

# Cuantificación del aporte contaminante gaseoso producto de las operaciones de GSE en plataforma: metodología según tiempos operativos

Lucas. Sznajderman<sup>1,2</sup>, Matías. Coppa<sup>1</sup>, Gabriel Alberto Ramirez-Díaz<sup>1,3</sup> y Alejandro. Di Bernardi<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup>CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas).

---

**Resumen**— En los aeropuertos existen diferentes actividades que generan contaminantes gaseosos. Por lo tanto, además de producirse emisiones derivadas de la operación de las aeronaves, deben tenerse en cuenta aquellas procedentes de las fuentes estacionarias, los vehículos de acceso al aeropuerto y los vehículos de apoyo en tierra, denominados en su conjunto como GSE (Ground Support Equipment) 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.

Determinado el perfil diario de una operación, es posible efectuar el análisis del aporte de los GSE. El presente estudio presenta una metodología en donde se tienen en cuenta diversos parámetros que afectan a la cuantificación de las emisiones como los tiempos asociados al servicio, espera, conexión y desconexión medidos en campo; factores de carga; factores de deterioro; potencias y factores de emisión asociados a cada vehículo.

El objetivo del trabajo es obtener el peso relativo del aporte contaminante de los GSE respecto a las emisiones totales del aeropuerto en su parte aeronáutica. Además, se busca comparar las emisiones cuantificadas por el software AEDT 2d con la metodología propuesta (teniendo en cuenta los tiempos medidos en campo y los estándar).

**Palabras clave**— aeropuertos, vehículos de asistencia a las aeronaves, emisiones de las aeronaves

---

**Abstract**— Besides considering aircraft operation as an essential source of airport emissions, the ground support vehicles, collectively referred to as GSE (Ground Support Equipment) should also be taken into account. This includes the passenger transport from the terminals to the aircraft and vice versa, the loading and unloading of merchandise and baggage, the supply of energy and fuel to the aircraft, and the aircrew transport, among other services.

Once the daily profile of an operation is determined, it is possible to analyze the contribution of the GSE. The present relates a sophisticated methodology in which several parameters are taken into account that affect the quantification of emissions such as the times associated with the service, wait, connection and disconnection measured in the field; load factors; deterioration factors; powers and emission factors associated with each vehicle.

One objective of the work was to obtain the relative weight of the GSE contaminant contribution with respect to the total airport emissions. To this end, both the polluting gaseous emissions generated by the GSE and those derived from aircraft operations are characterized. In addition, the aim is to compare the emissions quantified by the AEDT 2d software with the proposed methodology (taking into account the time measured in the field and the standard ones).

**Keywords**— Airport, Ground Support Equipment (GSE), aircraft emissions

---

## INTRODUCCIÓN

El transporte aéreo desempeña un papel importante en el desarrollo económico y social sostenible en el mundo.

Las infraestructuras aeroportuarias, a la vez de ser centros fundamentales de desarrollo local y regional, son también elementos que interaccionan 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.

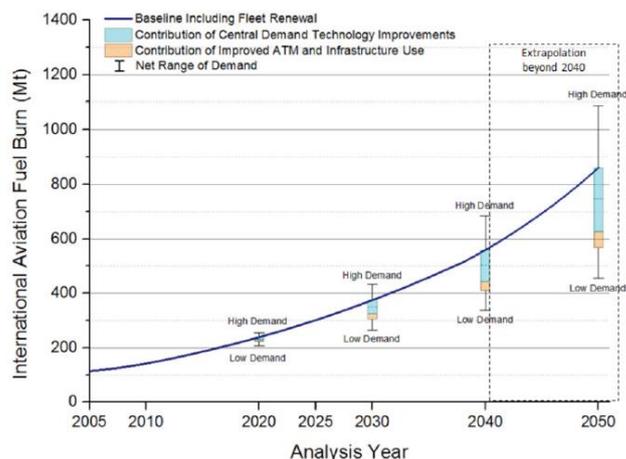
En el año 2016 han volado 3.796 millones de pasajeros en el mundo, incrementando un 6,8% la cantidad al año anterior (ICAO 2016). La consecuencia directa de dicho crecimiento es un mayor consumo de combustible y, por lo tanto, una mayor contaminación gaseosa que afecta la calidad del aire, de vida, la fauna y zonas protegidas en las áreas vecinas a un aeropuerto. Considerando además que la tendencia temporal de crecimiento urbano lleva a la ciudad hacia las inmediaciones del predio aeroportuario, la identificación anticipada de áreas sensibles a la contaminación acústica y gaseosa permite una menor afectación tanto en el desarrollo urbano como aeroportuario (Coppa 2016).

En el futuro se prevé un crecimiento constante del transporte aéreo, tal es así que se pronostica que el tráfico regular de pasajeros, medido en términos de Revenue Passenger Kilometres (RPK), crecerá de cinco mil millones a más de 13 mil millones en el período: 2010-2030 con un promedio anual de tasa de crecimiento de 4,9%, dependiendo primordialmente del desarrollo económico, del comercio mundial y la evolución de los costos de las líneas aéreas (el cual depende, a su vez, en gran medida del precio del combustible). Sin embargo, este crecimiento estará también influenciado por algunos desafíos como, la congestión de los aeropuertos y del espacio aéreo, la protección del medio ambiente y las crecientes necesidades de inversión de capital.

Teniendo en cuenta que existe la posibilidad de una restricción operativa debido al impacto en el ambiente y la afectación directa a la población correspondiente, este puede llegar a ser a mediano plazo, el principal factor limitador del crecimiento del sector de transporte aéreo. (Alonso 2012).

Por su parte, la Organización de Aviación Internacional Civil (OACI), a través del Comité de Protección ambiental de la Aviación (CAEP), busca darle prioridad a la protección del medio ambiente. Tal es así que, en el año 2004, se establecieron como principales objetivos las reducciones del impacto por las emisiones de la aviación en la calidad del aire local y las emisiones de gases de efecto invernadero de la aviación el mundo. Según este organismo, todos estos objetivos han contribuido a que las operaciones de las aeronaves actualmente sean un 70% más eficientes que en los años 70.

Respecto a las emisiones gaseosas contaminantes, uno de los focos está puesto en la reducción en la fuente de generación, es decir, los motores que equipan a las aeronaves. Los mismos deben cumplir con los estándares establecidos en el *Anexo 16 - Protección del medio ambiente, Volumen II: Emisiones de los motores de las aeronaves para su certificación* (International Civil Aviation Organization (ICAO) 2008) y el *Volumen III: Emisión de CO<sub>2</sub> de los aviones* (International Civil Aviation Organization (ICAO) 2017).



**Fig. 1:** Rango de incertidumbres asociadas en función del pronóstico de demanda. (International Civil Aviation Organization (ICAO) 2017).

Existe una variedad de contaminantes en el aire relacionadas con la aviación que potencialmente pueden afectar la salud humana y del medio ambiente. Sin embargo, no todos son relevantes para los inventarios de emisiones. En general, pueden considerarse gases primarios en los inventarios a los siguientes: óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), compuestos orgánicos volátiles (VOC), monóxido de carbono (CO), material particulado (PM 2,5 y PM10) y óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) (International Civil Aviation Organization (ICAO) 2011).

Las emisiones de los motores tanto de los aviones como el de los vehículos de asistencia y accesos al aeropuerto, incluyen el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), hidrocarburos no quemados (HC), material particulado (PM), compuestos orgánicos volátiles (VOCs), y otros compuestos (Lefebvre 1983). Los motores de reacción y los diesel contribuyen en gran medida a la contaminación de partículas ultrafinas en el aeropuerto. La fuente predominante dependerá de la ubicación y la actividad local (Press-Kristensen 2012).

El porcentaje de emisiones debido a cada fuente existente en el aeropuerto puede variar debido a las distintas condiciones operativas del mismo. El desarrollo de un inventario y cuantificación de las emisiones derivadas de las aeronaves y de los vehículos que le brindan el servicio como así también la determinación de las principales fuentes de emisión en todo el aeropuerto son objetivos fundamentales a la hora de estudiar el impacto en el medioambiente (Stettler 2011).

Las relaciones de las emisiones y el consumo de combustible entre las aeronaves y sus vehículos de asistencia varían dependiendo del escenario estudiado. Por ejemplo, durante el despegue de las aeronaves, las emisiones de NO<sub>x</sub> que provienen de sus motores principales, son altas (60% del total) en comparación con los GSE y las APU (Unidades de potencia en tierra) debido a la alta temperatura de combustión en plena potencia del motor y, por lo tanto, de los factores de emisión del gas. Por otra parte, si el escenario estudiado es el rodaje, los vehículos de asistencia aportan un 63% de emisiones de NO<sub>x</sub> en relación a las APU y las

aeronaves debido a los altos factores de emisión relacionados con el consumo de combustible con motores diesel (Winther et al. 2015).

Las principales fuentes dentro del predio aeroportuario son producto de: los vehículos de transporte en accesos y estacionamientos del aeropuerto, las fuentes estacionarias (caldera y depósitos de combustible), las aeronaves y aquellas procedentes de vehículos de apoyo en tierra (llamados Ground Service Equipment-GSE).



Fig. 2: Servicio de los GSE para aeronave Low Cost

Los GSE engloban entre sus operaciones el 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 (Airport Cooperative Research Program 2012). Cada uno de estos vehículos poseen distintos tiempos de operación, debido a su función, y no todos los procesos pueden realizarse simultáneamente (Jaehn & Neumann 2015). Los servicios se aplican en el Turnaround, definido como "el periodo 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. Por ejemplo, algunos vehículos son requeridos para brindar servicio a la aeronave luego del aterrizaje, otros para el despegue, otros para brindar servicio a los pasajeros y otros para las operaciones de carga y descarga. (Horstmeier & Haan 2001). Para todos los casos, los tiempos y los procedimientos en los servicios en tierra son fundamentales a la hora de analizar posibles accidentes, demoras y emisiones (Schmidt et al. 2016).

A partir del análisis de distintos estudios (Palocz-Andresen 2009) (Hannah et al. 2012) (Trujillo 2017)(Sznajderman 2017), (Sznajderman 2016), (Coppa 2016) se observa la variación de los porcentajes relativos de las emisiones en cada una de las fuentes y por ende la necesidad de realizar un modelo y análisis integral que contemple la totalidad de las mismas.



Fig. 3 Fuentes típicas de emisiones en un aeropuerto.

La intención del informe es presentar el modelo integrador realizado que cuantifica las emisiones generadas por los GSE en los tiempos correspondientes a la hora de brindar el servicio. Vale decir, que dicha discretización temporal tiene como ventaja la observación puntual del uso de la potencia para cada secuencia, además de identificar demoras, o posibles optimizaciones a futuro durante el servicio.

Para respaldar e identificar la secuencia temporal propuesta, se han realizado una serie de mediciones en el Aeropuerto Jorge Newbery. De manera que el modelo propuesto utiliza los tiempos discretizados, el uso del porcentaje de potencia máxima (denominado factor de carga) estimado in situ.

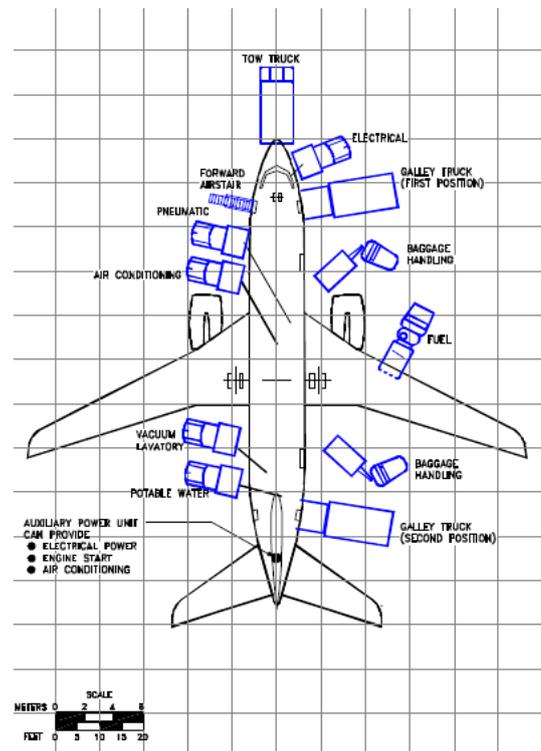


Fig. 4: Servicio de los GSE en plataforma para un Boeing 737-700

## METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología desarrollada, incluyendo las mediciones in situ-

### Hipótesis Generales

Se adoptan las siguientes conjeturas:

- todos los vehículos GSE han entrado en servicio el mismo año (2010)
- los vehículos utilizan combustible diésel
- en los puestos remotos no se utiliza pushback
- para los servicios low cost las aeronaves utilizan puestos remotos
- El análisis se enmarca en el servicio de transporte aéreo comercial (Regular y No Regular), para operaciones internacionales, de cabotaje o regionales.

### Metodología General

Seguidamente, se detalla el proceso para el cálculo de las emisiones derivadas de las operaciones de las aeronaves y de los respectivos GSE según cada servicio en plataforma con los tiempos discretizados en el modelo propuesto:

#### 1) Caracterización de los vehículos de asistencia según aeronaves y servicio

Para la cuantificación y posterior comparación del aporte relativo de los vehículos de asistencia respecto a las aeronaves, es necesario previamente caracterizar los tipos de servicio para las siguientes posibles configuraciones propuestas:

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

Se adoptaron vehículos de asistencia compatibles con aeronaves de fuselaje angosto como los A320, Boeing 737-700 y 737-800, dado que requieren los mismos servicios y son las aeronaves preponderantes en el Sistema Nacional de Aeropuertos (SNA).

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

Por su parte, en los vuelos LCC 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 (Tan 2010).

En resumen, se presenta a continuación la tabla que sintetiza, sombreados, los vehículos utilizados para las diferentes configuraciones propuestas.

**TABLA 1: IDENTIFICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE ASISTENCIA PARA LOS SERVICIOS PROPUESTOS CON Y SIN MANGA**

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					

Como se observa, los vehículos de asistencia dependen tanto del tipo de vuelo como del puesto de estacionamiento asignado, por lo tanto; la cantidad y tipo de vehículos de asistencia requeridos son un factor fundamental a la hora de cuantificar las emisiones. Se observa que los GPU son utilizados sin diferenciar la utilización o no de la manga, situación que podría modificarse para casos donde la pasarela telescópica incluyera dicho servicio.

#### 2) Caracterización de vehículos GSE

La caracterización de los vehículos GSE esta soportada en el estudio bibliográfico y la generación de información a partir del relevamiento de campo realizado en el aeropuerto Jorge Newbery.

De la visita al mencionado aeropuerto, se ha observado que los elevadores de carga y las unidades de arranque neumático presentan una baja o nula frecuencia de uso en vuelos comerciales de fuselaje angosto, por lo tanto, se excluyen del cálculo del aporte.

#### 3) Mediciones de tiempos de servicio en carga y descarga. Tiempos según airport planning.

Además de realizar la discretización de los tiempos en espera, conexión, servicio y desconexión, se agrupan las mediciones según procedimientos de carga y descarga.

Para vehículos como la cinta de equipaje (utilizados para todas las configuraciones) se han logrado registrar hasta 35 mediciones mientras que para el remolque de escalera 2 (identificados con los puestos remotos) mediciones debido a su poca frecuencia de uso y dificultosa visualización.

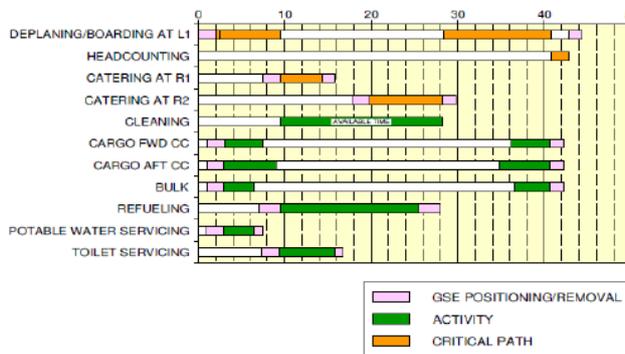
Se presenta a continuación en la siguiente tabla, el promedio de las mediciones realizadas según los tiempos discretizados (espera, conexión, servicio, desconexión y total) para cada vehículo de asistencia. En columna

identificada con “#” son la cantidad total de registros temporales para cada GSE.

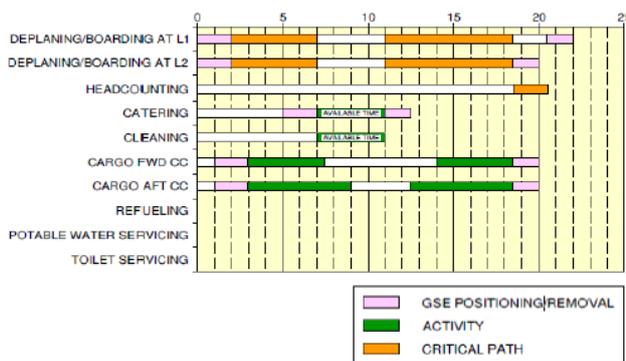
**TABLA 2: TIEMPOS DE LOS GSE SEGÚN LA DISCRETIZACIÓN PROPUESTA**

GSE	tiempo en segundos				total	#
	esp	con	ser	desc		
GPU	0	259	4.386	21	4.666	11
Catering	134	102	376	109	721	24
Pushback	30	131	315	24	501	16
Remolque	92	20	531	13	547	23
Cinta	105	38	924	124	1.191	35
Agua potable	24	18	48	34	124	5
Bus mov reducida	51	110	476	98	735	5
Combustible	930	63	531	143	1.667	11
Remolque escalera	68	54	298	0	419	2
Bus	53	0	292	0	332	24
Limpieza cabina	58	0	640	0	698	-
Manga fija	103	60	3.534	47	3.744	-

El modelo, como se mencionó anteriormente utiliza los tiempos medidos. Sin embargo, vale aclarar que los tiempos teóricos los propone los airport planning de cada aeronave. Como se puede observar en las siguientes figuras, para cada vehículo se propone el posicionamiento, servicio y desconexión.



**Fig. 5** Tiempo de servicio completo para aeronave A320. Fuente: ACAP



**Fig. 6** Tiempo de servicio en escala para aeronave A320. Fuente: ACAP

Por otra parte, se debe recalcar que el tiempo de posicionamiento y salida del equipo GSE no considera el tiempo de circulación ni espera que necesita cada vehículo para trasladarse entre puestos de estacionamiento de aeronaves. Los modelos de cálculo existentes solo toman en cuenta la potencia de funcionamiento del equipo y el tiempo total que el equipo tarda para realizar su servicio sin diferenciar el tipo de vuelo.

4) *Aplicación del modelo teórico*

En la ec (1) se puede cuantificar las emisiones gaseosas producto del servicio de cada GSE, por contaminante

$$E_{i,l} = P_i \cdot FE_{i,l} \cdot f_{d_t} \cdot \sum_{j=1}^8 (f_{c_j} \cdot t_j)_i \quad (1)$$

Dónde,

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

$P_i$ : Potencia al freno del equipo GSE ‘i’, unidades [HP]

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

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

$f_{d_t}$ : Factor de deterioro del equipo GSE ‘t’, adimensional.

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

*Potencia máxima, factor de carga*

Como se ha mencionado previamente, la visita ha permitido además de medir los tiempos propuestos en el modelo, identificar los propios GSE con el fin de relacionar la planta motriz de los vehículos y el estado del motor en el servicio (básicamente identificar la marcha, apagado o encendido).

A continuación, se presentan las potencias máximas utilizadas en el modelo:

**TABLA 3: POTENCIAS MÁXIMAS RELEVADAS A PARTIR DE LOS MODELOS GSE VISUALIZADOS.**

Modelos GSE	Potencia [HP]
Tractor de carga de equipaje	88
Cinta transportadora	88
Remolque de aeronaves	134
Transporte de pasajeros	177
Camión Catering	330
Limpieza aguas residuales	75
Abastecimiento de agua potable	235
Unidad de Potencia en Tierra	187
Escalera de Pasajeros	88
Camión cisterna de combustible	320

Los factores de carga, definidos como aquellos componentes que afectan la potencia máxima, son establecidos según el CAEP, los mismos son ajustados en función del relevamiento en campo.

A continuación, se puede observar los valores finales adoptados para el modelo según carga y descarga:

**TABLA 4:** FACTORES DE POTENCIA SEGÚN TIEMPOS Y OPERACIÓN DE DESCARGA

GSE	espera	conexión	servicio	desconexión
Ground Power Units	0	0	0	0
Catering	0,53	0,53	0	0,53
Tugs/ Aircraft tractor	0	0	0	0
Baggage	0,36	0,36	0,55	0,36
belt loader	0,36	0,36	0	0,36
Water truck	0,20	0,20	0	0,20
Bus pasajeros mov reducida	0,20	0,20	0,20	0,20
Lavatory truck	0,25	0,25	0	0,25
Fuel truck	0,25	0,25	0	0,25
Passenger Stands	0,57	0,00	0	0
Transporte de pasajeros	0,20	0	0,20	0
Limpieza/servicios	0,33	0	0	0

**TABLA 5** FACTORES DE POTENCIA SEGÚN TIEMPOS Y OPERACIÓN DE CARGA

GSE	espera	conexión	servicio	desconexión
Ground Power Units	0	0	0,75	0
Catering	0,53	0,53	0	0,53
Tugs/ Aircraft tractor	0,40	0,40	0,80	0,40
Baggage	0,36	0,36	0,55	0,36
belt loader	0,36	0,36	0	0,36
Water truck	0,20	0,20	0,20	0,20
Bus pasajeros mov reducida	0,20	0	0,20	0
Lavatory truck	0,25	0,25	0,25	0,25
Fuel truck	0	0,25	1	0,25
Passenger Stands	0,57	0	0	0
Transporte de pasajeros	0,20	0	0,20	0
Limpieza/servicios	0,33	0	0	0

En donde:

- e: espera
- c: conexión
- s: servicio
- d: desconexión

*Factor de Emisión*

Se calcula el aporte gaseoso de los siguientes contaminantes bases: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) e hidrocarburos no quemados (HC). Los factores de emisión representan la concentración de un gas por unidad de potencia por unidad de tiempo.

Los factores de emisión de los GSE se obtienen de la base de datos de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA), la cual se encuentra avalada por la Comité de Protección Ambiental de Aviación (CAEP) en donde, se considera el tipo de vehículo GSE: modelo, tipo de motor

correspondiente y año determinado (en el caso bajo estudio se trabaja con vehículos fabricados en el año 2010). Los ensayos para la obtención de los factores de emisión se realizan en motores con cero horas de uso, a máxima potencia y según tipo de combustible. En consecuencia, de ello, los valores utilizados son para condiciones con grandes requerimientos en motores sin uso. Los factores de carga y deterioro entonces son aquellos que corrigen al de emisión a la hora de la cuantificación de las emisiones. A continuación, se muestra la tabla con los factores de emisión según gas contaminante para los GSE utilizados.

**TABLA 6** FACTOR DE EMISIÓN POR TIPO DE VEHÍCULO GSE.

Modelos GSE	CO [g/HP.h]	HC [g/HP.h]	NO <sub>x</sub> [g/HP.h]
Tractor de carga de equipaje	1.503	0.327	4.485
Cinta transportadora	2.553	0.381	4.544
Remolque de aeronaves	1.503	0.327	4.485
Transporte de pasajeros	0.110	0.130	2.500
Camión Catering	0.449	0.203	1.037
Limpieza aguas residuales	0.654	0.255	2.417
Abastecimiento de agua potable	0.804	0.290	2.898
Unidad de Potencia en Tierra	0.961	0.297	4.135
Escalera de Pasajeros	0.801	0.289	2.891
Camión cisterna de combustible	0.614	0.245	2.184

*Factor de deterioro*

El factor de deterioro corrige de cierta manera al factor emisión debido a que los equipos llevan años de uso en plataforma, si bien los motores son certificados estos llevan años de mantenimiento y uso lo cual quiere decir que sus componentes no son totalmente nuevos, entonces sus niveles de emisión van a ser mayores a los de un motor nuevo. Para ello, el software EDMS propone la ec. (2) en donde se puede observar el cálculo empírico de corrección por factor de deterioro, que depende de dos coeficientes 'A, b', que a su vez dependen del tipo de vehículo, la potencia máxima, el año en servicio del equipo y los años de vida útil.

$$f_d = 1 + A \cdot \left( \frac{GSE_{año}}{GSE_{vida\ útil}} \right)^b \quad (2)$$

Para cada contaminante gaseoso en estudio, se dispone de dos tipos de coeficientes auxiliares para el cálculo de deterioro, según su respectivo rango de potencia. Estos coeficientes se encuentran actualizados al año 2010 con lo que se asume por defecto que los equipos llevan en servicio al menos 8 años; además el factor de deterioro depende del año de servicio y la vida útil promedio del equipo GSE. A continuación, se muestran las tablas requeridas para el cálculo, en donde se tiene en cuenta las variables mencionadas previamente.

**TABLA 7** COEFICIENTES AUXILIARES PARA FACTOR DETERIORO.

Modelos GSE	CO		HC		NOx	
	A	b	A	b	A	b
Tractor de carga de equipaje	0.150	1	0.270	1	0.008	1
Cinta transportadora	0.150	1	0.270	1	0.008	1
Remolque de aeronaves	0.150	1	0.270	1	0.008	1
Transporte de pasajeros	0.150	1	0.270	1	0.008	1
Camión Catering	0.150	1	0.270	1	0.008	1
Limpieza aguas residuales	0.150	1	0.270	1	0.008	1
Abastecimiento de agua potable	0.150	1	0.270	1	0.008	1
Unidad de Potencia en Tierra*	0.150	1	0.270	1	0.008	1
Escalera de Pasajeros*	0.150	1	0.270	1	0.008	1
Camión cisterna de combustible	0.150	1	0.270	1	0.008	1

**TABLA 8** AÑOS DE SERVICIO Y VIDA ÚTIL POR TIPO DE VEHÍCULO GSE, PARA FACTOR DETERIORO.

Modelo GSE	Año en servicio	Vida útil [años]
Tractor de carga de equipaje	8	13
Cinta transportadora	8	11
Remolque de aeronaves	8	14
Transporte de pasajeros	8	10
Camión Catering	8	10
Limpieza aguas residuales	8	13
Abastecimiento de agua potable	8	10
Unidad de Potencia en Tierra	8	14
Escalera de Pasajeros	8	14
Camión cisterna de combustible	8	14

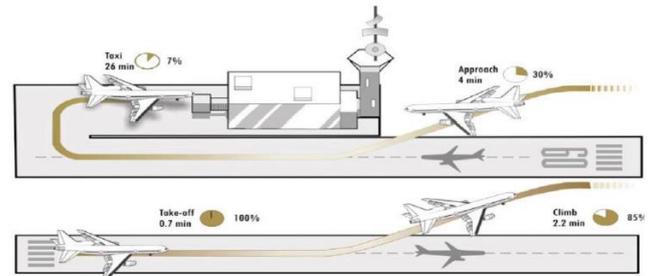
Con los respectivos coeficientes, en conjunto con los años de servicio y los años de vida útil de cada equipo, se obtienen los factores de deterioro como se muestra en la Tabla 9.

**TABLA 9** FACTOR DETERIORO POR TIPO DE VEHÍCULO GSE.

Modelos GSE	CO	HC	NOx
Tractor de carga de equipaje	1.092	1.017	1.005
Cinta transportadora	1.092	1.017	1.005
Remolque de aeronaves	1.086	1.015	1.005
Transporte de pasajeros	1.100	1.018	1.005
Camión Catering	1.120	1.022	1.006
Limpieza aguas residuales	1.120	1.022	1.006
Abastecimiento de agua potable	1.120	1.022	1.006
Unidad de Potencia en Tierra	1.120	1.022	1.006
Escalera de Pasajeros	1.120	1.022	1.006
Camión cisterna de combustible	1.086	1.015	1.005

5) Emisiones producto de las operaciones aéreas

Para estimar el impacto ambiental en el entorno aeroportuario, OACI ha estandarizado los tiempos de operación de las aeronaves comerciales en la aproximación al aeropuerto, el rodaje y el despegue. A partir de dichos tiempos estandarizados, organismos internacionales como OACI, IPCC, y la Environmental European Agency (EEA), entre otros, calculan el aporte de emisiones gaseosas en el entorno aeroportuario, por lo que el cálculo y análisis de dichos tiempos brindarán la diferencia relativa del impacto ambiental en cada aeropuerto y en la región bajo estudio.



**Fig. 7:** Ciclo LTO

Estos tiempos estandarizados por la OACI son definidos de la siguiente manera:

- **Landing (aproximación):** son todas aquellas operaciones que se realizan desde los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto hasta que alcanza la superficie de la pista.
- **Taxi (rodaje):** son las maniobras que realiza el avión hasta llegar a su puesto de estacionamiento en plataforma en condición de BlockOn (calzos colocados) y las maniobras que realiza el avión desde el BlockOff (calzos afuera) hasta llegar a la cabecera de pista.
- **Take-off (despegue):** son las operaciones que realiza el avión en la pista para lograr el despegue.
- **Climb out (ascenso):** son las operaciones que realiza el avión hasta alcanzar los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto

**TABLA 10** TIEMPO Y POTENCIA ASOCIADA A CADA ETAPA DEL CICLO LTO

Etapa	Duración, min	Porcentaje de potencia, %
Approach	4	30
Taxing	26	7
Take-off	0.7	100
Climb out	2.2	85

Establecidos los días bajo estudio, las aeronaves y sus vehículos de asistencia, se realizan los cálculos mediante el siguiente software:

Aviation Environmental Design Tool (AEDT Versión 2d, FAA): es un software que modela el rendimiento de la aeronave y sus vehículos de asistencia en el espacio y tiempo para estimar el consumo de combustible, emisiones, ruido, y las consecuencias en la calidad del aire.

6) Validación del software AEDT con base de datos en el rodaje

El software utiliza para dicho cálculo la base de datos EDB "Emissions databank". Dicho banco perteneciente a la OACI contiene información sobre las emisiones de escape de los motores principales de los aviones, medida de acuerdo con los procedimientos del Anexo 16, Volumen II de la OACI y, certificada por los Estados de Diseño de los motores de acuerdo con sus reglamentaciones nacionales. Con la base y los tiempos identificados que se busquen estudiar, se calcula el aporte gaseoso del monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

De esta manera se corroboran ambos resultados para la cuantificación de las emisiones de las aeronaves con el fin de comparar los resultados con los valores obtenidos por los GSE y las aeronaves en todo el ciclo y también en el rodaje en particular (taxeo).

**RESULTADOS**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos según el modelo propuesto, en donde se puede observar en las siguientes tres figuras la relación de las emisiones generadas por los GSE para una operación origen-destino con puesto remoto, según gas contaminante.

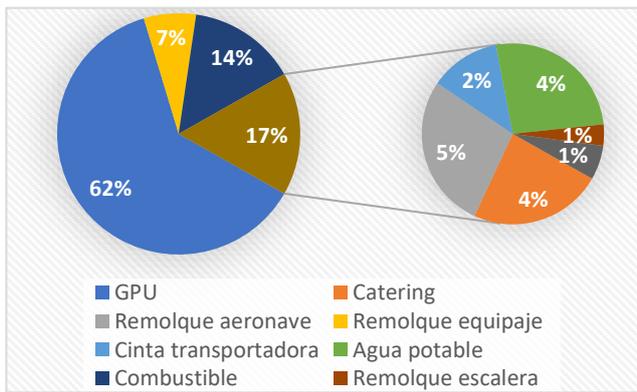


Fig. 10: Emisiones de CO por GSE

En la figura 11 se muestra la cantidad, en gramos, emitidas por los GSE para la operación que más vehículos requiere, es decir, origen destino con puesto remoto. En cuanto a la figura 12, la tabla indica también las emisiones de CO y NO<sub>x</sub> para la misma situación, pero sin tener en cuenta el GPU de manera de facilitar la visualización de todos los GSE, de dicha figura se destacan las emisiones de NO<sub>x</sub> generadas por el camión de combustible en consecuencia del tiempo de servicio y el factor de emisión que tiene.

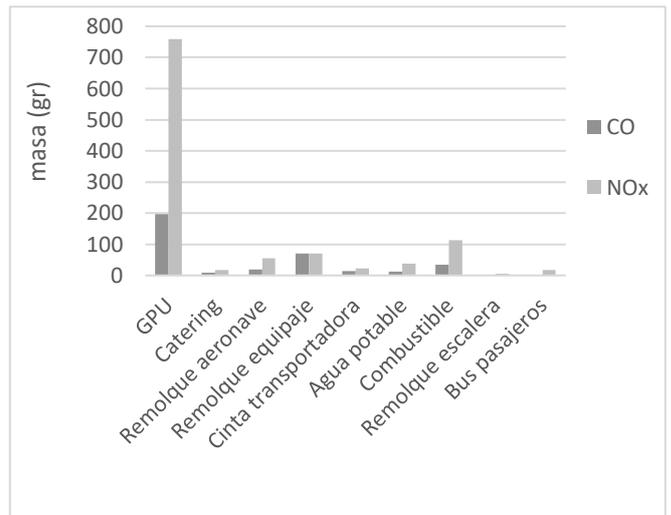


Fig. 11: Emisiones totales por contaminante de NO<sub>x</sub> y CO para todos los GSE

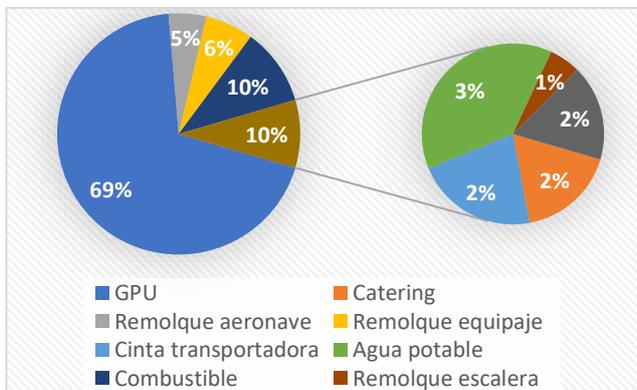
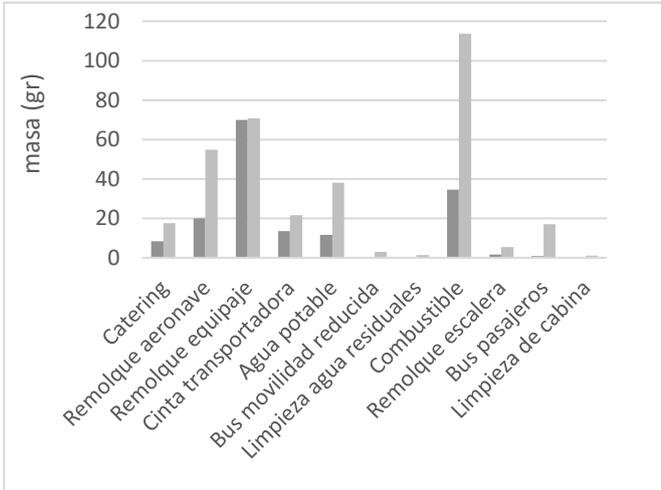


Fig. 9: Emisiones de NO<sub>x</sub> por GSE



**Fig. 12:** Emisiones totales por contaminantes de NOx y CO sin tener en cuenta las emisiones de las GPU

A continuación, la tabla 11 detalla la cantidad y la relación de las emisiones generadas por las aeronaves en el ciclo LTO completo y en particular solo en rodaje (in y out), junto a las generadas por los GSE para un mismo servicio requerido: puesto remoto y vuelo origen destino.

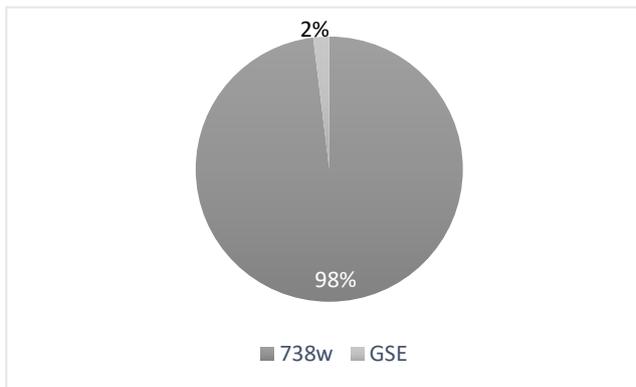
**TABLA 11** RELACIÓN DE LAS EMISIONES DE LOS GSE Y LAS AERONAVES EL CICLO LTO COMPLETO Y SOLO RODAJE

LTO	CO (kg)	% GSE	NOx (kg)	% GSE
738w	18,24	2	64,20	2
A320	23,60	1	40,95	3
GSE	0,36	-	1,10	-

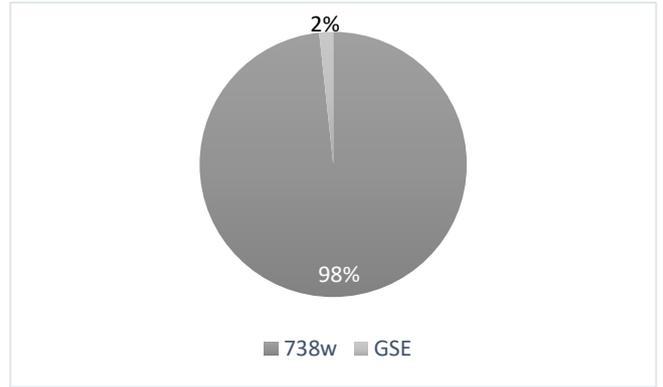
  

Rodaje	CO (kg)	% GSE	NOx (kg)	% GSE
738w	16,32	2	4,38	20
320	20,11	2	2,90	28
GSE	0,36	-	1,10	-

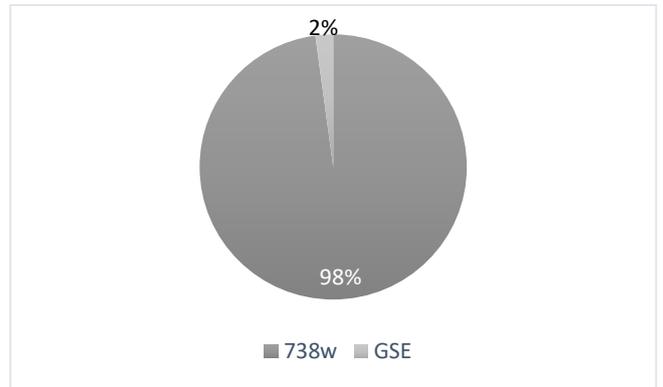
Por otra parte, se puede observar en las siguientes figuras la relación de las emisiones entre los vehículos de asistencia y las aeronaves según el ciclo y gas contaminante.



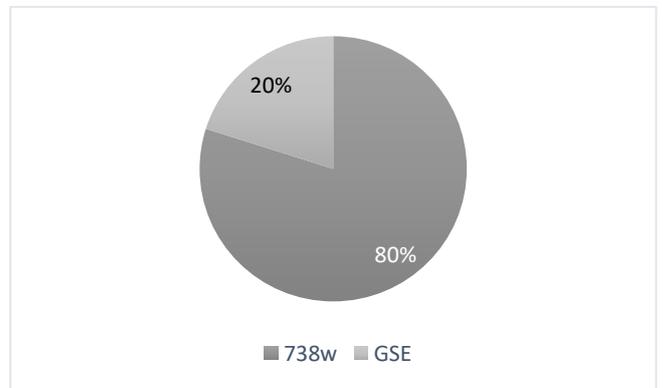
**Fig. 13:** Relación entre las emisiones de CO generadas por un Boeing 737-800w en el ciclo LTO y los GSE correspondientes



**Fig. 14** Relación entre las emisiones de NOx generadas por un Boeing 737-800w en el ciclo LTO y los GSE correspondientes



**Fig. 15:** Relación entre las emisiones de CO generadas por un Boeing 737-800w en rodaje y los GSE correspondientes



**Fig. 16** Relación entre las emisiones de NOx generadas por un Boeing 737-800w en rodaje y los GSE correspondientes

En la siguiente tabla se resumen las emisiones y las relaciones entre los valores obtenidos por el software AEDT y el modelo realizado. Se pueden observar valores comparables (por ejemplo, cinta transportadora, remolque de equipaje) y algunos valores con discrepancia (camión de combustible, catering):

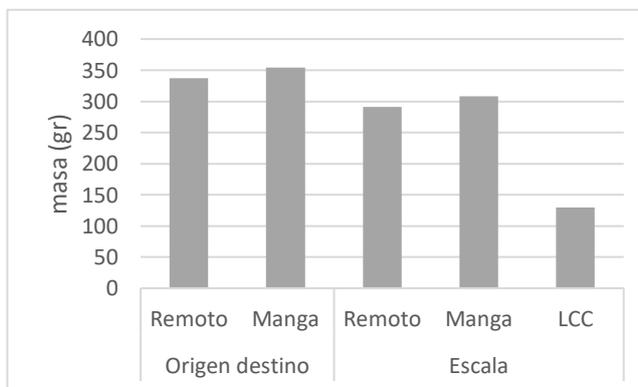
**TABLA 12:** COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE CO SEGÚN EL MODELO DESARROLLADO Y EL SOFTWARE AEDT

GSE	CO		
	AEDT	modelo	AEDT vs modelo
Catering	1,37	8,42	-84%
Remolque aeronave	5,98	19,87	-70%
Agua potable	14,09	11,75	+20%
Combustible	3,72	34,50	11%

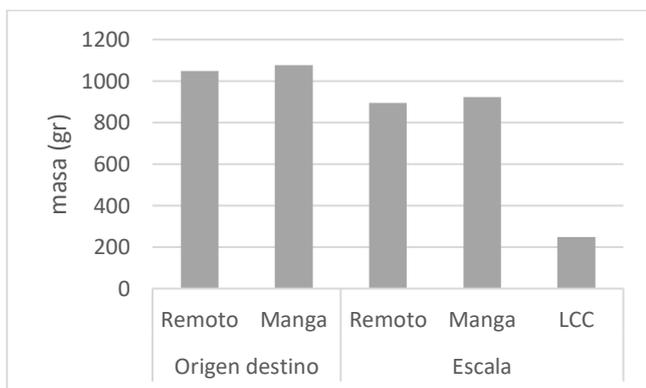
**TABLA 13** COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE NO<sub>x</sub> SEGÚN EL MODELO Y EL SOFTWARE AEDT

GSE	NO <sub>x</sub>		
	AEDT	modelo	AEDT/modelo
Catering	1,95	17,48	-89%
Remolque aeronave	36,90	54,87	-33%
Remolque equipaje	63,20	70,64	-11%
Cinta transportadora	22,76	21,70	+5%
Agua potable	44,75	38,08	+18%
Combustible	8,53	113,54	-92%

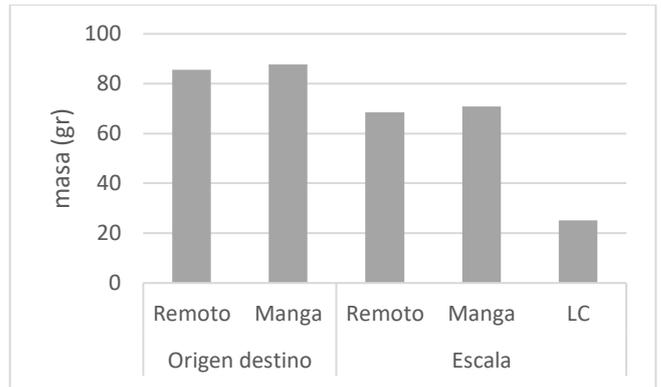
Las siguientes figuras muestran la cuantificación de las emisiones de los GSE para CO, NO<sub>x</sub> y HC según los tipos de vuelo y la utilización o no de la manga.



**Fig. 17:** Emisiones de CO total de todos los GSE para distintas configuraciones y tipos de operaciones de las aeronaves



**Fig. 18:** Emisiones de NO<sub>x</sub> total de todos los GSE para distintas configuraciones y tipos de operaciones de las aeronaves



**Fig. 19:** Emisiones de HC total de todos los GSE para distintas configuraciones y tipos de operaciones de las aeronaves

## CONCLUSIONES

En las figuras 8, 9 y 10, se puede visualizar la relación entre los contaminantes que emiten los vehículos GSE prestando servicio en plataforma (dentro de la línea de seguridad, según condición de estudio). Para el estudio realizado, se observa que el GPU emite entre un 55% y un 70% del total (en masa sería aproximadamente 750gr de NO<sub>x</sub> y 200gr de CO) para cada operación. Por su parte, el camión cisterna de combustible es otra fuente que considerar por cuanto genera entre un 10% y un 14% del total anteriormente indicado. Asociado a ello, los vehículos asociados al remolque de equipaje, presentan emisiones de HC y de NO<sub>x</sub> equivalente a un 7%, mientras que en el CO llega al 20%. Finalmente se puede destacar, entre el resto de los vehículos, el pushback que emite el 5% y 6% de los gases referenciados. Estos vehículos mencionados, a excepción de los GPU, producen entre 60 y 120 gr de NO<sub>x</sub> y un valor promedio de CO de 30 gr para cada servicio a la aeronave realizado.

Como se observa, las principales fuentes de emisiones son las aeronaves, GPU, vehículo de combustible, y los vehículos de remolques de equipaje producto de las altas potencias, el alto factor de carga (por ejemplo, de las visitas se establece que tanto el camión cisterna combustible como el catering tienen un FC de 1 en todo el servicio), el tiempo de servicio y altos niveles de los factores de emisiones establecidos por el CAEP.

Las emisiones de los GSE, en comparación con cada operación en el ciclo LTO de las aeronaves estudiadas, tienen una relación similar para los gases comparados (NO<sub>x</sub> y CO) rondando en valores entre 1 y 3%. Si se comparan las emisiones entre los vehículos de asistencia y las aeronaves (considerando solo el rodaje completo-in out-): se concluye por un lado que la relación entre ambas fuentes para el CO se comporta de la misma manera que en todo el ciclo LTO, mientras que, las emisiones de NO<sub>x</sub> generadas por los GSE alcanzan un 28% aproximadamente.

En cuanto a la verificación y comparación de los valores calculados con los otorgados por el software AEDT, se observa que, además de estar en el mismo orden de magnitud en general, los valores son mayores en el modelo debido principalmente que los tiempos analizados contemplan operaciones reales con las demoras que cada uno de los procesos conllevan. A su vez, el modelo no solo considera el servicio según tiempos teóricos, sino que ajusta con los

tiempos de espera, conexión y desconexión con sus respectivos factores de carga para cada estado, mientras que en el software la cuantificación es producto de un factor de carga promedio en el tiempo de servicio requerido por cada aeronave.

Finalmente, en cuanto a las emisiones de los GSE para el servicio según tipo de vuelo y estacionamiento de las aeronaves, se concluye que el servicio de origen-destino es aquel que genera más emisiones, seguido por el servicio aplicado a la escala y finalmente al Low Cost Carrier (LCC). Además, se puede observar que los servicios para aeronaves con manga son mínimamente mayores tanto en origen-destino como escala a pesar de requerir menos vehículos como se puede observar en la tabla 1: bus movilidad reducida, escalera, bus de pasajeros y limpieza de cabina. Sin embargo, este tipo de puesto de estacionamiento necesita el remolque de aeronaves (pushback), a diferencia del remoto en donde idealmente y según lo modelizado se lo omite, siendo este una de los principales fuentes. Cabe destacar que, la situación anteriormente descrita vería atenuado el impacto de emisiones si se consideraran mangas con servicios que reemplacen al GPU de las aeronaves.

## TRABAJOS FUTUROS

Realizar un inventario completo, utilizando la metodología para todas las emisiones de los vehículos de asistencia para las aeronaves con más uso en Argentina y en el mundo.

Unificación con los modelos desarrollados previamente, (Trujillo et al. 2018) incluyendo los recorridos de los GSE según asignación de puertas y las correspondientes bases de operaciones. Dicha unificación generará un modelo integrador en donde cuantificará y optimizará las emisiones de los vehículos para diferentes aeropuertos y plataformas.

Una vez completo el inventario de emisiones gaseosas anuales de las distintas fuentes de emisión se pueden realizar modelos de dispersión para determinar la cantidad de superficie afectada por las distintas concentraciones gaseosas y si estas se encuentran bajo los límites de exposición.

Desarrollo e investigación de índices de emisión gaseosa por tipo de operación GSE, tipo y cantidad de movimientos de aeronaves, cantidad de pasajeros transportados.

Estudios de posibles medidas de mitigación, posibles cuantificaciones de las emisiones por otros tipos de combustible, análisis y requerimientos para nuevos tipos asistencias posibles a las aeronaves.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Provincia de Buenos Aires por el financiamiento mediante una Beca Doctoral al Ing. Lucas Sznajderman N° 2018-207-GDEBA-CICMCTI.

Se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por el financiamiento mediante una Beca Doctoral de Postgrado tipo I al Ing. Gabriel Alberto Ramírez Díaz.

## REFERENCIAS

- [1] Boeing, Current Market Outlook - 2017-2036. Seattle: Boeing Commercial Airplanes Market Analysis, 2017.
- [2] Airport Cooperative Research Program, 2012. Airport Ground Support Equipment (GSE): Emission Reduction Strategies, Inventory, and Tutorial,
- [3] Alonso, G.R., 2012. El Impacto Ambiental Del Transporte Aéreo Y Las Medidas Para Mitigarlo. , p.15. Available at: [http://oa.upm.es/20345/1/INVE\\_MEM\\_2012\\_133532.pdf](http://oa.upm.es/20345/1/INVE_MEM_2012_133532.pdf).
- [4] Coppa, M., 2016. Análisis de la interacción entre la operatividad aerocomercial y el entorno inmediato. Competitividad Territorial. In I Congreso Internacional sobre Ciudades inteligentes, Innovación y Sostenibilidad. pp. 50–68.
- [5] Hannah, J. et al., 2012. Design of a carbon neutral airport. 2012 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium, SIEDS 2012, pp.40–45.
- [6] Horstmeier, T. & Haan, F. De, 2001. Influence of ground handling on turn round time of new large aircraft. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 73(3), pp.266–271.
- [7] ICAO, 2016. Air transport statics,
- [8] International Civil Aviation Organization (ICAO), 2011. Airport Air Quality Manual Doc 9889, Available at: [http://www.icao.int/publications/Documents/9889\\_cons\\_en.pdf](http://www.icao.int/publications/Documents/9889_cons_en.pdf).
- [9] International Civil Aviation Organization (ICAO), 2017. Annex 16 - Vol III - Aeroplane CO2 Emissions,
- [10] International Civil Aviation Organization (ICAO), 2008. Annex 16 Environmental Protection - Volume II: Aircraft Engine Emissions. , II(July), p.99.
- [11] Jaehn, F. & Neumann, S., 2015. Airplane boarding. European Journal of Operational Research, pp.1–21. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.008>.
- [12] Lefebvre, a. H., 1983. Fuel Effects on Gas Turbine Combustion. International Journal of Heat and Fluid Flow, 5(4). Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0142727X84900572>.
- [13] Palocz-Andresen, M., 2009. Emissions at airports and their impact at the habitat. Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering, 53(1), pp.13–17.
- [14] Press-Kristensen, K., 2012. Contaminación del aire en los aeropuertos.
- [15] Schmidt, M. et al., 2016. Challenges for ground operations arising from aircraft concepts using alternative energy. Journal of Air Transport Management, p.11. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.04.023>.
- [16] Stettler, M.E.J., 2011. Air quality and public health impacts of UK airports . Part I: Emissions. Atmospheric Environment, p.10. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.012>.
- [17] Sznajderman, L., 2017. Modelo integrado de aporte contaminante gaseoso de vehículos de asistencia a aeronaves aerocomerciales.
- [18] Sznajderman, L.C.M.D.B., 2016. SIMULACION DEL APORTE CONTAMINANTE GASEOSO DE CO Y NOX POR. CAIA 4, p.12.
- [19] Tan, Y.L., 2010. Differences in Ground Handling in the Global Market Yik Lun Tan. , pp.1–34. Available at: <http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/arbeiten/TextLunTan.pdf>.
- [20] Trujillo, C., 2017. Análisis del aporte contaminante gaseoso de los GAV en el aeropuerto de Ezeiza. VI Congreso de la Red Iberoamericana de Investigación en Transporte Aéreo (RIDITA), p.12.
- [21] Trujillo, C. et al., 2018. Estudio del aporte contaminante gaseoso generado por la circulación de vehículos de apoyo en tierra ( GSE ) en emplazamientos aeroportuarios: desarrollo metodológico y validación . , p.147.
- [22] Winther, M. et al., 2015. Emissions of NOx, particle mass and particle numbers from aircraft main engines, APU's and handling equipment at Copenhagen Airport. Atmospheric Environment, 100(x), pp.218–229. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.10.045>.