

Modelo de calidad del aire para Bogotá

**Alber Hamersson
Sánchez Ipiá**

**Willington Libardo
Siabato Vaca**

**John William
Cely Pulido**

RESUMEN

A través de los años, la humanidad ha dispersado polutantes en la atmósfera. Las grandes ciudades y sus fabricas producen contaminantes aéreos, estas sustancias pueden alcanzar los pulmones de los seres humanos y así enfermarlos. Este es un problema que ha venido empeorando desde que se dio la revolución industrial y ahora es uno de los asuntos más importantes de muchos congresos internacionales.

Este artículo describe uno de los esfuerzos que ha hecho la Universidad Distrital Francisco José de Caldas acerca de este problema en Bogotá D.C., Colombia.

Cuando una estación atmosférica mide la concentración de un determinado polutante en el aire no discrimina entre las fuentes de dicha contaminación (fábricas, automóviles, aeropuertos, transporte de partículas de origen antropogénico y otras naturales). El modelo de pluma de Gauss en cualquiera de sus tipos, puntual, lineal o de área, permite una aproximación a la cuantificación de dichas fuentes por separado, y esto es conducente a la creación de controles sobre dichas fuentes, ahorrando así tiempo y esfuerzos en el control de la contaminación.

Los resultados de este trabajo implican un mejoramiento sustancial en el proceso de análisis de la información recolectada por cada una de las estaciones. El modelo planteado presenta como resultados al cruzarlo con la información geográfica la descripción precisa del comportamiento de las concentraciones emitidas por un conjunto de chimeneas para cualquier conjunto de datos que hayan sido recolectados en determinada fecha y hora, a partir de esta información espacial se compara con las normas establecidas para el control de máximas emisiones como es la Resolución 391 de 2001 del DAMA¹, así se podrá determinar de una manera muy sencilla y ágil no solo si se esta transgrediendo o no la norma, sino las zonas de la ciudad en donde se presenta dicha falla.

Palabras clave: Meteorología de la calidad del Aire, Modelo de pluma de Gauss, Calidad del Aire, Distribución de Gases Contaminantes.

An air quality model for Bogotá

ABSTRACT

Through years, mankind has spread pollutants in the atmosphere. Big cities and their factories produ-

ce air contaminants, this substances can reach humans' lungs and make people sick. these is a problem that has been getting worse since the industrial revolution and nowadays one of the main topics of many international meetings.

This article describes one of the efforts that "Universidad Distrital Francisco José de Caldas" has made about this problem in Bogotá D.C. Colombia.

When an atmospheric station measures the concentration of pollutants in the air, these measures do not select the source (factories, cars, airports, human emissions and natural particles). All kinds of the Gaussian plume model (punctual, linear) allow an approach to the quantification of this sources separately. This permits the control of this sources and save time and efforts for the contamination control.

The results of this work imply a substantial improvement in the analysis process of the information gathered by each one of the stations. The raised model presents as results when crossing it with geographical information the precise description of the behavior of the concentrations emitted by a group of chimneys for any group of data that have been gathered in certain date and hour. Starting from this spatial information it is compared with the established norms for the control of maximum emissions like Resolution 391 of 2001 of the DAMA. This way, it will be able to determinate in a very simple and agile way if the norm is been transgressing and the areas of the city where this flaw is happening.

Key words: Air quality meteorology, Gaussian plume model, Air quality, Pollutants distribution.

INTRODUCCIÓN

Es de amplia difusión los efectos que tienen sobre la atmósfera (y a la larga sobre el hombre) las distintas sustancias residuales arrojadas a la misma generadas por diversas actividades humanas en los distintos sectores de la economía; entre las más conocidas se encuentran los gases de efecto invernadero y sus conocidos efectos sobre la capa de ozono. Una de las posibles preguntas resultantes del anterior comentario es ¿Quién se preocupa por los efectos inmediatos sobre la humanidad que puedan ser consecuencia de la contaminación arrojada a la atmósfera por ella misma?

Este artículo resume los aspectos fundamentales del modelo de Pluma de Gauss.

¹Departamento técnico Administrativo del Medio Ambiente.

El proyecto de investigación modelo para el análisis del comportamiento y distribución de los gases contaminantes y material particulado en la zona urbana del altiplano de Bogotá esta compuesto por cinco modelos: Pluma de Gauss, Geoestadístico, Estadístico, Matemático y Físico.

Pues bien, la meteorología de la calidad del aire es la rama de la meteorología que se preocupa por el efecto que puedan tener los contaminantes arrojados a la atmósfera sobre los seres vivos. Entre sus competencias, se encuentra el desarrollo de modelos que permitan llevar a estimaciones de la cantidad de sustancias nocivas que pueden llegar a afectar a un determinado grupo humano, animal o vegetal.

Enmarcado dentro de lo anteriormente mencionado, la Universidad Distrital Francisco José de Caldas encamina esfuerzos a obtener respuestas para los interrogantes que al respecto se ciernen sobre la ciudad que la alberga, mediante el proyecto titulado: *Modelo para el análisis del comportamiento y distribución de los gases contaminantes y material particulado en la zona urbana del altiplano de Bogotá*. Este artículo describe el primer modelo de los cinco que conforman todo el proyecto, Modelo de pluma de Gauss, ilustrando su fundamentación teórica y las consideraciones para aplicarlo en la zona urbana y específicamente en Bogotá.

I. EL PROYECTO

Al interior de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas se está gestando un proyecto conducente a la obtención de un modelo (o mejor conjunto de modelos) que permitan hacer frente a los interrogantes planteados por el crecimiento de las industrias y el número de automotores en un ambiente urbano (para este caso, Bogotá D.C.) y sus consecuencias en la calidad del aire que respiran sus habitantes, que en su primera fase trabajó sobre modelo de pluma de Gauss. Dicho proyecto esta siendo desarrollado por el grupo Núcleo de Investigación en Datos Espaciales NIDE, adscrito a la Facultad de Ingeniería de la mencionada Universidad, en el proyecto curricular de Ingeniería Catastral y Geodesia.

El proyecto busca encontrar alternativas para analizar el comportamiento y la distribución de los gases contaminantes y material particulado suspendido en el aire para la zona urbana del altiplano de Bogotá a las ya existentes y brindar herramientas de juicio, control y seguimiento a las instituciones del estado que son competentes al tema de la contaminación atmosférica, desde los enfoques de los modelos de pluma de Gauss, geoestadístico, estadístico, matemático y físico.

Durante la primera fase de desarrollo de este proyecto, la cual da origen al presente artículo, se hizo énfasis en el primer modelo de los mencionados en el párrafo anterior.

II. EL MODELO

Uno de los modelos inscritos en la meteorología de la calidad del aire es el modelo de pluma de Gauss, derivado de la premisa que postula que, *cuando un contaminante abandona la fuente que lo produce, se aleja de*

este a través de la atmósfera dispersándose y aproximándose en su distribución a la descrita por la ecuación matemática conocida en la estadística y la probabilidad como campana o curva de Gauss.

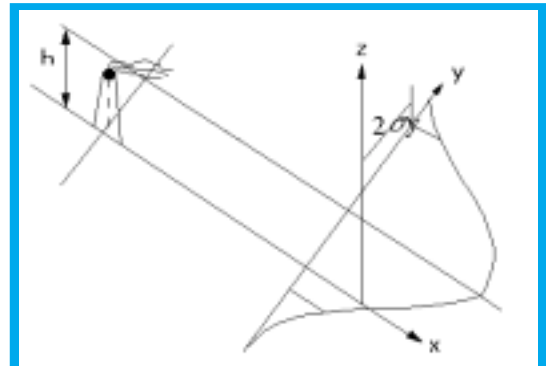


Figura 1. Esquema del modelo de pluma de Gauss. Se representan las partes de una típica pluma de Gauss, los ejes coordenados con origen en la base de la chimenea, el eje de la pluma elevado a una distancia h del suelo, representando los puntos de mayor concentración del polutante y una campana de Gauss mostrando la distribución transversal de la contaminación.

En principio, un modelo de pluma de Gauss describe cómo se distribuye un polutante que es arrojado a la atmósfera desde una fuente fija (chimenea), permitiendo estimar su concentración en un punto alejado a una determinada distancia de su fuente emisora.

No solamente las chimeneas de las fabricas pueden ser consideradas como “fuentes puntuales”, también pueden ser consideradas así los cráteres de los volcanes que arrojan plumas de ceniza y compuestos de azufre a la atmósfera cuando se encuentran en actividad o edificios en llamas (como las torres gemelas en New York durante los ataques del 11 de septiembre de 2001 o el escape de gases radioactivos de una planta nuclear hace unos años en Japón) u otros como los residuos de la combustión de petróleo en un atentado a un oleoducto; aunque el modelo puede ser modificado, permitiendo estimar concentraciones de contaminantes a partir de fuentes lineales, donde estas fuentes lineales podrían representar, por ejemplo, una vía por la que constantemente circulan vehículos con motor de combustión interna de combustibles fósiles.

Es condición fundamental para una correcta aplicación del modelo, que no sea utilizado para estimar concentraciones de contaminantes que reaccionen con otros compuestos o elementos químicos presentes en la atmósfera, dado que estas reacciones alteran las cantidades de contaminantes presentes; caso contrario, se deben incluir en el modelo estas consideraciones ó se debe usar un modelo que tenga en cuenta este aspecto.

La ecuación que describe el Modelo de pluma de Gauss y que fue planteada inicialmente por O. G. Sutton² en 1932 es:

² www.shodor.org/cas/gaussian.html

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2 * \pi * u * \sigma_y * \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-h}{\sigma_z} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z+h}{\sigma_z} \right)^2} \right\}$$

Dentro de la ecuación se tienen los siguientes miembros:

- $C(x, y, z)$ Es la concentración de la emisión (en microgramos por metro cúbico) en cualquier punto a X metros en la dirección del viento desde la fuente, Y metros lateralmente desde el eje de la pluma y Z metros sobre el suelo.
- Q Es la cantidad o masa de la emisión (en gramos) por unidad de tiempo (en segundos).
- u Es la velocidad del viento (en metros por segundo).
- h Es la altura de la fuente sobre el nivel del suelo (en metros).
- $\sigma_y ; \sigma_z$ Son las desviaciones estándar de una pluma estadísticamente normal en las dimensiones lateral y vertical, respectivamente.

En esencia, la ecuación describe el flujo del contaminante en un punto relativo al eje de la pluma en términos de desviaciones estándar respecto a los ejes coordenados Y & Z . El denominador del término principal de la ecuación establece el flujo uniforme³, es decir el producto de la sección transversal de la pluma ($2\pi \sigma_y \sigma_z$) y la velocidad constante de la emisión (u). Al involucrar el término Q el flujo se convierte en el flujo del contaminante, los términos restantes son la normalización de las coordenadas del punto para su respectiva ubicación relativa.

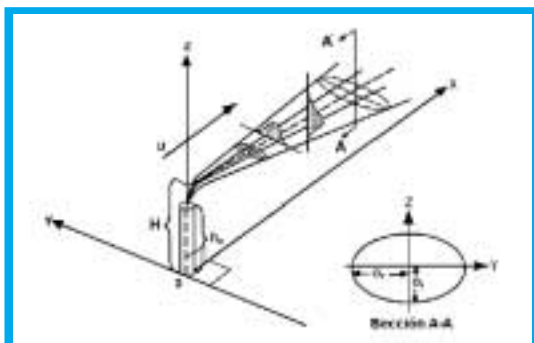


Figura 2. Representación espacial del Modelo de pluma de Gauss⁴. En la figura se aprecia claramente cada uno de los componentes de la ecuación y su significado espacial, se ve el comportamiento del vector de flujo uniforme u , y como σ_y, σ_z conforman la sección transversal.

³ Entendiendo como flujo uniforme cuando en cualquier punto del fluido el vector de velocidad es el mismo.

⁴ Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA). Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire. Manual de auto-instrucción. Adaptación Manual de auto-instrucción "SI: 049 Basic air pollution meteorology course" Instituto de Capacitación en la Contaminación del Aire (APTI). Segunda edición: Marcelo E. Korc, Asesor Regional en Control de Contaminación del Aire, CEPIS. Lección 6: La dispersión de las plumas y el modelado de la calidad del aire en exteriores. P. 9.

III. LA PREGUNTA

La pregunta elemental de este escrito es como llevar un modelo de pluma de Gauss (y las características que le son inherentes, como sus limitaciones) que ha sido concebido para una sola fuente emisora de gases contaminantes a un espacio urbano de varios kilómetros cuadrados de extensión.

IV. LA BASE DE DATOS

Para adelantar el proyecto, se detectó que era necesidad fundamental poseer información de las condiciones atmosféricas del área de estudio correctamente estructurada y actualizada.

La fuente de información acerca de las condiciones atmosféricas de Bogotá D.C, es el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, DAMA, para lo cual cuenta con una serie de estaciones de monitoreo distribuidas por la ciudad, las cuales constituyen la red de calidad de aire para Bogotá.

Después de algunas gestiones ante la mencionada institución del estado, fue posible conseguir información correspondiente al intervalo comprendido desde Octubre de 1997 hasta Abril de 2001. Como es fácilmente observable, se está recolectando nueva información permanentemente (los datos proporcionados por el DAMA corresponden a cada hora del día). Estos datos son mediciones de las condiciones atmosféricas (velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, radiación solar, humedad, presión) y de polutantes (material particulado inferior a 10 micras, monóxido de carbono, dióxido de azufre, compuestos nitrogenados, ozono y amoníaco).

Ya con esta información en manos del grupo de investigadores, se procedió a organizarla dentro de una base de datos, de tal manera que se garantice su coherencia, rápido acceso y la posibilidad de un fácil ingreso de los nuevos datos que constantemente se están recolectando.

La importancia de esta base de datos, radica en que será el pilar que alimentará de información al modelo (o modelos) que sean fruto del desarrollo de este proyecto, ya sea con la información atmosférica o con la correspondiente a polutantes.

V. EL PROCESO

Bien, el primer paso en llevarse a cabo fue recolectar bibliografía al respecto, donde la fuente primordial de información fue la Internet, para después construir un modelo de pluma de Gauss para una sola fuente puntual, sobre un software tipo hoja de cálculo.

Luego, se inició la construcción del modelo para que cubriera la zona urbana de Bogotá D.C., para lo cual se empezó por dividir el área de trabajo en una retícula, donde las dimensiones de cada una de sus celdas eran

En esencia, el modelo de Pluma de Gauss, describe el flujo del contaminante en un punto relativo al eje de la Pluma en términos de desviaciones estándar respecto a los ejes coordenados y y z



Figura 3. Distribución de las estaciones de la red de calidad del aire en Bogotá D.C. Cada identificador en la figura representa la distribución de las estaciones que actualmente conforman la red de calidad de Bogotá. Fueron ubicadas por coordenadas geográficas, información suministrada por el DAMA.

de 1 Km * 1 Km, y a su vez se calculó el punto central para cada una de esas celdas, dado que se asume que la concentración de contaminantes va a ser homogénea para cada celda, solo se calcula el valor para cada centro de celda.

Ya con la información atmosférica proveniente de la base de datos construida para este proyecto, aún era necesaria información acerca de cada una de las fuentes puntuales

a tener en consideración en el modelo (para Bogotá D.C., solamente se consideraron chimeneas). Lastimosamente, al momento de entrega del informe sobre la primera fase del proyecto, el DAMA no había dado respuesta a un oficio enviado por parte del grupo de investigadores en el cual se les solicitaba dicha información, razón por la cual, para ilustrar los resultados preliminares obtenidos a partir del modelo solamente se tuvieron en cuentas 20 chimeneas cuyos datos se obtuvieron de un estudio realizado por la *Japan International Cooperation Agency*. (THE STUDY ON AIR POLLUTION CONTROL PLAN IN SANTA FE DE BOGOTA CITY AREA, 1991)

Después de contar con la conceptualización teórica acerca del modelo de pluma de Gauss, la división de la zona de estudio mediante una retícula, la información de las condiciones atmosférica y los datos de las chimeneas, se tuvo el camino abierto para la construcción del modelo.

VI. LAS CONSIDERACIONES

A juicio de los investigadores del grupo NIDE, principales responsables por el desarrollo de la primera fase de este proyecto, las consideraciones presentadas acerca del modelo, son uno de los frutos más importantes de esta parte del proyecto, pues señalan cuestionamientos en los que se pueden indagar para llegar a mejoramientos en la capacidad de estimación del modelo, además de servir también como una guía a tener en cuenta para la construcción de las siguientes etapas del proyecto (como por ejemplo, el modelo de pluma de Gauss para fuentes lineales, aunque bien valdría la pena volver sobre estas consideraciones a partir de los demás modelos que serán desarrollados).

Primera Consideración: Modelo

El modelo que se aplica para la estimación de las concentraciones de polutantes en la ciudad juega un papel fundamental en los resultados a obtener.

Cada modelo, como una abstracción de la realidad, tiene que imponerle límites, por esa razón un modelo no llega a describir exactamente el comportamiento de un fenómeno. Por esa misma razón, los modelos tienen ciertas limitantes, ventajas y desventajas sobre otros.

De esta manera, una de las ventajas sobresalientes del modelo de pluma de Gauss sobre los demás a desarrollar en este proyecto, es que permite diferenciar el aporte de las fuentes fijas (modelo puntual) de las móviles (modelo lineal) y comparando las dos anteriores con las medidas por las estaciones de la red de calidad del aire, se puede obtener también un estimativo de la cantidad de polutantes en la atmósfera de Bogotá con origen no antropogénico, como por ejemplo el material particulado arrastrado al aire a causa de erosión eólica.

De la misma forma, el modelo de pluma de Gauss necesita un cierto grado de información acerca de cada una de las fuentes ubicadas en la ciudad, lo que implica un trabajo adicional y constante de actualización de la información, que los demás modelos no necesitan.

Segunda Consideración: Espacialización del Modelo

El modelo de pluma de Gauss puede ser calculado para cualquier localización x, y, z , sin embargo, si se realizara de esa forma implicaría una gran cantidad de operaciones matemáticas para obtener una estimación completa. De ahí la necesidad de dividir la zona de trabajo en una retícula, para reducir el número de operaciones y aligerar el proceso de cálculo, además, la pluma se distribuye en la dirección del viento a partir de la fuente, lo que hace innecesario calcular concentraciones a partir de esa fuente en la dirección contraria, basándose en lo cual, es posible reducir el cálculo.

También hay que tener en cuenta que la contaminación de la atmósfera es un problema que no conoce divisiones administrativas, la contaminación generada en Bogotá rebasa sus fronteras y afecta en un primer lugar a la sabana que la rodea, así que la correcta espacialización del modelo debe garantizar que el espectro cobijado por el modelo, a futuro, pueda trascender sus límites para integrarse en un entorno espacial más amplio, bien con modelos distintos de mayor o igual escala, o bien con el mismo tipo de modelo generado a partir de otras locaciones.

Tercera Consideración: La Orientación del Modelo

El modelo de pluma de Gauss para realizar sus estimaciones, utiliza unos ejes de coordenadas orientados de tal manera que el origen coincide con la base de la chimenea desde la cual es emitida la contaminación y el eje x coincide con la dirección en la que se encuentra el eje de la pluma.

Cuando se quiere ubicar esta pluma en el entorno del área de estudio, es necesario orientar los ejes del

Las consideraciones expuestas acerca del modelo, son uno de los frutos más importantes de esta parte del proyecto.

modelo con los ejes propios del área de estudio (que pueden ser, por ejemplo, coordenadas planas), teniendo en cuenta factores como la proyección geográfica del área de estudio o en áreas muy extensas, los efectos de la curvatura terrestre.

Cuarta Consideración: Volumen de Cálculo

Es fácil notar a partir de la segunda consideración, que es posible que, si se quiere tener un gran detalle en la estimación de la concentración de contaminantes, sea necesario invertir una considerable cantidad de tiempo para realizar los cálculos necesarios para el modelo. Si bien el desarrollo de la tecnología ha permitido el aumento de la velocidad y cantidad de cálculos que realizan las computadoras en pequeñas fracciones de tiempo, aun la cantidad de datos que se pueden generar a partir de fenómenos naturales puede rebasar las capacidades tecnológicas a disposición de los modeladores, lo que para efectos prácticos, causaría la imposibilidad de conocer en tiempo real la situación de calidad de aire para la zona en estudio, demorando la capacidad de reacción ante una emergencia, tales como las que se han dado en el Distrito Federal de México.

En particular, una disminución del tamaño de la grilla diseñada para Bogotá o un aumento de su cobertura implicaría un gran aumento en la cantidad de operaciones necesarias para calcular el modelo, acompañado esto por el hecho de que cada hora, la red de calidad del aire esta tomando datos en distintos puntos de la ciudad, lo que aumenta el volumen de información contenido en la base de datos que debe consultar el modelo.

Quinta Consideración: Temporalidad del Modelo

Una de las restricciones del modelo de pluma de Gauss, es que trabaja sobre variables de tiempo promedio, es decir que es necesario que los datos de las condiciones atmosféricas ingresados a él deben corresponder a promedios (o cualquier otra medida de tendencia central) comprendidos en un intervalo de tiempo de entre diez minutos y una hora.

Esto es pertinente con la forma en la que se presentan los datos atmosféricos por parte del DAMA, ya que están dados en intervalos de una hora, aunque se convierte en un limitante para otro tipo de modelos, que no posean esta restricción del modelo de pluma de Gauss o que necesiten trabajar con intervalos de tiempo más cortos en lo concerniente a este tipo de variables. Este es un importante tópico, en especial si se pretende llegar a modelamientos de la calidad del aire en tiempo real.

Manteniendo la perspectiva de otros modelos de calidad del aire, es necesario cuestionarse acerca del intervalo de tiempo dentro del cual una estimación mantiene el suficiente grado de precisión para ser considerada como una aceptable representación del estado de la contaminación en la atmósfera en un momento específico en una zona dada.

Sexta Consideración: Extinción de la Pluma

El modelo de pluma de Gauss, al haber sido desarrollado a partir del concepto de la campana de Gauss, heredó algunas de sus propiedades, entre las que figura su condición de ser asintótica respecto a uno de sus ejes. Esto se vería reflejado en el hecho de que una estimación hecha transversalmente a la pluma, jamás alcanzaría el valor cero de estimación de concentración de contaminación, lo cual entraría en contradicción con lo observado empíricamente.

De esta manera, se considera necesario poner límites a la pluma, mas allá de los cuales la concentración sería asumida como cero o demasiado pequeña como para ser tenida en cuenta. Una forma muy conveniente, dado que la pluma al dispersarse adquiere una forma parecida a la de un cono, sería establecer esta limitación como un valor angular.

Es sabido que los modelos de pluma de Gauss se consideran exactos hasta una distancia de cincuenta kilómetros y este es su límite longitudinal.

Considerando los límites de la pluma, tanto transversal como longitudinal, es posible realizar una disminución en el volumen de cálculo necesario para el modelo (cuarta consideración), lo que posibilitaría una optimización del modelo y usar ese recurso de máquina que se esta dejando de usar en otra función del modelo.

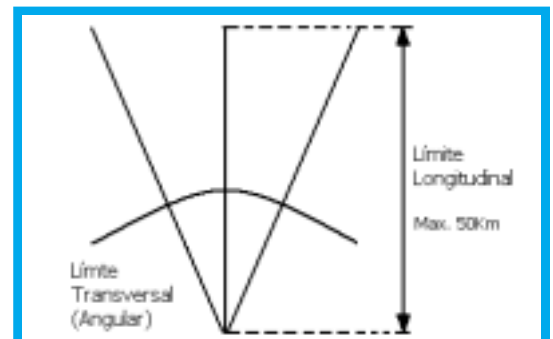


Figura 4. Extinción de la pluma . Límites longitudinal y transversal de una pluma de Gauss. Estos identifican hasta donde las estimaciones dadas por el Modelo de Gauss se consideran exactas o mayores de cero.

Séptima Consideración: Homogeneidad de las Variables

El modelo de pluma de Gauss, asume que existen condiciones atmosféricas homogéneas a lo largo de la pluma, lo cual en la practica no es completamente cierto.

¿Existen condiciones atmosféricas homogéneas a lo largo y ancho de toda la zona de estudio?. La respuesta para el caso de Bogotá es no, y es fácilmente verificable, solo basta con mirar los datos obtenidos por la red de calidad de aire de la ciudad.

Este hecho hizo necesario la introducción de un pre-proceso a los datos atmosféricos ingresados al modelo, pues en este, se asumieron que las condiciones atmosféricas de una pluma, eran las mismas que las de la celda (centro de celda) en la cual se encontraba la fuente de esa pluma.

¿Cómo se obtuvieron las condiciones atmosféricas de las celdas donde se encontraban las fuentes?

A partir de un proceso de interpolación de distancia inversa, tomando los datos de las estaciones de la red de calidad del aire.

La interpolación por distancia inversa es un algoritmo de interpolación extensamente utilizado en las ciencias de la tierra que se basa en la premisa de que cuando existen dos puntos en los cuales se ha tomado una muestra y existe un tercero para el cual se quiere estimar su valor, es más probable que ese valor no muestreado sea más parecido al valor del punto sobre el cual se ha hecho un muestreo más cercano que al valor del punto muestreado más alejado.

De la misma forma, es probable que para los demás modelos de este proyecto, las diferencias de homogeneidad de las variables atmosféricas en la zona urbana de Bogotá D.C. tengan la suficiente influencia en los resultados para ser tenidas en cuenta.

Octava Consideración: Topografía

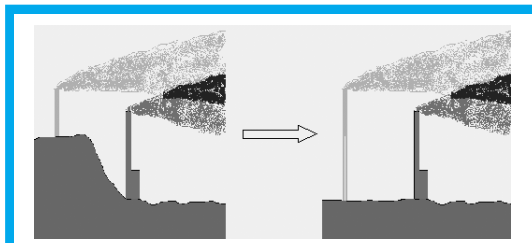


Figura 5. Cambio de altura de base de chimenea conservando la altura relativa de sus bocas. La figura muestra el cambio de altura de base de chimenea conservando la altura relativa de sus bocas y como este supuesto afecta la concentración del polutante emitido.

Indiscutiblemente, la topografía juega un papel fundamental en el comportamiento de la atmósfera en la escala en la que se ha trabajado este proyecto, no solamente como un obstáculo a las corrientes de aire que arrastran los contaminantes y terminan acumulándose debido a la obstrucción, si no que también cambiando la cantidad de radiación solar recibida por la superficie terrestre a lo largo de las horas del día, lo cual juega un papel fundamental en la generación de diferencias de presión atmosférica que a su vez producen el movimiento de la masa de aire.

Una de las condiciones del modelo de pluma de Gauss es que la topografía sea “plana”; la sabana de Bogotá tiene una topografía plana, sus desniveles no son considerablemente grandes, a excepción de los cerros orientales, que limitan la ciudad en su costado Este.

Como tal, en el modelo de pluma de Gauss desarrollado en esta fase del proyecto no se tuvo en cuenta la topografía como obstáculo a las corrientes de aire ni como variable que influye en la cantidad de radia-

ción solar absorbida por la tierra, más sin embargo se hizo una pequeña reflexión acerca de cómo pequeñas diferencias de nivel podrían afectar la estimación de contaminación en una locación determinada (ver ilustraciones).

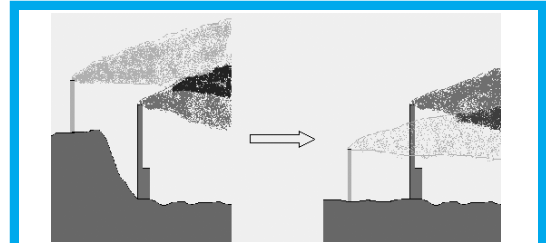


Figura 6. Cambio de altura de base de chimeneas sin conservar su altura relativa de las bocas. La figura muestra el cambio de altura de base de chimeneas sin conservar la altura relativa de sus bocas y como afecta este supuesto la concentración del polutante emitido.

Para la implementación del modelo en zonas montañosas o de topografía irregular se puede determinar una constante empírica que refleje la variación de la concentración. Otra alternativa es el uso de los modelos digitales de elevación (DEM) e incluir restricciones que determinen el comportamiento de la pluma. Es claro que en este punto se estaría modificando la altura efectiva de la pluma a lo largo de la misma. Estas restricciones acercarían el modelo de pluma de Gauss a convertirse en un modelo matemático que se maneja en espacios de trabajo de menor tamaño y que requieren tareas de modelado más complejas.

Novena Consideración: Plumas que se mezclan

¿Que pasa cuando dos plumas convergen en el mismo lugar? Esta consideración tiene relación con la séptima consideración: homogeneidad de las variables.

Cuando dos plumas se cruzan, no necesariamente ambas habrán sido calculadas bajo las mismas condiciones atmosféricas, pues vienen de fuentes diferentes y como ya se señaló anteriormente, la ciudad no presenta homogeneidad en el comportamiento de las variables atmosféricas.

Además en el comportamiento de la atmósfera subyace el caos, los movimientos “lineales” de las corrientes de aire solamente son tendencias generales, ya que a su interior lo que se puede observar es la predominancia de turbulencia y movimientos aleatorios; si se considera que al mezclarse dos plumas se están mezclando dos cuerpos de aire o “parcelas” distintas el asunto se torna bastante complicado y merece mucha atención.

En esta primera fase del proyecto, se optó por una de las opciones más sencillas: simplemente se realiza una suma del resultado del cálculo de concentraciones para la celda en la cual convergen varias plumas, cada una de una fuente distinta.

VII. CONCLUSIONES Y RESULTADOS PRELIMINARES

A continuación se van a presentar algunos resultados obtenidos a partir del modelo, teniendo en cuenta los señalamientos anteriormente mencionados (ver El Proceso), con respecto a que los datos de las chimeneas fueron tomados de un estudio anterior.

El tamaño de los puntos en la Figura 7 (centros de celda) es proporcional a la concentración de contaminantes; los puntos uniformes ubicados sobre la parte Sur-Oeste (y para la Figura 8, los ubicados en la parte Norte y Oeste) de la ciudad representan concentración nula, dado que la dirección del viento era predominantemente Nor-Este (para la siguiente ilustración, predominantemente hacia el Este), como es fácilmente apreciable si se siguen las trazas de las plumas (puntos de mayor tamaño). El punto en la parte central de la ciudad representa el Observatorio Astronómico Nacional, ubicado entre el Capitolio Nacional y el Palacio de Nariño, uno de los puntos de origen de coordenadas geográficas para Colombia y lugar donde Francisco José de Caldas realizara las primeras observaciones astronómicas en la Nueva Granada.

Específicamente para el modelo de pluma de Gauss, se plantea continuar con el modelo de tipo lineal para incorporar al ya desarrollado, la contaminación generada por los vehículos con motor de combustión interna que circulan por las principales vías de la zona en estudio. Así se logrará una visión general de Bogotá desde la perspectiva del modelo de pluma de Gauss.

Inmediatamente a esto, se desarrollarán los demás modelos, comenzando por un estudio desde el enfoque de la Geoestadística. Se tienen amplias expectativas por parte del grupo de investigadores acerca de los resultados que puedan venir de este enfoque, ya que la geoestadística se caracteriza por permitir modelar datos auto correlacionados espacialmente en direcciones específicas, lo que se complementa con las trazas dejadas por las plumas, observadas en los resultados del modelo ya desarrollado.

Finalmente, no hay que perder de vista que la atmósfera y los fenómenos que en ella se producen, en muchos aspectos, permanecen inexplorados o aún fuera del alcance de nuestro conocimiento y por tanto no son modelables (al menos por ahora), por lo cual se decidió cerrar este artículo con esta frase de Henri Poincaré, matemático y físico francés de finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, que ha acompañado al grupo de investigadores en el recorrido de este proyecto:

"Puede pasar que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produzcan unas muy grandes en el fenómeno final. Un pequeño error en lo anterior producirá un enorme error en lo posterior. La predicción se torna imposible..."
Henri Poincaré. (1854-1912)

BIBLIOGRAFÍA

- AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS (U.S. EPA). Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire. Manual de auto-instrucción. Adaptación del manual de auto-instrucción «SI: 049 Basic Air Pollution Meteorology Course». Instituto de Capacitación en la Contaminación del Aire (APTI). Segunda edición. KORC, Marcelo E.
- AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS (U.S. EPA). Curso de orientación para el control de la contaminación del aire. Manual de auto instrucción. Adaptación del manual de auto-instrucción «SI: 422 Air pollution control orientation course». Instituto de Capacitación en la Contaminación del Aire (APTI). Segunda edición. KORC, Marcelo E.
- CLAYTON, Deutsch and JOURNEL André. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford: Oxford University Press. 1992 340 p.
- DASIBI ENVIRONMENTAL CORPORATION. Data acquisition unit, operating and maintenance manual. Model 8001, Deulthz. 1995
- DASIBI ENVIRONMENTAL CORPORATION. Opsi emisor / receptor er 110, User Manual. Series 7001; Total suspended particles, pm 10 or pm 2.5; beta attenuation mass monitor (models 7001, 7001 w/pm10 & 7001 w/pm2.5); operating and maintenance manual. Deulthz. 1992.
- GLOBAL WATER WEATHER SENSORS (Catálogo de productos)
- JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. The Study on Air Pollution Control Plan in Santa Fe de Bogota City Area, 1991
- LEXIS 22, Tomo 13. España: Industria Gráfica S.A. 1984.
- SANCHEZ IPIA Alber Hamersson y SIABATO VACA Willington Libardo. Análisis de Gases Contaminantes en Zonas Urbanas. Centro de Investigación y desarrollo científico. Bogota D.C. Primera edición. Grupo editorial GAIA. 2002. 102 p.
- URIBE BOTERO, Eduardo y MEDINA M, Yaniro Gabriel. La pequeña y mediana industria y su relación con las regulaciones y las instituciones ambientales en Colombia. Bogotá D.C. Departamento Técnico Administrativo de Medio Ambiente. 1997

Willington Libardo Siabato Vaca

Ingeniero Catastral y Geodesta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Investigador Grupo N.I.D.E. wsiabato@eudoraimail.com

Alber Hamersson Sánchez Ipia

Ingeniero Catastral y Geodesta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Investigador Grupo N.I.D.E. hamersson@hotmail.com

John William Cely Pulido

Ingeniero Catastral y Geodesta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Msc. Telemática. Esp. S.I.G. Profesor Facultad de Ingeniería Universidad Distrital. Director Grupo de Investigación N.I.D.E. jwcely@express.net.com

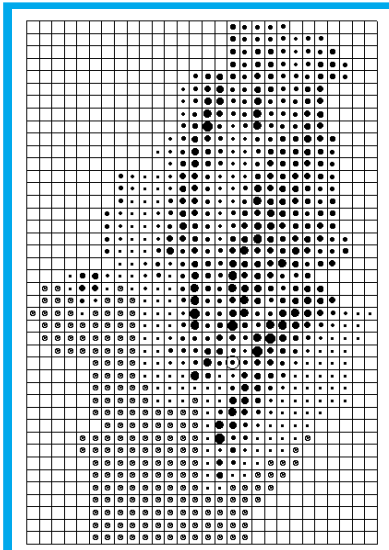


Figura 7. Comportamiento de polutantes 07:00 a.m. La figura muestra el resultado de aplicar el modelo de pluma de Gauss para Bogotá, para el día 24 de abril de 2000, a las 07:00 horas, calculado 100 mts sobre la superficie, se puede ver claramente la dirección del viento para el momento representado.

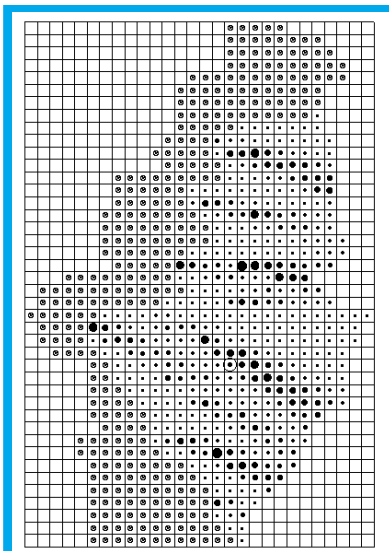


Figura 8. Comportamiento de polutantes 18:00 p.m. La figura muestra el resultado de aplicar el modelo de pluma de Gauss para Bogotá, para el día 24 de abril de 2000, a las 18:00 horas, calculado 100 mts sobre la superficie de la ciudad.