

# INGENIERIA INDUSTRIAL

## MODELOS MATEMATICOS PARA EL ESTUDIO DE LA DISPERSION DE CONTAMINANTES

Julián Bedoya V., Ph. D. - Profesor Asociado Universidad Nacional  
Doctor Ingeniería Ambiental - Universidad de Purdue - USA

### RESUMEN

El modelo de dispersión gausiano considera la tasa de emisión de contaminantes, la estabilidad atmosférica, la velocidad y dirección del viento, la altura de la chimenea y las posiciones relativas de la fuente y el receptor para estimar la concentración de un contaminante sobre un lugar determinado. La aplicación del modelo para un punto ubicado a 800 metros al Sur de la Central Térmica de Coltejer, Itagüí, produjo un impacto ambiental de alrededor de  $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , como promedio anual. El uso del modelo, teniendo en cuenta todos los factores meteorológicos para varias fuentes y receptores, se vuelve muy complejo, exigiendo la utilización de computadores. La Universidad Nacional dispone de once algoritmos de computador desarrollados por la Environmental Protection Agency (EPA) que se pueden aplicar a diferentes condiciones meteorológicas y de terreno.

### 1. INTRODUCCION

El uso de modelos matemáticos para estudiar la contaminación atmosférica ha recibido un gran impulso en los últimos años a nivel mundial. La Agencia para la Protección del Ambiente de los Estados Unidos (EPA) en 1979 utilizaba 11 modelos diferentes según las condiciones específicas de cada lugar y los alcances necesarios del estudio (Turner, 1979). Para 1977 Bermúdez y otros (1977) presentan los resultados de la aplicación de uno de estos modelos modificado para el caso del Valle de Aburrá. Sus resultados no fueron completamente satisfactorios debido al régimen de vientos tan peculiar que tiene el Valle de Aburrá y a la falta de buenas mediciones para calibrar los modelos.

El objetivo de este trabajo será el de presentar el modelo básico gausiano, sus aplicaciones y limitaciones. Además se dará una breve descripción de algunos de los modelos de dispersión de contaminantes disponibles en la Universidad

Nacional en desarrollo de una investigación que sobre el tema realiza el autor. La información que se presentará aquí será de mucha utilidad para todas aquellas personas interesadas en estimar el impacto de las fuentes puntuales en los niveles de contaminación del aire.

## 2. MODELO DE DISPERSION

En estudios de contaminación atmosférica se encuentran dos mediciones de importancia: la concentración ambiental del contaminante y los emisiones que cada fuente arroja al aire. La característica común a estos dos tipos de mediciones es su gran variabilidad en el tiempo y en el espacio. La dirección y velocidad del viento, la temperatura de la atmósfera, la cantidad y calidad de los combustibles son algunos de los factores que influyen en esta variabilidad. Una segunda característica de las mediciones de contaminación atmosférica es el alto costo para obtenerlas, pues se requieren instrumentos muy especiales y personal altamente calificado.

El alto costo en unión con la gran variabilidad de las mediciones hace necesaria la óptima utilización de los pocos resultados obtenidos. Los modelos de dispersión son muy útiles para poder interpolar las mediciones, analizar el impacto de nuevas fuentes de contaminación y predecir la eficiencia de los controles o de las nuevas reglamentaciones.

Quizá el modelo matemático más ampliamente utilizado es el modelo de dispersión gausiano. Este modelo se representa por medio de la siguiente expresión:

$$x(x, y, z; H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{1}{2}(\frac{y}{\sigma_y})^2} \left[ e^{-\frac{1}{2}(\frac{z-H}{\sigma_z})^2} + e^{-\frac{1}{2}(\frac{z+H}{\sigma_z})^2} \right] \quad (1)$$

Donde

$x(x, y, z; H)$ : Concentración de contaminante para un lugar  
 $x, y, z$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$Q$ : Tasa de emisión del contaminante de interés ( $\mu\text{g}/\text{s}$ )

$\sigma_y, \sigma_z$ : Desviaciones típicas de las dispersiones horizontal y vertical, respectivamente (metros).

H: Altura efectiva de la chimenea (metros). Corresponde a la altura física de la chimenea más la elevación de la pluma.

U: Velocidad promedia del viento a la altura de la chimenea (m/s).

x, y, z: Distancia en coordenadas inherentes a esta ecuación como se observa en la figura 1.

En el uso de esta ecuación se han hecho las siguientes suposiciones:

- La dispersión de la pluma tiene una distribución gausiana en ambos planos (horizontal y vertical).
- La velocidad y dirección promedia del viento es constante en todo el campo de aplicación.
- La emisión de contaminantes es uniforme.
- La pluma se refleja totalmente en la superficie terrestre, no hay deposición ni reacción.
- La concentración  $X$  es un promedio sobre el mismo intervalo para el cual los promedios de  $\sigma_y$  y  $U$  son representativos.
- Los valores  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  se evalúan de acuerdo con la distancia del receptor viento abajo.
- La difusión en la dirección del viento se puede despreciar. Esto se puede suponer cuando la emisión es continua o cuando la duración de emisión es mayor que el tiempo de viaje desde la fuente al punto de interés.

### 3. COEFICIENTES DE DISPERSION

Los valores para los coeficientes horizontal y vertical de dispersión ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ) dependen de la distancia en la dirección del viento y de la clase de estabilidad (1). McMullen (1975) desarrolló una ecuación para calcular los coeficientes de dispersión obtenidos experimentalmente y reportados por Turner (1970) en su "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates". El modelo de MacMu-

(1) La clase de estabilidad es un sistema de clasificación de las condiciones meteorológicas que dan idea de la facilidad o no para mezclar contaminantes en la atmósfera (Bedoya, 1980a).

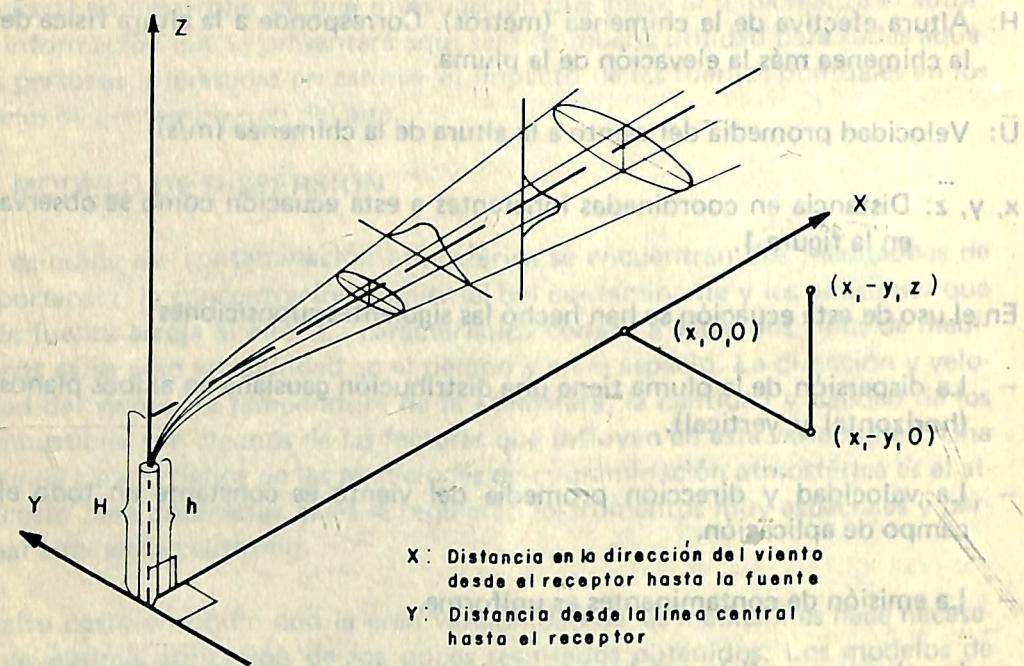


FIGURA 1. SISTEMA DE COORDENADAS INHERENTE AL MODELO DE DISPERSION GAUSIANO MOSTRANDO LA DISTRIBUCION ASUMIDA DE CONCENTRACIONES EN LOS EJES HORIZONTAL Y VERTICAL

llen es de la forma:

$$\sigma = e^{[I + J(\ln X) + K(\ln X)^2]} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma$ : Coeficiente de dispersión horizontal ( $\sigma_y$ ) o vertical ( $\sigma_z$ ) (metros).

$X$ : Distancia en la dirección del viento desde la fuente hasta el receptor (kilómetros).

$I, J, K$ : Constantes empíricas para una clase de estabilidad dada y para  $\sigma_y$  o  $\sigma_z$ , según la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de las constantes I, J, K para seis clases de estabilidad

Clase de Dispersión	Dispersión Horizontal, $\sigma_y$			Dispersión Vertical, $\sigma_z$		
	I	J	K	I	J	K
A	5,357	0,8828	-0,0076	6,035	2,1097	0,2770
B	5,058	0,9024	-0,0096	4,694	1,0629	0,0136
C	4,651	0,9181	-0,0076	4,110	0,9201	-0,0020
D	4,230	0,9222	-0,0087	3,414	0,7371	-0,0316
E	3,922	0,9222	-0,0064	3,057	0,6794	-0,0450
F	3,533	0,9181	-0,0070	2,621	0,6564	-0,0540

Los resultados del modelo de McMullen corresponden a los coeficientes conocidos como de Pasquill-Gifford. Estos datos fueron obtenidos para fuentes a bajo nivel en un campo rural de tipo plano y abierto, de superficies relativamente suave. Se aplican para períodos de muestreo de cerca de 10 minutos, aunque generalmente se usan como si fueran de una hora.

Hay resultados de muchos otros estudios experimentales que dan valores muy diferentes de  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ , dependiendo de la altura sobre la superficie, rugosidad del terreno, y estructura turbulenta de la atmósfera. Los datos de Brookhaven se obtuvieron en una torre de 108 m de altura con períodos de muestreo de 30 a 90 minutos en un sitio rural con bosques. Los datos de San Luis, Misuri, son para niveles bajos en áreas urbanas relativamente planas, y los períodos de muestreo fueron de alrededor de una hora. En términos generales estos coeficientes representan una mayor dispersión que los de Pasquill-Gifford. Se puede decir que al utilizar las ecuaciones de McMullen se está utilizando una posición conservativa, desde el punto de vista de los emisores. Esto significa que las mediciones van a ser menores que lo calculado a partir de la aplicación del modelo.

#### 4. ELEVACION DE PLUMA (2)

La mayor parte de los métodos analíticos para predecir las concentraciones de contaminantes incluye la determinación de un origen equivalente para la pluma

(2) Una pluma se define como el cuerpo de gases, intrusivo en la atmósfera, que emite una chimenea.

ma, como se muestra en la Figura 1. La altura  $H$  del origen virtual se obtiene sumando  $\Delta H$ , la elevación de la pluma, y la altura real de la chimenea,  $h$ . Tres parámetros controlan básicamente el fenómeno de elevación de una pluma gaseosa que sale de una chimenea: características de la chimenea, condiciones meteorológicas, y la naturaleza física y química del efluente. La mayoría de las ecuaciones que predicen la elevación de plumas contienen un término de momento producido por la velocidad de los gases,  $V_s$ , y un término de ascenso que considera el efecto de la diferencia de la temperatura de la chimenea,  $T_s$ , con la temperatura ambiente,  $T_a$ .

Briggs (1969) realizó un estudio muy completo de este fenómeno sugiriendo el uso de tres fórmulas de acuerdo con las condiciones de la chimenea y de meteorología.

#### 4.1 Plumas con momento

Para fuentes cerca a la temperatura ambiente (menos de 30°C sobre la temperatura ambiente) la siguiente fórmula se puede usar en el cálculo de la elevación de la pluma:

$$\Delta H = 1.5 (V_s / \bar{U}) D \quad (3)$$

Donde:

$V_s$ : Velocidad de salida de los gases de la chimenea (m/s)

$U$ : Velocidad media del viento (m/s)

$D$ : Diámetro de la chimenea (m)

#### 4.2 Plumas boyantes en condiciones estables o casi neutras.

Para plumas calientes y bajo condiciones atmosféricas estables o casi neutras, la fórmula para estimar el incremento en la altura de la pluma es:

$$\Delta H = 2.3 (F / \bar{U} S)^{1/3} \quad (4)$$

Donde:

$F$ : Parámetro de ascenso ( $m^4/s^3$ )

$$F = g V_s (T_s - T_a) D^2 / 4 T_a \quad (5)$$

$g$ : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$T_s$ : Temperatura de los gases ( $^{\circ}K$ )

$T_a$ : Temperatura del ambiente ( $^{\circ}K$ )

$U$ ,  $V_s$  y  $D$  como se han definido en 4.1

$S$ : Parámetro de estabilidad ( $s^{-2}$ )

$$S = \frac{g}{Ta} \left( \frac{dT}{dz} + \gamma \right) \quad (6)$$

$\frac{dT}{dz}$  : Tasa de cambio de la temperatura ambiente con la altura (°K/m)

$\gamma$  : Tasa adiabática de cambio de temperatura (°K/m)

$$\gamma = \left| \frac{dT}{dz} \right|_{\text{adiabático}} = 10K/100m$$

(es un número positivo)

Para condiciones neutras  $S = 0$ , lo cual indica que esta fórmula sólo se puede usar para condiciones próximas a neutras.

#### 4.3 Plumas boyantes bajo condiciones inestables y neutras.

Para plumas calientes y condiciones atmosféricas inestables y neutras la elevación de la pluma se puede estimar por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta H = 150 F/U^3 \quad (7)$$

Donde los términos usados aquí ya han sido definidos en 4.1 y 4.2

No sobra recalcar la importancia de la determinación de  $dT/dz$  que es la mejor orientación para estimar la estabilidad de la atmósfera y la cual se calcula por medio de mediciones de temperatura a diferentes alturas.

### 5. METEOROLOGIA

Esta sección trata solamente de los parámetros relacionados con la dirección del viento, su velocidad y la estabilidad atmosférica.

Estimativos precisos de la dispersión de contaminantes requieren conocimiento de la frecuencia de la distribución de la dirección del viento así como de su velocidad. La estabilidad atmosférica es indispensable para usar los coeficientes de dispersión apropiados.

Estos datos meteorológicos se obtienen registrando la dirección del viento, su velocidad y la estabilidad atmosférica cada tres horas (preferible cada hora) por un período mínimo de tres meses y lo ideal sería un año o más de observaciones. La manera más común de usar esta información en los modelos matemáticos es por medio de una distribución conjunta de probabilidades para la dirección del viento, su velocidad y la estabilidad atmosférica.

Una distribución conjunta de probabilidades es una matriz tridimensional de frecuencias,  $P(A, B, C)$ . "A" corresponde a las categorías de estabilidad atmosférica, "B" corresponde a los sectores de dirección del viento y "C" corresponde a las categorías en la velocidad del viento. La probabilidad  $p(i, j, k)$  se obtiene dividiendo el número de observaciones de la estabilidad  $i$ , dirección  $j$ , y velocidad  $k$  por el número total de observaciones. Existen procedimientos adecuados para la distribución de la dirección del viento cuando su velocidad es muy baja, pero éstos no se discutirán en esta oportunidad.

La matriz conjunta de probabilidades debe cumplir dos condiciones:

$$p(i, j, k) \geq 0 \quad \text{para todos los valores } i, j, k.$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k p(i, j, k) = 1$$

Existen diversos métodos para determinar la estabilidad atmosférica, uno de los cuales es el explicado por Turner en su libro "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates" publicado en 1970. Este método se explicó en un artículo aparecido en Dyna (Bedoya, 1980 a, pp 7, 8), donde se definen seis estabilidades atmosféricas desde la A, para condiciones muy inestables, hasta la F, para condiciones muy estables.

## 6. IMPACTO DE UNA FUENTE DE CONTAMINACION

El modelo matemático visto antes se puede utilizar en conjunción con la información meteorológica para estimar el impacto de una fuente puntual sobre la comunidad circundante. Para ilustrar esta capacidad de los modelos matemáticos se presenta un estudio del impacto ambiental de la Central de Energía y Vapor de Coltejer, ubicada al sur del Valle de Aburrá, en Itagüí. Esta fuente se selecciona porque se considera como la de mayor emisión en el área.

La Tabla 2 representa una distribución conjunta de probabilidades, simplificada. Allí se representan las condiciones meteorológicas de Itagüí, reconstruidas con base en las observaciones de Orozco (1979). En dicha ocasión sólo se consideraron cuatro direcciones del viento y la estabilidad atmosférica no

se midió directamente. Las observaciones hechas sobre el tipo de pluma se pueden utilizar para estimar la estabilidad atmosférica. Toda esta información sirvió para calcular la distribución conjunta de probabilidades, considerando cuatro direcciones del viento, cuatro categorías de la velocidad del viento y cuatro estabilidades atmosféricas. Las direcciones del viento consideradas fueron: Norte, Este, Sur y Oeste. Los valores promedios de velocidad del viento para cada categoría fueron 1,8 m/s, 4,4 m/s, 6,7 m/s y 10,5 m/s. Las estabilidades atmosféricas seleccionadas para agrupar la información disponible fueron A, C, D y E, quedando por fuera las estabilidades B y F.

Para poder realizar un mejor estudio de impacto ambiental en contaminación del aire se requiere seguramente de más detalle en la información meteorológica. Se deben considerar al menos dieciséis direcciones del viento, cinco o seis estabilidades atmosféricas, y seis o más categorías de velocidad del viento.

Supóngase además la siguiente información básica:

Q: Emisión de partículas 405.092.593  $\mu\text{g/seg}$ . (partiendo de una emisión estimada de 35 T/día)

H: Altura de la pluma para todas las condiciones 70 m (50 m de altura de la chimenea + 20m de elevación de pluma). Realmente H se debe calcular para cada uno de los casos, pero no se hará así para simplificar en algo los cálculos.

MH: Altura de mezcla, que para Medellín se estima en 300 m, en promedio (Esto significa que  $\sigma_z$  no puede ser mayor de 141 m).

Utilizando las ecuaciones (1) y (2) se puede preparar la Tabla 3 de concentraciones de contaminación ambiental producida por esta chimenea. Los cálculos se han hecho para cuatro distancias (200, 400, 800 y 1.500 metros), las cuatro estabilidades y las cuatro velocidades del viento de la Tabla 2. En general se puede apreciar que las concentraciones ambientales de contaminación atribuibles a esta fuente son altas para las condiciones asumidas.

2100,0	1000,0	900,0	850,0	1500,0		
0800,0	6100,0	5700,0	5300,0	1000,0		
0300,0	2000,0	1900,0	1800,0	1000,0		
0150,0	1800,0	1600,0	1500,0	1000,0		
0000,0	820,0	740,0	680,0	1000,0		

TABLA 2. DISTRIBUCION CONJUNTA DE FRECUENCIA PARA LA DIRECCION, VELOCIDAD Y ESTABILIDAD ATMOSFERICA EN ITAGUI (1977)

Dirección del viento	Estabilidad Atmosférica	VELOCIDAD PROMEDIA DEL VIENTO (m/s)				TOTAL
		1,8	4,4	6,7	10,5	
NORTE 0,6180	A	0,0324	0,0998	0,0764	0,0508	0,2594
	C	0,0062	0,0189	0,0146	0,0096	0,0493
	D	0,0039	0,0118	0,0095	0,0060	0,0312
	E	0,0348	0,1064	0,0826	0,0543	0,2781
ESTE 0,0480	A	0,0025	0,0074	0,0066	0,0039	0,0204
	C	0,0005	0,0015	0,0012	0,0007	0,0039
	D	0,0003	0,0009	0,0008	0,0005	0,0025
	E	0,0027	0,0081	0,0067	0,0037	0,0212
SUR 0,2640	A	0,0139	0,0416	0,0335	0,0214	0,1104
	C	0,0026	0,0081	0,0064	0,0041	0,0212
	D	0,0017	0,0051	0,0046	0,0026	0,0140
	E	0,0149	0,0447	0,0359	0,0237	0,1184
OESTE 0,0700	A	0,0037	0,0120	0,0097	0,0061	0,0315
	C	0,0007	0,0021	0,0019	0,0013	0,0060
	D	0,0004	0,0013	0,0012	0,0009	0,0038
	E	0,0039	0,0132	0,0049	0,0067	0,0278
TOTAL		0,1251	0,3829	0,2957	0,1963	1,0000

11  
TABLA 3. IMPACTOS AMBIENTALES PRODUCIDOS POR LA  
CHIMENEA DE COLTEJER.

ESTABILIDAD ATMOSFERICA	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	DISTANCIA (METROS)			
		200	400	800	1.500
A	1,8	2.541*	6.568	2.580	1.482
	4,4	1.039	2.687	1.055	606
	6,7	683	1.764	693	398
	10,5	436	1.126	442	254
C	1,8	1	1.712	6.261	3.903
	4,4	0	701	2.561	1.597
	6,7	0	460	1.682	1.048
	10,5	0	294	1.073	669
D	1,8	0	3	1.233	4.033
	4,4	0	1	504	1.650
	6,7	0	1	331	1.083
	10,5	0	1	211	691
E	1,8	0	0	60	1.476
	4,4	0	0	25	604
	6,7	0	0	16	397
	10,5	0	0	10	253

11  
\* Las concentraciones de partículas se dan en microgramos por metro cúbico.

## 7. DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados de la Tabla 3 se deben mirar teniendo en cuenta lo que realmente puede estar sucediendo. Estos resultados sólo están considerando a los receptores que se encuentran en la línea central de la dirección del viento. Lógicamente, la dirección del viento cambia continuamente, haciendo que la concentración promedio de contaminación recibida por un receptor específico sea menor.

Si se quiere calcular la concentración promedio anual de contaminación recibida en un punto colocado a 800 metros al sur de la chimenea, al nivel del suelo, se necesita combinar las informaciones de la Tabla 2 y la Tabla 3. Cada uno de los valores de la columna correspondiente a una distancia de 800 metros de la Tabla 3 se multiplican por la frecuencia correspondiente a esa estabilidad y velocidad del viento de la Tabla 2. Luego se suman todos estos resultados y de esta manera se obtendría el promedio anual. Por ejemplo:

$$\begin{aligned} x(800, \text{anual}) = & 2580 \times 0.0324 + 1055 \times 0.0998 \\ & + \dots + 6261 \times 0.0062 + 2561 \times 0.0189 \\ & + \dots + 1233 \times 0.0039 + 504 \times 0.0118 \\ & + \dots + 16 \times 0.0826 + 10 \times 0.0543 \end{aligned}$$

El promedio anual para este receptor sería de  $408 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo cual está por encima de las normas colombianas de calidad del aire para polvo en suspensión. La norma primaria de Colombia es  $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un promedio de 24 horas. La norma secundaria es de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un promedio geométrico anual (Resolución 4248 de 1977 del Ministerio de Salud Pública).

Este promedio está muy alto debido principalmente a que la rosa de viento sólo considera las cuatro direcciones principales y lo ideal sería considerar dieciseis o más direcciones. Esta subdivisión de la rosa de vientos disminuirá las frecuencias conjuntas para los vientos provenientes exclusivamente del norte.

Ya para el año de 1977 se tiene información de una rosa de vientos más detallada en la cual los vientos provenientes del norte sólo representan un 24 o/o (Bedoya, 1980b) comparado con el 62 o/o de la Tabla 2. Desafortunadamente, los datos son de dos localidades diferentes (aeropuerto Olaya Herrera e Itagüí), lo cual hace que las observaciones no sean muy comparables debido a las diferencias tan marcadas que presentan los vientos a lo largo del Valle de Aburrá. De todas maneras esto implicaría que la concentración anual promedia de polvos en suspensión para este receptor muy bien podría ser del orden de los  $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este nivel todavía sobrepasa la norma colombiana de los 75

$\mu \text{ g}/\text{m}^3$  en promedio anual. Esto significa que la planta térmica de Coltejer necesita instalar sistemas adecuados de control para que el impacto sobre la comunidad circundante esté a niveles aceptables (actualmente Coltejer está instalando filtros de talegas que reducirán emisiones en más del 99 por ciento).

Hasta el momento no se han reportado mediciones de la calidad del aire en los alrededores de la Planta Térmica de Coltejer. Tentativamente, los resultados de la aplicación de este modelo se podrían comparar con las mediciones obtenidas en 1978 en el Centro de Salud de Guayabal (Bedoya, 1980b, p. 91). El promedio de todas las mediciones obtenidas fue de  $60 \text{ mg}/\text{m}^3$  y el valor máximo para un promedio de 24 horas fue de  $79 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Por otra parte, en el año 1979, para la Fábrica de Licores de Antioquia, se reportó un promedio anual de  $46 \text{ mg}/\text{m}^3$  y el valor máximo para un promedio de 24 horas fue de  $200 \text{ mg}/\text{m}^3$  (Bedoya, 1980b, p. 88). Estos valores son bastante comparables con los obtenidos por el modelo matemático, sin olvidar que se trata de ubicaciones cercanas a la Planta Térmica de Coltejer, pero hacia el Norte.. La pluma aquí estudiada produce su mayor impacto hacia el Sur.

Toda la discusión anterior se ha centrado en el efecto que una sola fuente tiene sobre un receptor. Los cálculos y su interpretación pueden ser muchas veces más complicados si se trata de representar una situación más real que incluya los siguientes factores.

- Variación en la altura efectiva de la pluma según las condiciones meteorológicas.
- Variación en las emisiones de la planta según el tipo de carbón consumido y las necesidades de producción.
- Consideración de todas las otras fuentes contaminantes existentes en los alrededores (fábricas, transporte, vías destapadas, quemadas).
- Una representación de un buen número de receptores para poder ver cuáles son las zonas críticas.
- Variación continua en la altura de mezclas.
- Variación de la velocidad y dirección del viento, tanto vertical como horizontalmente (gradiente de viento, remolinos).
- Condiciones no ideales de dispersión, como la presencia de colinas, edifi-

cios, irregularidades del terreno.

— Deposición de parte del material particulado.

Si se desea incluir todas estas variables en un modelo matemático, se necesita utilizar un computador eficiente para poder obtener resultados aceptables. Respondiendo a esta necesidad se han desarrollado varios algoritmos de computador, entre los cuales cabe mencionar los de la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos.

## 8. MODELOS DE UNAMAP

Los siguientes 11 modelos se encuentran disponibles en cinta magnética<sup>(3)</sup>. Los programas están escritos en FORTRAN y se pueden utilizar en gran número de las instalaciones de cómputo disponibles en Medellín. Las siguientes explicaciones se han extractado del trabajo de Turner (1979).

APRAC. Es un modelo para monóxido de carbono urbano desarrollado por el Instituto de investigación de Stanford. Calcula los promedios horarios para cualquier lugar de la ciudad. Requiere un inventario extenso de tráfico urbano para la ciudad de interés.

CDM. El Modelo de Dispersión Climatológica (Climatological Dispersion Model) determina las concentraciones de contaminantes quasi-estables para largo término (estacional o anual) para cualquier receptor a nivel del piso, usando tasa de emisión promedio de fuentes puntuales y de área. Utiliza una distribución conjunta de frecuencia de la dirección del viento, su velocidad y la estabilidad atmosférica para el mismo período. No sirve para calcular concentraciones de contaminantes a corto término.

HIWAY. Calcula las concentraciones de contaminantes no activos, viento abajo de las carreteras o autopistas. Se aplica para condiciones de viento uniforme y terreno plano.

PTMAX. Sirve para analizar las máximas concentraciones de corto término

---

(3) Si alguien desea usar estos programas se pueden comunicar con Julián Bedoya, en la Universidad Nacional. Teléfonos: 34 86 44; 34 18 76.

para una fuente puntual como una función de la estabilidad y la velocidad del viento. Para cada cálculo se usa la altura final de la pluma.

PTDIS. Calcula las concentraciones a corto término, viento abajo de una fuente puntual a distancias predeterminadas por el usuario. Se puede incluir el límite de dispersión vertical por medio de una altura de mezcla. También considera un elevamiento gradual de la pluma hasta obtener el punto final de elevación. Una opción permite el cálculo de isopletas (líneas de igual concentración) para concentraciones específicas a cada distancia viento abajo.

PTMTP. Calcula para un número de receptores ubicados arbitrariamente, la concentración de contaminantes provenientes de un número de fuentes puntuales. Se determina la elevación de la pluma para cada fuente. Se determinan las distancias viento abajo y perpendiculares a esta dirección para cada fuente-receptor. Se supone que las concentraciones para cada receptor provenientes de varios receptores son acumulativas. Usa datos meteorológicos para cada hora. Se puede obtener concentraciones horarias y promedios para cualquier tiempo entre 1 y 24 horas.

CRSTER. Este algoritmo calcula las concentraciones a nivel del suelo resultantes de hasta 19 fuentes puntuales elevadas por un año completo, para hasta 180 receptores. Requiere valores horarios de la velocidad y dirección del viento, y valores horarios estimados para la estabilidad atmosférica y la altura de mezcla. El algoritmo se basa en una ecuación gausiana que utiliza coeficientes empíricos de dispersión, elevación de la pluma y altura de mezcla.

PAL. Algoritmo para estimar concentraciones de contaminantes estables provenientes de fuentes puntuales de área y de línea. El algoritmo no debe ser utilizado en áreas urbanas completas sino para análisis a menor escala de centros comerciales, aeropuertos, zonas industriales y plantas industriales aisladas. Se pueden obtener concentraciones horarias y concentraciones promedias de 1 a 24 horas.

VALLEY. Este algoritmo de dispersión gausiana está diseñado para estimar concentraciones de 24 horas o anuales para los contaminantes provenientes de hasta 50 fuentes puntuales o de área. Los cálculos se hacen para cada frecuencia de un arreglo matricial que consiste en seis estabilidades, 16 direcciones de viento, y seis velocidades de viento para hasta 112 receptores. Incluye coeficientes empíricos de dispersión, y ajustes por elevación de pluma y capa de mezcla.

RAM. Algoritmo de calidad del aire, de tipo gausiano, que calcula concentra-

ciones de corto término para contaminantes estables provenientes de fuentes puntuales y de área. Usa datos sobre varias horas. Puede utilizar dos tipos diferentes de coeficientes empíricos de dispersión (Pasquill-Gifford o Mc Elroy-Pooler). Actualmente es el modelo más utilizado ya sea para ambientes urbanos o rurales.

### Conclusiones y Recomendaciones:

Los modelos matemáticos manejados con un buen criterio se pueden utilizar para determinar el impacto de una fuente o varias fuentes contaminantes sobre la comunidad circundante. Con base en estos resultados se pueden determinar las políticas a seguir por el gobierno y las empresas para controlar la contaminación. Se puede reubicar la industria, exigir controles, zonificar de tal forma que las fábricas tengan un cordón de protección, no permitir asentamientos residenciales cerca de industrias contaminantes, y exigir ciertas alturas mínimas de chimeneas, entre muchas otras soluciones.

La segunda conclusión se refiere a la complejidad de estos estudios y a la necesidad de disponer de ordenadores electrónicos para elaborar todos los cálculos teniendo en cuenta todas las variables que afectarían los resultados. En muchos casos esto no requiere del desarrollo de sofisticados programas de computador ya que en la ciudad se hallan disponibles un buen número de éstos.

Por último, se destaca la importancia de la información meteorológica. Siempre que se desee un buen estudio de dispersión atmosférica, esta información es imprescindible. Es muy laboriosa de obtener y a veces las personas o entidades que desean hacerlo no obtienen apoyo económico adecuado para llevar adelante estos proyectos. Para el caso del Valle de Aburrá sería recomendable disponer de, al menos, cuatro rosas de viento a lo largo del Valle. Los únicos datos procesados hasta el momento son los del Aeropuerto Olaya Herrera. También se necesita un buen estudio sobre la altura de la capa de inversión y sobre las condiciones de turbulencia que se presentan en el Valle.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. BEDOYA, Julián. Contaminación del Aire y Meteorología. *Dyna* (Medellín), No. 99, Oct. 1980a, pp 5–10.
2. BEDOYA, Julián. Contaminación en el Valle de Aburrá, Trabajo de Promoción a Profesor Asociado. Universidad Nacional, Medellín, 1980b. 103 p.
3. BERMUDEZ, L.; GONZALEZ, C. y BARREIRO, R. Modelo Teórico de Dispersión de Contaminación Atmosféricos de Origen Industrial en el Valle de Aburrá, Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería Mecánica, UPB, Medellín, 1977.
4. BRIGGS, Gifford A. Plume Rise. U.S. Government Printing Office, Washington, 1969. (AEC Critical Review Series TID 25075).
5. McMULLEN, R. W. The Change of Concentration Standard Deviation with Distance. *JAPCA* (Pittsburg, USA), vol. 25, No. 10, Oct., 1975. pp 1057–1058.
6. OROZCO, Alvaro. Análisis del Comportamiento de la Pluma de una Chimenea Industrial. *Revista Contaminación Ambiental* (Medellín), No. 5, 1979. pp 43–53.
7. TURNER, D.B. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. EPA Research Triangle Park, N.C., U.S.A. 1970. (AP-26).
8. TURNER, D.B. Atmospheric Dispersion Modeling — A Critical Review. *JAPCA* (Pittsburg, USA), Vol. 29, No. 5, mayo, 1979. pp 502–519.