

# Aplicación del programa AERMOD para modelar dispersión de $PM_{10}$ emitido por equipos de calefacción a leña en la ciudad de Constitución

Application of the AERMOD software for modeling  $PM_{10}$  dispersion emitted by wood-burning heating equipments in Constitución city

Fecha de entrega: 14 de diciembre 2010

Fecha de aceptación: 28 de abril 2011

Adrián Silva y Dagoberto Arcos

Centro Regional de Estudios Ambientales CREA, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Av. Cristóbal Colón 2766, Talcahuano, Chile, asilva@ucsc.cl, darcos@ucsc.cl

*En este trabajo se estiman las tasas de emisión y cargas de  $PM_{10}$  mediante el programa computacional AERMOD para el período invernal del 2009 y usando 25 fuentes compuestas de calefacción a leña distribuidas en la zona urbana habitada de la ciudad de Constitución. Se determinan concentraciones de 24 horas, donde las tasas de emisión y cargas no superan en ningún punto el límite de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{10}$  establecido en la normativa chilena D.S. 59/98, así como también, aquellas tasas y cargas en que sí se supera la normativa en 1, 2 y 3 ó más puntos. Para no superar la norma, la tasa de emisión promedio por equipo calefactor debe ser inferior a  $7,5 \text{ g/h}$  de  $PM_{10}$ . Se supera la norma en 1 y 2 puntos, cuando la tasa de emisión promedio por equipo calefactor está entre 10 y  $22,5$  y entre 25 y  $40 \text{ g/h}$  de  $PM_{10}$  respectivamente. Valores superiores a  $45 \text{ g/h}$  generan nuevos puntos sobre  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En cuanto a la carga de  $PM_{10}$  para no superar la norma, los valores deben ser menores a  $83 \text{ kg/d}$ , y para superar la norma en 1 y 2 puntos, deben ser entre  $83$  y  $249$ , y entre  $249$  y  $443 \text{ kg/d}$ , respectivamente. Los dos primeros puntos que superan los  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , están en las coordenadas  $736700 \text{ mE} - 6085700 \text{ mS}$  y  $734900 \text{ mE} - 6087600 \text{ mS}$  (UTM WGS 84). Se sugiere realizar monitoreos de calidad del aire que permitan calibrar y validar el modelo usado en la zona de estudio.*

*In this paper emission rates and loads of  $PM_{10}$  are estimated using the software AERMOD for the winter period of 2009 and 25 sources composed of firewood heating distributed in an inhabited urban area of Constitución city. Where emission rates and loads do not exceed in any point the limit of  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $PM_{10}$  established by the Chilean regulation DS 59/98, as well as those rates and loads which do exceed the regulations in 1, 2 and 3 or more points, were determined based on 24-hours concentrations. To not exceed the regulation, the average emission rate of a heating equipment must be lesser than  $7.5 \text{ g/h}$  of  $PM_{10}$ . This regulation is exceeded in 1 and 2 points, when the average emission rate of firewood heating is between 10 and  $22.5$  and between 25 and  $40 \text{ g/h}$  of  $PM_{10}$  respectively. Values higher than  $45 \text{ g/h}$  generate new points over  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Concerning the load of  $PM_{10}$  does not exceed the regulation,  $PM_{10}$  load values must be lesser than  $83 \text{ kg/d}$ , and to exceed the regulation in 1 and 2 points, they must be between  $83 \text{ kg/d}$  and  $249 \text{ kg/d}$  and between  $249 \text{ kg/d}$  and  $443 \text{ kg/d}$ , respectively. The first two points in excess of  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  are in the geographical coordinates  $736700 \text{ mE} - 6085700 \text{ mS}$  and  $734900 \text{ mE} - 6087600$  (UTM WGS 84). It is suggested to carried out air quality monitoring to calibrate and validate the model used in the study area.*

Palabras clave: programa AERMOD, tasa de emisión, calefacción a leña, material particulado  $PM_{10}$ , norma primaria de calidad del aire

Keywords: AERMOD software, emission rate, firewood heating, particulate matter  $PM_{10}$ , primary standard of air quality

## Introducción

A medida que las ciudades crecen sin la implementación de una regulación y controles adecuados, pueden aparecer una serie de problemas ambientales, entre ellos, la contaminación atmosférica por partículas suspendidas. Dentro de las partículas suspendidas en la atmósfera, se

denomina “respirables” a las de un diámetro menor o igual a  $10 \mu\text{m}$  ( $PM_{10}$ ) por su capacidad de introducirse en las vías respiratorias (Oyarzún, 2010). Los componentes del material particulado son principalmente hollín, plomo, sulfatos e hidrocarburos (Gil *et al.*, 1997).

La contaminación aérea por material particulado afecta

negativamente la calidad del aire y la salud de las personas (Sánchez y Morel, 1995). Estudios realizados primero en Santiago y luego en Temuco, han confirmado los resultados comunicados en publicaciones internacionales que han establecido que por cada 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de elevación de los niveles de  $\text{PM}_{10}$  en 24 horas, se produce en promedio un aumento de alrededor del 3% de la mortalidad general. También estos estudios han detectado que el aumento de  $\text{PM}_{10}$  se asocia a un aumento de la mortalidad por causas respiratoria y cardiovascular (Oyarzún, 2010), y a fenómenos irritativos como tos crónica, ronquera, síntomas respiratorios nocturnos, neumopatías, bronquitis, asma bronquial y cáncer pulmonar (Gil *et al.*, 1997). El consumo residencial de leña es la fuente principal de las emisiones que generan los problemas de contaminación atmosférica en las ciudades de la zona sur del país. Los expertos coinciden en señalar al uso de leña como el principal factor que genera la alta concentración de  $\text{PM}_{10}$  en estas ciudades (Gómez, 2005). Es así, que estudios realizados en Chillán por Celis *et al.* (2007) y en Temuco por CONAMA Araucanía (2006), han concluido que dentro de las fuentes fijas, tiene gran importancia la calefacción domiciliaria. Datos para esta última ciudad confirman que la fuente principal de contaminación atmosférica por  $\text{PM}_{10}$  es la combustión residencial de leña para cocina y calefacción (87%), siendo en menor medida los aportes de otras fuentes tales como, calefacción de edificios de servicios, industrias, transporte vehicular, quemas agrícolas, e incendios forestales.

Actualmente en Chile, ya se implementan medidas para mitigar los impactos ambientales y sociales ocasionadas por las fuentes contaminantes, regulando mediante normativas la calidad primaria del aire y estableciendo planes de prevención o descontaminación que permiten establecer restricciones, controlar las fuentes emisoras, establecer monitoreos de la calidad del aire e implementar otras medidas adicionales que contribuyen a la mejora de la calidad ambiental. No obstante lo anterior, la gestión ambiental pública inicialmente ha estado preferentemente orientada hacia las áreas metropolitanas del territorio nacional, principalmente el Gran Santiago y también en Concepción y Talcahuano, quedando como uno de los aspectos menos estudiados los impactos ambientales atmosféricos en ciudades intermedias que tiene entre 50000 y 250000 habitantes (Celis *et al.* 2007).

En cuanto a las regulaciones o normativas aplicables, Chile cuenta desde el año 1998 con el Decreto Supremo

N°59 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, que establece que la norma primaria de calidad del aire para el contaminante Material Particulado Respirable  $\text{PM}_{10}$ , es 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  como concentración de 24 horas.

El trabajo que se presenta a continuación trata de un estudio para la ciudad de Constitución en la Región del Maule en el sur de Chile, consistente en la aplicación del software AERMOD, desarrollado por la empresa Lakes Environmental Inc. de Canadá, para determinar la tasa de emisión de  $\text{PM}_{10}$  máxima para los equipos de calefacción a leña y la carga máxima de  $\text{PM}_{10}$  por combustión residencial de leña en la ciudad.

El software AERMOD es uno de los modelos recomendados por la Environmental Protection Agency de Estados Unidos (EPA USA) para evaluaciones ambientales de proyectos. Se han realizado diversas publicaciones con el objetivo de comparar el modelo AERMOD con bases de datos reales y con otros modelos, obteniéndose, con pocas excepciones, rendimientos superiores en comparación con otros modelos testeados (Perry *et al.*, 2005). Se ha utilizado para determinar dispersión de contaminantes por fuentes emisoras existentes o simular dispersión de contaminantes de proyectos futuros. En el caso de Chile, ha sido utilizado para simular el efecto de proyectos de inversión presentados al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (e-seia.cl), como por ejemplo: proyectos mineros, reciclaje de baterías, plantas de ácido sulfúrico y centrales termoeléctricas, entre otras.

Se busca establecer la calidad del aire en época invernal debido al funcionamiento conjunto de todos los equipos de calefacción del sector urbano. Se usa como parámetro límite que no se sobrepase los 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en concentraciones de 24 horas establecidos en la norma DS N°59/98. No se considera determinar el impacto de las emisiones del promedio anual de acuerdo al D.S. 59/98 porque para ello se requiere tener datos meteorológicos de al menos tres años consecutivos. Además, se requiere conocer información de utilización de estufas y cocinas a leña en otoño, primavera y verano, información con la que los autores no cuentan.

## Desarrollo metodológico

El modelo AERMOD EPA USA consiste en determinar la distribución de contaminantes en una pluma de manera

horizontal y vertical siguiendo un comportamiento de tipo normal denominado distribución de Gauss (U.S. EPA, 2004). Se incorporan algoritmos de dispersión para considerar las diferencias de cotas del terreno en el dominio (terreno complejo). Para su funcionamiento el modelo debe ser alimentado por tres fuentes de información: un archivo de entrada de flujos y datos de la(s) fuente(s), un archivo meteorológico, y un archivo de topografía digital.

## Fuentes emisoras puntuales de $PM_{10}$

De acuerdo a la Encuesta Casen del año 2009, en la comuna de Constitución de 50531 habitantes, existen 13575 hogares de los cuales el 80% pertenece al sector urbano. Considerando un total de 1.02 calefactores por vivienda (CONAMA Metropolitana, 2007), se obtiene que el número de calefactores en la zona urbana de la comuna es de 11077. Agrupando el total de calefactores en solo 25 fuentes estacionarias compuestas, se obtiene una carga emisora correspondiente a 443 equipos individuales para cada fuente compuesta. Se prefiere el uso de fuentes puntuales a fuentes promedio por una cierta área debido a que el programa computacional no asume las fuentes por área como un promedio sino como otro tipo de emisores distintos a los calefactores. Además que no se considera real la emisión uniforme por área, dado que las emisiones son puntuales.

Si se considera un flujo de aire a una temperatura de 400 °C (CONAMA Araucanía, 2002) para cada equipo calefactor a leña de 18 m<sup>3</sup>/h (CONAMA Metropolitana, 2007) y un diámetro del caño de 6 pulgadas, se obtiene una velocidad de salida de los gases de 0.68 m/s. Escalando y manteniendo constante la velocidad de flujo, se obtiene un diámetro de 3.2 m para cada una de las fuentes estacionarias compuestas.

La tasa de emisión E corresponde al producto entre la tasa de actividad o de quemado de leña A y el factor de emisión del equipo calefactor EF, que se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación dada por U.S. EPA (1995):

$$E = A EF \left( 1 - \frac{ER}{100} \right) \quad (1)$$

donde ER es la eficiencia de reducción de las emisiones en %. En el caso de equipos calefactores a leña residenciales el valor de este último factor se considera igual a cero.

No existe un valor único de tasa de emisión de contaminantes para equipos calefactores. Ésta varía de acuerdo al tipo de equipo utilizado, tipo y calidad de la leña utilizada y la forma de uso del propietario. Un rango amplio sugerido, considerando las diversas variables para la operación de un equipo de calefacción a leña, puede establecerse entre 1.7 a 43 g/h de  $PM_{10}$  (CONAMA Araucanía, 2002). Valores más característicos de emisión de  $PM_{10}$  en Chile están en las cercanías de 40 g/h para estufas convencionales ó 20 g/h para estufas no catalíticas. Notar que el límite máximo de emisión permitido para estufas nuevas certificadas según EPA es de 7.5 g/h (CONAMA Araucanía, 2002).

Para Constitución se determinó un rango posible de tasas de emisión (multiplicando factores de emisión y tasas de quemado de leña), ver Tabla 1. Cada uno de los diferentes valores de tasas de emisión es un dato independiente que se utiliza para alimentar el software, junto con la información meteorológica y topográfica de la zona de estudio. Cada valor de tasa de emisión genera un resultado en la modelación que se interpreta según corresponda como: “no sobrepasa norma en ningún punto”, “sobrepasa norma en un punto”, “sobrepasa norma en dos”, “sobrepasa norma en dos o más puntos”.

La tasa de quemado de leña o tasa de actividad corresponde a un valor que representa el peso o volumen de un combustible utilizado en un equipo de combustión por unidad de tiempo de utilización. Para esta variable, un rango amplio sugerido, considerando las diversas variables para la operación de un equipo de calefacción a leña, puede establecerse entre 1.7 y 3.6 kg de leña por hora de operación (CONAMA Araucanía, 2002). Para el estudio, se utilizará una tasa de quemado con valores entre 1.5 a 3.5 kg/h de operación, considerando la existencia en el mercado de equipos de calefacción a leña con potencias entre 5000 a 12600 kcal/h, siendo el poder calorífico de la leña con un 20% de humedad de 3500 kcal/kg (CONAMA Araucanía, 2002).

El factor de emisión entrega un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada con la liberación de dicho contaminante. Este factor se expresa normalmente como el peso de contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o la duración de la actividad emisora del contaminante (U.S. EPA, 1995). La medición de una estufa de Temuco realizada en Suiza, demostró que

de acuerdo a la operación se puede esperar una emisión de  $0.6 \text{ gPM}_{10}/\text{kg}$  de leña seca, para condiciones ideales de operación; entre  $3.0$  y  $14.4 \text{ gPM}_{10}/\text{kg}$  de leña seca para condiciones típicas de operación; y de  $79.3 \text{ gPM}_{10}/\text{kg}$  de leña seca para malas condiciones de operación (CONAMA Araucanía, 2006). Un rango amplio sugerido es entre  $20$  y  $200 \text{ gPM}_{10}/\text{kg}$  de leña consumida (CONAMA Araucanía, 2002). Para el estudio se utiliza un rango de factor de emisión entre  $0.5$  y  $80 \text{ gPM}_{10}/\text{kg}$  de leña consumida.

Se consideran tasas de emisión fijas ya que el software utiliza un modelo de pluma gaussiana para estado estacionario. Por otro lado, la norma primaria de calidad del aire para el contaminante Material Particulado Respirable  $\text{PM}_{10}$ , D.S. 59/98, está limitada sólo para concentraciones de 24 horas y anual. El efecto de la variación en el tiempo de las tasas de emisión forma parte de futuras investigaciones.

## Ubicación de las fuentes emisoras

Las 25 fuentes emisoras compuestas fueron distribuidas en forma sistemática dentro del sector urbano habitado de la ciudad de Constitución, de tal forma de asignar un área equivalente de distribución a las emisiones para todos los sectores de la zona urbana habitada (Figura 1). Debido a que los autores desconocen la distribución exacta de las fuentes individuales domésticas (calefactores), esto tiene un error asociado en la simulación. Idealmente la existencia de un inventario de las mismas fuentes permitiría tener una mejor aproximación de la densidad y factores de emisión de los equipos a leña.



Figura 1: Distribución de las fuentes emisoras compuestas en la zona urbana de la ciudad de Constitución

La información meteorológica considerada en el estudio, corresponde a la registrada por una Estación

Meteorológica (EM) ubicada en la ciudad de Constitución, cuyas coordenadas en UTM WGS84 son 734521 Este y 6088228 Norte, a una altitud aproximada de  $3 \text{ m}$  para la base de la EM y de  $10 \text{ m}$  para el Anemómetro. La serie temporal de las condiciones atmosféricas consideradas abarcó entre el 21 de junio al 21 de septiembre del año 2009, ambos días incluidos.

Las variables meteorológicas utilizadas son: dirección y magnitud de la velocidad del viento, temperatura del aire, presión atmosférica, humedad relativa, radiación solar, precipitación y cobertura de nubes. Para este último parámetro, dado que no existen registros de cobertura de nubes para la ciudad de Constitución, se utilizó los datos más cercanos disponibles, correspondientes al Aeródromo General Freire de la ciudad de Curicó. Ubicado a unos  $115 \text{ km}$  al NE de la ciudad de Constitución y a unos  $88 \text{ km}$  de la costa, los datos fueron proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile y corresponden a promedios mensuales para las 14 horas, años 2007 y 2008.

Los datos meteorológicos se validaron y se pre-procesaron mediante el software AERMET, incorporando la información resultante en el software AERMOD de dispersión atmosférica.

## Escenario topográfico

La dispersión de contaminantes es influenciada a escala local por características de la superficie (U.S. EPA, 2004), por lo cual el uso del suelo es un factor que incide en la dispersión y el arrastre de elementos contaminantes a través del aire. En efecto, dado que el resultado de esta modelación se utilizará como referencia para la calidad del aire de la población, se otorga mayor relevancia a la dispersión en el área urbana. Para la cobertura superficial se consideran para el período invernal, valores para albedo, radio de Bowen y rugosidad de superficie para zona urbana y mar.

Para la modelación de dispersión de contaminación atmosférica se utilizó topografía digital Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) para la comuna de Constitución, ver Figura 2. La imagen digital de topografía de la Figura 2, es procesada mediante el software AERMAP. Sobre esta imagen procesada y para efectos de la implementación del sistema de modelación con el modelo AERMOD, se consideró una grilla de  $12,5 \times 15 \text{ km}$  con cuadrículas de  $100 \times 100 \text{ m}$  cada una.

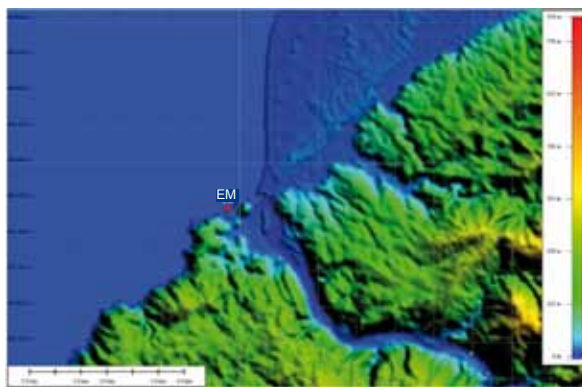


Figura 2: Ilustración de la topografía del área de estudio e identificación de la estación meteorológica (EM).

## Resultados de la modelación

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la modelación para la tasa de emisión máxima de material particulado PM<sub>10</sub> por equipos de calefacción a leña y durante período invernal. La utilización en la modelación de diferentes combinaciones de factores de emisión y tasas de quemado resulta en los niveles de tasas de emisión para fuentes individuales mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Niveles de tasas de emisión para fuentes individuales

Tasa emisión PM <sub>10</sub> (g/h)		Tasa de quemado (kg/h)					
		A	B	C	D	E	
Factores Emisión (g/kg)	a	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
	b	1	1.5	2	2.5	3	3.5
	c	5	7.5	10	12.5	15	17.5
	d	7.5	11.25	15	18.75	22.5	26.25
	e	10	15	20	25	30	35
	f	15	22.5	30	37.5	45	52.5
	g	20	30	40	50	60	70
	h	40	60	80	100	120	140
	i	80	120	160	200	240	280

Las tasas de emisión que obtienen coloración verde son aquellas para las cuales no se sobrepasa en ningún punto de la zona urbana los 150 µg/m<sup>3</sup> establecidos en la norma DS N°59/98. Aquellas de coloración azul, son aquellas en que se sobrepasa los 150 µg/m<sup>3</sup> en solo 1 punto. El caso de aquellas en coloración naranja, son los cuales se sobrepasa los 150 µg/m<sup>3</sup> en 2 puntos. Finalmente, las tasas en rojo, son aquellas en las cuales los 150 µg/m<sup>3</sup> son sobrepasados en 3 ó más puntos.

Para que no se sobrepase en ningún punto de la comuna los 150 µg/m<sup>3</sup> en concentraciones de 24 horas del D.S. N° 59/98, se obtiene que la tasa de emisión promedio por equipo calefactor debe ser como máximo de 7.5 g/h de PM<sub>10</sub> (Tabla 1 en verde). Este resultado concuerda con el límite máximo de emisión de 7.5 g/h de PM<sub>10</sub> permitido

para estufas nuevas certificadas según EPA. Los resultados de la modelación en la ciudad de Constitución, utilizando 7.5 g/h se muestra en la Figura 3.

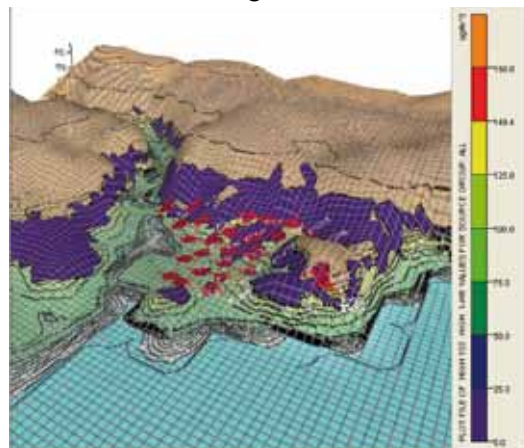


Figura 3: Resultados de la modelación mediante AERMOD en Constitución. Valores de concentración de PM<sub>10</sub> para la máxima tasa de emisión de calefactores a leña (7.5 g/h) que genere cero puntos sobre los 150 µg/m<sup>3</sup> establecidos en el D.S.N°59/98 para 24 horas.

Para que se sobrepase en solo 1 punto de la comuna los 150 µg/m<sup>3</sup> de concentraciones de 24 horas del D.S. N° 59/98, se obtiene que la tasa de emisión por equipo calefactor debe oscilar en el rango entre 10 y 22.5 g/h (Tabla 1 en azul). Estos valores son inferiores a los valores más característicos de emisión de PM<sub>10</sub> en Chile. Los resultados de la modelación sobre la ciudad de Constitución, utilizando 22.5 g/h, se muestran en la Figura 4.

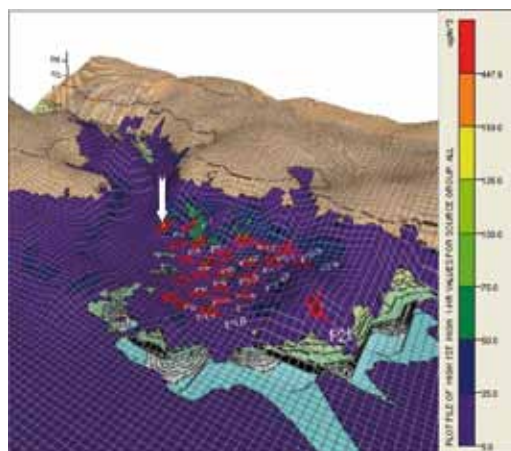


Figura 4: Resultados de la modelación mediante AERMOD en Constitución. Valores de concentración de PM<sub>10</sub> para la máxima tasa de emisión de calefactores a leña (22.5 g/h), que genere 1 punto sobre los 150 µg/m<sup>3</sup> establecidos en el D.S.N°59/98 para 24 horas.

El punto en que se sobrepasa los 150 µg/m<sup>3</sup> de concentraciones de 24 horas para PM<sub>10</sub> está en las coordenadas 736700 mE y 6085700 mS, muy cercano a la fuente F2 indicada con una flecha. Este punto corresponde al punto de máximo impacto atmosférico por PM<sub>10</sub> de la zona urbana.

Para que se sobrepase en solo 2 puntos de la comuna los 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de concentraciones de 24 horas del D.S. N° 59/98, se obtiene que la tasa de emisión por equipo calefactor debe oscilar en el rango entre 25 y 40 g/h (Tabla 1 en naranja). Estos valores son similares a los valores más característicos de emisión de  $\text{PM}_{10}$  en Chile. Por lo cual, es posible suponer que en la zona urbana habitada de la ciudad de Constitución han existido eventos de contaminación donde se ha superado, en uno o más puntos, la norma DS N°59/98 para concentraciones de 24 horas para  $\text{PM}_{10}$ . Los resultados de la modelación de la ciudad de Constitución, utilizando 40 g/h, se muestran en la Figura 5.

Los puntos en que se sobrepasa los 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de concentraciones de 24 horas para  $\text{PM}_{10}$  están en las coordenadas 736700 mE y 6085700 mS, muy cercano a la fuente F2; y 734900 mE y 6087600 mS, muy cercano a la fuente F16 (ambos indicados con flecha). Este último punto es el segundo punto de mayor impacto atmosférico por  $\text{PM}_{10}$  en la zona urbana.

Tasa de emisión de 45 g/h y superiores, comienzan a generar paulatinamente nuevos puntos sobre los 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dentro de la zona urbana habitada.

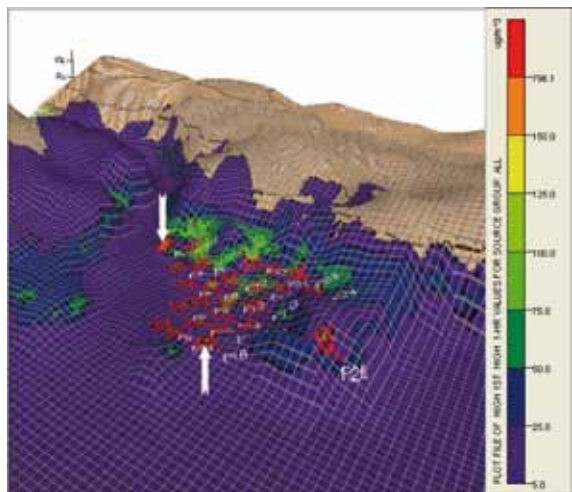


Figura 5: Resultados de la modelación mediante AERMOD en Constitución. Valores de concentración de  $\text{PM}_{10}$  para la máxima tasa de emisión de calefactores a leña (40 g/h), que genere 2 puntos sobre los 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  del D.S. N°59/98 para 24 horas.

### Carga máxima antropogénica de $\text{PM}_{10}$ en periodo invernal

Al igual que en la Tabla 1, se identifican en la Tabla 2 las tasas de emisión máximas para las fuentes compuestas para sobrepasar los 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en 0, 1, 2 y 3 o más puntos.

Tabla 2: Niveles de tasas de emisión para fuentes compuestas

Tasa emisión $\text{PM}_{10}$ (g/s)		Tasa de quemado (kg/s)				
		A	B	C	D	E
		0.0077	0.0103	0.0128	0.0154	0.0179
Factores Emisión (g/kg)	a 0.5	0.0038	0.0051	0.0064	0.0077	0.0090
	b 1	0.0077	0.0103	0.0128	0.0154	0.0179
	c 5	0.0385	0.0513	0.0641	0.0769	0.0895
	d 7.5	0.0577	0.0769	0.0962	0.1154	0.1343
	e 10	0.0769	0.1026	0.1282	0.1539	0.1791
	f 15	0.1154	0.1539	0.1923	0.2308	0.2686
	g 20	0.1539	0.2051	0.2564	0.3077	0.3582
	h 40	0.3077	0.4103	0.5128	0.6154	0.7163
	i 80	0.6154	0.8205	1.0257	1.2308	1.4326

Utilizando los valores Ac, Dd ó Af, Bg de la Tabla 2, que representan las tasas de emisión máximas para sobrepasar los 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en 0, 1 y 2 puntos respectivamente, por el total de calefactores urbanos, se obtienen las correspondientes cargas máximas de  $\text{PM}_{10}$  que es posible liberar en el aire de la comuna (Tabla 3).

Tabla 3: Cargas de emisión máximas para sobrepasar la norma en 0, 1 y 2 puntos

Carga para cero punto sobre 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (kg/d)	$\leq 83.08$
Carga para 1 punto sobre 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (kg/d)	$83.08 > \text{carga} \leq 249.24$
Carga para 2 puntos sobre 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (kg/d)	$249.24 > \text{carga} \leq 443.09$

Si se consideran otras fuentes generadoras de  $\text{PM}_{10}$ , como por ejemplo, fuentes móviles, industriales, y resuspensión de polvo de calles a causa del tránsito vehicular y el viento, puede asumirse que la carga de  $\text{PM}_{10}$  aumenta, aumentando consecuentemente la posibilidad de generarse eventos que conlleven a la superación de la norma DS N°59/98 para concentraciones de 24 horas en los meses invernales, especialmente en periodos de estabilidad atmosférica donde el aire circundante tenga un gradiente subadiabático vertical de temperatura y existan escasos vientos advectivos.

Debe tenerse en consideración que la concentración de  $\text{PM}_{10}$  resultante también se ve influenciada por el nivel basal de  $\text{PM}_{10}$ , que genera una concentración base de  $\text{PM}_{10}$  adicional no considerada en la simulación. Por otro lado, se tiene la utilización no simultánea de todos los equipos a leña, lo cual implica una reducción en la concentración de  $\text{PM}_{10}$  resultante de la simulación.

### Conclusiones

La tasa máxima de emisión de equipos de calefacción a leña necesaria para no sobrepasar los 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en concentraciones de 24 horas es de 7.5 g/h, de acuerdo a

lo establecido en la norma DS N°59/98 para período invernal en la ciudad de Constitución. Este valor concuerda con el límite máximo de emisión de 7.5 g/h permitido para estufas nuevas certificadas según EPA.

La operación de un número estimado de 11077 equipos de calefacción a leña en la ciudad de Constitución, con tasas de emisión con los valores característicos de emisión de PM<sub>10</sub> para Chile, sobrepasa en dos puntos de la ciudad los 150 µg/m<sup>3</sup> en concentraciones de 24 horas, por lo cual, se genera una situación de potencial incumplimiento de la norma DS N°59/98.

Al considerar fuentes emisoras de PM<sub>10</sub> adicionales a los calefactores a leña, se debe restringir la utilización de leña para calefacción a tasas de emisión promedio por calefactor inferiores a 7.5 g/h. Esto significa que los equipos deben ser altamente eficientes y el contenido de humedad de la leña utilizada debe ser inferior a 20%.

Para poder determinar con mayor aproximación la carga de PM<sub>10</sub> en la comuna, es necesario incorporar en la modelación mediante AERMOD, un mayor número de fuentes emisoras de material particulado y tener en consideración el porcentaje de utilización de equipos a leña en meses de invierno y la concentración basal de PM<sub>10</sub> de la ciudad.

La aplicación de esta modelación en Chile requiere de una base de datos de mediciones de emisión de equipos de calefacción a leña. Tal como existen mediciones de la calidad del aire en varias comunas de Santiago, es necesario implementar estaciones de monitoreo en otras comunas del país donde existen altos niveles de contaminación por emisiones de estufas y cocinas a leña. De esta forma se pueden adoptar medidas basadas en datos reales de mediciones y los modelos pueden ser así calibrados para estimar con mayor confiabilidad la contaminación alrededor de las estaciones de monitoreo.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar sus agradecimientos al personal de la Planta Celulosa Constitución de Celulosa Arauco y Constitución S.A., por facilitar los datos meteorológicos utilizados en esta aplicación, los cuales fueron obtenidos en su estación meteorológica entre el 21 de junio al 21 de septiembre del año 2009.

## Referencias

- Celis, J., Morales, J., Zaror, C. y Carvacho, O. (2007). Contaminación del aire atmosférico por material particulado en una ciudad intermedia: el caso de Chillán (Chile). *Informe tecnológico* 18, No3, 49-58
- CONAMA Región de la Araucanía (2002). Priorización de medidas de reducción de emisiones por uso residencial de leña para la gestión de la calidad del aire en Temuco y Padre Las Casas. Universidad de Concepción
- CONAMA Región de la Araucanía (2006). Análisis de medidas para incorporar al plan de descontaminación atmosférica de Temuco y Padre Las Casas.
- CONAMA Región Metropolitana (2007). Diseño y evaluación de las nuevas medidas para fuentes fijas contenidas en el PPDA. Análisis del mercado de equipos de calefacción residencial a biomasa actualizado. GAMMA Ingenieros S.A.
- Gil, L., Cáres, D., Quiñones, L. y Adonis, M. (1997). Contaminación del aire en espacios exteriores e interiores en la ciudad de Temuco. *Ambiente y Desarrollo* 13-No 1, 70-78
- Gómez, A. (2005). El Consumo de leña en el Sur de Chile: ¿por qué nos debe preocupar y qué se puede hacer?. *Ambiente y Desarrollo* 21(3): 43-47
- Decreto N° 59/98 (1998). Norma de calidad primaria para MP10. Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Santiago de Chile
- Oyarzún, M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la Salud. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias* 26: 16-25
- Perry, S., Cimorelli, A., Paine, R., Brode, R., Weil, J., Venkatram, A., Wilson, R., Lee, R. and Peters, W. (2005). AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part II: model performance against 17 field study databases. *Journal of Applied Meteorology* 44, 694 -708
- Sánchez, J. y Morel, J. (1995). Una estimación de los beneficios en salud de reducir la contaminación en Santiago. *Economía del Medio Ambiente en América Latina* (Varas ed.), 157-178, Ediciones PUC, Santiago, Chile
- U.S. EPA Environmental Protection Agency (1995). AP 42 - Compilation of air pollutant emission factors. Volume 1: Stationary Point and Area Sources. Fifth Edition
- U.S. EPA Environmental Protection Agency (2004). AERMOD, description of model formulation. Staff Report, EPA-454/R-03-004, North Carolina, USA