



SENSIBILIDAD DEL MODELO ISCST3 EN LA ESTIMACIÓN DE CONTAMINANTES CONSERVATIVOS. CASO DE ESTUDIO

SENSITIVITY OF CONSERVATIVE POLLUTANTS ESTIMATION USING ISCST3 TO INPUT PARAMETERS FOR A CASE OF STUDY

M.B. González-Cruz¹, S.F. Pire-Rivas¹ y P.A. López-Jiménez^{2*}

¹Centro de Estudio Ingeniería de Procesos. Facultad de Ingeniería Química. Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría

²Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. ETSII, Universidad Politécnica de València

Recibido 26 de Noviembre 2011; Aceptado 26 de Febrero 2012

Resumen

El presente documento describe un proceso de análisis realizado sobre el modelo gaussiano de dispersión de contaminantes atmosféricos ISCST3 aplicado en un área densamente poblada, el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE) ubicado en la Habana. Para la simulación numérica se realizó un inventario de fuentes y de emisiones de contaminantes atmosféricos en la zona, para estimar la concentración del contaminante conservativo, en este caso dióxido de azufre. El objetivo es mostrar la sensibilidad de esta simulación numérica con la variación en la entrada de varios parámetros: albedo medio, razón de Bowen, rugosidad de la superficie y velocidad del viento. Una vez obtenidos los resultados se analiza la influencia de las variaciones en la entrada de dichos parámetros sobre la concentración del contaminante estudiado. Concluyendo que la velocidad del viento es el parámetro al que el modelo es más sensible y presenta la menor sensibilidad a los cambios en la entrada del albedo. El receptor menos afectado en los valores de concentración estimados para 24 horas es el receptor 2, ubicado en el centro de la malla y correspondiente al campus universitario de la CUJAE. Mientras que para valores horarios los menos sensibles son los receptores 1 y 3.

Palabras clave: parámetros, análisis de sensibilidad, modelo Gaussiano, ISCST3, contaminantes conservativos, contaminación atmosférica, dióxido de azufre.

Abstract

This paper describes a process of analysis of the Gaussian model ISCST3 of air pollutants dispersion applied in a densely populated area, the Higher Polytechnic Institute José Antonio Echeverría (CUJAE) in Havana. For the numerical simulation was carried out a sources and emissions inventory of air pollutants in the area, to estimate the concentration of the conservative pollutant, in this case sulfur dioxide. The objective is to show the sensitivity of numerical simulation with variation in the input of several parameters: average albedo, Bowen ratio, surface roughness and wind speed. After obtaining the results, the influence of variations in these parameters input and contaminant concentration studied is analyzed. Concluding that the wind speed is the parameter to which the model is more sensitive and has the lowest sensitivity to changes in albedo input. The least affected receptor concentration values estimated for 24 hours is the number 2, located in the center of the screen and land in the campus CUJAE. While for hourly values, receptors 1 and 3 are less sensitive.

Keywords: parameters, sensitivity analysis, Gaussian model, ISCST3, conservative pollutants, atmosphere contamination, sulfur dioxide.

*Autora para la correspondencia. E-mail: palopez@upv.es

1 Introducción

La modelación de la calidad del aire se ha convertido en los últimos tiempos en una herramienta indispensable para caracterizar la calidad de vida que se experimenta en las ciudades. Sin embargo, el proceso de modelación del movimiento de los contaminantes en la atmósfera es complejo e implica muchos aspectos, tanto de la evolución físico-química de los contaminantes en el medio receptor, como de las estrategias matemáticas que se ven involucradas en el proceso de modelación en sí. Con el desarrollo de las técnicas computacionales, la comunidad científica dispone cada vez de forma más accesible y rápida, de herramientas para la realización de estas simulaciones, que sin embargo, es necesario que pasen un exhaustivo proceso de calibración antes de ser considerablemente validadas y aceptadas como herramienta de toma de decisiones. En este marco, se encuentra la investigación que a continuación se desarrolla. Se ha realizado una modelación de la calidad del aire en cuanto a la dispersión de un contaminante considerado como claro indicador de la misma, como es el dióxido de azufre (SO₂), en la ciudad de La Habana (Cuba). Además, se propone una estrategia para establecer la sensibilidad de la modelación de esta concentración a los parámetros que intervienen en los modelos y que pueden tener incertidumbre en su estimación, para acelerar el proceso de calibración siguiente y definir las dependencias espaciales de estos parámetros en la solución del modelo. Este análisis de sensibilidad se hace muy necesario para optimizar el proceso de estimación de parámetros y la toma de medidas en campo, así como para conocer el comportamiento del propio modelo ante la posible variación de los parámetros más representativos, que tienen un error intrínseco en su determinación.

El caso de estudio es un área de 400 kilómetros cuadrados donde está ubicado el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE) en la ciudad de La Habana. Este es el mayor centro del país en estudios de carreras de ingeniería y arquitectura, concebido en 1964. Con aproximadamente 8625 estudiantes externos, 2681 trabajadores y una población de 2048 residentes becados en la residencia estudiantil; dentro del Campus Universitario.

Para la aplicación del modelo, se ha realizado un inventario de fuentes y emisiones de contaminantes atmosféricos en el territorio y se identificaron un total de 48 fuentes fijas: 46 calderas, un grupo electrógeno de 60MW de potencia y un vertedero de residuos sólidos urbanos. Debido a la gran densidad

poblacional de la CUJAE y la ubicación en sus alrededores de fuentes de contaminación atmosféricas considerables es de gran importancia el estudio de la calidad del aire en dicha zona.

Las contribuciones recientes de la comunidad científica en este campo consideran muchos modelos diferentes, aplicables en casos concretos. Los modelos de dispersión de contaminantes son muy empleados en estudios de impacto ambiental y para la obtención de licencias ambientales. La selección del modelo a aplicar depende de varios factores, entre ellos la escala del estudio que se pretende realizar.

Para el estudio de múltiples fuentes fijas uno de los modelos recomendados por la bibliografía es el ISCST3. (Behera y col., 2011), (Sharma y Chandra, 2008). Este es uno de los modelos más utilizados de la familia de modelos ISC (Industrial Source Complex - Short Term versión 3) desarrollados por la USEPA (United States Environmental Protection Agency), es un modelo de pluma Gaussiana, aplicable a múltiples fuentes incluyendo fuentes puntuales, superficiales, volumétricas, y lineales.

Mehdizadeh y Rifai (2004) señalan que para la obtención de resultados precisos en los estudios de impactos a la calidad del aire es necesario suministrar al modelo computacional datos como: condiciones meteorológicas, características de terreno, especificaciones físicas y químicas del efluente y parámetros de las fuentes, para simular la formación de la pluma y el transporte de contaminantes.

Uno de los datos de entrada más importantes de cualquier modelo de dispersión de contaminantes es el conjunto de datos meteorológicos, (US EPA, 2000). Antes de introducir estos datos a algunos de los modelos de dispersión de la EPA (US EPA, 2011), incluido el ISCST3, es necesario su procesamiento. PCRAMMET (versión PC del programa original RAMMET) es un procesador meteorológico que combina los datos de superficie horarios y los de alturas de mezclado dos veces al día en un solo archivo, y comúnmente se utiliza como entrada para ISCST3.

Como no se dispone de datos meteorológicos de altura de la capa límite atmosférica, se puede emplear el estimador que brinda el software PCRAMMET, para lo cual es necesario tener conocimiento de los valores de los siguientes parámetros: albedo medio, razón de Bowen y rugosidad de la superficie. La escasez de datos puede conducir a problemas de calibración, debido al gran número de parámetros que intervienen en la misma y las limitaciones experimentales para obtener algunos de estos valores,

no resulta viable una variación de todos los parámetros a la vez. (Beyrich, 1997). Debe asumirse que la gran variabilidad de todos estos valores conduce a una posible incertidumbre de los resultados, que es muy conveniente cuantificar.

En el conjunto del proceso de modelación, el análisis de sensibilidad es una fase crucial; en su trabajo Gujer (2008) argumenta que entre los métodos científicos utilizados que permiten captar las diferencias entre la predicción del modelo y el comportamiento del mundo real está el análisis de sensibilidad, el cual indica los parámetros identificables que afectan a las concentraciones modeladas y los experimentos que darían más información. Es importante realizar este análisis, porque va a acelerar la calibración del modelo, al reconocer los parámetros a los que las soluciones son más sensibles en aras de conseguir una adecuación entre el modelo y la predicción más rápida.

El objetivo de este estudio es determinar la sensibilidad del modelo aplicado en una zona de ciudad de La Habana con el software ISCST3 para las condiciones de estudio anteriormente planteadas, lo cual permitirá la calibración del modelo cuando se cuente con los datos reales de calidad del aire. Para ello se necesita conocer cuan sensible es la concentración estimada empleando el modelo, para diferentes entradas de los parámetros analizados. Un análisis de sensibilidad del modelo de dispersión de contaminantes ISCST3 se realizó anteriormente por Faulkner y col. (2008) para una fuente superficial en condiciones rurales, y en sus resultados se aprecia que para esas condiciones las concentraciones obtenidas son sensibles a cambios en la velocidad del viento, temperatura, radiación solar, alturas de mezcla por debajo de 160 m y rugosidad de la superficie. Otro estudio de este tipo al que fue sometido el modelo se registra en el documento denominado Apéndice C: "Análisis de sensibilidad del modelo de dispersión atmosférica ISCST3" (US EPA, 2011), donde se describe el análisis de sensibilidad realizado sobre las opciones de deposición húmeda, forma y orientación de la fuente de y ubicación y espacio de los receptores.

La importancia del análisis de sensibilidad se encuentra profusamente documentada en la bibliografía con carácter general, Jakeman y col. (2008) consideran que para la evaluación de los modelos medioambientales se debe incluir la estimación de los valores de los parámetros. Los parámetros pueden ser calibrados en conjunto o por partes. Reconocen que es válido un análisis de sensibilidad de los resultados del modelo a cambios

en los parámetros individuales, incluso dos a la vez. Sin embargo el análisis de los efectos de cambios de grandes combinaciones de parámetros está usualmente limitado para medidas burdas. Los resultados de las pruebas de sensibilidad extensas pueden ser difíciles de interpretar, debido a la cantidad y complejidad de las relaciones de causa-efecto implícitas en el modelo. Para reducir al mínimo las dificultades, es necesario fijar las prioridades claras para definir las características de las variables a analizar y la incertidumbre de las mismas.

En este marco, el análisis de sensibilidad del modelo ISCST3 para territorios urbanos con estas características no se encuentra documentado en la literatura científica consultada. Así, con la presente contribución, se dispondrá de un modelo de dispersión de contaminantes reconocido, ajustado para condiciones semejantes a las estudiadas (características de terreno, uso de suelo y meteorología) en ciudad de la Habana, que en la actualidad no existe, y se convierte así en la principal aportación de la presente investigación.

2 Identificación de parámetros y análisis de sensibilidad

De acuerdo con Jakeman y col. (2006) el sistema que se va a modelar debe ser claramente definido, incluyendo sus límites. Las condiciones de contorno se pueden modelar como restricciones o como escenarios de entrada, cuyos valores pueden ser modificados dentro de unos intervalos documentados en la bibliografía. La existencia de modelos con demasiados parámetros de entrada sigue siendo endémica; la escasez de datos debe limitar la complejidad del modelo, pues demasiados grados de libertad pueden provocar grandes riesgos en los resultados de la simulación numérica.

El uso de datos meteorológicos con fines ambientales ha sido una práctica muy bien establecida desde 1960, como se documenta en (Beyrich y col., 1996). Los datos meteorológicos se han utilizado en varios tipos de análisis con diferentes objetivos. En particular, se requieren a menudo para simular la difusión de gases en la atmósfera y una simulación exhaustiva debería proporcionar una estimación aceptable de las concentraciones de contaminantes a nivel del suelo. Una entrada clave de estos modelos son los campos de mediciones meteorológicas y parámetros necesarios para calcular el transporte, dispersión y eliminación de

contaminantes. (Mandurino y Vestrucci, 2009).

Según Beyrich (1997) la altura de la capa límite atmosférica es un parámetro fundamental que caracteriza la estructura de la baja atmósfera, y su conocimiento es de particular importancia para diversas aplicaciones, tales como vigilancia del medio ambiente y la predicción de la contaminación del aire, el pronóstico meteorológico, etc.

La literatura consultada arroja estudios de sensibilidad que ponen de manifiesto el papel extremadamente importante de los flujos de superficie en la determinación de las variaciones diurnas en la troposfera baja. (Mihailović y Kallos, 1997). Los flujos de momentum y calor dependen fuertemente de características superficiales como albedo, longitud de la rugosidad y humedad del suelo. A veces, varían temporal y espacialmente dentro de un rango amplio de valores. Toda esta información se incorpora en los modelos atmosféricos con la ayuda de diversos esquemas de parametrización que, en general, son crudos y a veces poco realistas.

En los estudios de contaminación atmosférica se considera habitual utilizar el término de capa mixta o capa de mezcla. En esta capa en la baja atmósfera, cuando se dan condiciones de inestabilidad, las sustancias emitidas se dispersan verticalmente de forma gradual, debido a la acción de la turbulencia, produciendo concentraciones prácticamente constantes por debajo de la capa de inversión, cuyo valor es de gran interés conocer. Esta transferencia de propiedades en la capa límite atmosférica es primordial para el estudio de la dispersión de los contaminantes emitidos o acumulados en la atmósfera por los ecosistemas terrestres y acuáticos (Beyrich y col., 1996).

Desafortunadamente, no se pueden observar todos los factores externos que influyen en el comportamiento del sistema, y los que podemos observar están sujetos a errores de medición. (Gujer, 2008). Sin embargo, sí pueden conocerse parámetros a los que la modelación es sensible. La velocidad del viento se declara como uno de estos parámetros. Autores como Fatehifar y col. (2008) en su estudio de sensibilidad del modelo ISCST3 y del AERMOD, Faulkner y col. (2008) en el desarrollo de un nuevo modelo para la simulación de dispersión de la contaminación y Rodríguez y col. (2006) en el estudio del comportamiento de los parámetros contaminantes, tuvieron en cuenta el efecto de la velocidad del viento en la dispersión de contaminantes.

A la hora de realizar un análisis de sensibilidad efectivo, la necesidad de definir un subconjunto

máximo de parámetros se justifica por la escasez de datos. La selección de subconjuntos de parámetros de identificación es un tema especialmente relevante en la identificación del sistema ambiental. Mediante la inspección de las sensibilidades puede ser evaluada la combinación datos/modelo y se pueden diseñar las condiciones experimentales óptimas para maximizar la precisión de la estimación. (Marsili-Libelli y Giusti, 2008).

En cuanto a los datos meteorológicos recopilados para la realización del modelo que nos ocupa, en el área donde se realiza el estudio hay una estación meteorológica que registra los datos de superficie necesarios para la simulación numérica. Sin embargo no se cuenta con reportes de datos de altura de mezcla.

3 Métodos

En la modelación de la concentración de SO₂ que aquí se presenta, se emplearon las medias anuales de los siguientes valores: albedo medio, razón de Bowen y rugosidad de la superficie, propuestos por defecto por el código PCRAMMET. Para el resto de los parámetros meteorológicos (datos de superficie) se emplearon los valores reportados por la estación meteorológica ubicada en el área de estudio para los años 2009-2010. Los valores estimados empleados fueron, para el albedo medio: 0.2075, razón de Bowen: 1.625 y para la rugosidad de la superficie: 1m. (US EPA, 2000). Estos parámetros no medidos pudieran provocar errores en los resultados, debido a que los mismos están dados para condiciones climatológicas muy diferentes a las que presenta el país donde se realiza el estudio. Las estaciones del año descritas por la ayuda del programa son:

- Primavera: Períodos en que la vegetación es verde emergente o parcialmente. Esta es una situación transitoria que se aplica durante 1-2 meses tras la última helada de primavera.
- Verano: Períodos en que la vegetación es exuberante y saludable, típica de mediados de verano, pero también de otras estaciones, donde las heladas son menos frecuentes.
- Otoño: Los períodos en que las condiciones heladas son comunes, árboles de hoja caduca están sin hojas, los cultivos aún no están plantados o se cosechan ya (suelo desnudo expuesto), superficies de hierba son de color marrón, y no hay presencia de nieve.

- Invierno: Los períodos cuando las superficies estaban cubiertas por la nieve, y cuando las temperaturas son bajo cero.

Sin embargo, esta consideración no es aplicable por completo al caso particular modelado. El campus universitario de la CUJAE, área donde se realiza el estudio, está ubicado en Marianao, municipio capitalino de Cuba. En Cuba las estaciones del año no cumplen con los patrones antes mencionados, las estaciones de primavera y otoño no están bien enmarcadas y durante los escasos meses de invierno no nieva (suelen considerarse solo 2 estaciones, lluvia y seca). Se ha considerado teniendo en cuenta estas especificidades, que los parámetros meteorológicos antes mencionados deben tener valores reales cercanos a los reportados por la literatura para un área urbana y en verano. En base a esta consideración se realizó el estudio de sensibilidad del modelo para cada una de las variables de entrada siguiente: albedo medio, razón de Bowen, rugosidad de la superficie y velocidad del viento.

Albedo es la fracción de la radiación solar total reflejada por la superficie y que es devuelta a la atmósfera sin ser absorbida. Los valores típicos oscilan entre el 0.1 para bosques caducifolios y 0.9 para la nieve fresca (US EPA, 1995).

En el albedo no solo influye la reflectividad del suelo inmediato, sino también otras características de la tierra como paisaje, arbustos, árboles, etc. (Psiloglou y col., 2009). La bibliografía consultada indica valores recomendados de albedo alrededor de 0.2. Sin embargo la guía de usuario del PCRAMMET (US EPA, 2000) propone para ambientes urbanos en condiciones de verano 0.16.

La razón de Bowen es un indicador de humedad de la superficie. Es la relación entre el flujo de calor sensible y flujo de calor latente. Durante el día, la relación de Bowen habitualmente se mantiene bastante constante y oscila entre 0.1 sobre el agua y 10.0 en el desierto (US EPA, 1995).

La parametrización de la relación de Bowen es de primordial importancia en el logro de simulaciones precisas de la circulación térmica con los modelos atmosféricos. (Mihailović y Kallos, 1997). Por lo tanto, una parametrización incorrecta del flujo de calor latente puede perturbar esta relación, y la exactitud de la simulación del modelo.

Según la guía de usuario del PCRAMMET (US EPA, 2000) el valor de este parámetro puede variar en la zona de estudio (ambientes urbanos en condiciones de verano) desde 1,0 si las condiciones son de

humedad, 2.0 para condiciones promedio y 4.0 para secas.

En la superficie de la tierra hay obstáculos de diversas escalas, que van desde hojas de hierba hasta rascacielos, que debido a la fricción de la superficie provocan un retraso del viento en la capa superficial de la atmósfera. No sólo la altura de los elementos afecta el grado de desaceleración del viento y la extensión vertical a la que este efecto se alcanza sino que el área que ocupan también influye. Para los elementos de superficie homogénea, un parámetro ha sido definido, llamado rugosidad de la superficie y no es más que la altura donde el viento es aproximadamente cero. Por lo tanto, es menor que la altura de los elementos de rugosidad ya que, un poco de viento se produce por entre las copas de dichos elementos.

Para Schulze y Turner (1995) este parámetro toma valores entre 0,0001m para el agua y hasta 3m para superficies urbanas, Espert y López (2000) plantean que este parámetro puede tomar valores en una gama más amplia desde 10^{-5} m para zonas heladas y hasta 5m para centro de ciudades con grandes edificios y otros (US EPA, 1995) opinan que el valor promedio oscila entre menos de 0.001m sobre una superficie de aguas tranquilas a 1.0m o más para un bosque o una zona urbana.

El centro del área de estudio está en las coordenadas y: 2 540 000m y x: 354 000m; ubicada aproximadamente en el centro del terreno preparado para la estimación de la dispersión de contaminantes. Se abarcó un área de 400km². Para la estimación de contaminantes en la zona antes delimitada se realizó la modelación con 2 mallas diferentes, una malla cartesiana uniforme en la cual se encuentran ubicados un total de 10201 receptores y una malla cartesiana discreta con 3 receptores previamente seleccionados, ver Fig. 1.

Dentro de los parámetros meteorológicos incluidos en el estudio de sensibilidad está la velocidad del viento, por la importancia que tiene en la dispersión de contaminantes. Sin embargo, la determinación del valor de la misma no está exenta de posibles errores de incertidumbres en la medición; por lo que se plantea el estudio de su posible variación para el rango de valores reportados por la estación para el territorio de interés. Los valores de velocidad del viento varían desde las condiciones de calmas y hasta un máximo de 8 m/s.

La Fig. 1 se muestra el área estudiada, las isolíneas de elevación del terreno y dentro de esta geografía mostrada para el modelo, se indican también, los puntos donde se realiza el análisis de sensibilidad que aquí se documenta.

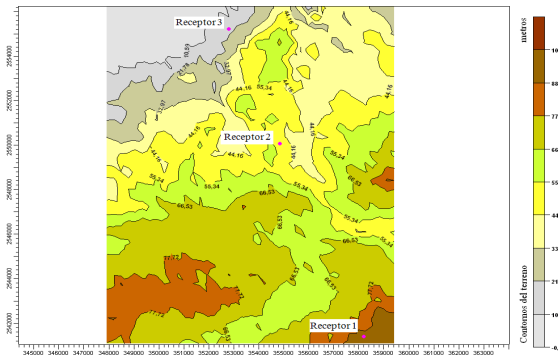
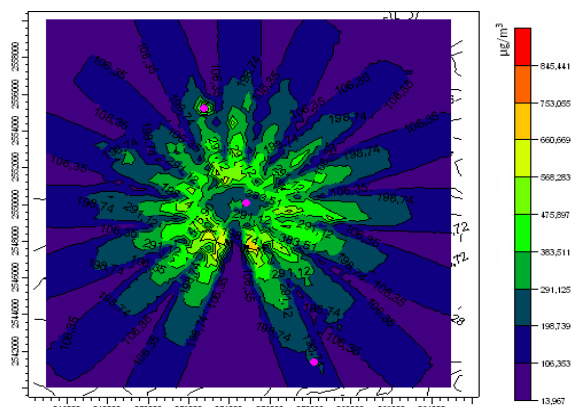
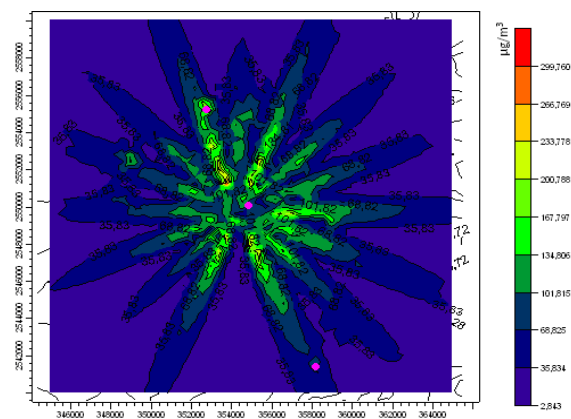


Fig. 1. Elevación de la zona de estudio y cuadrícula de receptores cartesiana discreta.



a)



b)

Fig. 2. Isolíneas de $c(SO_2)$ estimadas, a) para 1 hora, b) para 24 horas.

Punto 1 (coordenada x: 358 200, y: 2 541400) seleccionado por presentar los mayores concentraciones de SO_2 para el umbral de violaciones del caso analizado.

Punto 2 (coordenada x: 354 850, y: 2 550 050) seleccionado por estar en el centro del campus universitario.

Punto 3 (coordenada x: 352 800, y: 2 555 200) seleccionada por ser el punto donde se reportan las máximas inmisiones de contaminantes para 1 hora.

En la Fig. 2 se describe gráficamente las concentraciones de SO_2 estimadas para 1 y 24 horas considerando los valores de los parámetros indicados por defecto por el modelo.

Teniendo en cuenta las sugerencias realizadas para las condiciones del área y las estaciones del año se determinaron los rangos de posibles valores y se desarrollaron varias estimaciones modificando cada uno de los parámetros por separado.

Se calcularon así, varias simulaciones numéricas para estimar la concentración de SO_2 con las variaciones en los datos de entrada, para cada parámetro por separado, teniendo en cuenta las especificidades antes mencionadas del caso.

4 Análisis de resultados

Para cada uno de los parámetros se determinó el error relativo porcentual aproximado, que no es más que una normalización del error usando la mejor estimación posible al valor verdadero (Chapra y Canale, 2007), en este caso se emplea el valor estimado para las condiciones del caso base. Planteando la ecuación propuesta por los autores antes referidos para el caso de estudio, quedaría:

$$\epsilon_a = \left| \frac{C_m - C_{cb}}{C_{cb}} \times 100\% \right| \quad (1)$$

De acuerdo con el análisis de Chapra y Canale (2007) el resultado puede ser positivo o negativo, pero en este tipo de análisis lo que tiene mayor importancia es el valor absoluto porcentual, por lo que se ha planteado la Ec. (1) de manera que se obtengan los valores absolutos.

Se ha analizado además el denominado en la bibliografía número de condición. Según Chapra (1997) expresar los resultados a través de la relación representada por la Ec. (2) es un buen refinamiento para un análisis de sensibilidad ya que es una función de transferencia que propaga el error relativo del parámetro a la predicción.

$$\text{Número de condición} = \frac{\Delta \text{Concentración}/C_0}{\Delta \text{Parámetro}/P_0} \quad (2)$$

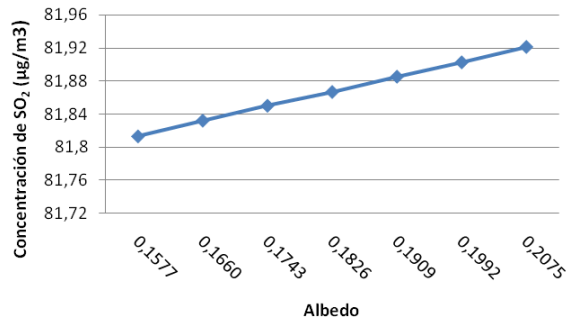


Fig. 3. Influencia del albedo en la concentración de SO₂. Para 24 horas, receptor 1.

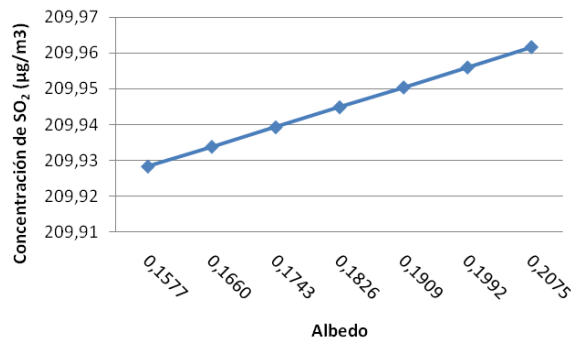


Fig. 4. Influencia del albedo en la concentración de SO₂. Para 24 horas, receptor 3.

Para el albedo medio, se realizaron 7 simulaciones del modelo para valores entre 0.1577 y 0.2075 con una diferencia de un 4%. Se estimaron las alturas de mezcla para cada uno de ellos empleando el PCRAMMET y posteriormente la concentración de contaminantes en los tres receptores antes definidos para 1 hora y 24 horas.

Para 1 hora, en ninguno de los receptores se detectó cambios en el valor de la concentración, mientras que para 24 horas las concentraciones varían en los receptores 1 y 3, receptores más alejados del centro de la malla cartesiana uniforme, en ambos casos con un aumento del albedo aumentan los valores de las concentraciones máximas mostrando un comportamiento lineal, ver figs. 3-4.

Para el receptor 1 el valor más bajo de concentración es de 0.13% el valor estimado para el caso base y en el caso del receptor 3 la disminución se corresponde con un 0,02%. El valor más alto del número de condición para los datos procesados es de 0.0044 para el receptor 1 y 0.0005 para el 3.

A diferencia de los resultados obtenidos por Faulkner y col. (2008), en su estudio de sensibilidad donde concluyen que el modelo ISCST3 no es sensible

a los cambios de albedo, en este caso solo se muestra invariable tanto para 1 hora como para 24 horas el receptor 2 (más cercano al centro de la malla).

4.1 Razón de Bowen

En el análisis de influencia de la razón de Bowen en la concentración se realizaron 20 simulaciones para valores entre 0.9750 y 4.0625 con una diferencia del 10%. Los resultados de la concentración de SO₂ obtenidos para 1 hora en los receptores 1 y 3 son constantes.

Para el receptor 2, las concentraciones de contaminantes estimadas en una hora muestran que para valores inferiores a 2.9250 no varía el valor estimado, ver Fig. 5, mientras que para ese valor de entrada se reporta el valor más alto de concentración que es 4.48% el del caso base y se corresponde con el indicativo de desviación más alto (0.2688). Para entradas mayores comienzan a disminuir las concentraciones hasta que se iguala con el caso de estudio para un valor de la razón de Bowen de 4.0625. Se observa en la Fig. 5 que la variación de la razón de Bowen no presenta sensibilidad alguna en el modelo, hasta que su valor asciende de 2.6, para decrecer fuertemente con posterioridad, sin tener una pauta constante como otros factores que afectan de forma mucho más lineal.

Para 24 horas en el receptor 2 las concentraciones permanecen invariables para cualquier valor de entrada de la razón de Bowen, mientras que para los receptores 1 y 3 nuevamente se observa una variación, con un aumento del valor de entrada disminuye la concentración máxima de contaminantes, ver figs. 6-7.

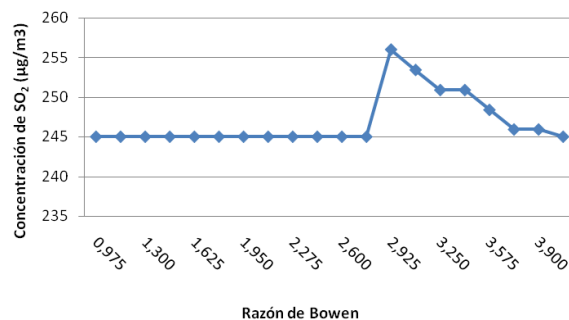


Fig. 5. Influencia de la razón de Bowen en la concentración de SO₂. Para 1 hora, receptor 2.

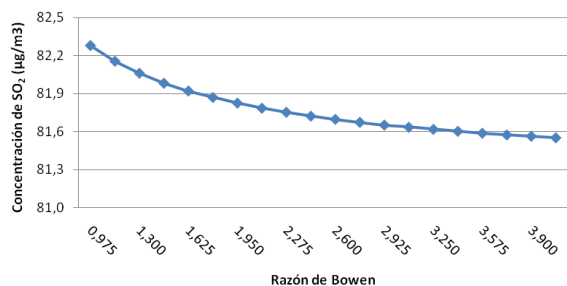


Fig. 6. Influencia de la razón de Bowen en la concentración de SO₂. Para 24 horas, receptor 1.

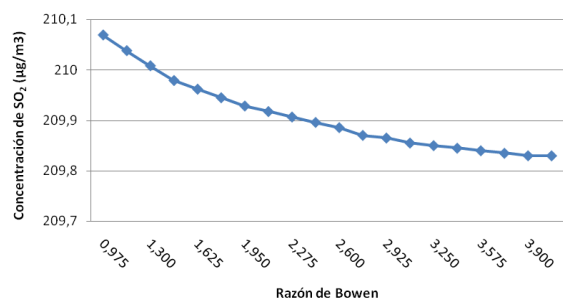


Fig. 7. Influencia de la razón de Bowen en la concentración de SO₂. Para 24 horas, receptor 3.

Los resultados de la concentración de SO₂ para 24 horas en los receptores 1y 3 muestran que para 0.9750 se reporta la mayor concentración, siendo 0,44% y 0,05% la del caso base respectivamente y para una entrada de 4.0625 de razón de Bowen las menores, 0,45% y 0,06% respectivamente. Para estos receptores el indicativo de desviación alcanza valores aproximados de 0.009 para el receptor 1 y 0.0009 para el receptor 3.

4.2 Rugosidad del terreno

Durante el estudio de la influencia de la rugosidad del terreno en la estimación de la concentración se realizaron 29 simulaciones para valores de rugosidad del terreno entre 0.3 y 3m con una diferencia de 10cm entre ellos.

Las concentraciones estimadas para 1 hora en los receptores 1 y 3 se mostraron invariables mientras que en el receptor 2 varían sensiblemente. En la Fig. 8 se observa que para valores de rugosidad de 0.3, 1.1, y entre 1.9 y 2.6 m los valores de concentración están por encima de la concentración del caso base, y el mayor valor es 49.4% la del caso base, para una rugosidad de 1.9 m, al cual le corresponde un indicativo de desviación de 1.2547.

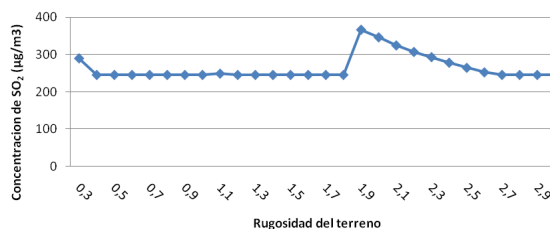


Fig. 8. Influencia de la rugosidad del terreno en la concentración de SO₂. Para 1 hora, receptor 2.

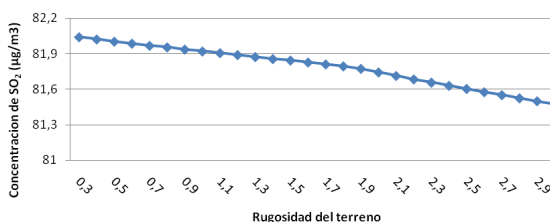


Fig. 9. Influencia de la rugosidad del terreno en la concentración de SO₂. Para 24 horas, receptor 1.

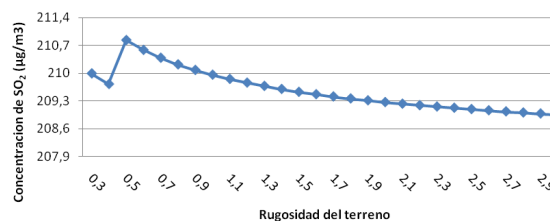


Fig. 10. Influencia de la rugosidad del terreno en la concentración de SO₂. Para 24 horas, receptor 3.

Para 24 horas en los receptores 1 y 3 se muestran cambios en las concentraciones de SO₂ estimadas, mientras que para el receptor 2 la concentración permanece constante.

En la Fig. 9 se observa que a medida que aumenta la rugosidad para el receptor 1 disminuye la concentración siendo la mayor 0,02% la del caso base y la menor 0,54%. Mientras que para el receptor 3, ver Fig. 10, para 0,5m se reporta el valor más alto, 0,42% por encima del caso base y con un 0,48% por debajo el menor valor, reportado para 0,9 m de rugosidad. Para estos receptores los valores máximos del indicativo de desviación son de 0.0011 y 0.0159 respectivamente.

Para 24 horas el único receptor que no presenta afectaciones en las concentraciones de SO₂ estimadas es el que está ubicado en centro de la malla (receptor 2) mientras que es el más afectado en los resultados horarios.

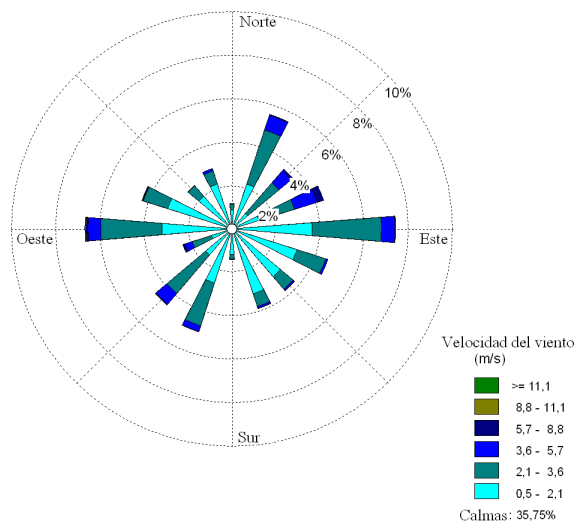


Fig. 11. Rosa de vientos considerada en el presente análisis de sensibilidad.

4.3 Velocidad del viento

Variando la entrada de la velocidad del viento se realizaron un total de 17 simulaciones, con una variación de 0.5m/s entre una y otra y se graficaron los resultados de la concentraciones estimadas para valores de velocidad del viento entre 1 y 9 m/s; siendo la dirección principal en el eje Este-Oeste. La rosa de los vientos considerada para esta posición se indica en la Fig. 11.

Faulkner y col. (2008) concluyen de su estudio que para valores entre 3 y 30m/s un incremento en la velocidad del viento representaba una disminución en los valores de concentración de contaminantes. En este caso las concentraciones estimadas para los 3 receptores tienen similar comportamiento a partir de los 5m/s de velocidad del viento, con un aumento de la velocidad disminuye la concentración, ver figs. 12-13. Sin embargo para valores de velocidad del viento inferiores a 5m/s la tendencia de los resultados de las concentraciones horarias para el receptor 2 y las concentraciones para 24 horas de los receptores 2 y 3 muestran inestabilidad.

Para los valores de concentración de SO₂ estimados para una hora el máximo valor del número de condición es de 0.4895 para el receptor 1, 0.2781 para el 2 y 0.1997 para el receptor 3.

Para valores de entradas de velocidad del viento superior a 5 m/s el indicativo de desviación comienza a disminuir y a partir de 8.5 m/s éste se anula, es decir la concentración para estos 2 últimos valores de velocidad se mantiene constante. El número de condición alcanza valores máximos de 0.5968 para el receptor 1, 0.7362 para el 2 y 0.6891 para el 3.

Para entrada de velocidad del viento mayores, entre 5 y 9 m/s el número de condición toma valores desde 0.1 (reportado para el receptor 3 en los resultados para 24 horas) y 0. En este mismo intervalo de entrada y para los resultados obtenidos por Faulkner y col. (2008) los valores del número de condición están entre 0.75 y 0.35.

Para una futura calibración del modelo ISCST3 será necesario tener conocimiento según el rango de concentración de que parámetros afectan más la simulación numérica. Por esta razón se ha realizado el presente análisis para el SO₂. En la Tabla 1, se muestran ordenados los parámetros por rango de concentración de SO₂.

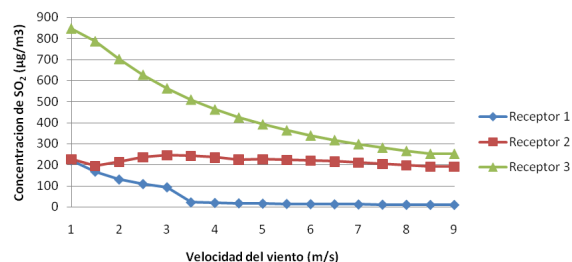


Fig. 12. Influencia de la velocidad del viento en la concentración de SO₂ estimada en los tres receptores para 1 hora.

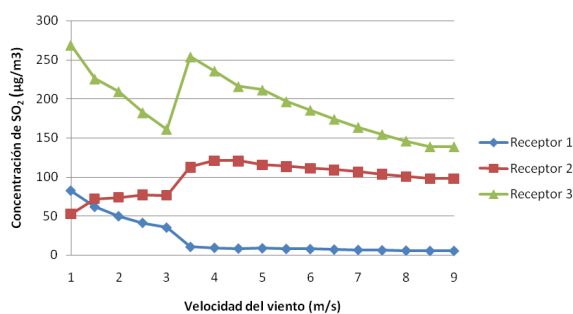


Fig. 13. Influencia de la velocidad del viento en la concentración de SO₂ estimada en los 3 receptores para 24 horas.

Tabla 1. Orden descendente de los parámetros (albedo, razón de Bowen y rugosidad de la superficie) que afectan la sensibilidad del modelo ISCST3 por rango de $c(\text{SO}_2)$ estimada.

$c(\text{SO}_2)$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	81 a 83	208 a 210	245 a 366
Parámetros	Razón de Bowen Albedo Rugosidad	Rugosidad Razón de Bowen Albedo	Rugosidad Razón de Bowen —

Conclusiones

La presente contribución describe un análisis en el que se ha realizado y presentado por primera vez un estudio de impacto de fuentes fijas sobre la calidad del aire del campus universitario CUJAE, empleando un modelo de dispersión recomendado para la dispersión del dióxido de azufre.

El trabajo es una guía metodológica para estudios de sensibilidad en otras condiciones o para otros modelos de dispersión de contaminantes; asimismo aplicada a un caso de estudio concreto. Se han propuesto indicadores e identificado receptores de interés para realizar el análisis de sensibilidad con el objetivo de una posterior calibración del modelo.

Se ha cuantificado la sensibilidad del modelo ISCST3 a diferentes parámetros que después de consultada la bibliografía reciente sobre el tema se han considerado representativos: albedo medio, razón de Bowen, rugosidad de la superficie y velocidad del viento.

Se ha detectado que el parámetro que afecta en mayor medida a las concentraciones estimadas para todos los receptores es la velocidad del viento; y sin embargo presenta la menor sensibilidad a los cambios en la entrada del albedo.

Se ha estudiado con detenimiento la dispersión del contaminante en la zona de estudio, identificando la ubicación de los tres puntos que se han considerado más representativos para una posterior calibración. Se analiza y concluye que el receptor menos afectado en los valores de concentración estimados para 24 horas es el receptor 2, ubicado en el centro de la malla y correspondiente al campus universitario de la CUJAE. Mientras que para valores horarios los menos sensibles son los receptores 1 y 3.

A esta investigación se le dará continuidad con la calibración del modelo ISCST3, para ello se contará con los datos reales de calidad del aire; según los resultados obtenidos en este estudio de sensibilidad lo más conveniente será realizar la campaña de mediciones de calidad del aire dentro del campus

universitario de la CUJAE y calibrar el modelo para 24 horas en el receptor 2 (ubicado en el campus universitario).

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto de Doctorado curricular en su dimensión ambiental existente entre el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE) y la Universidad Politécnica de Valencia que permitió en el marco del mismo la realización de este trabajo. Además de nuestra gratitud a otras instituciones que facilitaron los datos y medios para la investigación como son: Dirección Provincial de Salud Pública de ciudad de La Habana, Cubaenergía perteneciente al Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente y a la Oficina de Acción Internacional (OIA) de la Universidad Politécnica de Valencia.

Nomenclatura

ε_a	error relativo porcentual aproximado.
C_m	concentración de contaminantes máxima o mínima.
C_{cb}	concentración de contaminantes estimada para el caso base.
C_0	valor de concentración del contaminante reportado por la simulación para P_0 .
P_0	menor valor del parámetro en cuestión en el rango estudiado.

Referencias

- Behera, S. N., Sharma M., Dikshit O. y Shukla S.P. (2011). GIS-Based Emission Inventory, Dispersion Modeling, and Assessment for Source Contributions of Particulate Matter in an Urban Environment. *Water Air Soil Pollution* 218, 423-436.

- Beyrich, F., Gryning, S. E., Joffre, S., Rasmussen, A., Seibert, P. y Tercier, P. (1996). On the determination of mixing height—a review. *Proceedings of the 4th Workshop on harmonization within atmospheric dispersion modeling for regulatory purposes*. Oostende.
- Beyrich, F. (1997). Mixing Height Estimation from Sodar Data- A Critical discussion. *Atmospheric Environment* 31, 3941-3953.
- Chapra, S. C. (1997). The “Modeling” environment. En: *Surface Water-Quality Modeling*, 317-343. The McGraw-Hill, Inc., NY.
- Chapra, S. C. y Canale, R. P. (2007). Aproximaciones y errores de redondeo. En: *Métodos Numérico para Ingenieros*, Pp. 53 - 77. The McGraw-Hill, Inc., México D.F.
- Espert, V. y López, P. A. (2000). Meteorología y climatología. En: *Complementos de la Tecnología del Medio Ambiente. Módulo: emisión y Dispersión de Contaminantes*. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia. Pp. 41-76. Editorial: U.P.V Ref. 2000.776.
- Fatehifar, E., Elkamel A., Alizadeh Osalu A. y Charchi A. (2008). Developing a new model for simulation of pollution dispersion from a network of stacks. *Applied Mathematics and Computation* 206, 662-668.
- Faulkner W. B., Shaw B. W. y Grosch T. (2008). Sensitivity of Two Dispersion Models (AERMOD and ISCST3) to Input Parameters for a Rural Ground-Level Area Source. *Journal of Air and Waste Management Association* 58, 1288-1296.
- Gujer, W. (2008). *Systems Analysis for Water Technology*. Library of Congress Control Number: 2008924075. Springer - Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-77277-4 DOI 10.1007/978-3-540-77287-1.
- Mandurino, C. y Vestrucci, P. (2009). Using meteorological data model pollutant dispersion in the atmosphere. *Environmental Modeling and Software* 24, 270-278.
- Marsili-Libelli, S. y Giusti E. (2008). Water quality modeling for small river basins. *Environmental Modeling and Software* 23, 451-463.
- Mehdizadeh, F. y Rifai H. S. (2004). Modeling point source plumes at high altitudes using a modified Gaussian model. *Atmospheric Environment* 38, 821-831.
- Mihailović, D. T. y Kallos G. (1997). A sensitivity study of a coupled soil-vegetation boundary-layer scheme for use in atmospheric modeling. *Boundary-Layer Meteorology* 82, 283-315.
- Psiloglou, B. E. y Kambezidis H. D. (2009). Estimation of the ground albedo for the Athens area, Greece. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71, 943-954.
- Rodríguez, V., Parra, J., Campos, A. y De la Peña, A. (2006). Modelación atmosférica de la calidad del aire en la ciudad de Chihuahua. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 5, Supl. 1, 15-21.
- Schulze, R. H. y Turner, D. B. (1995). *Practical Guide to Atmospheric Dispersion Modeling. Chapter 2: A Layman’s Crash Course on the Physics of the Atmosphere-Its Character, Variability, and Subjective Effect on Pollutant Releases*. Trinity Consultants Inc. 12801 North Central Expressway, Suite 1200 Dallas, Texas 75243. Pp. 2-6.
- Sharma S. y Chandra A. (2008). Simulation of air quality using an ISCST3 dispersion model. *Clean* 36, 118 - 124.
- U.S. Environmental Protection Agency (2011). *Technology Transfer Network. Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling. Meteorological Processors and Accessory Programs*. Disponible en: http://www.epa.gov/ttn/scram/metobsdata_procaccprogs.htm. Accesado: 9 octubre 2011.
- U.S. Environmental Protection Agency. *Appendix C Sensitivity Analysis of ISCST3 Air Dispersion Model. IWAIR Technical Background Document*. Disponible: <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/industrial/tools/iwair/iwairtxc.pdf>. Accesado: 18 octubre 2011.

U.S. Environmental Protection Agency. (1995). *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models*. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. Research Triangle Park, North Carolina 27711. EPA-454/B-95-003.

U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *PCRAMMET Guía del Usuario*. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. Research Triangle Park, NC 27711. EPA-454/B-96-001.