

ELESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE FUENTES DE EMISIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE EN LA CIUDAD DE BAHÍA BLANCA

MELLADO, DANIELA^{1,2}; BALI, JUAN L.²; COLMAN LERNER, JORGE E.³; JACOVKIS,
PABLO M. ⁴; PORTA, ATILIO A.¹; SANCHEZ, ERICA Y.¹

1: Centro de Investigaciones del Medio Ambiente (CIMA)
Facultad de Ciencias Exactas - Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Calle 115 esq. 47
e-mail: melladodaniela11@gmail.com, yaninasanch, aporta@quimica.unlp.edu.ar

2: Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF-CONICET)
San Juan Bautista de La Salle 4397 (B1603ALO)
jballi@citedef.gob.ar, web: <http://citedef.gob.ar/>

3: Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas (CINDECA). CONICET – UNLP
Calle 47 N° 257
e-mail: jecolman@quimica.unlp.edu.ar, web: <http://cindeca.quimica.unlp.edu.ar/>

4: Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina. Sede Caseros IV Av. San Martín 2508
pablo.jacovkis@gmail.com

Resumen. *Una adecuada gestión del medio ambiente requiere de la complementación de metodologías que permitan no sólo caracterizar la calidad del aire y conocer sus efectos en la salud, sino también reconocer las principales fuentes de emisión de los contaminantes de interés y sus contribuciones, de manera de poder definir una estrategia que permita conciliar los procesos productivos con la salud de la población. En este trabajo se implementa el modelo NTA (Nonparametric Trajectory Analysis) en el software libre Python, para estimar la distribución de fuentes de emisión y la concentración promedio del dióxido de azufre en la ciudad de Bahía Blanca (Provincia de Buenos Aires, Argentina). La herramienta es considerada un híbrido de los modelos receptores, dado que utiliza mediciones tomadas en el centro de monitoreo y datos meteorológicos locales. Para tal objetivo, se hace uso de la información de calidad de aire de dióxido de azufre, de acceso libre y gratuito en el sitio web del municipio, junto con datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), descritos en el mismo período temporal. En función de la información recopilada, se aplica la herramienta a distintos períodos temporales, complementando el estudio con la elaboración de la rosa de los vientos para el mismo período de interés. Esta herramienta permitió conocer con más detalle el comportamiento previsto del patrón direccional del contaminante, a partir de la estimación de la zona de mayor de distribución de fuentes. Particularmente, se evidenciaron altas concentraciones al noroeste de la estación de monitoreo, en mayor medida para los meses fríos del año. Si bien Petrobras Argentina S.A. representa solo el 17.2% anual de las emisiones de SO₂, es destacable la relevancia que tienen los vientos predominantes en la dispersión de los contaminantes, y consecuente en la definición de las áreas de impacto. Como fortaleza de la herramienta, se destaca la posibilidad de proyectar zonas de mayor amenaza en función de la meteorología local, de modo de optimizar los recursos disponibles aplicados a*

campanias de monitoreo, al acotar la potencial región de emisión.

Palabras clave: Análisis no paramétrico de la trayectoria, Modelos receptores, Distribución de fuentes, Bahía Blanca.

1. INTRODUCCIÓN

En la técnica de distribución de fuentes (*Source Apportionment*) se busca obtener información sobre las potenciales fuentes de contaminación y la proporción en la que estas afectan a los niveles de polución del aire ambiente. Esta tarea se puede realizar mediante modelos receptores, los cuales tienen la ventaja de proporcionar información derivada de mediciones experimentales, limitado en su aplicación a especies muy reactivas. En la gestión de calidad del aire, existe un interés en los resultados de los modelos receptores para el diseño de medidas de reducción de contaminantes [1].

La ciudad de Bahía Blanca (Provincia de Buenos Aires, Argentina) se destaca por la presencia de uno de los polos industriales petroquímicos más importante del país, y un aglomerado urbano de unos 300 mil habitantes [2].

Las autoridades del municipio de Bahía Blanca operan una estación de monitoreo continuo de contaminantes criterio, para determinar el cumplimiento de los estándares provinciales de Calidad del Aire Ambiente. Las mediciones se reportan como valores medios horarios para el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado (MP) en el aire. El sitio de muestreo se encuentra próximo al polo petroquímico (38° 45' 32" S, 62° 17' 08" O).

1.1. Análisis no paramétrico de la trayectoria

El modelo NTA (*Nonparametric Trajectory Analysis*) se considera un modelo receptor híbrido debido a que utiliza observaciones reales de calidad del aire y, a diferencia de los demás, requiere del rol del viento para poder efectuar una georeferenciación potencial de la distribución de las fuentes, es decir, zonas con mayor probabilidad de presencia de fuentes. Otros modelos receptores de análisis multivariado, como PMF, UNMIX y el modelo de balance de masa químico, que cuantifican las fuentes de MP y gases orgánicos de compuestos volátiles (COVs), están basados en balances de masas de las especies químicas involucradas o son estadísticamente derivados de factores de composición. Sin embargo, estos modelos no pueden cuantificar las fuentes de sustancias de interés tales como SO₂ y CO, como tampoco pueden identificar las zonas de mayor probabilidad de presencia de fuentes [3].

En este contexto, el objetivo de este trabajo consiste en estimar la zona de mayor distribución de fuentes de SO₂, como sustancia modelo, mediante la aplicación del modelo NTA en el partido de Bahía Blanca. Dicha distribución se estima tanto anual como estacionalmente, para el período comprendido entre 2013 y 2015.

Este trabajo utiliza datos horarios promedio de la calidad del aire y del viento (magnitud y dirección) para localizar y cuantificar la contribución de las fuentes locales de contaminación del aire que afectan a un sitio receptor.

2. METODOLOGÍA

2.1. Caracterización de la zona de estudio

2.1.1. Relevamiento de las fuentes fijas de emisión de SO_2

La búsqueda de las fuentes se enfoca principalmente en las instalaciones emisoras de SO_2 en el partido de Bahía Blanca, destacando aquellas de mayor caudal de emisión del contaminante. En esta instancia, es importante reconocer la ubicación geográfica y la relación espacial con el punto de muestreo.

2.1.2. Estudio estadístico de las concentraciones de SO_2

Como análisis exploratorio, se realiza una serie de tiempo de las concentraciones del SO_2 , relevadas de la estación de monitoreo continuo, a partir de las medianas diarias en el periodo temporal 2013-2015. Para complementar el análisis, se realiza un gráfico de caja o *boxplot* de las concentraciones de la sustancia para el año 2015. De esta manera, se observan los siguientes estadísticos: mínimo, mediana y máximo (anual y estacionalmente). Para facilitar el análisis de los datos, se definen las estaciones del año como verano (enero-febrero-marzo), otoño (abril-mayo-junio), invierno (julio-agosto-septiembre) y primavera (octubre-noviembre-diciembre).

2.1.3. Análisis de la magnitud y la dirección del viento

En este trabajo se presentan las rosas de los vientos anuales y estacionales, entre 2013 y 2015, de la información horaria suministrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la estación 87750 (38°44'S, 62°10'O).

Las rosas de los vientos resumen información de cómo la velocidad del viento y su dirección se distribuye típicamente en una ubicación determinada. En este trabajo fueron elaboradas con la librería windrose en Python, y son presentadas como rosetas con 16 direcciones cardinales. El módulo se expresa en $m\ s^{-1}$, y se definen rangos comparables a los criterios de estabilidad de Pasquill-Gifford [4].

2.2. Estimación de la retrotrayectoria

La trayectoria hacia atrás (retrotrayectoria) realizada por el contaminante se calcula mediante la componente advectiva, despreciando la componente difusiva. A partir de los datos horarios de superficie del viento, provistos por el SMN, se estiman las trayectorias más probables desde la estación de monitoreo hasta las potenciales fuentes de emisión.

La dirección del viento es provista en el ángulo azimutal, es decir, ángulo medido desde el Norte (0°) incrementándose en sentido horario. Para estimar las trayectorias en el sistema de ejes cartesianos, x (oeste-este) e y (sur-norte), se convierte el ángulo azimutal (Z) en el

ángulo matemático (θ). Este último tiene como origen el Este (0°) y sentido antihorario. Si la velocidad del viento es u , las coordenadas de la velocidad del viento en un tiempo t_k están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} v_x(t_k) &= u(t_k) \cos(\theta(t_k)), \\ v_y(t_k) &= u(t_k) \sen(\theta(t_k)). \end{aligned} \quad (1)$$

Los puntos de las trayectorias (X, Y) para el tiempo final t_j se definen por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} x_k(t_j) &= \sum_{i=0}^k v_x(t_{j-i}) \Delta t, \\ y_k(t_k) &= \sum_{i=0}^k v_y(t_{j-i}) \Delta t. \end{aligned} \quad (2)$$

Esto vale para $k=1, \dots, N$, siendo Δt , el paso del tiempo, tiempo comprendido entre las mediciones, y N es el número de pasos requeridos para la trayectoria.

2.3. Estimación de las concentraciones promedio anuales y estacionales

Para estimar la concentración promedio (\hat{C}) que pasa por un punto de la grilla de coordenadas (X_i, Y_j) definidos por el usuario, se selecciona la función de densidad núcleo de Epanechnikov (K). La siguiente expresión permite obtener la concentración en un punto de interés:

$$\hat{C}(X_i, Y_i) = \frac{\sum_k K\left(\frac{X_i - x_k}{h}\right) K\left(\frac{Y_i - y_k}{h}\right) C_k}{\sum_k K\left(\frac{X_i - x_k}{h}\right) K\left(\frac{Y_i - y_k}{h}\right)}, \quad (3)$$

donde h es el parámetro de suavizado definido por Henry [3]. Según la experiencia del autor, los resultados presentan baja sensibilidad a la elección de h . Los puntos (x_k, y_k) son todos aquellos obtenidos por todas las retrotrayectorias para un tiempo t_k calculadas por la ecuación 2.

2.4. Estimación de la distribución geográfica de las fuentes

En este modelo híbrido receptor, el término de distribución de fuentes ($S(\theta)$) referencia a la estimación de la cantidad de contaminante asociada a una región geográfica. Este enfoque hace uso de las concentraciones promedios georeferenciadas $\hat{C}(X, Y)$ calculadas en el paso anterior (Ec.3) y la distribución de los puntos de la retrotrayectoria, \hat{f} . La densidad de distribución de fuentes ($S(\theta)$) se obtiene mediante el producto normalizado de las concentraciones por la distribución de la densidad de puntos de la trayectoria:

$$S(\theta) = \frac{1}{\bar{C}} \int \hat{f}(r \cos(\theta), r \sen(\theta)) \hat{C}(r \cos(\theta), r \sen(\theta)) r dr, \quad (4)$$

donde \bar{C} es la concentración promedio y r es la distancia radial desde el centro del monitoreo de interés. Un mayor detalle sobre el desarrollo de las ecuaciones puede encontrarse en Henry [3].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El relevamiento de las fuentes de emisión de SO_2 fue tomado del informe PIM [5], el cual presenta una actualización del Inventario de Emisiones Gaseosas de fuentes fijas puntuales de emisión continua, provisto por el municipio de Bahía Blanca para el año 2015. De allí se desprende que los principales contribuyentes en las emisiones de óxidos de azufre (SO_x), lo constituyen la *Central Piedra Buena S.A.* (82.8% anual) y *Petrobras Argentina S.A.* (17.2% anual). Las emisiones de los SO_2 en la central están directamente relacionadas con la cantidad de azufre que contiene el combustible utilizado.

En la Figura 1 se muestran las ubicaciones de las principales instalaciones y de la estación de monitoreo continuo de contaminantes criterio. Se puede observar que la *Central Piedra Buena S.A.* se encuentra al sureste de la estación de monitoreo, mientras que *Petrobras Argentina S.A.* se localiza al noroeste de la misma. Cabe destacar que, la *Central termoeléctrica Almirante Brown S.A.*, localizada al noroeste de la zona de estudio, en D. Cerri, no ha sido considerada en este estudio dado que la planta ha comenzado a funcionar a modo de prueba, en los últimos meses del período 2013-2015, según el informe de la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (CAMMESA) [6].

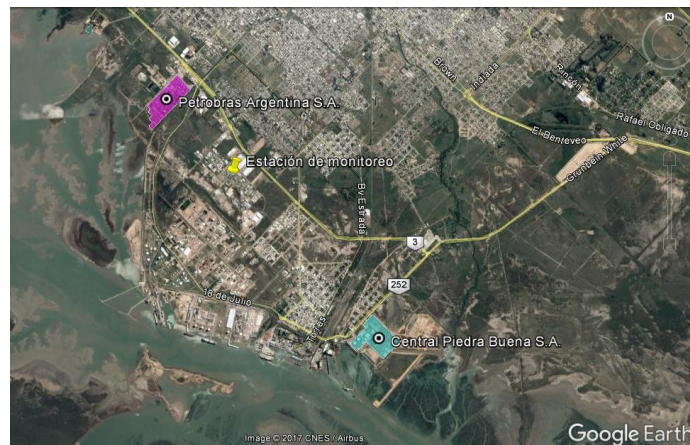


Figura 1. Ubicación de las principales instalaciones emisoras de dióxido de azufre y del centro de monitoreo en el Partido de Bahía Blanca. Fuente: Google Earth, 2017.

3.1. Resultados de la zona de estudio

En los tres años de datos del contaminante, se tiene un total de 26280 mediciones, de las cuales 816, 739 y 340 corresponden a valores perdidos en los años 2013, 2014 y 2015, respectivamente, reemplazados por el valor de la mediana del período temporal analizado.

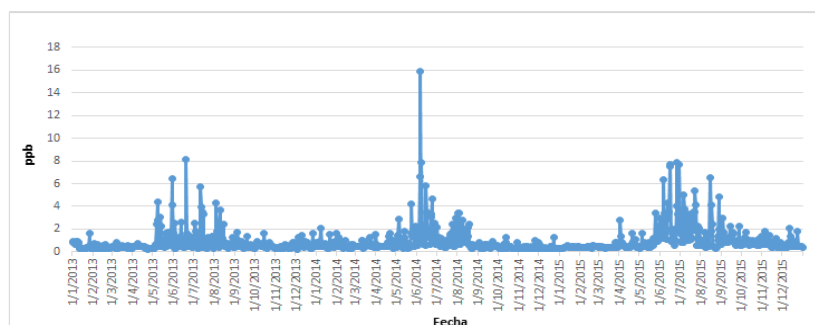


Figura 2. Concentración mediana diaria del dióxido de azufre (ppb) para el periodo temporal 2013-2015.

En la Figura 2, la serie de tiempo muestra un comportamiento estacional de la concentración de SO_2 en el período 2013-2015. Particularmente, se manifiestan concentraciones máximas en los meses fríos y mínimas en los meses cálidos. Cabe destacar que la concentración máxima no alcanza o es lo suficientemente pequeña respecto al límite que establece el Decreto 3395/96, reglamentario de la Ley Provincial 5965. La dispersión de los valores de concentración se puede observar mediante un gráfico *boxplot*. En la Figura 3 se muestra el análisis para el año 2015 (anual y estacional), para el conjunto de datos sin valores atípicos, discriminados según el criterio de Iglewicz y Hoaglin [7]. De su estudio se observa una variación significativa de las concentraciones en las distintas estaciones. En las estaciones cálidas (verano y primavera), las concentraciones medidas en el centro de monitoreo son significativamente menores, y presentan una dispersión menor en comparación a las estaciones frías (ver las cajas 2 y 5 de la Figura 3, correspondiente a verano y primavera, respectivamente). En cambio, en los meses más fríos, es decir, aquellos comprendidos en las estaciones de otoño e invierno, en los cuales la temperatura ambiente es menor, se observa que las concentraciones son superiores. Esto puede atribuirse a los movimientos verticales de las masas de aire debido a la turbulencia de origen térmico, la cual tiene mayor influencia durante días de elevada radiación solar y escasa nubosidad [8].

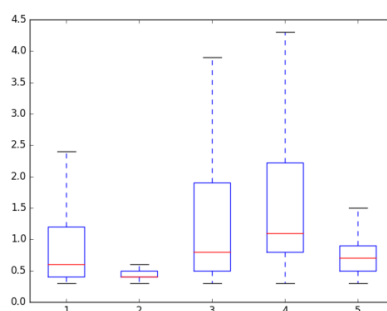


Figura 3. Gráfico de caja o boxplot para las concentraciones del dióxido de azufre (ppb): (1) año 2015, y verano (2), otoño (3), invierno (4) y primavera (5).

Por su parte, los años 2013 y 2014 muestran un comportamiento similar al presentado en la Figura 23 y en tal sentido, se ha optado por presentar el *boxplot* sólo para el 2015.

Complementariamente a los resultados presentados hasta aquí, se analizaron las rosas de los vientos anuales y estacionales para el período 2013-2015 (Figura 4). De su análisis, se concluye que existe una predominancia de la dirección Noroeste (NO) para cada año y en todas sus estaciones, teniendo los vientos de mayor intensidad una mayor frecuencia en vientos provenientes del NO y NNO. Los vientos calmos se encuentran igualmente distribuidos para los períodos analizados.

3.1.1 Resultados del modelo NTA

Para estimar las trayectorias más probables del SO_2 se utilizó un dominio temporal de una hora y una resolución temporal de 5 minutos. Como el tiempo de la resolución es inferior

al de las mediciones del contaminante, fue necesario interpolar linealmente los datos del viento. Por último, se asocia a cada punto de la trayectoria la concentración medida en el sitio receptor para el mismo tiempo t_j .

El dominio temporal seleccionado para la trayectoria permitió trabajar a escala local, contemplando las fuentes del contaminante de interés y, además, garantizar que la sustancia no reaccione. Con los puntos que componen las trayectorias (Ec.2 y Ec.3), se aproxima mediante un suavizado o regresión no paramétrica la concentración promedio (Ec.4).

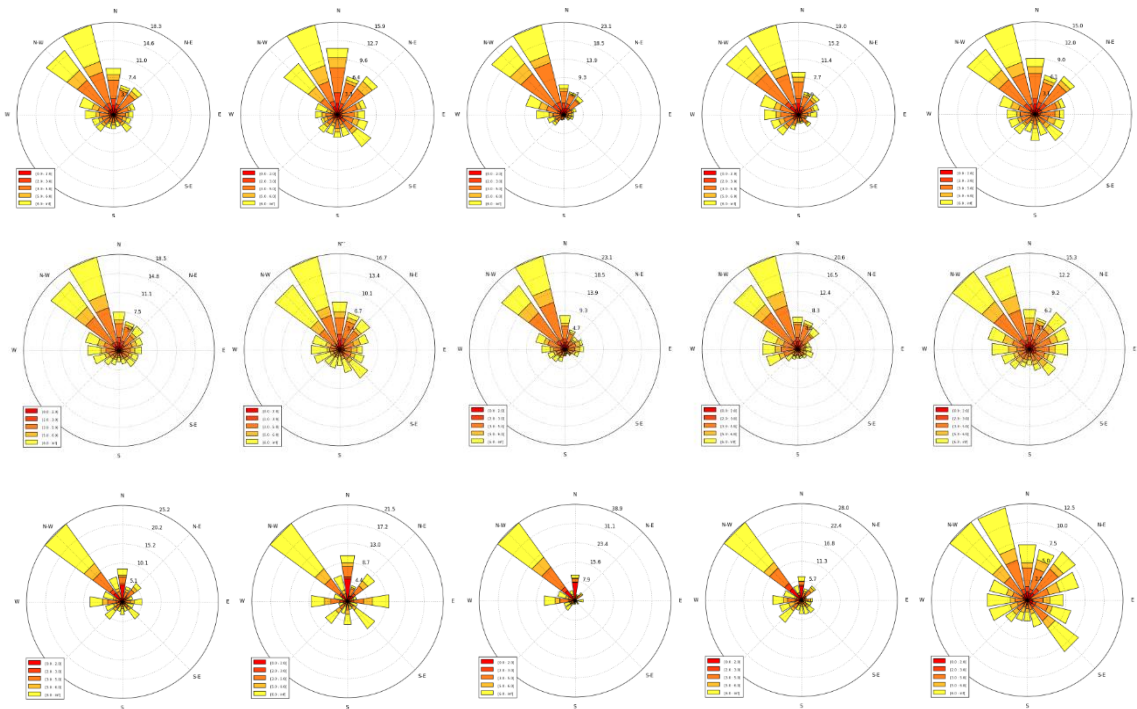


Figura 4. Rosa de los vientos para el año 2015 (primera fila), 2014 (segunda fila) y 2013 (tercera fila). En las columnas se observa la representación anual (primera columna), y las estacionales: verano (segunda columna), otoño (tercera columna), invierno (cuarta columna) y primavera (quinta columna). El módulo del viento está expresado en $m.s^{-1}$, siendo la proporción de color rojos los vientos suaves y los amarillos más intensos.

Se seleccionó un dominio espacial de 10 km x 10 km, centrado en el sitio de monitoreo con una resolución espacial de 0.5 km. El resultado se muestra en la Figura 5, donde el eje x representa el movimiento de oeste a este, y el eje y el movimiento de norte a sur [km]. En la misma se destaca la presencia de las concentraciones máximas promedios del SO_2 en las estaciones frías (columna 3 y 4), en concordancia con lo observado en la Figura 3. Adicionalmente, se observa cómo los vientos predominantes juegan un rol fundamental en la distribución del contaminante, y se destacan las mismas regiones comprometidas.

A partir de la ecuación 4, se obtiene la función de distribución de fuentes (S) en función de la dirección (ángulo azimutal, Z). Para este análisis, se estableció una resolución espacial de 1° para la dirección y de 0.1 km para la componente radial. Esta última tiene un dominio espacial

de 5 km.

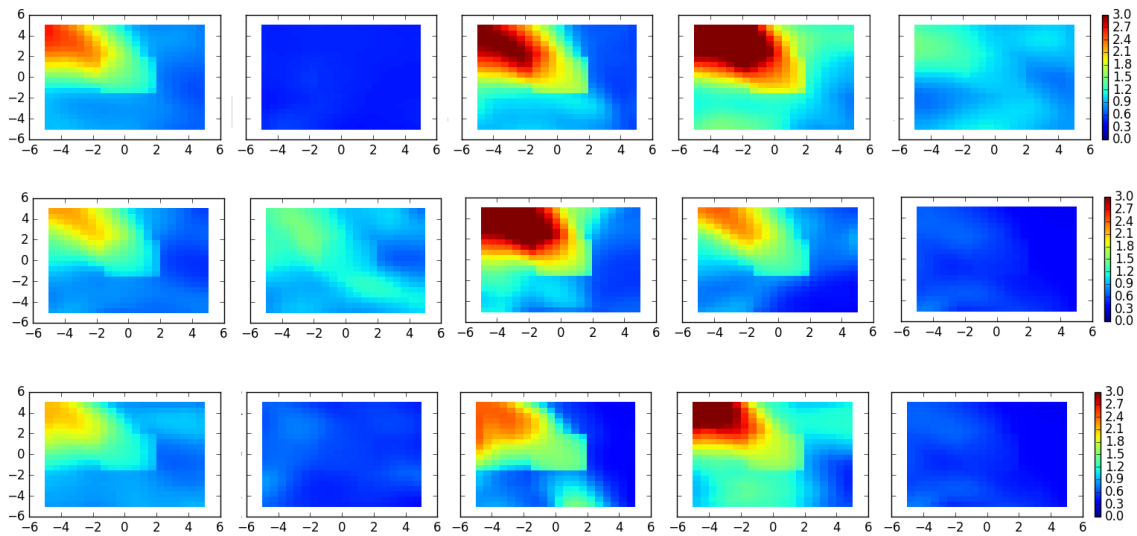


Figura 5. Concentraciones promedio de dióxido de azufre para el año 2015 (primera fila), 2014 (segunda fila) y 2013 (tercera fila). En las columnas se observa la representación anual (primera columna), y las estacionales: verano (segunda columna), otoño (tercera columna), invierno (cuarta columna) y primavera (quinta columna). El centro de monitoreo se encuentra localizado en el punto (0,0). Las unidades espaciales de los ejes x e y son km, y la concentración se expresa en ppb.

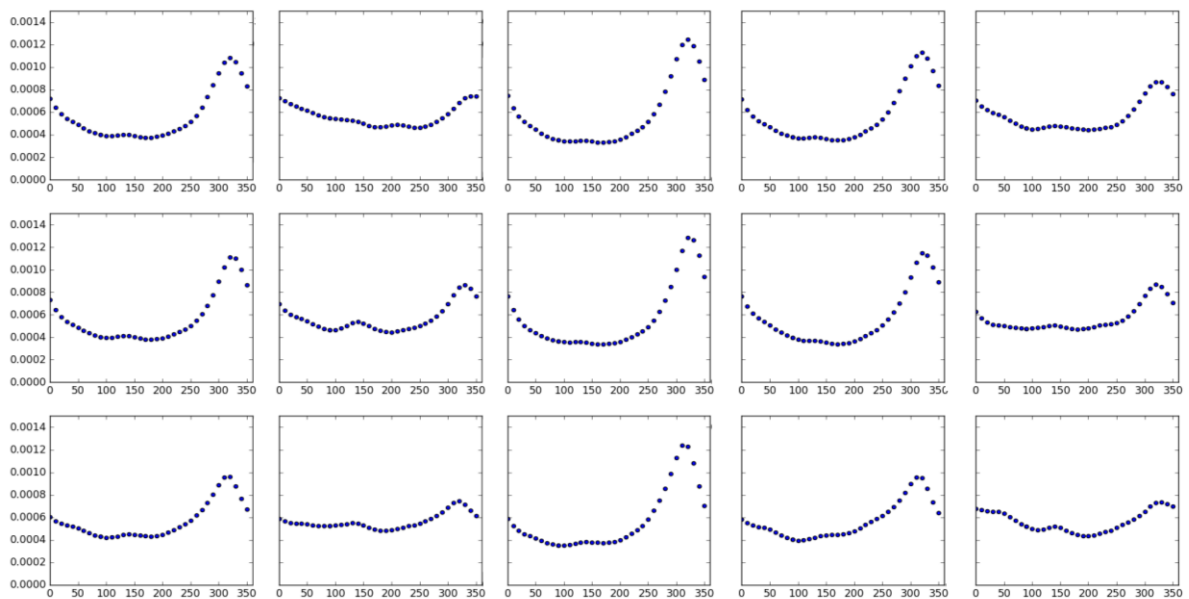


Figura 6. Distribución de fuentes normalizada para el año 2015 (primera fila), 2014 (segunda fila) y 2013 (tercera fila) en función del ángulo azimutal. En las columnas se observa la representación anual (primera columna), y las estacionales: verano (segunda columna), otoño (tercera columna), invierno (cuarta columna) y primavera (quinta columna).

Del
de la
y de la

Sector	Distribución 2015 (%)	Distribución 2014 (%)	Distribución 2013 (%)
N	15.7	16.0	13.4
NE	11.0	10.9	11.1
E	9.2	9.3	9.8
SE	9.0	9.3	10.0
S	8.7	8.8	9.9
SO	10.1	10.0	11.3
O	14.4	13.6	14.8
NO	21.9	22.0	19.6

análisis
Figura 6

Tabla 1, se concluye que la dirección predominante es la misma para cada año y cada estación, definido por los valores máximos. Se puede observar que las mayores concentraciones medias en la distribución de fuentes se encuentran en el arco formado por los 280°- 0°, correspondiente al NO.

Sector	Distribución 2015 (%)	Distribución 2014 (%)	Distribución 2013 (%)
N	15.7	16.0	13.4
NE	11.0	10.9	11.1
E	9.2	9.3	9.8
SE	9.0	9.3	10.0
S	8.7	8.8	9.9
SO	10.1	10.0	11.3
O	14.4	13.6	14.8
NO	21.9	22.0	19.6

Tabla 1. Distribución de fuentes de concentraciones promedios para el dióxido de azufre en función de los puntos cardinales para los años 2015, 2014 y 2013.

El resultado obtenido por este modelo (*S*) es superior al de la rosa contaminación (relación de la dirección del viento y las concentraciones medidas del contaminante) en la identificación de fuentes cercanas. Esto se debe a que no es sensible al número de arcos angulares seleccionado para su representación gráfica [9] y además ofrece una información más detallada de la relación de SO₂ y su potencial origen, ya que contempla el transporte de las emisiones (retrotrayectoria y su frecuencia).

4. CONCLUSIÓN

El modelo NTA se utilizó para evaluar el impacto de fuentes locales de dióxido de azufre (SO₂) en la estación de monitoreo de que dispone el municipio de Bahía Blanca en dicha

ciudad, para el período 2013-2015. En tal sentido, se utilizó para estimar la contribución de las instalaciones del polo industrial a las concentraciones medias de SO₂ monitoreadas, a partir de datos relevados de la estación de monitoreo continuo e información meteorológica provista por el Servicio Meteorológico Nacional. Asimismo, el modelo NTA permitió estimar la distribución de fuentes de emisión, entendiéndose como una herramienta útil para la gestión en cuanto a la visualización espacial de las potenciales fuentes de emisión.

Los resultados evidencian altas concentraciones al NO de la estación de monitoreo, en mayor medida para los meses fríos del año, que en ningún momento alcanza el valor límite que establece el Decreto 3395/96, reglamentario de la Ley Provincial 5965. Si bien Petrobras Argentina S.A. representa solo el 17.2% anual de las emisiones de SO₂, es destacable la relevancia que tienen los vientos predominantes en la dispersión de los contaminantes, y consecuente en la definición de las áreas de impacto. Por otro lado, en períodos posteriores al de estudio, es necesario estudiar el aporte de la Central Termoeléctrica de Almirante Brown S.A.

La metodología utilizada se considera versátil, pudiéndose aplicar a cualquier contaminante no reactivo para el dominio temporal del modelado. Desde el punto de vista de la gestión, la herramienta permite analizar los resultados gráficamente, representando sobre un mapa aquellas regiones con mayor probabilidad de presencia de fuentes de emisión para un contaminante de interés, a partir un punto de monitoreo. Adicionalmente, permite al usuario proyectar zonas de mayor amenaza en función de la meteorología local, siendo la dirección y la magnitud de viento los aspectos destacables, de modo de optimizar los recursos disponibles aplicados a campañas de monitoreo, al acotar la potencial región de emisión.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica (ANPCyT), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), al Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF) y a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC PBA), que han contribuido con fondos para este trabajo. Agradecen también al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) por suministrar la información meteorológica, y al Comité Técnico Ejecutivo de la Municipalidad de Bahía Blanca, por facilitar los datos de calidad del aire.

REFERENCIAS

- [1] Belis, C. A. et al. "European guide on air pollution source apportionment with receptor models, Report EUR 26080 EN, European Commission, Joint Research Centre." Institute for Environment and sustainability, (2014).
- [2] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la Cruz Roja Argentina. Documento País 2012. Riesgo de desastres en Argentina. (2012). Disponible en: http://www.msal.gob.ar/images/stories/ryc/graficos/0000000748cnt-2014-04_documento-pais.pdf
- [3] Henry, R., "Locating and quantifying the impact of local sources of air pollution". *Atmospheric Environment*, 42 (2), 358-363, (2008).

- [4] Golder, Donald. "Relations among stability parameters in the surface layer." *Boundary-Layer Meteorology*, 3.1, 47-58, (1972).
- [5] Municipalidad de Bahía Blanca. Secretaría de Gestión Ambiental. Comité Técnico Ejecutivo. Programa Integral de Monitoreo 2015. Disponible en: <http://www.bahiablanca.gob.ar/equipos-de-trabajo/gestion-ambiental/comite-tecnico-ejecutivo/informes-medioambientales/informes-medioambientales-2015/>
- [6] Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A. Informe Anual, (2015). Disponible en: <http://www.cammesa.com/linfoanu.nsf/MINFOANU?OpenFrameSet>
- [7] Iglewicz, B. y Hoaglin D. C., *How to detect and handle outliers. ASQC basic references in quality control*. Milwaukee, WI: American Society for Quality Control (1993).
- [8] Ruiz Boada F., González Ferradas E. y Miñana Aznar A., *Zonas de Planificación para accidentes graves de tipo tóxico*. Guía técnica (en el ámbito del Real Decreto 1254/99 [Seveso II]). Universidad de Murcia, (2003)
- [9] Henry, R., Norris, G. A., Vedantham, R., y Turner, J. R. "Source region identification using kernel smoothing". *Env. Science & technology*, 43(11), 4090-4097, (2009).