

# MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN UNA MINA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO USANDO ISC Y AERMOD

Jose Ignacio Huertas\*

María Elena Huertas

Jessica Garzón

Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz CIMA  
Tecnológico de Monterrey  
Eduardo Monroy Cardenas No. 2000. CP.50110. Toluca. México  
\*Tel (722) 2799990 ext 2113, jhuertas@itesm.mx

## Resumen

La región minera del departamento del Cesar, Colombia está conformada por 6 empresas mineras con una producción aproximada de  $70 \times 10^6$  ton/año de carbón mediante explotación a cielo abierto. Esta región cuenta con una red de monitoreo de calidad del aire que reporta sobrepasos a la norma de concentración diaria y anual de PST (Partículas Suspendidas Totales). Debido a la contaminación generada en cada una de las actividades desarrolladas por las empresas mineras, es necesario establecer la proporción en que cada mina afecta a las poblaciones ubicadas en la zona minera, por tal razón la autoridad ambiental requiere contar con una herramienta que modele la dispersión de PST. Para atender dicha necesidad, se desarrolló una metodología unificada de inventario de emisiones de PST para minería de carbón a cielo abierto. Esta metodología fue implementada en las 6 empresas mineras que operan en la región. Posteriormente, se recolectó y procesó la información topográfica y meteorológica disponible para la región y finalmente se modeló la dispersión de material particulado en ISC y AERMOD con datos meteorológicos recolectados por 3 estaciones locales durante el año 2009. Los resultados obtenidos fueron contrastados contra los valores medidos por la red de monitoreo de calidad del aire que se encuentra operando en la región. Se obtuvieron coeficientes de correlación superiores a 0.7 lo cual es aceptable en consideración a la alta incertidumbre en los datos de inventario de emisiones. Con base en los resultados de la modelación, se delimitaron las regiones que de acuerdo a la legislación local corresponden a áreas fuente de alta, media y moderada contaminación. Finalmente, se definió la contribución de cada empresa minera sobre cada centro poblado.

**Palabras claves:** Dispersión, Modelación de la calidad del aire, AERMOD, ISC

## 1. Introducción

La zona minera de carbón a cielo abierto del departamento del Cesar, Colombia, se encuentra constituida por 6 empresas mineras cuya producción de carbón fue aproximadamente de  $70 \times 10^6$  ton/año para el 2009. Esta región es una de las zonas mineras más grandes del mundo (1) y tiene un alto impacto ambiental y económico en la región. La red monitorio de calidad del aire ubicada en esta zona, reportó concentraciones de PST (partículas suspendidas totales) que superaban la norma diaria y anual establecida por la regulación ambiental colombiana. Por tanto, la autoridad ambiental colombiana requirió de una herramienta de modelación de la calidad del aire que le permitiera:

- Definir las áreas fuente de contaminación
- Establecer la proporción en que cada mina afecta a las poblaciones ubicadas en la zona minera

Por tanto, para satisfacer estas necesidades, se realizó la modelación de la calidad del aire para PST de la zona minera del departamento del Cesar. Se hizo uso de los modelos Gaussianos ISC y AERMOD. ISC es el modelo tradicional utilizado por las empresas mineras y AERMOD es el modelo de calidad del aire recomendado por la US EPA (1). A continuación se presenta la implementación de estos dos modelos.

## 2. Implementación de modelos de calidad del aire

La metodología para modelar la calidad del aire, es presentada en la figura 1. El procedimiento es dividido en tres pasos: Datos de entrada (geografía, meteorología y emisiones) correr el modelo y realizar un post procesamiento de los datos.

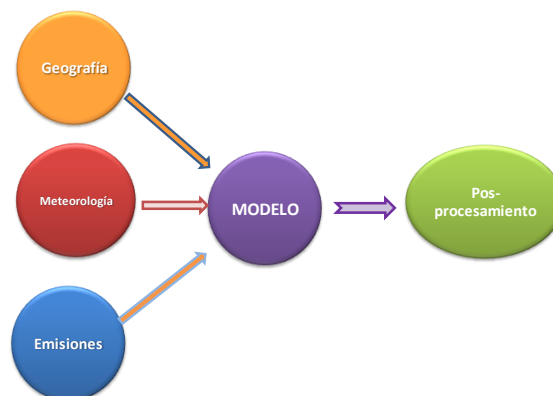


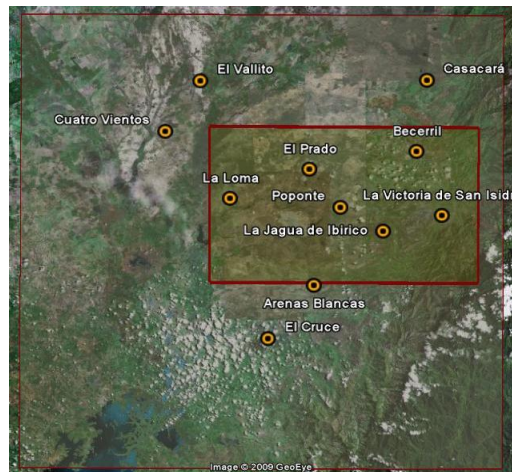
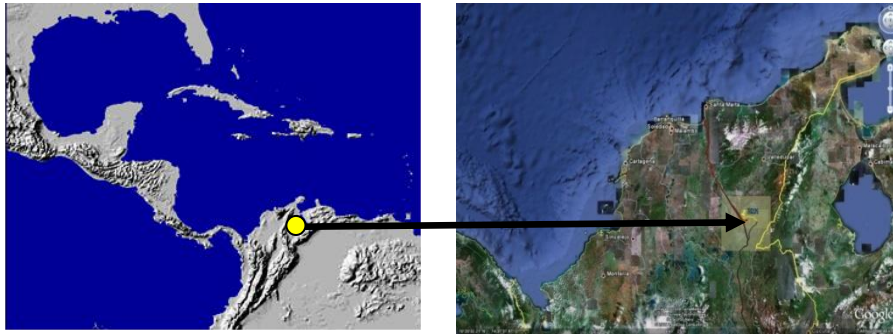
Figura 1. Metodología para modelar la calidad del aire

## **2.1 Geografía**

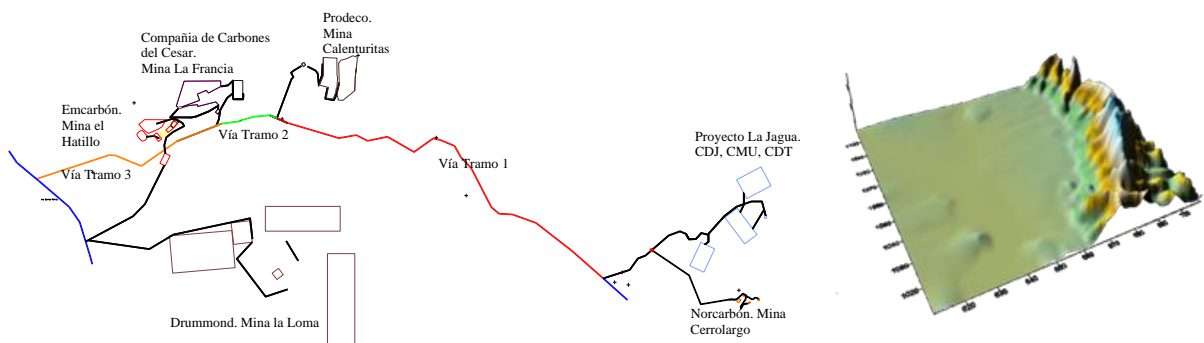
La zona de explotación de carbón a cielo abierto está situada al norte de Colombia, al occidente de la cordillera Oriental de los Andes y al sur de la Sierra Nevada de Santa Marta. La figura 2 muestra la región de modelación, la ubicación de las fuentes de emisión y de los centros poblados desde este momento denominados receptores sensibles.

Se definieron 2 regiones de modelación. La primera región está definida por la coordenada suroccidental UTM (610,1010) con un área de cobertura de  $89 \times 89 \text{ km}^2$  y resolución de 1.14 km. Para alcanzar esta resolución fue necesario dividir la región de modelación en 4 áreas contiguas, debido a que ISC y AERMOD limitan el número de receptores a 1200 y 1500 respectivamente. La segunda región de modelación está definida por la coordenada suroccidental UTM (650,1050) con un área de cobertura de  $45 \times 25 \text{ km}^2$  y una resolución de 0.5 km.

La topografía de la región se caracteriza por una gran zona plana acompañada de una región de media y alta montaña como se muestra en la figura 3. La información de elevación digital y uso y cobertura de suelos, mostrada en la figura 2, fue obtenida de la base de datos de Recursos de Sistemas de Información Geográfica (2). La elevación digital presenta una resolución de 0.9 km y por otro lado el uso y cobertura de suelos tiene una resolución de 1 kilómetro (3).



*Figura 2. Ubicación de la zona de explotación de carbón a cielo abierto en Colombia. Se muestran las dos regiones de modelación, la ubicación de las fuentes de emisión y de los receptores sensibles.*



*Figura 3. A la izquierda, se muestran los polígonos de emisión de material particulado y a la derecha se muestra la topografía de la región de modelación.*

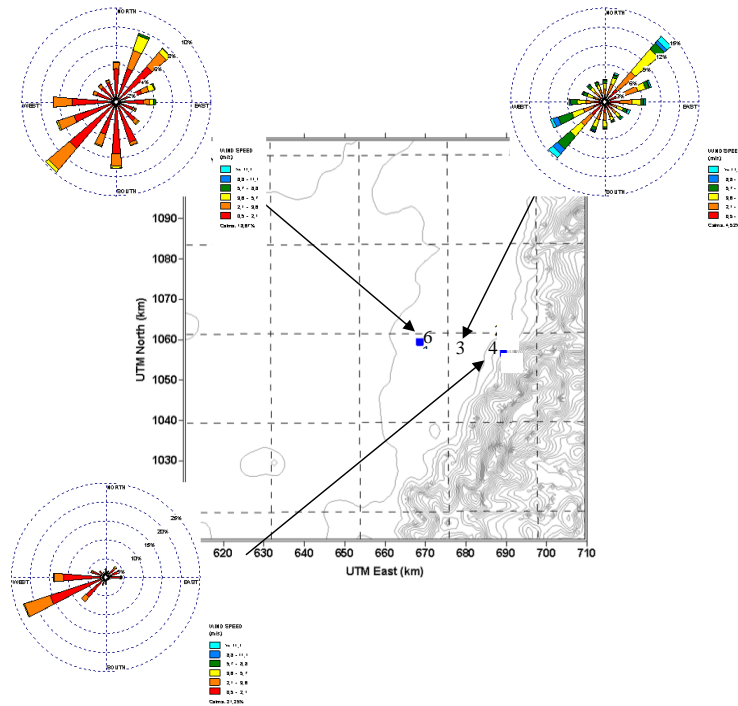
## 2.2 Meteorología

Debido a las características topográficas de la región, la meteorología de la región fue caracterizada por varias meteorologías. La tabla 1 muestra la información reportada por las estaciones meteorológicas utilizadas en el presente estudio. Se procesó dicha información por medio de análisis estadístico con intervalos de confianza del 95 %, obteniendo gráficos horarios y mensuales de temperatura y radiación. Adicionalmente, se realizaron gráficos de rosas de vientos como se presenta en la figura 4. Se observan diferencias en la tendencia que tienen los vientos en zona plana comparado con la zona montañosa.

*Tabla 1. Información meteorológica usada para simular la dispersión de material particulado en la zona de explotación de carbón a cielo abierto en el Departamento del Cesar, Colombia.*

<b>Nombre</b>		Borrego	Cerrolargo	Calenturitas	Agustín Codazzi
<b>Tipo</b>		Met*	Met	Met	Obs <sup>+</sup>
<b>Localización</b>	<b>x</b>	---	689.23	665.65	690.1
	<b>y</b>	---	1056.85	1067.29	1089.3
<b>Periodo</b>	<b>Día de inicio</b>	01/01/2009	01/01/2009	01/01/2009	02/09/2008
	<b>Día final</b>	31/12/2009	01/12/2009	24/10/2009	02/04/2009
<b>Parámetros primarios</b>	<b>Velocidad</b>	√	√	√	
	<b>Dirección</b>	√	√	√	
	<b>Max velocidad</b>	√	√	√	
	<b>Max dirección</b>	√	√	√	
	<b>Temperatura</b>	√	√	√	
	<b>Presión</b>	√	√	√	
	<b>Radiación</b>	√		√	
	<b>Precipitación</b>	√	√	√	√
	<b>Humedad</b>	√	√	√	
	<b>Evaporación</b>	√	√	√	
	<b>Nubosidad</b>				√
<b>Resolución</b>	<b>Minutos</b>	30	30	15	----
<b>% disponibilidad</b>		99.7	99.7	95.1	----
<b>Observaciones</b>		Operado por Drummond	Operado por Norcarbon	Operado por Prodeco	

*Nota: \*Meteorológica. <sup>+</sup> Observatorio*



*Figura 4. Rosa de los vientos obtenida por tres estaciones meteorológicas ubicadas en la región minera del Departamento del Cesar*

Debido a la ausencia de radiosondeos en la región, se usó la metodología recomendada por la *Guía de modelación de la calidad del aire* (metodología de Sozzi) (4) para estimar parámetros secundarios meteorológicos, tales como la altura de mezcla convectiva y mecánica. Adicionalmente, se implementó la metodología del preprocesador meteorológico AERMET con el que cuenta AERMOD. Los resultados de la modelación mostraron diferencias despreciables al usar estos 2 métodos como se presenta en la figura 5. Por otro lado, la nubosidad fue obtenida de la estación tipo observatorio Agustín Codazzi, la cual está ubicado aproximadamente 57 km al norte de la región minera. Esta estación registra nubosidad a las 7, 13 y 19 horas. Las nubosidades para las demás horas del día fueron obtenidas mediante regresión lineal.

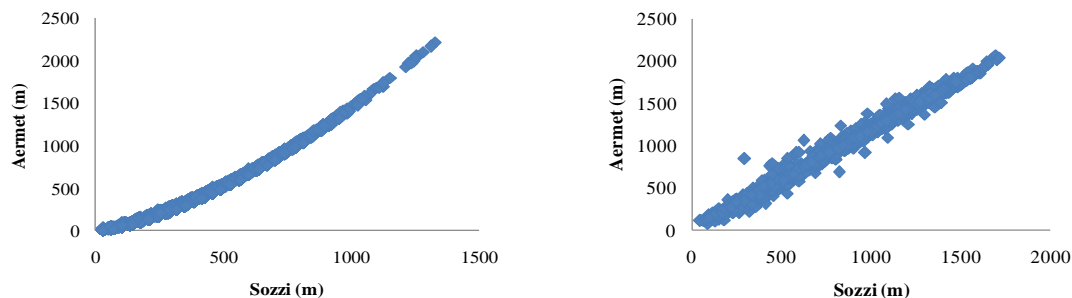


Figura 5. Comparación entre metodología Sozzi y AERMET para los parámetros secundarios meteorológicos: altura de capa de mezcla mecánica (izquierda) y convectiva (derecha).

### 2.3 Emisiones

Se desarrollo una metodología unificada para realizar inventarios de emisiones en zonas de explotación de carbón a cielo abierto reportada en la referencia (5). Cada una de las empresas mineras que operaban en la región en el año 2009 uso dicha herramienta para reportar el promedio anual de sus emisiones de PST. La tabla 2 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 2. Emisiones de PST para el año 2009 de las empresas que operan en la zona minera del Departamento del Cesar estimadas usando la metodología unificada del CIMA.

Fuente	gr PST/(m <sup>2</sup> -s)						
	1	2	3	4	5	6	7
Pit	5.0681E-05	3.4910E-06	1.1912E-05	9.1367E-04	9.8477E-06	2.6908E-05	1.2887E-05
Botadero	8.6049E-06	5.4693E-06	5.8058E-06	4.3629E-04	1.0434E-05	6.6505E-06	7.0641E-06
Acopio	3.5024E-05	2.0435E-04	1.3037E-03	2.0729E-03	2.9833E-03	1.4394E-04	5.3191E-05
Vía-Pit-Bot	2.1887E-04	5.5485E-06	1.4318E-04	2.1503E-04	3.5172E-05	7.2359E-05	2.6565E-05
Vía-Pit-Pat	4.3951E-05	1.0493E-07	1.4638E-05	2.3989E-07	1.1574E-06	8.8889E-04	9.9652E-06
Vía-Perim	5.4694E-05	1.4430E-07	0.0000E+00	9.3328E-07	3.1034E-06	4.3277E-05	3.8399E-06
<b>Total gr PST/(m<sup>2</sup>-s)</b>	3.5713E-04	2.1911E-04	1.4792E-03	3.6390E-03	3.0430E-03	1.1820E-03	1.1351E-04
<b>Total Kg PST/año</b>	3.9276E+06	7.4812E+05	2.3139E+06	1.6727E+06	3.0230E+06	1.4819E+07	9.0708E+05
<b>Producción Ton carbón/año</b>	1.8148E+06	1.0438E+06	5.9984E+06	6.0000E+05	4.7230E+06	1.8940E+07	1.6000E+06
<b>Kg PST/Ton carbón</b>	2.2	0.7	0.4	2.8	0.6	0.8	0.6

Se obtuvo que en promedio una empresa minera genera 0.72 kg de PST por tonelada de carbón extraído, como se observa en la figura 5. Adicionalmente, se encontró que se

requiere un metro cuadrado para extraer una tonelada de carbón al año y mantienen eficiencias de control de emisiones por riego en vías no pavimentadas del 99%.

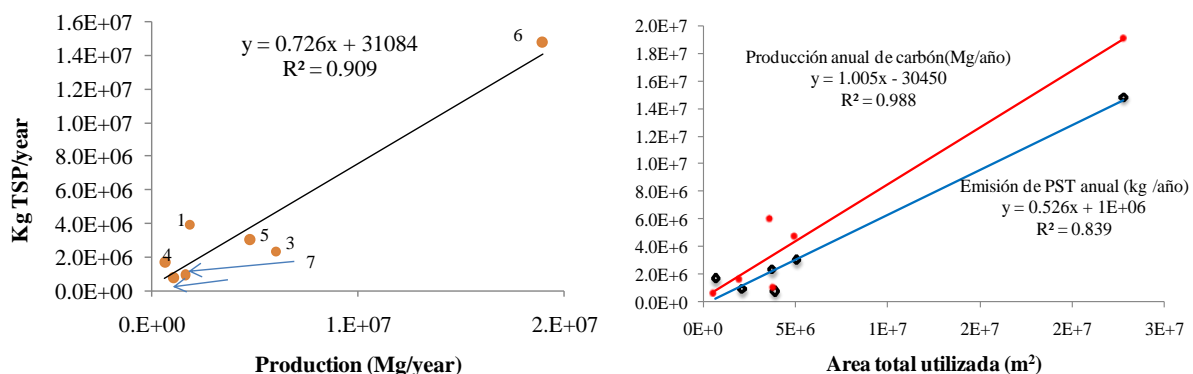


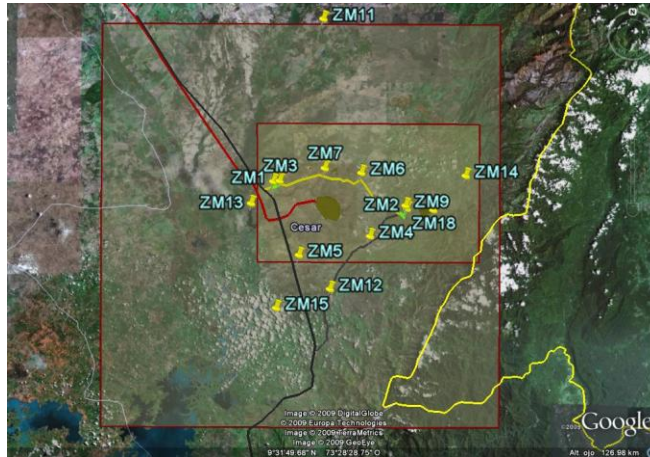
Figura 5. Índice de emisión (derecha) e índice de uso del suelo (izquierda)

La información presentada en el inciso 2.1, 2.2 y 2.3 fue ingresada a los modelos ISC y AERMOD cuyos resultados se reportan en la sección 4 de este trabajo.

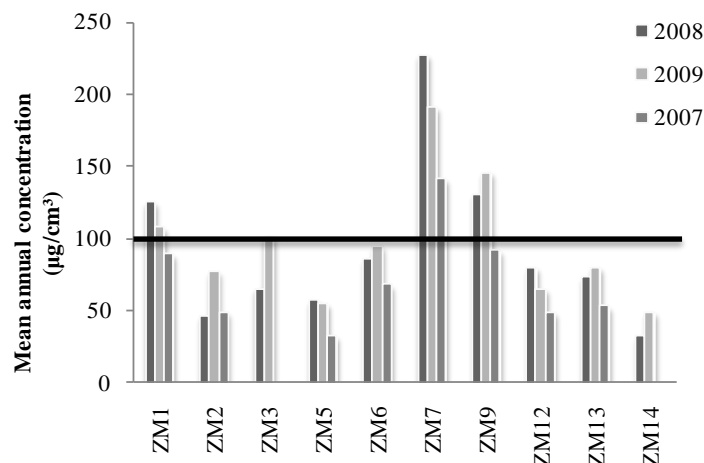
### 3. Monitoreo de la calidad del aire y estimación de la concentración de fondo

La región minera cuenta con la red de monitoreo de la calidad del aire, la cual reporta la concentración de PST. La figura 6 presenta la ubicación de cada una de las estaciones de monitoreo de la región minera. Se ha encontrado que las estaciones ZM1: La Loma, ZM7: Plan Bonito Norte y ZM9: La Jagua Vía, son las estaciones que registran problemas de sobrepaso de la norma de calidad del aire diaria y anual para PST como se presenta en la figura 7. Estas son estaciones ubicadas a los costados de la vía pública de transporte de carbón, con segmentos no pavimentados.





*Figura 6. Ubicación de las estaciones que componen la red de monitoreo de calidad del aire que opera en la región minera del Departamento de Cesar.*



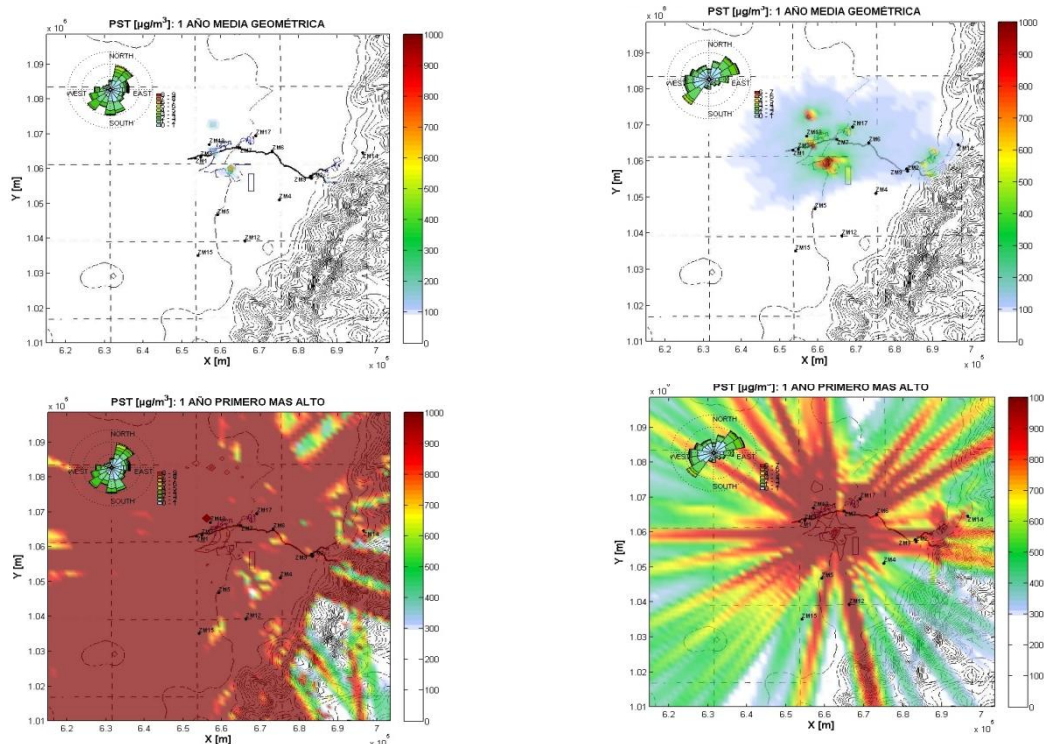
*Figura 7. Concentración media geométrica anual de PST reportadas por la red de monitoreo de calidad del aire de la región minera del Departamento del Cesar.*

Se eligió el valor reportado por la estación ZM14: Estados Unidos, como concentración de fondo para PST, la cual registra una media geométrica anual de  $48.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lo anterior, debido a que es la estación ubicada más al este de la región minera (9.6 km) y que algunas otras estaciones meteorológicas no reportan concentración de este contaminante.

#### 4. Resultados y discusión

Mediante ISC y AERMOD se obtuvieron los promedios diarios de PST. Para permitir la visualización de los resultados y el cálculo de la media geométrica anual, se desarrolló en herramienta en Matlab que entregara esta información de manera automática.

ISC y AERMOD solo permiten ingresar una meteorología dentro de los parámetros de entrada, por tanto se corrieron los modelos en tres ocasiones con diferentes meteorologías y de acuerdo con los resultados obtenidos se decidió hacer uso de la meteorología de la estación Calenturitas. Lo anterior, debido a que esta meteorología es la más representativa de la región minera, como se observó en las correlaciones obtenidas al comparar los resultados del modelo vs los valores reportados por la red de monitoreo de la calidad del aire. Por tanto, todos los resultados que se presentan en este trabajo corresponden a los obtenidos por medio de la meteorología de la estación Calenturitas. La figura 8 compara los resultados para PST obtenidos por medio de ISC y AERMOD para el año 2009.



*Figura 8. Media geométrica anual de PST (Superior) y primeros promedios aritméticos máximos diarios de PST (Inferior) obtenidos en AERMOD (Izquierda) y ISC (Derecha) para la región de modelación de 45x25 km<sup>2</sup>. La región coloreada indica sobrepasos en la norma anual y diaria de calidad del aire. Se incluye la concentración de fondo.*

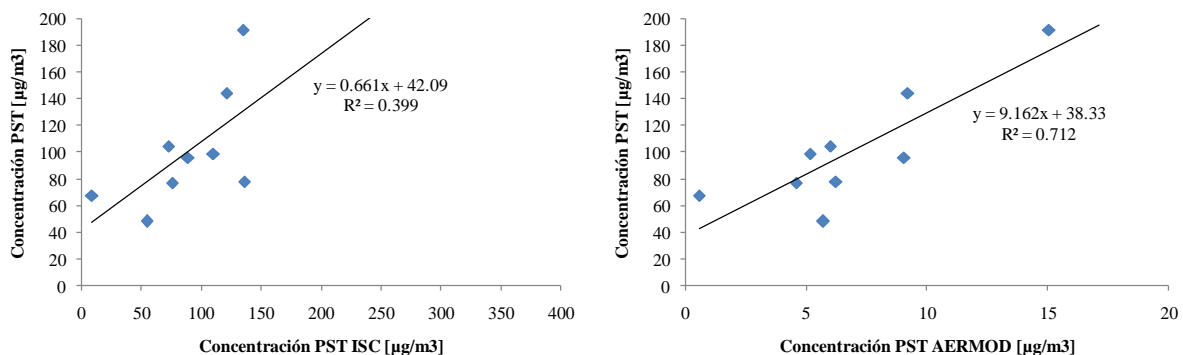
De la figura 8 se puede concluir:

- Los modelos de calidad del aire implementados estiman sobrepasos de la norma anual para PST en los alrededores de empresas mineras.
- Para un mismo modelo y una misma meteorología el resultado de concentración es el mismo independientemente de la resolución de la malla que se use.
- Independientemente del modelo y de la meteorología empleada, los resultados obtenidos muestran que las zonas de más alta concentración coinciden con la ubicación de las fuentes de emisión. Esta concentración disminuye con la distancia a la fuente de emisión. Se forman patrones en forma de islas. No existen regiones de alta concentración (distintas a las fuentes de emisión) que sean originadas por la contribución simultánea de diferentes fuentes.
- Los resultados reportados por ISC y AERMOD con una misma meteorología son diferentes. AERMOD estima mayores concentraciones a nivel superficie que ISC. Por tanto la región de impacto estimada por AERMOD es mayor que la estimada por ISC, para el caso de los primeros máximos.
- La región más grande con sobrepasos de la norma anual de PST es la ubicada alrededor de la empresa 6.
- La vía del carbón, con segmentos pavimentados y con control de emisiones por riego, solo presenta sobrepasos de la norma anual de PST y  $PM_{10}$  para el tramo ubicado al norte de la empresa 6. La resolución de las mallas de receptores utilizadas no es lo suficientemente amplia para visualizar la región de impacto de las emisiones de la propia vía. En otras palabras la región de impacto de las emisiones de la vía es menor a 0.5 km.
- No es posible estimar un radio de impacto (región con sobrepaso de norma anual) desde una fuente de emisión por cuanto este depende de la masa de contaminante emitida y de las condiciones meteorológicas.

#### **4.1 Comparación de resultados contra red de monitoreo**

La figura 9 compara los resultados obtenidos por los modelos de medias geométricas anuales de PST en cada uno de los receptores discretos contra los valores medidos por la

red de monitoreo de calidad del aire de la zona minera del Departamento del Cesar. La figura 9 muestra que existe una correlación aceptable entre los valores estimados por ISC y AERMOD y los valores medidos por la red de monitoreo.

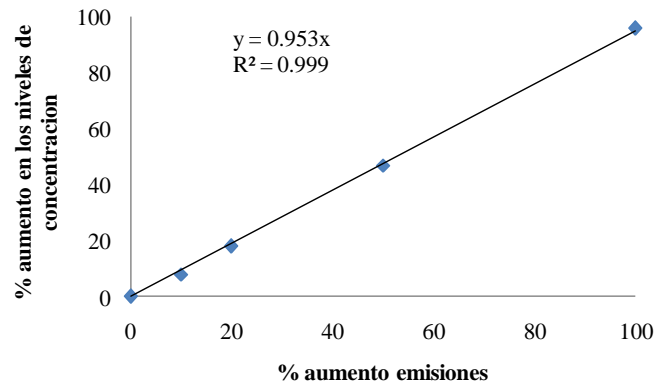


*Figura 9. Comparación entre los valores medidos por la red de monitoreo de calidad del aire y los resultados obtenidos por medio de ISC (Izquierda) y AERMOD (Derecha) para medias geométricas anuales de PST para la meteorología de la estación Calenturitas operada por Prodeco.*

## 4.2 Análisis de sensibilidad

Con el propósito de analizar la sensibilidad de los resultados a los datos de emisiones se procedió a observar los valores reportados por AERMOD cuando las emisiones aumentan un 10%, 20%, 50% y 100%. Para este caso la sensibilidad se define como la fracción obtenida entre el porcentaje de variación de los resultados de concentración y el porcentaje de variación de las emisiones. La figura 10 muestra la sensibilidad como la pendiente de la regresión obtenida al comparar el porcentaje de aumento de las concentraciones y el porcentaje de incremento de las emisiones. La figura 10 muestra que la sensibilidad es del 95%. Es decir por cada Kg/año que aumenten las emisiones de PST se obtiene un aumento en las concentraciones de  $0.953 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Este análisis permite concluir que los resultados presentados son altamente sensibles a los datos sobre emisiones.



*Figura 10. Análisis de sensibilidad. Porcentaje de aumento de las concentraciones y el porcentaje de incremento de las emisiones*

Un análisis similar fue realizado para el caso de la sensibilidad de los resultados del modelo ante variaciones en las emisiones en las vías. Se encontró que esta sensibilidad es de 0.055%.

#### **4.3 Definición de los límites de las áreas fuente de contaminación**

De acuerdo a la legislación colombiana se definen las *áreas fuente de contaminación alta, media, baja y marginal* como aquellas en que la concentración diaria de contaminantes, excede con una frecuencia igual o superior al 75%, 50%, 25% y 10%, respectivamente, la norma respectiva de concentración anual. Con base en esta clasificación la autoridad ambiental colombiana define la prioridad de sus políticas de descontaminación.

Con el fin de definir los límites de las áreas fuente de contaminación se determinó para cada receptor sensible, mediante AERMOD, el impacto alto, medio, bajo, o marginal. La figura 10 muestra el resultado obtenido aplicando esta metodología.

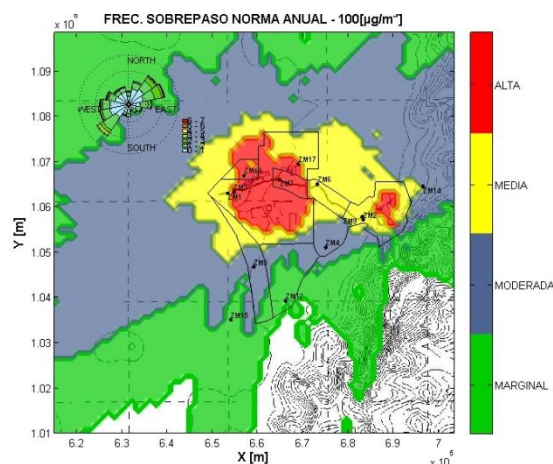


Figura 10. Límites de las áreas fuente de contaminación obtenidas para la zona minera del Departamento del Cesar, Colombia, con base en los resultados de la modelación de la calidad del aire usando AERMOD.

#### 4.4 Contribución de cada empresa a la contaminación en cada receptor sensible

Finalmente, se usaron los resultados de la modelación de la calidad del aire para identificar la contribución de cada una de las fuentes de emisión a la contaminación en cada uno de los receptores sensibles ubicados en la región minera. La figura 11 muestra el resultado obtenido por AERMOD usando la meteorología de Calenturitas.

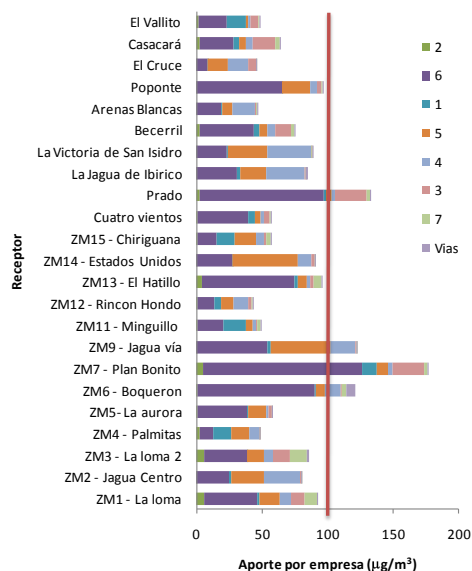


Figura 11. Porcentaje de contribución de cada una de las fuentes de emisión a la contaminación por PST en cada uno de los receptores sensibles ubicados en la región minera del Departamento del Cesar.

## 5. Conclusiones

En atención a la necesidad de la autoridad ambiental de contar con un modelo de calidad del aire para la región de explotación de carbón a cielo abierto del Departamento del Cesar, Colombia, se modeló en ISC y AERMOD la dispersión de PST emitido por cada una de las empresas presentes en la región y por la vía pública con alto flujo vehicular y con tramos no pavimentados. Lo anterior siguiendo los procedimientos recomendados por la Guía de modelación de calidad del aire y la Metodología unificada para realizar inventario de emisiones de PST en zonas de explotación de carbón a cielo abierto. Adicionalmente se evaluaron 3 meteorologías y 2 metodologías para estimar la altura de capa de mezcla y se desarrollaron pos-procesador propios para analizar los resultados arrojados por los modelos. Los resultados permitieron concluir que:

- Los modelos de calidad del aire implementados estiman sobrepasos de la norma diaria y anual de PST en los alrededores de empresas mineras. Los resultados obtenidos muestran que las zonas de más alta concentración coinciden con la ubicación de las fuentes de emisión. Esta concentración disminuye con la distancia a la fuente de emisión. Igualmente se observó que no existen regiones de alta concentración (distintas a las fuentes de emisión) que sean originadas por la contribución simultánea de diferentes fuentes.
- Los resultados reportados por ISC y AERMOD con una misma meteorología son diferentes. AERMOD estima mayores concentraciones a nivel superficie que ISC. Por tanto la región de impacto estimada por AERMOD es mayor que la estimada por ISC.
- La vía del carbón, con segmentos pavimentados y con control de emisiones por riego, solo presenta sobrepasos de la norma anual de PST para el tramo ubicado al norte de la empresa 6. La resolución de las mallas de receptores utilizadas no es lo suficientemente amplia para visualizar la región de impacto de las emisiones de la propia vía. En otras palabras la región de impacto de las emisiones de la vía es menor a 0.5 km.
- Existe una alta correlación entre los valores estimados de concentración de PST y los medidos por la red de monitoreo de calidad del aire. Por tanto, los resultados obtenidos pueden ser utilizados para evaluar el impacto de medidas de descontaminación que la autoridad ambiental considere necesarias implementar en la región. De igual manera,

permite a la autoridad ambiental identificar el porcentaje de contribución de cada fuente de emisión a la contaminación de cada receptor sensible ubicado en la zona minera.

## **6. Agradecimientos**

El presente trabajo fue financiado por el Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. Los autores también agradecen los aportes de los Ingenieros Dumar Camacho, Natalia Navarrete, Sebastián Izquierdo y Enrique González.

## **7. Bibliografía**

1. **EPA, US. Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling - SCRAM.** *<http://www.epa.gov/scram001/>*. 2008.
2. **Webgis.** *<http://www.webgis.com/>*. 2008.
3. **Scire J, Robe F, Fernau M, y Amartino R.,** *User's guide for the CALPUFF dispersion model. USEPA* . 2000.
4. **Monterrey, MAVDT y Tecnológico de.** *Guía nacional de modelación de calidad del aire.* 2008.
5. **Huertas J, Camacho D.,** *Metodología unificada de inventario de emisiones de PST y PM10 en zonas de explotación de carbón a cielo abierto.* 2009.
6. **MAVDT y Tecnológico de Monterrey.** *Guía nacional de modelación de calidad del aire.* Bogotá. 2008.
7. **Integral: Ingenieros Consultores.** *Modelación calidad del aire. Plan de manejo ambiental unificado. La Jagua; operación conjunta de CDJ, CMU y CET.* Colombia : s.n., Septiembre de 2008.
8. **K2 Ingeniería.** *Estimación de emisiones y modelo de dispersión de material particulado de la mina Calenturitas de C.I PRODECO S.A. Informe 2008-08-31.* Colombia. 2008.
9. **K2 Ingeniería.** *Estimación de emisiones y modelo de dispersión de particulado de la mina cerrolargo de Norcarbon.* MAVDT, 2008.
10. **K2 Ingeniería.** *Evaluación de la calidad del aire Compañía Carbones del Cesar. Modelo de dispersion.* Colombia : MAVDT, 2007.



11. **Ltda., Evaluacion y control ambiental.** *Modelamiento de calidad del aire en el escenario y en escenario futuros para la operacion de los proyectos mineros del centro del Cesar.* s.l. : Drummond, 2008.
12. **Benavides, O. Henry.** Pronóstico de la concentración de material particulado por chimeneas industriales en Bogotá. [En línea] Diciembre de 2003.  
<http://www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/Tesis%20Henry%20Benavides.pdf>.
13. **WHO.** Organizacion Mundial de la Salud. <http://www.who.int/es/>. 2008.
14. **Petro, S.** *Modelación de Calidad del Aire Cerrejón. I Congreso Colombiano de Calidad del Aire y Salud Pública.* Manizales, Colombia : s.n., Marzo de 2007.
15. **Ordieres J. B, Vergara E. P, Alba E.,** *Artificial neural network approach for modelling PM10 levels in logroño area, (spain), using the mixing layer height.* Universidad de La Rioja, c/ Luis de Ulloa 20, 26004, Logroño, La Rioja. . Spain.
16. **NTIS.** National Technical Information Service. <http://www.ntis.gov/>. 2008.
17. **Murcia F.** *Simulación de la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles en Bogotá. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia.* . Bogotá D.C. 2002.
18. **Missouri Department of Natural Resources.** Form 2.8. Storage Pile Worksheet.  
[www.dnr. mo.gov/forms/](http://www.dnr.mo.gov/forms/).
19. **MET ONE.** MET ONE. <http://www.metone.com/particulate-airquality.htm>. 2008.
20. **MAVDT.** *Decreto 979 de 2006.* Colombia 2006.
21. **MAVDT.** *Decreto 948 de 1995.* 1995.
22. **IDEAM.** <http://www.ideam.gov.co/sectores/aero/index4.htm>. 2008.
23. **Huertas J. y otros.** *Plan preliminar de descontaminación de las zonas de explotación carbonífera a cielo abierto en el departamento del Cesar. Centro de Investigación en Ingeniería Automotriz - CIMA.* . México . Julio de 2007.
24. **Huertas J.** *Plan preliminar de descontaminación.* MAVDT, 2008.
25. **Huertas.** *Plan preliminar de descontaminacion.* MAVDT.
26. **Evaluacion y control ambiental Ltda.** *Modelamiento de calidad del aire en el escenario y en escenario futuros para la operacion de los proyectos mineros del centro del Cesar.* Drummond, 2008.

27. **Estimación de emisiones y modelo de dispersión de material particulado de la mina Calenturitas de C.I PRODECO S.A. K-2Ingeniería.** *Informe 2008-08-31. Colombia.* 2008.
28. **EPA US: Office of Air Quality and Standars.** Revision of Emission Factors for AP-42. Chapter 11: Mineral Products Industry. Section 11.9: Western Surface Coal Mining. [En línea] 1998. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>.
29. **EPA US :Office of Air Quality and Standards.** Revision of Emission Factors for AP-42. Chapter 13: Miscellaneous Source. Section 13.2.4: Aggregate Handling and Storage Piles (Fugitive Dust Sources). For U.S. Environmental Protection Agency: Office of Air Quality and Standards,. 2006,. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>.
30. **EPA US : Office of Air Quality and Standars.** Revision of Emission Factors for AP-42. Chapter 13: Miscellaneous Source. Section 13.2.2: Unpaved Roads (Fugitive Dust Sources). 2006. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>.
31. **Departamento de Servicios Técnicos, Carbones del Cerrejón LLC.** *Modelación de Calidad del Aire para Plan Minero 2007.* 2007.
32. **Dawidowski L., Gómez D., Reich S.,.** *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental atmosférico. Unidad de Actividad Química. Centro Atómico Constituyentes. Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina.* 1997.
33. **Cowherd. C. Cowherd, Jr. et al.,** *Control Of Open Fugitive Dust Sources, EPA-450/3-88-008, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, September 1988.*
34. **Benson P.** *CALINE 3 - A versatile dispersion model for predicting air pollutant levels near highways and arterial strees.* US. 1979.
35. **ASTM.** *Standard Test Method forCollection and Measurement of Dustfall (Settleable Particule Matter) ASTM D 1739.* 2004.
36. **Amaya M., Martínez A.** *Evaluación de la Calidad del Aire, Compañía Carbones del Cesar. s.l. : K-2 Ingeniería LTDA,* 2007.
37. **Álvarez Gisela.** *Diseño y construcción de una canal de aire en la Facultad de Ingeniería de la Univerdad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas .* Argentina. 2003.
38. **MAVDT.** *Resolucion 412 de 2008.* 2008.

39. **MAVDT.** *Resolucion 2179 de 2007.* 2007.
40. **NOAA.** NOAA/ESRL Radiosonde Database Access. *<http://raob.fsl.noaa.gov/>*.2008.
41. **E&C evaluacion y controll ambiental ltda.** *MODELAMIENTO DE CALIDAD DE AIRE EN LA SITUACIÓN ACTUAL Y EN ESCENARIOS FUTUROS PARA LA OPERACIÓN DE LOS PROYECTOS MINEROS.* MAVDT, 2008.
42. **E&C evaluacion y control ambiental ltda.** *Modelación de la calida del aire en la situación actual y en escenarios futuros para la operación de los proyectos mineros.* MAVDT, 2008.