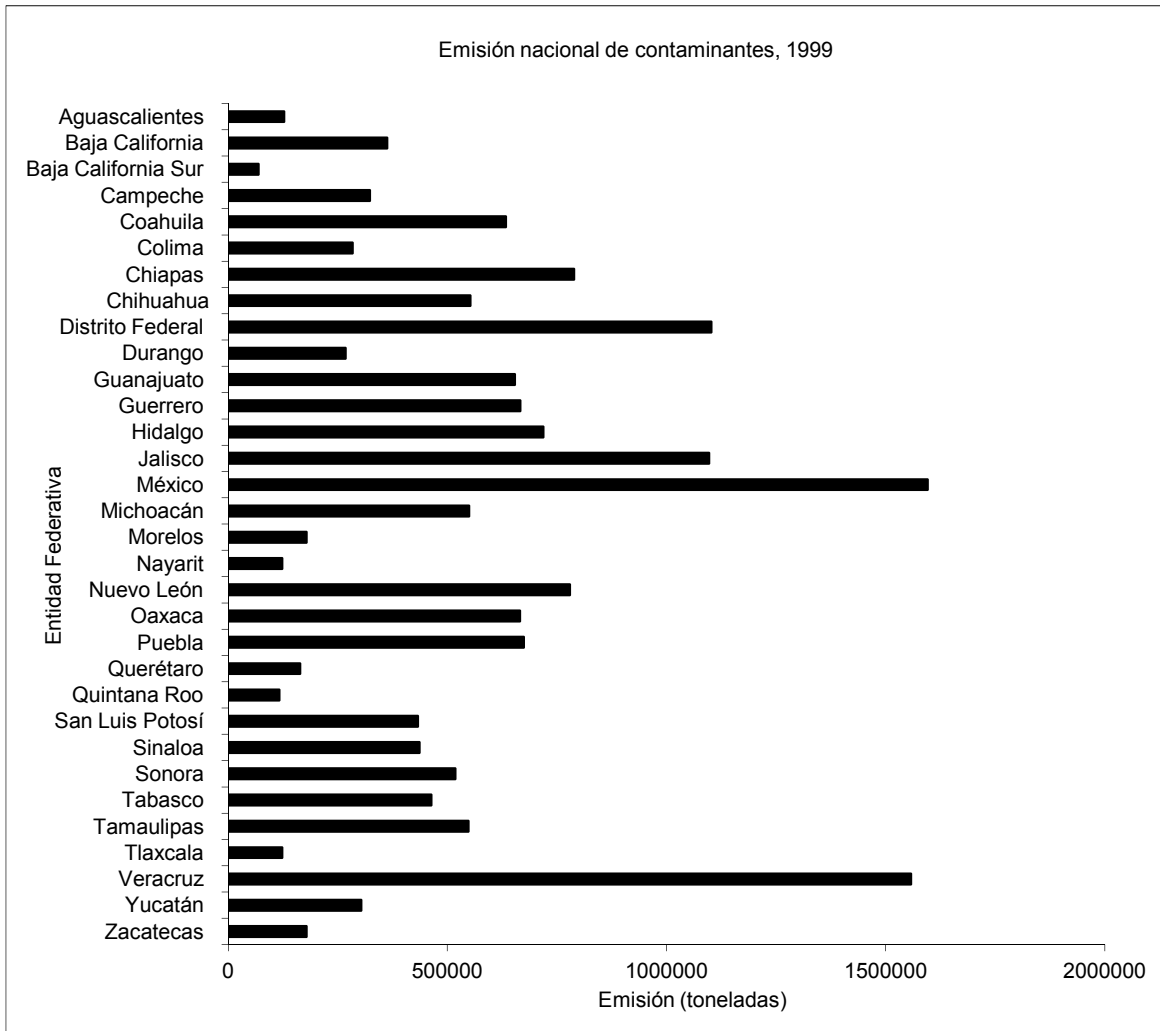


Figura 4. Emisión nacional de contaminantes por entidad federativa en el año de 1999. Fuente: SEMARNAT, INE. Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999. México. 2006.

Cuadro 7. Principales estaciones de monitoreo de la calidad del aire y contaminantes monitoreados por entidad federativa y ciudad, 2004.

	Ciudad	Número de estaciones de monitoreo automático	Número de estaciones de monitoreo manual	Contaminantes monitoreados						
				Ozono	Monóxido de carbono	Dióxido de azufre	Dióxido de nitrógeno	Óxidos de nitrógeno	Partículas <10µm <sup>3</sup> /l	Partículas suspendidas totales <sup>b</sup>
Distrito Federal	ZMVM	36	16	20	25	26	16	19	22	13
Jalisco	ZHJG	8	0	8	8	8	8	8	8	0
Nuevo León	ZNLN	5	0	5	5	5	5	5	5	0
México	ZMVT	7	5	5	4	7	7	7	7	7
Aguascalientes	Agascalientes	2	3	2	2	2	2	2	3	3
Baja California	Tijuana	4	8	4	4	4	4	4	6	0
Baja California	Mexicali	4	6	4	4	4	4	4	6	0
Baja California	Tecate	1	1	1	1	0	1	1	1	0
Chihuahua	Ciudad Juárez	3	5	3	3	0	0	0	6	0
Coahuila de Zaragoza	Torreón	8	16	1	1	8	1	1	4	19
Colima	Marzanillo	3	3	0	0	4	4	4	5	3
Guanajuato	Celaya	3	0	3	2	2	2	2	0	0
Guanajuato	Irapuato	3	0	3	3	3	3	3	0	0
Guanajuato	Salamanca	3	2	3	3	3	3	3	3	1
Guanajuato	Silao	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Puebla	Puebla	4	0	4	4	4	4	4	4	0
Querétaro	Querétaro	0	7	0	0	62	0	0	0	7
San Luis Potosí	San Luis Potosí	11	11	1	1	11	1	1	2	10
Sonora	Cananea	0	3	0	0	0	0	0	3	0
Sonora	Cumpas	4	4	0	0	4	0	0	4	0
Sonora	La Chinitaria	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Sonora	Nacozeri	6	1	0	0	6	0	0	1	0
Sonora	Nogales	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Veracruz de Ignacio de la Llave	Coatzacoalcos	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## 2.14 Normas nacionales

El deterioro de la calidad del aire debe evaluarse de manera cuantitativa, a través de la medición de la concentración de los contaminantes que se emiten. Los contaminantes atmosféricos cuyos valores máximos permisibles se encuentran en normas son los contaminantes criterio y el plomo, Pb, cuadro 8 y se relacionan con 8 NOM emitidas por la Secretaría de Salud ya que se relacionan con la exposición aguda y crónica de la población.

Por otro lado una de las formas para evaluar la calidad del aire es comparando las concentraciones de los contaminantes obtenidas de las redes de monitoreo con los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) publicadas la SEMARNAT, cuadro 9. En total se tienen 14 NOM que son específicas para el control de contaminantes en fuentes fijas, como chimeneas por ejemplo y que incluye como contaminantes al azufre y a los compuestos orgánicos volátiles. También estas NOM se relacionan con los Requisitos de los sistemas de vapores de gasolina en estaciones de servicio y autoconsumo en el Valle de México, NOM-092-ECOL-1993. Como su nombre lo dice sólo es aplicable en el Valle de México desafortunadamente ya que las estaciones de gasolina en el país se han incrementado considerablemente y no se monitorean sus emisiones como fuentes fijas. En las siguientes secciones se darán cifras de la tendencia en el aumento de las estaciones de gasolina en algunas ciudades del Bajío, figura 16. Las NOM descritas en el cuadro 9 evidencian como en la Ciudad de México se han establecido mecanismos de control de la contaminación atmosférica más rigurosos y formales debido a que es considerada una megaciudad y sus problemas de contaminación tienen una larga historia. de estas experiencias y de estos controles y normas las ciudades en crecimiento como Querétaro deben tomar ejemplo y crear mecanismos de control más eficientes basados en la amplia experiencia ya existente en el País.

Cuadro 8. Valores normados para los contaminantes de aire en México

Contaminante	Valores límite			Normas Oficiales Mexicanas
	Exposición aguda		Exposición crónica	
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Para la protección de la salud de la población susceptible	
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8h) (12595 µg/m <sup>3</sup> )	1 vez al año	-	NOM-021-SSA1-1993 <sup>a</sup>
Bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	0.13 ppm (24h) (341 µg/m <sup>3</sup> )	1 vez al año	0.03 ppm (promedio aritmético anual)	NOM-022-SSA1-1993 <sup>a</sup>
Bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0.21 ppm (1h) (395 µg/m <sup>3</sup> )	1 vez al año	-	NOM-023-SSA1-1993 <sup>a</sup>
Ozono (O <sub>3</sub> )	0.11 ppm (1h) (216 µg/m <sup>3</sup> )	No se permite	-	Modificaciones a la NOM-020-SSA1-1993 <sup>b</sup>
	0.06 ppm (8h) <sup>d</sup>	4 veces al año	-	
Partículas suspendidas totales PST	210 µg/m <sup>3</sup> (24 h) <sup>c</sup>	2% de mediciones al año	-	Modificación a la NOM-025-SSA1-1993 <sup>c</sup>
Partículas menores de 10 micrómetros PM <sub>10</sub>	120 µg/m <sup>3</sup> (24 h) <sup>c</sup>	2% de mediciones al año	50 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético anual)	
Partículas menores de 2.5 micrómetros PM <sub>2.5</sub>	65 µg/m <sup>3</sup> (24 h) <sup>c</sup>	2% de mediciones al año	15 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético anual)	
Plomo (Pb)	-	-	1.5 mg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético en 3 mensual)	NOM-026-SSA1-1993 <sup>a</sup>

a. Diario Oficial de la Federación del 23 de diciembre de 1994.

b. Diario Oficial de la Federación del 30 de octubre de 2002.

c. Diario Oficial de la Federación del 26 de septiembre de 2005, entra en vigor a partir del 26 de noviembre de 2005.



Cuadro 9. Normas Oficiales Mexicanas para el control de contaminantes atmosféricos por fuentes fijas. Fuente INE 2007.

<b>Norma Oficial Mexicana</b>	<b>Niveles máximos permisibles de emisión atmosférica</b>
NOM-039-ECOL-1993	Bióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico en plantas productoras de ácido sulfúrico.
NOM-040-ECOL-1993	Partículas sólidas y control de emisiones fugitivas provenientes de Industrias productoras de cemento.
NOM-043-ECOL-1993	Partículas sólidas en proceso.
NOM-046-ECOL-1993	Bióxido de azufre, neblinas de trióxido de azufre y ácido sulfúrico en plantas productoras de ácido dodecilsulfónico.
NOM-051-ECOL-1993	Nivel máximo permisible en peso de azufre, en el combustible líquido, gasóleo industrial que se consume por fuentes fijas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
NOM-075-ECOL-1995	Emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles provenientes del proceso de los separadores agua-aceite de las refinerías del petróleo.
NOM-085-ECOL-1994	Humos, partículas suspendidas totales, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno en fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles.
NOM-092-ECOL-1993	Requisitos de los sistemas de vapores de gasolina en estaciones de servicio y autoconsumo ubicadas en el valle de México.
NOM-093-ECOL-1993	Eficiencia de laboratorio de los sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y autoconsumo.
NOM-097-ECOL-1995	Material particulado y óxidos de nitrógenos en los procesos de fabricación de vidrio en el país.
NOM-105-ECOL-1996	Partículas sólidas totales y compuestos de azufre reducido total en plantas de fabricación de celulosa.
NOM-EM-118-ECOL-1997	Especificaciones de protección ambiental que deben reunir el gas licuado de petróleo que se utiliza en las fuentes fijas ubicadas en la zona Metropolitana de la Ciudad de México.
NOM-121-ECOL-1997	Compuestos orgánicos volátiles provenientes de las operaciones de recubrimiento de carrocerías de la industria automotriz así como el método para calcular sus emisiones.
NOM-123-ECOL-1998	Establece el contenido máximo permisible de compuestos orgánicos volátiles (COV), en la fabricación de pinturas de secado al aire base solvente y para uso doméstico y los procedimientos para la determinación del contenido de los mismos en pinturas y recubrimientos.

### 2.14.1 Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA)

El sistema Nacional de información de la calidad del aire está a cargo del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC, reúne la información de las redes de monitoreo de la calidad atmosférica de diferentes ciudades de la República Mexicana con el objetivo de dar a conocer la situación de los contaminantes criterio actual e históricos. Esta información se encuentra en la página web del INECC, <http://sinaica.ine.gob.mx/>.

El sistema tiene tres modalidades para consulta, información en tiempo casi real, se obtiene vía internet y la red se enlaza a las estaciones de monitoreo y permite acceder a la información más cercana a la actual, bases de datos validadas por las redes de monitoreo y bases de datos histórica. Así mismo cuenta con datos meteorológicos. A la fecha el SINAICA cuenta con 19 ciudades dentro de la red de monitoreo, todas las redes de monitoreo dependen de los gobiernos locales. A largo plazo la red de monitoreo pretende incluir las estaciones privadas, públicas, automáticas y manuales de todo el país. Las ciudades que actualmente se encuentran en la red de monitoreo son: de las Áreas Metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Toluca, Puebla, Salamanca, León, Celaya, Irapuato, Silao, Ciudad Juárez, Tijuana-Rosarito-Tecate, Mexicali, Cuernavaca, Durango, Gómez Palacio, Torreón, San Luis Potosí y Región Tula-Tepeji. La forma en que valida las mediciones es utilizando los criterios de suficiencia de información, cuadro 10, y método para cada contaminante criterio de acuerdo se describe en el cuadro 11.

Cuadro 10. Determinación de las concentraciones diarias por contaminante  
 (<http://www.inecc.gob.mx/calair-presentacion/556-calair-metodologia>)

Contaminante	Concentración diaria	Criterio de suficiencia de información
CO	Es la concentración <i>máxima</i> obtenida de los <i>promedios móviles de 8 horas</i> generados durante el día	Al menos el 50% de los datos de promedios móviles de 8 horas en un día
SO <sub>2</sub>	La constituye el <i>promedio de 24 horas</i> de las concentraciones horarias generadas durante el día	Al menos el 50% de los datos horarios en un día
NO <sub>2</sub>	Esta representada por la <i>concentración horaria máxima</i> del día	Al menos el 50% de los datos horarios en un día
O <sub>3</sub>	Con el fin de evaluar la norma horaria, la constituye la <i>concentración horaria máxima</i> del día. Con el fin de evaluar la norma anual, es la concentración <i>máxima</i> obtenida de los <i>promedios móviles de 8 horas</i> generados durante el día.	Al menos el 50% de los datos horarios en un día al menos el 75% de los datos de promedios móviles de 8 horas en un día
PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	Es el <i>promedio de 24 horas</i> de las concentraciones horarias generadas durante el día	Al menos el 50% de los datos horarios en un día (para evaluar el número de días por arriba del valor de norma) al menos el 75% de los datos horarios en un día (para evaluar el percentil 98 y promedio anual)

Cuadro 11. Método de cálculo de las concentraciones diarias por contaminante para evaluar su conformidad con los límites máximos de las NOM correspondientes. (<http://www.inecc.gob.mx/calair-presentacion/556-calair-metodologia>).

Contaminante	Indicador	Método
CO	Segundo máximo anual de los promedios de 8 h (11 ppm, 8 h)	Se calcula a partir de los promedios móviles de 8 horas sin traslape de información. Si el valor obtenido durante el año es mayor a 11 ppm se infiere que se incumple la norma de dicho contaminante, dado que en esta se especifica que dicho valor no debe ser rebasado en un promedio móvil de 8 horas más de una vez al año.
SO <sub>2</sub>	Segundo máximo de 24 horas anual (0.13 ppm, 24 h)	Se genera a partir de las concentraciones diarias. Si el valor calculado durante el año es mayor a 0.13 ppm se infiere que se incumple la norma de dicho contaminante, ya que en esta se especifica que dicho valor no debe ser rebasado en 24 horas más de una vez al año.
	Promedio aritmético anual (0.03 ppm)	Se obtiene a partir de las concentraciones horarias. Se trata del estimador central de los valores horarios para cada año. Si el valor obtenido es arriba de 0.03 ppm, se incumple la norma.
NO <sub>2</sub>	Segundo máximo horario anual (0.21 ppm, 1 h)	Se calcula a partir de las concentraciones horarias. Si el valor obtenido durante el año es mayor a 0.21 ppm se infiere que se incumplió la norma horaria de dicho contaminante, dado que en esta se especifica que dicho valor no debe ser rebasado en una hora más de una vez al año.
O <sub>3</sub>	Máximo horario anual (0.110 ppm, 1 h)	Se obtiene a partir de las concentraciones horarias. Si el valor obtenido durante un año es mayor que 0.110 ppm, indica que se incumplió la norma horaria, dado que en esta se especifica que dicho valor no debe de rebasarse durante el año.
	Quinto máximo anual de los promedios de 8 h (0.08 ppm, 8 h)	Se calcula a partir de las concentraciones diarias de los promedios móviles de 8 horas. Este indicador se obtuvo de acuerdo con los lineamientos técnicos de suficiencia de al menos el 75% de las concentraciones diarias durante el año establecidos en la <a href="#">NOM</a> . Se trata del estimador central de las concentraciones diarias para cada año.
PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	Percentil 98 de las concentraciones diarias de 24 h (120 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>10</sub> y 65 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>2.5</sub> , 24 h)	Se calcula a partir de las concentraciones diarias de todo el año de acuerdo a los criterios de suficiencia especificados en la <a href="#">NOM</a> , que requieren de un mínimo de 3 trimestres con 75% de muestras válidas para poder calcular el percentil 98. El Percentil 98 significa que el 98% de las mediciones deben estar por debajo del límite estipulado en la norma, permitiéndose un 2% de mediciones por arriba de dicho límite.
	Promedio anual de las concentraciones diarias de 24 h (50 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>10</sub> y 15 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>2.5</sub> , 24 horas)	Se obtiene a partir de las concentraciones diarias de acuerdo a los criterios de suficiencia especificados en la <a href="#">NOM</a> , que requieren de un mínimo de 3 trimestres con 75% de muestras válidas para poder calcular el valor anual.
O <sub>3</sub>	Máximo horario anual (0.110 ppm, 1 h)	Se obtiene a partir de las concentraciones horarias. Si el valor obtenido durante un año es mayor que 0.110 ppm, indica que se incumplió la norma horaria, dado que en esta se especifica que dicho

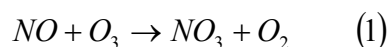
		valor no debe de rebasarse durante el año.
	Quinto máximo anual de los promedios de 8 h (0.08 ppm, 8 h)	Se calcula a partir de las concentraciones diarias de los promedios móviles de 8 horas. Este indicador se obtuvo de acuerdo con los lineamientos técnicos de suficiencia de al menos el 75% de las concentraciones diarias durante el año establecidos en la <a href="#">NOM</a> . Se trata del estimador central de las concentraciones diarias para cada año.
<b>PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub></b>	Percentil 98 de las concentraciones diarias de 24 h (120 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>10</sub> y 65 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>2.5</sub> , 24 h)	Se calcula a partir de las concentraciones diarias de todo el año de acuerdo a los criterios de suficiencia especificados en la <a href="#">NOM</a> , que requieren de un mínimo de 3 trimestres con 75% de muestras válidas para poder calcular el percentil 98. El Percentil 98 significa que el 98% de las mediciones deben estar por debajo del límite estipulado en la norma, permitiéndose un 2% de mediciones por arriba de dicho límite.
	Promedio anual de las concentraciones diarias de 24 h (50 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>10</sub> y 15 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>2.5</sub> , 24 horas)	Se obtiene a partir de las concentraciones diarias de acuerdo a los criterios de suficiencia especificados en la <a href="#">NOM</a> , que requieren de un mínimo de 3 trimestres con 75% de muestras válidas para poder calcular el valor anual.

## 2.15 Factores que influyen en el incremento de la contaminación atmosférica

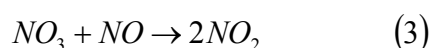
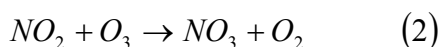
### 2.15.1 Química atmosférica

La química del  $\text{NO}_3$ ,  $\text{O}_3$  y los compuestos orgánicos volátiles (VOC's) así como los cambios en la composición de los aerosoles influyen en los niveles de los contaminantes del aire durante la noche y al día siguiente (Stutz et al., 2009). Tanto la radiación solar como la micrometeorología influyen en la composición y en la homogeneidad de los contaminantes en las diferentes capas de la atmósfera.

La química nocturna en las ciudades está dominada por las reacciones de varios óxidos de nitrógeno. El  $\text{O}_3$  reacciona con el  $\text{NO}$  emitido, reacción 1, que proviene de la emisiones de diferentes fuentes y tiene una tendencia de mezclado vertical que depende básicamente de la química atmosférica que se lleva a cabo durante la noche (Stutz *et al.*, 2009).



La reacción 1 influye en los perfiles verticales del  $\text{O}_3$  y del  $\text{NO}_2$  que son precursores de especies para los precursores radicales del  $\text{NO}_3$ ;



La importancia de la reacción 3 depende de la velocidad de emisión del  $\text{NO}$ , el mezclado vertical del  $\text{NO}$  y las reacciones de competencia del  $\text{NO}$  con el ozono (Geyer *et al.*, 2004).

Las reacciones del  $\text{NO}_3$  con los hidrocarburos, en particular el isopreno y los terpenos proporcionan información adicional de la formación de los aerosoles orgánicos secundarios. Por ejemplo la reacción del isopreno con el  $\text{NO}_3$  se da entre un 4.3- 23.8% y puede reaccionar con partículas de aerosol, (Stutz *et al.*, 2009).

Las partículas pueden formarse en eventos primarios, cuando son emitidas por las fuentes móviles y por procesos industriales, las denominadas secundarias se forman vía conversiones de gas a partícula. La formación y el crecimiento de las partículas ultrafinas durante eventos de nucleación han sido objeto de diferentes estudios y en los cuales se han propuesto diferentes mecanismos de formación (Shields, *et al.*, 2008).

#### 2.15.2 Influencia de las condiciones ambientales en la tendencia de dispersión de las partículas.

Todos los contaminantes atmosféricos que son emitidos por fuentes puntuales (chimeneas) o por fuentes móviles (autos, aviones etc.) se distribuyen, transportan, dispersan o concentran de acuerdo a las condiciones meteorológicas y topográficas de los lugares donde son generadas. En términos generales se puede decir que los contaminantes atmosféricos son emitidos, transportados y difundidos en la atmósfera.

Para poder establecer sus patrones de transporte y dispersión es necesario utilizar modelos matemáticos para los cuales se requieren no solamente las tasas de emisión sino los mecanismos que influyen en su transporte y dispersión (Wark y Warner 1998).

La dispersión de un contaminante atmosférico está influenciada principalmente por tres factores:

- a) el movimiento medio general del aire que transporta al contaminante en la dirección del viento.
- b) las fluctuaciones turbulentas de la velocidad que dispersan al contaminante en todas direcciones.
- c) La difusión de masa debido a los gradientes de concentración.

Adicionalmente las características aerodinámicas de las partículas como son su tamaño, forma y peso afectan la tasa de deposición o su permanencia en el aire. La dirección del viento no sólo tiene un efecto en la concentración de los contaminantes sino en la correlación entre contaminantes (Noble *et al.*, 2003).

Algunos estudios han demostrado qué tan importante es la influencia del viento en la concentración del material particulado y de su dispersión, Jones *et al.*, (2010) evaluaron tres regiones en el Reino Unido Marylebone Road, Kensington norte (región urbana) y Harwell (región rural), y establecieron la dependencia de la concentración de los contaminantes con la velocidad del viento.

### 2.15.3 Viento

El calentamiento diferencial del aire origina gradientes de presión horizontales, lo que conduce a un movimiento horizontal en la atmósfera por lo que la diferencia de temperatura entre los polos y el ecuador, los continentes y océanos es la causa de los movimientos a gran escala de los vientos.

La velocidad y la dirección de los vientos está influenciada principalmente por varios factores, la fuerza de la presión atmosférica ( $F_p$ ), la fuerza de fricción ( $F_f$ ) la fuerza de Coriolis ( $F_C$ ) y la aceleración centrípeta ( $a_c$ ) debida a que la Tierra gira, esta velocidad se conoce como velocidad de gradiente, figura 5.

Si se considera que solamente la dirección del viento se ve afectada por  $F_p$  entonces se tendrá una dirección perpendicular al vector de  $F_p$  y a  $F_C$ . Esto generalmente se observa a grandes altitudes y se conoce como el viento ideal llamado *geotrófico*  $V_g$ .

El desplazamiento angular del viento en la capa límite planetaria tiene una importante repercusión sobre el patrón de dispersión de los contaminantes procedentes de las fuentes fijas. Como la fuerza de retraso por fricción varía con la altura sobre el suelo, la cantidad de desplazamiento angular varía con la altura. La fuerza de fricción tiene un máximo, cerca de la superficie de la Tierra y cae a cero en la parte superior de la



capa límite, donde predomina en viento *geotrófico* o el de gradiente. De esta forma el ángulo de desplazamiento de la dirección del viento debido a la fricción varía desde un valor máximo cerca de la superficie terrestre hasta cero en la parte superior de la capa límite (Seinfeld, 1985).

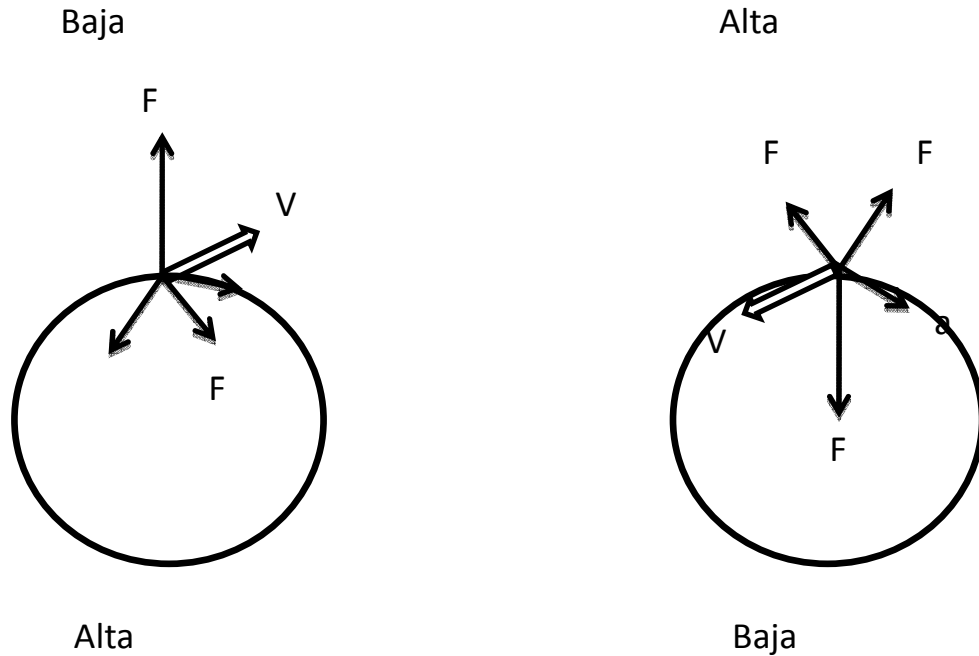


Figura 5. Equilibrios de las fuerzas en las regiones de alta y baja presión:  $F_p$ , fuerza de la presión,  $F_f$ , fuerza fricción,  $F_C$  fuerza de Coriolis,  $a_c$  aceleración centrípeta,  $V$ , velocidad del viento (Wark y Warner, 1998).

Cuando la velocidad el viento es  $< 6$  m/s en cambio de dirección podrá ser apreciable. Según los contaminantes son arrastrados en la dirección del viento, se dispersaran exteriormente en la dirección  $y$ , y verticalmente en la dirección  $z$ , figura 6. A medida que los contaminantes se difunden verticalmente en la capa límite, encontrarán diferentes corrientes principales en la dirección del viento, a diversas alturas, así el patrón de dispersión no será simétrico con respecto al eje de la dirección del viento en la parte superior de la fuente fija, sino que mostrará una cierta tendencia a la oblicuidad.

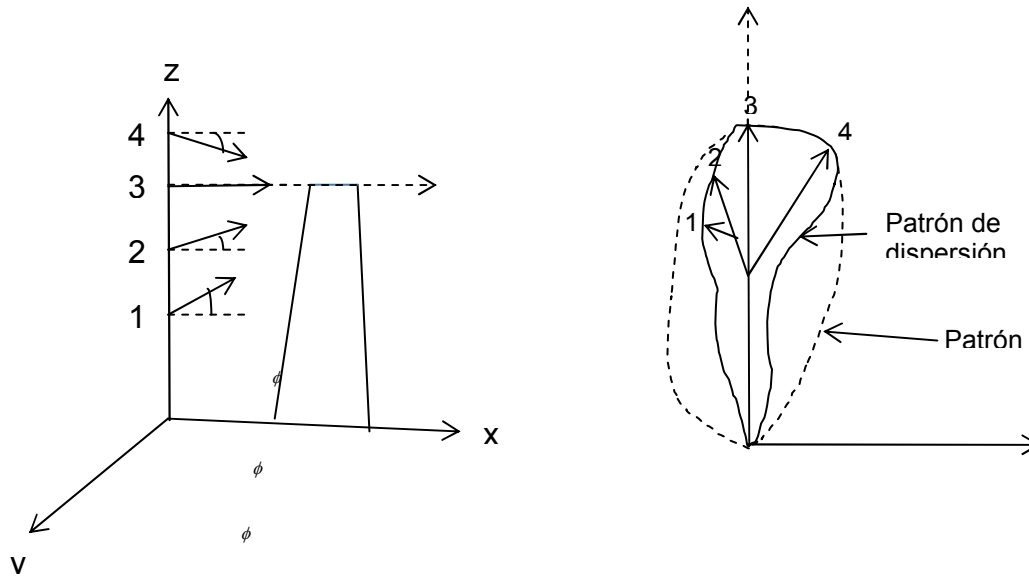


Figura 6. Efecto de las fuerzas de fricción en la capa límite planetaria, sobre la dirección del viento a diversas alturas (Wark y Warner, 1998).

#### 2.15.4 Temperatura y humedad relativa

Una de las características más importantes de la atmósfera es su estabilidad, que es la tendencia a resistir el movimiento vertical o suprimir la turbulencia existente. Esto influye sobre la capacidad de la atmósfera de dispersar los contaminantes que se emiten.

La atmósfera se considera como una columna estacionaria de aire en un campo gravitacional, y se aproxima a un gas ideal seco. En ausencia de efectos de fricción e inercia, el equilibrio de fuerzas estáticas sobre un elemento diferencial de espesor  $dz$  se puede expresar con la siguiente ecuación (29);

$$\partial P = -\rho g \partial z \quad (29)$$

Donde:  $P$ = presión atmosférica,  $g$  = gravedad,  $\rho$ = densidad y  $z$ = elevación

La primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado de gas ideal con un cambio cuasi estático se puede expresar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\partial q &= \partial v + \partial w = \partial u + P\partial V = (\partial h - P\partial V - V\partial P) + P\partial V = \partial h - V\partial P \\ &= C_p \partial T - \frac{1}{\rho} \partial P \quad (30)\end{aligned}$$

Para un proceso adiabático  $\partial q = 0$  por lo tanto,

$$C_p \partial T = \frac{1}{\rho} \partial P \quad (31)$$

Sustituyendo la ecuación 31 en la 29;

$$-\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{adia} = \frac{g}{C_p} = \frac{g(k-1)}{kR} \quad (32)$$

$k = \frac{C_p}{C_v}$ ; y si se supone  $g$  despreciable y  $C_p$  con la elevación, entonces el cambio de temperatura con la elevación en condiciones adiabáticas será constante e independiente de la elevación. En el SI el  $C_p$  aire = 1.005 kJ/kg°C y  $g = 9.806$  m/s<sup>2</sup> por lo que:

$$\Gamma = \left(-\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{adia, seco} \cong \frac{1^\circ C}{100m} \quad (33)$$

Conocido como grado de estabilidad  $\Gamma$  que es una medida de la capacidad de la atmósfera para dispersar los contaminantes emitidos dentro de la misma. Se establece una norma atmosférica internacional conocido como gradiente normal de T expresado de la siguiente forma:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{normal} = -\frac{0.0066^\circ C}{m} = \frac{0.66^\circ C}{100m} \quad (34)$$

Es necesario conocer el grado de estabilidad de la atmósfera para poder estimar la capacidad de la atmósfera para dispersar los contaminantes que recibe de fuentes naturales y antropogénicas. Se define una atmósfera estable como aquella que no

muestra un mucho mezclado o movimientos verticales cerca de la superficie del suelo tienden a permanecer estáticos. El mezclado significativo de los contaminantes en la baja atmósfera depende básicamente de dos factores:

- a) el gradiente de temperatura
- b) la turbulencia mecánica debida a la acción cortante del viento

Cuando la temperatura aumenta con la altura, la tasa de cambio es negativa y la condición atmosférica se conoce como una *inversión*. Es una condición de gran estabilidad y se caracteriza por un gradiente positivo de temperatura potencial relativamente grande. El efecto de la inversión es reducir la dispersión vertical de los contaminantes y así aumenta la concentración local. Existen varios tipos de inversiones pero las más importantes son las formadas por el descenso de una capa de aire dentro de una masa de aire a alta presión, y las formadas por la radiación nocturna de la superficie del suelo a la atmósfera local, El primer tipo se conoce como *inversión por asentamiento*. Es una capa de inversión cuya base está usualmente a cierta distancia de la superficie terrestre. Este tipo de inversión está formada por la compresión adiabática y el calentamiento de una capa de aire según desciende a alturas inferiores en la región de un centro de alta presión.

La parte superior se calienta más rápidamente que la parte inferior de la misma. Las inversiones por asentamiento ocurren sobre las fuentes de emisión y por lo tanto no contribuyen a los problemas de contaminación a corto plazo. No obstante este tipo de inversión puede persistir durante varios días y contribuir en grande a la acumulación a largo plazo de los contaminantes.

### 2.15.5 Perfil de la velocidad del viento

Debido a la condición atmosférica más estable durante la noche, el perfil nocturno es usualmente más pronunciado que el diurno. La variación de la velocidad del viento se estabiliza en este caso a una altura de aproximadamente 600 m. Por encima de esta altura el efecto de fricción es despreciable y, la velocidad del viento se convierte en la velocidad del viento gradiente.

### Rosa de los vientos

Los patrones característicos del movimiento del aire local se pueden presentar en forma grafica. Los datos se reportan usualmente para ocho direcciones primarias y ocho secundarias de la brújula (16 direcciones del viento). Se debe disponer de un conjunto completo de rosas de los vientos para todo el año, con el fin de predecir la dispersión de los contaminantes en la atmósfera local, los datos de velocidad y dirección pueden presentar una amplia variación de un mes al otro.

Los fenómenos de dispersión se ven afectados principalmente por la velocidad promedio del viento y por la turbulencia existente (Seinfeld, 1985), (Wark y Warner, 1998).

### 2.15.6 Efecto de la isla calórica

La atmósfera en una ciudad está influenciada por el tipo de construcciones, si hay grandes espacios abiertos, si hay edificios, todo esto hace que los vientos sigan patrones de comportamiento locales. Cuando se evalúa la concentración de los contaminantes es importante evaluar esta situación ya que algún comportamiento no previsto de la dispersión y de la concentración de los contaminantes se puede deber a esto (Noble, *et al.*, 2003). Debido a las superficies perpendiculares de los edificios y a las calles semejantes a barrancas el área urbana absorbe mayor cantidad de energía solar durante el día y la conserva durante un periodo más largo durante la

noche. La ciudad libera también grandes cantidades de partículas. El fenómeno resultante se conoce como “isla calórica”.

Algunos estudios discuten este efecto en la interpretación de resultados y cómo en explanadas rodeadas de edificios altos la velocidad del viento aumenta y los resultados de concentración y dispersión no son representativos (Noble *et al.*, 2003). Otros autores han enfatizado el hecho de que la concentración de algunas especies químicas que interaccionan con las partículas tienen una dinámica mayor durante el periodo de la noche debido a la energía solar remanente. Por eso los resultados en los niveles de concentración de material particulado es mayor durante la noche (Shields *et al.*, 2008).

#### 2.15.7 Radiación solar

La cantidad de radiación solar incidente absorbida en la superficie del terreno es una función de la absorbancia de dicha superficie; esto es, si la superficie es de tierra, roca, agua, hielo, nieve o cualquier otro elemento. El suelo desnudo absorbe más radiación que por ejemplo el hielo. El agua absorbe mucho más radiación al ampliar su capa absorbente. La fracción de la radiación incidente que refleja una superficie se conoce como el albedo de la superficie, figura 7, (Wark y Warner, 1998).

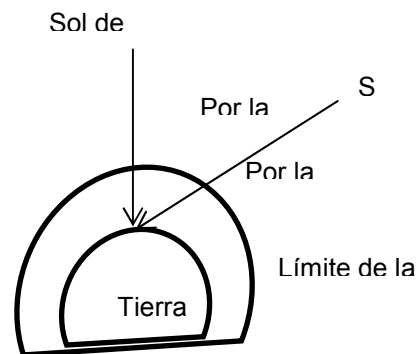


Figura 7. Variación con el ángulo de incidencia del espesor de la atmósfera atravesado por la radiación solar.

## 2.16 Contaminación atmosférica a nivel mundial

De acuerdo al reporte del foro internacional económico en su “*Outlook on the global agenda 2015*” (WEF, 2015) los problemas de contaminación atmosférica en el mundo son mayores en países de Latinoamérica ya que representan un grave problema. Considerado en porcentaje, les representa el 72% comparado con países de Europa a los que la contaminación grave sólo les representa el 36%, figura 8.

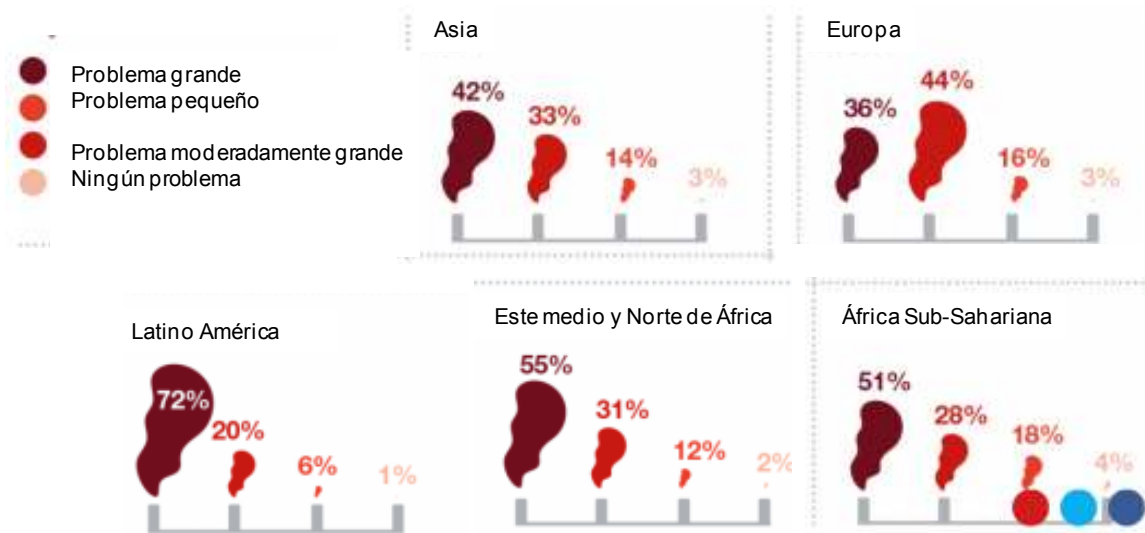


Figura 8. Clasificación de los problemas de contaminación en países en desarrollo de acuerdo al estudio *Global Burden of Diseases*.

Así mismo, el aumento en su industrialización ha producido niveles de contaminación insostenibles ya que su reducción implica el uso de tecnologías más avanzadas, generación de fuentes alternativas de energía a través de fuentes, solares, geotérmicas, eólicas e inclusive nucleares. Básicamente la industria de los países de Latinoamérica se sostiene en combustibles fósiles (WEF 2015).

En una escala global se cataloga a la contaminación producida en los países en desarrollo como la sexta más importante en el 2015, y para la contaminación producida en Asia la tercera. China es el mayor emisor de gases de efecto invernadero desde el 2005 y hasta el 2015 sigue en la misma posición, seguido de

Estados Unidos y la Unión Europea (WEF 2015). Brasil y la India son el quinto y octavo país que contaminan significativamente. Sin embargo si la contaminación se mide no en gases de efecto invernadero sino en partículas, por ejemplo las partículas (PM 2.5), la situación cambia y la India pasa a primer lugar junto con 20 de sus ciudades.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (por sus siglas en inglés OCDE) hizo una proyección del incremento de contaminación con PM<sub>10</sub> en 2020-2050 y los lugares más contaminados serán para esos años el sureste de Asia, seguidos de la India, China, Indonesia, Rusia, Brasil y África, figura 9, hay que considerar que el nivel máximo considerado por la Organización Mundial de la Salud es de 20 µg/m<sup>3</sup>.



Figura 9. Proyección de partículas PM10 en los años 2020 y 2050 para algunas regiones y países del mundo.

Al evaluar el caso de China, respecto a la contaminación atmosférica, se encontró que ha tenido un aumento muy rápido en su sector manufacturero que produce energía y por lo tanto es el país en el mundo que más crecimiento de su economía



ha tenido, sin embargo esto tiene un costo muy grande en cuestión de contaminación y de acuerdo al estudio *Global Burden of Disease* (Murray1996] la contaminación atmosférica de China ha contribuido con 1.2 millones de muertes prematuras en el 2010, lo que de acuerdo a este estudio representa una pérdida de 25 millones de años de vida saludable.

Los países en desarrollo tienen que encontrar la forma de seguir creciendo económicamente pero a la par establecer mecanismos para reducir los contaminantes provenientes del uso de combustibles fósiles. Debe incrementarse el uso de energías renovables, asegurar que las industrias con alto grado de contaminación como las de refinación del petróleo, las de generación eléctrica con combustibles fósiles, las mineras, cementeras y los ingenios azucareros estén reguladas adecuadamente y promover la utilización de energía limpia. Por lo anterior es necesario tener programas de investigación para desarrollar nuevas tecnologías o adaptar las ya existentes, por ejemplo desarrollar la capacidad de la energía solar, eólica y establecer sistemas de captura de carbono. En el 2015 se llevó a cabo en Cancún México el foro del *World Economy Forum*, donde se formalizó un fondo económico para apoyar los estudios de cambio climático de los países en desarrollo (WEF 2015). Aun así falta ver cómo se va a distribuir el dinero del fondo y qué tipo de investigación se apoya para tener un impacto efectivo en la reducción de gases de tipo invernadero a corto plazo, y qué políticas usan los países en desarrollo para regular las emisiones.

## 2.17 Situación actual en la región de El Bajío

Los Estados Unidos Mexicanos tienen una superficie de 1 958 201 km<sup>2</sup>, sólo considerando el territorio continental, y ocupa el tercer lugar en tamaño en Latino América, está dividido en 31 estados y un D.F.

Se puede dividir de acuerdo a su geografía en 13 regiones las cuales son, Sierra de California, Desierto de Sonora, Desierto de Chihuahua, Bolsón de Mapimí (depresión desértica, Durango, Chihuahua y Coahuila), Altiplanicie Mexicana, Sierra Madre

Occidental, Sierra Madre Oriental, El Bajío, Cordillera Volcánica, Sierra Madre del Sur, Sierra Madre de Oaxaca, Montes de Chiapas, Mesa Central de Chiapas [INEGI].

Es la región que se localiza en el suroeste de la altiplanicie Mexicana. Es el territorio no montañoso del estado de Guanajuato, las llanuras al oeste de Querétaro, los valles de Morelia y La Piedad en Michoacán y las llanuras orientales de Jalisco. Es una región fértil y es considerada la región agrícola más importante del País. Así mismo la actividad industrial ha sido de gran importancia por lo que hay un corredor industrial que va desde Querétaro hasta Guadalajara.

El crecimiento industrial en la zona del Bajío ha sido exorbitante con la creación de complejos industriales como los automotrices y aeroespaciales. En el primer semestre del 2012 la tasa de crecimiento de los complejos industriales fue del 10% siendo que en el norte del país sólo fue de 0.35%. A esta región llegaron empresas como Bombardier, Eurocopter, Pirelli, Volkswagen, Honda, Mazda, Nissan y General Motors.

Así mismo la Secretaría de Economía cuenta con datos de que la zona industrial del Bajío es la de más alto crecimiento en toda América Latina. En el 2012 las cuatro entidades que conforman la zona del Bajío captaron 1419.2 millones de dólares de inversión extranjera directa, que equivalen al 11% del total de recursos que atrajo el país en su conjunto (SE 2015).

Por ejemplo sobre la carretera Silao-León se encuentra el parque industrial “Puerto Interior” que es uno de los *clusters* más grandes e importantes de América Latina, alberga 41 empresas del sector automotriz y se encuentra la primera fábrica de llantas Pirelli en México.

En Querétaro ha habido un crecimiento económico desde 1994 con un Producto Interno Bruto (PIB) de más de 5%, de acuerdo a las cifras del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2015). El 2011 fue el año de mayor crecimiento para el estado ya que el sector industrial recibió inversiones superiores a los mil 28 millones de dólares.

De acuerdo a la Secretaría de Desarrollo Sustentable de Querétaro (SEDESU), desde 2010 se han instalado más de 100 empresas nuevas, de los sectores, automotriz, aeronáutico, alimentos y tecnologías de la información. Actualmente Querétaro cuenta con 22 parques industriales y este 2015 se van a abrir 7 nuevos parques y uno de ellos estará en los límites de San Juan del Río y Tequisquiapan (INEGI 2015). Los parques industriales son: Querétaro, Santa Rosa, Juríca, Santiago Micro, Benito Juárez, Tecnológico, La Montaña, San Pedrito Peñuelas, La Cruz, Aeropuerto, Agro, El Pueblito, La Noria, Finsa, Bernardo Quintana, El Marqués, Querétaro Aerospace, Balvanera, Valle de Oro, Nuevo San Juan, Aerotech, Parque Tecnológico Innovación.

El estado tiene una superficie de 11 684 km<sup>2</sup> y de acuerdo a los resultados preliminares del último censo de población del 2010 la población es de 1 827 985 habitantes.

El indicador trimestral de la actividad económica estatal (ITAEE), muestra la evolución económica a corto plazo. Para el cuarto trimestre del 2014, Querétaro registró un incremento en su índice de actividad económica de 14.2% con respecto al mismo periodo del año anterior (SE 2015) como se muestra en el cuadro 12.

Cuadro 12. Posición de Querétaro a nivel nacional de acuerdo al indicador trimestral de la actividad económica estatal ITAEE.

<b>Denominación</b>	<b>Variación % 4<sup>to</sup> trimestre 2014</b>	<b>Posición a nivel nacional</b>
Total nacional	2.6	
Querétaro	14.2	1
Actividades primarias	33.4	1
Actividades secundarias	23.6	3
Actividades terciarias	6.8	2

El estado de Aguascalientes tiene un superficie de 5 613 km<sup>2</sup> con una población de 1 184 996 personas de acuerdo al último censo. El PIB en el 2013 representó el 1.1% respecto al total nacional y en comparación con el 2012 tuvo un incremento del 4.7%<sup>1</sup>. El indicador ITAEE para el cuarto trimestre de 2014 coloca al estado en el segundo lugar a nivel nacional con un crecimiento de tasa anual total de su economía del 14.1%, respecto al mismo periodo del año anterior. Sus principales actividades económicas son en los sectores de la construcción, automotriz, agro-industrial, robótica, tecnologías de la información, aeroespacial-aeronáutico. Cuenta con 12 parques industriales y/o tecnológicos.

Guanajuato cuenta con una superficie de 30607 km<sup>2</sup> su población es de 5 486 372 habitantes de acuerdo al censo de población y vivienda 2010. El Producto Interno Bruto (PIB) en el 2013 representó el 4.0% con respecto al total nacional y en comparación con el año anterior tuvo un incremento del 3.9%. El indicador ITAEE lo coloca en el cuarto trimestre del 2014 en el quinto lugar a nivel nacional y registró un incremento en su índice de actividad económica del 7.6% con respecto al mismo periodo del año anterior.

Sus principales actividades económicas se encuentran en los sectores, agroindustrial, autopartes-automotriz, productos químicos, cuero-calzado, confección-textil-moda. Cuenta con 17 parques industriales.

Jalisco tiene una superficie de 78 588 km<sup>2</sup> con una población de 7 350 682 habitantes de acuerdo a los datos del censo de población y vivienda 2010. El indicador ITTAE para el estado lo coloca en el lugar 14 a nivel nacional y un incremento de su índice de actividad económica de 3.8% con respecto al periodo del año anterior<sup>1</sup>. Sus principales actividades económicas son, servicios inmobiliarios, construcción, agricultura, cría y explotación de animales e industria alimentaria. Cuenta con 50 parques industriales.

Los estados que comprenden la región del Bajío se encuentran dentro de los primeros lugares en exportaciones por ejemplo en el 2013, Jalisco, Guanajuato, Querétaro y Aguascalientes, ocuparon los lugares 7, 11, 13 y 16 respectivamente,

figura 10. De acuerdo al informe *Doing Business* del 2014, publicado por el Banco Mundial y la Corporación Financiera Internacional, que clasifica a las economías por su facilidad para hacer negocios, la ciudad de Querétaro ocupa el lugar 17 y a Guadalajara en el lugar 21.



Figura 10. Valores de exportaciones en miles de millones de dólares (mmd) en el 2013. Posición anual nacional.

El crecimiento en la actividad económica de la región ha ocasionado la migración de personas que demandan vivienda, infraestructura y servicios. Se ha incrementado el congestionamiento de los sistemas de transporte y aumentó el parque vehicular de tal forma que las vías rápidas de acceso a las ciudades están rebasadas.

La densidad de población de las ciudades de Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro es de 190, 160 y 137 habitantes/km<sup>2</sup> respectivamente ocupan el 5<sup>to</sup>, 6<sup>to</sup> y

8<sup>vo</sup>, lugar de los estados con mayor densidad de población, figura 11, siendo la media nacional de 53 habitantes/km<sup>2</sup>.

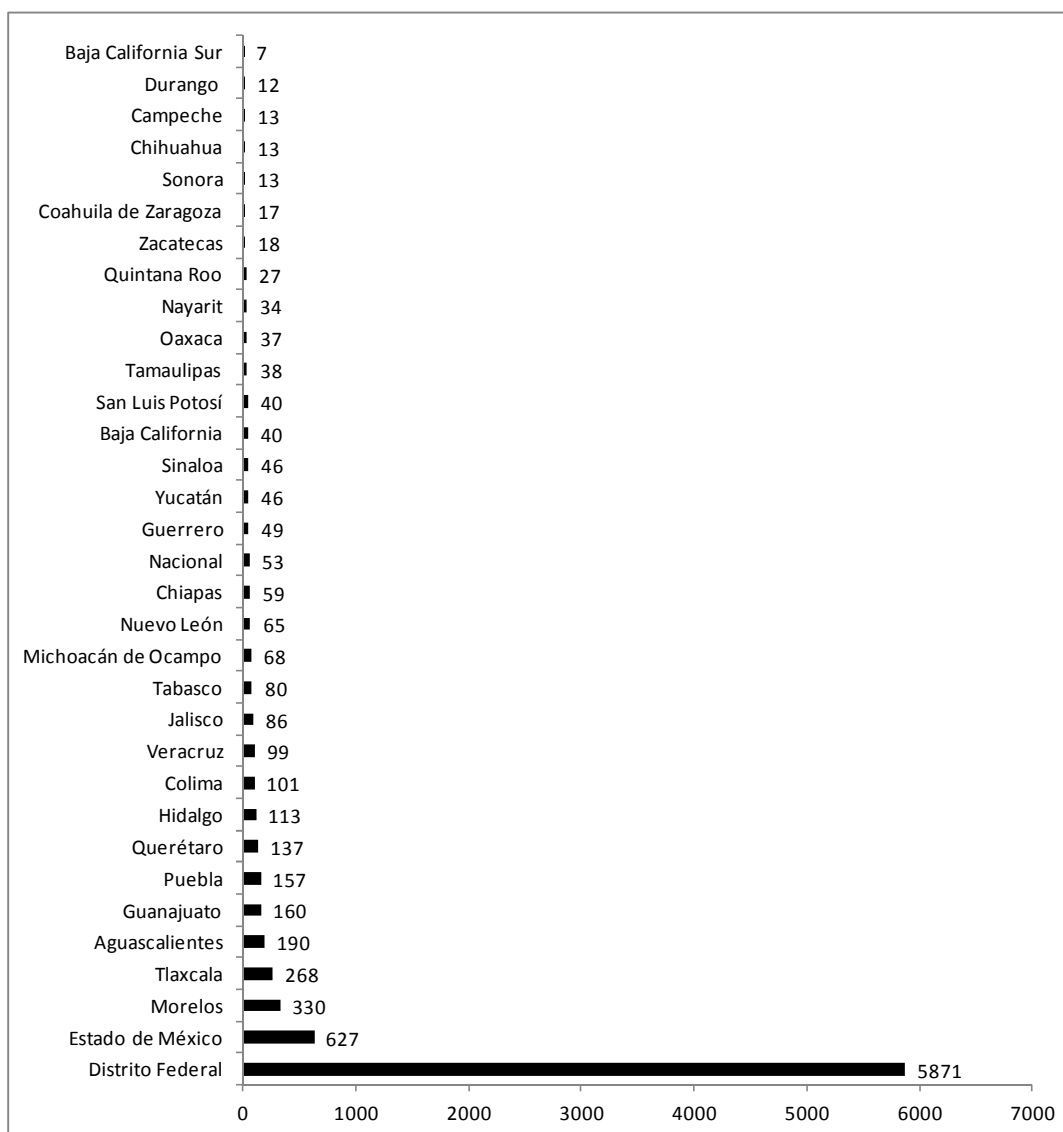


Figura 11. Densidad de población a nivel Nacional 200-2005. INEGI 2010.

Por otro lado se ha incrementado el deterioro de la sanidad (basura y drenaje) y por lo tanto la contaminación ambiental se ha incrementado. En la figura 12 se observa como el incremento en la generación de residuos en Querétaro ha alcanzado en el 2008 las 562 miles de toneladas y Jalisco 2710. Esto está de acuerdo al crecimiento urbano que han tenido las ciudades.

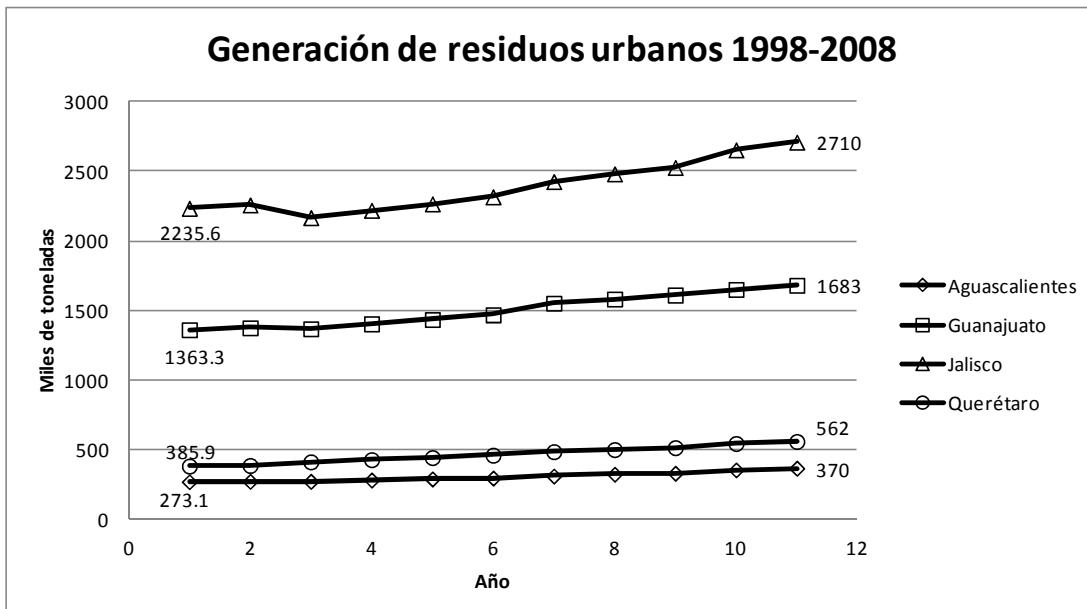


Figura 12. Generación de residuos urbanos 1998-2008. INEGI 2010.

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biinegi/>

### 2.17.1 Incremento en el parque vehicular de las ciudades del Bajío

Por ejemplo en el estado de Querétaro los reportes de la Secretaria del Transporte (INEGI) respecto al aumento del parque vehicular muestran que desde 1980 hasta el 2014 se observa un incremento exponencial con sus mayores picos en 1996 y 2003, figura 13, esto sin considerar aquellos vehículos que no se encuentran registrados en el estado y provienen del Distrito Federal, Estado de México, Guanajuato y Jalisco, sólo por mencionar algunos. En Querétaro de 2003 a 2014 se registraron en promedio 21000 automóviles al año. A nivel nacional en el 2014 se tienen registrados 6 426 930 automóviles, Querétaro 342 257, Aguascalientes 307 473, Guanajuato 885 201 y en Jalisco 1 721 252.

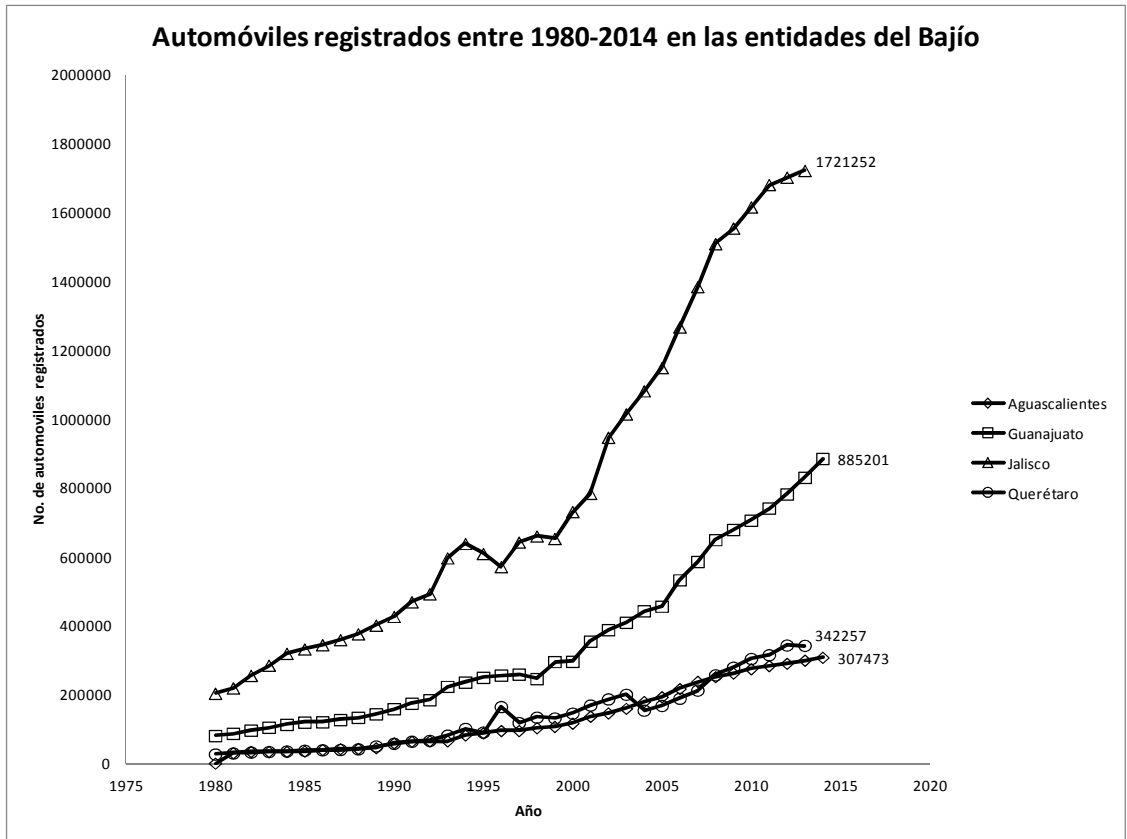


Figura 13. Automóviles registrados en los estados de Querétaro, Aguascalientes, Guanajuato y Jalisco en el periodo 1980-2014.

Así mismo, el transporte de pasajeros se ha incrementado en ese mismo periodo de años de forma exponencial lo que indica que la demanda de servicios va en aumento debido al incremento en el número de habitantes y al establecimiento de nuevas industrias. Es interesante también notar cómo el número de motocicletas ha crecido con la misma tendencia que los otros medios de transporte lo que nos podría indicar la deficiencia en el transporte público y el aumento en los servicios de entregas a domicilio o mensajería. Hasta 2012 se tienen 3336 camiones de pasajeros y 10661 motocicletas, figura 14. Los vuelos de aviones contribuyen también a la contaminación y han aumentado, figura 15.



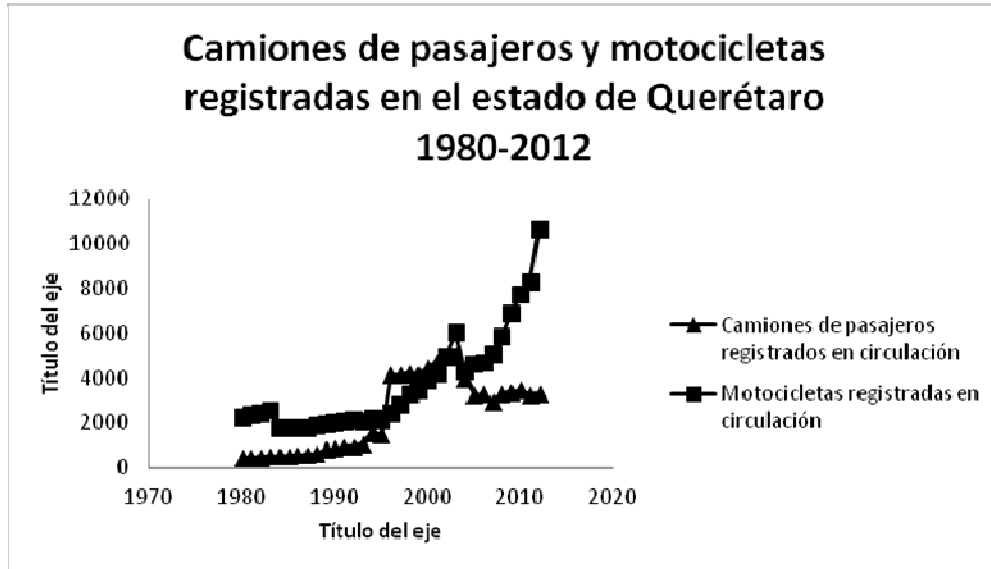


Figura 14. Camiones de pasajeros y motocicletas registradas en el estado de Querétaro en el periodo 1980-2012.

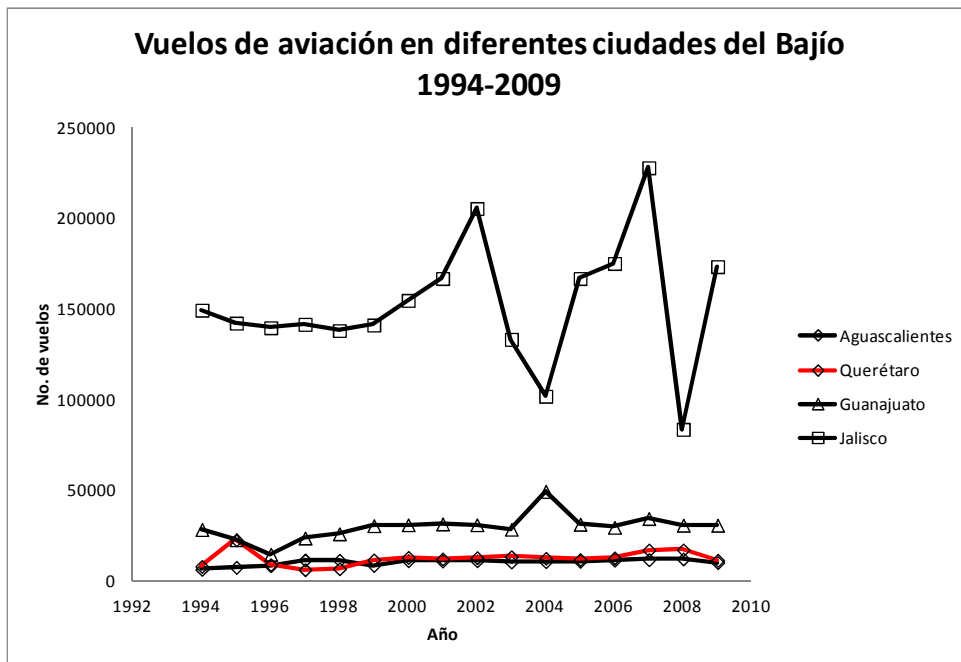


Figura 15. Número de vuelos en diferentes ciudades del Bajío 1994-2009

Como el número de vehículos ha ido en aumento y las empresas y parques industriales la demanda de combustibles fósiles ha ido en aumento por lo que las estaciones de servicio aumentaron proporcionalmente.

De acuerdo al directorio de abril del 2015 de estaciones de servicio de PEMEX hay 1741 en la región del Bajío (INEGI 2015). En el cuadro 13 se presentan el total por estado y para algunas de sus ciudades más importantes.

La tendencia en el establecimiento de nuevas estaciones va en aumento constante de acuerdo a los datos de PEMEX, en la figura 16 se presenta el incremento observado desde 2003 a 2015 en los estados de Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco y Querétaro.

Cuadro 13. Número de estaciones de servicio en diferentes ciudades de la región de El Bajío.

<b>Entidad</b>	<b>No de estaciones de servicio</b>
Estado de Aguascalientes	<b>124</b>
Aguascalientes	<b>90</b>
Estado de Querétaro	<b>223</b>
Santiago de Querétaro	<b>111</b>
San Juan del Río	<b>25</b>
Corregidora	<b>20</b>
Estado de Guanajuato	<b>548</b>
Celaya	<b>57</b>
Irapuato	<b>61</b>
León	<b>143</b>
Salamanca	<b>34</b>
Estado de Jalisco	<b>846</b>
Guadalajara	<b>125</b>

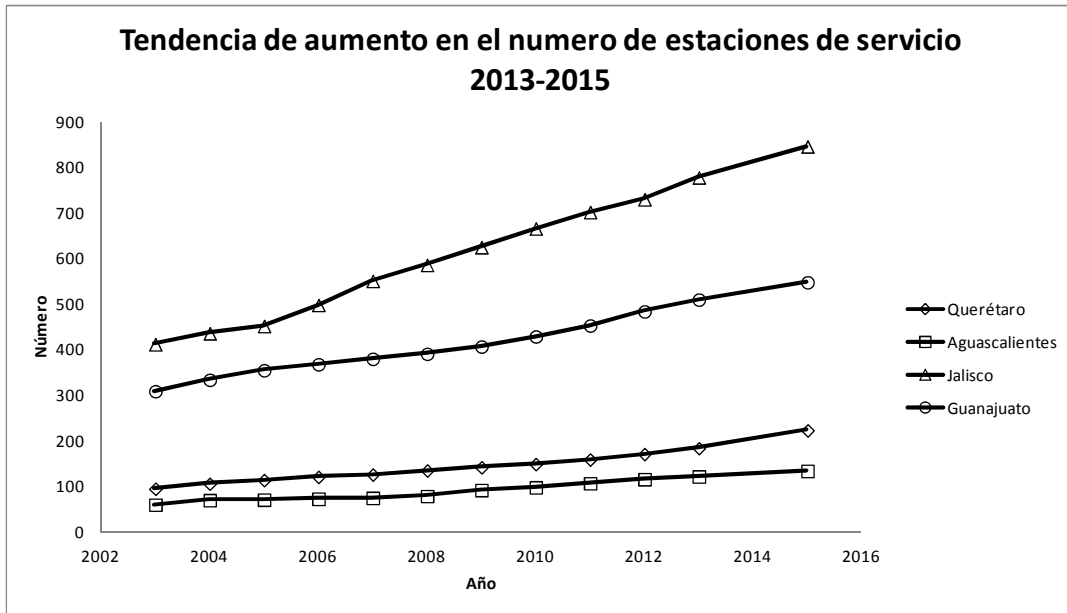


Figura 16. Tendencia de aumento en el número de estaciones de servicio en el periodo 1980-2012.

Los productos de refinación que vende PEMEX son 9, cuadro 14, dentro de los cuales se encuentran las gasolinas y el diesel de diferentes calidades en cuanto al contenido de azufre, compuestos aromáticos, densidad específica entre otros. La calidad de los productos es uno de los puntos más importantes para poder disminuir la contaminación de óxidos de azufre, óxidos nitros, monóxido de carbono y partículas al aire ambiente.

**Cuadro 14.** Productos petroquímicos vendidos por PEMEX.

<b>Producto</b>	<b>Características y principal uso</b>	<b>Contenido de Azufre</b>
Pemex premium UBA	Gasolina de bajo contenido de azufre y mayor octanaje, formulada para automoviles con convertidor catalítico y motores de alta relación de compresión	No especificado
Pemex Magna	Gasolina sin plomo formulada para automóviles con convertidor catalítico y en general motores de combustión interna a gasolina con requerimientos, por lo menos, de 87 octanos.	80-1000 ppm
Pemex Diesel	Combustible utilizado en motores de combustión interna para vehiculos de carga y transportes de pasajeros.	500 mg/kg
Diesel Marino especial	Combustible para embarcaciones con motores a Diesel	500 mg/kg
Diesel industrial Bajo azufre	Combustible de uso industrial con bajas emisiones de contaminantes	
Combustóleo pesado	Combustible utilizado en procesos industriales en quemadores, calentadores, calderas, generadores de energía eléctrica y embarcaciones mayores.	4% en peso
Gasavión	Combustible utilizado para aeronaves equipados con motores del ciclo Otto	No especificado
Turbosina	Combustible utilizado en los aviones con motores de turbina o a reacción	0.30% en peso
Parafinas	Materias primas utilizadas en la fabricación de aceites lubricantes y otros insumos de uso industrial	No aplica
Otros	Gasnafta, gasolvente, coque de petróleo, citrolina, asfaltos y lubricantes básicos.	No aplica

La industria manufacturera ha obviado el daño que ocasiona al ambiente, entre otros, debido a sus sistemas de logística y de sus cadenas de suministros. Varias empresas de Estados Unidos, Inglaterra y Suiza han evaluado sus cadenas de producción para conocer en dónde impactan más al ambiente y encontraron que es

en su cadena de provisión ya que depende básicamente del transporte el cual tiene un alto impacto (Golicic, et al., 2010).

Los medios de transporte de las empresas más utilizados en México son por carreteras lo que implica la generación de grandes cantidades de dióxido de carbono y partículas. El transporte motorizado es cuatro veces menos eficiente que el ferrocarril, desafortunadamente en México el transporte por ferrocarril es de alrededor del 3.04 % y el terrestre es del 96.96%, cuadro 15.

Cuadro 15. Cuentas nacionales por tipo de transporte en % miles de pesos durante 2003-2009. Comparación entre estos tres tipos de transporte. INEGI, Banco de Información económica.

<b>Tipo de transporte</b>	<b>% miles de pesos durante 2003-2009</b>
Ferrocarril	3.04
Autotransporte de carga	47.79
Terrestre de pasajeros	49.17

Es importante reconocer los diferentes factores que incrementan los problemas de impacto ambiental relacionados con el transporte terrestre, utilizado por diferentes empresas, básicamente hablando de emisiones a la atmósfera (Mena, 2010).

Para evaluar la contaminación se considera la distancia que recorren los transportes ya que a mayores distancias el impacto mayor a la atmósfera se debe a las emisiones de CO<sub>2</sub>. La tendencia de crecimiento constante implica que el impacto ambiental crece de manera significativa.

### 3. Hipótesis y objetivos

#### 3.1 Hipótesis

Se puede establecer el patrón de la dispersión de los contaminantes criterio en Salamanca y Querétaro de la zona del Bajío a través del uso del modelo numérico HYSPLIT.

#### 3.2 Objetivo general

Establecer el patrón de la dispersión de los contaminantes criterio en Salamanca y Querétaro de la zona del Bajío a través del uso del modelo numérico HYSPLIT.

#### 3.3 Objetivos específicos

- Analizar gráficamente los datos del monitoreo de la concentración para los contaminantes criterio en Salamanca y Querétaro.
- Utilizar el modelo HYSPLIT para establecer el patrón de dispersión de los contaminantes.
- Evaluar la interacción de la contaminación atmosférica entre las diferentes ciudades estudiadas a través del análisis de matriz del modelo HYSPLIT.

## 4.0 Metodología

### 4.1 Materiales y Métodos

Dada la complejidad de las ecuaciones que rigen la dispersión de los contaminantes, el empleo de métodos numéricos es de gran importancia para encontrar su solución. Las ventajas de usar estos métodos es que eliminan algunos de los sesgos sistemáticos de los modelos, las probabilidades generales son confiables, proporcionan predicciones adaptadas a lugares específicos. Sin embargo los inconvenientes son la importancia que tienen las bases de datos, la necesidad de adaptación a los cambios de modelos y los casos extremos suelen estar fuera de las estadísticas.

### 4.2 Caso de estudio

Este estudio se desarrolló para la ciudad de Santiago de Querétaro y se evaluó la influencia que tiene la contaminación de la zona del bajío donde existe un corredor industrial desde Querétaro hasta Guadalajara, específicamente Salamanca. Las ciudades estudiadas serán Salamanca y Querétaro.

En Salamanca se encuentra la refinería Ing. Antonio M. Amor que está ubicada a una altitud sobre el nivel del mar de 1720 m con las coordenadas geográficas a la latitud de  $101^{\circ}11'51''$  y una longitud de  $20^{\circ}34'09''$  (INEGI, 2010).

El estado de Querétaro de Arteaga colinda, al norte con Guanajuato y San Luis Potosí; al este con San Luis Potosí e Hidalgo; al sur con Hidalgo, México y Michoacán de Ocampo; y al oeste con Guanajuato. Sus coordenadas geográficas son al norte  $21^{\circ} 40'$ , al sur  $20^{\circ} 01'$  de latitud norte; al este  $99^{\circ} 03'$ , al oeste  $100^{\circ} 36'$  de longitud oeste.

### 4.3 Clima

En el estado de Querétaro el 51% de la superficie del estado presenta clima seco y semiseco localizado en la región centro; el 24.3% presenta clima cálido subhúmedo en la región de la Sierra Madre Oriental; el 23% presenta clima templado subhúmedo localizado en la región sur, centro y noreste; el 1% presenta clima cálido húmedo hacia el noreste y el restante 0.7% presenta clima templado húmedo al noreste de estado. La temperatura media anual es de 18°C, la temperatura máxima promedio es de 28°C y se presenta en los meses de abril y mayo, la temperatura mínima promedio es de 6°C durante el mes de enero. La precipitación media estatal es de 570 mm anuales (Comisión estatal de agua CEA, 2010).

Para las características del terreno existe una base de datos global *North American Regional Reanalysis* (NARR) hecha y mantenida por el servicio nacional meteorológico (NSW) de los Estados Unidos que funciona para el modelo MM5. Es una base de datos meteorológicos e hidrológicos, de datos históricos e información generada por el NWS o que es recibida de otras fuentes oficiales. También tiene acceso a observaciones en tiempo real (NWS y NOAA, 2010).

### 4.4 Archivos de datos meteorológicos

El Servicio Meteorológico Nacional de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) ejecuta una serie de análisis y previsiones de equipo operacional. Del laboratorio del NOAA utiliza generalmente los datos del modelo del NCEP para el uso en el transporte aéreo de calidad y los cálculos de modelos de dispersión.

En 1989 el Laboratorio de Recursos del Aire (ARL) del NOAA comenzó a archivar algunas de estas bases de datos para que sean utilizadas en estudios de investigación futuros. El ARL ha archivado y sigue archivando bases de datos. El NOAA tiene modelos numéricos del clima uno de ellos es el sistema de asimilación



de datos Global (por sus siglas en inglés, GDA) es el sistema utilizado por el modelo del sistema de pronóstico Global (por sus siglas en inglés, GFS) que hace observaciones considerando un espacio cuadrulado y tiene el objetivo de crear pronósticos del tiempo con datos obtenidos de observaciones. El GDA agrega los siguientes tipos de observaciones datos de globo, datos de viento generador de perfiles, informes de aviones, observaciones de radar y observaciones por satélite de la superficie.

Los datos del modelo GDAS pueden obtenerse a través de su página web del NOAA y están disponibles para trabajar con el modelo HYSPLIT entre otros modelos como especificados en la figura 17.

### Release Type, Meteorology & Starting Location

The screenshot shows a web form with the following sections and options:

- Release Type:** A dropdown menu currently set to "Unknown Material (Generic Mass, < 24 hrs)". A "More info" link is to the right.
- Meteorology:** A dropdown menu with a list of options: "GDAS (1 degree, global, 2006-present)", "NAM 12km (since 05/2007)", "GDAS (0.5 degree, global, 09/2007-present)", "EDAS 40km (U.S., 2004-present)", "EDAS 80km (U.S., 1997-2004)", "NGM (N.A., 1991-1997)", "REANALYSIS (global, 1948-present)", "WRF ARW", "CFSR", "NARR 32km (N.A., 1979-present)", "MM5", and "RESEARCH". A "More info" link is to the right.
- Source Location (enter using):** Includes several options:
  - Open Map Display
  - Decimal Degrees Latitude
  - DDD/MM/SS Latitude
  - City (Country or State: name: lat: lon): [dropdown]
  - Airport or WMO ID (i.e., dca): [input] ID Lookup
- Longitude:** Two input fields for longitude. The first is a single field with a "W" dropdown. The second is split into "Deg.", "Min.", and "Sec." fields, with a "W" dropdown.

Figura 17. Bases de datos disponibles para el modelo HYSPLIT.

#### 4.5 Modelo HYSPLIT

El modelo HYSPLIT requiere menos cantidad de datos por lo que proporciona una buena aproximación y es útil para los primeros estudios que se realicen tanto en cuestiones meteorológicas como en aspectos de dispersión de contaminantes.

Es por eso, que se utilizó para este trabajo, evaluando primero la trayectoria de los vientos *backward* de ciudad en ciudad y después en matriz, para este caso el modelo se modelo a la altitud de 1850 m. Se alimentaron los datos al modelo y después se utilizaron las altitudes de 2500 y 3000 m sobre el nivel del mar, cuando se trabaja ciudad por ciudad (modo normal). Las ciudades estudiadas en matriz fueron, Querétaro, y Salamanca, en el cuadro 12 se presentan los datos de longitud y altitud que son necesarios para utilizar el modelo. de forma individual Salamanca y Querétaro.

Adicionalmente se evaluaron las trayectorias de los vientos para la refinería de Salamanca cuya ubicación geográfica también se encuentra especificada en el cuadro 16.

Cuadro 16. Datos de latitud y longitud para diferentes ciudades del Bajío, INE 2011.

<b>Ciudad</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud sobre el nivel del mar (m)</b>
Querétaro	20.35	-100.23	1850
Celaya	20.31	-100.48	1704
Refinería Ing. Antonio M. Amor, Salamanca	20.34	-101.11	1721
León	21.07	-101.41	1804

La base de datos que se utilizó fue la de la estación meteorológica GDAS de 2006 al presente y se analizaron datos del 2006 al 2009 para las diferentes ciudades para que pudieran obtenerse de la base de datos del SINAICA en las mismas fechas y comparar los resultados del modelo con las mediciones con analizadores específicos para los diferentes contaminantes criterio. Después se utilizó la opción de evaluación de la dispersión en el modelo HYSPLIT para las mismas ciudades y en los modos, normal y de matriz.

#### 4.6 Procedimiento

El modelo HYSPLIT se puede utilizar desde internet o con la opción de obtener una versión en una PC. La versión libre que se puede bajar a una PC tiene la limitación de no contar con los datos meteorológicos. El modelo solicita información de la localización de GPS de donde se va a hacer la modelación de dispersión o trayectoria, altura de la fuente, salida de contaminantes, duración de la modelación. Antes de iniciar la modelación se selecciona la fuente de datos meteorológicos y la selección depende del lugar y año que se quiere modelar pues no todas las fuentes de modelación tiene todos los datos disponibles. En las figuras 18 y 19 se presenta la página donde se tiene que colocar los datos de modelación.

Uno de los problemas de los modelos es que se tiene que colocar la masa de salida de los contaminantes y este dato generalmente no se tiene por lo que se modela considerando un número de partículas o contaminantes determinado de no tener ningún dato se deja como 1 y se seleccionan las unidades correspondientes o simplemente se considera como masa. Los datos de concentración obtenidos entonces son una dilución de la fracción masa real de contaminantes emitida a la atmósfera. También se pueden obtener datos de masa por segundo por  $m^3$  ( $m\text{-s}/m^3$ ). En todos los casos se seleccionó un modelo Gaussiano para la modelación.



# Spain HYSPLIT



[Skip Top Navigation](#)

HOME > HYSPLIT Modelo de Dispersión

## HYSPLIT Modelo de Dispersión

### Detalles del modelo de Ejecución

Tipo de emisión: Unknown  
Ubicación de origen: Lat: 20.34 Lon: -101.11  
Término de origen: User Entered - 1 mass



### Meteorología: GDAS1

Salida: Concentración/deposición  
El GDAS1 archivo contiene los datos a partir de 0000 UTC 12/29/09.

[Cambiar los parámetros por defecto y Opciones de Visualización](#)

### Parámetros término fuente

<b>Hora de inicio (UTC):</b>	<a href="#">Ayuda</a>	año 09	mes 12	dia 29	hora 20
<b>Latitud de origen:</b>	<a href="#">Ayuda</a>	20.34 grados			
<b>Logitud de origen:</b>	<a href="#">Ayuda</a>	-101.11 grados (Este es negativo)			
<b>Tope de emisión:</b>	<a href="#">Ayuda</a>	100 metros AGL			
<b>Fondo de emisión:</b>	<a href="#">Ayuda</a>	50 metros AGL			
<b>Cantidad de emisión:</b>	<a href="#">Ayuda</a>	560	mass		
<b>Duración de emisión:</b>	<a href="#">Ayuda</a>	24 hora(s)	10 minutos		

### Parámetros de Ejecución

<b>Duración Total:</b>	<a href="#">Ayuda</a>	24 hora(s)
<b>Periodo medio / intervalo de salida:</b>	<a href="#">Ayuda</a>	24 hora(s) 0 minutos
<b>Principio de la capa media:</b>	<a href="#">Ayuda</a>	500 metros AGL (deben ser >= 100m)
<b>Final de la capa media:</b>	<a href="#">Ayuda</a>	100 metros AGL

Figura 18. Datos solicitados por el modelo HYSPLIT para modelar una dispersión.

<b>Contorno multiplicador:</b>	conversiones	Ayuda	1.0E+00
Advanced Options (SETUP.CFG - See the <a href="#">HYSPLIT User's Guide</a> )			
<b>Number of Particles or Puffs Released (NUMPAR):</b>	500		
<b>Maximum Number of Particles (MAXPAR):</b>	10000		
<b>Particles Dump Interval (hours):</b>	1		
<b>Model Run Type (INITD):</b>	<input type="radio"/> Horizontal and Vertical Particle (0) <input type="radio"/> Horizontal Top-Hat Puff, Vertical Particle (4) <input type="radio"/> Horizontal Gaussian Puff, Vertical Top Hat Puff (1) <input type="radio"/> Horizontal and Vertical Top Hat Puff (2) <input checked="" type="radio"/> Horizontal Gaussian Puff, Vertical Particle (3) <input type="radio"/> Auto switch from INITD=0 to INITD=3 <input type="radio"/> Auto switch from INITD=0 to INITD=4		
<b>Turbulence Computational Method (ISOT):</b>	<input type="radio"/> Short Range: Horizontal and vertical velocity variances (1) <input type="radio"/> Short Range/No Fluxes: Same as ISOT=1, but will not use model fluxes (2) <input checked="" type="radio"/> Standard: Vertical diffusivity and horizontal deformation (0) <input type="radio"/> Input TKE: Turbulence based upon input meteorology TKE (4) <input type="radio"/> Variances: Velocity variances from input meteorology (6)		
Parámetros de salida			
<b>Trama de resolución (dpi):</b>	Ayuda	96	
<b>Factor de enfoque:</b>	Ayuda	70	
<b>Superposición círculo de distancia:</b>	Ayuda	<input type="radio"/> Ninguno <input type="radio"/> Auto	<input checked="" type="radio"/> 4 círculos separados por 10 km
<b>¿Límites del registro de EE.UU.?</b>	Ayuda	<input type="radio"/> Sí <input checked="" type="radio"/> No	
<b>¿Salida de los SIG de los contornos?</b>	Ayuda	<input checked="" type="radio"/> Ninguno <input type="radio"/> GIS Shapefiles <input type="radio"/> Google Earth (kmz)	
<b>¿Archivo PostScript?</b>	Ayuda	<input type="radio"/> Sí <input checked="" type="radio"/> No	
<b>¿Crear archivo PDF de gráficos?</b>	Ayuda	<input type="radio"/> Sí <input checked="" type="radio"/> No	
Ejecución Modelo Dispersión		Valores por Defecto	

Figura 19. Datos solicitados por el modelo HYSPLIT para modelar una dispersión.

## 5.0 Resultados

### 5.1 Análisis de trayectorias para el 2009

Se seleccionó el año de 2009 para evaluar la trayectoria debido a que se cuenta con información del inventario de emisiones de SO<sub>2</sub> para la ciudad de Salamanca de las tres estaciones de monitoreo que controla y con esto se puede comparar la predicción del patrón de dispersión. Los datos se obtuvieron de la página web del SINAICA y provienen de tres estaciones de monitoreo en tiempo casi real, cuadro 17. Adicionalmente se seleccionó la ciudad de Salamanca por su cercanía con Querétaro y por el nivel de contaminación que produce a través de la Refinería de PEMEX.

Cuadro 17. Identificación de estaciones de monitoreo en Salamanca

<b>Estación de monitoreo</b>	<b>Identificación</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>
Cruz Roja	CR	20°34'43.63"	101°11'53.19"
DIF	DIF	20°33'29.55"	101°12'17.44"
Nativitas	NAT	20°33'54.63"	101°11'16.12"

Las trayectorias de los vientos se modelaron el 29, 30 y 31 de diciembre utilizando los datos de la estación meteorológica (*Global data atmospheric satellite GDAS*), a las altitudes de 2500 y 3000 m sobre el nivel del mar. Así mismo utilizando la altitud de cada ciudad. En las figuras 19 a la 23 se presentan por ciudad los resultados.

De acuerdo a los patrones de viento las masas de aire van hacia el suroeste para la ciudad de Querétaro, la ciudad tiene una altitud de 1850 m sobre el nivel del mar, figura 20.

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 0000 UTC 29 Dec 09  
 GDAS Meteorological Data

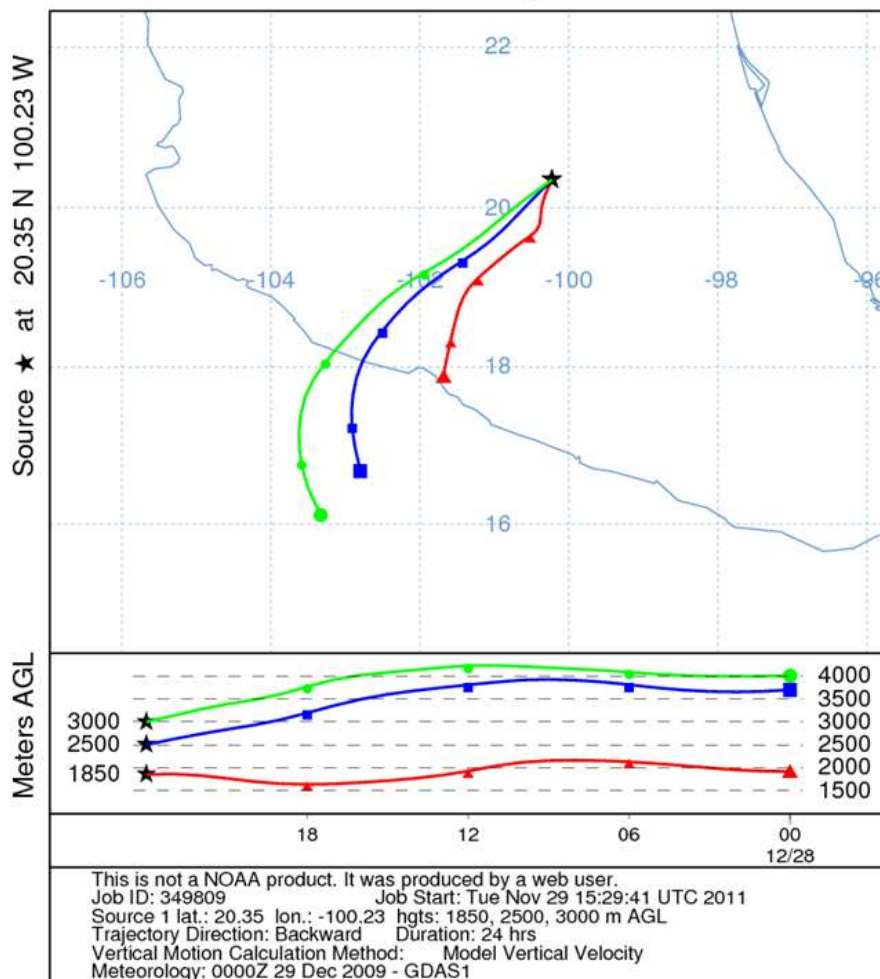


Figura 20. Análisis de trayectorias 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la ciudad de Querétaro.

En el caso de la ciudad de Celaya, Salamanca y León tienen una trayectoria similar a la de la ciudad de Querétaro que van de norte al suroeste. Para evaluar la relación de la trayectoria de los vientos entre la refinera de Salamanca, la refinera de Tula Hidalgo y Querétaro se utilizó la herramienta de modelación de matriz sin embargo como puede observarse en la figura 24 para estos días en este año no hubo relación aparente entre las trayectorias de los vientos de las tres ciudades. El establecimiento

de esta correlación depende entonces de datos disponibles y las condiciones meteorológicas que imperaron en los días de la modelación por lo que es necesario modelar en otros días para ver si existe correlación.

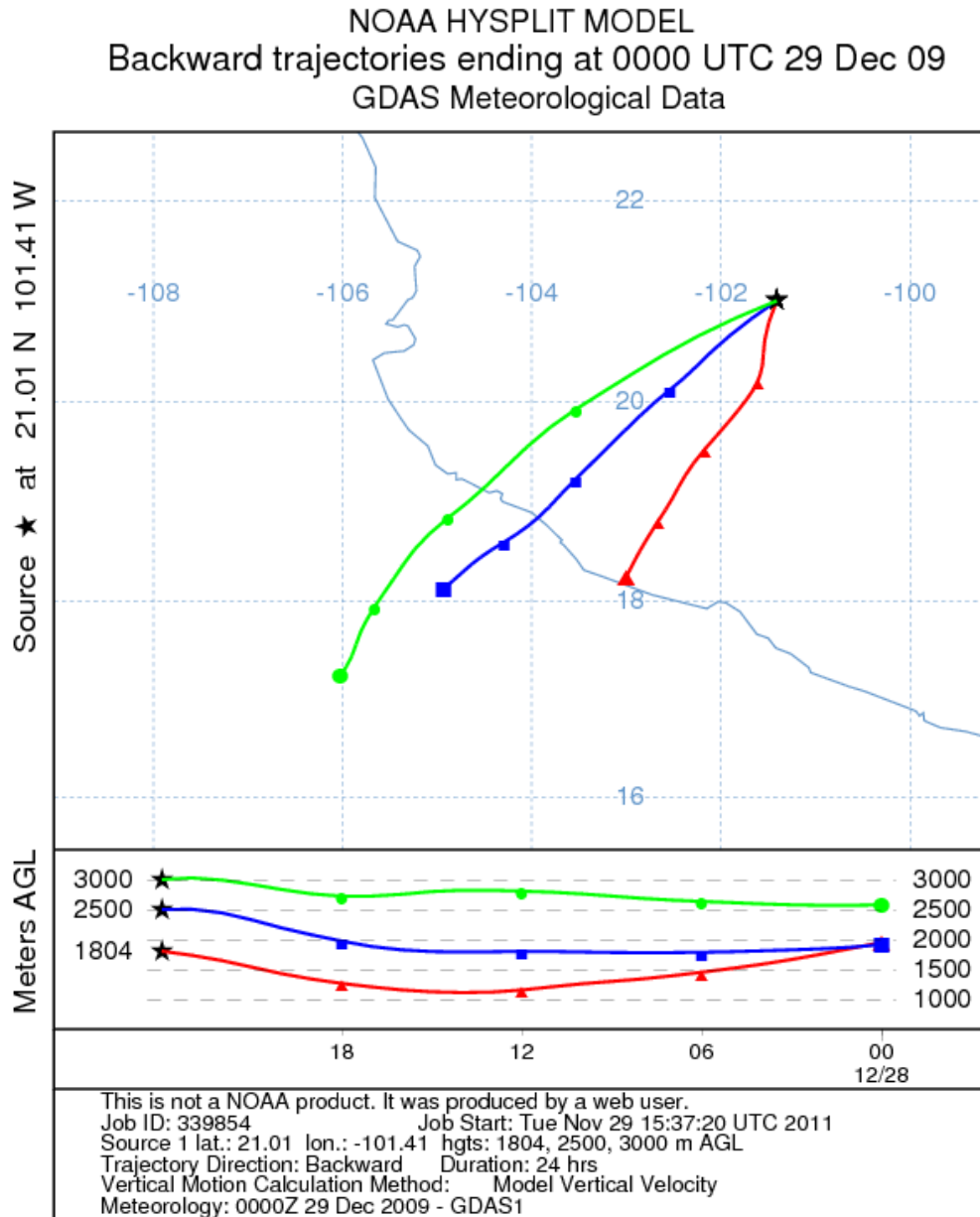


Figura 21. Análisis de trayectorias 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la ciudad de León.



NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 0000 UTC 29 Dec 09  
 GDAS Meteorological Data

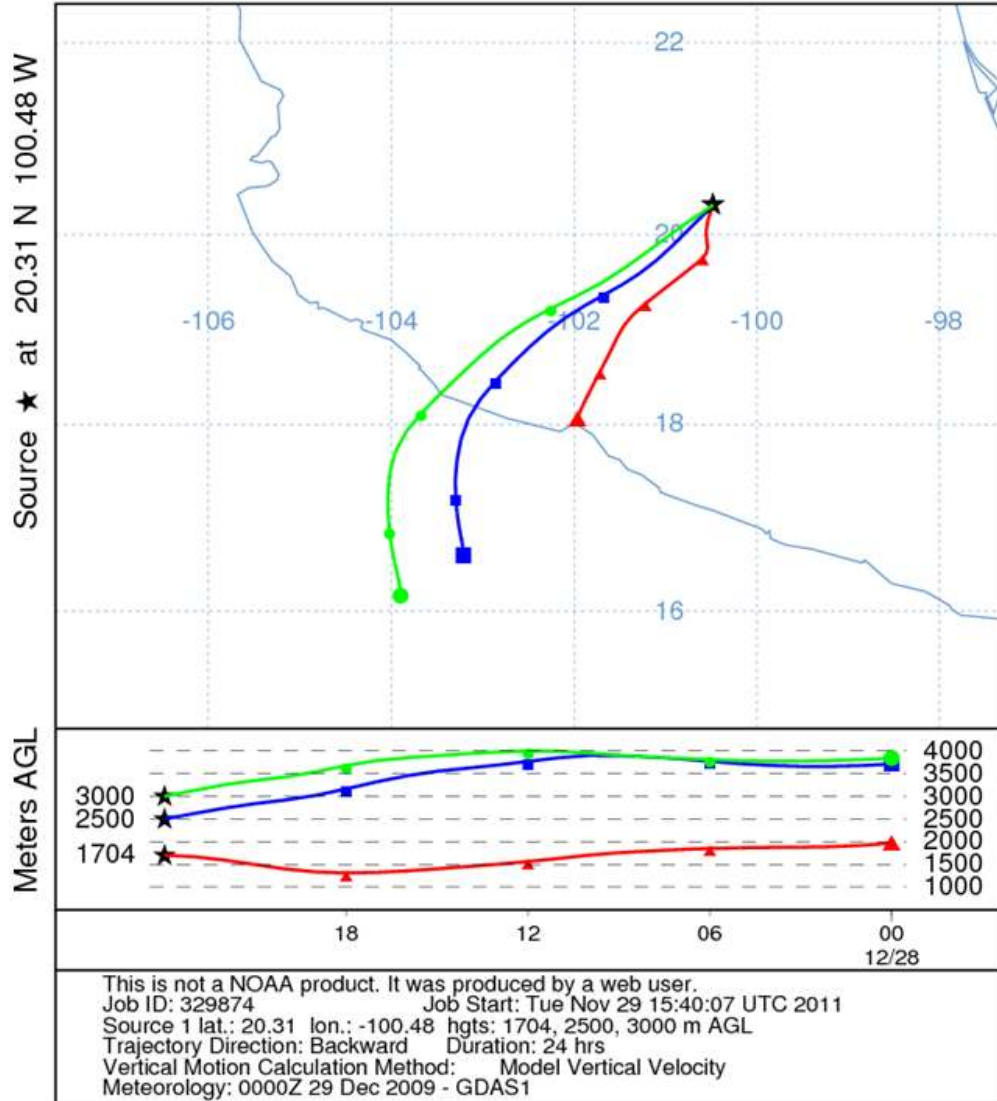


Figura 22. Análisis de trayectorias 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la ciudad de Celaya.

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 0000 UTC 29 Dec 09  
 GDAS Meteorological Data

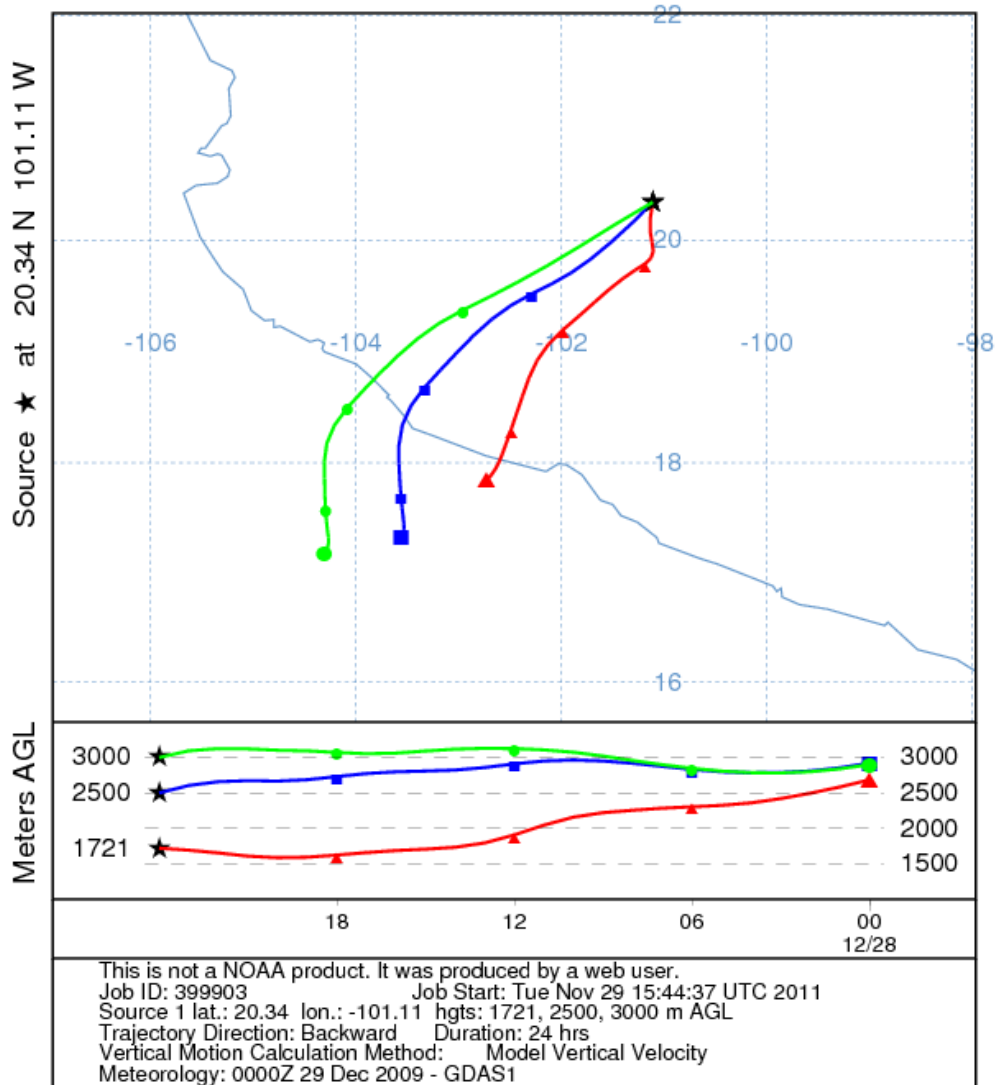


Figura 23. Análisis de trayectorias 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la refinera de Salamanca Ing. Antonio M. Amor.

NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 0000 UTC 29 Dec 09  
GDAS Meteorological Data

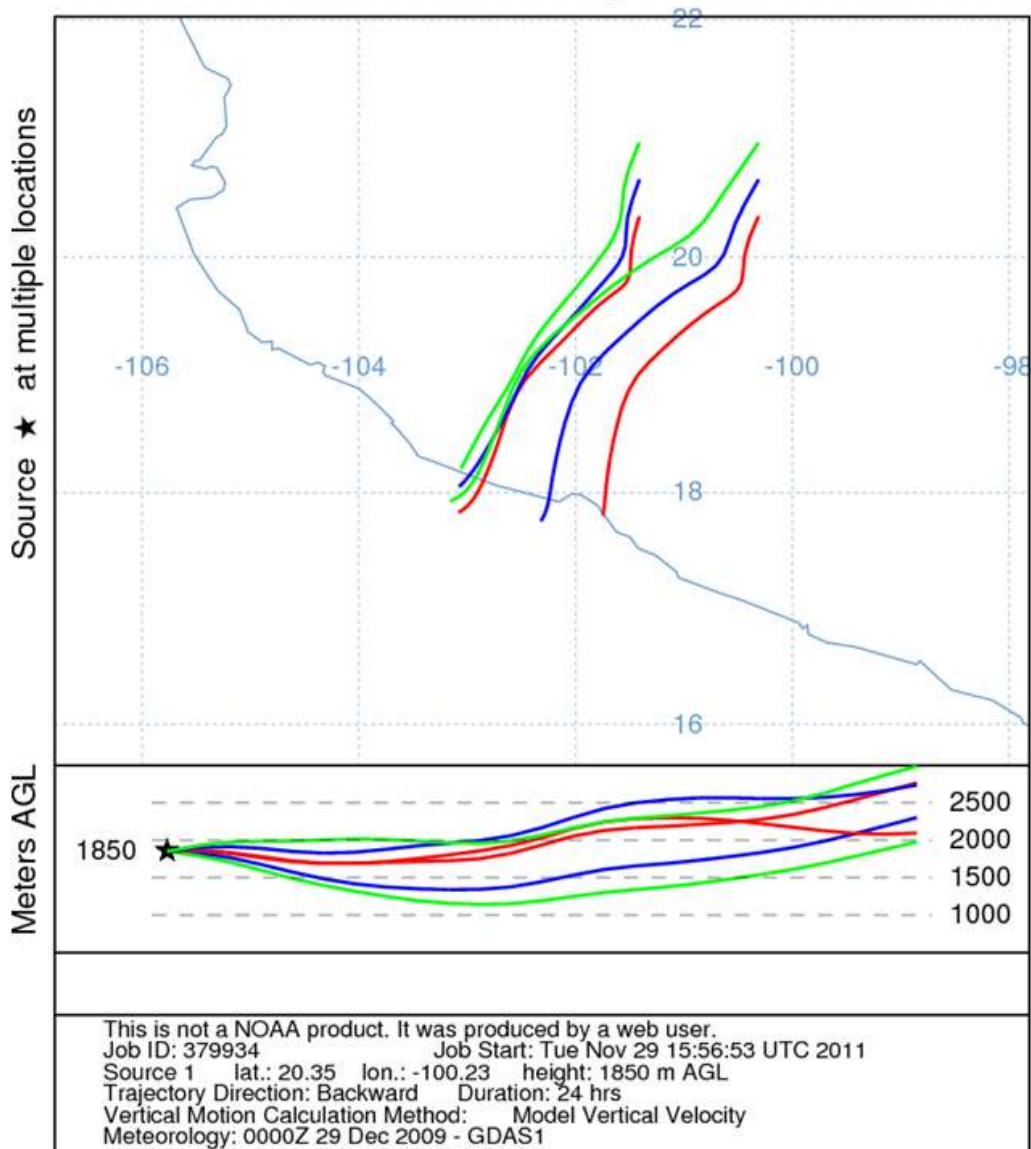


Figura 24. Análisis de trayectorias 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la ciudad de la refinería de Salamanca Ing. Antonio M. Amor, la ciudad de Querétaro y la refinería de Tula Hidalgo.

## 5.2 Dispersión y difusión

### 5.2.1 Salamanca

Para modelar el patrón de los contaminantes gaseosos se utilizaron las mismas fechas 29, 30 y 31 de diciembre del 2009 con los datos de la estación meteorológica de GDAS. En este caso se modeló una fuente estacionaria con una altura de 50 m y de base 20 m. Esta misma fuente se modeló para las diferentes ciudades, en la figura 25 se presenta gráficamente el patrón de dispersión de la pluma de contaminantes. La modelación se realizó considerando la altitud de cada ciudad.

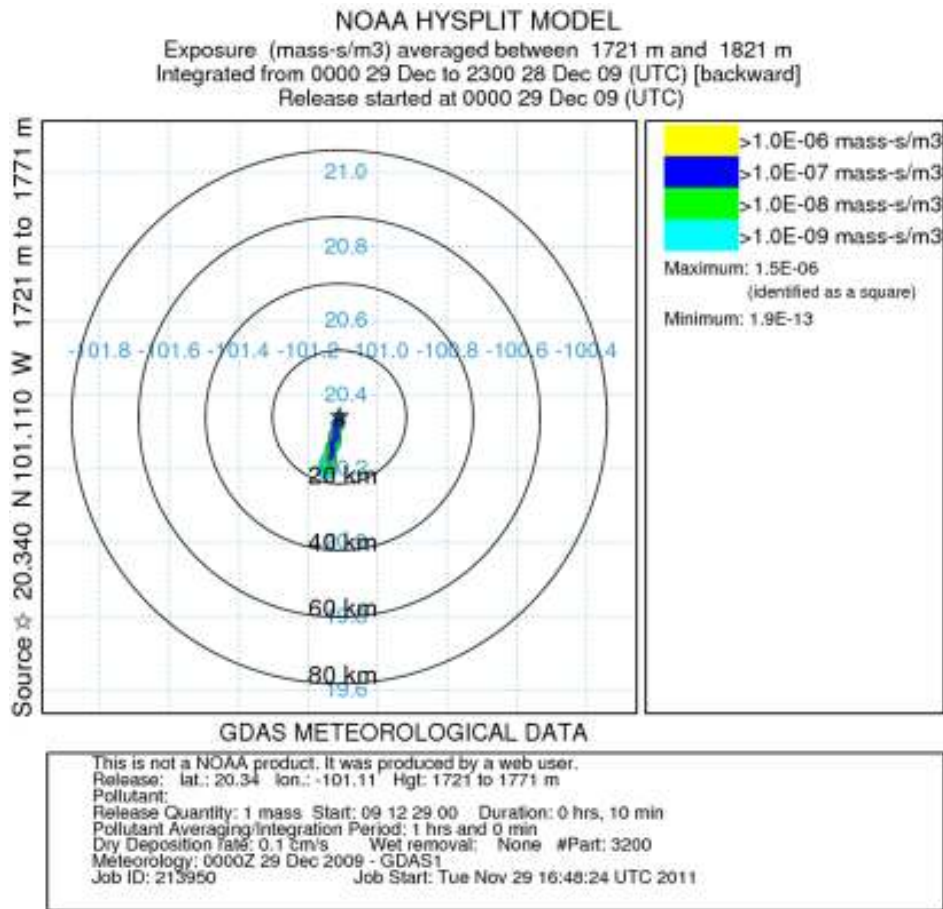


Figura 25. Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, GDAS, para la ciudad de Salamanca. Modelación de una fuente de 50 m de altura.

En el caso de la ciudad de Salamanca el patrón de dispersión va del norte al suroeste y presentó una concentración máxima de  $1.5 \times 10^{-6}$  masa  $-s/m^3$  hasta  $1.9 \times 10^{-13}$  masa  $-s/m^3$  en un radio de 20 km. La modelación se realizó en un periodo de 1h.

De acuerdo a los datos de las estaciones de monitoreo para estas fechas los contaminantes como el  $SO_2$  presentó una concentración de 0.0050 ppm para el 29 de diciembre en la estación DIF y el 30 y 31 0.0057 los tres días están por abajo del límite establecido en la NOM-022-SSA1-1993 y los valores de concentración en las otras dos estaciones son más bajos y se pueden ver en el cuadro 18 todos los datos están representados gráficamente en la figura 26.

Cuadro 18. Concentración de  $SO_2$  en las estaciones de monitoreo de Salamanca para los días 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, promedios de 24h.

Día	Ppm EST_DIF	ppm EST_CR	Ppm EST_NAT	ppm (24h) Límite
29	0.0050	0.0403	0.0124	0.13
30	<b>0.0057</b>	0.0287	<b>0.0127</b>	0.13
31	0.0057	0.0287	0.0127	0.13

Los contaminantes más importantes en cuanto efecto en la salud humana son el ozono y las partículas, por lo que tomando nuevamente el caso de Salamanca se modeló la dispersión de partículas usando el modelo HYSPLIT. En la figura 27 se presentan los promedios trimestrales de las tres estaciones de monitoreo. En ninguna de ellas se rebasa el límite de la norma que es de  $120 \mu g/m^3$ . Así mismo el trimestre más contaminado es el primero ya que el valor máximo alcanzado fue de  $74.40 \mu g/m^3$  en la estación Nativitas.

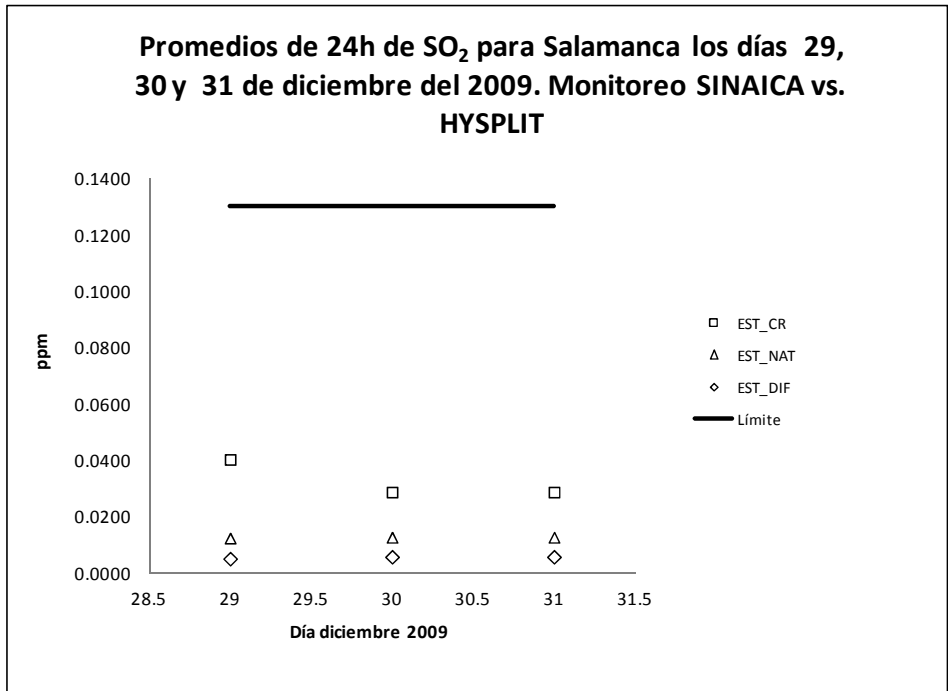


Figura 26. Monitoreo de concentración en tiempo casi real de SO<sub>2</sub> los días 29, 30 y 31 de diciembre del 2009, para la ciudad de Salamanca. Promedio de 24h.

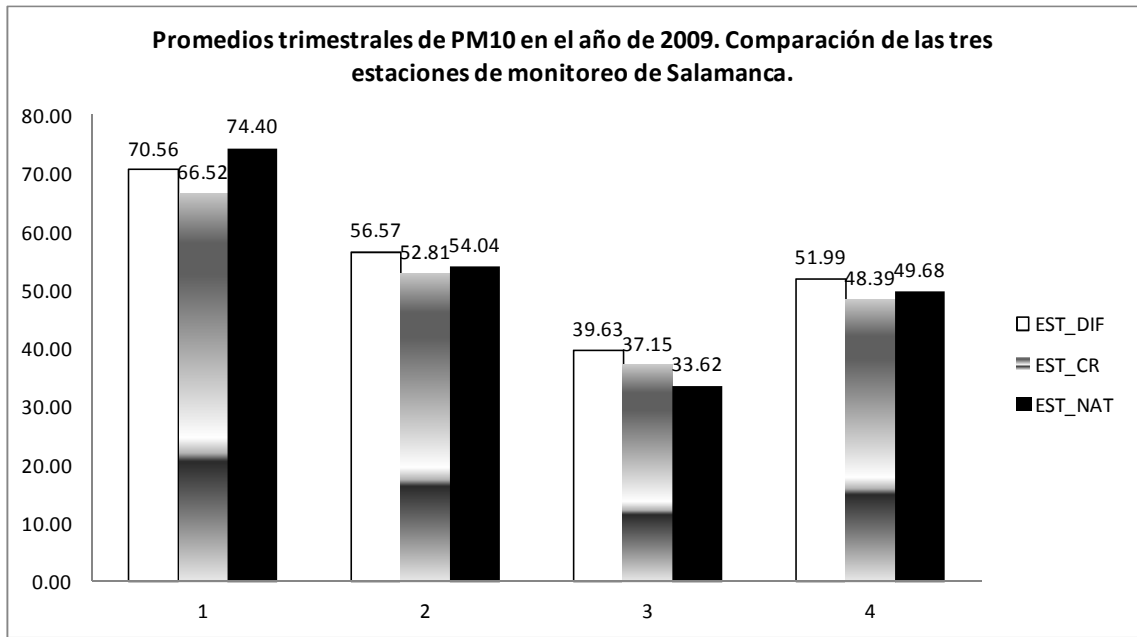


Figura 27. PM<sub>10</sub> µg/m<sup>3</sup> promedios trimestrales 2009 de las tres estaciones de Salamanca.

Utilizando HYSPLIT se modela la dispersión en el día de mayor concentración de partículas del primer trimestre del 2009 que fue el 10 de enero. La modelación se hizo en un período de 24 h con promedios cada 4 h. Las coordenadas utilizadas fueron las de la estación de Nativitas que fue en donde se registró la mayor concentración de  $PM_{10}$  con un valor de  $564 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La modelación se realizó considerando un comportamiento Gaussiano.

Como puede observarse en las figuras de la 28 a la 34 la pluma empieza a dispersarse en dirección noreste y a las 16 h, figura 25, la pluma empieza a dispersarse a través de un rango de  $180^\circ$  hasta que al as 20 h, figura 31, prácticamente la pluma tiene un movimiento de hélice y cubre un círculo completo en un radio de más de 40 km.

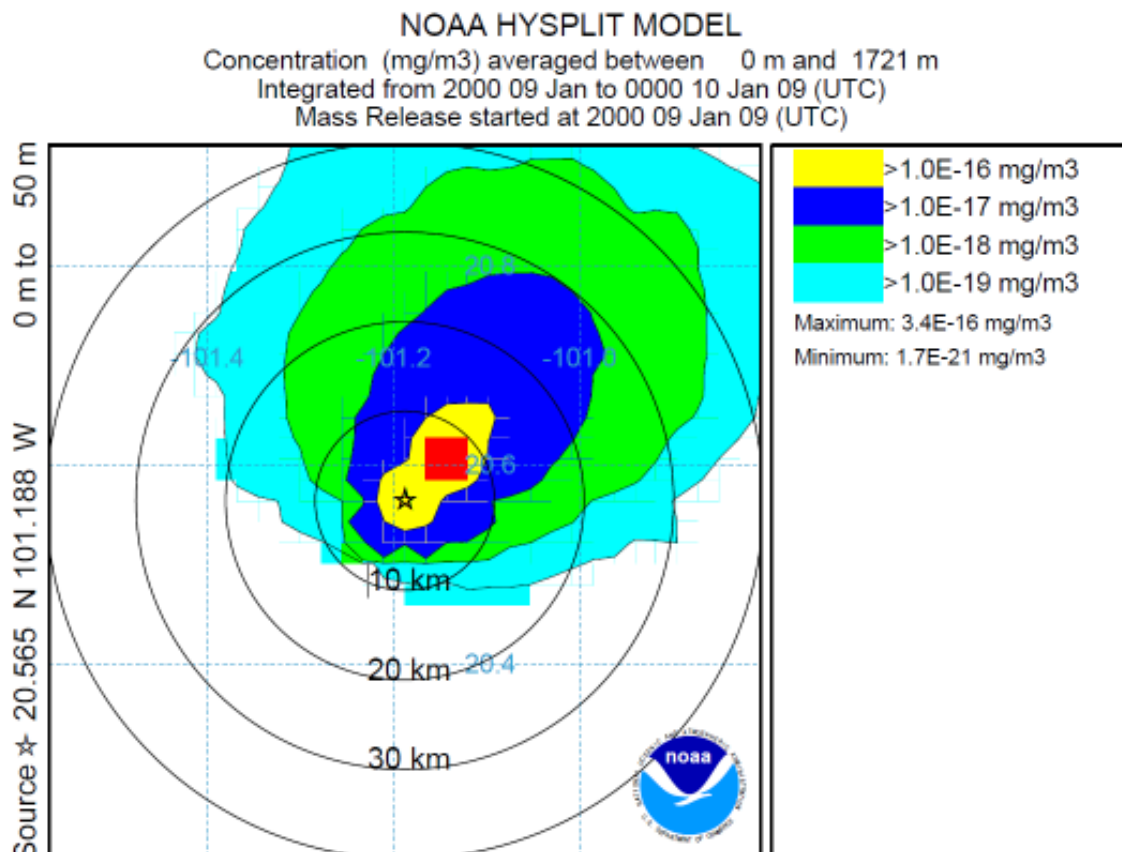


Figura 28. Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 0h.

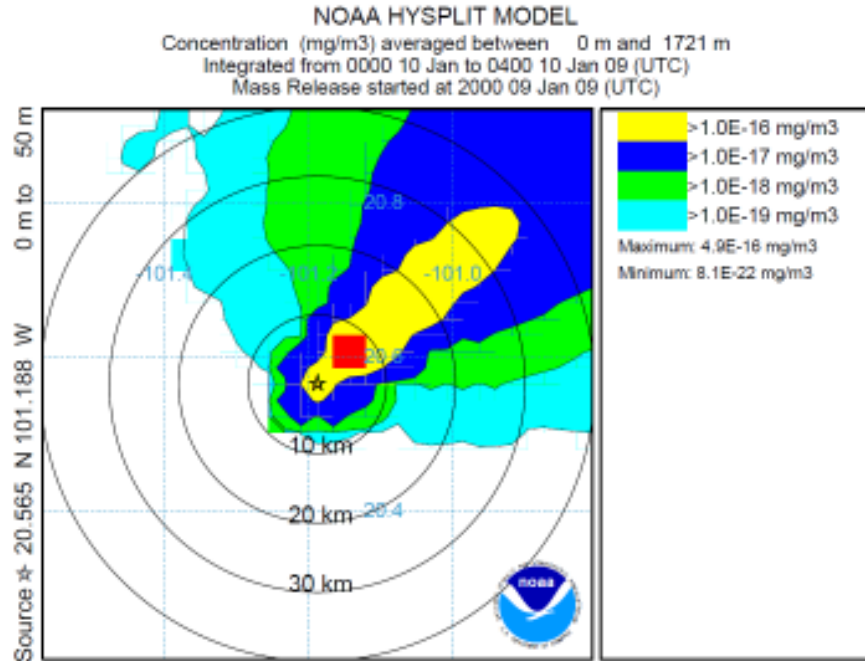


Figura 29. Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 4h.

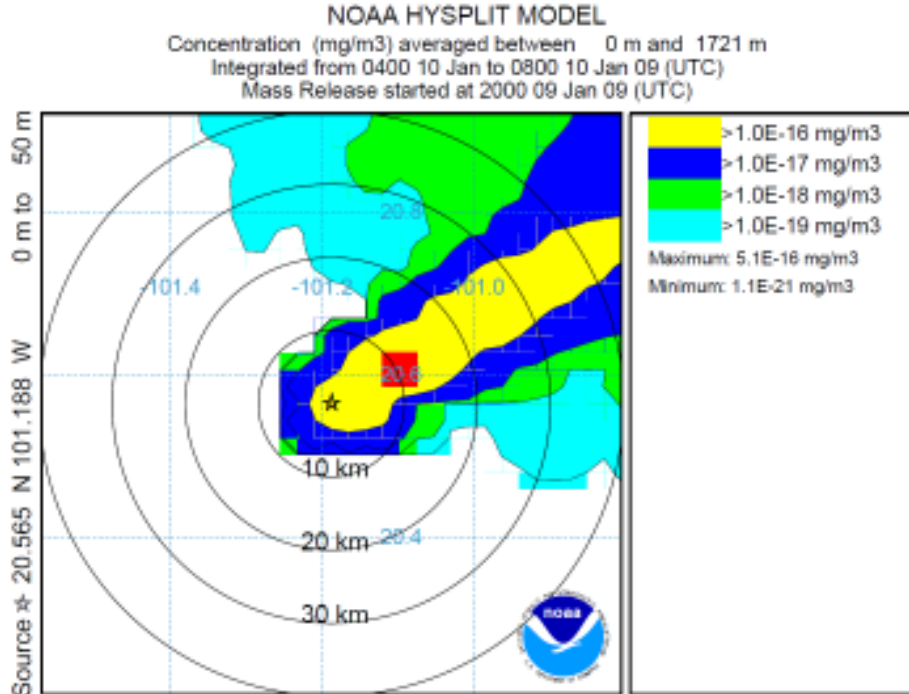


Figura 30. Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 8h.



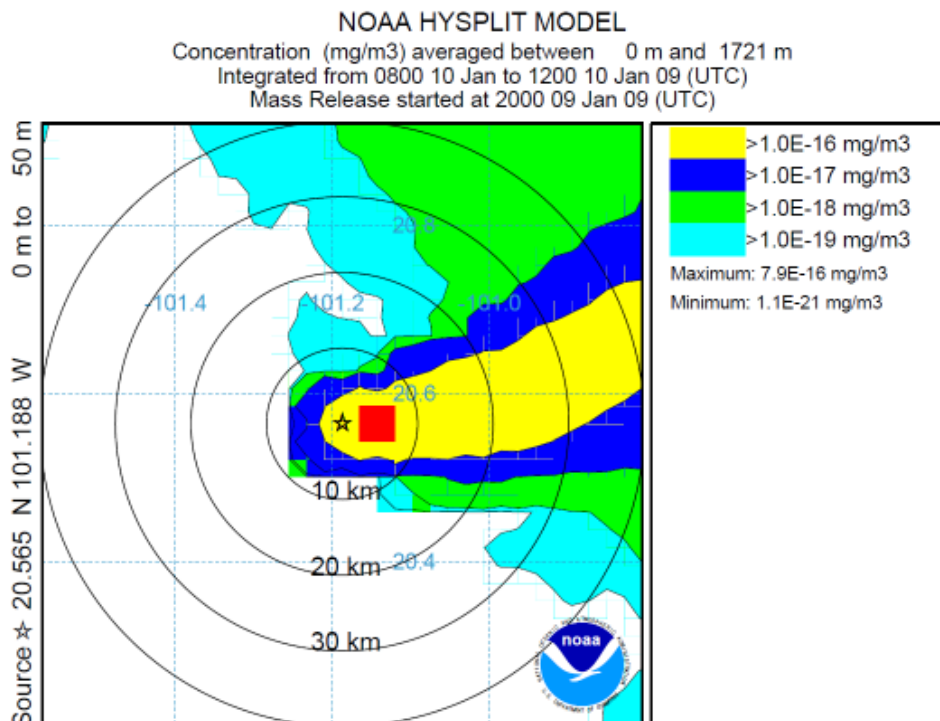


Figura 31. Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 12h.

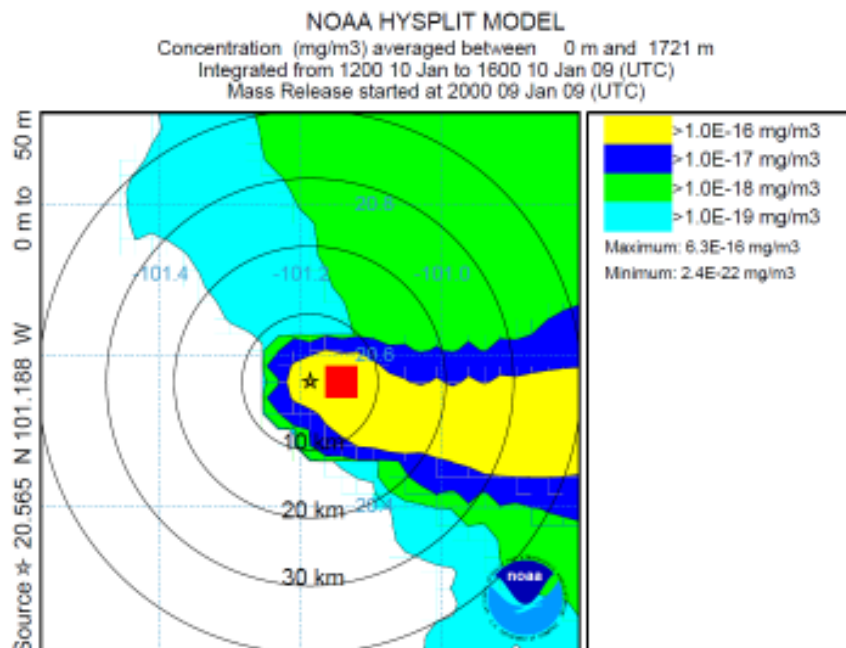


Figura 32. Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 16h.

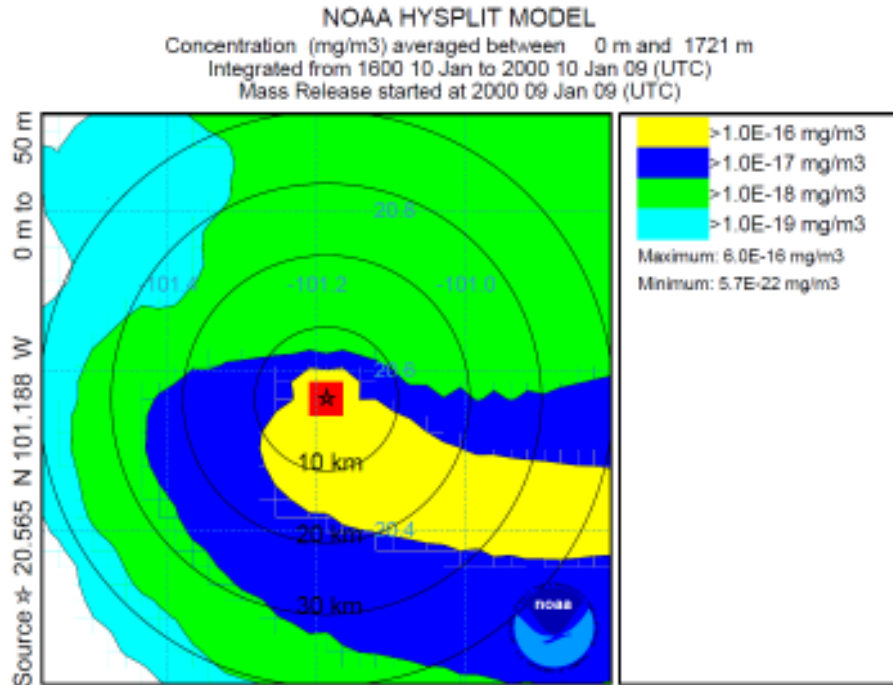


Figura 33. Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca el 10 de enero del 2009 a las 20h.

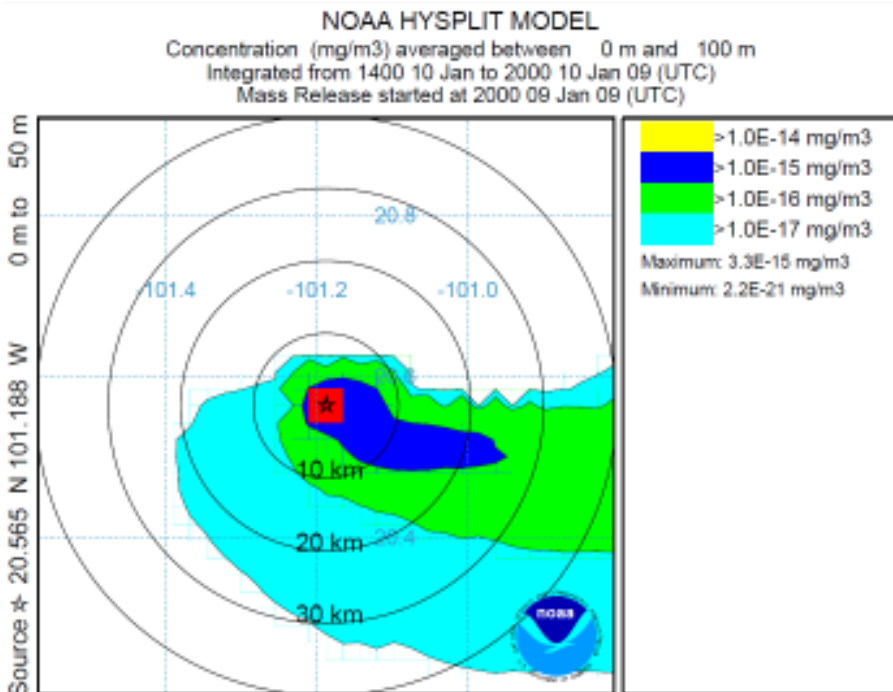


Figura 34. Modelación de dispersión de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca a 100 m, 10 de enero del 2009 a las 20h.

Cuando la modelación se modifica cambiando la altitud de la malla a 100 m se observa un comportamiento similar, figura 33. La concentración máxima a 100 m es de  $3.3 \times 10^{-15} \text{ mg/m}^3$  que representa una dilución porque la modelación se hizo considerando 1 unidad de masa porque generalmente no se sabe cuánta masa de contaminantes salen de la fuente. La pluma se mueve en el tiempo primero hacia el noreste y después al suroeste.

Cuando se hace la simulación utilizando la masa de contaminantes que sale de la fuente a 100 m de altura, se observa el mismo comportamiento de dirección de la pluma que utilizando 1 partícula y la dilución de los contaminantes es a las 8 h y es cuando se tiene la concentración mínima de  $3.3 \times 10^{-17} \text{ masa/m}^3$  y una altitud de 2000 m.

En la modelación además de la dispersión se obtiene la distribución de las partículas a diferentes altitudes, por ejemplo en la figura 35 se observa la modelación para su distribución de una masa de  $564 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  de partículas a las 20 h en la ciudad de Querétaro. La mayor cantidad de partículas se encuentra entre 0 - 2000 m sobre el nivel del mar a 400 m todavía se encuentran partículas pero en menor grado.

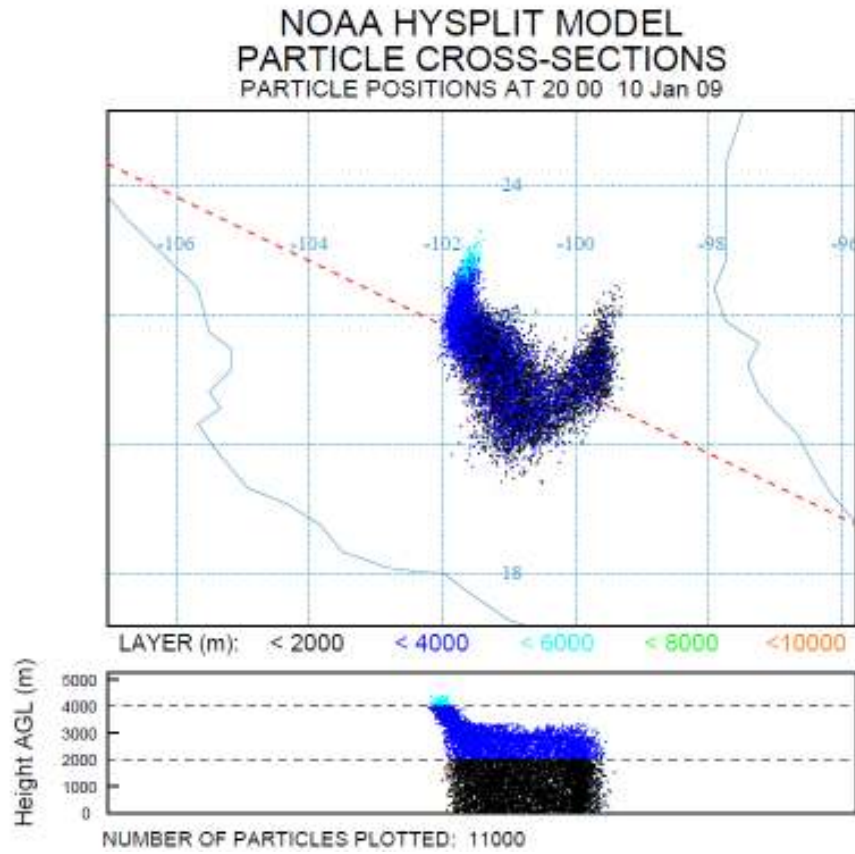


Figura 35. Modelación de distribución de partículas en la estación de Nativitas de Salamanca a 100 m, 10 de enero del 2009 a las 20h.

## 5.2.2 Querétaro

Para la ciudad de Querétaro se hizo una modelación de julio del 2002 ya que Luna Rangel (2004), llevo a cabo un estudio de monitoreo ambiental de fuentes móviles y modelo el flujo vehicular y las emisiones de NO<sub>x</sub> con datos de la SEDESU obteniendo como valor promedio para NO<sub>x</sub> 0.161 ppm en la Avenida 5 de Febrero. En julio se presentó la velocidad más baja de viento y por eso se atribuye que el valor de concentración de NO<sub>x</sub> sea máximo en este mes.

Se modelaron dos escenarios a) considerando 1 partícula o especie gaseosa y b) considerando una masa de salida de 0.161 ppm a una altitud de 1810 m para tratar de usar las mismas condiciones que las mediciones hechas en el trabajo de Luna Rangel (2004). La modelación fue del 5 de julio del 2002 en 24 h.

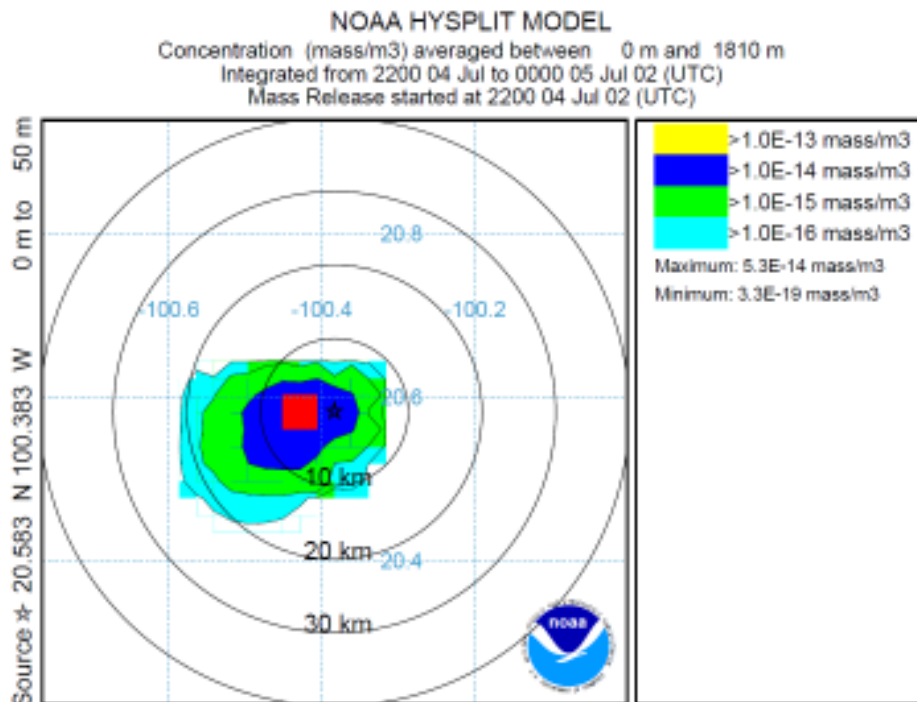


Figura 36. Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 0 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.

Los resultados obtenidos por HYSPLIT para la modelación en la ciudad de Querétaro para una partícula se observan en las figuras 36 a la 41 y se ve claramente que los contaminantes se dispersan del oeste hacia el noreste. A las 18 h de modelación, figura 40, la dispersión de la pluma ya es un radio de 20 km y la extensión de la pluma de más de 40 km. A las 22 h de modelación, figura 40, ya la pluma alcanza un radio de 40 km y continúa su trayectoria hacia el noreste

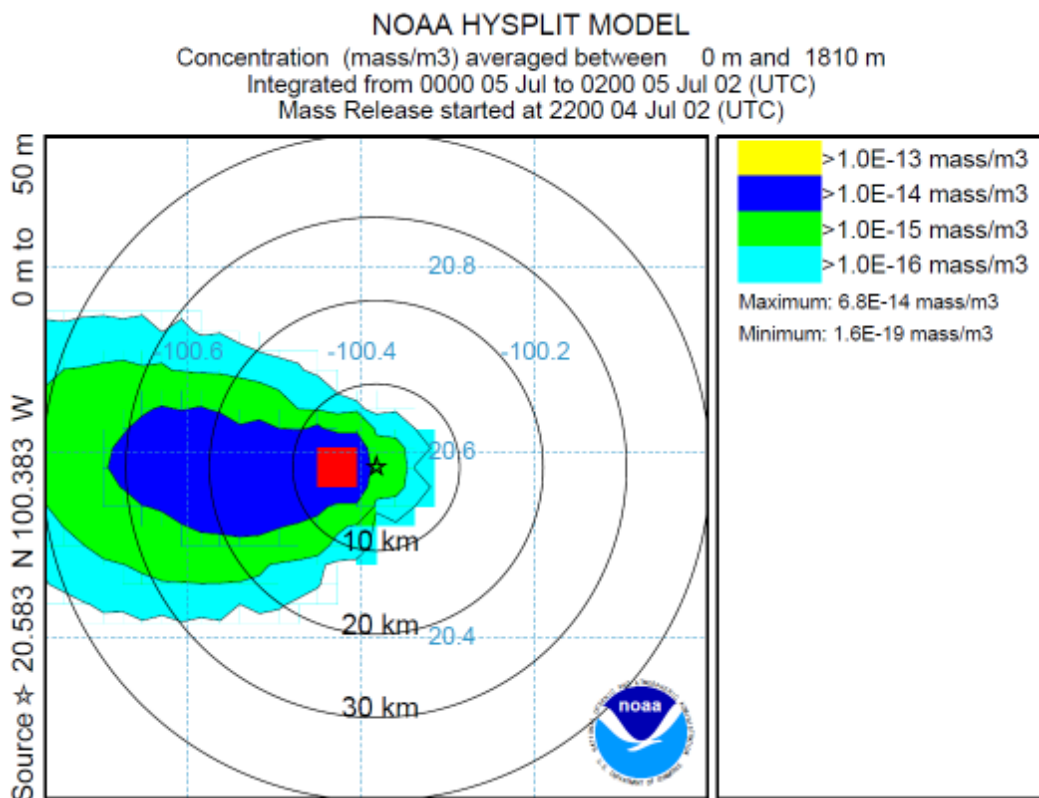


Figura 37. Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 2 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.

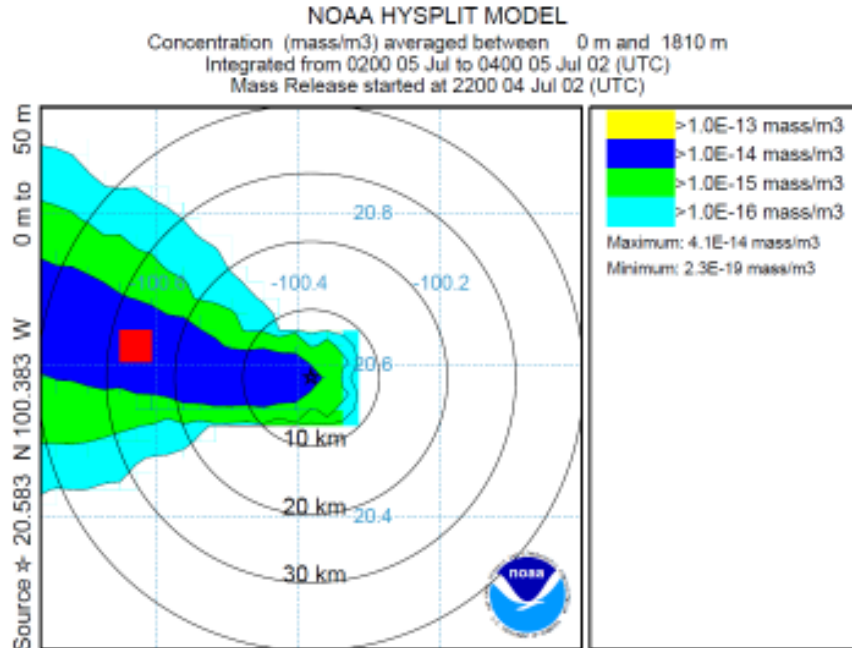


Figura 38. Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 4 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.

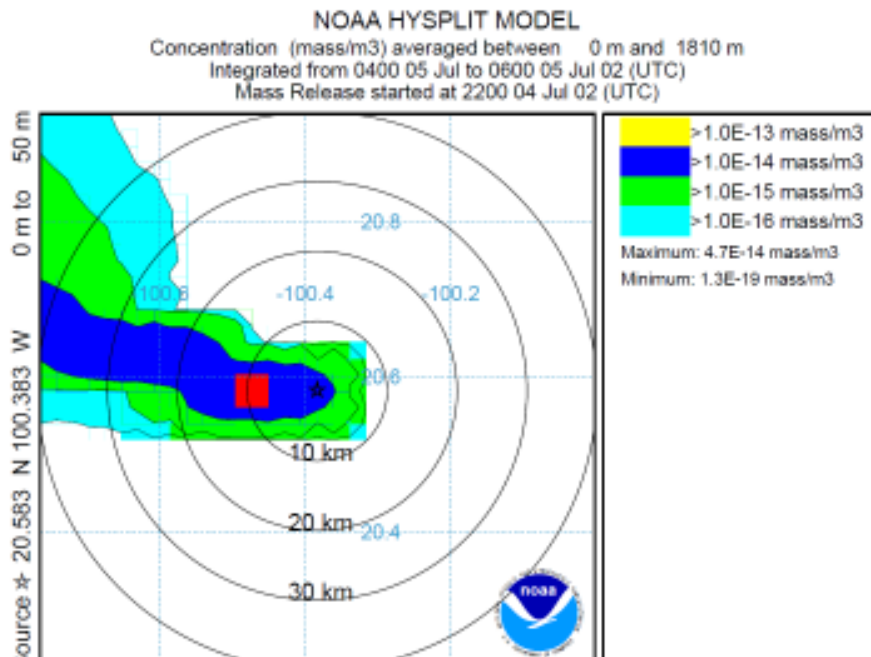


Figura 39. Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 6 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.

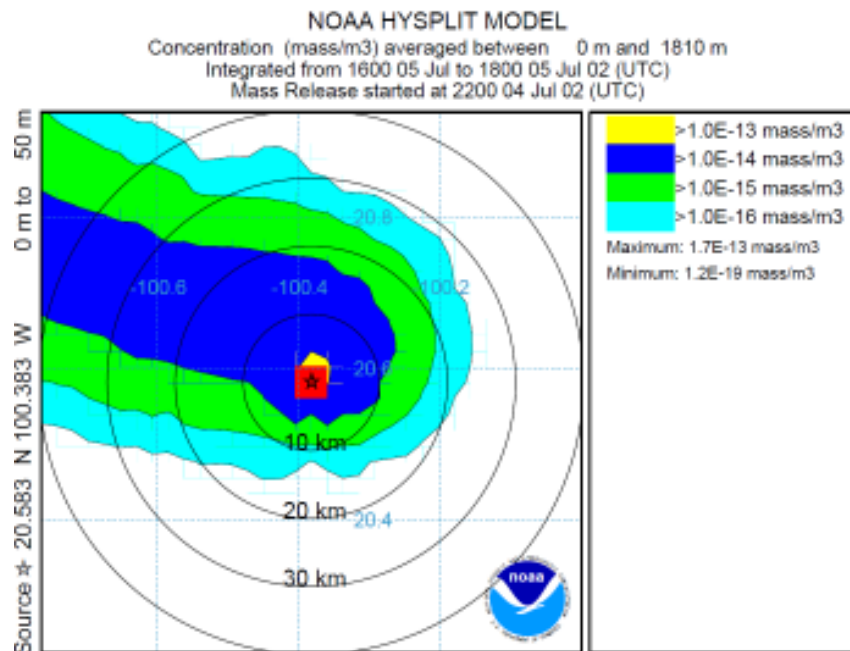


Figura 40. Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 18 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.

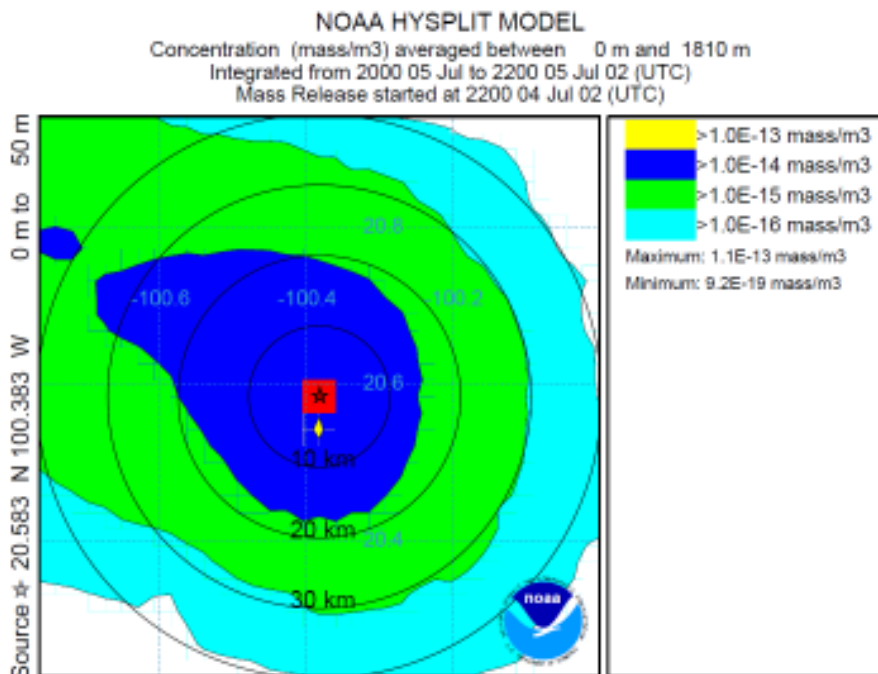


Figura 41. Análisis de dispersión de concentración de contaminantes gaseosos 4 de julio del 2002, para la ciudad de Querétaro a las 22 h. Modelación a 50 m considerada una salida de contaminantes de 0.161 ppm.



## 6.0 Discusión de resultados

El modelo HYSPLIT es una herramienta adecuada para hacer una evaluación del patrón de dispersión de contaminantes y de trayectorias en las ciudades de Salamanca y Querétaro. Su base de datos meteorológicos permite tener datos históricos y en tiempo semi real. A pesar de que el modelo es global y la resolución es baja con un dominio general de 65,000 x 65,000 x 20 km permite tener aproximaciones de los patrones de dispersión y comparar éstos con datos de monitoreo que provienen de mediciones reales.

En México el Instituto Nacional de Ecología mantiene los datos de las redes de monitoreo de 15 ciudades del territorio mexicano y con éstos se pueden comparar los resultados obtenidos y evaluar la aplicabilidad del mismo. En este caso se hizo una pequeña evaluación para conocer el modelo, sus herramientas y el tipo de información que suministraba. También se quiso evaluar si existe la influencia de la contaminación atmosférica de la ciudad de Querétaro de las ciudades del bajío y de la refinería más cercana que es la Ing. Antonio M. Amor de Salamanca. De este primer estudio sólo se pudo observar a grandes rasgos que no se podía establecer una trayectoria conjunta entre Salamanca y Querétaro las trayectorias de los contaminantes de Salamanca van del sureste al noreste y de Querétaro del oeste hacia el noreste por lo que en teoría podrían en un momento interceptarse los contaminantes. Sin embargo es necesario utilizar datos de otros días y años para determinarlo. Las trayectorias se modelaron a la altitud de cada ciudad y a altitudes mayores y se obtuvieron resultados de trayectorias comunes hacia el suroeste.

Para el caso de la dispersión se obtuvieron el patrón de contaminación para contaminantes gaseosos con una concentración máxima y mínima simulando una fuente fija de 50 m de altura. En el caso de Salamanca se pudo comparar el resultado de la modelación del 29-35 de diciembre del 2009 con el resultado del monitoreo y la concentración máxima y mínima están en el mismo orden de magnitud: Sin embargo es necesario evaluar más datos y ciudades pero con éstos datos se puede establecer que la factibilidad es viable utilizando el modelo HYSPLIT global. En ciudades como Querétaro que aún no cuenta con un monitoreo extenso de contaminantes los modelos de dispersión resultan una herramienta accesible para poder predecir las zonas más contaminadas de la ciudad y en dónde sería adecuado colocar estaciones de monitoreo.

Debido al alto grado de crecimiento de la ciudad de Querétaro y en general de la zona del Bajío es imperativo incrementar más zonas de monitoreo, difundir los valores de contaminación, proponer controles más estrictos de emisión de contaminantes y promover el uso de energías limpias como la eólica y solar. En Estados Unidos se está incentivando el uso de automóviles eléctricos por ejemplo la compañía Tesla Motors, está impulsando este mercado. Como se mencionó al inicio el desarrollo de los países ahora se mide de acuerdo al control de la contaminación que emite. El desarrollo debe ir de la mano de programas de control de emisiones atmosféricas y de otro tipo. Es necesario recordar que la salud de la población se ve afectada por las partículas y el O<sub>3</sub> principalmente.

## 7.0 Referencias bibliográficas

World Economy Forum (2015). <http://reports.weforum.org/outlook-global-agenda-2015/top-10-trends-of-2015/6-rising-pollution-in-the-developing-world/>

World Economy Forum (2015). <http://www.weforum.org/events/world-economic-forum-latin-america-2015>

ECONOMIA (2015). <http://www.economia.gob.mx/delegaciones-de-la-se/estatales/queretaro#>

(2015) <http://espanol.doingbusiness.org/data/exploreeconomies/mexico>

(2015) <http://www.hispanoteca.eu/LandeskundeLA/Geograf%C3%ADa%20y%20relieve%20de%20M%C3%A9xico.htm>

(2015) <http://www.arl.noaa.gov/index.php>

Abdel-Wahab M.M., Essa K. S. M., Embaby M., Elsaid, S. E. M. (2013). Derivation the Schemes of Lateral and Vertical Dispersion Parameters: Application in Gaussian Plume Model. *Open Journal of Air Pollution*, 2, 19-24.

Alam K., Qureshi S., Blaschke T. (2011). Monitoring spatio-temporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS and MISR satellite data and a HYSPLIT model. *Atmospheric Environment* 45, 4641-4651.

Awang N. R., Ramli N. A., Yahaya A. S., Elbayoumi M. (2015). Multivariate methods to predict ground level ozone during daytime, nighttime, and critical conversion time in urban areas. *Atmospheric Pollution Research* 6, 726-734.

Ayllón T., Elementos de Meteorología y Climatología. Editorial Trillas primera edición 1996.

Buitrago Arango Jaime H. (2003). Aplicación del modelo Gaussiano para determinar la calidad del aire en Manizales. Maestría en Medio ambiente y desarrollo. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Chen B., Stein A. F., Guerrero Maldonado P., Sanchez de la Campa A. M., Gonzalez-Castanedo Y, N. Castell, J. D. de la Rosa (2013). Size distribution and concentrations of heavy metals in atmospheric aerosols originating from industrial emissions as predicted by the HYSPLIT model. *Atmospheric Environment* 71 234-244.

Chow J. C., Watson J. G., Frank N. y Homolya J. (1998). Guideline on Speciated Particulate Monitoring. U.S. Environmental Protection Agency

Draxler Roland R. and Hess G.D. (1998) . An Overview of the HYSPLIT\_4 Modelling System for Trajectories, Dispersion, and Deposition. *Australian Meteorological Magazine*, 47, 295-308.

Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE 2013), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Quinta versión (DENUE interactivo 10/(2013)).

Directiva 96/62/CE del Consejo, de 27 de septiembre de 1996, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente.

Environmental Protection Agency (2004). Air Quality Criteria for Particulate Matter. Vol. I and II.

Francis Timmy (2012). Temporal Trends in Ambient SO<sub>2</sub> at a High Altitude Site in Semi-Arid Western India: Observations versus Chemical Transport Modeling *Journal of Environmental Protection*, 3, 657-680.

Gasca Tierrafría Juan Manuel (2007). Caracterización por SEM-EDS de aero partículas antrópicas de la fracción respirable en la ciudad de Querétaro y su

relación con fuentes contaminantes. MCA, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química.

González Ferradás E., Doval Miñarro M., Morales Terrés I. M., Marzal Martínez F. J. (2010). [An approach for determining air pollution monitoring sites](#). Atmospheric Environment, 44, 2640-2645.

Hertel O., Ellermann T., Palmgren F., Berkowicz R., Lofstrom P., Frohn L.M. Geels C., Skjoth C. A., Brandt J., Christensen J., Kemp K., Ketzel M. (2007). Integrated air quality monitoring-combined use of measurements and models in monitoring programmes. Environ. Chem 4, 65-74.

Homolya J., y Rice J. Environmental Protection Agency (1999). Particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) speciation guidance. Final Draft. Edition.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2015).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2014). Delegación estatal Jalisco 2014.

Jimenez J.L., Huffman A.A., Ulbrich I. M., Canagaratna M.R., Worsnop D. R. y Guenther A. B. (2008). An Eddy-Covariance System for the Measurement of Surface/Atmosphere Exchange Fluxes of Submicron Aerosol Chemical Species-First Application above an Urban Area. Aerosol Science and Technology, 42, 636-657.

Johansson C., Burman L., and Forsberg B. (2009). The effects of congestions tax on air quality and health. Atmospheric Environment, 43 4843-4854.

Jones A. M., Harrison R. M., Baker J. (2010). [The wind speed dependence of the concentrations of airborne particulate matter and NO<sub>x</sub>](#). Atmospheric Environment, 44, 1682-1690.

Kim E. y Hopke P. K., (2004). Comparison between Conditional Probability Function and Nonparametric Regression for Fine Particle Source Directions. *Atmospheric Environment* 38, 4667–4673.

Luna Rangel Juan Carlos (2004). Estudio del comportamiento de la dispersión atmosférica de óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>) provenientes de fuentes móviles en la ciudad de Santiago de Querétaro. Facultad de Ingeniería. Tesis de maestría junio.

Mahura, R. Nuterman, Petrova I., Amstrup B. (2013). Atmospheric Trajectory and Chemical Transport Modelling for Elevated Ozone Events in Denmark. *Atmospheric and Climate Sciences*, 3, 87-99.

Molina L. T. and Molina M. J. Air Quality in the Mexico Megacity. (2002). Kluwer Academic Publishers.

Monteiro A., Ferreira J., Ribeiro I., Fernandes A. P, Martins H., Gama C., Miranda A. I. (2015). Air quality over Portugal in 2020. *Atmospheric Pollution Research* 6, 788–796.

Noble C. A., Mukerjee S, Gonzales M., Rodes C. E., Lawless P. A., Natarajan S., Myers E. A., Norris G. A., Smith L., Ozkaynak H. and Neas L. M. (2003). *Atmospheric Environment*, 37 827-840.

Nguyen T. B., Bateman A. P., Bones D.L., S. y Nizkorodov A., Laskin J., Laskin A.. (2010). [High-resolution mass spectrometry analysis of secondary organic aerosol generated by ozonolysis of isoprene](#). *Atmospheric Environment* 44, 1032-1042.

Ogulei D., Hopke P. K., Zhou L., Pancras J. P., Nair N., Ondov J. M. (2006). Source apportionment of Baltimore aerosol from combined size distribution and chemical composition data. *Atmospheric Environment* 40 , S396–S410.

Ogulei D., Hopke P. K., Ferro A. R. y Jaques P. A. (2007). Factor Analysis of Submicron Particle Size Distributions near a Major United States–Canada Trade Bridge. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 57, 190–203.

Ozel G., Cakmakyapan S. (2015). A new approach to the prediction of PM<sub>10</sub> concentrations in Central Anatolia Region, Turkey. *Atmospheric Pollution Research* 6, 735-741

Phalen R.F., Cuddihy R.G., Fisher G.L., Moss O.R., Schlessinger R.B., D.L. Swift, Yeh H. C., (1991). Main Features of the Proposed NCRP Respiratory Tract Model, *Radiat. Protect. Dosim.* 38:179-184.

Resultados de la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE 2015). Cifras durante el primer trimestre 2015 [15 de mayo, 2015].

Romero-Placeres Manuel, Más-Bermejo Pedro, Lacasaña-Navarro Marina, Téllez Rojo-Solís Martha Aguilar-Valdés Juan, Romieu Isabelle (2004). Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad, de La Habana. *Salud Pública Méx*; Vol. 46(3):222-233.

Seinfeld John H. (1985). *Atmospheric Chemistry and Physics of Air pollution*. John Wiley and Sons.

Shields L. G. Qin X, Toner S. M., and Prather K. A. (2008). Detection of ambient ultrafine aerosols by single particle techniques during the SOAR 2005 campaign. *Aerosol Science and Technology* 42, 674-684.

Stone E. A., Hedman C. J., Zhou J., Mieritz M., Schauer J. J. (2010). [Insights into the nature of secondary organic aerosol in Mexico City during the MILAGRO experiment 2006](#). *Atmospheric Environment*, 44, 312-319.

Stutz J., Wong K. W., Lawrence L., Ziemba L., Flynn J. H., Rappenglück B., Lefer B.. (2010). Nocturnal NO<sub>3</sub> radical chemistry in Houston TX. *Atmospheric Environment*, 44, 4099-4106.

K. Wark y C. F. Warner (1998). *Contaminación del Aire. Origen y control*. Editorial Limusa.

Wang Y., Stein A. F., Draxler R. R., de la Rosa J. D., Zhang X., (2011). Global sand and dust storms in 2008: Observation and HYSPLIT model verification. *Atmospheric Environment* 45, 6368-6381.

Zhao W., Hopke P. K., Zhou L. (2007). Spatial distribution of source locations for particulate nitrate and sulfate in the upper-midwestern United States. *Atmospheric Environment* 41, 1831–1847.

Zhao S., Yu Ye, Xia D, Yin D., He J., Liu Na, Li F (2015). Urban particle size distribution during two contrasting dust events originating from Taklimakan and Gobi Deserts. *Environmental Pollution*, Volume 207, December 107-122.

Zoljoodi M., Didevarasl A., Montazerzohor Z. (2013). Application of the dust simulation models in the Middle East, and dust-dispersion toward the western/southwestern Iran (case study: 22-26 June 2010). *Natural Science* Vol.5, No.7, 818-831.



