

## Modelamiento de Dispersión de Contaminantes en la atmósfera emitidos por Generadores Termoeléctricos Móviles en la ciudad de Guayaquil

<sup>1</sup>Peralta J; <sup>2</sup> Delgado E; <sup>3</sup> Vera J; <sup>4</sup> Barriga A.

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción CDTS [jperal@espol.edu.ec](mailto:jperal@espol.edu.ec)

<sup>2</sup> Ing. Mecánico CDTS FIMCP ESPOL [eadelgad@espol.edu.ec](mailto:eadelgad@espol.edu.ec)

<sup>4</sup> Ph.D Profesor Principal CDTS FIMCP - ESPOL [abarriga@espol.edu.ec](mailto:abarriga@espol.edu.ec)

<sup>3</sup> Ing. Mecánico FIMCP ESPOL [jpverafigueroa@yahoo.com](mailto:jpverafigueroa@yahoo.com)

### RESUMEN

El presente trabajo muestra los diferentes pasos y mecanismos de análisis de los efectos a la calidad del aire en la ciudad de Guayaquil producto a la emisión de contaminantes (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM entre otros) por la combustión de derivados de petróleo (fuel oil y diesel) durante la operación de barcasas de generación termoeléctricas. Para el presente estudio se desarrollo la modelación matemática de dispersión de los contaminantes en la atmósfera por medio del modelo gaussiano.

Dentro de la metodología de cálculo primero se evaluó los diferentes parámetros meteorológicos existentes en el 2005 para la ciudad de Guayaquil como lo son: la velocidad y dirección del viento, temperatura, nubosidad, etc. Con los resultados del análisis se procedió a crear el archivo denominado data meteorológica, el cual es utilizado en el modelo ISCST3 (**MODELO DE DISPERSION DE COMPLEJO DE FUENTE INDUSTRIAL**) basado en el modelo gaussiano y recomendado por la EPA para evaluación de la calidad del aire producto a la emisión de gases de combustión proveniente de fuentes industriales

Posteriormente se ingresan todos los datos y variables pertenecientes a la fuente de emisión e información meteorológica disponible al Modelo de Dispersión ISCST3 para su ejecución, esto se realiza por medio del programa Breeze Isc Gis Pro, creado por la empresa Trinity Consultants, el cual permite presentar los resultados según los requerimientos establecidos en las normas de internacionales de control y evaluación de la contaminación atmosférica.

Finalmente se presenta en función de la norma de calidad de aire del Ecuador como analizar e interpretar los resultados obtenidos en el modelo, los cuales serán presentados en forma grafica y numérica para contaminante que sido evaluado en el estudio.

**Palabras Claves:** combustión, dispersión, emisión, atmósfera

### Introducción

Debido a los altos valores de consumo de electricidad en la ciudad de Guayaquil, ha sido necesario complementar la generación eléctrica con la utilización de barcasas de generación (termoeléctricas) que operan principalmente con bunker y diesel.

El uso de estos equipos no solo genera un problema energético, sino también ambiental en la actualidad debido que durante el proceso de combustión se generan gases, partículas en suspensión, cenizas entre otras sustancias; las cuales son arrojadas directamente a la atmósfera

en la mayoría de casos sin el estudio apropiado para su emisión.

El presente trabajo tiene como objetivo indicar como realizar la evaluación de los efectos a la calidad del aire por la operación de barcasas termoeléctricas en punto de la ciudad de Guayaquil a través de Modelaje de la dispersión de Contaminantes en la Atmósfera por medio del programa ISCST3 utilizando el software Breeze.

El diagnóstico y posterior modelaje de la dispersión de los gases de combustión comprende tres objetivos fundamentales

1. Evaluación de los parámetros meteorológicos necesarios para la ejecución del modelo
2. Establecer el posible comportamiento de los contaminantes en la atmósfera.
3. Identificar potenciales parámetros para el control apropiado de las emisiones en la fuente.

## EL MODELO DE SIMULACIÓN UTILIZADO

En el Ecuador existen disposiciones técnico-legales específicas sobre la modelación matemática de la dispersión de contaminantes atmosféricos y calidad de aire y la práctica al respecto es muy limitada, por tanto, para este análisis se sigan los lineamientos establecidos La Agencia de Protección Ambiental de E.U. (EPA) guarda la Guía sobre modelos de calidad del aire, por ello, la base teórica para esta parte del estudio usaremos los lineamientos de la Agencia en materia de regulaciones en modelos de dispersión de calidad del aire en la revisión y preparación del estudio para fuentes y correcciones a Planes de Implementación Estatal (SIP). La aplicación regulatoria del modelo ISC debe atenerse al conjunto de lineamientos también.

En base a esto, se reconocen dos niveles de sofisticación en el proceso de modelación. El primer nivel consiste de técnicas generales y relativamente simples de estimación del impacto sobre la calidad del aire causado por una fuente específica, luego evaluaremos con todos las dos fuentes generando emisión, este modelaje se lo realizara a través del MODELO DE DISPERSION DE COMPLEJO DE FUENTE INDUSTRIAL conocido en su siglas de ingles (ISC).

### Descripción teórica del modelo de dispersión gaussiano

Los modelos de transporte y difusión de contaminantes son representaciones numéricas o físicas del comportamiento de gases o partículas en el aire.

Los modelos de difusión permiten la determinación cuantitativa de la

concentración de contaminantes emitidos a partir de fuentes fijas

En este caso utilizaremos el modelo matemático de la distribución de Gauss, que el modelo de dispersión mas utilizado en la actualidad.

### Las ecuaciones básicas

El modelo de dispersión de Gauss puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

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

En donde:

**Q:** caudal de contaminante emitido (masa por unidad de tiempo)

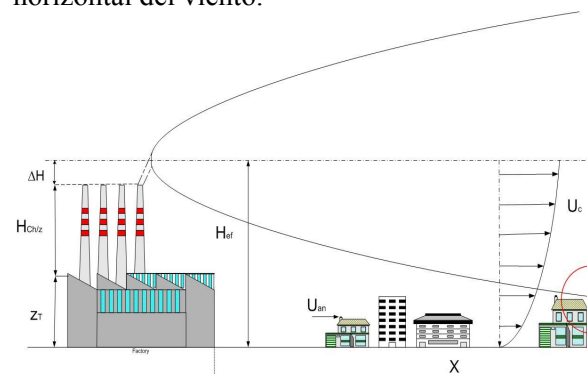
**u:** Velocidad promedio de la velocidad (m/s)

$\sigma_y, \sigma_z$ : Parámetros de dispersión o de distribución.

**H:** Altura Efectiva

**y:** coordenada transversal a la dirección horizontal del viento.

**z:** coordenada de altura a la dirección horizontal del viento.



**FIGURA. 1 ESQUEMA DEL MODELO DE DISPERSIÓN CONVENCIONAL**

Desde el punto de vista el campo tridimensional de concentraciones generado por una fuente puntual en condiciones meteorológicas y de emisión estacionarias. A medida que un penacho progresa en la dirección del viento, el modelo gaussiano supone que el perfil de concentración por mezcla turbulenta adquiere una distribución gaussiana.

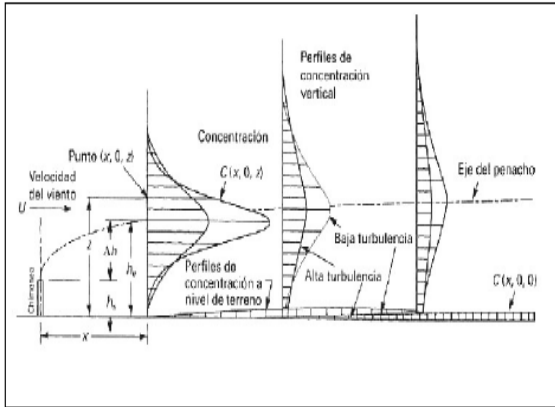


Figura 1-6. Elevación del perfil de concentración de un penacho Gaussiano.  
Fuente: Kiely, 1999.

## FIGURA. 2 PERFIL DE EMISIÓN

Para la aplicación del modelo se tomarán en cuenta las siguientes suposiciones:

- El flujo se mantiene estable (Régimen estacionario)
- Magnitud y dirección constante en el periodo de interés.
- No existen barreras para la dispersión encima o por debajo de la fuente
- La fuente emite de manera constante un caudal  $Q$
- Contaminantes Inertes
- Distribución de la concentración en los ejes perpendiculares al plano  $0x$  es de tipo gaussiano
- Un contaminante con densidad igual a la del aire.

### Parámetros que intervienen

Al momento de aplicar el modelo de dispersión de Gauss hay que tomar en cuenta los siguientes parámetros.

- Tasa de emisión
- Velocidad y dirección del viento.
- Estabilidad Atmosférica.
- Dimensiones de la Chimenea
- Velocidad de Salida de los Gases
- Temperatura de salidas de los Gases
- Condiciones Atmosféricas

### Tasas de emisión

Para el caso de fuentes en operación, es recomendable usar los valores de emisión medidos, para lo cual la forma de calcular la tasa de emisión es multiplicar directamente la concentración en ppmv (partes por millón en volumen) por la densidad del gas contaminante corregida a

las condiciones de chimenea y por el flujo volumétrico también en condiciones de chimenea

Los parámetros mínimos necesarios que debemos conocer de la fuente de emisión son:

Parámetros de modelación
Altura geométrica de la chimenea (m)
Diámetro de la chimenea (m)
Velocidad promedio de gases (m/s). para MP
Temperatura chimenea (°C)
Temperatura ambiente (°C)
NOx (g/s) (condiciones de chimenea)
SOx (g/s) (condiciones de chimenea)
CO (g/s) (condiciones de chimenea)
MP (g/s) (condiciones de chimenea)

### Altura efectiva de emisión

La altura física de emisión es el resultado de añadir la elevación de la pluma ( $\Delta h$ ) a la altura física de la fuente ( $h_s$ ). Este fenómeno de elevación de la pluma es el resultado de la flotación de la corriente de gas debido a su mayor temperatura con respecto al aire ambiente y el momentum vertical derivado de la velocidad de salida de los gases.

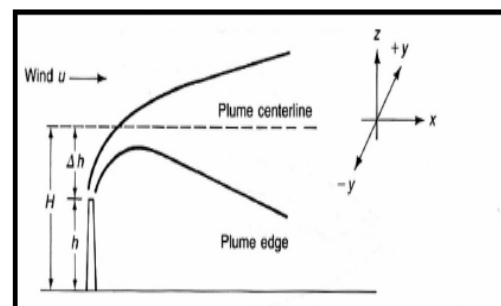


FIGURA 3. DIAGRAMA DEL PENACHO

### Coefficientes o Parámetros de dispersión

El método de cálculo se basa en el empleo de relaciones semi-empíricas, considerando las distintas categorías de estabilidad atmosférica y la distancia viento abajo de la fuente en que se encuentra el receptor. Este se calcula a través de la fórmula de Briggs

Los modelos de EPA utilizan estas ecuaciones en vez de monogramas

Este factor depende del área en la cual se localizó la fuente de emisión, ya que las ecuaciones para el cálculo de  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  varían en función de la estabilidad atmosférica y el tipo de zona urbana o rural

## METODOLOGIA

El desarrollo del modelo de dispersión comprende dos etapas básicas:

### Análisis de Datos Meteorológicos

La evaluación de datos meteorológicos se deberá realizar hora por hora en un año en el sector de influencia de la fuente. Por lo cual es necesario conocer los siguientes datos:

- Velocidad de Viento
- Dirección de Viento
- Nubosidad
- Temperatura del ambiente
- Insolación

Los datos de velocidad del viento y estabilidad atmosférica, siempre que sea posible, deben obtenerse de estaciones meteorológicas locales. Dado que no siempre es posible disponer de esta información, a través de una tabla establecida por Pasquill (Tabla 1) se puede obtener la categoría de estabilidad atmosférica estimada según las condiciones de insolación y velocidad del viento.

El Método de Turner clasifica las estabilidades en base a las observaciones efectuadas en las estaciones completas del Servicio Meteorológico, fundándose en que la estabilidad cerca del suelo depende esencialmente de la radiación solar neta y de la velocidad del viento.

Tabla 1 Clasificaciones de estabilidad atmosférica.

Viento Superficial Velocidad <sup>a</sup> m/s	Insolación día solar			Índice de nubosidad	
	Intenso <sup>b</sup>	Moderada <sup>c</sup>	Baja <sup>d</sup>	Nublado ≥4/8	Claro ≤3/8
<2	A	A-B <sup>e</sup>	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

**Tabla 1.1 Fuente: Martin, "The Change of Concentration Standard Deviation with Distance," Journal Air Pollution Control Association.**

- Superficie de viento medida a 10 m sobre el suelo.
- Corresponde a día de verano despejado con sol alto (60° sobre el horizonte).
- Corresponde a un día de verano nublado, con el sol 35-60 ° sobre el horizonte.
- corresponde a un día de verano nublado, o en la caída de la tarde, con el sol 15-35° sobre el horizonte.
- este índice de nubosidad es definido como la fracción del cielo cubierta por nubes.
- Para las condiciones A-B, B-C o C-D, promedio de valores obtenidos para cada uno.

A = extremadamente inestable..

B = inestabilidad moderada.

C = ligeramente inestable.

D = Neutra

E = ligeramente estable.

F = moderadamente estable.

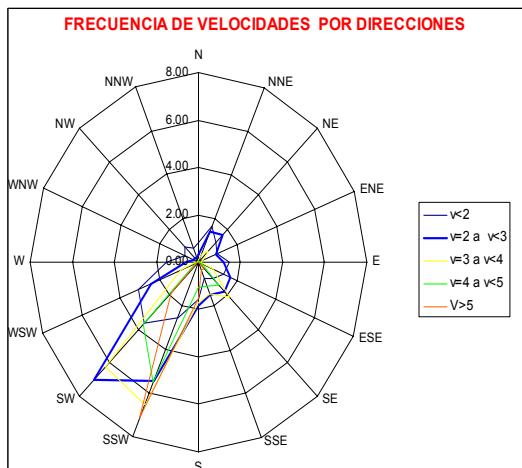
Los indicadores del viento que se requieren conocer con fines de simulación de la dispersión son la velocidad y la dirección o rumbo desde donde sopla, con referencia a las 16 direcciones de la rosa de los vientos.

La función principal del procesamiento de la información meteorológica es la determinación de los parámetros necesarios que necesita el programa ISC para poder utilizarlos en el cálculo de las concentraciones anuales, promedio y ponderadas según sea el caso. La metodología utilizada para este propósito se describe a continuación:

- a) Los datos horarios de la dirección y magnitud del viento, de todo el registro histórico dado por la estación, se agrupa de acuerdo a cada una de 16 direcciones y la calma (velocidad de viento igual a cero), obteniendo el número de horas que sopla el viento en cada dirección por las 8760 horas que tiene un año típico.
- b) Los datos de magnitud de viento se los procede a clasificar en cada dirección del viento y para la condición de calma para las 24 horas del día
- c) Clasificados estos valores se procede a calcular los porcentaje de la magnitud de viento en cada dirección
- d) Basado en la información de nubosidad mensual se procede a evaluar la rango de insolación e índice de nubosidad en la noche.

Establecidos estos parámetros se proceder a establecer la estabilidad atmosférica utilizando el criterio Pasquill-Gifford para cada hora de los 12 meses del año en función de magnitud del viento

A partir de este análisis se obtienen los siguientes resultados para la ciudad de Guayaquil:



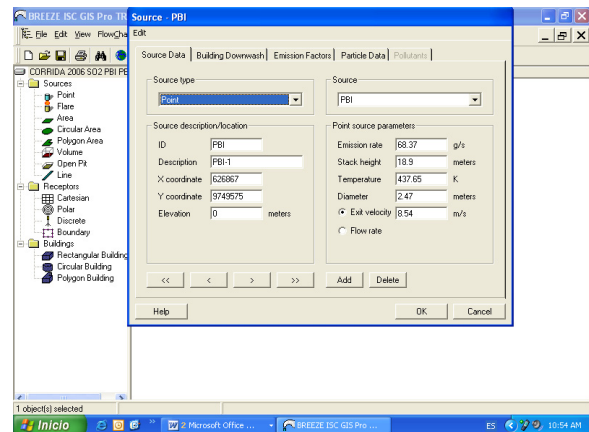
**FIGURA 5: ROSA DE VIENTOS**

### Procedimiento General para la Ejecución del Modelo

Para ejecutar el modelo de dispersión ISCST, se ha utilizado el software de dispersión Breeze ISC GIS PRO, creado por la empresa TRINITY CONSULTANTS de los Estados Unidos de América.

Básicamente, el software de dispersión mencionado se encarga de colocar en ambiente Windows, tanto los archivos de entrada como los de salida, requeridos en el manejo del software ISCST3 (versión 02035) de la US. EPA, siendo este último de acceso gratuito al público en general a través del sitio web de la mencionada entidad ambiental.

El ingreso de datos al software de dispersión, ha sido de desarrollo de acuerdo con la información técnica disponible para las fuentes de emisión



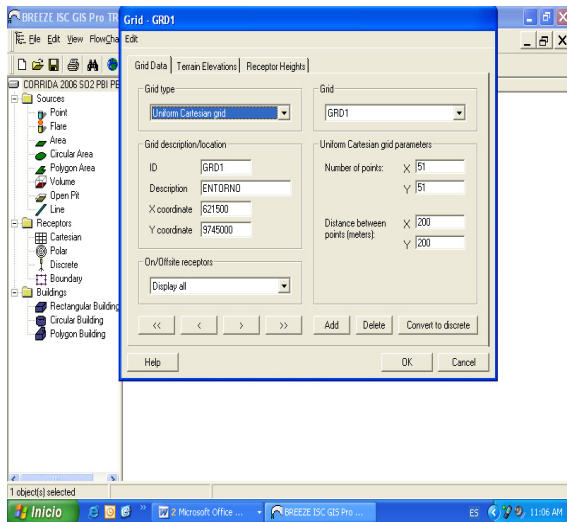
**FIGURA 4: INGRESO DE DATOS DE LAS FUENTES AL MODELO**

En la figura anterior, se muestra la forma de ingreso de datos al software de dispersión; es importante destacar que la operación adecuada del modelo, requiere una serie de parámetros que definen por completo la operación de la fuente de emisión. Nótese el requerimiento de coordenadas específicas para cada fuente, por lo que se tendrá una ubicación exacta para cada fuente puntual considerada en el análisis.

Así también, el software hace posible el ingreso de los puntos donde se desea calcular las concentraciones de sustancias contaminantes en aire ambiente. Estos puntos que se generan mediante el software conviene ubicarlos en los alrededores del punto de ubicación de la fuente. Dependiendo de la capacidad de dispersión existente en la zona, así como también de las características de la fuente de emisión, se deberá ubicar una cantidad determinada de puntos a una distancia adecuada, de manera que se pueda obtener resultados que

sean representativos del impacto ambiental inducido por las fuentes de combustión.

Ha modo de ejemplo, se determinó que una escala adecuada para determinar concentraciones representativas, sería dentro de un radio de 5 km a la redonda, con respecto al sitio de ubicación de las barcas. Así, mediante el software de dispersión se creó un arreglo de receptores tipo 'malla' (GRID), la misma que consistió de 51 puntos en el eje X, y 51 puntos en el eje Y, ubicados a 200 metros uno respecto de otro, por lo que el número de receptores considerado en el presente análisis en total es de 2601. Esto puede apreciarse en la figura siguiente.



**FIGURA 6: GENERACIÓN DE MALLA DE RECEPTORES MEDIANTE EL SOFTWARE**

Dadas las condiciones topográficas típicas en la cual se posicionan las barcas generalmente a la rivera de los ríos y esteros, ha sido viable considerar que el terreno sobre el cual se desarrolla la dispersión de emisiones en aire ambiente es plano. Esto se justifica plenamente por cuanto la zona no presente elevaciones, además de que parte del proceso de dispersión se va a llevar a cabo sobre la superficie acuática del Río Guayas

El software de dispersión ISC GIS Pro, tiene incorporado un Sistema de Información Geográfica (GIS), que facilita la interpretación de resultados en forma gráfica, de manera que es posible visualizar los perfiles de concentración generados por

la operación de las diferentes fuentes evaluadas con el modelo. Se destaca que la función de GIS, es una ventaja propia del software BREEZE, por cuanto con la versión de EPA no es posible obtener directamente resultados en forma gráfica

## 2 Información de Entrada Requerida por el Modelo

La evaluación de calidad del aire desarrollada mediante la aplicación del software de dispersión ISCST3, ha requerido la utilización de información provista por las propias empresas operadoras de las Barcas. Esta información, básicamente consiste de las características físicas de la fuente, de sus parámetros operativos, y fundamentalmente, de la tasa de emisión de cada sustancia contaminante evaluada.

Así, la información de entrada del modelo, referente a la fuente de emisión, previo a la obtención de resultados de concentraciones de sustancias contaminantes a nivel del suelo, consiste en lo siguiente:

- Altura de Chimenea
- Diámetro Interno de la Chimenea
- Temperatura de los Gases
- Velocidad del Gas
- Tasa de Emisión de  $\text{NO}_x$
- Tasa de Emisión de  $\text{SO}_2$
- Tasa de Emisión de CO
- Tasa de Emisión de PM

### Principales Criterios Asumidos

Para la utilización del modelo de dispersión, así como para la obtención de resultados representativos de la operación de las fuentes, bajo condiciones críticas, el modelaje de calidad del aire ha asumido lo siguiente:

- ✓ El terreno que rodea el área donde operarán las barcas es relativamente plano
- ✓ Las barcas operan en forma continua durante todo el año
- ✓ Todas las chimeneas de las barcas emiten al mismo tiempo, es decir, cada barcaza opera a su máxima capacidad

Bajo estos criterios, lo que se recomienda es evaluar un escenario crítico, el cual representará la peor situación esperada por la operación de las barcazas. No obstante, se debe destacar que el efecto de la concentración de contaminantes a nivel del suelo, es aditivo, de manera que cada una de las fuentes evaluadas, contribuirá por separado a los niveles de contaminación esperados. Los resultados se presentan en forma agregada, es decir, para el equivalente del conjunto de fuentes operadas en el área; no obstante, los resultados pueden estar disponibles por empresa, de manera que es posible establecer la contribución de cada una de ellas a los niveles de contaminación atmosférica esperados.

Para concentraciones inferiores a periodos anuales, por ejemplo 24 horas, 8 horas, 1 hora, etc., se fijan condiciones adicionales a los límites de calidad del aire, referentes al número de veces que podrá sobrepasarse dicho límite durante el periodo anual. Así, el modelo de dispersión deberá ejecutarse considerando dicho criterio, por lo que se utilizarán las opciones referentes al reporte de datos para el segundo, tercero, cuarto o el número de máximo correspondiente en la escala descendente, según demande la aplicación del estándar de calidad del aire. La tabla siguiente muestra los límites máximos establecidos para los contaminantes considerados en la presente evaluación.

**Tabla 2: Límites Máximos Permisibles de Calidad del Aire Para Comparación con Resultados del Modelo**

Sustancia Contaminante	Límite Máximo Permisible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Periodo Regulado	Observaciones
Dióxido de Azufre – SO <sub>2</sub>	80	Anual	-
	350	24 horas	No más de una vez en un año
Óxidos de Nitrógeno – NO <sub>x</sub>	100	Anual	-
	150	24 horas	No más de dos veces en un año
Monóxido de Carbono – CO	10000	8 Horas	No más de una vez en un año
	40000	1 Hora	No más de una vez en un año
Material Particulado Menor a 10 micras – PM <sub>10</sub>	50	Anual	-
	150	24 horas	No más de dos veces en un año

### Resultados del Modelo de Dispersión

A seguir se presentan los resultados del modelo de dispersión ISC, aplicado al complejo de fuentes fijas de emisión, definido en esta evaluación como ‘CONJUNTO’, el cual incluye ha modo de ejemplo 8 barcazas con una generación que oscila entre 25 MW y 50 MW.

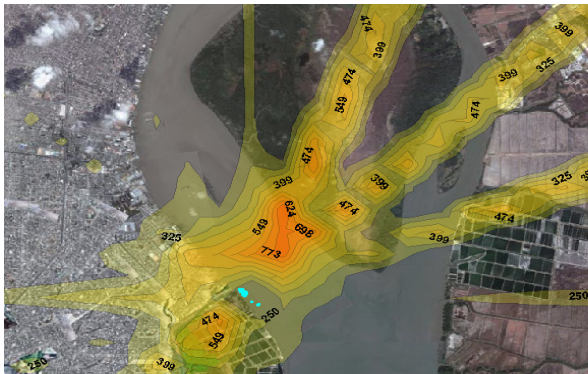
Los resultados son mostrados en formato gráfico, así como también mediante tablas. El lector deberá referirse a los resultados presentados en formato de tablas, por cuanto los gráficos provistos por el Sistema de Información Geográfico del software de dispersión, podrían interpretarse en base a criterios no uniformes, además de que rara vez la representación gráfica de resultados proveerá un único valor máximo, sino que más bien los resultados son graficados mediante curvas de nivel, o denominadas por la literatura técnica como Curvas de Iso-concentración.

## RESULTADOS

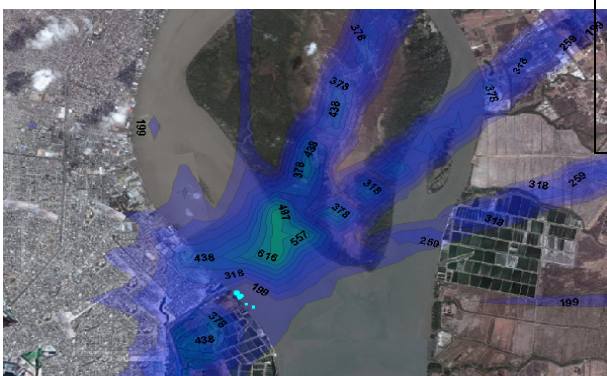
Los contaminantes evaluados, y por lo tanto los resultados generados por el modelo de dispersión, corresponden a las principales sustancias reguladas en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Título IV, Libro VI, Anexo 4 – Norma de Calidad de Aire Ambiente, y son:

- Dióxido de Azufre – SO<sub>2</sub>
- Óxidos de Nitrógeno – NO<sub>x</sub>
- Monóxido de Carbono – CO
- Material Particulado Menor a 10 Micras – PM<sub>10</sub>

A modo de ejemplo se presenta algunas figuras de la forma grafica como el programa presenta los resultados



**FIGURA 7: Gráfica de Resultados Concentraciones de SO<sub>2</sub> – 2<sup>do</sup> Máximo en 24 horas**



**FIGURA 8: Gráfica de Resultados Concentraciones de NO<sub>x</sub> – 3<sup>er</sup> Máximo en 24 horas**

## EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos para el ejemplo mediante el modelo de dispersión son mostrados en la tabla siguiente. Se muestran también los valores de la normativa ambiental y se verifica si las fuentes de emisión cumplen o no con los estándares de calidad del aire, es decir, se evalúa el impacto que estas fuentes tienen sobre la calidad del aire del sector.

**Tabla 3: Resultados Obtenidos con el Modelo de Dispersión ISC**

Sustancia Contaminante	Límite Máximo Permisible (µg/m <sup>3</sup> )	Periodo Regulado	Valor del Modelo para Periodo y para Máximo Regulado	Observaciones
Dióxido de Azufre – SO <sub>2</sub>	80	Anual	420.6	No cumple
	350	24 horas	1000.5	No cumple
Óxidos de Nitrógeno – NO <sub>x</sub>	100	Anual	350	No cumple
	150	24 horas	1008.5	No cumple
Monóxido de Carbono – CO	10000	8 Horas	199.4	Si cumple
	40000	1 Hora	400	Si cumple
Material Particulado Menor a 10 micras – PM <sub>10</sub>	50	Anual	22.8	Si cumple
	150	24 horas	53.6	Si cumple

## Bibliografía

- 1) Ministerio de Medio Ambiente del Ecuador, LEY DE GESTION AMBIENTAL, Capitulo VI anexo 4, publicado RO/ 245 de 30 de Julio de 1999. Ecuador.
- 2) Pal Arya,. Air Pollution Meteorology and Dispersión, First edition Oxford University Press. 1999

- 3) Espert V, López P. Dispersión de contaminantes en la atmósfera, Primera Edición, Universidad Politécnica de Valencia, 2004.
- 4) Wark K, Warner C 1 Contaminación del Aire Origen y Control, Universidad de Purdue, 1996. Brizuela E,.. Romano D. Curso de Combustión, 1997. Área de Proyectos de Ingeniería, Modelos de difusión atmosférica, Universidad de Oviedo
- 5) EPA-454/B-95-003a Guía Del Usuario Para El Modelo De Dispersión De Complejo De Fuente Industrial (Isc3), 2000
- 6) EPA (2001). 40 CFR Clean Air Act, Appendix W to Part 51 – Guidelines on Air Quality Models. United States Environmental Protection Agency. Estados Unidos
- 7) EPA (1992). Screening Procedures for estimating the Air Quality Impact for Stationary Sources, Revised. United States Environmental Protection Agency. Estados Unidos