

ANALISIS COMPARATIVO DE LOS CONTAMINANTES GASEOSOS PRIMARIOS Y DEL CO₂ EN LOS AEROPUERTOS PRODUCTO DE LAS OPERACIONES DE LOS VEHICULOS DE ASISTENCIA A LA AERONAVE

Lucas Sznajderman^{1,2}, Matías Coppa¹, Alejandro Di Bernardi¹

¹Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Pcia. Buenos Aires, Argentina.

²Comisión de Investigaciones Científicas - CIC, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, Pcia. Buenos Aires, Argentina

Palabras claves: vehículos de asistencia, contaminantes gaseosos, aeropuerto, operaciones

Resumen

Los aeropuertos y sus actividades conexas son fuente de una variedad de emisiones gaseosas y de partículas contaminantes. En el contexto de la calidad del aire local, la cuantificación de las emisiones representa la base para el desarrollo de un inventario de gases.

Existe una amplia gama de contaminantes del aire presentes como emisiones gaseosas y de partículas procedentes de actividades relacionadas con la aviación que pueden tener consecuencias para la salud humana y el medio ambiente. Se cuantifica los siguientes gases primarios: óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos volátiles incluyendo hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), materia particulada (PM) y óxidos de azufre (SO_x). A su vez, se incluye el CO₂ por su injerencia en la afectación del medio ambiente y el calentamiento global.

El estudio se focaliza en estudiar y cuantificar, utilizando el *modelo analítico* desarrollado por el autor, las emisiones gaseosas derivadas de los vehículos de asistencia, quienes pertenecen a una de las fuentes contaminantes existentes en el aeropuerto.

Dichos vehículos bajo estudio, denominados Ground Support Equipment (GSE), están asociados al transporte de pasajeros desde las terminales a las aeronaves y viceversa, a los procesos de carga y descarga de mercancías y equipajes, al suministro de energía y combustible a la aeronave, al transporte de tripulaciones, entre otros tantos servicios.

El presente estudio se encuentra encolumnado con los objetivos del Comité de Protección Ambiental Aeronáutica (CAEP), conformado por la Organización de aviación civil internacional (OACI), y particularmente con los del Grupo de Trabajo 3 (WG3) centrados en la mitigación de las emisiones gaseosas.

1. INTRODUCCIÓN

Las infraestructuras aeroportuarias, a la vez de ser centros fundamentales de desarrollo local y regional, son también elementos que interactúan con el medioambiente en el que se constituyen. La necesidad de hacer compatible el desarrollo del transporte aéreo con la conservación de los valores naturales y de la calidad de vida en el entorno aeroportuario, precisa de estudios y modelos de actuación basados en el equilibrio entre los factores económicos, sociales y ambientales, que permita el acercamiento a un modelo sostenible de desarrollo.

Por su parte, la OACI reconoce que las fuentes de emisiones relacionadas con los aeropuertos tienen la capacidad de emitir contaminantes que pueden contribuir al deterioro de la calidad del aire en las comunidades cercanas. Por ello, los programas y normas nacionales e internacionales sobre calidad del aire requieren continuamente que las autoridades aeroportuarias y los órganos gubernamentales traten los aspectos de calidad del aire en las cercanías de los aeropuertos.

En particular, el Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación (CAEP) de la OACI y su antecesor, el Comité sobre las emisiones de los motores de las aeronaves, han tratado continuamente desde finales de los años 1970 las normas sobre emisiones para nuevos tipos de motores, sus derivados y nuevos motores en producción. Concretamente, establecen límites a las cantidades de humo y emisiones gaseosas de estos contaminantes en el escape de la mayoría de los tipos de motores civiles.

En los aeropuertos, además de registrarse las emisiones procedentes de las aeronaves, se determinan como principales fuentes de emisión las procedentes de los vehículos de transporte en accesos y estacionamientos del aeropuerto, las procedentes de fuentes estacionarias (caldera y depósitos de combustible), y aquellas procedentes de vehículos de apoyo en tierra (llamados Ground Service Equipment-GSE) [1].

Particularmente, los GSE engloban entre sus operaciones al transporte de pasajeros desde las terminales a las aeronaves y viceversa, los procesos de carga y descarga de mercancías y equipajes, el suministro de energía y combustible a la aeronave, transporte de tripulaciones, así como todas las maniobras que deben realizarse para situar al avión en posición para efectuar el despegue o el inicio de la rodadura según el caso. En resumen, incluyen todos los equipos de servicio en tierra y los vehículos normalmente asociados con los movimientos de la aeronave en la plataforma [2]. Cada uno de estos vehículos poseen distintos tiempos de operación, debido a su función, y no todos los procesos pueden realizarse simultáneamente. Los servicios se aplican en el turnaround, definido como "el período de tiempo en el cual la aeronave está en la plataforma, desde que frena en el puesto de estacionamiento en el arribo, hasta que deja el puesto para el despegue incluyendo el posicionamiento del tractor de remolque". El tipo de GSE varía según la aplicación en función de su operación y deben tenerse en cuenta los servicios requeridos además según el puesto de estacionamiento[3].

Existe una amplia gama de contaminantes del aire presentes como emisiones gaseosas y de partículas procedentes de actividades relacionadas con la aviación que pueden tener consecuencias para la salud humana y el medio ambiente. No obstante, no todas ellas son pertinentes o necesarias para los inventarios de emisiones. Deberían consultarse los requisitos estatales para determinar las especies de emisiones que se necesitan realmente para el inventario. En general, podrían considerarse las siguientes especies comunes como especies primarias en los inventarios de emisiones:

- a) óxidos de nitrógeno (NO_x), incluyendo dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxido de nitrógeno (NO);
- b) compuestos orgánicos volátiles (VOC), incluyendo hidrocarburos distintos del metano (NMHC);
- c) monóxido de carbono (CO);
- d) materia particulada (PM), tamaño de fracción PM_{2.5} y PM₁₀; y
- e) óxidos de azufre (SO_x).

El dióxido de carbono (CO₂) a veces se incluye en los inventarios (utilizando el consumo total de combustible como base para el cálculo). Se ha de reconocer que el CO₂ es de interés mundial más que estrictamente local.

2. HIPÓTESIS Y METODOLOGÍA

A continuación, se detalla el proceso para el cálculo de las emisiones gaseosas derivadas de las operaciones de los GSE.

- Identificación del servicio de cada vehículo según tipo de vuelo y puesto de estacionamiento
- Identificación de los tiempos de servicio relacionados con el modelo propuesto según mediciones elaboradas in situ y analizadas estadísticamente
- Caracterización de cada parámetro a utilizar en el modelo propuesto
- Cuantificación de las emisiones
- Elaboración de tablas comparativas de la contaminación provocadas por los GSE según características asociadas al servicio y puesto de estacionamiento

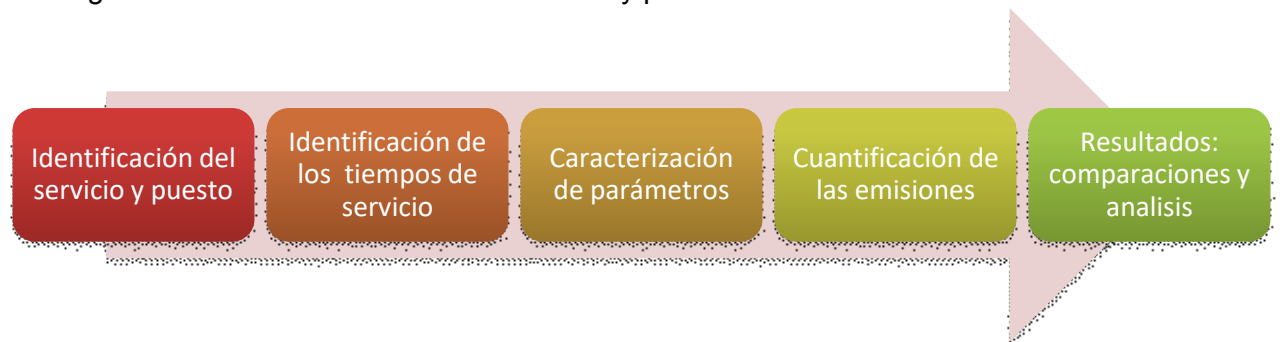


Figura 1 Proceso lógico de trabajo para determinar la contaminación gaseosa

2.1. Identificación de los vehículos de asistencia según tipo de servicio y puesto de estacionamiento

Los GSE dependen del tipo de requerimiento asociado a la aeronave, siendo función de las políticas de asistencia a la aeronave determinado por los tipos de vuelos (origen-destino, escala o low cost), y el tipo de servicio asociado a los puestos de estacionamiento (uso de pasarela de embarque o puestos remotos).

Para este estudio no se tienen en cuenta los perfiles de demanda asociados a los arribos y partidas de las aeronaves ni la circulación de los GSE (las emisiones cuantificadas dependen del servicio en plataforma).

En el desarrollo del modelo para caracterizar la operación de circulación y servicio de los GSE, se consideran las siguientes hipótesis:

- El servicio de handling es brindado por un único proveedor.
- El servicio brindado distingue si es con uso de pasarela de embarque o no.
- Los tiempos discretizados de servicio corresponde a tiempos representativos del Boeing 737/700/800 y el A320-200 (fuselaje angosto)
- Todos los vehículos GSE han entrado en servicio el mismo año (2010)
- Los vehículos utilizan combustible diésel
- El puesto remoto no utiliza remolque de aeronaves

Las características y cantidad de vehículos de asistencia dependen del tipo de operación de la aeronave. A continuación, se identifican las posibles configuraciones propuestas:

- Servicio origen-destino con manga y puesto remoto
- Servicio parcial o de escala con manga y puesto remoto
- Low Cost Carrier (LC)

El vuelo de origen-destino se identifica porque en el lugar de destino se realiza un intercambio completo de pasajeros, carga y combustible, en función de la programación del vuelo; en el vuelo de tránsito (escala) el intercambio de pasajeros, carga y combustible se

Análisis comparativo de los contaminantes gaseosos primarios y del CO₂ en los aeropuertos producto de las operaciones de los vehículos de asistencia a la aeronave

hace de manera parcial y a diferencia del primero no cuenta con limpieza de cabina ni agua residuales.

Por su parte, en los vuelos LC la velocidad, la eficiencia y la precisión son importantes en la operación para minimizar los tiempos de respuesta y los costos de manejo en tierra. Para el caso bajo estudio de este tipo de configuración, no se tienen en cuenta el Ground Power Unit (GPU), catering, pushback, remolque de escaleras, bus de pasajeros ni vehículo para la limpieza de cabina [4].

Se presenta a continuación la tabla que sintetiza los vehículos utilizados para las diferentes configuraciones propuestas:

GSE	Origen destino		Parcial		Low cost
	Remoto	Manga	Remoto	Manga	
GPU					
Catering					
Remolque aeronave					
Remolque equipaje					
Cinta transportadora					
Agua potable					
Bus pasajeros mov reducida					
Limpieza agua residuales					
Combustible					
Remolque escalera					
Bus pasajeros					
Limpieza de cabina					

Tabla 1 Identificación de los vehículos de asistencia para los servicios propuestos con y sin manga

2.2. Discretización de los tiempos de servicio

Además de realizar la discretización de los tiempos en espera, conexión, servicio y desconexión, se agrupan las mediciones según procedimientos de carga y descarga. La metodología para identificar los tiempos asociados a la discretización propuesta es la siguiente:

- Procesamiento de datos medidos.
- Identificación de distribución/comportamiento.
- Identificación de modelos lineales que ajusten a las mediciones. Estudio de las seleccionadas y comparación con los datos registrados.

Análisis comparativo de los contaminantes gaseosos primarios y del CO₂ en los aeropuertos producto de las operaciones de los vehículos de asistencia a la aeronave

GSE	E		C		S		D	
	n	t	n	t	n	t	n	t
GPU	0	-	5	4,32	11	73,10	3	0,34
Catering	7	1,96	9	1,67	23	6,30	10	1,81
Remolque aeronave	5	0,50	5	2,19	16	5,26	4	0,40
Remolque equipaje	10	1,72	8	0,50	23	11,35	10	0,27
Cinta	3	1,75	9	0,75	36	14,57	6	1,86
Agua potable	3	0,41	3	0,29	5	0,81	2	0,57
Bus mov. red.	2	0,85	1	1,83	5	7,93	2	1,63
Combustible	5	15,51	5	1,05	11	8,85	5	2,38
Remolque escalera	2	1,13	2	0,89	2	4,96	0	-
Bus pasajeros	5	1,03	0	-	22	3,18	0	-

Tabla 2 Cantidad de mediciones y mediana de los tiempos observados por GSE según discretización propuesta

2.3. Parámetros y modelo propuesto

El modelo propuesto consiste en la suma del aporte contaminante debido a la discretización de tiempos de servicio según el proceso de espera, conexión, servicio (realización de la tarea en sí) y desconexión de los equipos GSE. Surge a partir del modelo 'sophisticado' para el cálculo de las emisiones brindado por la OACI que considera 5 factores, corrigiendo el factor de potencia, deterioro, carga, y tiempo operativo con el objetivo de potenciar el modelo.

$$E_{i,l} = P_l \cdot FE_{i,l} \cdot f_{dt} \cdot \sum_{j=1}^8 (f_{c_j} \cdot t_j)$$

Dónde,

$E_{i,l}$: Emisión gaseosa del contaminante 'i', respecto del equipo GSE 'l'. [g] ó [kg]

P_l : Potencia al freno del equipo GSE 'l', [HP]

$FE_{i,l}$: Factor de emisión del contaminante 'i', respecto del equipo GSE 'l', $\left[\frac{g}{HP \cdot h}\right]$ ó $\left[\frac{kg}{HP \cdot h}\right]$.

f_{c_j} : Factor de carga del equipo GSE por cada tiempo discretizado 'j', según operación de carga y descarga, adimensional.

f_{dt} : Factor de deterioro del equipo GSE 'l', adimensional.

t_j : Tiempos discretizados de los GSE en la espera, conexión, servicio y desconexión para la carga y descarga, en unidades [h].

Vale decir que el modelo propuesto es válido para los gases propuestos con excepción del CO₂, en donde se utiliza la metodología desarrollada por el Aeropuerto de Zurich [5] donde, dependiendo del tipo de fuselaje de las aeronaves y la cantidad de ciclos LTO, es posible estimar las emisiones de CO₂. El método de cálculo aplicado es el siguiente:

$$Emisiones (gr) = (M \cdot fe) \cdot 1000$$

Dónde:

- fe: factor de emisión según tipo de fuselaje (kg de CO₂/ciclo)
- M: cantidad de movimientos de las aeronaves, como el objetivo del trabajo es comparar las emisiones independientemente de las operaciones, el factor es unitario.

Donde los factores de emisión adoptados fueron los que se presentan en la siguiente tabla:

Análisis comparativo de los contaminantes gaseosos primarios y del CO₂ en los aeropuertos producto de las operaciones de los vehículos de asistencia a la aeronave

	CO ₂ (kg/ciclo)
Aeronave fuselaje angosto	18
Aeronave fuselaje ancho	58

Tabla 3 Factores de emisión por defecto representativos del aeropuerto de Zurich para servicios a las aeronaves

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la cuantificación de las emisiones generadas por todos los vehículos GSE utilizando los modelos propuestos para todos los gases.

GSE	CO	HC	NO _x	SO _x	PM 10	CO ₂
GPU	184	52	711	9	58	18
Catering	16	7	33	1	3	18
Remolque aeronave	20	4	55	1	4	18
Remolque equipaje	89	8	90	1	14	18
Cinta transportadora	13	2	21	0	2	18
Agua potable	2	1	8	0	0	18
Bus pasajeros mov reducida	1	1	18	2	2	18
Limpieza agua residuales	0	0	0	0	0	18
Combustible	51	19	169	4	6	18
Remolque escalera	2	1	6	0	0	18
Bus pasajeros	1	1	12	1	1	18
Limpieza de cabina	0	0	0	0	0	18

Tabla 4 Emisiones para un servicio completo en gramos

Total GSE (gr)	Origen-destino		Parcial		LC
	Remoto	Manga	Remoto	Manga	Remoto
CO	359	375	305	322	156
HC	90	93	70	72	31
NO _x	1068	1105	892	910	306
SO _x	19	18	15	13	7
PM 10	87	90	80	81	11
CO ₂	198	198	126	90	108

Tabla 5 Emisiones totales de los GSE según tipo de servicio requerido por la aeronave y puesto de estacionamiento

4. CONCLUSIONES

De las Tabla 4 y Tabla 5 se puede observar los gases con mayor preponderancia si comparamos los valores cuantificados, los GSE que más emiten para todos los tipos de servicio propuestos en el trabajo, y a su vez la cuantificación de las emisiones según los procedimientos establecidos.

Es posible visualizar de las tablas mencionadas previamente que los GSE que más emiten en las distintas etapas del servicio brindado son los GPU, el remolque de equipaje y el combustible. Además, si se analizan y comparan los tipos de servicio requeridos en función de los puestos de estacionamiento, se puede destacar el Origen-destino, tanto para puesto

Análisis comparativo de los contaminantes gaseosos primarios y del CO₂ en los aeropuertos producto de las operaciones de los vehículos de asistencia a la aeronave

remoto como manga es el tipo de vuelo que genera más contaminación de los GSE, seguido por el servicio parcial (escala) y luego por Low Cost. Si se comparan las emisiones según tipo de puesto de estacionamiento, las emisiones provocadas por el servicio de manga son levemente mayores que el servicio al puesto remoto debido a que en este puesto de estacionamiento se ignora la utilización del remolque de aeronave por hipótesis.

Finalmente, de la Tabla 5 es posible comparar los gases que emiten los GSE, destacando principalmente los gases CO, NO_x, y CO₂ por sobre todos los analizados. En promedio estos gases generan el 90% de los totales estudiados.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo y el incentivo a la investigación por parte de la Comisión de Investigaciones Científicas, de la Provincia de Buenos Aires. Referencias

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ICAO, *Airport air quality manual*, vol. 1. 2011.
- [2] Airport Cooperative Research Program, *Airport Ground Support Equipment (GSE): Emission Reduction Strategies, Inventory, and Tutorial*. 2012.
- [3] L. Sznajderman, "Cuantificación del aporte contaminante gaseoso producto de las operaciones de GSE en plataforma: metodología según tiempos operativos," *CAIA V*, pp. 1–11, 2018.
- [4] Y. L. Tan, "Differences in Ground Handling in the Global Market Yik Lun Tan," pp. 1–34, 2010.
- [5] Zurich Airport, "Aircraft Ground Handling - Methodology and Emission Factors," *Airport Design and Operation*. p. 20, 2014.