

Un procedimiento simple para evaluar la menor altura ambientalmente sustentable de una chimenea

▶ Nicolás A. Mazzeo y Andrea L. Pineda Rojas.

RESUMEN

Se presenta una metodología para evaluar la menor altura de una chimenea ambientalmente sustentable, que posibilite que la emisión a la atmósfera de un caudal másico de contaminantes, y no genere impacto sobre la calidad del aire a nivel del suelo, sin superar el estándar correspondiente. En el procedimiento se utilizó el modelo bigaussiano de dispersión atmosférica. La ecuación final obtenida, que permite evaluar la menor altura de la chimenea, depende de la velocidad de viento crítica, de la estabilidad atmosférica y de las características de la emisión de los contaminantes de la atmósfera. Este método puede aplicarse realizando un sólo cálculo por clase de estabilidad atmosférica y no utiliza información meteorológica local. Se incluye un ejemplo de aplicación.

ABSTRACT

This paper presents a methodology to evaluate the lower height of an environmentally sustainable chimney, which allows the emission to the atmosphere of a pollutant mass flow that not generate impact on the air quality at ground level not exceeding the corresponding standard. In the procedure the bigaussian model of atmospheric dispersion is used. The final equation obtained to evaluate the lower height of the chimney depends on the critical wind speed, the atmospheric stability and the emission characteristics of the pollutants in the atmosphere. The method presented can be applied by doing only one calculation per class of atmospheric stability and does not require local meteorological information. An example application is included.

Palabras clave: Chimeneas, altura de chimenea, modelo de dispersión atmosférica, calidad de aire, emisión de contaminantes

Keywords: Fireplaces, chimney height, atmospheric dispersion model, air quality, emission of pollutants

INTRODUCCIÓN

Casi todas las actividades humanas y algunas fuentes naturales de emisión, generan contaminantes atmosféricos. Afortunadamente, no todas las formas de contaminación del aire suelen ser problemáticas para la salud y el medio ambiente; sin embargo, algunos contaminantes pueden afectar a ambos.

Adicionalmente a otros efectos adversos sobre la salud humana, se estima que la contaminación del aire causa anualmente, alrededor de dos millones de muertes prematuras en el mundo (Ezzati, y otros, 2002; WHO, 2006). Los niños, las mujeres embarazadas, las personas alérgicas y los ancianos, son los grupos más sensibles a la contaminación del aire.

La concentración de contaminantes en el aire en una zona depende, entre otros factores, del grado de dispersión atmosférica. La dispersión es un fenómeno mediante el cual, un conjunto de partículas que se mueve en una dirección determinada, interactúa sucesivamente con las partículas del medio en el que se mueve, hasta abandonar la dirección privilegiada del movimiento de las mismas. La dispersión es la diseminación de una sustancia en un fluido, que es función de los movimientos aleatorios del mismo.

El modelado de la dispersión atmosférica es una importante metodología que permite evaluar si las concentraciones en aire de contaminantes emitidos por una fuente de contaminantes del aire, genera o no, impacto sobre la salud humana y el ambiente.

Un modelo de dispersión atmosférica consiste en una serie de ecuaciones codificadas para utilizar por una computadora. Las computadoras son extremadamente útiles para realizar los cálculos repetitivos necesarios para estimar concentraciones de contaminantes en aire en un número de receptores, generadas por las emisiones desde una cantidad de fuentes, y para una cantidad de condiciones atmosféricas en el período simulado. Adicionalmente, un modelo de dispersión atmosférica, también incluye medios específicos para la lectura de los datos de entrada y de salida.

Existen algunas razones por las que se utilizan modelos de dispersión atmosférica en diferentes problemas de la ingeniería ambiental, dependiendo de su aplicación:

- No es posible medir simultáneamente la calidad del aire en cada uno de todos los sitios relevantes
- Si se planifica instalar una nueva fuente de contaminación, la aplicación de modelos de dispersión es la única metodología que posibilita estimar el futuro impacto de la misma sobre la calidad de aire
- Cuando la contaminación del aire es conocida, los modelos de dispersión atmosférica pueden contribuir a determinar la localización de la fuente o fuentes responsables de la misma

- Cuando una fuente de emisión causa un determinado problema de contaminación del aire, los modelos de dispersión atmosférica pueden determinar la reducción de la emisión requerida para minimizar el impacto
- Los modelos de dispersión atmosférica pueden ser utilizados para planificar la respuesta a emergencias tales como liberación accidental de contaminantes a la atmósfera

La finalidad de una chimenea es emitir a la atmósfera, gases residuales provenientes de procesos industriales, residenciales o comerciales. Su diseño debe contemplar las reglamentaciones locales de calidad del aire ambiental. Esto requiere que las dimensiones de la chimenea sean determinadas mediante un balance entre la mejor estabilidad estructural y los menores impactos que producirían los gases emitidos sobre la calidad del aire ambiental.

Venegas y Mazzeo (1996) Mazzeo y Venegas (2009a, 2009b, 2010) describieron metodologías destinadas a evaluar la menor altura de una chimenea ambientalmente adecuada, que requieren aplicar un modelo de dispersión atmosférica en 43.800 ocasiones utilizando la información meteorológica horaria correspondiente a un período de observación de 5 años para diferentes alturas posibles de chimenea. Posteriormente, es necesario efectuar un análisis estadístico de los valores obtenidos de esas alturas, que posibilite determinar la altura más adecuada desde el punto de vista ambiental.

Para muchos aspectos ingenieriles prácticos, es conveniente y económico que se utilicen fórmulas relativamente simples y directas para estimar el menor valor de h requerido, para que las concentraciones máximas de contaminantes en aire a nivel del suelo, no superen los estándares de calidad de aire establecidos por las reglamentaciones correspondientes. Esas fórmulas pueden ser derivadas mediante la aplicación de un determinado modelo de dispersión atmosférica.

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología simple que permita determinar directamente, la menor altura de una chimenea que posibilite que los efluentes que serán emitidos y su consecuencia (la concentración de contaminantes en aire a nivel del suelo) cumplan con las normas ambientales correspondientes, sin utilizar la información meteorológica local.

EL MODELO DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA DE LA PLUMA BIGAUSSIANA

Los modelos dispersión atmosférica se han transformado en una de las principales herramientas utilizadas en estudios académicos de calidad del aire y en la práctica de la ingeniería ambiental. Por ejemplo, estos modelos son una necesidad en la evaluación de impacto ambiental de futuras industrias. Existe una variedad de modelos de dispersión atmosférica, que abarcan desde el conceptual, computacionalmente simple y mayoritariamente aplicado modelo de la pluma bigaussiana (Abdel-Magid y otros, 1997; Arya, 1999, Seinfeld y Pandis, 2006) hasta los modelos numéricos que demandan grandes tiempos de ejecución computacional, basados en la dinámica de fluidos (Hardisty y otros, 1996; Turner y Schulze, 2007, De Visscher, 2014). En general, los modelos de dispersión atmosférica son potencialmente más exactos cuando están mejor fundamentados física y químicamente, y adicionalmente, son computacionalmente más intensivos. Sin embargo, estos modelos tienen sus propios “ardides” y requieren conocimientos, destreza, experiencia y habilidad para su ejecución.

Existen tres factores que afectan la exactitud de los modelos de dispersión atmosférica:

1. *Las matemáticas incluidas en el modelo*
2. *La calidad de los datos de entrada*
3. *El uso para el cual el modelo está siendo aplicado*

El modelo de dispersión bigaussiana (Arya, 1999; Seinfeld y Pandis, 2006) es muy utilizado en la evaluación de impactos de fuentes existentes y planificadas de contaminación del aire, especialmente en aplicaciones regulatorias. Las bases teóricas de este modelo están limitadas a flujos idealizados con turbulencia atmosférica homogénea. Cuando se supone que la velocidad y la dirección del viento son constantes en el espacio y el tiempo, como así también, la difusividad turbulenta de la atmósfera, y la fuente emite contaminantes al aire en forma constante y continua, se puede asumir que los perfiles lateral y vertical de la concentración de contaminantes en el aire, son gaussianos. Experimentalmente, se ha verificado que la distribución de la concentración es aproximadamente gaussiana en la gran mayoría de los casos.

Algunos de los modelos de dispersión atmosférica de uso operativo (por ejemplo, el Industrial Source Complex (US.EPA, 1995a) SCREEN3 (US.EPA, 1995b) AERMOD (US.EPA, 2005) CALPUFF (Scire y otros, 2000)) están basados total o parcialmente, en el modelo de la pluma bigaussiana (Choy Reible, 2000; Schnelle y Dey, 2000; Turner y Schulze, 2007, De Visscher, 2014). La principal justificación para el uso del modelo de la pluma bigaussiana en aplicaciones regulatorias, se encuentra en su evaluación y validación mediante datos provenientes de experimentos de dispersión atmosférica. Otras razones para el uso de del modelo de la pluma bigaussiana, son las siguientes:

- Es analítica y conceptualmente atractivo
- Es consistente con la naturaleza aleatoria de la turbulencia atmosférica
- Su uso es computacionalmente económico
- Adquirió status “oficial” al ser incluido en guías regulatorias (US.EPA, 2005; Idriss y Spurrell, 2009)

Las suposiciones y aproximaciones más importantes del modelo bigaussiano son los siguientes (Arya, 1999):

- Las emisiones desde las fuentes son continuas y constantes
- Las condiciones atmosféricas son estacionarias
- Existe conservación de masa en la pluma de contaminantes
- La distribución gaussiana es reflejada en la superficie del suelo
- El viento de transporte es constante
- No se verifican cortantes verticales del viento
- La advección horizontal de contaminantes es más importante que la dispersión turbulenta en esa dirección

Cuando se observa una pluma de contaminantes emitidos en la atmósfera desde una chimenea, generalmente se distinguen los siguientes aspectos:

- La pluma asciende (debido al impulso y empuje térmico de los gases emitidos) y se estabiliza a una cierta altura (se manifiesta con su eje horizontal)
- La pluma se dispersa horizontal y verticalmente, y se transporta en la dirección del viento
- La forma de la pluma fluctúa aleatoriamente

Las fluctuaciones aleatorias de una pluma no pueden ser descritas mediante un modelo determinista. Sin embargo, la concen-

tración media para un dado período, puede ser incluida en este tipo de modelos.

Una convención utilizada en el modelo de la pluma gaussiana es la definición de ejes de coordenadas:

$x > 0 \rightarrow$ dirección del viento (en $x=0$ está localizada la fuente de emisión).

$y \rightarrow$ eje horizontal perpendicular a la dirección del viento ($y=0$ se encuentra en el eje de la pluma; $y > 0$ hacia la derecha observando la dirección del viento).

$z \rightarrow$ dirección vertical ($z=0$ en la superficie y $z > 0$ por encima de la superficie).

A la distancia $x_{m\acute{a}x.}$ de la fuente de emisión, el valor de la concentración de contaminantes en el aire a nivel del suelo será máximo ($C_{m\acute{a}x.}$).

La determinación de $C_{m\acute{a}x.}$ y su localización ($x_{m\acute{a}x.}$) en la dirección del viento, es de considerable interés en aplicaciones regulatorias de los modelos de dispersión atmosférica, debido a que si $C_{m\acute{a}x.}$ es menor que el estándar de calidad del aire, las concentraciones en los otros puntos también serán menores que el estándar. Las concentraciones máximas y las distancias en las que ocurren, se pueden calcular aplicando modelos de dispersión atmosférica. Para una fuente puntual (ubicada en $x=0, y=0, z=0$) con altura h , que emite continuamente contaminantes a la atmósfera, la concentración (C) de los mismos en aire a nivel del suelo en el eje central de la pluma y en la dirección del viento, está dada por la siguiente expresión (Arya, 1999):

$$C(x)=Q [\pi u \sigma_y \sigma_z]^{-1} \exp [-H^2 (2 \sigma_z^2)^{-1}] \quad [1]$$

Donde: Q es el caudal másico de emisión de contaminantes a la atmósfera, u es la velocidad del viento, σ_z y σ_y son los parámetros de dispersión respecto de los ejes z e y respectivamente (que varían con x y con la estabilidad atmosférica) y $H=h+\Delta h$ es la altura efectiva de emisión, siendo h la altura de la chimenea y Δh la elevación de la pluma (originada por el impulso vertical y/o el empuje térmico de los gases de emisión).

La elevación final de la pluma (Δh) de los contaminantes puede ser expresada genéricamente de la siguiente forma (Seinfeld y Pandis, 2006):

$$\Delta h=M u^{-n} \quad [2]$$

Donde $n=1$ en condiciones atmosféricas neutra e inestable y $n=1/3$ en condiciones estables, y M es un parámetro dimensional que depende del parámetro de empuje (F_b) a través de la siguiente relación:

$$M=1,6 F_b^{1/3} \quad [3]$$

$$\text{con } F_b=w_0 d^2 g (T_s - T_a)/4T_s \quad [4]$$

Siendo w_0 la velocidad de salida de los gases de la chimenea, d el diámetro de la misma, g la aceleración debida a la gravedad, T_s la temperatura de los gases y T_a la temperatura de la atmósfera.

En este trabajo se consideran las siguientes formas funcionales potenciales de los coeficientes de dispersión:

$$\sigma_y=a x^p \quad [5]$$

$$\sigma_z=b x^q \quad [6]$$

Donde a y b son parámetros con unidades m^{-1-q} y m^{-1-p} respectivamente; p y q son parámetros adimensionales que dependen de la estabilidad atmosférica, como presentan Seinfeld y Pandis (2006) (Tabla 1).

Las clases de estabilidad atmosférica incluidas en la Tabla 1 son: A: marcadamente inestable; B: moderadamente inestable; C: levemente inestable; D: neutral; E: levemente estable; F: moderadamente estable. Estas clases de estabilidad atmosférica se pueden obtener de observaciones o de estimaciones horarias de la radiación solar (condiciones diurnas) de la nubosidad (condiciones nocturnas) y de la velocidad del viento (determinada a 10 m de altura) (Tabla 2).

Insertando las formas potenciales de σ_y y σ_z (ecuaciones (5) y (6)) en la ecuación (1) queda:

$$C(x)=Q [\pi u a b x^{p+q}]^{-1} \exp [-H^2 (2 b^2 x^q)^{-1}] \quad [7]$$

Derivando esta ecuación con respecto de x e igualando a cero la expresión resultante, se obtiene la siguiente expresión:

$$q [H^2 (b x_{m\acute{a}x.}^q)^{-2}]=(p+q) \quad [8]$$

Despejando $x_{m\acute{a}x.}$ la ecuación (8) queda:

$$x_{m\acute{a}x.}=\{[qH^2 [b^2 (p+q)]^{-1}]^{1/2q} \quad [9]$$

Introduciendo la ecuación (9) en la (7) con $x=x_{m\acute{a}x.}$, se obtiene la siguiente expresión que permite estimar la concentración máxima ($C_{m\acute{a}x.}$) de contaminantes en aire a nivel del suelo:

$$C_{m\acute{a}x.}=Q [\pi u a b]^{-1} \{(qH^2)^{-1} b^2 (p+q)\}^{(p+q)/2q} \exp [-(p+q) (2q)^{-1}] \quad [10]$$

Esta ecuación puede escribirse de la siguiente manera:

$$C_{m\acute{a}x.}/H^s Q=[\pi u a b]^{-1} \{(q b^2 (p+q))^{s/2} \exp [-s/2] \quad [11]$$

Donde $s=1+p/q$

VELOCIDAD CRÍTICA DEL VIENTO

En la estimación de la concentración (C) de contaminantes en aire a nivel del suelo, representada por la ecuación (1) y de la concentración máxima ($C_{m\acute{a}x.}$) descrita por la ecuación (10) la velocidad del viento aparece en dos multiplicandos que tienen efectos opuestos sobre el valor de la concentración.

C es inversamente proporcional a u

Velocidades bajas del viento posibilitan aumentos en los valores de $C/C_{m\acute{a}x.}$ y viceversa. Físicamente, esta relación lineal entre C y u^{-1} representa la dilución atmosférica de los contaminantes en la dirección del viento, originada por u .

C aumenta con u a través de su relación con H en la ecuación (10)

Δh que es inversamente proporcional a la u (ecuación (2)). De esta forma, los vientos más débiles permiten que la pluma tienda a tener una dirección más cercana a la vertical, contribuyendo a disminuir el valor de C y de $C_{m\acute{a}x.}$ Por el contrario, cuando la ve-

Tabla 1. Valores de a, b, p y q para las diferentes clases de estabilidad atmosférica (Sienfeld y Pandis, 2006).

Clase de estabilidad atmosférica	a (m ^{1-p})	b (m ^{1-q})	p	q
A	0,469	0,017	0,983	1,380
B	0,306	0,017	0,855	1,021
C	0,230	0,076	0,855	0,879
D	0,219	0,140	0,764	0,727
E	0,237	0,217	0,691	0,610
F	0,237	0,262	0,594	0,500

Tabla 2. Dependencia de las clases de estabilidad atmosférica de la velocidad del viento (determinada a 10 m de altura) de la radiación solar (condiciones diurnas) y de la nubosidad (condiciones nocturnas) (Sienfeld y Pandis, 2006).

Velocidad del viento (m/s)	Condiciones diurnas radiación solar			Condiciones diurnas radiación solar	
	Fuerte	Moderada	Débil	≥4/8	≤3/8
<2	A	A-B	B	---	---
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

locidad del viento es mayor, la pluma tiende a la horizontalidad. Físicamente, el factor exponencial en la ecuación (1) y el factor potencial en la ecuación (10) representan el efecto de la cercanía o lejanía del eje horizontal de la pluma respecto de la superficie terrestre.

De esta manera, los vientos más débiles posibilitan aumentos en el valor de C y de C_{máx.} (C es inversamente proporcional a u) y al mismo tiempo permiten que la pluma sea más cercana al eje vertical contribuyendo a disminuir el valor de C y de C_{máx.} (C aumenta con u a través de su relación con H en la ecuación).

La velocidad crítica del viento (u_c) es el valor de u que optimiza ambos efectos, contribuyendo al mayor valor de C_{máx.} El valor de u_c se puede encontrar derivando C_{máx.} con u en la ecuación (10) igualando a cero la expresión resultante y resolviendo numéricamente para cada clase de estabilidad atmosférica, teniendo en cuenta los posibles valores de u correspondientes (Tabla 3).

En la Tabla 3 se presentan los valores de (C_{máx.} H⁻⁵)/Q (s=1+p/q) obtenidos aplicando la ecuación (10) para las velocidades críticas de viento (u_c) correspondientes a cada clase de estabilidad atmosférica.

El valor relativo más impactante es el que corresponde a la clase

de estabilidad F (moderadamente estable).

ALTURA MÍNIMA DE LA CHIMENEA

Despejando H de la ecuación (11) con C_{máx.}=Est (estándar de calidad de aire) resulta:

$$H = \{Q^{-1} (\text{Est } \pi u c a b) \exp [(p+q) (2q)] [q b^{-2} (p+q)^{-1}]^{(p+q)/2q} q^{(p+q)}\}^{1/2} \quad [12]$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta la definición de altura efectiva de la emisión (H) la altura de la chimenea está dada por la siguiente expresión:

$$h = \{Q^{-1} (\text{Est } \pi u c a b) \exp [(p+q) (2q)] [q b^{-2} (p+q)^{-1}]^{2(p+q)/q} q^{(p+q)} - \Delta h\}^{1/2} \quad [13]$$

La ecuación (13) permite el cálculo de la altura de la chimenea que verifica C_{máx.}=estándar de calidad de aire (Est) establecido por la reglamentación local. Se puede observar que esta altura depende de la estabilidad atmosférica (a través de a, b, p, q y Δh) del estándar de calidad de aire y de las características de la emisión (a través de Q y Δh).

Por tanto, es posible obtener un valor de h para la velocidad crítica del viento correspondiente a cada clase de estabilidad atmosférica.

Tabla 3. Valores de la concentración máxima normalizada correspondientes a cada velocidad crítica del viento en cada clase de estabilidad atmosférica y cada valor de s=(1+p/q).

Clase de estabilidad atmosférica	A	B	C	D	E	F
Velocidad crítica del viento (m/s)	1,0	3,0	10,0	15,0	2,5	2,5
s=1+p/q	- 1,712	- 1,837	- 1,973	- 2,051	- 2,133	- 2,188
(C _{máx.} H ⁻⁵)/Q (s/m ^(3+s))	7,77E-06	4,19E-06	1,28E-05	9,54E-06	4,9E-05	6,9E-05

EJEMPLO APLICATIVO

Se requiere instalar una chimenea industrial en algún lugar rural de la Provincia de Buenos Aires, para la cual es necesario evaluar la mínima altura (h) de la chimenea ambientalmente adecuada, que emitirá residuos gaseosos a la atmósfera. La emisión será continua, de 130 g/s de óxidos de nitrógeno (se considerará una transformación total en la atmósfera a dióxido de nitrógeno)

El estándar de calidad de aire correspondiente al dióxido de nitrógeno es 0,367 mg/m³ (Resolución 242/97 de la Secretaría de Política Ambiental de la Provincia Buenos Aires (hoy denominada OPDS)).

Se conocen las siguientes características de la emisión:

w₀: velocidad de salida de los gases de la chimenea)=25,0 m/s

d: (diámetro interno de la boca de la chimenea)=3,5m

T_s: (temperatura absoluta de los gases de emisión)=494K

T_a: (temperatura absoluta de la atmósfera)=293K

Para la clase de moderada estabilidad atmosférica (F) cuando la velocidad del viento crítica (u_c) es 2,5 m/s, y utilizando los siguientes valores correspondientes incluidos en la **Tabla 1**:

$$a=0,237 \text{ m l}^{-1}$$

$$b=0,262 \text{ m l}^{-4}$$

$$p=0,594$$

$$q=0,5$$

Se obtiene:

$$F_b=498,2 \text{ m}^4/\text{s}^3$$

Luego, combinando las ecuaciones (2) a (4), se encuentra:

$$\Delta h=1,6 F_b u_c^{-1}=390,8\text{m}$$

Aplicando la ecuación (12) resulta:

$$H=421,7\text{m}$$

Por tanto,

$$h=30,9\text{m} \approx 31\text{m}$$

Este valor es el que corresponde a la altura mínima de la chimenea ambientalmente sustentable.

Teniendo en cuenta que según lo manifestado anteriormente, las estimaciones de un modelo de dispersión atmosférica tiene resultados inciertos (principalmente, debido a las ecuaciones utilizadas, los datos de las variables de entrada, la inadecuada utilización de datos de entrada y del modelo) se podría suponer que el modelo bigaussiano tiene una incertidumbre media de aproximadamente 30% (Turner y Schulze, 2007).

Esto implica que la altura de la mínima de la chimenea ambientalmente sustentable podría resultar aproximadamente 40 m.

Debe notarse que en el cálculo anterior, se consideró que la concentración de fondo de dióxido de nitrógeno en aire a nivel del suelo es nula. En el caso que hubiera una concentración de fondo no nula, sería necesario restar su valor al del estándar de calidad de aire.

Alternativamente, si la concentración de fondo en la zona fuera nula (como en el ejemplo) dependiendo de la autoridad ambiental correspondiente, se podría asignar a la zona un valor de

concentración arbitrario como "reserva del aire ambiental", que posibilite en el futuro, la instalación de otras industrias que fueran emisoras de óxidos de nitrógeno a la atmósfera.

CONCLUSIONES

Utilizando el modelo dispersión atmosférica bigaussiana, se presenta una metodología simple destinada a evaluar la altura de una chimenea ambientalmente sustentable, que posibilite emitir un contaminante con un caudal másico de emisión determinado tal, que su concentración en aire a nivel del suelo no supere el estándar de calidad de aire correspondiente. Se obtiene una ecuación que permite evaluar la altura de la chimenea incorporando la velocidad de viento crítica y que posibilita realizar sólo un cálculo por cada clase de estabilidad atmosférica. La elección de la altura de la chimenea más adecuada, surge de seleccionar la menor de esas alturas. Este procedimiento no requiere utilizar información meteorológica del lugar como lo hacen otras metodologías que se basan en la aplicación de modelos de dispersión atmosférica en miles de ocasiones. Se presenta un ejercicio de aplicación que permite ejemplificar la utilización de la metodología planteada.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del Proyecto CONICET PIP 0304: "Estudio de la calidad del aire en áreas urbanas"

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abdel-Magid I. M, Mohamed A. H. y Rowe D. R. (1997). Modeling methods for environmental engineers. Lewis Publishers, New York, USA.
- [2] Arya S.P. 1999). Air pollution meteorology and dispersion. Oxford University Press, NY.
- [3] De Visscher A. (2014). Air dispersion modeling. Foundations y Applications. John Wiley and Sons, NY
- [4] Choy B. and Reible D.D. (2000). Diffusion models of environmental transport. Lewis Publishers, New York, USA.
- [5] Ezzati, M., López A. D., Vander Hoorn S. and Murray C. J. L. (2002). Selected major risk factors and global and regional burden of disease. Lancet 360, 1347-1360.
- [6] Hardisty, J., Taylor D. M. and Metcalfe. (1996). Computerised environmental modeling. A practical introduction using Excel. John Wiley and Sons, NY.
- [7] Idriss A. and Spurrel F. (2009). Air quality model guideline. Government of Alberta, Edmonton, Alberta, Canadá.
- [8] Mazzeo N. A. y Venegas L. E. (2009a). Chimenea industrial a instalar en una zona urbana o rural: evaluación de la altura ambientalmente adecuada. IX Jornadas de Vinculación Tecnológica. Avellaneda, Provincia de Buenos Aires.
- [9] Mazzeo N. A. y Venegas L. E. (2009b). Altura ambientalmente adecuada de una chimenea industrial. Reserva ambiental atmosférica. COPIME-La Revista 19, 32-39.
- [10] Mazzeo N. A. y Venegas L. E. (2010). Altura mínima de la chimenea que permita cumplir con las normas de calidad de aire. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 5, 16. 16-22.
- [11] Scire J. S., Strimaitis D. G. and Yamartino R. J. (2000). A user's guide for CALPUFF dispersion model. Earth Tech, Concord, MA.
- [12] Schnelle K. B. (Jr.) and Dey P. B. 1999). Atmospheric dispersion modeling compliance guide. McGraw-Hill, NY, USA.
- [13] Seinfeld J. H. y Pandis S. N., (2006). Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change. John Wiley and Sons, NY.
- [14] Turner D. B. y Schulze R. H. (2007). Atmospheric dispersion modeling. Air&Waste Management Association and Trinity Consultants. USA.
- [15] US.EPA, 2005. User's guide for the AMS/EPA regulatory model AERMOD. Report EPA-454/B-03-001. US.EPA, Research Triangle Park, NC.
- [16] US.EPA. (2005). Revision to the guideline on air quality models: adoption of

a preferred general purpose (flat and complex terrain) dispersion model and other revisions. Federal Register, 70, N° 216, 68218-68261.

- [17] US.EPA. (1995a). SCREEN3 model user's guide. Report EPA-454/B-95-004. US.EPA, Research Triangle Park, NC.
- [18] US.EPA, (1995b). User's guide for industrial source complex (ISC3) dispersion models. Volume II- Description of model algorithms. Report EPA-454/B-95-003b. US.EPA, Research Triangle Park, NC.
- [19] Venegas L.E. y Mazzeo N.A. (1996). Análisis de riesgos ambientales asociados con diferentes alturas de chimeneas industriales. 9 Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente.
- [20] WHO. (2006). Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Summary of Risk Assessment, WHO.

Sobre los autores:

Nicolás A. Mazzeo es Doctor en Ciencias de la Atmósfera, egresado de la Universidad de Buenos Aires (UBA) Argentina y se desempeña como docente e investigador del CONICET. Puede ser contactado en la dirección electrónica: <nmazzeo@fra.utn.edu.ar>.

Andrea L. Pineda Rojas es Doctora de la UBA, en el área de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Se desempeña como Investigadora del CONICET y se especializa en modelado de la contaminación atmosférica en áreas urbanas