

LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA

Laura E. Venegas y Nicolás A. Mazzeo

*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Departamento de Ingeniería Química, Facultad Regional Avellaneda, Universidad Tecnológica
Nacional, Av. Ramón Franco 5050, 1874 Avellaneda, Argentina.
lvenegas@fra.utn.edu.ar - nmazzeo@fra.utn.edu.ar*

Palabras clave: dispersión atmosférica, viento, concentración de contaminantes, modelo AERMOD

Resumen. La atmósfera es la capa gaseosa que rodea a la Tierra, y constituye la principal defensa que tienen las diferentes formas de vida, de la incidencia de las radiaciones que provienen del espacio exterior, especialmente del sol. A través de su evolución, la atmósfera fue cambiando su constitución. Actualmente, los mayores constituyentes de la misma son el nitrógeno y el oxígeno. La calidad del aire en una zona, y en consecuencia, los efectos producidos por la contaminación atmosférica, depende directamente de la emisión de los contaminantes y de los procesos que intervienen en el transporte y la dispersión de los mismos en la atmósfera. En estos procesos actúan el viento y la turbulencia del aire. Generalmente, se asocia una disminución de la concentración de contaminantes en aire con el aumento de la velocidad del viento. Sin embargo, esta "relación" no se verifica para todas las alturas de emisión y en todas las condiciones atmosféricas. En este trabajo se analiza la influencia de la velocidad del viento sobre las concentraciones horarias de contaminantes en aire a nivel del suelo, originadas por una emisión continua proveniente de: a) una fuente ubicada a nivel del suelo y b) una fuente elevada. Este análisis se basa en resultados obtenidos aplicando el modelo de dispersión atmosférica AERMOD de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. y comprende condiciones atmosféricas estables, inestables y neutras. Para disminuir la influencia de la capa de mezcla sobre los resultados, se consideran alturas de la misma suficientemente elevadas.

En el caso de la emisión desde el nivel del suelo, se analizan los valores de la concentración horaria de contaminantes en aire estimada a una distancia de 1000m en la dirección del viento. En condiciones estables e inestables (excepto de marcada inestabilidad), se encuentra que la concentración normalizada por la intensidad de la emisión (C/Q) a 1000m disminuye con la velocidad del viento. En condiciones marcadamente inestables (convectivas) la variación de C/Q en función de la velocidad del viento no presenta una tendencia definida.

En el caso de la fuente elevada (chimenea) se analizan los valores de la concentración horaria máxima normalizada ($C_{\text{máx}}/Q$) a nivel del suelo. Se obtuvo que en condiciones estables, inestables y neutras, $C_{\text{máx}}/Q$ es directamente proporcional a la velocidad del viento. Este resultado puede ser producto del balance entre la dilución atmosférica de los contaminantes generada por la velocidad del viento y la influencia del viento sobre la elevación de la pluma de contaminantes.

1 INTRODUCCIÓN

El problema de la contaminación del aire puede ser representado mediante un sistema integrado por tres componentes fundamentales: las fuentes de emisión, la atmósfera y los receptores. El origen de la contaminación del aire se encuentra en las fuentes de emisión. Los contaminantes son emitidos desde las fuentes a la atmósfera que actúa como medio para el transporte, la dilución y mezcla, la remoción, la acumulación y las transformaciones física y química de los mismos. Por último, los receptores son los seres vivos y los materiales afectados por las sustancias contaminantes.

Se denomina “dispersión atmosférica” al proceso que transporta y mezcla los contaminantes en el aire. La dispersión de los contaminantes en la atmósfera depende del viento, de la elevación de la pluma y de la turbulencia del aire. Los contaminantes, luego de ser emitidos a la atmósfera, se diluyen debido a su mezcla con el aire limpio, generando plumas que un tiempo después de su emisión y, en la mayoría de los casos, son casi horizontales.

El viento, en regiones llanas, puede ser definido como el desplazamiento prácticamente horizontal del aire. La dispersión de contaminantes en la atmósfera, está influenciada significativamente por la variabilidad de la dirección del viento. Si la dirección del viento es constante, la misma área estará continuamente expuesta a niveles relativamente altos de contaminación. Por otra parte, cuando la dirección del viento es cambiante, los contaminantes serán dispersados sobre un área mayor y las concentraciones resultarán relativamente menores.

El viento también desempeña un papel significativo en el transporte y dilución de los contaminantes. Cuando su velocidad aumenta, mayor es el volumen de aire que se desplaza por unidad de tiempo, por la zona donde está localizada una fuente de emisión de contaminantes. En consecuencia la concentración disminuye si la emisión es constante. La velocidad del viento afecta el tiempo de recorrido de los contaminantes entre la fuente y los receptores. Cuando los contaminantes son emitidos desde las fuentes, con impulso vertical y calor, la elevación de los mismos también está afectada por la velocidad del viento.

Generalmente, es aceptado que cuanto mayor es la intensidad del viento, menor será la concentración de contaminantes en el aire. Esta relación se verifica, generalmente, cuando la fuente está ubicada a nivel del suelo. Sin embargo, las concentraciones máximas a nivel del suelo de contaminantes emitidos desde chimeneas con empuje térmico e impulso vertical, pueden no verificar esta “relación inversa” con la velocidad del viento.

En este trabajo se analiza la influencia de la velocidad del viento (U) sobre la concentración horaria de contaminantes emitidos desde: a) una fuente ubicada a nivel del suelo y b) una fuente elevada. En el primer caso, se analizan los valores de la concentración (C) en aire a nivel del suelo a una distancia de la fuente. Para la fuente elevada, se analizan los valores máximos horarios de la concentración en aire a nivel del suelo ($C_{m\acute{a}x}$). En ambos casos, las concentraciones fueron normalizadas por el caudal másico de emisión (Q). Se considera que las emisiones desde la fuente ubicada a nivel del suelo no tienen empuje térmico y ni impulso vertical. Para la fuente elevada el análisis es aplicable a contaminantes emitidos con empuje térmico e impulso vertical. El análisis comprende diferentes condiciones de estabilidad atmosférica.

2 ASPECTOS CONCEPTUALES DE LOS EFECTOS DUALES DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO SOBRE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Si la fuente de emisión de contaminantes se encuentra ubicada en superficie, las mayores

concentraciones de los mismos en aire a nivel del suelo se presentan cuando las velocidades del viento son bajas y la atmósfera es estable (Turner y Schulze, 2007).

Si las fuentes son elevadas (por ejemplo, chimeneas) y los contaminantes son emitidos con impulso vertical y empuje térmico, la condición atmosférica (velocidad del viento y estabilidad de la atmósfera) asociada a las mayores concentraciones de contaminantes en aire a nivel del suelo, solo puede ser determinada mediante la aplicación de modelos de dispersión atmosférica. Esto se debe, en parte, a que la velocidad del viento está involucrada en dos aspectos que tienen influencias contrapuestas sobre la concentración de contaminantes en aire a nivel del suelo. Por un lado, la velocidad del viento afecta la elevación de la pluma originada por una emisión de contaminantes con impulso vertical y empuje térmico. Cuando los vientos son débiles, la elevación de la pluma es mayor que para vientos fuertes. Por otro lado, vientos débiles generan una mínima dilución, mientras que vientos fuertes proporcionan considerable dispersión. Por otra parte, en condiciones atmosféricas marcadamente inestables (convectivas) la pluma de contaminantes puede ser transportada hacia la superficie, originando concentraciones relativamente elevadas a nivel del suelo cerca de la fuente.

La interacción de los efectos mencionados anteriormente es compleja de analizar sin aplicar modelos de dispersión atmosférica (Turner y Schulze, 2007).

3 METODOLOGÍA UTILIZADA

Los cálculos de la concentración de contaminantes en aire, realizados en este trabajo, fueron efectuados aplicando el modelo de dispersión atmosférica AERMOD de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (Perry y otros, 1994; Cimorelli y otros, 1996; Cimorelli y otros, 2003; U.S.EPA, 2004, 2012) que considera la dispersión de contaminantes, emitidos desde diferentes tipos de fuentes, en capas límites atmosféricas inestables, estables y neutras. Este modelo se encuentra operativo desde diciembre de 2006.

En este trabajo, el AERMOD fue aplicado a dos hipotéticas fuentes: a) una localizada en superficie y b) otra en altura (chimenea), que emiten continuamente contaminantes a la atmósfera.

Las características de la emisión en cada caso son:

- a) emisión de contaminantes con temperatura igual a la del aire ambiente y sin impulso vertical, desde una fuente puntual ubicada en el nivel del suelo.
- b) emisión de contaminantes con empuje térmico (temperatura de los gases igual a 400K) e impulso vertical (velocidad de salida de los gases igual a 10m/s) desde una chimenea de 60m de altura y 5m de diámetro.

Se supone que las hipotéticas fuentes de emisión están localizadas en Ezeiza (Provincia de Buenos Aires), en terreno llano cubierto parcialmente con césped y en algunas zonas por cultivos, con un albedo de 0.18, relación de Bowen de 1.0 y longitud de rugosidad de 0.01m.

El modelo AERMOD es aplicado para evaluar las concentraciones horarias normalizadas (C/Q) en aire de contaminantes a nivel del suelo hasta una distancia de 50km (límite espacial de aplicabilidad del modelo AERMOD), considerando un año (8760 horas) de valores horarios meteorológicos de superficie, y de variables en altura, registrados en la estación Ezeiza Aero (34°49' S; 58°32' W) del Servicio Meteorológico Nacional. Los cálculos se realizaron reduciendo al mínimo el efecto de la altura de la capa de mezcla atmosférica sobre la dispersión vertical de los contaminantes. Se consideraron alturas de la capa de mezcla suficientemente elevadas para posibilitar el análisis de la influencia de la velocidad del viento en la dispersión de contaminantes.

Para cada condición atmosférica horaria, se determinó el valor de: a) la concentración normalizada (C/Q) a 1000m de distancia (en el caso de la emisión desde superficie) y b) la concentración máxima normalizada ($C_{\text{máx}}/Q$) (en el caso de la emisión desde la chimenea), de

contaminantes en aire a nivel del suelo en la dirección del viento y la distancia a la que se verifica. En este trabajo, $C_{\text{máx}}$ es la concentración máxima de contaminantes en aire a nivel del suelo, $X_{\text{máx}}$ es la distancia en la dirección del viento desde la fuente de emisión, donde se presenta la $C_{\text{máx}}$, y Q es el caudal másico de emisión.

4 RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Emisión originada a nivel del suelo

Los valores de la concentración horaria normalizada (C/Q) de contaminantes (emitidos desde la fuente ubicada en superficie) en aire a nivel del suelo, calculados por el AERMOD a 1000m de distancia de la fuente, fueron graficados conjuntamente con los correspondientes valores horarios medidos de la velocidad de viento (U), para condiciones atmosféricas estables ($L > 0$) e inestables ($L < 0$). L es la longitud de Monin- Obukhov (Arya, 1999; Seinfeld y Pandis, 2006). Ambas condiciones de estabilidad atmosférica se aproximan a la neutralidad cuando el valor absoluto de L es grande ($|L| \rightarrow \infty$).

La Figura 1 presenta los resultados de (C/Q) a nivel del suelo obtenidos a 1000m de distancia de la fuente de emisión en la dirección del viento, para distintos valores de U en condiciones estables ($L > 0$). En la misma se distinguen dos grupos: las cruces en color rojo indican los valores obtenidos en condiciones marcadamente estables ($0 < L < 10\text{m}$) y en azul los correspondientes a condiciones moderada y levemente estables ($L \geq 10\text{m}$). En general, cuando $L > 0$ (condiciones atmosféricas estables), se verifica que (C/Q) es inversamente proporcional a U . En este caso el efecto predominante es la mayor dilución de los contaminantes en la atmósfera que se genera al aumentar la velocidad del viento. Asimismo, se observa que, para una emisión desde superficie, los mayores valores de (C/Q) se presentan en condiciones de mayor estabilidad ($0 < L < 10\text{m}$).

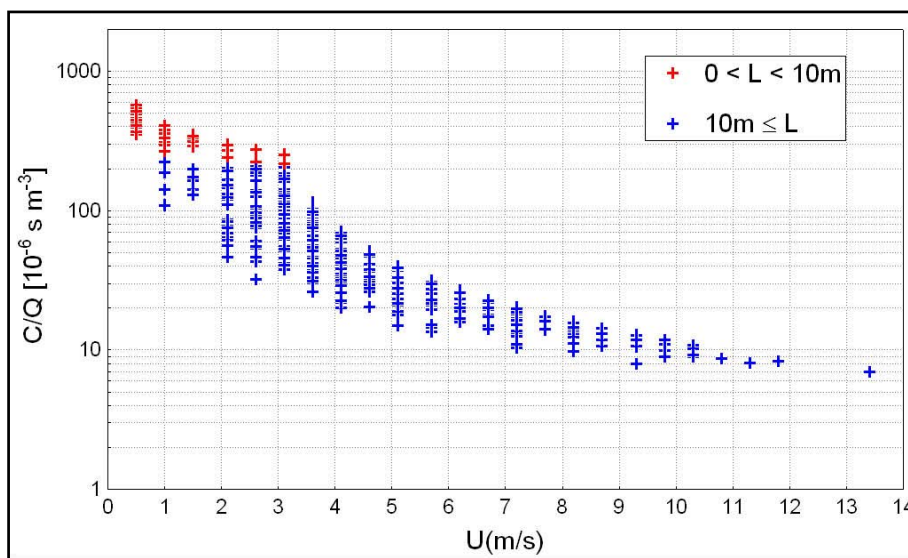


Figura 1. Variación de (C/Q) estimados a una distancia de 1000m, con la velocidad del viento (U) en condiciones estables ($L > 0$).

En la Figura 2 se presentan los valores de C/Q obtenidos a 1000m de distancia de la fuente de emisión, correspondientes a los casos inestables, separados en dos situaciones de inestabilidad atmosférica: $L \leq -10\text{m}$ (en color azul) y $-10\text{m} < L < 0$ (en color rojo). En general, cuando $L \leq -10\text{m}$ (condiciones neutrales, levemente y moderadamente inestables) se observa

que C/Q es inversamente proporcional a U . Este comportamiento coincide cualitativamente con lo observado para los casos estables (Figura 1). La variación de C/Q con U para las condiciones más inestables ($-10\text{m} < L < 0$) no presenta un patrón simple.

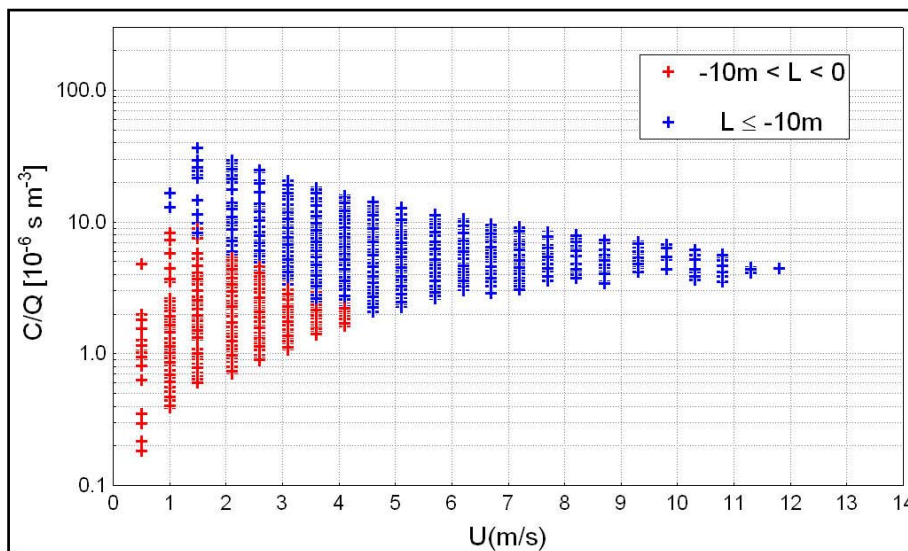


Figura 2. Variación de (C/Q) estimados a una distancia de 1000m, con U en condiciones inestables ($L < 0$).

A continuación se analizan con mayor detalle las condiciones inestables. La Figura 3 presenta los valores de C/Q (a una distancia de 1000m) para diferentes U para los casos con $-10\text{m} < L < 0$ (incluidos en la Figura 2), divididos en cinco sub-intervalos de valores de L : $-10\text{m} < L \leq -8\text{m}$; $-8\text{m} < L \leq -6\text{m}$; $-6\text{m} < L \leq -4\text{m}$; $-4\text{m} < L \leq -2\text{m}$ y $-2\text{m} < L < 0$.

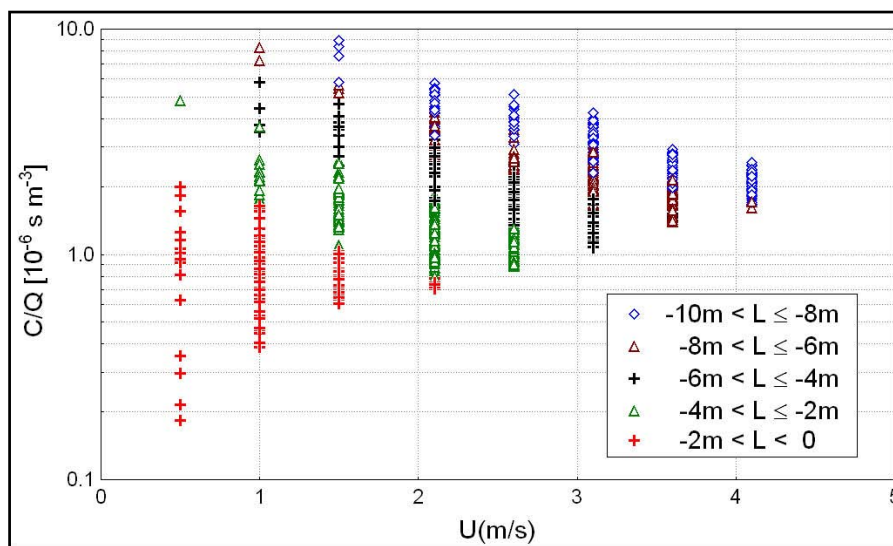


Figura 3. Variación de (C/Q) estimados a una distancia de 1000m, con U en condiciones inestables. (Detalle de los valores presentados en la Figura 2, para $-10\text{m} < L < 0$).

Se observa que para los sub-intervalos: $-10\text{m} < L \leq -8\text{m}$; $-8\text{m} < L \leq -6\text{m}$; $-6\text{m} < L \leq -4\text{m}$; $-4\text{m} < L \leq -2\text{m}$, los valores de C/Q , en general, disminuyen cuando aumenta U . Sin embargo, para el intervalo $-2\text{m} < L < 0$, la variación de C/Q con U es confusa. Para analizar estos valores, se dividió este último intervalo de L en tres sub-intervalos: $-1.9\text{m} < L \leq -1.6\text{m}$; $-1.6\text{m} < L \leq -1.3\text{m}$; $-1.3\text{m} < L \leq -1.0\text{m}$ (no se presentaron casos con $-1.0\text{m} < L < 0$). Se encontró que

los valores de C/Q , en general, también, disminuyen cuando aumenta U en los dos primeros sub-intervalos. En el sub-intervalo $-1.3\text{m} < L \leq -1.0\text{m}$, los valores de C/Q en relación con U , en general, tienen un comportamiento indefinido. Cuando $U = 0.5\text{m/s}$, los valores de C/Q a 1000m de distancia de la fuente de emisión estaban comprendidos en el rango $1.83\text{E-}07\text{s/m}^3 \leq C/Q \leq 1.99\text{E-}06\text{ s/m}^3$. Si $U = 1.0\text{m/s}$, éstos variaron entre $3.89\text{E-}07\text{s/m}^3$ y $1.22\text{E-}06\text{ s/m}^3$. Para $U = 1.5\text{m/s}$ se encontraron valores en el rango $6.04\text{E-}07\text{s/m}^3 \leq C/Q \leq 8.46\text{E-}07\text{s/m}^3$. Esta variabilidad de los valores de C/Q obtenidos a 1000m de distancia de la fuente, podría deberse a los efectos que los diferentes valores de los flujos horarios verticales turbulentos de calor y de cantidad de movimiento generan sobre la dispersión de contaminantes.

4.2 Emisión originada en una fuente elevada

La Figura 4 presenta los resultados de la concentración máxima normalizada ($C_{\text{máx}}/Q$) a nivel del suelo para distintos valores de la velocidad del viento (U) en condiciones estables ($L > 0$), originadas por los contaminantes emitidos desde una fuente elevada. Se indican en color azul los casos en que las distancias $X_{\text{máx}}$ a las que se presenta $C_{\text{máx}}/Q$ es inferior a 50km (límite espacial de aplicabilidad del modelo AERMOD) y en color marrón las situaciones en las que la distancia $X_{\text{máx}}$ es mayor o igual a 50km .

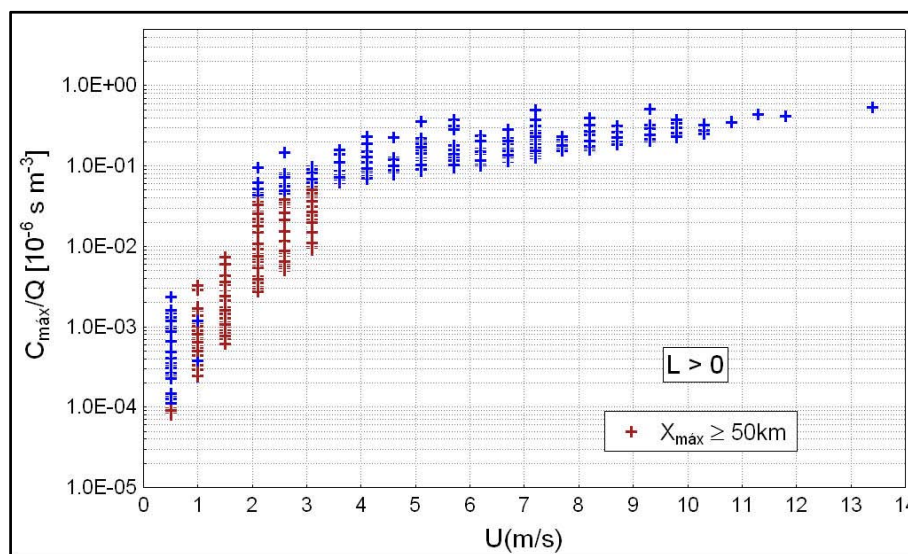


Figura 4. Variación de $C_{\text{máx}}/Q$ con U , estimados hasta 50km de la fuente. Condiciones estables ($L > 0$).

Los casos en color marrón representan el 68% del total de las situaciones estables (esta alta proporción puede ser consecuencia de haber eliminado el efecto de la altura de la capa de mezcla sobre la dispersión vertical de los contaminantes). En general, para los casos restantes se verifica que ($C_{\text{máx}}/Q$) es directamente proporcional a U . Esto podría deberse a que, si bien al aumentar la velocidad del viento se genera mayor dilución de los contaminantes en la atmósfera, se produce simultáneamente una disminución de la altura final de la elevación de la pluma, que también depende del empuje térmico y del impulso vertical de la emisión de contaminantes. El efecto limitante de la altura final de la pluma parece predominar, aumentando la concentración de contaminantes en aire a nivel del suelo.

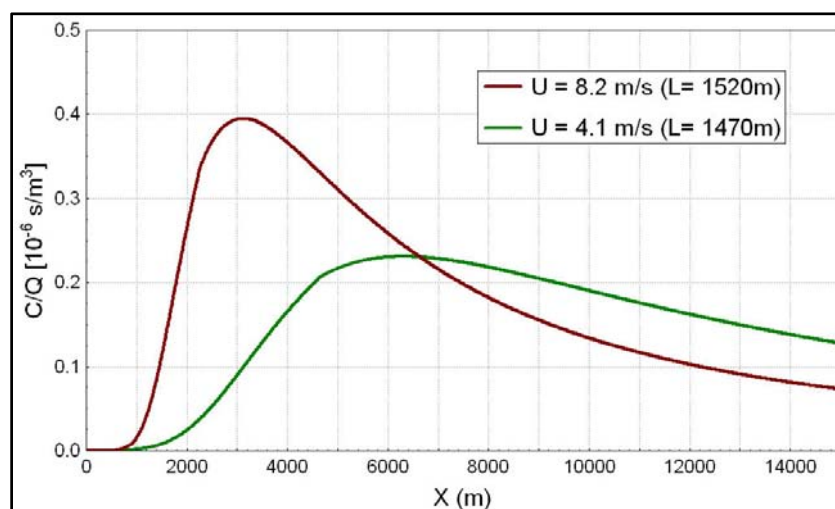


Figura 5. Variación de C/Q con la distancia (X) para dos velocidades del viento. Condiciones atmosféricas estables cercanas a la neutralidad

En la Figura 5 se presentan dos ejemplos de la variación de C/Q a nivel del suelo en función de la distancia a la chimenea en la dirección en la que el viento transporta los contaminantes, para dos diferentes velocidades del viento (4.1m/s y 8.2m/s) y similar condición de estabilidad atmosférica ($L \approx 1500\text{m}$, condición estable cercana a la neutral). Se observa que el valor de $C_{\text{máx}}/Q$ (en color marrón) para $U = 8.2\text{m/s}$ resulta aproximadamente 70% mayor que el obtenido cuando $U = 4.1\text{m/s}$ (en color verde).

En la Figura 6, en color azul, se presenta la variación con U de la distancia ($X_{\text{máx}}$) desde la chimenea en la dirección del viento a la cual se produce $C_{\text{máx}}/Q$, en condiciones estables ($L > 0$).

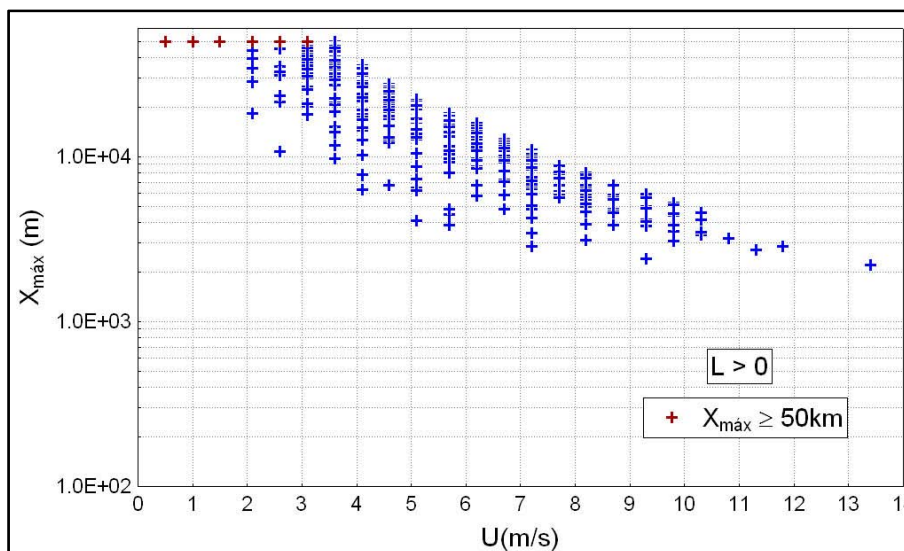


Figura 6. Variación de $X_{\text{máx}}$ con U . Condiciones estables ($L > 0$)

Los casos presentados en color marrón corresponden a situaciones con $X_{\text{máx}} \geq 50\text{km}$ (límite espacial de aplicabilidad del AERMOD). Los grandes valores de $X_{\text{máx}}$ podrían resultar de haber removido la influencia de la altura de la capa de mezcla. En general, se verifica que $X_{\text{máx}}$ varía inversamente con la velocidad del viento. Este resultado puede indicar que a mayor velocidad del viento la elevación de la pluma de contaminantes es menor. En estos casos, el

efecto de la velocidad del viento sobre la elevación de la pluma parece ser más importante que el transporte de los contaminantes a mayores distancias, generando que la $C_{\text{máx}}/Q$ se verifique a distancias más reducidas.

En la Figura 7a) se presenta la variación de $C_{\text{máx}}/Q$ con la velocidad del viento (U) correspondiente a los casos inestables ($L < 0$). En general, se observa que ($C_{\text{máx}}/Q$) es directamente proporcional a U . Sin embargo, debido a la gran dispersión de los valores de $C_{\text{máx}}/Q$, principalmente para $U < 4$ m/s, se analiza a continuación la variación de $C_{\text{máx}}/Q$ con U para diferentes intervalos de L .

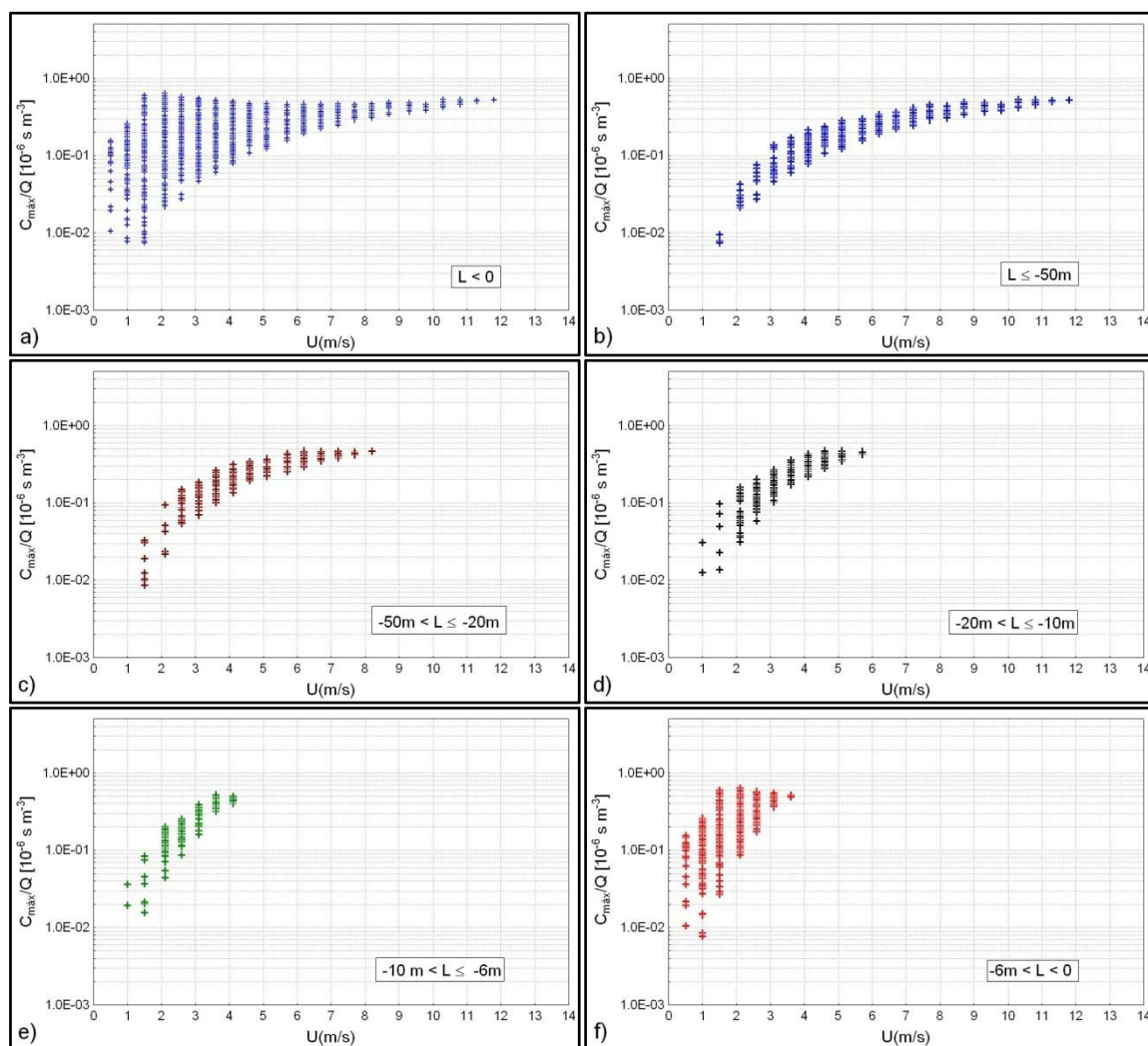


Figura 7. Representación de $C_{\text{máx}}/Q$ con U . Condiciones inestables ($L < 0$)

Las Figuras 7b, c, d, e y f) se presenta la variación de $C_{\text{máx}}/Q$ a nivel del suelo con U para los siguientes intervalos de estabilidad atmosférica: $L \leq -50\text{m}$, $-50\text{ m} < L \leq -20\text{m}$, $-20\text{ m} < L \leq -10\text{m}$, $-10\text{ m} < L \leq -6\text{m}$, $-6\text{ m} < L < 0\text{m}$. En todas estas Figuras se encontró que $C_{\text{máx}}/Q$ aumenta con la velocidad del viento.

La Figura 8 ilustra la variación de C/Q a nivel del suelo con la distancia en la dirección del viento en condiciones inestables ($L = -32\text{m}$) para dos intensidades del viento (3.1m/s y 7.2m/s). Puede observarse que el valor de ($C_{\text{máx}}/Q$) para $U = 7.2\text{m/s}$ (en color marrón) es casi 3.3 veces el obtenido para $U = 3.1\text{m/s}$ (en color verde).

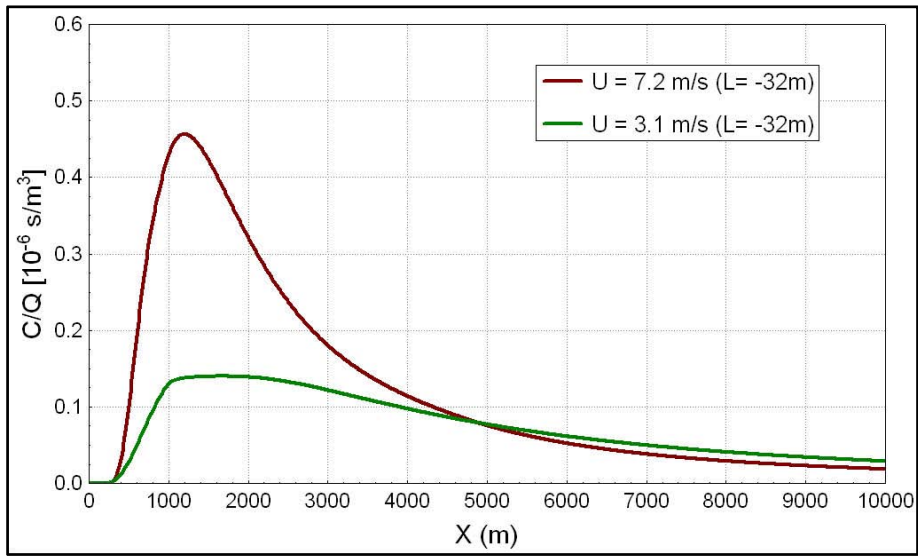


Figura 8. Variación de C/Q con la distancia para dos velocidades del viento. Condiciones inestables.

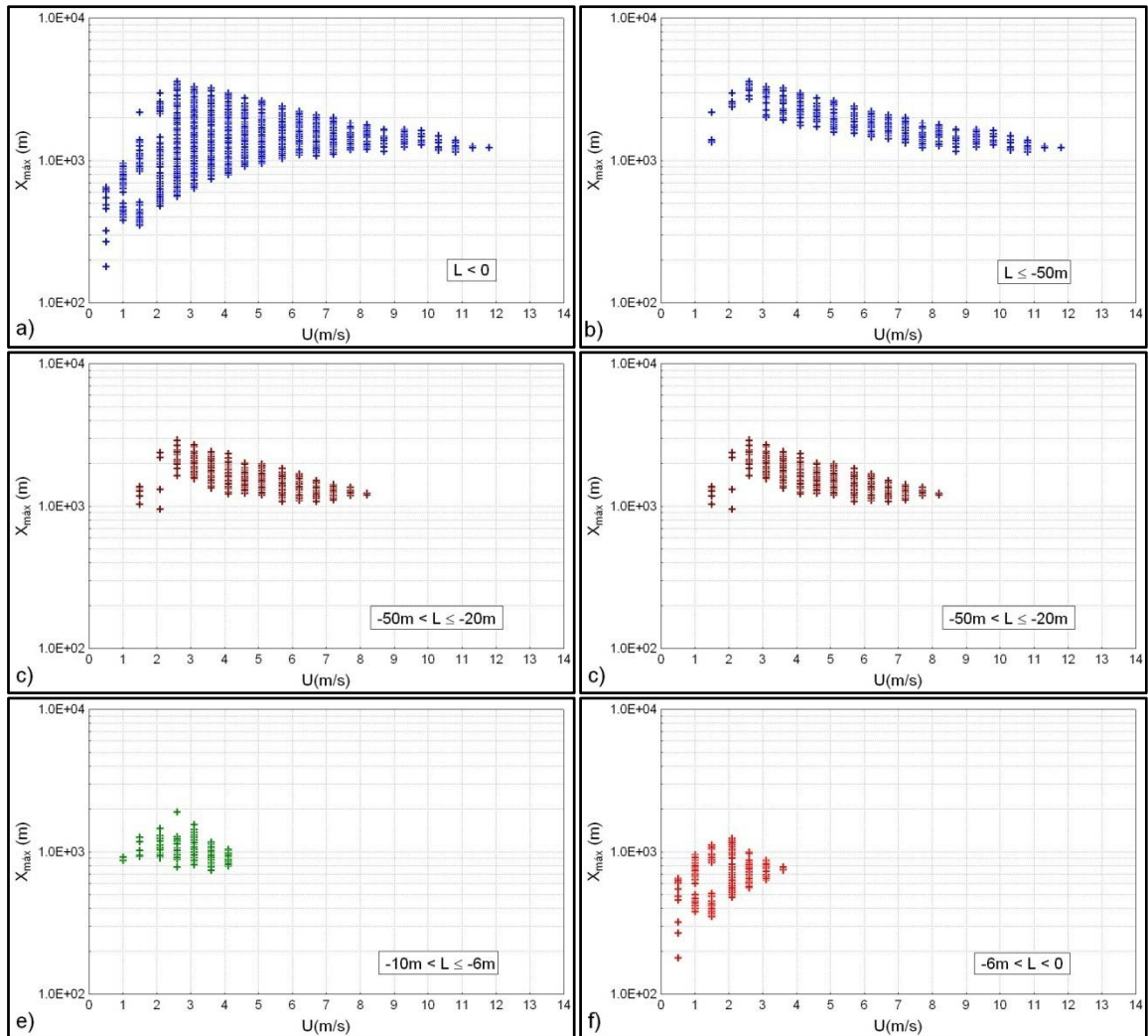


Figura 9. Variación de $X_{\text{máx}}$ con U . Condiciones inestables ($L < 0$)

En la Figura 9a) se presenta la variación de la distancia ($X_{\text{máx}}$) desde la chimenea en la

dirección del viento a la cual se produce $C_{m\acute{a}x}/Q$ con las correspondientes velocidades de viento U para condiciones inestables ($L < 0$). Los resultados obtenidos muestran que la distancia $X_{m\acute{a}x}$ se encuentra comprendida entre 180m (que corresponde a una velocidad del viento de 0.5m/s) y 3580m (para $U = 2.6$ m/s). Debido a la complejidad de la distribución de $X_{m\acute{a}x}$ con U se dividió el intervalo de L en sub-intervalos. Las Figuras 9b, c, d, e y f) presentan la variación de $X_{m\acute{a}x}$ con la velocidad del viento para los siguientes intervalos de inestabilidad atmosférica: $L \leq -50$ m, -50 m $< L \leq -20$ m, -20 m $< L \leq -10$ m, -10 m $< L \leq -6$ m, -6 m $< L < 0$. En condiciones inestables con $L \leq -6$ m (Figuras 9b, c, d y e), se observa que para vientos débiles ($U \leq 2.5$ m/s) $X_{m\acute{a}x}$ aumenta con la velocidad del viento, mientras que para $U > 2.5$ m/s, los valores de $X_{m\acute{a}x}$ disminuyen con el aumento de la velocidad del viento. Por otra parte, en condiciones de marcada inestabilidad (-6 m $< L < 0$, Figura 9f) los valores de $X_{m\acute{a}x}$ parecen aumentar con la velocidad del viento.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza la influencia de la velocidad del viento sobre la concentración horaria de contaminantes en aire a nivel del suelo generada en las siguientes condiciones de emisión: a) desde una fuente ubicada a nivel del suelo, sin impulso vertical ni empuje térmico y b) desde una fuente elevada, con impulso vertical y empuje térmico. Este análisis se basa en los resultados obtenidos aplicando el modelo de dispersión atmosférica AERMOD de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. El análisis considera resultados obtenidos eliminando la influencia de la altura de la capa de mezcla sobre la dispersión vertical de los contaminantes y comprende condiciones atmosféricas estables, inestables y neutras.

Se encuentra que para una emisión desde superficie, la concentración horaria normalizada a nivel del suelo a 1000m de distancia de la fuente, disminuye con la velocidad del viento en condiciones atmosférica estables e inestables (excepto con marcada inestabilidad). En condiciones marcadamente inestables (convectivas) la concentración horaria de contaminantes a 1000m de la fuente, no presenta una tendencia definida con la velocidad del viento.

En el caso de una emisión desde una fuente elevada (chimenea), la concentración horaria máxima normalizada de contaminantes a nivel del suelo es directamente proporcional a la velocidad del viento, en condiciones atmosféricas estables, inestables y neutras. Este resultado podría ser consecuencia del balance entre la dilución de contaminantes generada por la velocidad del viento y la influencia del viento sobre la elevación de la pluma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico otorgado por el Proyecto CONICET-PIP0304.

REFERENCIAS

- Arya, S. P. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. Oxford University Press, 1999.
- Cimorelli, A.J., Perry, S.G., Lee, R.F., Paine, R.J., Venkatram, A., Weil, J.C. and Wilson, R.B. *Current progress in the AERMIC model development program*. Preprint, 89th Annual Meeting Air and Waste Management Association. Pittsburgh, Air and Waste Management Association, 1-27, 1996.
- Cimorelli, A.J., Perry, S.G., Venkatram, A., Weil, J.C., Paine, R.J., Wilson, R.B., Lee, R.F. and Peters, W.D. *AERMOD: Description of Model Formulations*. U. S. Environmental Protection Agency, EPA Rep. 454/R-03-002d. Research Triangle Park, NC., 2003.
- Perry, S.G., Cimorelli, A.J., Lee, R.F., Paine, R.J., Venkatram, A., Weil, J.C. and Wilson, R.B. *AERMOD: A dispersion model for industrial source applications*. In Proceedings 87th

- Annual Meeting Air and Waste Management Association. Pittsburgh, 94-TA23.04. Air and Waste Management Association, Pittsburgh, PA, 1994.
- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climatic Change*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, USA, 2006.
- Turner, D.B. *Workbook of atmospheric dispersion estimates*. PHS Publication N° 999 AP-26, 1967.
- Turner, D.B. and Schulze, R.H. *Practical Guide to Atmospheric Dispersion Modeling*. Air and Waste Management Association – Trinity Consultants, Inc. USA, 2007.
- U.S.EPA. User's Guide for the AMS/EPA regulatory model-AERMOD. EPA-454/B-03-001, 2004.
- U.S.EPA. ADDENDUM. User's Guide for the AMS/EPA regulatory model-AERMOD. (EPA-454/B-03-001), 2012.