

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA



**MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES BASADO EN LA
DISCRETIZACIÓN DE LA CAPA LÍMITE EN BOGOTÁ: UNA REVISION
CONCEPTUAL**

David Andrés Sánchez Bonell

Trabajo de grado Especialización

Director: Erika Johana Ruiz Suárez

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.
FACULTAD DE INGENIERIA
ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTEGRAL
DE RECURSOS NATURALES
BOGOTÁ
2015**

**MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES BASADO EN LA
DISCRETIZACIÓN DE LA CAPA LÍMITE EN BOGOTÁ: UNA REVISION
CONCEPTUAL**

David Andrés Sánchez Bonell

Licenciado en Biología

Universidad Pedagógica Nacional

Magister en ciencias

Universidad Nacional de Colombia

dasanchezb@unal.edu.co

*Universidad Militar Nueva Granada. Especialización en Planeación Ambiental y
Manejo Integral de Recursos Naturales, Bogotá 2015*

RESUMEN

Dentro de las características básicas de los modelos de dispersión de contaminantes es necesario tener en cuenta que ante todo son una representación matemática de los diferentes procesos de transporte y difusión que se presentan en la atmósfera en un determinado tiempo y escala determinada. Estos modelos permiten simular y pronosticar las condiciones meteorológicas dentro de los parámetros analizados, conocer parcialmente los procesos físicos y/o químicos que participan en la dispersión, transporte, transformación y deposición final de los contaminantes en la atmósfera, lo que requiere novedosos arreglos para su desarrollo y ejecución. Como señalan (Ruíz & Pabón, 2002) la calidad del aire de cualquier región se obtiene mediante una serie de medidas de los niveles de contaminación realizadas en una red de calidad de aire o por medio de la estimación de las diferentes concentraciones de los gases y partículas contaminantes mediante modelos que pueden ser físicos, numéricos o semiempíricos. A continuación se analiza la posibilidad de utilizar modelos que estimen la dispersión de los contaminantes al interior de la capa límite basados en las ecuaciones de difusión-advención, discretizando N sub-intervalos al interior de la PBL, se presupone que dichas herramientas permitirán conocer la dispersión de contaminantes en las ciudades, teniendo

previo conocimiento de la circulación característica, el régimen de inestabilidad, régimen radiativo y conductividad térmica del suelo; a partir de los cuales se pueden inferir los flujos de impulso, masa y energía (flujos de calor turbulento). Necesarios para determinar los movimientos verticales tanto ascendentes como descendentes necesarios para el pronóstico de la contaminación del aire.

Palabras Clave: Contaminación atmosférica, capa límite, modelos de dispersión, discretización

ABSTRACT

Among the basic features of the models of dispersion of pollutants it is necessary to consider that first of all is a mathematical representation of the different transport and diffusion processes that occur in the atmosphere at a certain time and a certain scale. These models simulate and forecast meteorological conditions within the parameters analyzed, partially understand the physical processes and / or chemicals involved in the dispersion, transport, transformation and deposition of pollutants in the end the atmosphere, which requires arrangements novel its development and implementation. As pointed out (Ruiz & Pabón, 2002) air quality of any region is obtained through a series of measures undertaken inición levels in a network of air quality or by estimating the different concentrations of gases and particulate pollutants by models which can be physical, numerical or semiempirical. Below the ability to use models to estimate the dispersion of pollutants into the boundary layer based on the advection-diffusion equations is analyzed, discretizing N sub-intervals within the PBL, it is assumed that these tools permit the dispersion of pollutants in cities, having prior knowledge of the characteristic movement, the regime of instability, radiative thermal conductivity regime and soil; from which it can be inferred flows momentum, mass and energy (heat turbulent flows). Necessary to determine both upward and downward vertical movements necesarios for forecasting air pollution.

Key words: Atmospheric pollution, boundary layer, dispersion models, discretization

INTRODUCCIÓN

Las ecuaciones de difusión–advección han sido suficientemente aplicadas en modelos de dispersión de contaminantes para predecir el comportamiento y la concentración de estos en la capa límite planetaria (PBL). En principio, con la obtención de esta ecuación es posible formular un modelo teórico de dispersión de puntos continuos dadas las condiciones de la capa límite, el comportamiento y velocidad de viento así como las condiciones de los flujos turbulentos en la capa de mezcla donde interactúen estos contaminantes.

El planteamiento de modelos que estimen la dispersión de los contaminantes al interior de la capa límite basados en las ecuaciones de difusión-advección, discretizando N sub-intervalos al interior de la PBL, se convierten en poderosas herramientas que permitirán conocer la dispersión de contaminantes en las ciudades, teniendo previo conocimiento de la circulación característica de la ciudad, el régimen de inestabilidad, régimen radiativo y conductividad térmica del suelo; a partir de los cuales se pueden inferir los flujos de impulso, masa y energía (flujos de calor turbulento). Necesarios para determinar los movimientos verticales tanto ascendentes como descendentes.

Es así que la utilización de modelos de dispersión de contaminantes de capa límite tanto locales como regionales, integrados a los modelos de macro escala como son los Modelos de Circulación General (MCG), permitirán la proyección la elaboración de escenarios climáticos futuros para el país. Los modelos de capa límite son de gran utilidad para determinar el régimen de turbulencia e inestabilidad característico de una región, sirviendo de apoyo para inferir la transformación, arrastre y dilución de contaminantes, de acuerdo con las alteraciones que pueda ocasionar las diferencias de calentamiento debido a las heterogeneidades de la superficie del suelo y circulación local.

CONTAMINANTES Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Un contaminante es “una sustancia que aparece en el ambiente, al menos en parte, como resultado de las actividades humanas, y que tiene un efecto nocivo sobre el entorno”. Se estima aproximadamente 63.000 productos químicos contaminantes en uso. **Nevers**. (1.997). Algunos alteran el medio físico generando condiciones inadecuadas para la vida. Otros son directamente tóxicos para lo vivo, alrededor de 186 compuestos químicos, desde metales pesados, bifelinos policlorados (PBC) y dioxinas hasta iones radiactivos **Quarles & Lewis**. (1.990). La toxicidad de estos contaminantes esta directamente relacionada con la concentración, las formas químicas o especies de los compuestos y su persistencia y vida media en el ambiente. **Keily**. (1.999).

Por otra parte “la contaminación del aire ocurre en presencia de uno o más contaminantes en la atmósfera, en cantidades y duración tal que pueden ser nocivos para la vida, propiedad o pueden interferir con el uso y disfrute de la vida o con la realización del trabajo” **Canter**. (1.997). El “smog fotoquímico”, la lluvia ácida y el calentamiento global son efectos atmosféricos en algunos casos asociados a las fluctuaciones en las concentraciones de diversos contaminantes.

METEOROLOGÍA DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Los factores ambientales influyen en la toxicidad de los compuestos químicos, afectado no solo su metabolismo por los organismos sino su biodisponibilidad. Especialmente en el aire resulta difícil predecir el desarrollo y evolución de las emisiones debido a la complejidad de estos factores. Los principales factores de interés meteorológico en la contaminación atmosférica son: La velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad, turbulencia, estabilidad atmosférica así como los efectos topográficos. Las emisiones a la atmósfera se estudian en tres escalas: Microescala del orden de 1Km desde minutos a horas

como son los penachos y chimeneas, Mesoescala del orden de 100Km desde horas a días como son los fenómenos de viento valle – montaña y Macroescala del orden de miles de Km de días a semanas en fenómenos de altas y bajas presiones sobre océanos y continentes. El transporte de contaminantes ocurre dentro de la capa límite atmosférica (CLA), influenciada por las variaciones térmicas y rugosidad de la superficie del suelo. **Keily.** (1.999) definida también como PBL convectiva, incluye las capas superficial, de mezclado y convectiva. **Sozzi.** (1.997). La dispersión de contaminantes ocurre por fuertes fenómenos de turbulencia debidos a la estratificación de la CLA o PBL.

CAPA LÍMITE

En 1904 Prant desarrollo el concepto de capa límite, proporcionando un importante enlace entre el fluido ideal y el flujo de fluido real " Para líquidos con baja viscosidad, el efecto de la fricción interna en un fluido se aprecia solo en una región estrecha que rodea las fronteras de un fluido " así el flujo por fuera de la región angosta cerca de las fronteras sólidas se puede considerar como un flujo ideal o flujo potencial. Cuando de inicia el movimiento de un fluido de muy pequeña viscosidad, el flujo real fija las fuerzas cortantes, cerca de la frontera que reduce el flujo relativo a ala frontera. Aquella capa de fluido que ve afectando su velocidad por la fuerza cortante en la frontera se llama capa límite. La capa limite es un concepto circunstancial que dependerá de diferentes factores, podemos distinguir algunos subtipos de la capa límite planetaria.

La (VSL) es subcapa que se extiende pocas decenas de micrones sobre las superficies líquidas y sólidas (hojas, capas de pasto) aquí el transporte de calor, humedad y contaminantes ocurre por movimiento molecular poco eficiente por ello la (VSL) opone alta resistencia al cambio de gases traza y partículas microscópicas entre la atmósfera y la superficie terrestre.

La (SBL) o capa límite superficial, por su parte se extiende verticalmente hasta unos 100 m durante fuertes inversiones nocturnas. Sobre una superficie plana, suficientemente plana y sin obstáculos, los flujos verticales de impulso, de

calor, humedad y de contaminación se suponen que sean constantes dentro de esta capa límite. De hecho, la capa se define, a menudo, por el criterio de que los flujos no variarán en más de un 5%. Además se supone que la dirección del viento es constante con la altura.

La capa límite planetaria (PBL), que incluye a la SBL es de aproximadamente 1 000 m de espesor, a pesar de que puede llegar a ser de hasta solo 100 m durante las inversiones nocturnas. Dentro de la PBL, debido a la rotación de la tierra, el parámetro de coriolis, y el cambio de dirección del viento con la altura deben ser considerados. Se supone que existe un balance de fuerza entre el viento geostrófico, la resistencia por fricción con la superficie terrestre y el parámetro de coriolis. La parte superior de la PBL es la altura nominal a la cual la fricción llega a ser insignificante (alrededor de un 5% de su valor en superficie). A veces, la PBL es denominada de Capa de Ekman o capa de la espiral de Ekman.

La capa superficial de mezcla (SML) es la capa de aire sobre la superficie terrestre donde existe una fuerte mezcla turbulenta de contaminantes. La capa bien puede no existir del todo, durante inversiones por radiación, durante la noche, pero puede extenderse hacia arriba, tanto como 5 Km durante las tardes, en las zonas áridas. La parte superior de la SML es denominada la altura de mezcla (MH) y su máximo valor diario es denominado altura máxima de mezcla de la tarde. En las áreas urbanas puede liberarse el suficiente calor durante la noche, el cual, conjuntamente con el tránsito automovilístico hace que el aire se mezcle, manteniendo por consiguiente una capa superficial de mezcla urbana (USML) durante la noche. La capa superficial de mezcla es denominada, a veces, la capa límite convectiva.

la capa límite interna (IBL) se relaciona al viento debajo de un pequeño cambio de las condiciones de la superficie (de un lago a la tierra; de un bosque a una pradera; del campo a la ciudad, etc.) , el flujo de aire se ajusta dentro de una capa límite interna de espesor creciente. La relación altura/distancia sin obstáculo (z-x) disminuye aproximadamente 1: 10 cerca de la discontinuidad hasta aproximadamente 1: 100 a distancia de 20 a 30 Km. Dentro de una IBL,

los flujos verticales de impulso, calor, etc., son aproximadamente constantes con la altura, a pesar de que cambian con la distancia viento abajo, alcanzando una nueva condición de equilibrio de forma exponencial; a una relación de altura/diatancia sin obstáculos mayor de 1: 100, es permisible suponer que existe un flujo vertical constante. Una IBL podría explicarse como resultado de un cambio súbito en la rugosidad de la superficie o de energía o de ambos.

Las superficies superiores de una SBL y de una PBL no están bien definidas y no son fáciles de medir experimentalmente. Por el contrario, las partes superiores un SML y de un IBL pueden estar, a veces, bien delineadas, particularmente cuando existe por encima una inversión por subsidencia, como ocurre por ejemplo, en la zona de los vientos alisios. En tales casos, la altura de mezcla y la altura de la IBL actúan como tapaderas en la difusión vertical de la contaminación. El smog de los Ángeles, por ejemplo se debe parcialmente a la inversión por subsidencia que existe sobre la región costera de California. Desde luego, los penachos de chimeneas individuales pueden tener el suficiente empuje como para alcanzar alturas mayores que la MH . Además, existe el fenómeno diurno de convección penetrativa, el cual puede acarrear aire contaminado de superficie hasta dentro de la inversión atrapante. (el impulso ascensional de los penachos y burbujas convectivas permiten que estas sobrepasen la altura a la cual alcanzan equilibrio con el aire circundante.

Durante condiciones de buen tiempo sobre campo abierto, la altura de mezcla muestra el ciclo diurno que se presenta esquemáticamente. La altura de mezcla es cero durante la inversión por radiación durante la noche y alcanza su máximo valor durante la tarde. En condiciones de tiempo tormentoso, desde luego, la mezcla vertical puede, a veces, extenderse hacia arriba, a través de toda la troposfera.

TURBULENCIA LIBRE Y FENÓMENOS DE TRANSPORTE EN LA CAPA LÍMITE.

Al encontrarse un flujo de un fluido expuesto a una frontera se presentan gradientes de velocidad, esfuerzos cortantes y mezclas turbulentas. Un flujo turbulento libre es aquel donde el movimiento no se afecta sustancialmente por la presencia de fronteras sólidas ya que está rodeado por fluido no turbulento, ejemplo de ello son las corrientes chorro por encima de la capa límite que son utilizados para cambiar las concentraciones de contaminantes, al igual que lo hace la difusión molecular y turbulenta al interior de una capa límite.

Para entender el fenómeno de transporte se necesita establecer el concepto de "concentración" como la cantidad relativa de una sustancia en un punto específico del tiempo y el espacio, expresada en unidades de masa, peso, volumen y hasta número de partículas por unidad de fluido: el movimiento de la sustancia en el fluido se da cuando la distribución de la misma no es uniforme, es decir, existe un gradiente de concentración. Así la difusión es uno de los procesos por la cual la concentración de una sustancia en el fluido es alterada y este proceso difusivo puede resultar de la actividad molecular "difusión molecular" o de la acción de turbulencia "difusión turbulenta". Los movimientos Eddy (o de remolino) durante los flujos turbulentos son los causantes de la difusión turbulenta generalmente mayor que la molecular en la capa límite. La energía, cantidad de movimiento y masa pueden ser transportadas por difusión ya sea molecular como turbulenta.

INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES

El espesor de la atmósfera y por tanto la energía solar absorbida esta en función de la hora del día. Los rayos del sol son tangentes a la superficie terrestre en la mañana - tarde y aproximadamente perpendiculares al medio día. El periodo de insolación es casi el doble en verano que en invierno, esto indica que la cantidad real de energía solar recibida por área unitaria de

superficie es una función compleja de la posición, la estación, la hora del día y la composición de la atmósfera sobre la superficie (nubosidad). **Wark, & Warner.** (1.998)

La (PBL) actúa como una máquina térmica gigante que “transforma” la energía solar en movimiento del aire, esta transferencia de energía determina en el aire; mayor en la parte cercana al suelo y menor en la alejada, variaciones desordenadas de las variables meteorológicas como la turbulencia convectiva de origen térmico, sin embargo debido a la rugosidad superficial puede “perder” energía por fricción, generando una turbulencia mecánica en el flujo del aire. En el día la energía perdida por fricción es casi siempre mayor a la energía ganada (situación convectiva) por el contrario en la noche el suelo no puede proporcionar mas energía al aire y este pierde energía generando una situación estable. **Sozzi.** (1.997)

INFLUENCIA DEL VIENTO EN LA DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES

De manera general el calentamiento diferencial de aire origina gradientes de presión horizontales, conduciendo a movimientos también horizontales de la masa de aire en la atmósfera. En macroescala la diferencia de temperatura entre las masas de aire del polo y del ecuador así como entre los continentes y los océanos son generadores de movimientos del aire. Además del gradiente de presión, la fuerza de Coriolis o fuerza de reflexión horizontal ejercida por la aparente deflexión de una porción de aire hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur con relación al movimiento rotacional de la superficie terrestre es una función de la velocidad de la porción del aire, la latitud y de la velocidad angular de rotación. **Wark, & Warner.** (1.998)

Los vientos de gradiente y geostrófico son importantes en la descripción del movimiento en ausencia de fricción, no obstante el movimiento cercano a la superficie terrestre es retrasado por los efectos de la fricción y rugosidad

superficial respecto al flujo de aire cercano a un centro de presión en los sistemas de baja y alta presión, se encuentra que el flujo se dirige hacia abajo así como hacia fuera resultando que el aire debe introducirse desde arriba del centro y dirigirse hacia abajo a fin de mantener el flujo hacia fuera. Este flujo descendiente llamado *asentamiento* constituye un posible inhibidor de la dispersión de los contaminantes en la atmósfera. **Wark , &Warner.** (1.998)

Alrededor de un centro de baja presión el vector velocidad del viento apunta hacia adentro, por tanto un flujo cercano a un centro de baja presión tiene una dirección contraria a las manecillas del reloj, el movimiento espiral se dirige tanto hacia arriba como hacia adentro, así los contaminantes en la parte inferior de la atmósfera serán arrastrados hacia arriba dispersándose en una gran área, adicionalmente al elevarse el aire se enfría como resultado de una baja presión a mayor altura, posibilitando la condensación del agua la cual podría operar como una acción de limpieza en una atmósfera contaminada. **Wark, &Warner.** (1.998)La fuerza del retraso por fricción presenta un máximo cerca de la superficie de la tierra y de un decaimiento cercano a cero en la parte superior de la PBL, cabe anotar que la velocidad angular presenta un comportamiento contrario.

Los contaminantes son arrastrados en la dirección del viento tanto horizontal como verticalmente. A medida que los contaminantes se difunden verticalmente en la capa limite, encuentran diferentes corrientes de viento principales a diferentes alturas, mostrando una dispersión no simétrica con respecto al eje de dirección del viento esto hace que la dispersión muestre cierta tendencia oblicua en los penachos de las fuentes emisoras **Jacobson.** (1999).

GRADIENTE DE TEMPERATURA AMBIENTAL Y ADIABÁTICO

En las zonas bajas de la troposfera, la temperatura del ambiente disminuye con la altitud. La velocidad como la temperatura disminuye “gradiente de temperatura”. Estos gradientes son determinados por una sonda globo equipada con termómetro, que cuando se libera mide la temperatura de la atmósfera en su movimiento ascendente. Esto es conocido como “ gradiente de

temperatura ambiental y varía de día a día, día a noche y entre estaciones; la mayor parte del tiempo, estos disminuyen con la latitud, pero puede ocurrir lo contrario ocurriendo una inversión térmica.

El gradiente de temperatura de referencia, con el que se compara el de temperatura ambiental es el gradiente de temperatura adiabático seco (GTSA). En condiciones adiabáticas, un volumen de aire ascendente se comporta como un globo. El aire en el interior de la parcela se expande debido a que en su ascensión el aire que le rodea es menos denso y se expande hasta que su propia densidad se iguala con la del aire. El aire seco que se expande adiabáticamente se enfría a una velocidad de 9.8 °C/Km o alrededor de 1 °C/100m. **Keily, G.** (1999)

TASA DE CAMBIO

Una atmósfera “neutralmente estable” tiene lugar cuando el (GTA) o gradiente adiabático es igual al de temperatura (GTSA). En este caso sí el volumen se desplaza ascendente o descendente, su temperatura se ajustará a la de los alrededores. Una atmósfera inestable se da cuando el (GTA) excede el (GTSA), este gradiente de temperatura incita mayor turbulencia térmica. En este caso si la parcela de aire se desplaza ascendentemente se enfriará en su interior a aproximadamente 1° C/100m de modo que estará mas templada que el aire alrededor. Debido a la capacidad de flotación esta parcela continuara en ascenso. Igualmente si esta se mueve en forma descendente, será mas fría y seca que el aire alrededor y continuará descendiendo. Esta condición se conoce como “Atmósfera inestable” con gradiente de temperatura “superadiabático”.

Una característica de la atmósfera es su estabilidad esto es, su tendencia a resistir el movimiento vertical. Este comportamiento influye en la capacidad de la atmósfera de dispersar los contaminantes procedentes de fuentes naturales o por el hombre. Cuando un pequeño volumen de aire o parcela de aire se desplaza hacia arriba dentro de la atmósfera, encuentra una presión menor

presenta una expansión a una temperatura menor. Usualmente la expansión es tan rápida como para suponer que no hay lugar a alguna transferencia de calor entre dicho volumen de aire y la atmósfera que la rodea. Es conveniente definir una *tasa de cambio* como el valor negativo del gradiente de temperatura en la atmósfera. La tasa de cambio adiabática seca es extremadamente importante en los estudios meteorológicos especialmente en contaminación. **Keily.** (1999)

MOVIMIENTO DE CONTAMINANTES EN LA CAPA LIMITE

El movimiento de los contaminantes y componentes tóxicos a través del medio es similar al movimiento de energía y nutrientes por los ecosistemas y en mayor escala por la biosfera. El estudio del movimiento de contaminantes a través del medio conocido como ecotoxicología, incluye una serie de procesos relacionados como la bioacumulación y biomagnificación de los contaminantes tóxicos en los sistemas vivos, procesos de dispersión y mezcla en la atmósfera e hidrosfera así como la formulación de modelos matemáticos que explican su comportamiento y movimiento, determinados por complejos factores meteorológicos, del origen de la emisión de los contaminantes y de los procesos que los generan.

Se asume que los contaminantes al igual que otras sustancias, presentan comportamientos cíclicos. Su estancia aérea inicia con la emisión seguida de su transporte y difusión en la atmósfera. Completándose el ciclo con su depósito en la vegetación, transporte a través de las redes tróficas, así como su depósito directo en la superficie del suelo y del agua, y de otros objetos cuando son arrastrados por la lluvia, o cuando escapan al espacio. **Wark & Warner.** (1998). Los contaminantes del aire emitidos por fuentes puntuales y móviles son transportados, dispersos, o concentrados por condiciones meteorológicas y topográficas, en algunas regiones estas condiciones conducen a la acumulación y concentración de los contaminantes acelerando el deterioro de las edificaciones, afectación de la salud pública, así como la vegetación del área.

El establecimiento de los patrones de transporte y dispersión en áreas consideradas, basados en modelos matemáticos de la atmósfera local suministrara entonces los datos conocidos de las tasas de emisión para el área, logrando así trazar mapas para las concentraciones estimadas de los diversos contaminantes en toda la región. Si es exitoso el modelo, duplicará la información de los datos actuales tomados en las estaciones de monitoreo, estableciendo así las normas de emisión de las fuentes en concordancia con la normatividad de calidad del aire para un área.

Por otra parte la dispersión en la atmósfera de los efluentes que proceden de respiraderos y chimeneas depende de diversos factores correlacionados: naturaleza física y química de los efluentes, características meteorológicas, ubicación de la chimenea en relación con la obstrucción al movimiento del aire, naturaleza del terreno que se encuentra en la dirección del viento que viene de la chimenea. Existen métodos analíticos para relacionar la dispersión de los efluentes con un número de los factores mencionados. Los efluentes de las chimeneas pueden ser de gases o de gases y partículas. Las partículas con diámetro menor de $20\mu\text{m}$ o menos tiene velocidad de sedimentación tan baja que se mueven igual que el gas. **Jacobson**, (1999).

Los procedimientos analíticos para la dispersión de los gases se aplican para pequeñas partículas. Sin embargo las partículas grandes no se tratan igual por su velocidad de sedimentación que resulta en una concentración mas alta a nivel del suelo del contaminante sólido mas cerca de la chimenea que el caso de los gases.

Para la máxima dispersión, los efluentes deben salir con suficiente cantidad de movimiento y flotación, a fin que siga su ascenso luego de salir de la chimenea. Si el viento no tiene velocidad suficiente, las plumas de baja densidad alcanzan grandes velocidades, con las consecuentes bajas concentraciones a nivel del suelo. Las partículas grandes y plumas de gas densa caen al suelo cerca de la chimenea. Altas velocidades del viento aumentan la acción diluyente de la atmósfera, dando bajas concentraciones a nivel del suelo, en dirección del viento con respecto la chimenea. **Jacobson**, (1999).

El ascenso de plumas de alta temperatura causa la flotación por la alta temperatura de los gases. Cuando la pluma se desvía en el viento, se diluye a lo largo de su eje de dispersión proporcional a la velocidad promedio del viento, a la altura de la pluma, reduciendo así capacidad de flotación. En el aire estratificado, la flotación de la pluma se disipa como resultado de la estabilidad de la atmósfera circundante. Cuando existe condiciones neutrales, la pluma se difunde por turbulencia cuya intensidad es función de la rugosidad del terreno, la altura y la velocidad del viento.

Para impedir la deflexión descendente de la pluma a la salida de la chimenea, La velocidad V_s deflexión debe ser grande. Si un 98% de la velocidad del viento es igual o menor a 15m/s, una velocidad de 20m/s protegerá contra la deflexión por un 98% del tiempo. Esto es, la deflexión descendente de una chimenea es mínima cuando la velocidad del gas en la chimenea, es el doble de la velocidad del viento en la parte superior de la chimenea. **Sozzi**, (1997)

a. Modelo de difusión turbulenta

El enfoque de la teoría del transporte se basa en el “modelo de difusión turbulenta” que aplica el concepto de “longitud de mezclado”. Este es el punto inicial en el desarrollo del modelo. La ecuación básica de este modelo es la siguiente:

$$u \frac{aC}{ax} = K_{yy} \frac{a^2C}{ay^2} + K_{zz} \frac{a^2C}{az^2} \quad (1)$$

donde $K_{yy} \neq K_{zz}$. La solución de esta ecuación debe también cumplir las siguientes condiciones de frontera :

1. $C \rightarrow \infty$, cuando $x \rightarrow 0$ (una gran concentración de la fuente puntual)

2. $C \rightarrow 0$, cuando $x, y, z \rightarrow \infty$ (concentraciones cero a una gran distancia de la fuente)
3. $K_{zz} (aC/az) \rightarrow 0$ cuando $z \rightarrow 0$ (no hay difusión en la superficie)
(la tasa de transporte contaminante en la dirección del viento es constante e igual a la tasa de emisión Q del contaminante en la fuente)

A nivel del suelo la ecuación es :

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

Por tanto, la solución de la ecuación teórica indica que el valor de C a nivel del suelo y a lo largo de la línea de la pluma es inversamente proporcional a x e independiente de la velocidad del viento, u . Esta ecuación indica que, lejos de la línea de centro, la concentración decae exponencialmente tanto en la dirección y como en z . Matemáticamente esto significa que C en la dirección transversal al viento y en la vertical puede estar distribuido "normalmente". Además, la disminución del valor C en la dirección x depende mucho de los valores de K_{zz} y K_{yy} . **Jacobson**. (1999).

b. Modelo Gaussiano Estacionario

A pesar de que son posibles varios enfoques del problema, por lo general se necesita posiciones simplificadoras a fin de obtener una solución. De esto resulta que las teorías llegan a la función de distribución *gaussiana*, por ser pionera en la prevención, planificación y descripción de impacto ambiental en USA, así como su utilidad es amplia cuando la información meteorológica disponible es limitada. Su forma analítica puede ser derivada rigurosamente de la teoría Euleriana y también de la teoría Lagrangiana siempre y cuando las emisiones de contaminantes sean constantes, las fuentes sean localizadas en un punto geométrico del espacio o fuente punto, los campos de viento sean constantes y uniformes y la turbulencia de la PBL sea gaussiana, homogénea, isotropa y estacionaria es decir no convectiva **Sozzi**. (1997).

Las previsiones del modelo gaussiano estacionario son realistas si el suelo no presenta orografía significativa, las fuentes de contaminantes son chimeneas bastante altas, con emisiones constantes de contaminantes no reactivos o poco reactivos, la variación de los parámetros meteorológicos y micrometeorológicos es muy lenta en el tiempo y el espacio y la PBL esta en situación más o menos adiabática **Sozzi**, (1997).

Los programas mas importantes que implementan la estructura del modelo gaussiano estacionario son: El ISC3 (US-E.P.A) basado en la teoría estándar, puede tratar fuentes punto, área y volumen usando los parámetros de dispersión Pasquill-Gifford y Briggs, OML (NERI-DK) referenciado para Europa del norte, utiliza toda la información disponible sobre turbulencia atmosférica para cálculos de dispersión y elevación de la pluma y CALINE3 (US - E.P.A) estima la concentración de contaminantes derivados de las calles. Otros modelos estacionarios híbridos como S. HANNA (US- E.P.A) son capaces de realismo en situaciones convectivas por su capacidad de utilizar parámetros de turbulencia atmosférica. Por su parte existen modelos para situaciones particulares como "Canyon urbano" que determina la contaminación en la parte central de las ciudades por óxidos de nitrógeno derivado del trafico de los automotores e las carreteras, o los modelos gaussianos "PUFF" (MESOPUFF II , RIMPUFF, AVACTA II y CALPUFF) utilizados cuando se debe modelar con un dominio espacial muy grande; en el orden de los 100Km de lado, y el cambio del viento necesariamente no es uniforme (estudios a mesoescala).

c. Modelo Euleriano

Es uno de los pocos modelos que describe los procesos fotoquímicos en la PBL, explica la dispersión de los contaminantes usando las ecuaciones básicas de la hidrodinámica como son: el balance de masa de aire en la PBL, el balance de momentum, calor, humedad, la ley de los gases y el balance de todos los contaminantes que se quiera estudiar. Este modelo se separa en dos partes independientes: por un lado la reconstrucción de los campos meteorológicos medios y por otro la dispersión de los contaminantes **Sozzi**, (1997).

d. Modelo Lagrangiano de partícula

A partir de la teoría lagrangiana de la dispersión de los contaminantes en el aire surge un modelo estadístico bastante realista basado en el conocimiento del campo tridimensional del viento medio y la estadística de las tres componentes del vector viento como elementos meteorológicos que nutren el modelo. Por su parte los elementos básicos de las fuentes de contaminantes son las características geométricas como son altura, radio de la chimenea y posición; físicas como velocidad de salida de humo, temperatura y densidad; finalmente químicas como la tasa de emisión de los diversos contaminantes.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

No es casual que las proyecciones climáticas a largo plazo estén mostrando un acelerando aumento de la temperatura producto del cambio climático natural, debido, precisamente a los excesivos procesos industriales, tala y deforestación de zonas vegetales, utilización masiva de combustibles fósiles, que generan cambios reales en los flujos de materia y energía del ambiente, alterando de esta manera sus variaciones naturales. Estas proyecciones son importantes en la medición y prevención de los impactos socioeconómicos consecuentes y requieren por tanto estudios a diferente escala. El estudio de dichas variaciones del comportamiento del clima en nuestra región permitirá no solo la formulación de acciones directas en las decisiones futuras, además de presencia científico-tecnológicos tanto nacional como internacional **Vega,** (2002)

Para lograrlo, el estudio de los fenómenos atmosféricos tanto nacionales como internacionales tienen como denominador común la comprensión de la dinámica de fluidos en toda su complejidad. Esto quiere decir que los sistemas que estudiamos en la atmósfera están formados por una mezcla de gases reactivos en movimiento, además de un perfil de temperatura y presión

determinados por la dinámica del sistema. En esta dinámica también interviene la radiación solar que llega a un lugar determinado y los contaminantes antropogénicos, producto de la actividad humana. Técnicamente tenemos, entonces, el estudio de un sistema por demás complejo donde se requieren conocer los métodos; tanto matemáticos como de modelación, de la hidrodinámica, termodinámica, óptica atmosférica, cinética química, etc., así como los métodos numéricos apropiados para resolver ecuaciones diferenciales parciales acopladas y no lineales, todo ello con condiciones de inicio y frontera impuestas por el lugar al cual se quiere aplicar el modelo, requiriendo así, técnicas de Downscaling para los estudios de variabilidad climática y cambio climático en el país.

Aún cuando en la literatura este tipo de problemas se han trabajado extensamente, es claro que también hay un gran número de problemas no resueltos; no sólo por la complejidad del de los sistemas que se estudian sino porque la aplicación de los resultados a una localidad en particular requiere de datos específicos y de las adaptaciones correspondientes.

De esta manera el suelo y la atmósfera forman un sistema altamente acoplado. Los flujos en la superficie no solamente controlan la entrada de energía y agua en la atmósfera, sino que ellos mismos también dependen de las propiedades dinámicas y termodinámicas de la capa límite a través de una cadena de procesos que abarcan nubosidad, contenido de agua en el suelo, evaporación, hidrología de la subsuperficie y cobertura de la vegetación. La observación y modelamiento de estos sistemas acoplados suelo/atmósfera es la primera tarea a desarrollar en la comprensión de los escenarios climáticos en la Capa Límite propios del territorio Nacional.

Por todo lo mencionado anteriormente encontrar mediante la ejecución de un modelo discretizante de la PLB, las correlaciones existentes entre las concentraciones de flujos turbulentos y los gradientes de dichas concentraciones tanto en coeficientes locales como no locales es una tarea necesaria y pertinente para la modelación en de una N sub-unidad de la Capa Límite Bogotana mediante la información aportada por el modelo MM5 del

National Centre for Atmospheric Research y compararlo con el propuesto para capa límite por **Vega**. (2000) para superficie teniendo en cuenta los coeficientes de **Pasquill and Smith**. (1983) para los eventos locales y los cambios no locales de los coeficientes que dependen de las propiedades Diarias de la Capa límite planetaria según **Holtslang and Moeng**. (1991).

METODOLOGIA

Revisión bibliográfica

En una atmósfera urbana contaminada tenemos dos tipos de fuentes de contaminantes, las fuentes fijas que como resultado de la actividad industrial arrojan a la atmósfera especies químicas que alteran la dinámica de una atmósfera limpia y las fuentes móviles esencialmente provenientes del transporte urbano. Ambas contribuciones se mezclan con el aire y catalizadas por la radiación solar reaccionan químicamente produciendo diversas especies que en mayor o menor medida aumentan el problema de una atmósfera contaminada. El viento en una localidad dada transporta los contaminantes a regiones diferentes del lugar donde se producen y las características de éste generalmente indican la presencia de un flujo turbulento. De esta manera el campo de velocidad en el aire provoca el transporte a través de advección y difusión turbulenta. Las ecuaciones que rigen la dinámica, son las ecuaciones de las concentraciones de cada una de las especies contaminantes presentes.

En estas ecuaciones intervienen el mecanismo fotoquímico que produce las reacciones y el campo de vientos que nos permite calcular la contribución de la advección y la difusión turbulenta. Es importante señalar que estas ecuaciones deben resolverse numéricamente y es necesario alimentar el programa simulador con datos iniciales para las concentraciones, con las condiciones topográficas de la localidad y con la forma de la superficie que limita a la capa de mezclado. Ésta última es una función del tiempo a lo largo del día y en general podría ser diferente en regiones distintas dentro de la misma área que se está estudiando.

La dinámica de la superficie que limita la capa de mezclado en una atmósfera contaminada puede también ser una función de la cantidad y distribución de tamaños de las partículas suspendidas en ella. En la literatura se han realizado caracterizaciones de las partículas en cuanto a su distribución de tamaños y su composición, sin embargo la dinámica misma de las partículas no ha sido estudiada.

Como se ha mencionado antes, el campo de vientos en la atmósfera generalmente cumple con las características de flujo turbulento. Es bien sabido que el problema de la turbulencia en general no está resuelto y para la aplicación que se busca en este proyecto es necesario conocer los modelos existentes y probarlos en la región de estudio. En este caso, lo que más interesa es la aplicación y validación de los modelos existentes en el caso en que están presentes las reacciones químicas. En la literatura se ha tomado como un hecho comprobado que la presencia de la turbulencia no altera la rapidez de reacción, sin embargo dicha aseveración sólo tiene un fundamento empírico, que además es un tanto cuestionable. Se han iniciado trabajos en el que se genera un campo de velocidades que tiene las características de un campo turbulento controlado y posteriormente calculado la evolución de la concentración proveniente de una fuente puntual localizada, calculando también las funciones de correlación y por otra parte se ha comparado con los modelos de difusión turbulenta existentes en la literatura.

Es nuestro interés tomar estos resultados y ahora dejar que dos especies reaccionen, de manera se pueda ver si la turbulencia tiene un efecto sobre ella. Para la aplicación al caso de la capa límite es importante contar con los datos meteorológicos propios de la región a estudiar, no sólo se necesitan sino que además debemos tener un estudio estadístico en cuanto a su representatividad y validación. De aquí se desprende que estos análisis estadísticos sean de fundamental interés, se pretende hacer estos estudios de manera sistemática para los datos meteorológicos existentes, usarlos y si en su caso sugerir las mediciones a realizar.

Es un hecho que la presencia de partículas en la atmósfera afecta de manera muy significativa a la radiación solar que llega a la superficie. La radiación se dispersa, absorbe y reemite dependiendo de los gases y las partículas que encuentra en su trayectoria. Para el estudio de la dispersión es importante notar que no sólo está presente la dispersión Rayleigh producida por los gases en el aire, también la dispersión de Mie producida por las partículas que no sólo depende de la cantidad de ellas sino también de su distribución de tamaños entre otras características. Así, el resolver las ecuaciones de transferencia radiativa en la atmósfera para condiciones propias de la capa límite nos da información valiosa.

El mecanismo fotoquímico existente en una atmósfera contaminada depende de las especies presentes en la mezcla, las partículas suspendidas, el perfil de temperatura, la humedad relativa y de la presión. Esto sucede en general para las reacciones termoquímicas, pero en el caso en que están presentes las reacciones fotoquímicas, resulta sumamente importante el espectro de la radiación que llega a la región. De hecho en el caso de la producción de O₃ interviene de manera crucial la radiación, que en presencia de especies precursoras favorece la producción de los radicales adecuados para su formación, además de otras especies como el peroxiacetonitrilo (PAN) que es agente fuertemente cancerígeno. El estudio de estos mecanismos forma una parte importante de una simulación de episodios y de la construcción de las llamadas isopletras de ozono, curvas que nos dicen el máximo de ozono producido como función de la cantidad total de emisiones de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno.

PROCEDIMIENTO METODOLOGICO

Para esta proyecto se emplearon cinco fases de trabajo, inicialmente la consecución del material bibliográfico, posteriormente la selección, tratamiento y estandarización de los datos provenientes de los perfiles atmosféricos arrojados por el radio sonda, de la red de monitoreo ambiental, seguido por la estimación de los parámetros y coeficientes para microescala del modelo, datos de entrada y de contorno, una vez obtenidos y analizados estos datos se

selecciona el tratamiento matemático mas adecuado para el ajuste de los nuevos datos y se generan los comportamientos gracias al algoritmo generado con los datos reales para el periodo y zona comprendida en gráficos y mapas que generaran el nuevo modelo.

Fase 1: Consecución del material bibliográfico. Consistente en la recopilar toda la información técnica relacionada con metodologías para el calculo de dispersión de contaminantes en capa limite tanto nacional como mundial. Importante para adecuar la metodología planteada por **Vega**. (2000), para la modelación en capa limite, así como los datos pertinentes de los radisondeos del aeropuerto el dorado de bogota que permitirá el análisis del los perfiles atmosféricos pertinentes para el estudio.

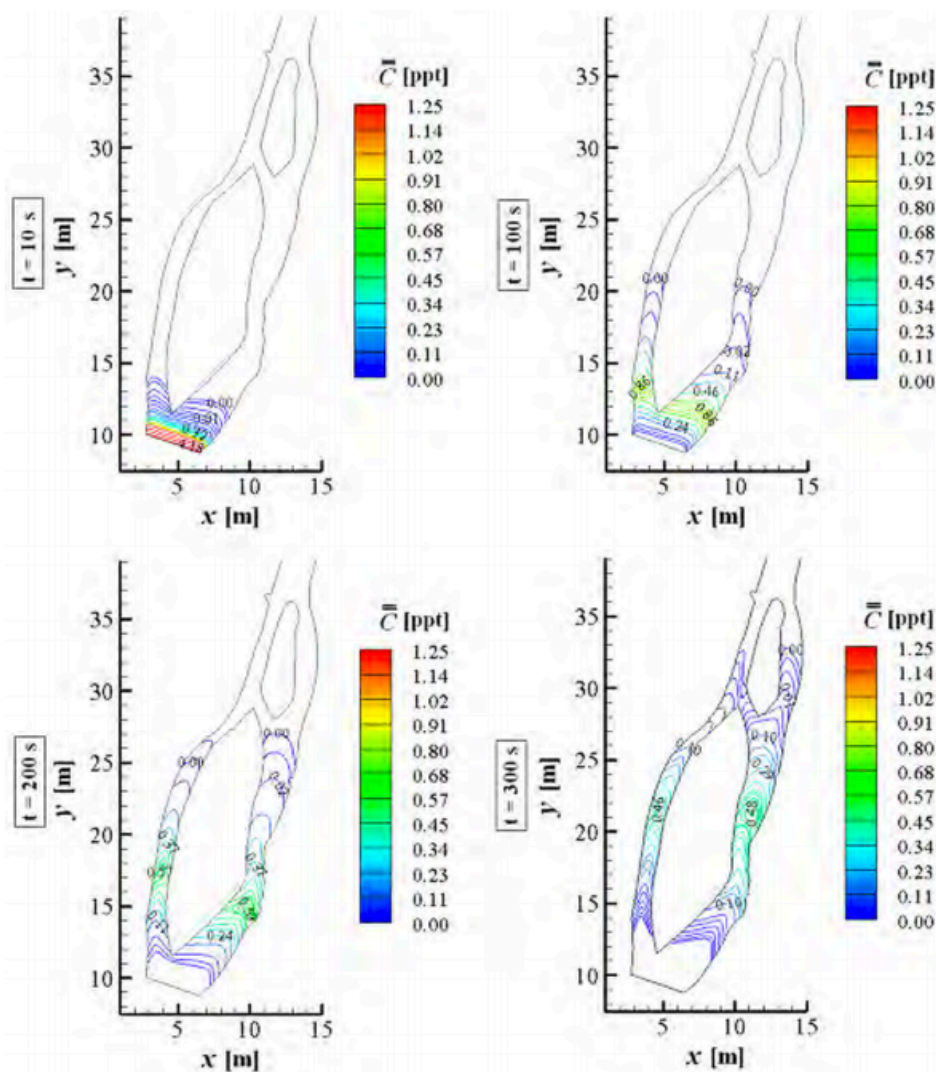
Fase 2: Selección, tratamiento y estandarización de los datos. En esta fase se priorizaron los datos relevantes tanto de las estaciones de la red de monitoreo ambiental como los del sondeo, seleccionando los que presenten mayor seguimiento y continuidad se ajustan basado en modelos estadísticos y se proyectan los faltantes para obtener confiabilidad en los datos que servirán de soporte a modelo final.

Fase 3: Generación del algoritmo del modelo y posterior programación en el lenguaje escogido. Parametrización e identificación usando el histórico de la red ambiental, se valida realizando una prueba a ciegas, para la parametrización se utilizaron varios tratamientos matemáticos, en este se escogio el que mas se ajuste a nuestro modelo.

Fase 4: Selección y aplicación del modelo micrometeorológico de dispersión de contaminantes adecuado para los datos obtenidos. Una vez obtenidos los datos y teniendo en cuantas las variables meteorológicos a la escala adecuadas se evalúa el modelo apropiado para correr los datos obtenidos en la búsqueda del comportamiento acorde a las concentraciones, el modelo que mejor se ajuste a las condiciones de los datos obtenidos necesariamente debe ser ajustado a las necesidades de la investigación.

Fase 5: Generación de las de mapas de concentración y graficas de los patrones de distribución de los contaminantes para Bogotá. Una vez el modelo arroja los primeros datos se analizan los gráficos y mapas obtenidos para el posterior análisis de comportamiento de estos contaminantes en la atmósfera explicando las tendencias y proyecciones así como los factores y variables meteorológicas de mayor incidencia y relevancia en la dispersión de los contaminates en la capa limite Bogotana

Modelos posibles



Conclusiones

Figura 1: tipos de modelos que muestra la concentración de un trazador en el tiempo

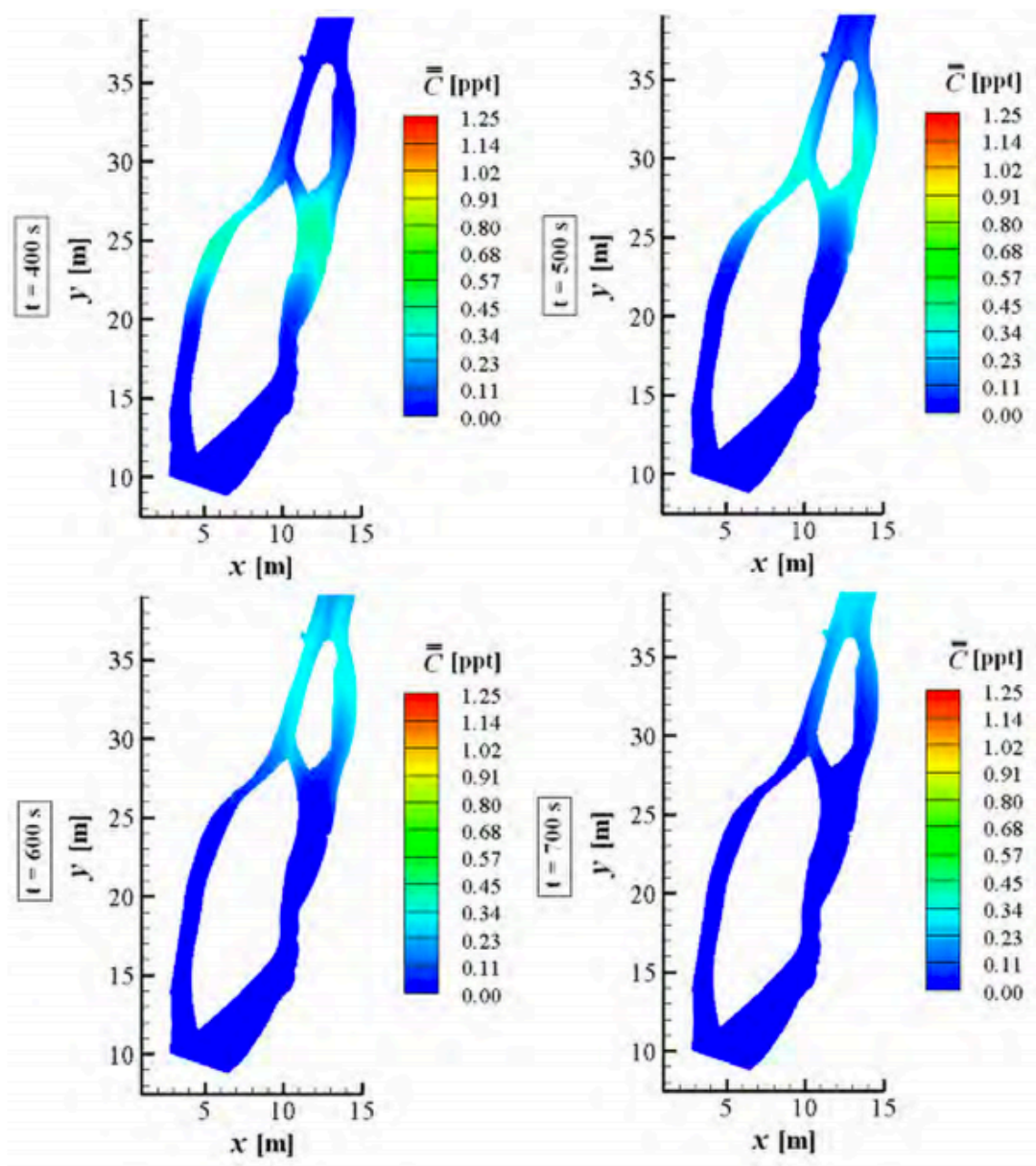


figura 2. tipos de modelo que muestran la evolucion de un trazador en el tiempo

CONCLUSIONES

Es importante tener en cuenta que en la modelación de contaminantes un modelo de dispersión enlaza tres componentes básicos para su simulación como la meteorología actuante, las emisiones establecidas en una línea base de inventario de fuentes y la química atmosférica

Es necesario tener en cuenta en cualquier modelo que pretenda discretizar la atmósfera debe poder explicar la estabilidad atmosférica dentro de la Capa Superficial como lo hacen los modelos más utilizados de contaminación atmosférica

En la modelación cuando se asume una mirada en altura es indistinguible la sensibilidad entre la turbulencia térmica y mecánica, por ello la discretización ofrece la oportunidad de diferenciar estos dos tipos de turbulencia.

Es necesario correr los modelos micrometeorológicos dentro del cálculo de la capa de mezcla para determinar qué porcentaje de corrimiento tienen con respecto a los modelos reales, datos como los del día con carro o sin carro, o de emisiones fijas como chimeneas y otras fuentes puntuales permitan ajustar las bondades de estos modelos en capa de mezcla en tiempo real

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Berkowicz, R.R., Olesen H,R and Torp U.** 1986.The Danish Gaussian air pollution model (OML).
- Canter, L.** 1997. Manual de Evaluación de Impacto Ambiental, McGraw – Hill/interamericana de España. cap. 4, 5 y 6 pag 124 – 229
- Goody, R** .1995."Principles of Atmospheric Physics and Chemistry". Oxford University Press,
- Hanna S.R.,** 1989.Confidence limit for air quality models as estimated by bootstrap and jackknife resampling methods. Atmospheric Environmental.
- Holtstang A,A.M. And Moeng C.H.,** 1991.Eddy diffusivity and countergradient transport in the convective boundary layer. J. Atmos. Sci.48, 1690-1698
- Jacobson, M.** 1999. Fundamentals of Atmospheric Modeling. Cambridge, University press.
- Keily, G.** 1999. Ingeniería Ambiental. Fundamentos, Entornos, Tecnologías y Sistemas de Gestión. McGraw – Hill/interamericana de España.
- Nevers, N.** 1997. Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire. McGraw – Hill.
- OMM.** Organización Meteorológica Mundial, 1990. Compendio de meteorología, vol. II. Secretaria de la organización meteorológica mundial. Ginebra.
- Paulsen C, A** 1975,. The mathematical representation of wind and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer J. Appl. Met 9 857-861.
- Quarles, J. & Lewis ,W.,** 1990 : The New Clean Air Act, Morgan, Lewis , and Bockius, Washington, DC
- Ruíz, j., & Pabón, J.** (octubre de 2002). propuesta de un modelo Estacionario de diagnostico de dispersion de contaminantes químicamente no reactivo aplicado para fuentes móviles en bogota . (U. N. Colombia, Ed.) Meteorología Colombiana(6), 131-138.
- Schulman, L. Strimaitis, D. Y Scire, J** : 2000. "Development and Evaluation of the PRIME Plume Rise and Building Downwash Model". J. Air & Waste Management Association 50, p. 378-390.

Sozzi, R. 1997. La Turbulencia de la Atmósfera y la Dispersión de los Contaminantes. Vol. 1 y 2 ASAS Bucaramanga Colombia y Servicio Territorio Cinisello Balsamo – Italia .

Strimaitis, D. Scire J y Cheng J: 1988. “Evaluation of the CALPUFF Dispersion

Vega, E.E. (2000), Capa límite atmosférica en las regiones tropicales. Revista colombiana de meteorología No. 1. Universidad Nacional, pp 67-70.

Wark, K. & Warner, F. 1998. Contaminación del Aire Origen y Control, Editorial Limusa Grupo Noriega Editores. Cap. 3