



ID de la contribución : 43

Tipo : no especificado

Modelado de la variación espacial de la concentración atmosférica de metano en la ciudad de Tandil utilizando análisis de regresión exploratoria

Palabras claves: Metano urbano, fuentes fijas, regresión exploratoria, OLS

Introducción

De acuerdo a la última comunicación del IPCC (IPCC, 2013), para frenar y/o reducir los efectos del cambio climático es necesario disminuir sustancialmente las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), las cuales han aumentado de manera significativa desde 1750. Uno de los gases con mayor potencial de calentamiento global es el metano (CH_4), cuyo efecto es 25 veces mayor al del dióxido de carbono (Daelman, 2012). Las fuentes antrópicas de este gas incluyen el uso de la energía fósil y su distribución, las actividades agrícolas y el sector de residuos (Cambaliza, 2015). Al contrario de las emisiones naturales de CH_4 , desde humedales principalmente, las emisiones desde fuentes antrópicas pueden ser cuantificadas, reguladas y tratadas adecuadamente, especialmente las de origen urbano, como rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de aguas residuales, uso de combustibles fósiles y sistemas de distribución de gas (Cambaliza, 2015; Czepiel, 1993). En Argentina, las emisiones de CH_4 del sector energético representan casi un 10% de las emisiones totales, del cual el 57% corresponde a gas natural y a su consumo para cocción, calefacción y combustible para vehículos. En cuanto al sector de residuos y el industrial, sus emisiones representan el 17% y el 0,08% del total, respectivamente. De las emisiones de CH_4 originadas por el sector de residuos, el 51,79% proviene de los residuos sólidos urbanos, el 22,51% de las aguas residuales domésticas y el 25,7% de las aguas residuales industriales (República Argentina, 2014).

El presente trabajo tiene como objetivo principal identificar las posibles fuentes fijas y dispersas de CH_4 que se encuentren cercanas a los sitios de estudio en la ciudad de Tandil (provincia de Buenos Aires) y su influencia en las concentraciones atmosféricas medidas de dicho gas. Para ello, se trabajó con mediciones puntuales de la concentración de CH_4 en una red de muestreo y con herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). Por otra parte, se busca obtener un modelo matemático que permita estimar las concentraciones atmosféricas de CH_4 en cualquier punto, a partir de factores que contemplen el peso relativo de las fuentes de emisión.

Materiales y métodos

La ciudad de Tandil ($37^{\circ}19' \text{ S}$, $59^{\circ}08' \text{ O}$) se localiza en el centro sur de la provincia de Buenos Aires. Su superficie es de 52,34 km^2 y su población es de 116.916 habitantes, según el último censo nacional (INDEC, 2010). Dentro de la zona urbana, se seleccionaron 23 puntos como sitios de estudio (Figura 1) para la medición de la concentración de CH_4 atmosférico, incluyendo cuatro sitios de control (S3, S7, S17, S18) con baja influencia antropogénica y alejado de posibles fuentes del gas en estudio. La elección de los sitios se basó en una distribución homogénea dentro del área urbana, incluyendo distintas densidades de edificación, usos de suelo (residencial y comercial) y circulación de automóviles.

El periodo de estudio fue a lo largo del año 2019, durante el que se recolectaron muestras integradas de aire en periodos consecutivos de 15 días. Para esto, se utilizaron recipientes de acero inoxidable (volumen de 0,5 L) con una válvula de ingreso, a la cual se le colocó un restrictor de ingreso de aire que permite un llenado lento del colector (Gere y Gratton, 2010). Una vez finalizado el período de recolección de 15 días, los recipientes colocados en los sitios de muestreo fueron retirados, cambiados por otros, y llevados al laboratorio para la cuantificación de las concentraciones atmosféricas de CH_4 por medio de cromatografía gaseosa (CG Agilent 7890A, detector FID). Durante el período completo de estudio, se obtuvieron entre 20 y 24 muestras por sitio de muestreo, permitiendo así, obtener una media anual de la concentración atmosférica de CH_4 para cada uno de los sitios.

A partir de los valores medios de CH₄ obtenidos durante el año de estudio, se realizó un análisis estadístico para la descripción de los resultados y un Test ANOVA, LSD Fisher ($p < 0,05$) para conocer diferencias espaciales, estadísticamente significativas, entre los sitios de muestreo.

Se aplicaron herramientas de SIG (ArcGIS 10.5) con el fin de analizar qué variables independientes influyen o explican los valores medios de CH₄ encontrados. Primero, se localizaron los sitios de muestreo, mediante coordenadas, con sus respectivas concentraciones medias anuales de CH₄. Luego, se aplicó el modelo de interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en inglés, Inverse Distance Weight) a los valores de medias anuales de CH₄, creando de esta manera una superficie continua de datos sobre la ciudad de Tandil con una resolución espacial de 30 metros. Finalmente, a partir del raster IDW, se creó una capa de puntos de toda la superficie, obteniendo una tabla de atributos.

Se identificaron aquellas fuentes fijas (Figura 1) que, a priori, pudieran contribuir a la variación espacial de las concentraciones atmosféricas de CH₄ en la zona urbana: estaciones de expendio de gas natural comprimido (GNC), plantas de tratamiento de efluentes cloacales (Planta 1, Planta 2 y Planta 3), relleno sanitario (RS) y un embalse artificial (Dique). Todas las fuentes fueron localizadas en una capa vectorial y se calculó la distancia euclidiana entre cada sitio de muestreo y cada fuente, creando así cuatro mapas individuales de distancia. Por otro lado, se creó una capa raster que contiene información sobre la densidad de viviendas por hectárea calculada a partir del proceso de viviendas realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos en el año 2021. Todas las capas poseen una resolución espacial de 30 metros. Los valores de densidad de viviendas y distancia fueron extraídos y añadidos a la tabla de atributos de los sitios de muestreo. De esta manera, cada uno de los sitios contiene información sobre la media anual de concentración atmosférica de CH₄, la densidad de viviendas (DU), la distancia en metros a las estaciones de GNC (DG), al relleno sanitario (DR), al embalse (DD) y la distancia promedio a las tres plantas de tratamiento de efluentes cloacales (DP).

Considerando que la variable dependiente es la media anual de concentración de CH₄ y las variables independientes son las cinco capas creadas, se realizó la regresión exploratoria. Los principales coeficientes que se tuvieron en cuenta para poder verificar los resultados son: el signo (+ si es directamente proporcional, - si es inversamente proporcional), el valor de R² ajustado, el nivel de significancia ($= 0,10, = 0,05, = 0,01$), el Factor de Inflación de la Varianza (VIF en inglés, menor a 7,5 indica independencia entre las variables independientes) y el % de significancia de las variables (la consistencia en las relaciones). Los modelos o las combinaciones de variables, que lograron superar todos los criterios establecidos, se utilizaron para realizar una regresión de Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS, de sus siglas en inglés) y obtener un modelo matemático para calcular la concentración atmosférica de CH₄ en la ciudad de acuerdo a las variables contempladas. Se debe tener en cuenta que todos los índices del OLS fueron evaluados con un $p < 0,01$.

Resultados y discusión

La media anual de la concentración de CH₄ atmosférico para la ciudad de Tandil presentó un valor de 2,64 ppm (Tabla 1). Las concentraciones medias de CH₄ reportadas para todos los sitios se encontraron entre valores de 2,06 ppm a 8,65 ppm. El mínimo valor corresponde al sitio control S3 ubicado en una zona de baja densidad de viviendas y alejada de fuentes fijas de CH₄. Seguido a este valor, se encuentran el S7, S17 y S18, con concentraciones medias de 2,08, 2,07 y 2,08 ppm, respectivamente. Los valores medios más bajos, así como valores bajos de desvío estándar en estos cuatro sitios permiten confirmar que se comportan como sitios control e inferir acerca del impacto que tienen las actividades antrópicas sobre las concentraciones atmosféricas de CH₄. Esto se vio reflejado en concentraciones de CH₄ más altas en los otros sitios urbanos, producto de una densidad de viviendas mayor y su consecuente incremento en el consumo residencial de gas natural. Por otro lado, la concentración media de CH₄ más alta corresponde al RS, donde se detectó la concentración más alta (16,94 ppm) y la mayor desviación estándar. El segundo valor medio más alto fue de 6,41 ppm, perteneciente a la Planta 1, cuya concentración máxima detectada fue 11,54 ppm. El resto de los sitios presentaron medias anuales intermedias con valores entre 2,07 ppm (S6) y 2,32 ppm (S2). El Dique en un principio fue considerado como una fuente fija de CH₄, sin embargo, la concentración media anual de CH₄ registrada se encuentra dentro de los valores de los sitios urbanos e incluso hasta menor, sin diferencias estadísticamente significativas respecto a ellos. Por lo tanto, el Dique no fue considerado como variable independiente para el análisis de regresión exploratoria.

Las concentraciones relativamente altas en el RS y en la Planta 1, sumadas a que los resultados del test ANOVA, LSD Fisher (Tabla 1) mostraron diferencias estadísticamente significativas de estas concentraciones con el resto de los sitios, requirió que estos sitios sean excluidos en los próximos análisis para hacer más notables las diferencias entre los demás sitios. Al excluir estas fuentes fijas, también se excluyeron la Planta 2 y Planta 3 y, de esta manera, se trabajó sólo con las fuentes dispersas. Por lo tanto, la regresión exploratoria se aplicó a todos los sitios de muestreo, excepto a las fuentes fijas de CH₄. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Todas las variables resultaron con un 100% de valor de significancia y un p-value igual a 0,01. Además, las variables DU y DG explican un 44% y 41%, respectivamente, de la variabilidad atmosférica de CH₄. La variable DR explica un 0,05% de la variabilidad atmosférica. Con respecto a DP, sólo explica un 0,008% y, además, en el 50% de los modelos presenta signo positivo, lo cual no es racional ya que se esperaría que a mayor distancia de las plantas de tratamiento se encuentren menores concentraciones. Este resultado puede deberse a que a medida que la distancia desde las plantas aumenta, la distancia al resto de las fuentes fijas disminuye, la densidad poblacional aumenta y, por lo tanto, la concentración aumenta, generando una discordancia. Sin

embargo, los valores de VIF fueron menores a 7,5 para todas las variables, lo que significa que las variables no presentan alta multicolinealidad.

De los resultados de la regresión exploratoria se observa que únicamente los modelos de una sola variable lograron pasar todas las pruebas sobre los criterios de búsqueda establecidos de los coeficientes. Es decir, cuando se consideran dos o más variables, las pruebas no fueron superadas en su totalidad. Aun así, en principio se incluyeron todas las variables en la aplicación de OLS y se probaron distintos modelos hasta llegar al mejor ajuste y coherencia en los resultados. De acuerdo a los coeficientes obtenidos en cada OLS, se propone el siguiente modelo matemático para el cálculo de las concentraciones atmosféricas de CH₄ en la ciudad de Tandil:

$$[\text{CH}_4]_{\text{atm}} = 2,22 + 1,4 \times 10^{-3} \text{ DU} - 4 \times 10^{-6} \text{ DR} - 1,4 \times 10^{-5} \text{ DG}$$

Este modelo tiene un R² y un R² ajustado igual a 0,58. El valor de R² ajustado indica que el modelo explica aproximadamente el 58% de la variación espacial de la concentración de CH₄, contemplando la cantidad de variables y la relación con los datos. La consistencia con los signos se cumple, presentando una relación positiva con la variable DU y una relación negativa con las variables DR y DG. La variable DP no se consideró en el modelo ya que presentaba un signo positivo y por lo tanto no es coherente, según lo expresado anteriormente. En cuanto a los coeficientes, el aumento en las concentraciones se encuentra más afectado por la densidad poblacional. Esto quiere decir que a mayor densidad de viviendas por hectárea, la concentración de CH₄ aumenta 1,4x10⁻³ ppm, mientras que por cada metro más cerca al relleno sanitario y a las estaciones de GNC, la concentración aumenta 4x10⁻⁶ y 1,4x10⁻⁵ ppm, respectivamente. Las probabilidades para ambas variables y para la pendiente son menores a 0,01, siendo estadísticamente significativas. En cuanto al VIF, para las tres variables el valor es menor o igual a 2, por lo tanto, no son redundantes. Debido a que el valor del índice Koenker (BP) es estadísticamente significativo (p<0,01), el índice estadístico de Wald conjunto es válido para determinar la importancia general del modelo. De esta manera, como el índice de Wald también es estadísticamente significativo, las variables independientes son efectivas para la explicación de la variable dependiente, lo cual puede observarse en los valores estadísticamente significativos de las probabilidades estándar del coeficiente robusto de las variables. Por último, el índice Jarque-Bera también es estadísticamente significativo, lo que quiere decir que los valores residuales no se distribuyen normalmente.

Conclusiones

Se realizaron muestreos de aire en 23 sitios de la ciudad de Tandil durante un periodo de un año con el fin de conocer las concentraciones atmosféricas medias de CH₄. Sus valores medios permitieron identificar sitios control y fuentes fijas de CH₄. Para lograr explicar las concentraciones encontradas, se evaluaron distintas variables independientes: densidad poblacional, distancias a estaciones de GNC, a un embalse artificial, al relleno sanitario y distancia media a las plantas de tratamiento de efluentes cloacales. A partir de los resultados del análisis de regresión exploratoria se encontró que las variables densidad poblacional y distancia al relleno sanitario y estaciones de GNC son las que mejor explican y se relacionan con la variable dependiente, las tres con un nivel de significancia de 0,01. Con estas variables, se aplicó una regresión OLS para determinar un modelo matemático que permitiera calcular concentraciones de CH₄ a partir de ellas. El modelo obtenido logró pasar la mayoría de las pruebas estadísticas con un R² ajustado de 0,57, siendo consistente y coherente. Como trabajo a futuro, se pretende considerar otras variables independientes con el fin de mejorar el ajuste del modelo (principalmente fuentes variables como el consumo de gas y el tránsito vehicular) y aplicar otras herramientas para un mejor análisis, como Regresión Geográficamente Ponderada (GWR, por sus siglas en inglés) y la regresión de uso de suelo (LUR, por sus siglas en inglés).

Referencias

- Cambaliza, M. O. L., et al. (2015). Quantification and source apportionment of the methane emission flux from the city of Indianapolis. *Elementa*, 3, 1–18.
- Cambio Climático 2013. Bases físicas (2013). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Czepiel, P. M., Crill, P. M., & Harris, R. C. (1993). Methane Emissions from Municipal Wastewater Treatment Processes. *Environ. Sci. Technol*, 27(12), 2472–2477.
- Gere, J. I., & Gratton, R. (2010). Simple, low-cost flow controllers for time averaged atmospheric sampling and other applications. *Latin American Applied Research*, 40(4), 377–381.
- INDEC. 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Provincia de Buenos Aires. Hogares por tipo de vivienda, según combustible utilizado principalmente para cocinar. *Inst. Nac. Estad. Censos República Argentina, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina*.
- Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (2017). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Presidencia de la Nación. Argentina.

Primary author(s): Ms STADLER, Carla Sofía (CIFICEN (CONICET - CICPBA - UNCPBA)); Dr FUSÉ, Victoria Susana (CIFICEN (CONICET - CICPBA - UNCPBA)); Dr PICONE, Natasha (IGEHCs (CONICET - UNCPBA)); Dr

JULIARENA, Maria Paula (CIFICEN (CONICET - CICPBA - UNCPBA)); Dr LINARES, Santiago (IGEHCs (CONICET - UNCPBA))

Presenter(s) : Ms STADLER, Carla Sofía (CIFICEN (CONICET - CICPBA - UNCPBA))

Clasificación de la sesión : E-3. TIG aplicada a procesos físico-ambientales

Clasificación de temáticas : E-3. TIG aplicada a procesos físico-ambientales