

Proyecto de investigación “Análisis multidisciplinario de problemáticas ambientales y aplicaciones”

Estimación integral de emisiones por motores de combustión en el Aeropuerto Internacional Rosario y de la dispersión en su entorno

E. Luccini^{1,2}, L.M. Lamagni³, C. Deco¹, J. Gomez Insausti¹, L. Herrera¹,

¹ Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica Argentina. Santa Fe, Argentina.

² CONICET - Centro de Excelencia en Procesos y Productos de Córdoba (CEPROCOR). Córdoba, Argentina.

³ Egresado de la Maestría en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Sustentable, Facultad de Química e Ingeniería del Rosario.

Resumen

Sobre la base del tipo de motores que participan en movimientos aéreos y terrestres en el área del Aeropuerto Internacional Islas Malvinas de la ciudad de Rosario, Argentina, del tiempo y régimen de actividad, y de sus emisiones típicas conocidas a partir de los correspondientes manuales de emisión, se analiza la estadística de 9.484 vuelos y de 407.302 movimientos vehiculares terrestres durante el año 2016 para estimar sus emisiones netas y su alcance. Se ha cuantificado una emisión total anual de 111.372 t de dióxido de carbono (CO₂), 5.799 t de monóxido de carbono (CO), 3.070 t de óxidos de nitrógeno (NO_x), y 990 t de hidrocarburos. Para cada uno de ellos se realiza un análisis estacional. La dispersión de los contaminantes se analiza mediante el software ALOHA haciendo uso de la rosa de los vientos característica de la zona. Las direcciones NO, O y SO predominan en la dispersión. Dentro de las simplificaciones asumidas, en estado puro el óxido nítrico (NO) es el contaminante potencialmente con mayor alcance, de hasta un par de kilómetros, seguido por dióxido de nitrógeno (NO₂) y el monóxido de carbono (CO). Se contextualiza con la contaminación típica de la ciudad de Rosario, con la proyección hacia años futuros, y con la bibliografía disponible de estudios similares en otros aeropuertos.

Palabras clave: Contaminantes atmosféricos; Motores de combustión; Aeropuerto; Dispersión.

Abstract

Based on the type of engines involved in air and land movements in the area of the Islas Malvinas International Airport in the city of Rosario, Argentina, their time and activity regime, and their typical emissions known from the corresponding emission manuals, the statistics of 9,484 flights and 407,302 land vehicle movements during 2016 are analyzed to estimate their net emissions and scope. A total annual emission of 111,372 t of carbon dioxide (CO₂), 5,799 t of carbon monoxide (CO), 3,069 t of nitrogen oxides (NO_x), and 990 t of hydrocarbons has been quantified. A seasonal analysis is carried out for each of them. The dispersion of the pollutants is analyzed using the ALOHA software making use of the wind rose characteristic of the area. The NW, W and SW directions predominate in the dispersion. Within the simplifications assumed, in its pure state nitric oxide (NO) is potentially the pollutant with the longest range, up to a couple of kilometers, followed by nitrogen dioxide (NO₂) and carbon monoxide (CO). Results are contextualized with the typical pollution of the city of Rosario, with the projection towards future years, and with the available bibliography of similar studies in other airports.

Keywords: Air pollutants; Combustion engines; Airport; Dispersion.

1. Introducción

Con una superficie de 2.780.400 km², Argentina es el segundo país más extenso de América Latina. Su territorio contiene una enorme diversidad de paisajes, climas y biodiversidad natural, ofreciendo oportunidades turísticas, culturales, comerciales, etc. que exigen facilidades de movilidad, entre las cuales el transporte aéreo es uno de los más significativos. En cuanto a la navegación aérea, el país cuenta con un sistema de aeronavegación de los más importantes, constituido por 24 aeropuertos internacionales y 29 nacionales o de cabotaje, lo que suma un total de 53 aeropuertos operables (Figura 1). Acorde a datos del Organismo Regulador del Sistema Nacional de Aeropuertos ([ORSNA](#)), durante el año 2015 se realizaron un total de 455.962 movimientos de aeronaves, distribuidos de la siguiente manera: aviación general 145.847, de carga 3.711 y de pasajeros 306.404. Uno de los Aeropuertos más destacados

dentro del sistema de aeronavegación es el Aeropuerto Internacional "Islas Malvinas" de Rosario (conocido más informalmente como Fisherton, por el barrio donde se ubica). Rosario integra la Red Argentina de Municipios frente al Cambio Climático (RAMCC), cuyo objetivo es impulsar y ejecutar proyectos o programas municipales, regionales o nacionales, relacionados con la mitigación y/o adaptación al cambio climático, a partir de la movilización de recursos locales, nacionales e internacionales (<https://www.ramcc.net/index.php>). Por lo tanto, la cuantificación de las emisiones localizadas en su aeropuerto, un sitio realmente aislado y focalizado, es un tema de sumo interés.



Figura 1. Sistema Nacional de Aeropuertos de la República Argentina ([ORSNA](https://www.argentina.gob.ar/orsna), <https://www.argentina.gob.ar/orsna>)

Las emisiones de los motores a combustión incluyen dióxido de carbono (CO_2 , un gas de efecto invernadero), y contaminantes como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC) no quemados durante la combustión y material particulado (PM), que repercuten sobre el aumento de efecto invernadero, el ozono (O_3) troposférico y estratosférico, la lluvia ácida y el cambio climático, y presentan riesgos potenciales para la salud pública y el medio ambiente. Los aviones causan impacto sobre la calidad del aire en los ambientes locales, regionales y globales, afectando a la atmosfera misma pero también la tierra, el agua, los seres vivos y materiales. Las emisiones integrales producidas por la combustión de motores terrestres y aéreos en un sitio tan localizado como un aeropuerto merecen especial atención, ya que se producen concentradamente. La contribución aérea en torno de los aeropuertos está asociada principalmente a las operaciones de aterrizaje y despegue, o ciclos LTO (Yunos et al, 2017).

La dispersión de los contaminantes en el aire es muy compleja, interviniendo fenómenos de difusión, turbulencia, posibles reacciones fotoquímicas, etc., y su estudio detallado es toda una disciplina dentro de las ciencias atmosféricas. Sin embargo, a través de modelos que contemplan los principales parámetros que intervienen en el fenómeno y haciendo uso de soluciones matemáticas simples es posible obtener una buena representación estimativa de la dispersión de un contaminante en una dada región, lo cual es resuelto habitualmente con software, algunos de los cuales son de libre acceso como ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres, <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>) utilizado en nuestro estudio.

Diferentes investigaciones han estimado las emisiones provenientes de los aeropuertos, como el estudio de los ciclos LTO de las aeronaves realizado por Urbaneja Mercano (2016) y la estimación de gases de efecto invernadero en el Aeropuerto Internacional de Ezeiza por Chapela et al (2013). Hasta el presente, no hay antecedentes de estudios similares en el Aeropuerto Internacional Rosario que contribuyan a un plan de gestión y mitigación de emisiones. Entonces, sobre la base de datos recabados durante el año 2016, el presente trabajo estima por primera vez las emisiones totales anuales de motores a combustión provenientes de los movimientos de las aeronaves, vehículos que transitan la plataforma de apoyo al vuelo, carga de combustible y automotores en general que operan en el área del Aeropuerto Internacional Rosario. El mismo constituyó la investigación de tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Sustentable (Facultad de Química e Ingeniería del Rosario – UCA) del alumno Luis Marcelo Lamagni (Lamagni, 2019). Se analiza su posible impacto sobre la calidad del aire local y su aporte al cambio climático global, utilizando para ello una serie de herramientas complementarias que incluye estadística meteorológica en la zona y software de dispersión de contaminantes.

2. Objetivos

El trabajo estuvo signado por los siguientes objetivos:

- Clasificar los emisores en función de sus características y actividades propias en el aeropuerto y su entorno.
- Cuantificar las emisiones en función de las características conocidas de cada emisor.
- Realizar una estadística temporal detallada de la cantidad de automotores emisores en el aeropuerto y su entorno durante al menos un año.
- Obtener datos meteorológico-climatológicos de la zona del aeropuerto.
- Analizar el alcance zonal de las emisiones mediante distintas herramientas, incluyendo modelos de transporte de contaminantes, eventuales análisis de suelo, etc.
- Analizar la fotoquímica de las sustancias emitidas y sus derivados al ser transportados a partir de su emisión.
- Analizar las posibles consecuencias y efectos de las sustancias emitidas y sus derivados sobre la zona de estudio.
- Determinar las zonas urbanizadas del entorno del aeropuerto y su grado de afectación por las emisiones establecidas.

3. Materiales y Métodos

3.1 Estimación de emisiones de aeronaves

Existen varias metodologías para cuantificar las emisiones de las aeronaves, cada una de ellas con su determinada precisión. Para describir los métodos existentes y para preparar el inventario nacional de emisiones provenientes de aeronaves se ha tomado como referencia la guía APEI (2016), y el Manual sobre la Calidad del Aire en Aeropuertos (ICAO, 2020). Se describen tres métodos detallados en la Tabla 1. La elección sobre su uso depende de la información disponible.

Tabla 1. Metodologías disponibles para estimar las emisiones de las aeronaves y datos de entrada requeridos. Fuente: APEI (2016), ICAO (2020). *LTO*: ciclo de despegue/aterrizaje (Landing/TakeOff). *EF*: factor de emisión del contaminante para el tipo de fase de vuelo y tipo de aeronave.

Metodología	Datos requeridos	Consideraciones técnicas
Nivel 1	Venta de combustible subdividida en uso para vuelos nacionales e internacionales.	Usa una medida promedio de la flota (es decir, los EF de aeronaves genéricos) y factores LTO y crucero.
Nivel 2	Venta de combustible subdividida en vuelos nacionales e internacionales. Número de LTO de vuelos nacionales e internacionales según tipo de aeronave.	Usa EF y LTO específicos de cada aeronave.
Nivel 3	Datos de cada vuelo nacional e internacional, tipo de aeronave y distancia de vuelo.	Usa los datos de tipo de aeronave específicos de la hoja de cálculo disponible en: http://eea.europa.eu/emep-eea-guidebook

Dados los datos disponibles, en el presente trabajo se empleó la metodología Nivel 2, que se aplica en las siguientes etapas:

1. Obtener la cantidad total de combustible vendido para toda la aviación (en kilo-toneladas).
2. Obtener la cantidad total de combustible usado en la aviación para vuelos nacionales (en kilo-toneladas).
3. Calcular la cantidad de combustible usado en la aviación para vuelos internacionales, esto se hace restando las cantidades de combustible en el paso 1, con la cantidad de combustible a la que se hace referencia en el paso 2.
4. Obtener el número de LTO llevados a cabo por cada tipo de aeronave referidos a los vuelos nacionales.
5. Calcular el combustible utilizado en las actividades de LTO por tipo de aeronaves y referido solo a vuelos nacionales.
6. Calcular el total de combustible usado para vuelos nacionales durante la etapa de crucero, este cálculo se obtiene

restando al combustible total usado para las actividades de LTO calculado en el paso 4 con el total obtenido en el paso 2.

7. Estimar las emisiones para las actividades de LTO correspondiente a los vuelos nacionales por tipo de aeronave, se obtiene multiplicando el número de LTO para cada tipo de aeronave por el factor de emisión relacionado con el tipo de aeronave y el tipo de contaminante. Esto debe hacerse para cada tipo genérico de aeronave. Los factores de emisiones más relevantes pueden ser encontrados en la guía APEI (2016), para las aeronaves que no están en la base de datos de los anexos, se deben usar los datos de otra aeronave similar en tamaño.
8. Estimar las emisiones para las actividades del crucero correspondiente a los vuelos nacionales, esto se hace usando el combustible usados para los vuelos domésticos y correspondientes a la etapa de crucero y el factor de emisión correspondiente.
9. Calcular las emisiones totales para las actividades de LTO para vuelos nacionales. Añadir todas las contribuciones de los diferentes tipos de aviones estimados en el paso 7. La suma debe hacerse para cada tipo de contaminante (para CO₂, NO_x, etc.)
10. Calcular las emisiones totales correspondientes a las actividades de crucero para los vuelos nacionales. Añadir todas las contribuciones de los diferentes tipos de aviones estimados en el paso 8. La suma debe hacerse para cada tipo de contaminante.

Repetir el cálculo (paso 4 al 10) para los vuelos internacionales.

3.2 Estimación de emisiones de Automotores

Para estimar las emisiones netas del parque automotor que transita anualmente el aeropuerto y su entorno se realizó una estadística de flujo automotor en cada área del aeropuerto: movimientos de automotores de asistencia a las aeronaves, calles y estacionamiento de los automotores que traen y llevan pasajeros o personal que trabaja en el aeropuerto, categoría y modelo del parque automotor. Tal estadística permitió estimar la distribución anual de la flota automotriz en el Aeropuerto Rosario, detallada en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribución estimada de la flota automotriz en el Aeropuerto Rosario.

Categoría automotriz	Porcentaje [%]
Motocicletas	3
Automotores	79
Camionetas	3
Tractores – automotores especiales	5
Colectivos	6
Camiones	4

Finalmente, la intensidad del flujo automotor se asoció con el total de vuelos, y las emisiones netas se calcularon empleando valores de manual para cada tipo de motor.

3.3 Estimación de la dispersión y alcance de los contaminantes

La Estimación de la dispersión y alcance de los contaminantes se realizó mediante el software libre ALOHA. Su biblioteca contiene información sobre las propiedades físico-químicas de más de 900 compuestos contaminantes. Consiste en una serie de bloques de información que el usuario introduce por pasos:

1. Indicar la ubicación geográfica donde está ocurriendo el evento, la fecha y la hora.
2. Elegir el contaminante emitido, si se encuentra en la lista que el software trae por defecto, o insertar sus características físico-químicas.
3. Introducir información sobre las condiciones meteorológicas.
4. Describir en que forma el contaminante es emitido.
5. Mostrar la zona donde las concentraciones químicas en el aire pueden ser lo suficientemente altas como para

representar un riesgo para la salud. ALOHA permite exportarlo en un formato asimilable por plataformas georreferenciadas, por ejemplo Google Earth como en este caso.

La zona del aeropuerto cuenta con la ventaja de ser marcadamente llana, por lo tanto libre de turbulencias y eso la transforma en muy apta para la modelización. La estadística de datos meteorológicos local es crucial y para este trabajo se empleó la rosa de los vientos determinada para la ciudad de Rosario y su entorno por Luccini y Pomar (2012).

4. Resultados

Para el Aeropuerto Internacional Rosario y su entorno, sobre la base de estadísticas de vuelos y de movimientos de vehículos terrestres durante el año 2016, se han cuantificado emisiones totales anuales de 111.372 t de dióxido de carbono (CO₂), 5.799 t de monóxido de carbono (CO), 3.070 t de óxidos de nitrógeno (NO_x), y 990 t de hidrocarburos no quemados durante la combustión, distribuidos por fuentes según las Tablas 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

Tabla 3. Emisiones totales estimadas de CO₂ y el porcentaje por tipo de movimiento en el Aeropuerto Internacional Rosario y su entorno durante el año 2016.

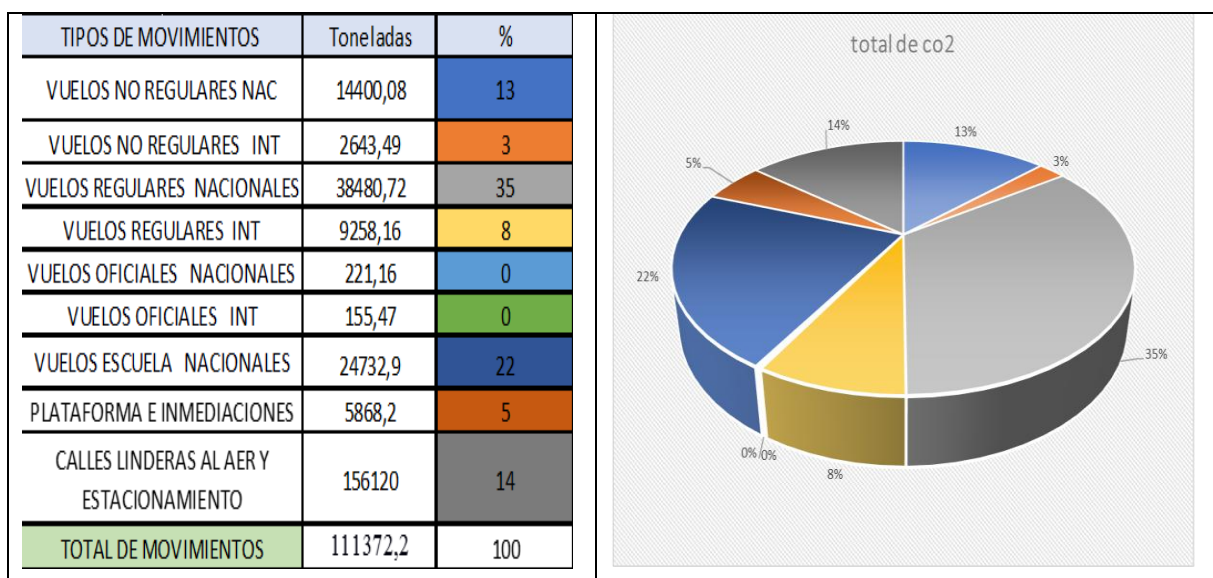


Tabla 4. Emisiones totales estimadas de CO y el porcentaje por tipo de movimiento en el Aeropuerto Internacional Rosario y su entorno durante el año 2016.

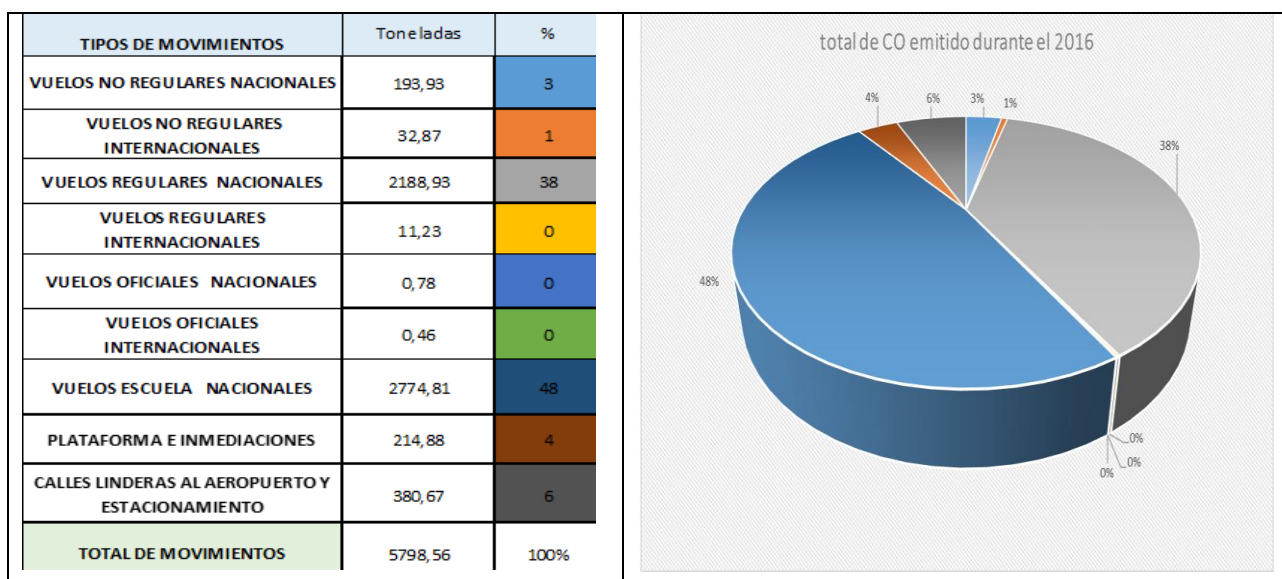


Tabla 5. Emisiones totales estimadas de NO_x y el porcentaje por tipo de movimiento en el Aeropuerto Internacional Rosario y su entorno durante el año 2016.

TIPOS DE MOVIMIENTOS	Toneladas	%
VUELOS NO REGULARES NAC	1661,35	54
VUELOS NO REGULARES INT	1,63	0
VUELOS REGULARES NAC	1178,51	39
VUELOS REGULARES INTER	11,19	0
VUELOS OFICIALES NAC	2,94	0
VUELOS OFICIALES INTER	1,53	0
VUELOS ESCUELA NACIONALES	66,32	2
PLATAFORMA E INMEDIACIONES	51,83	2
CALLES LINDERAS AL AER Y ESTACIONAMIENTO	93,98	3
TOTAL DE MOVIMIENTOS	3069,80	100

Tabla 6. Emisiones totales estimadas de Hidrocarburos y el porcentaje por tipo de movimiento en el Aeropuerto Internacional Rosario y su entorno durante el año 2016.

TIPOS DE MOVIMIENTOS	Toneladas	%
VUELOS NO REGULARES NACIONALES	21,04	2
VUELOS NO REGULARES INT	7,82	1
VUELOS REGULARES NACIONALES	182,41	18
VUELOS REGULARES INT	111,15	11
VUELOS OFICIALES NACIONALES	0,05	0
VUELOS OFICIALES INT	0,06	0
VUELOS ESCUELA NACIONALES	142,14	14
PLATAFORMA E INMEDIACIONES	182,70	19
CALLES LINDERAS AL AER Y ESTACIONAMIENTO	343,03	35
TOTAL DE MOVIMIENTOS	990,40	100

Asumiendo que la composición típica de NO_x en procesos de combustión se distribuye en aproximadamente un 89% de NO (óxido nítrico), 10% de NO₂ (dióxido de nitrógeno) y 1% de N₂O (óxido nitroso), obtenemos la distribución por contaminantes que se muestra en la Tabla 7, considerando finalmente que la emisión se concentra durante las horas de actividad pico en el aeropuerto: las 7:00 y las 20:00 hs.

Con los datos de concentración de contaminante en las horas pico de actividad (tercera columna en la Tabla 7), la Figura 2 muestra la estimación de dispersión por áreas de riesgo del contaminante potencialmente con mayor alcance (NO) en estado puro, siempre bajo las simplificaciones asumidas en los cálculos con el software ALOHA. Si bien podría superar la extensión que delimita el área del aeropuerto, lo haría bajo niveles eventualmente no preocupantes y distribuidos con breves picos de concentración durante el año. Nivel de máximo riesgo (hasta 20ppm): alcances del orden de 330m. Nivel de riesgo medio (hasta 12ppm): alcances hasta 430m. Nivel mínimo de riesgo (hasta 0,5 ppm): hasta aproximadamente 3100m, preponderantemente hacia las direcciones del sector Noroeste, Oeste y Sureste.

Tabla 7. Distribución temporal del total emitido anualmente de los principales contaminantes en promedio sobre 24 hs y también concentrados en las horas de actividad pico del aeropuerto.

Compuesto	t/año	kg/h sobre 24 hs	kg/h sobre horas pico (7:00 y 20:00)
CO	5798.56	661.94	7943.23
NO _x (total)	3069.28	350.37	4204.49
NO (89% del total NO _x)	2731.7	311.8	3742
NO ₂ (10% del total NO _x)	306.928	35.037	420.45
N ₂ O (1% del total NO _x)	30.693	3.504	42.045

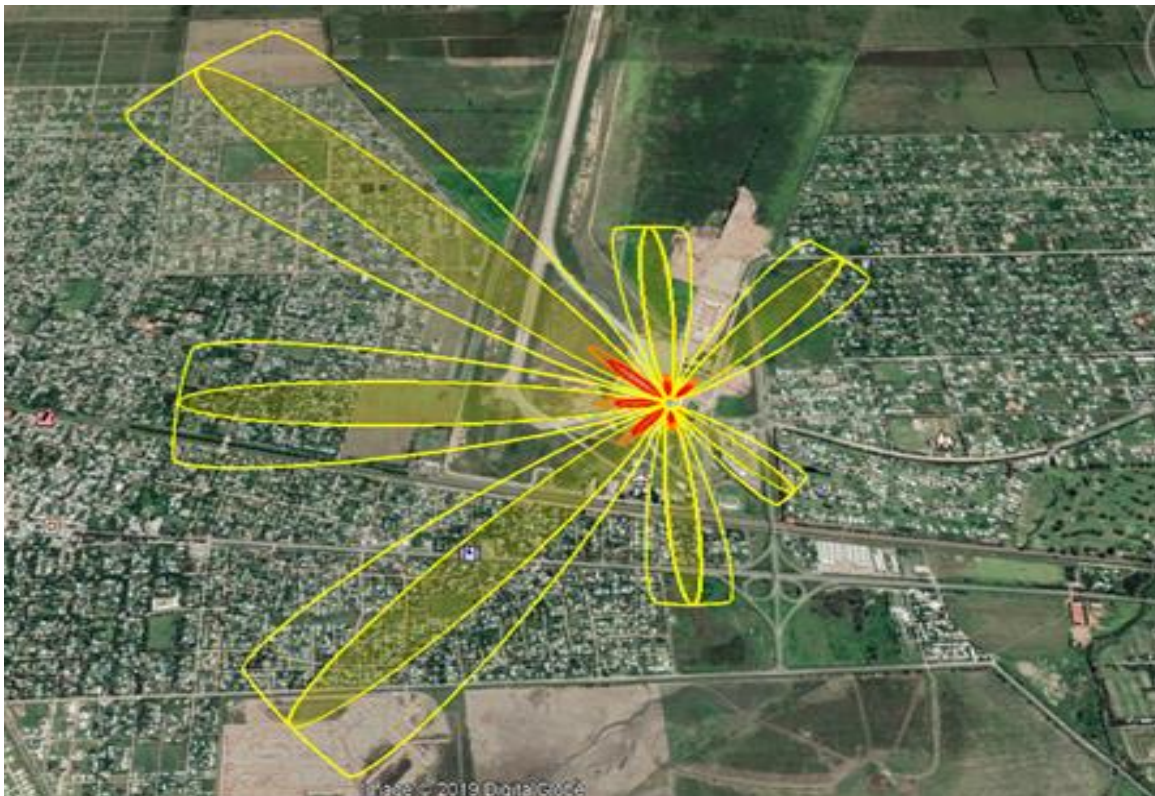


Figura 2. Estimación de dispersión del contaminante con mayor alcance (NO) en estado puro.

Los resultados obtenidos se encuentran en el rango proporcional de emisiones, acorde a la magnitud del Aeropuerto Internacional Rosario en el contexto de estudios similares que han cuantificado emisiones de contaminantes en aeropuertos o redes de aeropuertos de otros países del mundo (Liu et al, 2019; Zhou et al, 2019; Yang et al, 2018; Stettler et al, 2011).

5. Conclusiones

Se han cuantificado las principales emisiones producidas por motores de combustión en el Aeropuerto Internacional Rosario “Islas Malvinas” y su entorno durante el año 2016. Se han estudiado las emisiones del gas de efecto invernadero CO₂ y de los contaminantes locales CO, NO_x e Hidrocarburos, producidas por la suma de aeronaves y vehículos terrestres que realizan movimientos en la plataforma aérea, calles linderas y estacionamiento. La suma de los movimientos en el aeropuerto durante el año 2016 ocasionó emisiones de CO₂ por un total de 111.372 toneladas. Las emisiones de CO, fueron un total de 5.798 toneladas ese año y de NO_x un total 3.070 t. Asumiendo que la composición típica de NO_x en procesos de combustión se distribuye en aproximadamente un 89% de NO (óxido nítrico), 10% de NO₂ (dióxido de nitrógeno) y 1% de N₂O (óxido nitroso) y haciendo uso de la modelización, se puede considerar que la

contaminación por NO_x podría tener influencia de hasta uno o dos km, desde luego ya en baja concentración y en niveles mínimos de riesgo.

Este estudio constituye un primer relevamiento de los principales contaminantes gaseosos emitidos por fuentes móviles procedentes de motores de combustión en el Aeropuerto internacional Rosario “Islas Malvinas” y el alcance en su entorno, y alienta a nuevas investigaciones para cuantificarlos con mayor precisión, ampliar a contaminantes no estudiados e identificar potenciales riesgos para la salud. Una opción planteada a futuro es la toma de muestras de suelo y su posterior análisis. Es importante remarcar que anualmente se realizan estudios preventivos de salud al personal que trabaja en las tareas aeroportuarias.

Referencias

- APEI (Air Pollutant Emission Inventory) guidebook. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook>. 2016.
- Chapela M. et al. Determinación de la Contaminación Gaseosa en el Aeropuerto Internacional de Ezeiza. II Jornadas de Investigación y Transferencia de la Facultad de Ingeniería. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/37721>. 2013.
- ICAO (International Civil Aviation Organization) - Airport Air Quality Manual Doc 9889 (Second Edition). https://www.icao.int/publications/Documents/9889_cons_en.pdf. 2020.
- Lamagni L.M. Cuantificación de las emisiones producidas por motores de combustión en el Aeropuerto Internacional Islas Malvinas de la ciudad de Rosario y su contribución contaminante en la zona. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Sustentable, Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica Argentina. 2019.
- Liu H., Tian, H., Hao, Y., Liu, S., Liu, X., Zhu, C., Wu, B. Atmospheric emission inventory of multiple pollutants from civil aviation in China: Temporal trend, spatial distribution characteristics and emission features analysis. *Science of The Total Environment*, 648, 871–879. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.07.407. 2019.
- Luccini E. y Pomar J. Caracterización de vientos en Rosario, Argentina, a partir de mediciones 2008-2011. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 16, 11.19-11.22. 2012.
- Urbaneja Marcano L. Estimación de emisiones de los ciclos de aterrizajes y despegues de las aeronaves en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid, Barajas. http://oa.upm.es/42931/1/TFG_LUISANA_CAROLINA_URBANEJA_MARCANO.pdf. 2016.
- Stettler M.E.J., S. Eastham, S.R.H. Barrett. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions. *Atmospheric Environment* 45, 5415-5424. 2011.
- Yang X., Shuiyuan Cheng, Jianlei Lang, Ran Xu, Zhe Lv. Characterization of aircraft emissions and air quality impacts of an international airport. *Journal of Environmental Sciences*. Volume 72, Pages 198-207. 2018.
- Yunos S., M. Ghafir, and A Wahab. Aircraft LTO emissions regulations and implementations at European airports. *AIP Conference Proceedings* 1831, 020006; doi: 10.1063/1.4981147. 2017.
- Zhou Y., Jiao Y, Lang J, Chen D, Huang C, Wei P, Li S, Cheng S. Improved estimation of air pollutant emissions from landing and takeoff cycles of civil aircraft in China. *Environ Pollut.* 25; 249: 463-471. doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.088. 2019.