

**DETECCIÓN DE REGIONES DE PROCEDENCIA DE DIÓXIDO DE AZUFRE FRENTE A  
EVENTOS, EN GRAN LA PLATA**

**Mellado, Daniela<sup>1, 2</sup>; Bali, Juan L.<sup>2</sup>; Colman Lerner, Jorge E.<sup>3</sup>; Reyna Almandos, Jorge<sup>4, 5</sup>;  
Sacchetto, Víctor<sup>4</sup>; Jacovkis, Pablo M. <sup>6</sup>; Porta, Atilio A.<sup>1</sup>; Sanchez, Erica Y.<sup>1</sup>**

1: Centro de Investigaciones del Medio Ambiente (CIM). CONICET - UNLP  
Calle 115 esq. 47.  
e-mail: melladodaniela11@gmail.com

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

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

4: Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Plata.  
Av. del Petróleo Argentino 417.  
e-mail: vss@frlp.utn.edu.ar

5: Centro de Investigaciones Ópticas (CIOP). CONICET-UNLP - CIC.  
Camino Centenario y 506.  
e-mail: jreyna@ciop.unlp.edu.ar

6: Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina. Sede Caseros IV.  
Av. San Martín 2508 (B1678GQO).  
pjacovkis@untref.edu.ar

**Resumen.** *La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que la contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. La población bonaerense (ARG) constituye una de aquellas que viven en lugares donde no se respetan las directrices de la OMS sobre la calidad del aire, y las escasas políticas de monitoreo impiden abordar esta problemática con seriedad. Un paso inicial implica reconocer la calidad del aire que respiramos y detectar los factores que contribuyen a la mala calidad del mismo (meteorología local y fuentes de emisión). Este trabajo propone una metodología capaz de detectar eventos donde la calidad del aire es insalubre según niveles guía propuestos por organismos competentes, y determinar así las zonas potenciales de procedencia mediante la aplicación del modelo de receptor híbrido NTA (Nonparametric Trajectory Analysis). Para su implementación, se analizó una base de datos meteorológicos y de concentraciones atmosféricas de dióxido de azufre, registrados en la UTN-FRLP, para el período 1999-2003. Los resultados muestran los eventos considerados insalubres acorde al Índice de calidad de aire (ICA) de la U.S.EPA, asociados a las potenciales zonas geográficas de procedencia, siendo el polo petroquímico la fuente areal principal de emisión. La fortaleza de la metodología radica en visualizar en tiempo real, la región potencial de emisión frente a la detección de una mala calidad del aire en un sitio de monitoreo. Asimismo, su capacidad de relacionar emisión y condiciones meteorológicas locales, para señalar a aquellas fuentes potenciales de aporte que no necesariamente deben ser las que más emisiones presentan en la región estudio.*

**Palabras clave:** Eventos, Modelos de Receptor, Calidad del Aire, Dióxido de Azufre.

## 1. INTRODUCCIÓN

El conglomerado urbano de Gran La Plata se encuentra conformado por el partido de La Plata, Ensenada y Berisso. Con una población de 799.523 habitantes (INDEC, 2010), se presenta como una zona potencialmente expuesta a padecer los efectos de la contaminación atmosférica, debido al número de habitantes y a la estructura productiva en la región (Petcheneshsky et al., 1998). No obstante, el crecimiento poblacional y la ausencia de políticas de ordenamiento territorial, junto al incremento del tráfico vehicular, contribuyen a alimentar la problemática (Colman Lerner et al., 2012; Colman Lerner et al., 2014; Massolo 2010).

En la región, se emplaza uno de los complejos petroquímicos más importantes de América del Sur. Tan solo la refinería presenta una capacidad de procesamiento de 189.000 barriles de crudo por día (YPF, 2019). Asimismo, se encuentra situado en un área cuya atmósfera presenta una baja capacidad de auto-purificación, principalmente en las estaciones de otoño e invierno (Gassmann y Mazzeo, 2000; Ratto, 2018). En este contexto, la ausencia de una red de monitoreo consolidada de la calidad del aire y la premisa de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) que considera a la contaminación del aire como un riesgo medioambiental (WHO, 2019), permiten destacar la necesidad de estudiar la calidad del aire en la región (OMS, 2006; OPS, 2000). La calidad del aire local puede ser determinada a partir de la medición de contaminantes criterio, según los índices de calidad del aire (ICA) de cada región (Porta et al., 2018). Dado que nuestro país no cuenta con un índice propio que permita describir la relación entre las concentraciones medioambientales de los dichos contaminantes y la salud de la población expuesta, en este trabajo se utilizan los índices propuestos por la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (US-EPA, 2019a). Bajo esta clasificación, es posible estimar el grado de contaminación atmosférica en un sitio receptor para un momento dado, y los posibles efectos en la salud de la población. La escala de estos ICA está compuesta por 6 niveles de contaminación atmosférica definiendo como buena, moderada, insalubre para grupos sensibles, insalubre, muy insalubre hasta peligroso la calidad del aire, siendo los dos primeros aceptables para la gestión debido a que no se presentan medidas de acción para proteger a la población. El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) es uno de los contaminantes criterio, capaz de caracterizar el nivel de contaminación en una región, que se ha medido en forma continua por UTN-FRLP junto a parámetros meteorológicos de superficie. Además, las principales emisiones del contaminante en cuestión provienen de procesos de combustión en instalaciones industriales y centrales eléctricas (US-EPA, 2019b), dos tipos de empresas que se emplazan en la región de estudio. En el siguiente trabajo se propone una metodología capaz que detectar las zonas potenciales de procedencia mediante la aplicación del modelo de receptor NTA (Henry et al., 2009) frente a eventos de concentraciones elevadas para los datos disponibles comprendidos en el periodo 1999-2003.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Relevamiento de fuentes de emisión

El reconocimiento de las fuentes de emisión presentes en la región de estudio constituye un paso fundamental a seguir por un tomador de decisiones para interpretar los

resultados. Por lo tanto, se requiere, como información de base, el conocimiento tanto de las fuentes influyentes que toman lugar en la región como de los eventos esporádicos naturales y antropogénicas. Información tal como la ubicación geográfica, caudal de emisión y contaminantes emitidos a la atmósfera resultan importantes para una buena interpretación de los resultados.

## **2.2. Determinación de eventos**

Para el periodo que abarca la base de datos bajo estudio, se estima la concentración media según tiempo de exposición que estipula el ICA considerado, para el contaminante bajo estudio. Los eventos serán definidos por el período de tiempo en el cual la calidad del aire sea insalubre para grupos sensibles. En esta instancia, los datos faltantes de concentración no fueron imputados.

## **2.3. Aplicación del modelo de receptor NTA**

### *Generación de retrotrayectorias*

Debido a que el modelo no considera fenómenos químicos, se estiman las retrotrayectorias a escala local para los eventos mediante un modelo rectilíneo uniforme, a partir de las concentraciones observadas ( $C$ ), tomadas en el sitio receptor.

Con origen en el centro de monitoreo, las retrotrayectorias son estimadas a partir de información meteorológica (velocidad y dirección del viento) in situ. Para cada evento definido, se realizan las retrotrayectorias de cada concentración durante un tiempo de simulación (20 minutos). Asimismo, se establece 60 minutos como diferencia temporal máxima entre los datos disponibles de concentración ( $C$ ) y de los vientos, y se interpola linealmente. Respecto a los vientos, la dirección definida por el ángulo azimutal ( $^{\circ}$ ) (medido desde el Norte con sentido horario) y el módulo ( $\text{km h}^{-1}$ ), son expresados en coordenadas cartesianas para simplificar su interpolación, descartando aquellos vientos con módulos menores a  $1 \text{ m s}^{-1}$  (condiciones calmas). Un mayor detalle del modelo puede encontrarse en Henry et al. (2009).

### *Estimación de regiones de procedencia*

A partir de las retrotrayectorias espaciales estimadas para un evento, se realiza una regresión no paramétrica. El resultado muestra las concentraciones promediadas espacialmente ( $\hat{C}$ ) que describen cada evento. Los polígonos que presentan concentraciones superiores permiten inferir las zonas de mayor aporte de emisión. Un mayor detalle sobre la aplicación y el desarrollo matemático del modelo de receptor NTA, se encuentra en Henry et al. (2009).

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este trabajo se aplicó la metodología a una base de datos de dióxido de azufre para el período 1999-2003, obtenida en la UTN-FRLP. Las concentraciones medias, máximas y mínimas analizadas para el 2003, 2002, 2000 y 1999, se presentan en la Tabla 1. Durante el año 2001 no se realizaron mediciones. Los valores medios no superan los niveles normados en la Provincia de Buenos Aires publicados en la Tabla A del Anexo III de la Resolución N° 242/97, complementario al Decreto 3395/96, la cual establece una

concentración promedio anual para el SO<sub>2</sub> de 0.03ppm (OPDS, 2019).

**Tabla 1.** Estadísticos media, mínimo, máximo anuales para las concentraciones observadas de SO<sub>2</sub> el periodo de estudio.

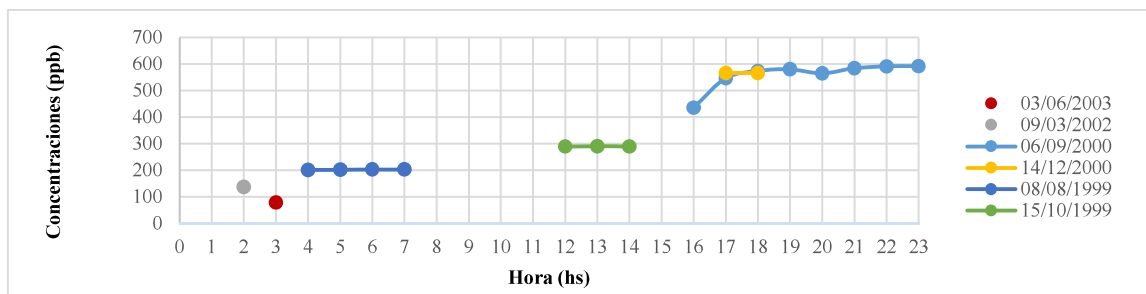
Año	Media (ppb)	Mínimo (ppb)	Máximo (ppb)
2003	3.6	2.0 E-3	112.5
2002	6.6	7.2 E-3	529.8
2000	27.0	6.9	606.6
1999	16.4	2.0	291.1

En este estudio, se define como evento a aquellos períodos de tiempo en los cuales las concentraciones medias horarias de SO<sub>2</sub> superan los 76 ppb, y en consecuencia la calidad del aire se vuelve probablemente insalubre para grupos sensibles (personas con enfermedades pulmonares, adultos mayores y niños) según el ICA propuesto por la US-EPA. En la Tabla 2, se presentan los eventos encontrados en el análisis de la base de datos de SO<sub>2</sub>: inicio, duración y cantidad de datos de concentraciones observadas durante el evento, y además, el análisis de la concentración máxima observada durante el evento con su correspondiente velocidad y dirección del viento. Las filas resaltadas con color destacan a aquellos eventos aptos para aplicar el modelo de receptores NTA debido a que presentan velocidades de vientos superiores a 1 m s<sup>-1</sup>.

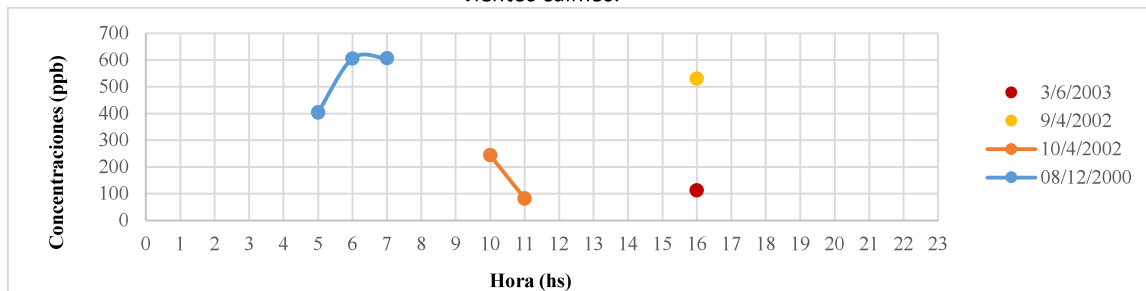
**Tabla 2.** Descripción de los eventos del periodo comprendido entre 1999 y 2003.

Inicio (Fecha - Hora)	Duración (horas)	Cantidad datos	Datos asociados al máximo				
			Concentración (ppb)	Hora	Velocidad(km/h)	Dirección	
<b>2003</b>							
03/06/03	3:00	1	58	151	3:04	3.0	-
03/06/03	16:00	1	40	155	16:39	4.5	NO
<b>2002</b>							
09/03/02	2:00	1	58	335	2:44	7.0	N
09/04/02	16:00	1	35	1549	16:32	2.0	-
10/04/02	10:00	2	55	493	10:57	1.4	-
<b>2000</b>							
06/09/00	16:00	8	443	608	22:02	20.0	N
08/12/00	5:00	3	95	609	5:37	2.0	-
14/12/00	17:00	2	81	577	17:29	11	E
<b>1999</b>							
08/08/99	4:00	4	145	204	6:38	6.0	O
15/10/99	12:00	3	178	295	12:02	13.0	E

De los 10 eventos encontrados solo 6 son aptos a ser analizados con el NTA debido a que la georreferenciación de los eventos gobernados por vientos calmos no es representativa. Luego, al estudiar los eventos puede observarse en aquéllos donde no se presentan vientos calmos, los mayores promedios horarios fueron encontrados durante la tarde-noche, entre las 17 y las 22 horas (Figura 1). Mientras que en eventos gobernados por vientos calmos, las concentraciones superiores se presentaron en la madrugada y en una hora la tarde (Figura 2).



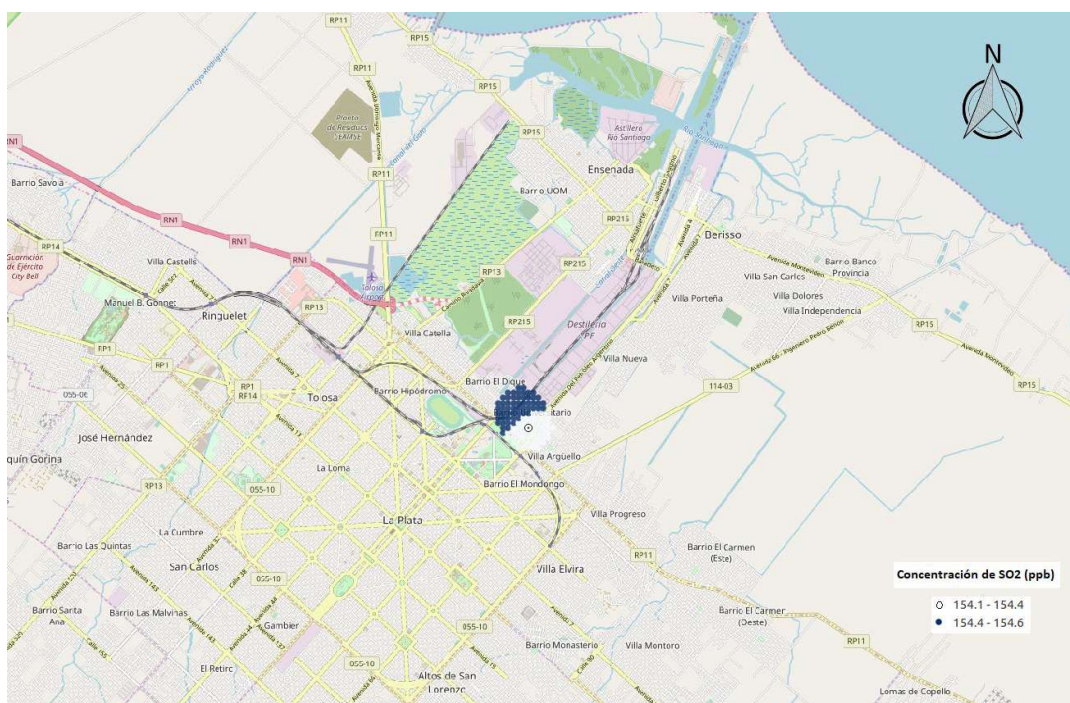
**Figura 1.** Concentración media horaria de SO<sub>2</sub> (ppb) en función del horario registrado para eventos sin vientos calmos.



**Figura 2.** Concentración media horaria de SO<sub>2</sub> (ppb) en función del horario registrado para eventos gobernados por vientos calmos.

Al evaluar anualmente los eventos discriminando en función de la presencia de vientos calmos, se puede observar que en condiciones de baja dispersión atmosférica se presentan valores superiores para 2003 y 2000. En el año 2003 la concentración media para eventos gobernados por calmos fue un 40% superior respecto a condiciones de buena dispersión (113 ppb frente a 79 ppb) y en el 2002 un 100% superior (285 ppb frente a 138 ppb). Esto podría estar indicando la presencia de una fuente cercana. Particularmente, en el 2000 no se observó una amplia diferencia entre las concentraciones medias en las distintas condiciones de vientos (560 ppb sin vientos calmos y 539 ppb para eventos gobernados por vientos calmos), mientras que en el año 1999 no se contemplan datos de monitoreo del contaminante que describan un evento asociado a vientos calmos.

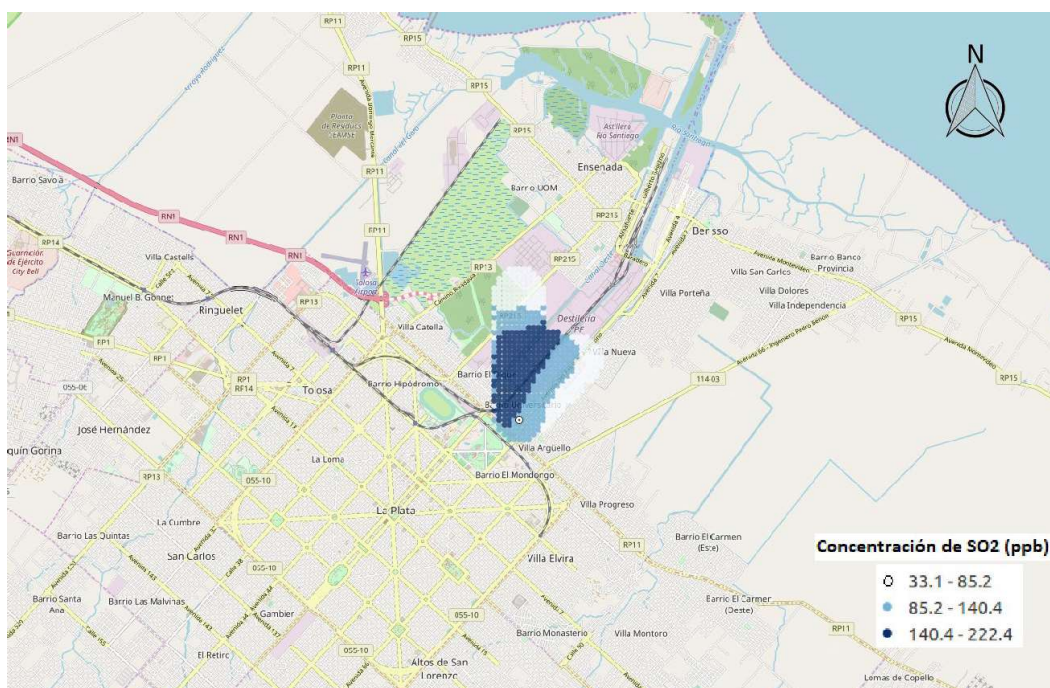
Para el periodo contemplado en este estudio, en el año 2003 se presentaron dos eventos; el primero se desarrolló en la madrugada del día 3 de junio, cuya concentración promedio fue de 79 ppb, mientras que el segundo tomó lugar durante la misma tarde, con una concentración promedio de 112.5 ppb, asociado a la presencia de vientos calmos. En la Figura 3 se pueden observar las zonas de procedencia mediante las concentraciones superiores obtenidas por el modelo NTA. Cabe destacar que los valores de módulos de vientos asociados al primer evento fueron relativamente bajos, lo cual se ve reflejado en el corto alcance de las retrotrayectorias. La región estimada representa la presumible fuente de origen del contaminante, donde encierra tanto el inicio del polo petroquímico como vías de alto tráfico.



**Figura 3.** Aplicación del modelo NTA: Concentraciones promedio para el evento desarrollado el día 3-Junio-2003 a las 3 a.m. El círculo blanco indica la ubicación geográfica del sitio receptor.

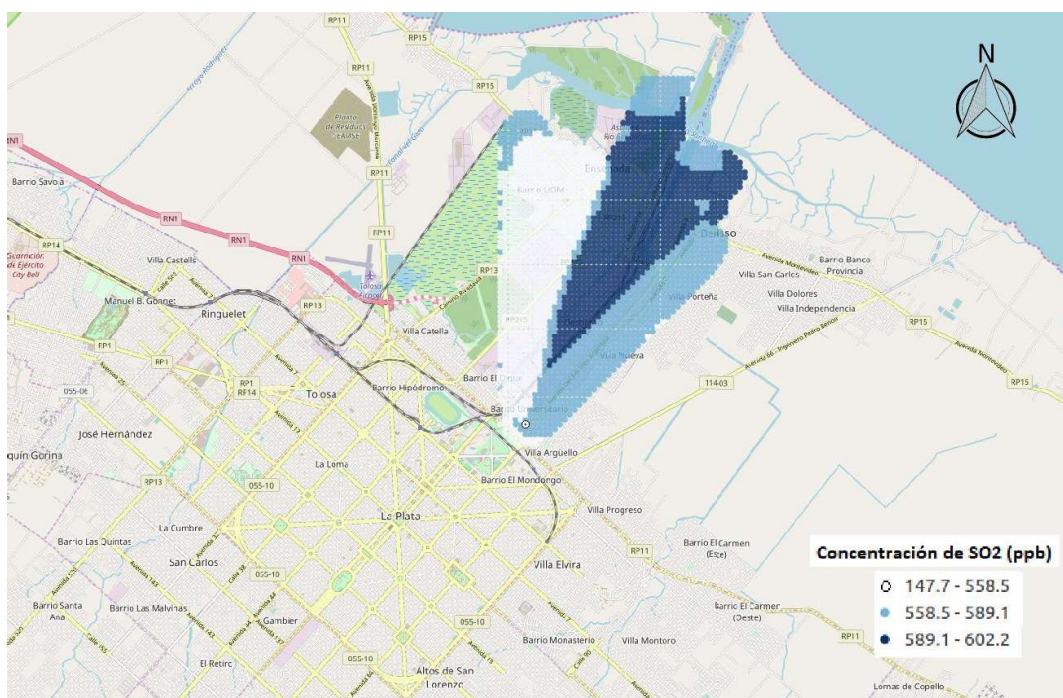
En el año 2002 se registraron 3 eventos, el primero durante la madrugada del día 9 de marzo alcanzando una concentración promedio de 138 ppb; el segundo, en la tarde del 9 de mayo con 530 ppb, y por último, en la mañana del día 10 de abril con una duración de dos horas, cuyas concentraciones promedio horarias fueron 244 ppb y 81 ppb. Los últimos dos eventos descriptos estuvieron asociados a la presencia de vientos calmos. El resultado de aplicar el modelo para el evento desarrollado el día 09/03/2002 a las 2 am puede observarse en la Figura 4, en la cual las concentraciones superiores que estiman la zona de procedencia del SO<sub>2</sub> toman lugar principalmente sobre el polo petroquímico.

Para el año 2000 se encontró la presencia de 3 eventos, siendo el primero observado el día 6 de septiembre entre horas diurnas y nocturnas; para el mismo las concentraciones promedio horarias se incrementaron desde 436 ppb a 592 ppb con el paso de las horas. El segundo evento, gobernado por vientos calmos, acontece el 8 de diciembre en horas de la madrugada con concentraciones promedio desde 404 a 607 ppb. Por último, el tercero toma lugar durante la tarde del 14 de diciembre, donde concentraciones promedio observadas fueron de 566 ppb. De los dos eventos analizados mediante el modelo de receptor se observa que el primero (06/09/2000) resalta como presumible zona de procedencia al polo petroquímico (Figura 5) mientras que el segundo (14/12/2000) indica una región al Oeste del sitio receptor (Figura 6), en cuya dirección no se destaca la presencia de una fuente fija de emisión para este contaminante. Ambos eventos tienen en común el desarrollo del mismo en horas diurnas con concentraciones medias horarias similares.

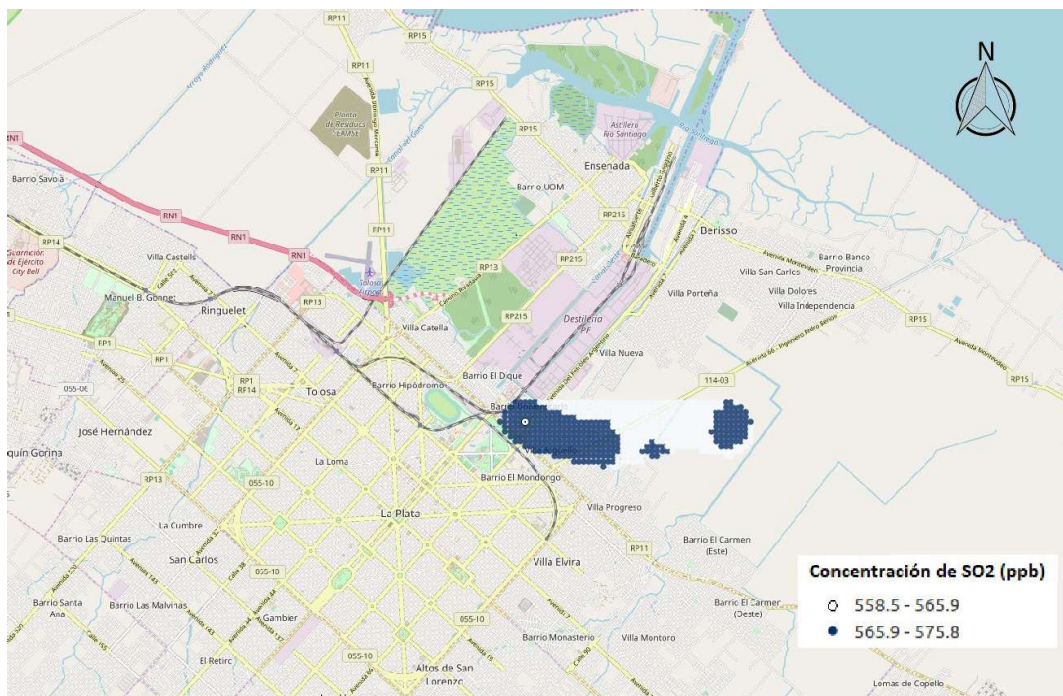


**Figura 4.** Aplicación del modelo NTA: Concentraciones promedio para el evento desarrollado el día 9-Marzo-2002 a las 2 a.m. El círculo blanco marca la ubicación geográfica del sitio receptor.

Durante el año 1999 se presentaron 2 eventos; el primero tomó lugar en la madrugada del día 8 de agosto, cuya concentración promedio permaneció prácticamente constante en 202 ppb, mientras que el segundo se registró en horas del mediodía para el día 15 de octubre con concentraciones promedio de 290 ppb. En las Figuras 7 y 8 resultantes de la aplicación del modelo NTA, puede observarse análogamente al último evento evaluado (14/12/2000), en el que las presumibles zonas de procedencias indican regiones en cuyas direcciones no se reconoce la presencia de una fuente fija de emisión para el contaminante bajo estudio. Se asume la manifestación de alguna situación que no se ha reportado oportunamente, pero la aplicación de la metodología en tiempo real puede ser útil para detectar estas emisiones ocasionales de fuentes de emisión no reconocidas.

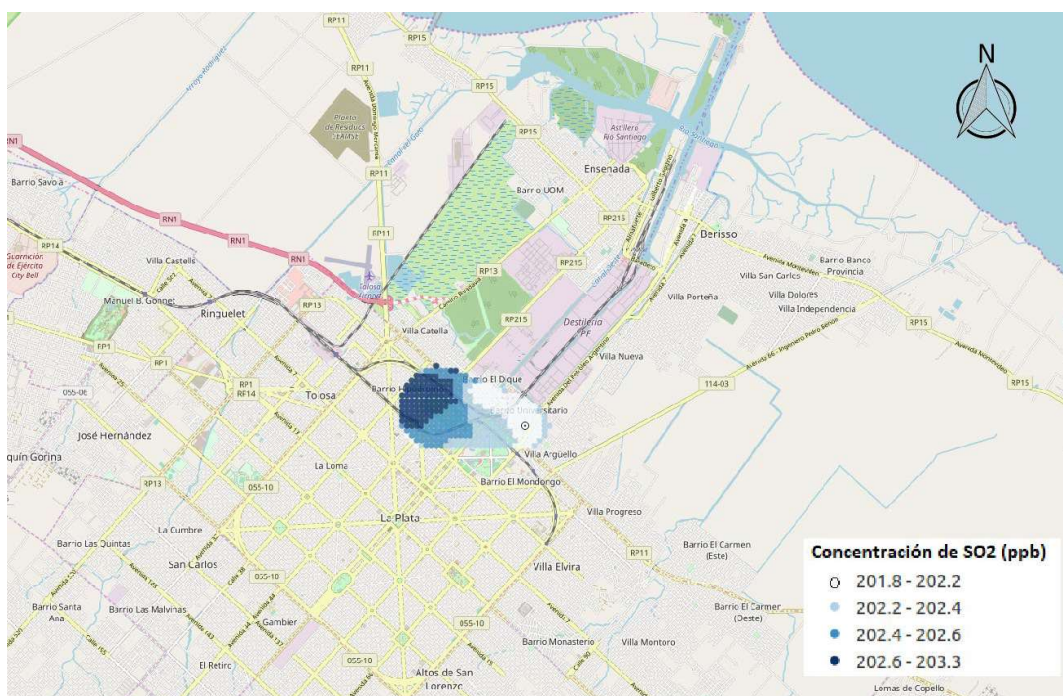


**Figura 5.** Aplicación del modelo NTA: Concentraciones promedio para el evento desarrollado el día 6-Septiembre-2000 entre las 16 y 23 horas. El círculo blanco marca la ubicación geográfica del sitio receptor.

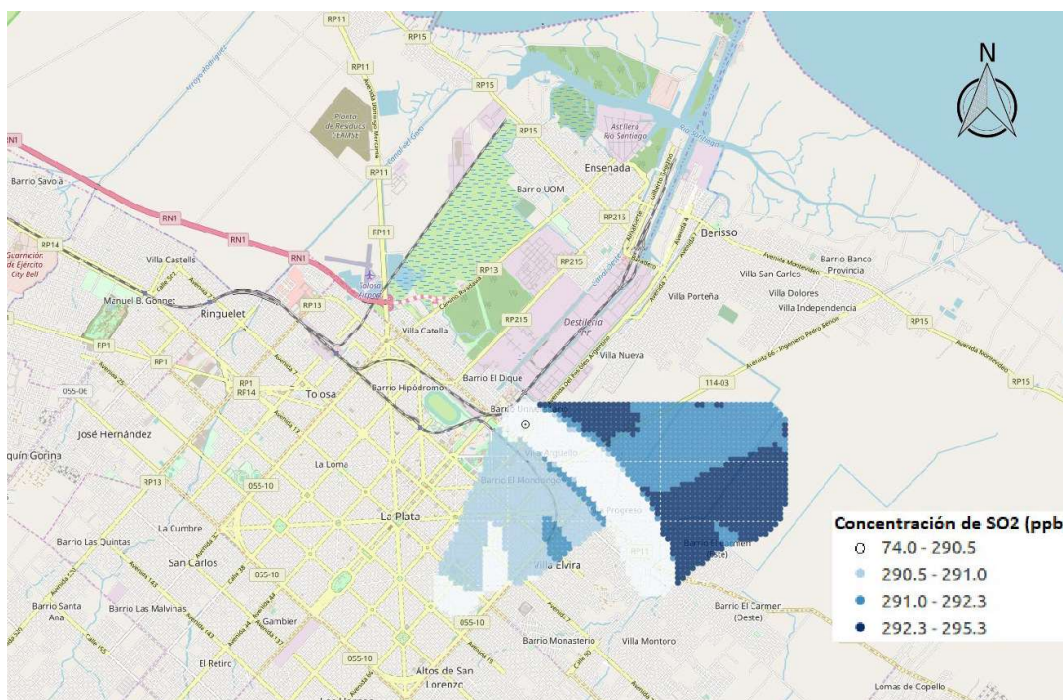


**Figura 6.** Aplicación del modelo NTA: Concentraciones promedio para el evento desarrollado el día 14-Diciembre-2000 entre las 16 y 17 horas. El círculo blanco marca la ubicación geográfica del sitio receptor.





**Figura 7.** Aplicación del modelo NTA: Concentraciones promedio para el evento desarrollado el día 8-Agosto-1999 entre las 4 y 7 am. El círculo blanco marca la ubicación geográfica del sitio receptor.



**Figura 8.** Aplicación del modelo NTA: Concentraciones promedio para el evento desarrollado el día 15-Octubre-1999 entre las 12 y 14 horas. El círculo blanco marca la ubicación geográfica del sitio receptor.

#### 4. CONCLUSIONES

- El uso de modelos de receptores como herramientas de análisis local no se encuentra ampliamente difundida en nuestro país por las organizaciones gestoras de la calidad del aire. Dado que es considerada una herramienta complementaria,

la misma debería ser utilizada para la prevención y respuesta de posibles eventos. En este trabajo se ofrece una metodología rápida y de fácil interpretación para detectar eventos de mala calidad del aire a partir del índice propuesto por la US-EPA, versátil para cualquier sustancia, siempre y cuando existan mediciones con una frecuencia alta (menor o igual a una hora). A su vez, resulta de importancia contar con datos meteorológicos en el lugar para poder proporcionar una interpretación más cercana a la realidad.

- Debido a que el contaminante estudiado es dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), característico de emisiones antropogénicas relacionadas a procesos de combustión, las principales fuentes fijas pueden reconocerse aun cuando no se cuente con un inventario de emisiones. En el presente estudio puede notarse que grandes emisiones generadas en presencia de vientos calmos indicarían la presencia de fuentes cercanas, presumiblemente el polo petroquímico emplazado en el partido de Ensenada, el cual por su extensión puede considerarse una fuente areal. El uso del modelo de NTA frente a eventos permitió observar, en el periodo 1999-2003, que la potencial zona de procedencia del SO<sub>2</sub> para los eventos más actuales era el polo previamente mencionado; sin embargo, en los eventos más antiguos se observa que existen fuentes no identificables como fijas. En estos últimos casos, debería complementarse con un inventario de emisiones de fuentes fijas o bien, con datos del tráfico asociados a los caminos más transitados, para poder identificar la fuente de origen.
- En conclusión, la metodología utilizada se considera versátil, pudiéndose aplicar a cualquier contaminante que no se vea afectado por procesos de remoción, tales como reacción o deposición durante el tiempo de transporte modelado. Se obtiene un resultado en tiempo real de la amenaza, siendo capaz de georreferenciarse para poder trabajar en la preparación y respuesta a eventos.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), a la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CICPBA), a la Facultad Regional La Plata de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN - FRLP) y al Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF), que han contribuido con fondos para este trabajo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Colman Lerner, J. E., Sanchez, E. Y., Sambeth, J. E., y Porta, A. A. (2012). Characterization and health risk assessment of VOCs in occupational environments in Buenos Aires, Argentina. *Atmospheric environment*, 55, 440-447.

Colman Lerner, J. E., Kohajda, T., Aguilar, M. E., Massolo, L. A., Sánchez, E. Y., Porta, A. A., ... & Mueller, A. (2014). Improvement of health risk factors after reduction of VOC concentrations in industrial and urban areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(16), 9676-9688.

Gassmann, M. I., Mazzeo, N. A. (2000). Air pollution potential: Regional study in Argentina. *Environmental Management*, 25(4), 375-382.

Henry, R., Norris, G. A., Vedantham, R., Turner, J. R. (2009). Source region identification using kernel smoothing. *Environmental science & technology*, 43(11), 4090-4097.