

Effect of the operational and meteorological variables in the atmospheric dispersion of SO₂

Roberto Rojano¹, César García², Neyma García², Andrés Galindo², Enrique Toncel², Jhonny Pérez² y Sammy Daza²

¹Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira, Riohacha, Dpto. Guajira, Colombia. E-mail: aroberto12@hotmail.com

²División de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Edo. Zulia, Venezuela

Abstract

This paper presents an analysis of the effect of the operational and meteorological variables in the atmospheric dispersion of the SO₂. To estimate the concentrations, the Gaussian model of atmospheric dispersion was utilized. The utilized model, it bases on a program in FORTRAN language, based on the theory of the dispersion developed by D. Bruce Turner. In this model incorporate the most recent understanding of the dispersion in the mixed layer, plume rise and the parameters of dispersion in rural and urban areas. The primary inputs to model they consist of emissions information of the source, data meteorological and information of the points receptor. For the operational and meteorological parameters studied; levels were observed maximums of SO₂ that surpassed the Limits of Quality of Air. It is was of expecting, the operational characteristics of the source and the meteorological conditions of the evaluated area, inciden in the maximal concentrations of a pollutant.

Key words: SO₂ dispersion, gaussian model, operational and meteorological variables.

Efecto de las variables operacionales y meteorológicas en la dispersión atmosférica del SO₂

Resumen

Este trabajo presenta un análisis del efecto de las variables operacionales y meteorológicas en la dispersión atmosférica del SO₂. Para estimar las concentraciones, se utilizó el modelo gaussiano de dispersión atmosférica. El modelo utiliza un programa en lenguaje FORTRAN, basado en la teoría de la dispersión desarrollado por D. Bruce Turner. En este modelo se incorporan los más recientes conocimientos de la dispersión bajo una capa de mezclada, la elevación de la pluma y los parámetros de dispersión en áreas rurales y urbanas. Las variables de entrada al modelo consisten de informaciones de emisiones de la fuente, datos meteorológicos horarios e información de los puntos receptores. Para los parámetros operacionales y meteorológicos estudiados se observaron niveles máximos de SO₂ que sobrepasaron los Límites de Calidad de Aire. Como era de esperar, las características operacionales de la fuente y las condiciones meteorológicas del área evaluada, inciden en las concentraciones máximas del contaminante.

Palabras clave: Dispersión de SO₂, modelo gaussiano, variables, operacionales y meteorológicos.

Introducción

En la mayor parte de los países industriales la legislación sobre contaminación del aire se

basa en algún tipo de concentración permitida de contaminantes. Para planear y poner en práctica programas de control de la contaminación del aire, diseñados para cumplir con los requisitos

expresados en estas leyes, se deben predecir y analizar las concentraciones en el aire ambiental, las cuales serán resultados de cualquier conjunto planeado de emisiones [1]. Las predicciones y análisis, se hacen por vía de modelos matemáticos utilizados para estimar la dispersión atmosférica de los contaminantes. El modelo matemático de dispersión atmosférica perfecto, permitirá predecir las concentraciones que resultarían de cualquier conjunto especificado de emisiones de contaminantes, para cualquier condición meteorológica especificada, en cualquier lugar durante cualquier periodo, con confianza total en las predicciones [2]. La mayor parte de estos modelos se pueden usar para diferentes contaminantes, pero se deben aplicar por separado a cada uno [3].

El objetivo de este trabajo es analizar el efecto de las variables operacionales y meteorológicas sobre la dispersión atmosférica del SO₂, en diferentes localizaciones, desde una fuente puntual continua, teniendo como base, datos operacionales de la fuente y el comportamiento meteorológico de la zona. Para analizar el efecto que sobre la dispersión atmosférica del SO₂, tiene las variables operacionales y meteorológicas, se utilizó un modelo aplicable a dióxido de azufre (SO₂). Los datos meteorológicos usados en este trabajo, son promedios horarios de registros de mediciones realizadas por la estación meteorológica La Cañada bajo responsabilidad de la Fuerza Aérea Venezolana, para los años 1995-1997 [4]. El área en estudio corresponde a la zona aledaña a la termoelectrica Ramón Laguna, ubicada en la Zona Sur del Municipio Maracaibo-Venezuela.

Modelo Gaussiano de Dispersión

La forma general de la ecuación de la dispersión gaussiana, es la presentada en la ecuación 1 [1, 5, 6], seguida de las derivaciones de las ecuaciones para condiciones más especializadas. Esta ecuación estima la concentración de un receptor localizado a una distancia *x* viento abajo, *y* transversal y a una altura *z* por encima del suelo, que resulta desde una emisión a una altura efectiva *H* encima del suelo.

Las variables usadas son:

[X] Concentración del contaminante del aire en masa por volumen, usualmente g/m³.

- Q Tasa de emisión del contaminante en masa por tiempo, usualmente g/s.
- u Velocidad del viento en el punto de liberación, m/s.
- σ_y La desviación estándar de la distribución de la concentración en la dirección transversal, *m*, a una distancia *x* viento abajo.
- σ_z La desviación estándar de la distribución de la concentración en la dirección vertical, *m*, a una distancia *x* viento abajo.
- π Constante matemática pi igual a 3.14159216.....
- H La altura efectiva de la línea central de la pluma del contaminante.

La ecuación consta de cuatro factores separados, los cuales se multiplican entre sí. Estos factores representan la dependencia sobre la emisión, o factor de fuente, y que ocurre en las tres dimensiones paralelas a los tres ejes de coordenadas.

$$\begin{aligned}
 X(x, y, z; H) = & \text{Factor de emisión } Q \\
 & \text{Factor viento abajo } \frac{1}{u} \\
 & \text{Factor transversal } \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \\
 & \text{Factor vertical } \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_z} \left(\exp\left(-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

Una breve explicación de los cuatro términos es la siguiente:

1. La concentración a un receptor es directamente proporcional a la emisión.
2. Paralelo al eje X, las concentraciones son inversamente proporcionales a la velocidad del viento.
3. Paralelo al eje transversal Y, las concentraciones son inversamente proporcionales a la expansión transversal, σ_y, de la pluma; cuanto mayor es la distancia desde la fuente, mayor es la expansión transversal, σ_y, y resulta menor la concentración.
4. Paralelo al eje vertical Z, las concentraciones son inversamente proporcionales a la expansión vertical de la pluma, σ_z. Cuanto mayor es la distancia desde la fuente, ma-

yor es la dispersión vertical y menor la concentración. La suma de los dos términos exponenciales en el factor vertical, representa la posición del receptor en la altura o eje vertical z , desde la línea central de la pluma. El primer término representa la distancia directa, $H-z$, del receptor desde la línea central de la pluma. El segundo término representa la distancia de reflexión del receptor desde la línea central de la pluma, la cual es la distancia desde la línea central de la pluma hasta el suelo.

Haciendo la multiplicación de los cuatro factores, la ecuación se simplifica a:

$$X(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \times \left(\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\left(\exp\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} + \exp\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right) \right) \quad (1)$$

De esta ecuación general se derivan las siguientes ecuaciones adicionales para condiciones específicas:

Para receptores al nivel del piso, $z=0$, La ecuación 1 se reduce a:

$$X(x, 0, 0; H) = \frac{Q}{\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \times \left(\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\left(\exp\frac{-1}{2}\left(\frac{H^2}{\sigma_z^2}\right)\right)\right) \right) \quad (2)$$

Para estimar la concentración directamente abajo de la línea central de la pluma, $y=0$, al nivel del suelo, $z=0$, la ecuación se reduce a:

$$X(x, 0, 0; H) = \frac{Q}{\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \left(\exp\frac{-1}{2}\left(\frac{H^2}{\sigma_z^2}\right) \right) \quad (3)$$

Para calcular las concentraciones en la línea central de la pluma, $y=0$, $z=H$, la ecuación (1) toma la forma siguiente:

$$X(x, 0, H; H) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \left(1 + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{2H}{\sigma_y}\right)^2\right) \right) \quad (4)$$

Para calcular las concentraciones a lo largo de la línea central de la pluma al nivel del suelo desde el nivel de liberación, $Y=0$, $z=0$, $H=0$, la ecuación (1) se reduce a:

$$X(x, 0, 0; 0) = \frac{Q}{\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \quad (5)$$

Los valores de los parámetros de dispersión Pasquill-Gifford, σ_y y σ_z , utilizados por el modelo, son determinados como una función de la distancia viento abajo de la fuente, x , y la clase de estabilidad de Pasquill [5]. En cualquier consideración de concentración viento abajo desde una fuente, es deseable estimar la altura efectiva de la chimenea, la altura en la cual la pluma alcanza su nivel (línea central). El modelo realiza este cálculo con las ecuaciones de elevación de la pluma de Briggs [7, 8].

Diseño del experimento

Para analizar el efecto que sobre la dispersión atmosférica del SO_2 , tienen las variables operacionales y meteorológicas, se utilizará un programa en lenguaje FORTRAN, basado en la teoría de dispersión de Turner [5]. Las variables de entrada del modelo de dispersión consisten de datos meteorológicos, información de emisiones de la fuente e información de receptores. Los parámetros meteorológicos horarios que son requeridos para las variables de entrada al modelo, son: la clase de estabilidad de Pasquill, dirección del viento, velocidad del viento, temperatura y la altura de la capa de inversión. La información de emisiones consiste de las coordenadas de la localización de la fuente, la altura física de las chimeneas, el diámetro interno en el tope de la chimenea y la velocidad y la temperatura del gas de salida de la chimenea. Estas variables entran al modelo de dispersión, la cual es una simulación matemática de las características físicas y químicas de la atmósfera. Las salidas del modelo son las concentraciones de cada receptor, sobre los cuales se analizarán los efectos mencionados anteriormente.

Datos meteorológicos

Muchas investigaciones [9] han presentado el efecto de las condiciones meteorológicas en la dispersión de contaminantes. Se puede observar, que las condiciones meteorológicas favorables (atmósfera adiabática o inestable), contribuyen a la reducción de los niveles de SO_2 , mientras que en otros lugares donde las condiciones eran desfavorables, se alcanzaron niveles altos. Los datos

meteorológicos requeridos por el modelo, son los siguientes:

- Dirección y velocidad del viento. Dichas variables determinan el transporte horizontal de los contaminantes y la ruta que toman los contaminantes una vez emitidos por la fuente a la atmósfera.
- Estabilidad atmosférica, variable relacionada con el gradiente vertical de temperatura y que incluye turbulencia térmica de la atmósfera, y por tanto influye en la dispersión vertical del contaminante. La clasificación horaria de la estabilidad atmosférica, fue determinada siguiendo el principio presentado por Pasquill [5].
- Altura de la capa de inversión. Cuando existe una inversión térmica a cierta altura desde el suelo, se comporta como un techo que limita la dispersión vertical del contaminante en las zonas comprendida entre el nivel del piso y el fondo de la capa de inversión. El modelo de dispersión calcula las concentraciones de contaminantes, cuando se encuentra influenciado por esta capa, sólo dando la altura de la misma sobre el nivel del suelo. Para utilizar el valor del parámetro de la altura de la capa de inversión en la ciudad de Maracaibo se utilizó el promedio de diez años, cuyo valor es de 1.565 m registrados por la estación meteorológica de La Cañada, por medio de radiosondeos. La Tabla 1 presenta los promedios y las condiciones predominantes horarias de los parámetros meteorológicos de relevancia para el modelo, como son: la estabilidad atmosférica, velocidad y dirección del viento, insolación, nubosidad y temperatura [4]. Estas variables entran al modelo por intermedio del menú **Meteorología**.

Datos de emisiones

La evolución en la emisión específica del SO₂, con diferentes intensidades, depende esencialmente de la participación porcentual del fuel oil en la combustión [10]. Estas emisiones de contaminantes, son influenciadas notablemente por los parámetros operacionales de la planta de poder [11]. La planta termoeléctrica "Ramón Laguna" (PTRL) de la empresa ENELVEN, esta ubicada a 10°36'15" de latitud norte y 71°36'50" de

longitud oeste, en el municipio de Maracaibo del estado Zulia, Venezuela. La capacidad instalada de producción es de aproximadamente de 804 MW. El combustible de uso frecuente es el petróleo residual (también se utiliza gas natural), que contiene alrededor del 3.02% de azufre, 450 ppm de vanadio, 0.1% de cenizas y 18055 Btu/lb de energía. Los contaminantes son emitidos por nueve chimeneas de altura variable: tres de 100 m, dos de 60 m y cuatro de 40 m. Como se mencionó anteriormente, las emisiones de dióxido de azufre a estudiar, provienen principalmente de la combustión de combustibles derivados del petróleo, originados en la planta termoeléctrica Ramón Laguna. El modelo maneja emisiones de fuente puntuales, para las cuales se requiere información exacta en cuanto a localización y características de las emisiones. Para calcular la cantidad de SO₂ proveniente de la combustión se partió de los datos de consumo de combustible para cada unidad de generación y se aplicaron los factores de emisión correspondientes, de con el porcentaje de azufre contenido en el combustible. En la Tabla 2, se presentan los datos más importantes de operación de las nueve unidades en estudio, tales como la energía de entrada de las calderas, capacidad de producción y las tasas de emisión de cada chimenea.

Adicional a los datos operacionales presentados en la Tabla 2, el modelo requiere datos específicos operacionales y físicos de las unidades de generación y las chimeneas, diámetro interno en el tope de la chimenea (4.3 m), la velocidad de salida de los gases (12.5 m/s), y la temperatura del gas de salida (423 K) para las chimeneas RL15, RL16 y RL17. Todos estos parámetros entran al modelo por intermedio del menú **emisiones**, siendo susceptibles de cambiarse, para analizar el efecto que tienen sobre la dispersión atmosférica del SO₂, objetivo de esta investigación.

Resultados y Análisis

Variables operacionales

Concentración máxima de SO₂ como función de la tasa de emisión: Para la estimación de las concentraciones máximas en función de la tasa de emisión, se realizó el estudio para la clase de estabilidad C por ser la estabilidad atmosférica de Pasquill predominante en la ciudad de

Tabla 1
 Datos meteorológico promedios horarios en la ciudad de Maracaibo, (1995-1997)

Horas	Vel. Viento (m/s)	Dir. Viento (Grados)	Temperatura (°C)	Insolación (Horas de sol)	Nubosidad (Octavos)	Estabilidad (Pasquill)
1:00 am	3.5	36	26.18			D
2:00 am	3.39	36	25.84			D
3:00 am	3.15	36	25.71			D
4:00 am	2.9	36	25.56			C
5:00 am	3.15	36	25.38		2	C
6:00 am	2.5	36	25.07	1.4	3	C
7:00 am	2.57	36	24.83	5.2	4	C
8:00 am	3.18	34	25.44	6.6	5	C
9:00 am	3.3	36	27.18	7.2	6	C
10:00 am	3.2	0.2	28.45	7.4	7	C
11:00 am	2.6	0.5	29.6	7.7	6	C
12:00 pm	3	0.7	30.76	7.5	4	B
1:00 pm	2.9	11	31.27	8.6	4	B
2:00 pm	3.12	0.7	31.64	8.3	4	B
3:00 pm	3.46	34	31.83	7.6	5	B
4:00 pm	3.72	34	31.56	5.4	6	B
5:00 pm	4.25	34	31.05	1.9	6	C
6:00 pm	4.91	34	29.9	0.2	6	C
7:00 pm	4.79	34	28.41		7	D
8:00 pm	5.12	34	27.66		8	D
9:00 pm	4.27	36	27.22		8	D
10:00 pm	4.02	34	26.85		7	D
11:00 pm	3.8	34	26.63		6	D
12:00 am	3.86	36	26.42			D
Promedio	3.53	-	27.94	5.77	5.47	-
Predominante	-	36	-	-	-	C

Maracaibo. Se hizo variar la tasa de emisión de la chimenea desde 150 hasta 3000 g/s y se calcularon las concentraciones máximas y las distancias a estas concentraciones para cada ítem, este rango incluye la operatividad de todas las unidades potencia con un valor de diseño de 2868,07 g/s.

La Figura 1 muestra una relación lineal entre la tasa de emisión y la concentración del SO₂. Se puede decir, que las concentraciones de los contaminantes del aire viento abajo, son lineales con respecto a las emisiones, con un grado de co-

rrelación de $r = 0.9949$. Esta relación puede ser usada para evaluar alternativas en procesos de ingeniería.

Concentración máxima de SO₂ como función de la velocidad de salida de los gases:

En cálculo de las concentraciones máximas como función de la velocidad de salida de los gases, se tomó en cuenta la clase de estabilidad Pasquill C, variándose la velocidad de salida de los gases a partir de la mínima velocidad de los vientos registrado. Los resultados se presentan

Tabla 2
 Datos de operaciones y emisiones para fuel oil en la termoeléctrica Ramón Laguna

Unidad de Potencia	Altura Chimenea (m)	Capacidad de Producción (Mw)	Energía de Entrada (Btu/h)	Tasa de Emisión (g/s)
RL8	40	24	81.912	85.61
RL9	40	24	81.912	85.61
RL10	40	66	225.258	235.44
RL11	40	66	225.258	235.44
RL13	60	87	296.931	310.35
RL14	60	87	296.931	310.35
RL15	100	150	511.95	535.09
RL16	100	150	511.95	535.09
RL17	100	150	511.95	535.09
Total		804	2744.052	2868.07

Fuente: Araujo [12], 1987.

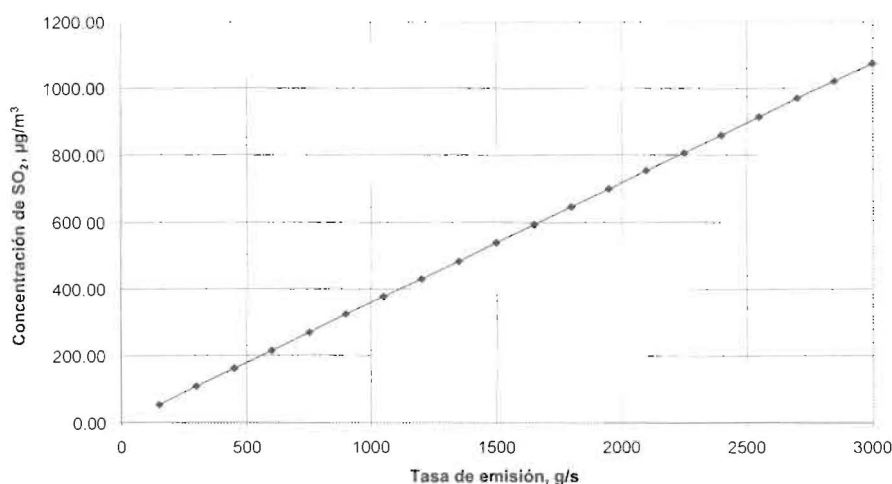


Figura 1. Concentración máxima de SO₂ como función de la tasa de emisión, Pasquill C, dispersión Pasquill-Gifford.

la Figura 2. Se puede observar que a medida que la velocidad de salida de los gases aumenta, disminuye la concentración máxima. La concentración del contaminante es influenciada por esta velocidad hasta una distancia donde la velocidad del viento comienza a predominar. Según Turner [5] cuando la relación de la velocidad de salida y la velocidad del viento sea mayor que 1.5, se ve favorecida la dispersión y no se observan interferencias.

Se puede apreciar en la misma Figura que para la velocidad de salida de la planta en estudio, 12.5 m/s, y la clase de estabilidad Pasquill C, la distancia de la máxima concentración se sitúa

a 4.424 m viento abajo de la fuente, con una concentración máxima de 1027.30 µg/m³, equivalente para un periodo de muestreo de 24 horas a 369 µg/m³. Este valor sobrepasa los estándares de Calidad de Aire establecido en la normativa Venezolana, cuyo máximo aceptado es de 365 µg/m³ [13], para un porcentaje de excedencia en el lapso de muestreo de 0.5% y un periodo de medición de 24 horas.

Concentración máxima de SO₂ como función de la altura de la chimenea: Los resultados de estos cálculos se presenta en la Figura 3. Se realizaron para una clase de estabilidad

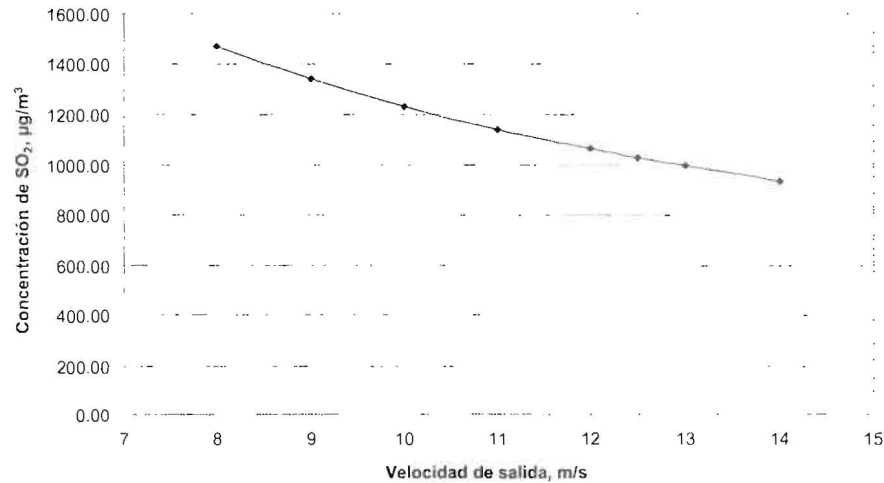


Figura 2. Concentración máxima de SO₂ como función de la velocidad de salida de los gases, Pasquill C, dispersión Pasquill-Gifford.

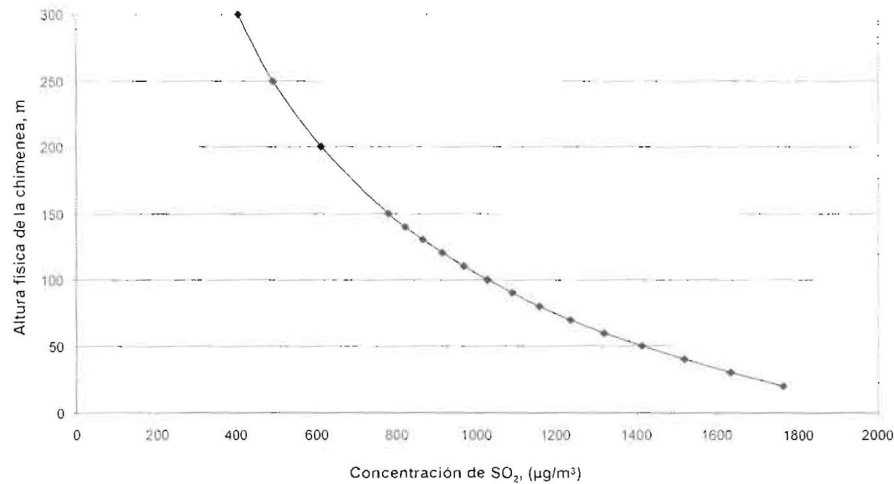


Figura 3. Máxima concentración de SO₂ como función de la altura física de la chimenea, Pasquill C, dispersión Pasquill-Gifford.

Pasquill C. Se puede apreciar, que independientemente de la altura física de las chimeneas, la elevación de la pluma, Ah , se mantiene constante con un valor de 235,4 m, a diferencia de la altura efectiva de la chimenea H , que varía de acuerdo al cambio de la altura física ($H = h + Ah$). Se observa en la Figura 3, que la distancia a la máxima concentración aumenta con el incremento de la altura física de la chimenea H , por ejemplo, para la altura física de la chimenea en estudio, que es de 100 metros la distancia de máxima concentración se ubica a 4.424 metros, para estas condiciones de estabilidad y demás parámetros meteorológicos y operacionales.

En la Figura 3, se puede observar cómo disminuye la concentración máxima cuando incrementa la altura física de la chimenea, obteniéndose la máxima concentración con la menor altura de la chimenea, en este caso a 20 m de altura. La concentración máxima para la chimenea en estudio es 1030 µg/m³ con un equivalente para un periodo de muestreo de 24 horas de 369 µg/m³. Como fue mencionado anteriormente, este valor excede el valor aceptado por la norma vigente de Límite de Calidad de Aire. Se puede apreciar la disminución en la concentración del 9% en promedio por un aumento de 10 m en la altura de la chimenea, resultadò que deben ser tenido en cuenta para la implementación de nuevas opera-

ciones libres de contaminación atmosférica en fuentes elevadas.

VARIABLES METEOROLÓGICAS

Concentración como función de la clase de estabilidad de Pasquill en la distancia viento abajo de la fuente: Como se explicó anteriormente, se utilizó un sistema de coordenadas con tres ejes ortogonales X, Y, y Z. Con el origen del sistema bajo el punto de emisión y haciendo coincidir el eje X con la dirección predominante del viento. Para la corrida de este ítem, se tomaron en cuenta las tres categorías de estabilidad atmosférica según el principio de Pasquill, predominantes en la ciudad de Maracaibo, que son la B, C y D, de igual manera se utilizaron la técnica de dispersión desarrolladas por Pasquill-Gifford y la técnica urbana de Briggs. Esta última se utilizó para clase de estabilidad C. Los resultados se presentan en la Figura 4 para las clases de estabilidad B, C y D. Para la técnica de dispersión de Pasquill-Gifford, y la estabilidad C, para la técnica de dispersión de Briggs, se puede apreciar que la máxima concentración se alcanza a una distancia de 2.110 m con un valor de 1409.7 µg/m³ para la estabilidad B, de 4.394 m y 1030 µg/m³ para la estabilidad C, y de 21.586 m y 321.46 µg/m³ para la estabilidad D. Para la clase de estabilidad C y la técnica de dispersión de Briggs urbana, la distancia para la máxima concentración es de 1.231 m y la concentración máxima es 1894.6 µg/m³. Se puede observar que a

medida que la clase de estabilidad cambia de sentido A→E la máxima concentración aumenta. Esto es de esperar ya que con el cambio de la estabilidad atmosférica desde condiciones inestables (A, B, C) a condiciones estables (E, F), la estructura térmica de la atmósfera inhibe los movimientos verticales, pero no inhibe los movimientos horizontales ni transversales, alcanzándose con este cambio de estabilidad grandes distancias para la máxima concentración y una concentración que se decrece con la distancia viento abajo. El análisis de las concentraciones máximas viento abajo de la planta, para un período de muestreo de 24 horas y para las estabilidades atmosféricas mencionadas anteriormente, (Pasquill B, C y D), y presentadas en la Figura 4, muestran que para las clases de estabilidad Pasquill B Y C, las concentraciones para algunas distancias viento abajo, exceden el límite máximo de calidad de aire establecido por la normativa Venezolana (80, 200, 250 y 365 µg/m³), tanto en la técnica de dispersión Pasquill-Gifford, como para técnica urbana de Briggs. El análisis de los resultados muestra que el porcentaje de excedencia de SO₂, para las estabilidades B y C, se encuentra por encima de los niveles establecidos en los Límites de Calidad de Aire, a diferencia de la estabilidad D, cuyo porcentaje de excedencia no sobrepasa los límites de la misma norma.

Concentración máxima de SO₂ como función de la velocidad del viento y la clase de estabilidad de Pasquill: Para las estimaciones de

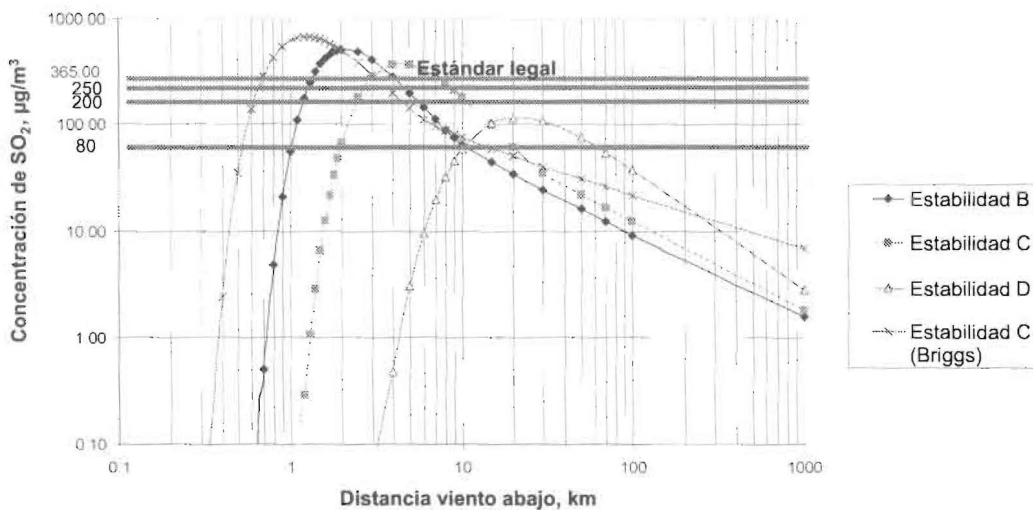


Figura 4. Límites de calidad de aire y la distribución de la concentración de SO₂ como función de la distancia viento abajo de la fuente para periodos de muestreo de 24 horas.

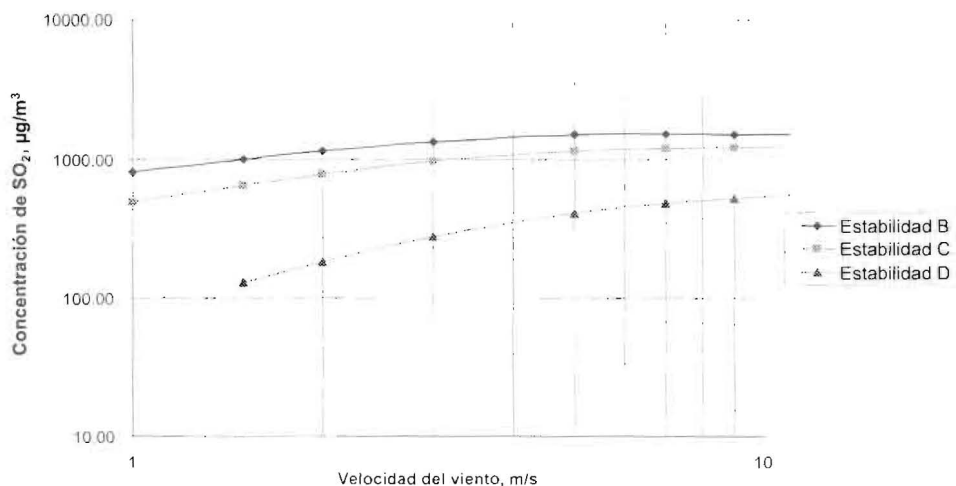


Figura 5. Concentración máxima de SO_2 como función de la velocidad del viento y la clase de estabilidad, dispersión Pasquill-Gifford.

las concentraciones máximas de SO_2 en función de la velocidad del viento y la clase de estabilidad B, C, y D, se analizó la variación de la velocidad del viento en la ciudad de Maracaibo, tomando un rango de variación de 1 a 10 m/s. Se analizaron las estimaciones correlacionándolas con las categorías de Pasquill nombrada anteriormente, por ser las que predominan en la atmósfera de esta región. Los resultados se presentan en la Figura 5, se puede apreciar que la velocidad crítica, es decir, la velocidad donde resulta la mayor concentración, es 5 m/s con $995,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la clase de estabilidad B, 7 m/s con $962,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la estabilidad C y 11 m/s con un valor $554,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la estabilidad D. Se puede observar que la clase de estabilidad B es la que representa la mayor concentración en función de la velocidad del viento. También se puede observar que a medida que aumenta la velocidad del viento la concentración aumenta en cada clase de estabilidad de Pasquill estudiada, hasta llegar a la concentración máxima de esa estabilidad. Luego disminuye con el aumento de la velocidad del viento, o se torna inversamente proporcional con este parámetro. También se observa en la Figura 5, que la distancia para la máxima concentración disminuye al aumentar la velocidad del viento, alcanzando las menores distancias para la clase de estabilidad B. Se observaron niveles máximos de SO_2 que sobrepasaron los Límites de Calidad de Aire.

Máxima concentración de SO_2 como función de la altura de la capa de inversión: Para el cálculo de la concentración máxima como fun-

ción de la altura de la capa de inversión, se usaron las clases de estabilidad B, C, y D (las que mayor predominan en la ciudad), se hizo variar la altura de esta capa desde 400 metros desde el nivel del suelo, hasta una altura de 2.000 m, teniendo en cuenta el comportamiento de este parámetro en la ciudad. En la Figura 6, se puede observar el comportamiento de las concentraciones máximas, se puede decir que la altura de esta capa afecta la concentración máxima, cuando esta ubicada a pocos metros sobre el nivel del suelo. Por ejemplo, en la Figura 6, se puede observar, que para cada estabilidad, las concentraciones máxima más altas se encuentran cuando la altura de la capa de inversión está a 400 m sobre el nivel del suelo, así de esta manera, después de una altura determinada este parámetro no afecta a la concentración máxima ni la distancia para la máxima concentración hasta una distancia donde se asume que tiene lugar la reflexión, tanto del piso como del fondo de la capa de inversión.

Conclusiones

Las principales conclusiones de este estudio analítico del efecto de las variables operacionales y meteorológicas en la dispersión atmosférica del SO_2 , aplicando un modelo de dispersión atmosférico, basado en el principio gaussiano, son:

- La planta termoeléctrica Ramón Laguna constituye una fuente importante de contaminación por dióxido de azufre, en sus zonas aledañas. De todos los puntos alrede-

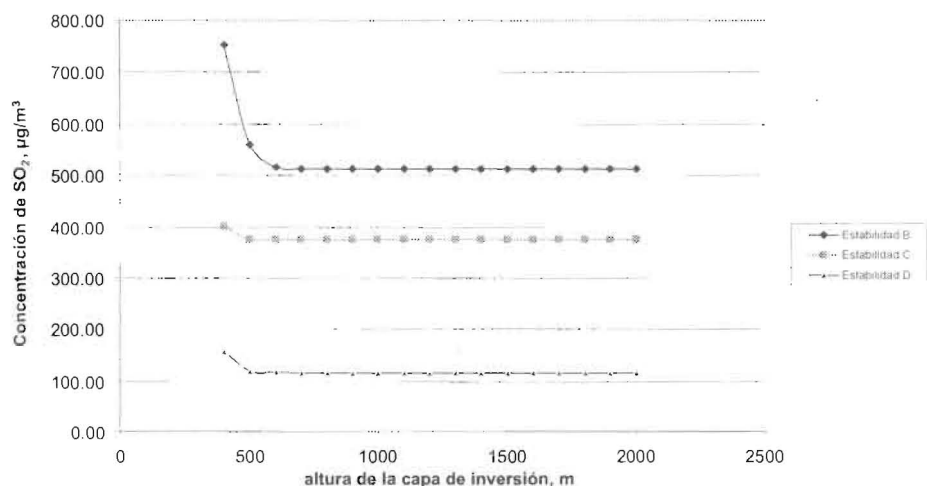


Figura 6. Máxima concentración de SO₂ como función de la altura de la capa de inversión, Pasquill C, dispersión Pasquill-Gifford.

dor de la planta, los que encuentran ubicados en la dirección noreste (NE) del viento, son los que están más influenciados por las descargas de SO₂.

- De todas las clases de estabilidad atmosférica estudiada, según el principio de Pasquill, la clase de estabilidad C, es la predominante en la atmósfera de la ciudad de Maracaibo y es la que presenta una mejor correlación entre las concentraciones de SO₂ estimadas por el modelo y las mediciones de SO₂, experimentales.
- La zona de ubicación de la fuente en estudio, representa un área sensible, a considerar en instalaciones nuevas de fuentes fijas de contaminación atmosférica, en particular debido a la relación lineal que existe entre la tasa de emisión de contaminante y las concentraciones del mismo alrededor de la fuente para las condiciones meteorológicas predominantes de la región.
- Las variables operacionales de más incidencia en la dispersión del SO₂, son la tasa de emisión y la altura física de la chimenea.
- El análisis de las concentraciones de SO₂ para las variables operacionales y meteorológicas con las estabildades atmosféricas predominantes B, C y D revela valores por encima de 365 µg/m³ como límite máximo establecido en la norma venezolana de contaminación atmosférica.

Referencias Bibliográficas

1. De nove, Noel. Ingeniería de control de la contaminación del aire. McGraw-Hill. México. (1998). pp. 175.
2. Oduyemi, K. Modelling dispersion of pollutants with a simple software. It is a practical approach. Computational mechanics. (1994). pp. 25-32.
3. Baldasano, J.M; Brebbia, C.A; Power, H; Zannetti, P. Aplicación de the air quality model for regional planning purposes. Computational mechanics. (1994). pp. 27-34.
4. Rojano A, R. Análisis del efecto de las variables operacionales y meteorológicas en la dispersión atmosférica del SO₂. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. (1998). pp. 147.
5. Turner D. Bruce. Workbook Atmospheric Dispersion Estimates. An Introduction to Dispersion Modeling. Lewis Publishers. CRC press Inc. London. (1994). pp. 144.
6. Smith, R.J. A Gaussian model for estimating emissions from puntual sources. Math. Comput. model. Vol 21 No. 9 (1995). pp. 23-29.
7. Briggs, G. A. Discussion Chimney Plumes in Neutral and Stable Surroundings. Atmospheric Environment. (1972). Vol. 6, pp. 507-510.

8. Padmanabh amurty, B; Chakrabarty, P. A comparative study of maximum ground level concentration of air pollutants using different plume rise formulae and dispersion parameters. *Sch. Environment sci.* Vol. 65 No. 5 (1993). pp. 419-421.
9. Fricke, W; Uhse, K; Contribution of meteorological conditions and emission reduction to decrease of SO₂ concentration in Alemania. *Staub Reinhalt.* Vol 54. No. 7-8 (1994). pp. 289-296.
10. Rivas, H. Análisis de la emisión de contaminantes en las centrales eléctricas de servicio público argentinas. *Revista energetica. Energy magazine.* Año 14 No. 3 (1997). pp.12-90.
11. Zhao, Jianshens. Influence of operating parameters on SO₂ y NO_x emissions from power plant. *Fuel.* Vol 73. No. 10 (1997). pp. 1650-1557.
12. Araujo, José. Determinación cuantitativa de los contaminantes gaseosos emitidos por la planta termoeléctrica Ramón Laguna. *Escuela de Ingeniería civil. Facultad de Ingeniería. Luz. Maracaibo.* (1987). pp. 1-115.
13. Venezuela, Normas sobre Calidad de Aire y Control de la Contaminación Atmosférica. *Gaceta Oficial.* Número 4.889. Decreto 638. Caracas 19 de mayo de (1995).

Recibido el 26 de Octubre de 1998
En forma revisada el 17 de Julio de 2000