

Estimación del impacto en salud de las emisiones atmosféricas actuales en Tocancipá usando MSR

presentado por:
Ms. Henry Torres Posada ¹
Dr. Néstor Rojas ²

Grupo Calidad del Aire. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá,

¹ htorrespo@unal.edu.co: Tel. +57 (1) 3165000 Ext. 14304,

² nyrojasr@unal.edu.co: Tel. +57 (1) 3165000 Ext.14304, Fax.+57 (1) 3165000 Ext.14302

(Artículo control interno XSMH153, CIUREE 2010)

RESUMEN

La Metodología Superficie de Respuesta (MSR) es un conjunto de técnicas estadísticas y matemáticas útiles para el desarrollo, mejora y optimización de procesos (Myers & Montgomery, 1995), y también en la cuantificación de la incertidumbre de modelos determinísticos. Este estudio muestra la aplicación de modelos de dispersión ISCST3 y MSR para crear un metamodelo en el Municipio de Tocancipá, considerado uno de los municipios de mayor proyección industrial del departamento de Cundinamarca. El metamodelo reemplaza el análisis típico computacional mediante una aproximación funcional multidimensional estocástica para cuantificar la incertidumbre de las variables de diseño y, a su vez, estimar el impacto sobre la salud de la población.

El estudio revela que para periodos de exposición anual, hay una sola vereda afectada (Tibitoc), con excesos de mortalidad por causas cardiopulmonares que oscilan entre 3 y 39 muertes, a un nivel de confianza del 95%. Así mismo, esta vereda muestra entre 3 y 273 casos de excesos de síntomas respiratorios, con un nivel de confianza del 95%.

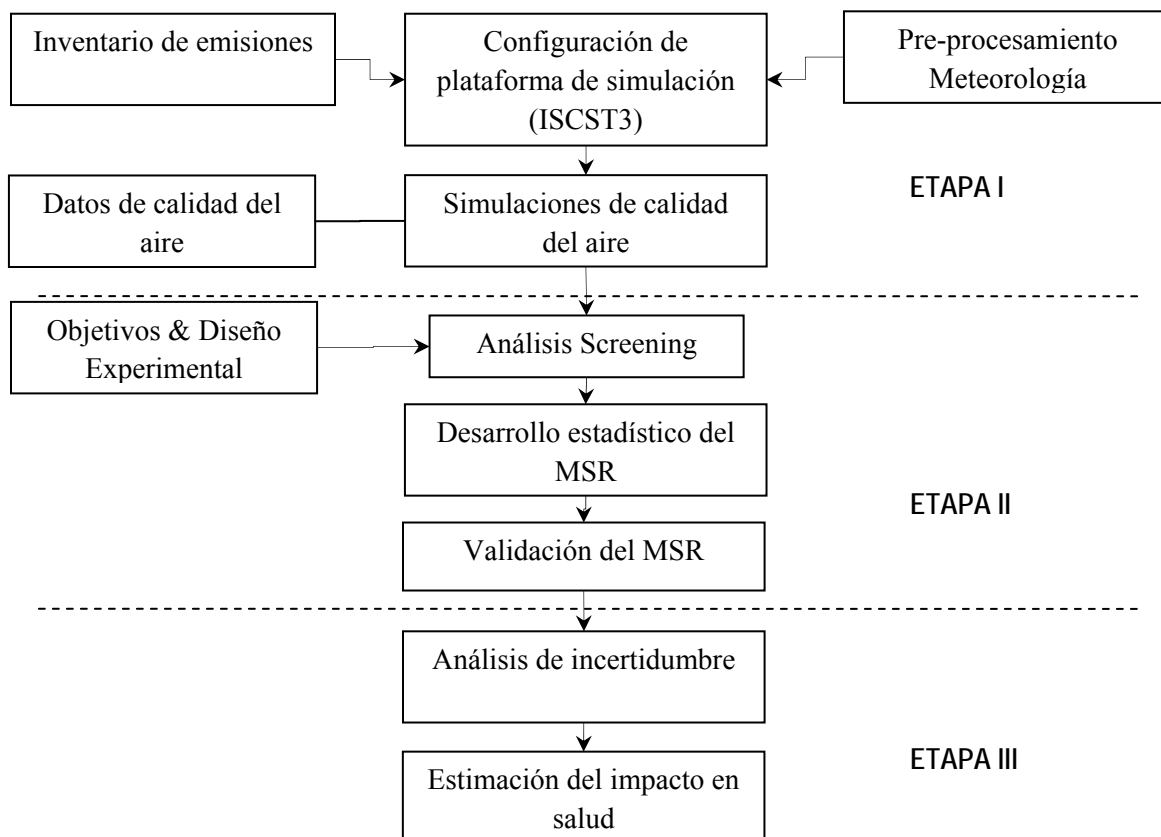
El modelo superficie de respuesta representa muy bien el modelo lineal (polinomio) de primer orden para el periodo de ponderación 24 h y anual, cuando no se elige la opción depositación seca en la simulación del ISCST3. No se puede afirmar lo mismo cuando se elige simular la depositación seca, en este caso el modelo lineal de primer orden se ajusta bien a los resultados para el periodo de ponderación anual, y no se ajusta tan bien para el periodo de ponderación 24 h.

1. Introducción

La MSR generalmente utiliza un número limitado de ejecuciones de un modelo complejo, teniendo en cuenta un conjunto de puntos seleccionados estadísticamente en el espacio de diseño. Utilizando la teoría de Diseño de Experimentos, la MSR puede mejorar la exactitud de las aproximaciones del modelo minimizando el costo del modelo con la realización de pocas ejecuciones del modelo computacional (Box, G.E.P., y Draper, N.R., 1987).

El estudio consta de tres etapas. En la Etapa I, la estimación de calidad del aire se obtiene por simulación de la dispersión de contaminantes, empleando el modelo matemático computarizado ISCST3; la plataforma de modelación requiere información detallada de emisiones y de información meteorológica diaria. La Etapa II, hace referencia a la construcción del MSR, mediante el empleo de las técnicas de análisis estadística para construir el MSR y la validación del modelo obtenido. Finalmente, en la Etapa III se realiza la estimación del impacto en salud, a partir de los resultados obtenidos por el MSR.

Figura 1. Procedimientos y técnicas para determinar el impacto en salud



Las emisiones totales de PM10 se obtienen de estudios manuales de emisión en chimenea, cuando estos no existían se registró la cantidad de material o combustible consumido, finalmente, las emisiones se estiman con factores de emisión AP-42, de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency, USEPA en inglés).

Existen resultados de monitoreos de calidad del aire en el municipio de Tocancipá. Esta estación se encuentra en la azotea de las oficinas de la empresa de acueducto de Bogotá, en la planta de tratamiento de Tibitoc. Sus coordenadas planas Gauss-Krüger son, X = 1011797, Y = 1042240, a una altura de 2676 msnm. La estación está funcionando desde el 6 de enero de. Se analizará la información existente, desde el año 2002 hasta el año 2007.

Adicionalmente, se realiza el monitoreo de material particulado en aquellas zonas que no son impactadas por las emisiones globales de Tocancipá, en el periodo junio a julio de 2009.

2. Parte experimental

Objetivos y diseño experimental del modelo ISCST3

Las variables más importantes del modelo (ISCST3), por su afectación a la dispersión de contaminantes, y estar asociadas a la incertidumbre de los resultados son: diámetro de la chimenea, altura del ducto a la cual se realiza la emisión, velocidad de salida de los gases, temperatura de los gases, y la emisión másica del contaminante. De estas variables el diámetro, y la altura del ducto son realmente constantes, por cuanto toman valores únicos. Por sustracción de materia, las variables más importantes son: la emisión másica de contaminantes, la temperatura y velocidad de salida de gases.

El modelo superficie de respuesta se construye a partir de los resultados del diseño de experimentos. El número de ejecuciones del modelo ISCST3 dependen del número de factores requeridos para representar el comportamiento del modelo.

Análisis screening

Para disminuir los recursos computacionales se deben reducir en lo posible el número de variables, mediante la identificación de factores importantes. De esta manera el diseño experimental solamente involucra aquellos factores que amerita, en este caso se ha decidido trabajar con las fuentes de emisión que indica el inventario de emisiones como importantes.

Análisis Screening hace referencia a una de las técnicas utilizadas en el análisis de sensibilidad de modelos determinísticos, según metodología propuesta por Downing et., al., (1985) en evaluación y análisis de incertidumbre de modelos de dosis-respuesta. Los criterios de evaluación son:

- El valor de incertidumbre U se tomó como dos veces la desviación estándar de la variable de entrada.
- El cambio en el valor de la salida (resultado) es la diferencia de las salidas (resultados) cuando la entrada (el parámetro) está en su valor medio más dos desviaciones estándar, y cuando la entrada (el parámetro) está en su valor medio.
- La sensibilidad es el cociente del cambio en la salida (resultado) al cambio en la entrada (parámetro), y es una estimación cruda de la sensibilidad debido a cambios tan significativos, como en este caso.
- La importancia $I1$ es el producto de la incertidumbre con el cociente de sensibilidad, y $I2$ es la diferencia entre el valor máximo y mínimo de las estimaciones del método de los cinco puntos.

Desarrollo del MSR

El modelo superficie de respuesta se construye a partir de los resultados del diseño de experimentos. El número de ejecuciones del modelo ISCST3 dependen del número de factores requeridos para representar el comportamiento del modelo.

El procedimiento se aplicó en la siguiente secuencia:

- Identificar las fuentes que más afectan la calidad del aire. En este caso el número de fuentes (más importantes) hace referencia a un tipo de factor (número de fuentes).
- Identificar las variables – asociadas a las fuentes – que afectan la dispersión de contaminantes: altura de la descarga, diámetro de la chimenea, velocidad de salida de los gases, temperatura de los gases, diámetro de la chimenea.
- Diseñar el experimento a partir de la información recopilada.
- Determinar los coeficientes de la superficie de respuesta por regresión lineal.
- Determinar las bondades de ajuste de la superficie de respuesta.

Ajuste del MSR

El ajuste por mínimos cuadrados es la forma estándar utilizada para ajustar la ecuación de un MSR generada a partir de los datos del Diseño de Experimentos (DOE).

El modelo lineal, con n puntos, para m variables independientes se escribe como:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_m x_{im} + \varepsilon_i$$

En forma matricial, el modelo de regresión lineal es:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

donde:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

El modelo de regresión ajustado es:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{X}(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}$$

El modelo cuadrático con n puntos, para m variables independientes se escribe como:

$$y_i = \beta_0 + \sum_{1 \leq j \leq m} \beta_j x_{ij} + \sum_{1 \leq j \leq k \leq m} \beta_{jkl} x_{ij} x_{ik} x_{il} + \varepsilon_i$$

donde y_i es la i -ésima observación de la variable de respuesta, x_{ji} es la j -ésima variable independiente de la i -ésima observación, los β son los coeficientes del modelo que deben estimarse, y ϵ_i es el error aleatorio, del cual se asume tiene media cero y varianza constante σ^2 . En forma matricial, el modelo de regresión lineal es:

$$y = X\beta + \epsilon$$

Validación del MSR

El cuadrado de la sumatoria de los errores SSE es una medida de la cantidad de variación explicada por la regresión. Entre más pequeño sea SSE, mejor es el modelo ajustado. A continuación se muestra lo que se denomina la descomposición de la variación total.

$$SST = y'y - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}$$

$$SSR = \beta'X'y - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}$$

$$SSE = y'y - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} - \left[\beta'X'y - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \right]$$

$$SSE = y'y - \hat{\beta}'X'y$$

Los estadísticos utilizados para el análisis de varianza se muestran en la Tabla 1. Análisis de varianza.

Tabla 1. Análisis de varianza.

Variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	Fo
Regresión	SSR	q	MSR	MSR/MSE
Error o residuales	SSE	N - q - 1	MSE	
Total	SST	N - 1		

Incertidumbre del modelo

El proceso de realización de una simulación Monte Carlo consiste en la simulación repetida del metamodelo, extrayendo cada vez un grupo distinto de valores de la distribución de las muestras de los parámetros del modelo, cuyo resultado es un conjunto de posibles resultados (efectos). El modelo determinístico (superficie de respuesta) se modificará entonces a un modelo estocástico (que considera la incertidumbre de los parámetros) y se analizará mediante una simulación de Monte Carlo.

Antes de combinar todas las contribuciones de incertidumbre, esta se debe expresar como incertidumbre estándar, que es la desviación estándar de la medición. En situaciones donde el componente de la incertidumbre ha sido evaluado experimentalmente de la dispersión de

mediciones repetidas, esta se puede expresar como la desviación estándar de los datos procesados.

Para obtener la desviación estándar de los datos, realizamos múltiples simulaciones de las superficies de respuesta. Por lo anterior se realizarán 10000 ejecuciones del MSR.

Después de realizar la estimación individual y expresarla en forma de la incertidumbre estándar individual, o de grupos de componentes, el siguiente paso es calcular la incertidumbre estándar combinada utilizando el procedimiento que se enuncia a continuación.

La relación general entre la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ de un valor y , y la incertidumbre de los parámetros independientes x_1, x_2, \dots, x_n de los cuales depende es

$$u_c(y(x_1, x_2, \dots)) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u(x_i)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u(y, x_i)^2},$$

donde $y(x_1, x_2, \dots)$ es una función de varios parámetros, c_i es el coeficiente de sensibilidad evaluado como $c_i = \partial y / \partial x_i$, la derivada parcial de y , con respecto a x_i , y $u(y, x_i)$ significa la incertidumbre en y , que surge de la incertidumbre en x_i . La contribución de cada variable $u(y, x_i)$ es el cuadrado de la incertidumbre asociada, expresada como la desviación estándar, multiplicada por el cuadrado del coeficiente de sensibilidad. Estos coeficientes de sensibilidad describen como el valor de y varia con los cambios en los parámetros x_1, x_2 , etc.

Cuando una contribución de la incertidumbre está asociada a un procedimiento entero, se expresa usualmente como un efecto sobre el resultado final. En estos casos, o cuando la incertidumbre en un parámetro es expresado directamente en términos de su efecto en y , el coeficiente de sensibilidad $\partial y / \partial x_i$ es igual a 1. El modelo implícito para la medición, despreciando otros factores por claridad es

$$y = (\text{resultado calculado}) + e$$

, donde e representa el efecto de variación aleatoria para las condiciones de medición. En este sentido $\partial y / \partial e = 1.0$

El paso final es multiplicar la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura para obtener una incertidumbre expandida. La incertidumbre expandida es indispensable para suministrar un intervalo en el cual se espera encontrar una gran fracción de las distribuciones atribuidas razonablemente al mesurando.

En la elección del valor de cobertura k , se deben considerar algunas recomendaciones, estas son: El nivel de confianza requerido, algún conocimiento de las distribuciones subyacentes, cualquier conocimiento del número de valores utilizados para estimar los efectos aleatorios.

Sin embargo, para muchos propósitos lo más recomendado es seleccionar $k = 2$, cuando se desea obtener un intervalo con un nivel de confianza del 95% (NIST, 2009).

Mortalidad

La evaluación cuantitativa de los impactos en la salud, por contaminación con PM10 o PM2.5, se realiza con los siguientes componentes (OMS, 2004):

- Concentración de PM10 o PM2.5 obtenida por el modelo de dispersión (X), que corresponde a la concentración de evaluación con un 95% de confianza obtenida con el modelo superficie de respuesta. Adicionalmente, se considera la concentración objetivo (X_0), para realizar la comparación, es decir, determinar la enfermedad o muerte atribuible por exceder la norma o estándar que se desea comparar.
- El tamaño de la población o grupo de la población expuesta a PM10 o PM2.5, y los efectos en la salud.
- La incidencia de los efectos en la salud que se están estimando, como la tasa de mortalidad en la población (número de muertes por 1000 personas).

Función Concentración – Respuesta de estudios epidemiológicos que relacionan la concentración de PM10 o PM2.5 para los efectos en salud seleccionados, y suministra la fracción atribuible.

Los datos que se utilizarán son los que se muestran en la siguiente tabla,

Tabla 2 Modelos para estimar el riesgo relativo asociado con la exposición a PM10

Exposición	Función Riesgo Relativo ¹	Coefficiente β sugerido (95% Intervalo de confianza)
Todas las causas de mortalidad y exposición a PM10 por cortos periodos de tiempo	$RR = \exp [\beta(X - X_0)]$	0.0008 (0.0006 – 0.0010)
Mortalidad cardiopulmonar y exposición a PM2.5 por largos periodos de tiempo	$RR = \exp [\beta(X - X_0)]$	0.00893 (0.00322–0.01464)

Nota: El límite inferior del Riesgo relativo se utiliza para determinar el límite inferior del número de efectos esperados, de igual manera.

El impacto en la salud, medido como el número esperado de muertes atribuibles a cambios en la concentración de PM10 o PM2.5, se determina así,

¹ El Riesgo Relativo es el incremento de la probabilidad de un efecto en la salud con el incremento de la exposición. El riesgo relativo mide la fuerza de la asociación entre la exposición y la enfermedad o efecto. Indica la probabilidad de que se desarrolle la enfermedad en los expuestos a un factor de riesgo en relación al grupo de los no expuestos. Su cálculo se estima dividiendo la incidencia de la enfermedad en los expuestos (I_e) entre la incidencia de la enfermedad en los no expuestos (I_o)

$$E = FA \times B \times P$$

E, es el número de muertes esperadas debido al incremento de la concentración del contaminante en evaluación (PM10 para cortos periodos de tiempo y PM2.5 para largos periodos de tiempo), B es la incidencia o número de nuevos episodios de una enfermedad o daño por un periodo de tiempo especificado (número de muertes/1000 personas), y P, es la población expuesta a los efectos de la salud.

La fracción atribuible, $FA = (RR - 1)/RR$, establece el grado de influencia que tiene la exposición en la presencia de enfermedad o efectos entre los expuestos

El impacto en salud, para el periodo de ponderación anual, se estima por el número de personas que llegan a la muerte al respirar la concentración de material particulado que supera un valor establecido como umbral. Este umbral es arbitrario, y generalmente corresponde al valor fijado como norma de calidad del aire, u otro que se desee evaluar.

De acuerdo a la tasa de incidencia de mortalidad reportada por la Organización Mundial de la Salud (2006), como la probabilidad de morir entre las edades 15 a 60 años por 1000 personas, es 131 por 1000 habitantes, $B = 0.131$.

Morbilidad

La morbilidad se cuantifica de igual manera con el mismo procedimiento y las ecuaciones utilizadas para la mortalidad. A diferencia de la mortalidad, se utilizará directamente el Riesgo Relativo.

La información de morbilidad que se compila en el municipio de Tocancipá es muy limitada y no existe un servicio hospitalario que reporte la información requerida. En su lugar, hay un centro de salud para valoración y remitir pacientes a centros asistenciales de mayor nivel. No se pueden cuantificar los ingresos hospitalarios, las incapacidades, o las crisis asmáticas. En su lugar, se cuenta con los resultados de una encuesta realizada recientemente por el municipio de Tocancipá (2008) que arroja resultados de bronquitis aguda: la incidencia es de 16 casos de bronquitis aguda por cada 100 habitantes.

Ostro et al. (1993) proporciona estimaciones de síntomas respiratorios en la salud, señalando que un cambio de PM10 en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ genera un Riesgo Relativo en síntomas respiratorios de 1.07 (un intervalo de confianza de 95%, $IC = 1.02 - 1.11$)

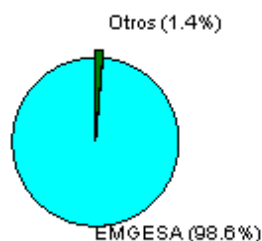
El impacto en la salud, medido como el número esperado síntomas respiratorios atribuibles a cambios en la concentración de PM10 o PM2.5, se determina de igual manera que las ecuaciones utilizadas para mortalidad.

3. Resultados y discusión

Realizado el inventario, se logra establecer que el número de industrias registradas en la autoridad ambiental que han presentado alguna información como sobre emisiones son apenas 16, las cuales se encuentran en los siguientes sectores: industria de alimentos y

bebidas, productos de arcilla o materiales pétreos, industria metalmecánica, industria química, y la generación de energía eléctrica. Esta última (EMGESA) representa el 98.61% de la emisión de material particulado (ver Figura 2).

Figura 2. Distribución porcentual de la emisión de partículas por sector industrial.




Es de resaltar que esta termoeléctrica posee cuatro unidades de generación que funcionan con carbón mineral.

Modelo superficie de respuesta

Se definieron inicialmente seis sitios de interés para hallar la calidad del aire: (1) planta de tratamiento de agua potable Tibitoc, (2) Tanque de almacenamiento de agua de la vereda Las Esmeraldas, (3) Club Costa Caribe en la vereda Las Lajas, (4) estación de policía en el casco urbano de Tocancipá, (5) Finca Tibatama en la vereda Verganzo, y (6) Población San Javier en la vereda Verganzo.

Se propuso un modelo de primer orden, y se verificó el ajuste de la función polinomial a los valores reales. En total se ejecutaron 16 simulaciones, para seis (6) sitios, y sus respectivos periodos de ponderación 24 h y anual. A simple vista, se observa una diferencia apreciable entre los dos criterios de simulación: sin y con depósito.

Tabla 3 Análisis de significancia de la varianza de regresión para seis (6) sitios de Tocancipá, sin depósito, periodo 24 h y anual

	SSR	SSE	SST	MSR	MSE	F0	R2	
T1	17059.5	31.5	17091	4264.875	2.8636364	1489.3214	0.998	0.997
T2	1253.75	1.25	1255	313.4375	0.1136364	2758.25	0.999	0.999
E1	37322.75	1.	37323.75	9330.6875	0.0909091	102637.56	1.000	1.000
E2	866.75	1.	867.75	216.6875	0.0909091	2383.5625	0.999	0.998
C1	34.25	1.1875	35.4375	8.5625	0.1079545	79.315789	0.966	0.954
C2	36.25	0.6875	36.9375	9.0625	0.0625	145.	0.981	0.975
U1	0.	0.	0	0.	0.	∞	∞	∞
U2	23.25	0.6875	23.9375	5.8125	0.0625	93.	0.971	0.961
F1	96.25	1.1875	97.4375	24.0625	0.1079545	222.89474	0.988	0.983
F2	45.	1.	46	11.25	0.0909091	123.75	0.978	0.970
J1	898.	1.	899	224.5	0.0909091	2469.5	0.999	0.998
J2	21.	1.	22	5.25	0.0909091	57.75	0.955	0.938

Nota: T=Tibitoc, E=Esmeraldas, C=C. Caribe, U=Z. Urbana, F=La Fuente, J=San Javier.
1=periodo 24 h, 2=periodo anual.


Ahora se realizan pruebas de significancia a la regresión para determinar si existe relación entre la variable dependiente-y y las variables independientes-A, B, C, y D (x1, x2, x3 y x4).

El estadístico F es comparado al valor crítico $F_{\alpha, q, N-q-1}$. Si el valor F-observado es superior al F-crítico, entonces la hipótesis nula será rechazada.

El siguiente análisis corresponde a la superficie de respuesta obtenida con el criterio “sin depósito”. Se aplica la prueba de significancia a la variable de respuesta y2 “24 h”. A un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, el valor crítico $F_{0.05, 4, 11} = 3.36 < F\text{-observado} = 2758.25$. Hay una evidencia estadística significativa para rechazar la hipótesis nula. Esto implica que, al menos una de las variables del modelo – Unidad2, Unidad3, Unidad4 y Unidad5 – contribuye significativamente a los resultados del modelo.

El siguiente análisis corresponde a la superficie de respuesta obtenida con el criterio “con depósito”. A diferencia a las superficies de respuesta obtenida con el criterio “sin depósito”, los cocientes MSR/MSE indican, a un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, que el valor crítico $F_{0.05, 4, 11} = 3.36 > F\text{ observado}$ para los receptores: Z. Urbana, La Fuente y San Javier, para el periodo de 24 h. Esto implica que, para estos casos, ninguna de las variables del modelo – Unidad2, Unidad3, Unidad4 y Unidad5 – contribuye significativamente a los resultados del MSR. Esto es confirmado por los cocientes de regresión R y R2, puesto que son los más alejados de la unidad. De manera general, los MSR se ajustan mejor para el periodo de ponderación anual.

Tabla 4 Análisis de significancia de la varianza de regresión para seis (6) sitios de Tocancipá, con deposito, periodo 24 h y anual

	SSR	SSE	SST	MSR	MSE	F0	R2	
T1	15698	3479	19177	3925	316.26	12.41	0.819	0.753
T2	809.4	84.3	893.72	202.4	7.66386	26.4	0.906	0.871
E1	21562	8125	29687	5391	738.614	7.298	0.726	0.627
E2	447.4	69.14	516.54	111.9	6.28517	17.8	0.866	0.817
C1	337.5	179.3	516.8	84.38	16.2988	5.177	0.653	0.527
C2	16.11	0.282	16.394	4.028	0.02563	157.2	0.983	0.977
U1	296.3	498.2	794.45	74.06	45.2911	1.635	0.373	0.145
U2	10.83	0.49	11.32	2.708	0.04455	60.78	0.957	0.941
F1	210.4	620.3	830.7	52.59	56.3945	0.933	0.253	-0.018
F2	15.81	0.688	16.498	3.953	0.0625	63.24	0.958	0.943
J1	197.4	5822	6019.7	49.35	529.299	0.093	0.033	-0.319
J2	9.65	0.648	10.298	2.413	0.05886	40.98	0.937	0.914

Nota: T=Tibitoc, E=Esmeraldas, C=C. Caribe, U=Z. Urbana, F=La Fuente, J=San Javier.
1=periodo 24 h, 2=periodo anual.

Los resultados anteriores muestran que el modelo de primer orden no se ajusta bien a los resultados del ISCST3 en el periodo de ponderación de 24 h, pero sí para el periodo de ponderación anual.

Hasta el momento se encuentra que el modelo de primer orden se ajusta bien para la simulación de la dispersión de contaminantes sin depositación, pero no para simulación con depositación. Sin embargo, este último podría arrojar datos más reales si se comparan los resultados obtenidos con depositación, y los datos de calidad del aire de la estación Tibitoc.

Tabla 5 Excedencia de la norma nacional (MAVDT, 2006) de concentraciones máximas promedio de PM10, ponderación 24 h y anual, por división territorial (año 2008)

División territorial	Concentración 24h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Excedencia Concentración 24h (%)	Concentración Año ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Excedencia Concentración Anual (%)
Tibitoc	226.5	96%	71.4	32%
Esmeraldas	182.4	58%	23.1	-57%
C. Caribe	83.0	-28%	11.7	-78%
Z. Urbana	64.9	-44%	7.4	-86%
La Fuente	103.7	-10%	11.6	-78%
S. Javier	144.3	25%	14.4	-73%

Fuente: el estudio. La excedencia anual se determina tomando el valor limite 53.9 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). La excedencia 24 h se determina tomando como referencia el valor limite 115.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Se aprecia que para un periodo de 24 h en: Tibitoc, Esmeraldas y S. Javier se presentan excedencias promedio por encima del valor regulado, y que C. Caribe, Z. Urbana y Las Fuentes se encuentra dentro de la norma 24 h. Sin embargo, no ocurre lo mismo con la norma anual, solamente en Tibitoc es el único sitio que no se cumple la norma.

La distribución de la población en la jurisdicción del municipio de Tocancipá no se puede establecer con certeza, debido a que los datos de los censos no reflejan el nivel de migración y la población flotante total. Basados en la información suministrada por la oficina del sistema de identificación de potenciales beneficiarios de programas sociales (SISBEN) del municipio se obtuvo la siguiente distribución poblacional:

Tabla 6 Distribución de la población de Tocancipá

Vereda	Porcentaje
La Fuente	8 %
Porvenir	3 %
Verganzo	23 %
Esmeralda	7 %
Tibitoc	2 %
Canavita	17 %
Z. Urbana	39 %

Las impactos en salud son estimados comparando los resultados promedios del modelo de dispersión con los valores norma establecidos por el MAVDT. Esto permite cuantificar efectos adicionales en morbilidad y mortalidad por sobrepasar las normas de calidad del aire. La mortalidad se determina para todas las causas en cortos periodos de tiempo (verificando las excedencias de la norma diaria), y mortalidad cardiopulmonar para largos periodos de tiempo (verificando las excedencias de la norma anual).

Los excesos de mortalidad por todas las causas se presenta por excedencia de la norma en la vereda Verganzo, Esmeralda y Tibitoc. Las otras veredas no presentan concentraciones elevadas, por encima de la norma para 24 h. En estos casos la mortalidad es cero. El número de muertes en exceso que se presenta es de 33 (el intervalo de confianza es 11 – 78 muertes, con un nivel de confianza del 95%) al año, por excedencias de la norma diaria.

Tabla 7 Todas las causas de mortalidad para cortos periodos exposición a PM10 (24 h)

	Población	Concentración Promedio PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Límite inferior ²	Promedio	Límite superior ³
La Fuente	1918	103.7	0	0	0
Porvenir	719	83	0	0	0
Verganzo	5516	144.3	9	16	25
Esmeralda	1679	182.4	0	11	30
Tibito	480	226.5	2	5	10
Canavita	4077		0	0	0
Z. Urbana	9353	64.9	0	0	0
		Sumatoria	11	33	78

Nota: Las excedencias se presentan cuando la concentración de PM10 exceden la norma diaria 115.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Los excesos de mortalidad por causas cardiopulmonares se presentan por excedencia de la norma en la vereda Tibitoc. Las otras veredas no presentan concentraciones elevadas, por encima de la norma anual, en estos sitios la mortalidad es cero. El número de muertes en exceso que se presenta es de 12 (el intervalo de confianza es 3 – 39 muertes, con un nivel de confianza del 95%) al año.

² El límite inferior se cuantifica utilizando la función de Riesgo Relativo del límite inferior, y el límite inferior de la concentración obtenida en el modelo superficie de respuesta. Los límites de confianza de utilizados del modelo superficie de respuesta corresponden a la incertidumbre estándar, al igual que la incertidumbre del riesgo relativo, por uniformidad de unidades.

³ El límite superior se cuantifica utilizando la función de Riesgo Relativo del límite superior, y el límite superior de la concentración obtenida en el modelo superficie de respuesta

Tabla 8 Mortalidad cardiopulmonar para largos tiempos de exposición a PM2.5 (anual)

	Población	Concentración promedio PM10 (µg/m3)	Límite inferior ⁴	Promedio	Límite superior ⁵
La Fuente	1918	11.6	0	0	0
Porvenir	719	11.7	0	0	0
Verganzo	5516	14.4	0	0	0
Esmeralda	1679	23.1	0	0	16
Tibitoc	480	71.4	3	12	23
Canavita	4077		0	0	0
Z. Urbana	9353	7.4	0	0	0
		Sumatoria	3	12	39

Nota: Las excedencias se presentan cuando la concentración de PM10 exceden la norma diaria 53.9 µg/m3. La concentración de PM2.5 se determina asumiendo que el cociente PM2.5/PM10=0.5 para países en desarrollo (OMS, 2004).

Como es de esperarse, los excesos de muertes por todas las causas son más altos que por causas cardiopulmonares.

El número de síntomas respiratorios que se incrementa en el municipio de Tocancipá, pero solamente por incrementos en la concentración anual de PM10, es en 92 casos (el intervalo de confianza es 3 – 273 casos, con un nivel de confianza del 95%) al año.

Tabla 9 Morbilidad causada por síntomas respiratorios para largos periodos de exposición a PM10 (anual)

	Población	Concentración promedio PM10 µg/m3	Límite inferior ⁶	Promedio	Límite superior ⁷
La Fuente	1918	11.6	0	0	0
Porvenir	719	11.7	0	0	0
Verganzo	5516	14.4	0	0	0
Esmeralda	1679	23.1	0	0	0
Tibitoc	480	71.4	3	92	273
Canavita	4077		0	0	0
Z. Urbana	9353	7.4	0	0	0
		Sumatoria	3	92	273

Nota: Las excedencias se presentan cuando la concentración de PM10 exceden la norma diaria 53.9 µg/m3.

⁴ Idem nota anterior

⁵ Idem nota anterior

⁶ Idem nota anterior

⁷ Idem nota anterior

4. Conclusiones

El inventario de emisiones reveló que la actividad de generación de energía eléctrica es la categoría de fuente más importante que existe en el municipio de Tocancipá y concentra el 98% de las emisiones totales de material particulado. Cualquier intento que la autoridad ambiental desee realizar para mejorar la calidad del aire del municipio debería orientarse a la disminución de la carga de contaminantes emitidos por esta industria.

El MSR es una aproximación del modelo inicial, que simplifica los cálculos y sirve de guía en la toma de decisión sobre el posible óptimo o mínimo de la superficie de respuesta, por lo tanto sus resultados deben observarse con precaución.

Los límites de confianza arrojados por el modelo superficie de respuesta y las funciones de Riesgo Relativo sirven para determinar los efectos de la contaminación en un intervalo de confianza del 95%. Se encontró que, para el periodo de exposición diaria, las veredas más afectadas son Verganzo, Esmeralda, y Tibitoc, presentando excesos de mortalidad por todas las causas que oscilan entre 11 – 78 muertes, con un nivel de confianza del 95%.

Para periodos de exposición anual, la vereda afectada es Tibitoc, con excesos de mortalidad por causas cardiopulmonares que oscilan entre 3 y 39 muertes, a un nivel de confianza del 95%. Así mismo, esta vereda muestra entre 3 y 273 casos de excesos de síntomas respiratorios, con un nivel de confianza del 95%.

5. Referencias

Box, G. E. P. & Draper, N. R. 1987. Empirical Model Building and Response Surfaces, John Wiley & Sons, New York, United States.

Downing D. J., Gardner R. H, Hoffman F. O. 1985. An Examination of Response-Surface Methodologies for Uncertainty Analysis in Assessment Models, En: Technometrics, Vol. 27, No. 2, pp. 151-163

MAVDT (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial). 2006. Norma de calidad del aire, Bogotá D.C. 13 p.

- - - -. 2008. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, Bogotá, 135p.

Myers, R.H. & Montgomery, D.C. 1995. Response Surface Methodology. John Wiley & Sons, New York.

NIST, 2009. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, En: <http://physics.nist.gov/Pubs/guidelines/appb.html> (consultado en noviembre de 2009)

OMS (Organización Mundial de la Salud 2004. Outdoor Air Pollution: Assessing the Environmental Burden of Disease at national and Local Levels. Environmental Burden Disease Series, No. 5, Geneva, 2004.

Ostro et al., The association of air pollution and mortality: examining the case for inference. Arch Environ Health; 48: 336-42