

CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DEL SECTOR TRANSPORTE AEREO EN LA CIUDAD DE ROSARIO

M. Vega^{1,3}, S. Garro^{1,2}, B. Maurici¹, A. Data¹, R.D. Piacentini^{1,4}

1 Laboratorio de Eficiencia Energética, Sustentabilidad y Cambio Climático (LESyC). Instituto Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE). Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA). Universidad Nacional de Rosario (UNR). Argentina marcelo.vega@eie.fceia.unr.edu.ar

2 Almerix. Consultora Inventario de Gases de Efecto Invernadero. Rosario. Argentina

3 Dirección Innovación y Calidad Ambiental. Secretaría Ambiente y Espacio Público. Municipalidad de Rosario. Argentina

4 Física de la Atmósfera, Radiación Solar y Astropartículas, Instituto de Física Rosario (CONICET – UNR). Argentina.

Recibido 12/08/16, aceptado 11/10/16

RESUMEN: El rol de las ciudades como grandes emisoras de Gases de Efecto Invernadero (GEI), determina la necesidad de estimar las emisiones relativas al consumo energético. Presentamos resultados de las emisiones de GEI en el Transporte aéreo, analizando tres métodos para el cálculo de combustible: a) Método Simplificado, b) Flight Simulator, c) Emission Inventory Guidebook. Seleccionamos como criterio el promedio de los métodos mencionados, con una incertidumbre de 8,9% con respecto a los valores extremos. El consumo anual de combustible para transporte aéreo es de 13.6 Mlitros. Para el cálculo de emisiones consideramos los cuatro criterios. Concluimos que el Método Actividad Inducida es el más apropiado con un valor total de 8.8 TnCO₂equivalentes anuales. Comparamos además las emisiones de distintos medios de transporte entre Rosario-Buenos Aires con respecto al avión. El auto diésel refleja menores emisiones de GEI en un porcentaje de -98,69% y el tren de -99,90%.

Palabras clave: Emisiones, Gases efecto invernadero, ciudades, cambio climático, transporte, aviación

INTRODUCCION

Un protocolo reconocido a nivel internacional es Global Protocol for Community- Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC), reconocido internacionalmente como el que más contribuye al análisis de las emisiones contaminantes que generan el calentamiento global, por pasajero transportado. Dicho protocolo está sectorizado en: a) Energía Estacionaria, b) Transporte, c) Residuos, d) Procesos Industriales y Uso de Productos y e) Agricultura, Silvicultura y otros usos de suelo.

El Transporte representa uno de los sectores de mayor relevancia en los inventarios de GEI de las ciudades y al mismo tiempo tiene un gran potencial para la implementación de políticas de reducción. Es el responsable del mayor y más acelerado crecimiento en términos de emisiones de GEI. Es a su vez un sector fuertemente desafiado ante potenciales escenarios de escasez de recursos energéticos tipo combustibles, que demanden una mayor eficiencia energética y una renovación, para asegurar la sostenibilidad en el desarrollo. Para hacer frente a estos retos será preciso adoptar enfoques innovadores en el transporte y establecer prioridades en relación a las mayores fuentes de emisión de gases contaminantes (Barbero y Rodríguez Tornquist, 2012).

El transporte aéreo y marítimo combinados son responsables aproximadamente del 5% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en Estados Unidos, y del 3% globalmente y están entre los modos de transporte con mayor crecimiento (McCollum, 2010). Controlar el crecimiento de las emisiones del transporte marino y aéreo será una parte fundamental para reducir las emisiones del sector transporte. El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) reportó que la demanda global en aviación se incrementó en un 5,9% y la demanda de transporte marino en un 5,1 % solo durante 2005 (IPCC, Climate Change - Fourth Assesment Report. , 2007). La aviación ha experimentado una rápida expansión a medida que la economía mundial creció. El tráfico de pasajeros

ha crecido desde 1960 cerca del 9% anual, 2,4 veces el crecimiento promedio del producto bruto interno (PBI). El tráfico de carga, del que aproximadamente el 80% es ejecutado por aviones de pasajeros, también ha crecido durante el mismo período de tiempo. Las emisiones totales de la aviación han incrementado, porque el aumento en la demanda fue mayor a las reducciones de las emisiones debidas a la implementación de mejoras tecnológicas y operacionales. (IPCC, Aviation and the Global Atmosphere., 1999).

El primer paso para tomar medidas tendientes a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es estimarlas.

La ciudad de Rosario está elaborando su inventario GEI bajo el protocolo Global Protocol for Community- Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC). Bajo este protocolo la ciudad de Rosario analizará y reportará sus emisiones de acuerdo al nivel de reporte BASIC. En este alcance, se tienen en cuenta las emisiones resultantes de las siguientes fuentes: Energía Estacionaria, Transporte y Residuos. Las emisiones a su vez según el protocolo se clasifican en alcances, siendo las emisiones de alcance 1 las que se originan dentro de la ciudad, las emisiones de alcance 2 las que se emiten por la generación de la energía eléctrica que se usa dentro de la ciudad, y las emisiones de alcance 3, las que se emiten fuera de la ciudad, pero por acciones que son responsabilidad de la ciudad (World Resource Institute, ICLEI, C40 cities, 2014).

El protocolo está alineado con las directrices del IPCC, que sirven de referencia para el análisis más detallado de algunas fuentes de emisión (IPCC, Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, 2006).

El presente informe tiene como objetivo estimar las emisiones derivadas de la actividad aérea, por viajes de pasajeros que salen y llegan al aeropuerto de la ciudad de Rosario, tomando como año base el 2014.

A continuación, presentamos en **Tabla 1** la información referida a los vuelos operados en Aeropuerto Internacional Rosario “Islas Malvinas” (<http://aerpuertorosario.com/>), durante el año 2014. Los datos brindados por este Aeropuerto fueron los siguientes: a) Marca de las aeronaves; b) Origen – Destino; c) Marca de combustible empleado; d) Frecuencia semanal. Además se obtuvo información sobre los vuelos desarrollados solo durante ciertos periodos del año de estudio .

Dado que para el caso del pequeño avión Cessna 150 – Tecnam, el mismo es usado para vuelos de entrenamiento de corta distancia, no se tuvo en cuenta su contribución al consumo total de combustible.

| Marca del Avión | Capacidad de Pasajeros/Carga | Ciudad Origen | Ciudad Destino | Marca de Combustible | Frecuencia Semanal | Distancia (km) | Duración Vuelo (hs) |
|---------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------|---------------------|
| Embraer 190 | 96 | Rosario | Aeroparque (Bs. As.) | JP A1 | 7 | 286,2 | 0:24 |
| Embraer 190 | 96 | Aeroparque (Bs. As.) | Rosario | JP A1 | 7 | 286,2 | 0:24 |
| Embraer 190 | 96 | Rosario | Ezeiza (Bs. As.) | JP A1 | 7 | 298,4 | 0:25 |
| Embraer 190 | 96 | Ezeiza (Bs. As.) | Rosario | JP A1 | 7 | 298,4 | 0:25 |
| Embraer 190 | 96 | Rosario | Iguazú | JP A1 | 2 | 1016,7 | 1:26 |
| Embraer 190 | 96 | Iguazú | Rosario | JP A1 | 2 | 1016,7 | 1:26 |
| Boeing 737-700 | 136 / 5200 kg | Rosario | San Pablo | JP A1 | 4 | 1753,6 | 1:59 |
| Boeing 737-700 | 136 / 5200 kg | San Pablo | Rosario | JP A1 | 4 | 1753,6 | 1:59 |
| Airbus 320 | 156 | Rosario | San Pablo | JP A1 | 7 | 1753,6 | 1:59 |
| Airbus 320 | 156 | San Pablo | Rosario | JP A1 | 7 | 1753,6 | 1:59 |
| Saab 340 | 34 | Rosario | Aeroparque (Bs. As.) | JP A1 | 12 | 286,2 | 0:29 |
| Saab 340 | 34 | Aeroparque (Bs. As.) | Rosario | JP A1 | 12 | 286,2 | 0:29 |
| Saab 340 | 34 | Rosario | Córdoba * | JP A1 | 5 | 367,3 | 0:37 |
| Saab 340 | 34 | Córdoba | Rosario * | JP A1 | 5 | 367,3 | 0:37 |
| Saab 340 | 34 | Punta del Este | Rosario ** | JP A1 | 5 | 584,8 | 1:00 |
| Saab 340 | 34 | Rosario | Punta del Este ** | JP A1 | 5 | 584,8 | 1:00 |
| Cessna 150 - Tecnam | 2 | Rosario | Rosario | 100 LL | 200 hs | - | - |

Tabla 1 Resumen vuelos Aeropuerto Rosario durante año 2014

* Operó entre los meses de enero a junio.

** Operó entre los meses de enero y febrero.

MÉTODOS UTILIZADOS PARA CÁLCULO DE COMBUSTIBLE

I. Método simplificado:

Este primer método consiste en utilizar los consumos de combustible promedio disponibles en internet. Como ventajas podemos mencionar su muy rápida determinación, aunque el mayor inconveniente es que omite muchos detalles sobre la forma en que se lleva a cabo el vuelo (trayecto, altitud, velocidades, peso del combustible y de pasajeros, consumos de carreteo, reserva de combustible para contingencias, etc). Un aspecto que le da validez a estos valores es que están determinados por experiencia y muchos de ellos son valores recomendados por pilotos en algunos foros de aviación. Por último, siempre es conveniente tener un valor de referencia que se pueda estimar de manera rápida, sobre todo cuando las magnitudes de consumo no son conocidas para personas que se encuentran fuera del ámbito de la aviación. A continuación, presentamos el caso del Boeing 737-700. El primer valor “consumo”, en L/min detallado en la tabla 2 para el avión Boeing 737-700, es el valor obtenido de la web (Fuente: www.aiberlin.com), el cual al multiplicarse por la duración del viaje da por resultado el consumo de combustible por viaje (trip fuel). A dicho consumo es necesario adicionar un 5% de combustible para contingencias. Además es necesario considerar la denominada Unidad de Potencia Auxiliar (APU, por sus siglas en inglés), cuyo valor recomendado es de 250L por viaje y el carreteo inicial y final del avión (denominado Taxi) que es estimado en 280 L por viaje. Adicionando las contribuciones de contingencia, APU y taxi, obtenemos el valor del consumo 6727,02 litros por viaje para el avión especificado (Tabla 2).

En la Tabla 3 izquierda, presentamos valores de referencia y consumo de Viaje para Aeronave Embraer 190 (Fuente: www.finairgroup.com) y en la Tabla 3 derecha la aeronave Saab 340 (Fuente: www.aviacionargentina.net/foros/fuerza-aerea-argentina.4). Los valores de consumo de combustible por viaje son 1504,58 litros y 853,06 litros respectivamente.

| Boeing 737-700 | |
|----------------------|----------------|
| Consumo (l/min) | 50.42 |
| Duración viaje (min) | 117 |
| Trip Fuel (l) | 5898.75 |
| Contingencia (l) | 294.9375 |
| APU (l) | 250 |
| Taxi (l) | 283.33 |
| Consumo de viaje (l) | 6727.02 |

Tabla 2: Boeing 737- 700 Valores de referencia y Consumo Viaje (L)

| Embraer 190 | | Saab 340 | |
|----------------------|----------------|----------------------|---------------|
| Consumo (l/min) | 38.54 | Consumo (l/min) | 10.5 |
| Duración viaje (min) | 24 | Duración viaje (min) | 29 |
| Trip Fuel (l) | 925 | Trip Fuel (l) | 304.5 |
| Contingencia (l) | 46.25 | Contingencia (l) | 15.225 |
| APU (l) | 250 | APU (l) | 250 |
| Taxi (l) | 283.33 | Taxi (l) | 283.33 |
| Consumo de viaje (l) | 1504.58 | Consumo de viaje (l) | 853.06 |

Tabla 3: Izq. Embraer 190 Valores de referencia y Consumo Viaje (L); Der. Saab Valores de referencia y Consumo Viaje (L)

II. Simulación con software Flight Simulator

El uso de software para simular el vuelo es otra de las herramientas utilizadas para la estimación del consumo de combustible (Fuente: <http://www.flightsimulatorarg.com.ar>). Este programa posee una base de datos de una gran cantidad de aviones y de aeropuertos.

Para realizar la estimación elegimos el modelo de avión, los aeropuertos de origen-destino, las condiciones climáticas, las cargas de combustible y pasajeros/cargas, y también podemos agregar manualmente una altura de vuelo y otros parámetros.

Presentamos en Tabla 4: Sup. Izq, Boeing 737- 700; Sup. Der. Embraer 190; Inf. Izq. Airbus A320, Inf. Der. Saab 340; Destino, Distancia (Km), Consumo (Litros), Tiempo de Vuelo (Hr), Altura de vuelo (m). El programa indica el consumo estimado directamente. También agregamos información sobre la distancia recorrida, la duración de vuelo y la altura del mismo.

| Boeing 737-700 | | Embraer 190 | |
|----------------------------|----------------|----------------------------|--------------|
| Destino | San Pablo | Destino | Aeroparque |
| Distancia (km) | 1753.6 | Distancia (km) | 286.2 |
| Consumo estimado (l) | 7624.6 | Consumo estimado (l) | 920.2 |
| Tiempo estimado vuelo (hs) | 01:59 | Tiempo estimado vuelo (hs) | 00:24 |
| Altura de vuelo (m) | 2743 | Altura de vuelo (m) | 914 |
| Airbus A320 | | Saab 340 | |
| Destino | San Pablo | Destino | Aeroparque |
| Distancia (km) | 1753.6 | Distancia (km) | 286.2 |
| Consumo estimado (l) | 11986.9 | Consumo estimado (l) | 440 |
| Tiempo estimado vuelo (hs) | 01:59 | Tiempo estimado vuelo (hs) | 00:29 |
| Altura de vuelo (m) | 2743 | Altura de vuelo (m) | 914 |

Tabla 4: Sup. Izq, Boeing 737- 700; Sup. Der. Embraer 190; Inf. Izq. Airbus A320, Inf. Der. Saab 340; Destino, Distancia (Km), Consumo (Litros), Tiempo de Vuelo (Hr), Altura de vuelo (m)

III. Método y tablas del EMEP-CORINAIR

Estas tablas son muy convenientes porque tienen codificados a la mayoría de los tipos de aviones, e ingresando con la distancia de vuelo suministra directamente el combustible de crucero y del LTO (Landing Take Off). Como agregado, da valores de emisiones de distintos gases de efecto invernadero. El método del EMEP-CORINAIR es el más apto, ya que da valores que son altos, pero que no son ni muy superiores ni muy inferiores respecto los demás, a diferencia de los otros métodos, los cuales para algunos casos dan valores muy distintos.

| Modelos | Código | nm | Combustible LTO (kg) | Combustible crucero (kg) | Combustible (kg) | Combustible (L) |
|----------------|--------|--------|----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|
| Embraer 190 | E190 | 154.54 | 614.66 | 855.64 | 1470.30 | 1837.88 |
| Embraer 190 | E190 | 154.54 | 614.66 | 855.64 | 1470.30 | 1837.88 |
| Embraer 190 | E190 | 161.12 | 614.66 | 855.64 | 1470.30 | 1837.88 |
| Embraer 190 | E190 | 161.12 | 614.66 | 855.64 | 1470.30 | 1837.88 |
| Embraer 190 | E190 | 548.97 | 614.66 | 2363.80 | 2978.47 | 3723.08 |
| Embraer 190 | E190 | 548.97 | 614.66 | 2363.80 | 2978.47 | 3723.08 |
| Boeing 737-700 | B737 | 946.87 | 779.22 | 5310.28 | 6089.50 | 7611.88 |
| Boeing 737-700 | B737 | 946.87 | 779.22 | 5310.28 | 6089.50 | 7611.88 |
| Airbus 320 | A320 | 946.87 | 873.25 | 5439.01 | 6312.27 | 7890.33 |
| Airbus 320 | A320 | 946.87 | 873.25 | 5439.01 | 6312.27 | 7890.33 |
| Saab 340 | SF34 | 154.54 | 101.70 | 255.61 | 357.31 | 446.64 |
| Saab 340 | SF34 | 154.54 | 101.70 | 255.61 | 357.31 | 446.64 |
| Saab 340 | SF34 | 198.33 | 101.70 | 255.61 | 357.31 | 446.64 |
| Saab 340 | SF34 | 198.33 | 101.70 | 255.61 | 357.31 | 446.64 |
| Saab 340 | SF34 | 315.77 | 101.70 | 463.15 | 564.85 | 706.07 |
| Saab 340 | SF34 | 315.77 | 101.70 | 463.15 | 564.85 | 706.07 |

Tabla 5: Tabla resumen del gasto de combustible de cada aeronave. El título de la tercera columna (nm) indica millas náuticas (nautical miles)

En Tabla 6 presentamos los valores obtenidos para cada aeronave por cada método analizado. En la penúltima columna mostramos el valor promedio adoptado. Comparando el valor promedio de la penúltima columna de esta tabla (3120 L por viaje sin incluir el avión de entrenamiento) con los valores de cada uno de los métodos, resulta que el que más se aproxima a dicho promedio es el Simplificado, con una diferencia del 5%, siguiéndole el Flight Simulator con un 6%, y por último el EMP con un 30%.

Cargas por pasajero; 80 kg/persona; 6 tripulantes oficiales.

Carga de equipaje: 60 a 70 kg/persona.

Combustibles: APU: 200 kg; TAXI: 680 kg/h (10 a 15 min); Viaje (trip fuel) (según cálculo y tablas); contingencia. Se convierten millas terrestres en aéreas, considerando la velocidad del viento y su sentido.

De los tres métodos analizados, adoptamos la media aritmética considerando que el error de apreciación estará definido como la semisuma entre el valor máximo y el mínimo de cada vuelo, de cada aeronave.

En **Tabla 6** presentamos, por cada tipo de aeronave y destino (u origen) la distancia (km); la duración del vuelo (hr), el consumo unitario (L) y el consumo anual (L).

| Consumo de Combustible - Aeropuerto Internacional de Rosario | | | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|--------------|------------------|------|------------------------------|-------------------------|
| Marca | Ciudad Origen | Ciudad Destino | Simplificado | Flight Simulator | EMP | Consumo Unitario x Vuelo (L) | Consumo Total Anual (L) |
| Embraer 190 | Rosario | Aeroparque (Bs. As.) | 1505 | 920 | 1838 | 1421 | 517.203 |
| Embraer 190 | Aeroparque (Bs. As.) | Rosario | 1505 | 920 | 1838 | 1421 | 517.203 |
| Embraer 190 | Rosario | Ezeiza (Bs. As.) | 1545 | 959 | 1838 | 1447 | 526.845 |
| Embraer 190 | Ezeiza (Bs. As.) | Rosario | 1545 | 959 | 1838 | 1447 | 526.845 |
| Embraer 190 | Rosario | Iguazú | 4014 | 3272 | 3723 | 3670 | 381.629 |
| Embraer 190 | Iguazú | Rosario | 4014 | 3272 | 3723 | 3670 | 381.629 |
| Boeing 737-700 | Rosario | San Pablo | 6727 | 7625 | 7612 | 7321 | 1.522.803 |
| Boeing 737-700 | San Pablo | Rosario | 6727 | 7625 | 7612 | 7321 | 1.522.803 |
| Airbus 320 | Rosario | San Pablo | 6932 | 11987 | 7890 | 8936 | 3.252.826 |
| Airbus 320 | San Pablo | Rosario | 6932 | 11987 | 7890 | 8936 | 3.252.826 |
| Saab 340 | Rosario | Aeroparque (Bs. As.) | 853 | 440 | 447 | 580 | 361.857 |
| Saab 340 | Aeroparque (Bs. As.) | Rosario | 853 | 440 | 447 | 580 | 361.857 |
| Saab 340 | Rosario | Córdoba | 941 | 565 | 447 | 651 | 84.604 |
| Saab 340 | Córdoba | Rosario | 941 | 565 | 447 | 651 | 84.604 |
| Saab 340 | Punta del Este | Rosario | 1195 | 899 | 706 | 933 | 41.997 |
| Saab 340 | Rosario | Punta del Este | 1195 | 899 | 706 | 933 | 41.997 |
| Cesna 150 - Tecnam | Escuelas de Vuelo | | | | | 4.000 | 192.000 |
| | | | | | | | 13.571.526 |

Tabla 6: Distancia, Duración y Litros consumidos parciales y anuales.

En la Figura 1: Consumo Anual de Combustible por Método y Promedio (L), observamos que la diferencia relativa entre máximos y mínimos de los métodos analizados representa un error del 8,9%, con respecto al valor medio adoptado.

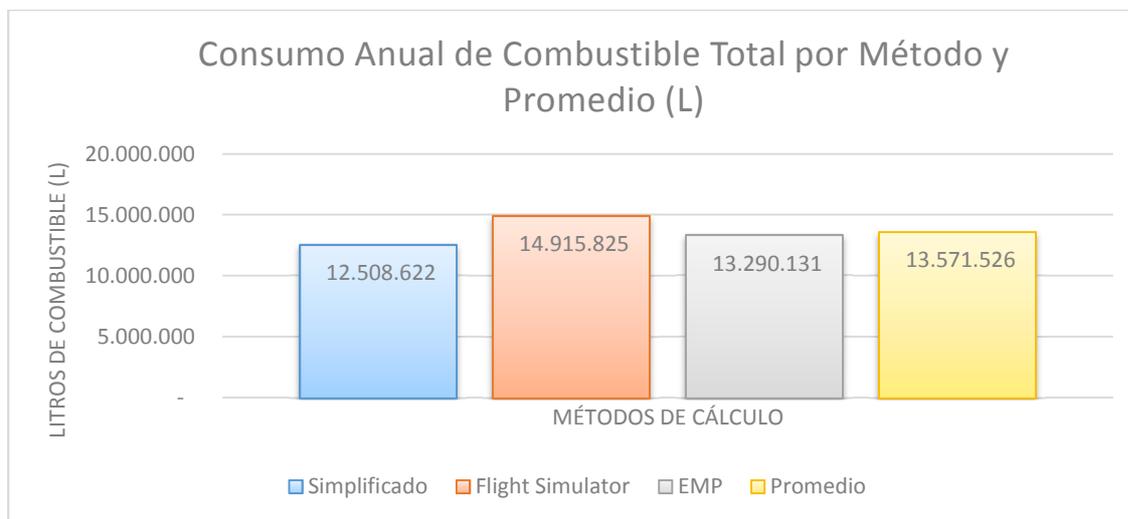


Figura 1: Consumo Anual de Combustible por Método y Promedio (L)

En la Figura 2. Izquierda, presentamos los consumos promedios por Km recorrido (L/Km), destacando que la aeronave Saab 340 tiene el mejor rendimiento de 1.22 L/Km, y el Embraer 190 el menos eficiente de 6,42 L/Km. Sin embargo, si observamos la Figura 2 Der., al incluir el consumo por pasajero transportado por Km, la aeronave Embraer 190 tiene un valor de 0,067 (Litros*Pasajero/ Km) y es la de mayor gasto de combustible por pasajero transportado, siendo en este caso la aeronave Airbus 320 la que presenta el valor más reducido, 0.029 (Litros*Pasajeros/ Km), representando una diferencia porcentual entre los extremos de 56.72%. Deseamos señalar que para el cálculo de estos valores consideramos factor de carga igual a 1.

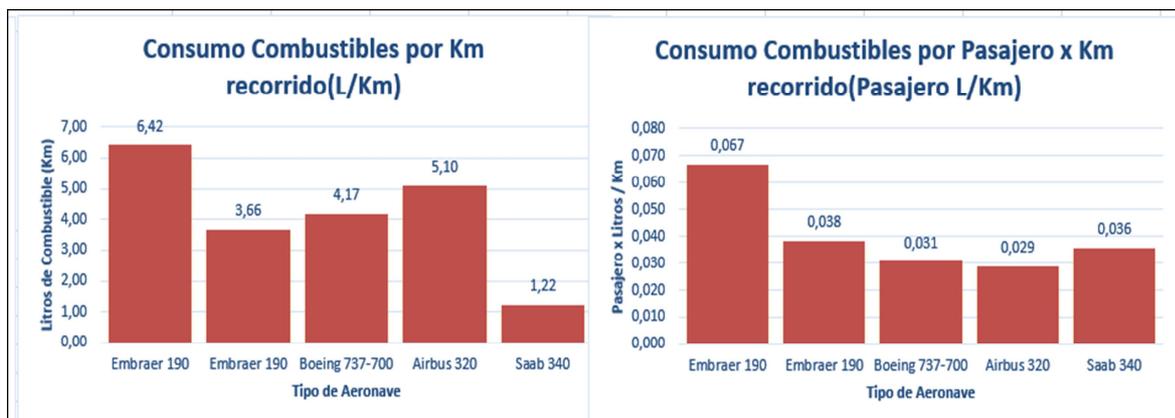


Figura 2. Izquierda: Consumo de combustible por Km recorrido por las distintas aeronaves; Derecha: Consumo de Combustible por Pasajero x Km recorrido (Pasajero* L/Km)

OPCIONES DE METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR LAS EMISIONES PROVOCADAS POR LOS MEDIOS DE TRANSPORTE

De acuerdo a la disponibilidad de los datos, hay diferentes enfoques que podemos implementar para cuantificar y asignar las emisiones al transporte. El GPC propone cuatro metodologías de cálculo que se describirán a continuación. Estas pueden clasificarse en términos generales como enfoque de “arriba hacia abajo” o de “abajo hacia arriba”. El primer caso citado sirve para comenzar el estudio tomando el consumo de combustible como un indicador, considerando que las emisiones son el resultado de multiplicar el combustible total vendido por un factor de emisión de gases efecto invernadero, de acuerdo a cada tipo de combustible. El segundo caso mencionado se basa en un marco de trabajo denominado ASIF (Activity- mode Share- Intensity-Fuel) en el cual se vinculan sus variables a través de la fórmula expuesta en la Figura 3. A continuación, detallamos qué aspectos incluyen cada una de las variables.

El enfoque de “arriba hacia abajo” (top-down), que se corresponde con el método de “venta de combustible”, que describiremos más adelante, parte del consumo de combustible como dato aproximado para conocer el comportamiento del transporte. Este dato multiplicado por el factor de emisión de cada tipo de combustible es usado como estimación de las emisiones de GEI.

Los enfoques de “abajo hacia arriba” (bottom-up), que se corresponden a los métodos de “Actividad inducida”, “Geográficos”, “Actividad Residencial”, que también explicaremos más adelante, parten de datos de actividad detallados. Estos enfoques se basan en un marco de trabajo denominado ASIF (Activity- mode Share- Intensity-Fuel) en el cual se vinculan sus variables a través de la fórmula expuesta en la *Figura 3*. A continuación, detallamos qué aspectos incluyen cada una de las variables.

A = Cantidad de Actividad: refleja el número y la duración de los viajes. Se mide como VKT (kilómetros viajados por vehículo).

S= Proporción de viajes: describe la porción de los viajes realizados a través de los diferentes medios (por ejemplo, caminar, andar en bicicleta, el transporte público, coche privado) y vehículos tipo (por ejemplo, motocicleta, automóvil, autobús, camión, avión).

I = Intensidad energética: es una función las características de los tipos de vehículos (por ejemplo, el factor de ocupación o de carga, representa los pasajeros por kilómetro o las toneladas de carga por kilómetro y de las condiciones de conducción). De acuerdo a los ciclos de conducción se pueden evidenciar puntos que muestran la velocidad del vehículo a través del tiempo).

F = Factor de emisión de cada gas de efecto invernadero producido por el combustible.

La metodología de “abajo hacia arriba” es más detallada y conduce a producir evaluaciones más eficaces para contribuir a la mitigación de las emisiones.

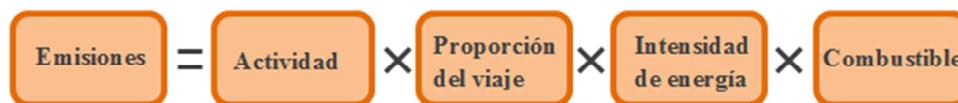


Figura 3: Marco de trabajo ASIF(Cooper, 2013)

En los párrafos siguientes se da una breve descripción de los cuatro métodos sugeridos por el GPC para reportar las emisiones originadas por el transporte y en la *Figura 4* están detallados los límites adoptados en cada metodología.

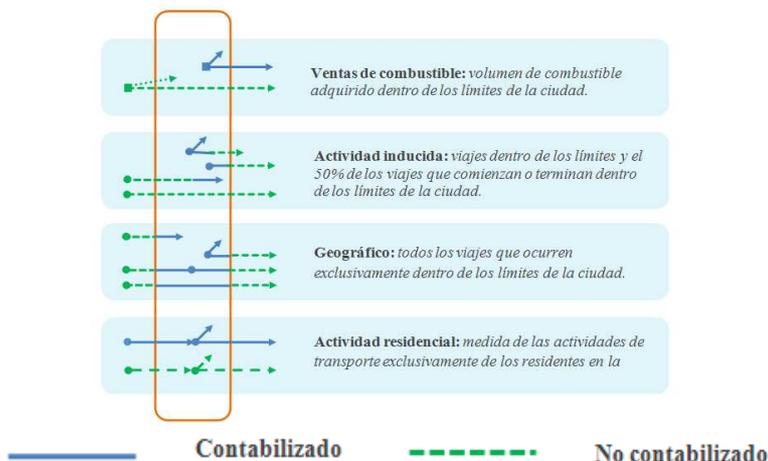


Figura 4: Límites adoptados en cada metodología. Fuente: Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories

Método actividad inducida

Ese método sirve para cuantificar las emisiones del transporte que son inducidas por la ciudad, incluyendo los viajes que comienzan, terminan o están contenidos completamente dentro de la ciudad,

excluyéndose en general los viajes que pasan a través de ella. Esta metodología se focaliza en identificar el origen y el destino de cada viaje, la frecuencia con que se efectúa, la eficiencia del motor del vehículo, el tipo de combustible y sus factores de emisión. La información se puede obtener directamente de las empresas de transporte o bien mediante la realización de encuestas. Una vez recopilada toda la información de cada tipo de transporte, se reporta la totalidad de los viajes cuando estos se producen exclusivamente dentro de la ciudad. En el caso de viajes interurbanos, existen dos formas distintas de reportarlos para reflejar la responsabilidad compartida por las dos ciudades involucradas en el trayecto. Una de las opciones se ocupa de informar el 50% de los desplazamientos que comienzan y terminan en la ciudad. De ese 50%, la porción que se produce dentro de los límites de la ciudad es reportada en alcance 1, mientras que el 50% restante que se produce fuera de la frontera se informa en el alcance 3. La otra opción recomendada por el GPC es tomar solo los viajes que comienzan en la ciudad e informar el 50% de ellos en el alcance 1. En la **Figura** se ejemplifica la asignación de los porcentajes de acuerdo a las dos opciones descritas.



Figura 5: Asignación de actividad inducida por la ciudad en viajes interurbanos Fuente: Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories.

Método de las ventas de combustible

Este método calcula las emisiones del transporte de carretera basado en el total de combustible vendido dentro de los límites de la ciudad. El volumen de combustible se puede obtener por medio de los datos de ventas realizadas en estaciones de servicio y/o distribuidores de combustible. En el caso de transportes en carretera es conveniente asignar el consumo por subcategoría de vehículo, de acuerdo a los registros de taxis, colectivos, autos, etc. disponibles en la ciudad. A pesar de que parte de las compras en estaciones pueden ser empleadas para viajes interurbanos, son informadas en alcance 1. De no estar disponibles los datos de venta en estaciones o proveedores de combustible, se pueden realizar encuestas para obtener información de consumo.

Método geográfico o territorial

Este método se emplea para cuantificar las emisiones procedentes de la actividad de transporte que se produce exclusivamente dentro de las ciudades, sin tener en cuenta el origen o destino del viaje y la información se reporta en el alcance 1. A pesar de que los viajes fuera de los límites no son evaluados o cuantificados, se pueden efectuar encuestas adicionales para complementar la información con datos sobre las emisiones de alcance 3.

Método actividad residente

Este método cuantifica las emisiones procedentes de la actividad de transporte llevada a cabo sólo por residentes de la ciudad. Para efectuar los cálculos se requiere contar con el registro de todos los vehículos de residentes y la cantidad de kilómetros recorridos por cada unidad. Para obtener la información requerida por el inventario, se pueden realizar encuestas sobre los viajes que realizan los residentes. Aunque estos datos suelen ser más manejables que los de otros métodos, presentan la limitación de que pasa por alto el impacto de los no residentes en la ciudad, como ser el pasaje de turistas, proveedores de productos, etc. Para asignar las emisiones, se utiliza el enfoque de origen y destino solo dentro de la ciudad.

En el presente trabajo adoptamos la metodología de Actividad Inducida para informar las emisiones originadas por el transporte de aviación, dado que es el enfoque sugerido por el GPC. Para reflejar la responsabilidad de las emisiones de las ciudades origen y destino de cada viaje, Reportamos el 50% de los viajes transfronterizos (excluyendo los viajes que pasan por la ciudad, pero no se detienen). De este 50%, la porción que se da dentro de los límites de la ciudad se reporta como alcance 1, y el resto en alcance 3. (World Resource Institute, ICLEI, C40 cities, 2014).

A pesar de que el nivel de reporte elegido para realizar el inventario en la ciudad de Rosario es el BASIC, que no incluye el reporte del alcance 3, hemos decidido informarlo debido a que se ha realizado un trabajo de investigación en este tema y resulta provechoso incluirlos, quedando asentadas las bases para un futuro nivel de reporte de BASIC+.

Cálculo de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Para el cálculo de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del sector aéreo de la ciudad de Rosario, consideramos los siguientes gases: Dióxido de Carbono (CO₂), Metano CH₄ y Óxido Nitroso (N₂O).

Los factores de emisión para cada gas, así como el poder calorífico inferior del combustible considerados, fueron referenciados del inventario de GEI de la República Argentina, año 2000 (Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de la República Argentina, 2000).

Aplicando el método de actividad inducida determinamos para cada vuelo la proporción que ocurre sobre la ciudad de Rosario para reportar bajo alcance 1, el resto del 50% del viaje lo reportamos bajo alcance 3.

Para obtener el total de emisiones expresado en Kg de Dióxido de Carbono *equivalente* (CO₂e), usamos como referencia el resumen publicado por el Greenhouse Protocol para los valores de potencial de calentamiento global, tomando como referencia 100 años (GHG Protocol, 2007).

En la Tabla 7 observamos el resumen de las emisiones por fuente y gas y en la Tabla 8: Emisiones Totales Resultantes.

| Consumo (L) | Emisiones | | | | | | | | Total |
|--------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|
| | Alcance 1 | | | | Alcance 3 | | | | |
| | CO ₂ [Kg] | CH ₄ [Kg] | N ₂ O [Kg] | CO ₂ eq [Kg] | CO ₂ [Kg] | CH ₄ [Kg] | N ₂ O [Kg] | CO ₂ eq [Kg] | |
| 1421,00 | 42489,9472 | 16,8833 | 1,4520 | 43344,7118 | 616265,3550 | 244,8720 | 21,0588 | 628662,6833 | 672007,3951 |
| 1421,00 | 42489,9472 | 16,8833 | 1,4520 | 43344,7118 | 616265,3550 | 244,8720 | 21,0588 | 628662,6833 | 672007,3951 |
| 1447,00 | 45875,1291 | 18,2284 | 1,5676 | 46797,9930 | 625161,0736 | 248,4067 | 21,3628 | 637737,3559 | 684535,3489 |
| 1447,00 | 45875,1291 | 18,2284 | 1,5676 | 46797,9930 | 625161,0736 | 248,4067 | 21,3628 | 637737,3559 | 684535,3489 |
| 3670,00 | 1754,5983 | 0,6972 | 0,0600 | 1789,8953 | 484321,7145 | 192,4444 | 16,5501 | 494064,7501 | 495854,6454 |
| 3670,00 | 1754,5983 | 0,6972 | 0,0600 | 1789,8953 | 484321,7145 | 192,4444 | 16,5501 | 494064,7501 | 495854,6454 |
| 7321,00 | 4888,7581 | 1,9425 | 0,1671 | 4987,1046 | 1934687,2893 | 768,7447 | 66,1115 | 1973607,1364 | 1978594,2410 |
| 7321,00 | 4888,7581 | 1,9425 | 0,1671 | 4987,1046 | 1934687,2893 | 768,7447 | 66,1115 | 1973607,1364 | 1978594,2410 |
| 8936,00 | 10442,7686 | 4,1494 | 0,3568 | 10652,8444 | 4132642,9725 | 1642,0986 | 141,2193 | 4215778,8021 | 4226431,6464 |
| 8936,00 | 10442,7686 | 4,1494 | 0,3568 | 10652,8444 | 4132642,9725 | 1642,0986 | 141,2193 | 4215778,8021 | 4226431,6464 |
| 580,00 | 29727,7564 | 11,8123 | 1,0158 | 30325,7858 | 431165,1954 | 171,3227 | 14,7336 | 439838,8884 | 470164,6741 |
| 580,00 | 29727,7564 | 11,8123 | 1,0158 | 30325,7858 | 431165,1954 | 171,3227 | 14,7336 | 439838,8884 | 470164,6741 |
| 651,00 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 107759,1073 | 42,8179 | 3,6823 | 109926,8830 | 109926,8830 |
| 651,00 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 107759,1073 | 42,8179 | 3,6823 | 109926,8830 | 109926,8830 |
| 933,00 | 1134,2158 | 0,4507 | 0,0388 | 1157,0326 | 52356,8630 | 20,8039 | 1,7891 | 53410,1191 | 54567,1517 |
| 933,00 | 1134,2158 | 0,4507 | 0,0388 | 1157,0326 | 52356,8630 | 20,8039 | 1,7891 | 53410,1191 | 54567,1517 |
| 4000,00 | 244548,1136 | 97,1708 | 8,3566 | 249467,6555 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 249467,6555 |
| Total | 517174,4605 | 205,4984 | 17,6727 | 527578,3904 | 16768719,1412 | 6663,0217 | 573,0153 | 17106053,2363 | 17633631,6267 |

Tabla 7: Resumen de las emisiones de cada vuelo por fuente y gas de efecto invernadero.

| Emisiones CO ₂ eq [Tn] | |
|---|---------|
| Emisiones CO ₂ eq Total | 8816,82 |
| Emisiones de CO ₂ eq Alcance 1 | 263,79 |
| Emisiones de CO ₂ eq Alcance 3 | 8553,03 |

Tabla 8: Emisiones Totales Resultantes en el Aeropuerto de Rosario.

| Marca | Ciudad Destino | Distancia (KM) | Consumo [lt] | Emisiones [Kg CO2 eq] | Emisiones [Kg CO2 eq/km] |
|----------------------------|----------------------|----------------|--------------|-----------------------|--------------------------|
| Airbus 320 (San Pablo) | San Pablo | 1753,6 | 8936 | 4226,43 | 2,41 |
| Embraer 190 (Aeroparque) | Aeroparque (Bs. As.) | 286,2 | 1421 | 672,01 | 2,35 |
| Embraer 190 (Ezeiza) | Ezeiza (Bs. As.) | 298,4 | 1447 | 684,54 | 2,29 |
| Saab 340 (Aeroparque) | Aeroparque (Bs. As.) | 286,2 | 580 | 470,16 | 1,64 |
| Boeing 737-700 (San Pablo) | San Pablo | 1753,6 | 7321 | 1978,59 | 1,13 |
| Embraer 190 (Iguazú) | Iguazú | 1016,7 | 3670 | 495,85 | 0,49 |
| Saab 340 (a Cor) | Córdoba | 367,3 | 651 | 109,93 | 0,30 |
| Saab 340 (a P. Este) | Punta del Este | 584,8 | 933 | 54,57 | 0,09 |

Tabla 9: Comparativa de emisiones de Gases de Efecto Invernadero expresadas en Kg CO2 eq. por Km recorrido, en el Aeropuerto de Rosario.

Para el reporte total de las emisiones consideramos el 50% de las emisiones, ya que el método de *actividad inducida* determina que, si consideramos los vuelos que despegan del aeropuerto, así como los que aterrizan en él, debemos tener en consideración el 50% del total de las emisiones. De ese 50% reportamos, dentro de alcance 1, la proporción del vuelo que ocurre dentro de la ciudad y dentro de alcance 3 el porcentaje restante.

Considerando las emisiones por km recorrido de cada vuelo, podemos comparar los distintos aviones, lo cual está detallado en la Tabla 10, correspondiente a la Comparativa de emisiones de Gases de Efecto Invernadero, expresadas en Kg CO2 eq por Km recorrido.

Como podemos observar en la **Figura 6**, las emisiones de GEI por km recorrido en función del avión y de la distancia de vuelo. Debido al hecho de que las maniobras de carreteo, despegue y aterrizaje consumen más combustible que el vuelo a velocidad crucero, las emisiones por kilómetro de un avión comienzan a descender a medida que la distancia del vuelo es mayor. Esto se observa para el caso del Embraer 190, avión que emite 6,45 KgCO2eq/Km en un vuelo de Rosario a Buenos Aires (Aeroparque), mientras que emite 4,69 KgCO2eq/Km en un vuelo a Iguazú, Argentina.

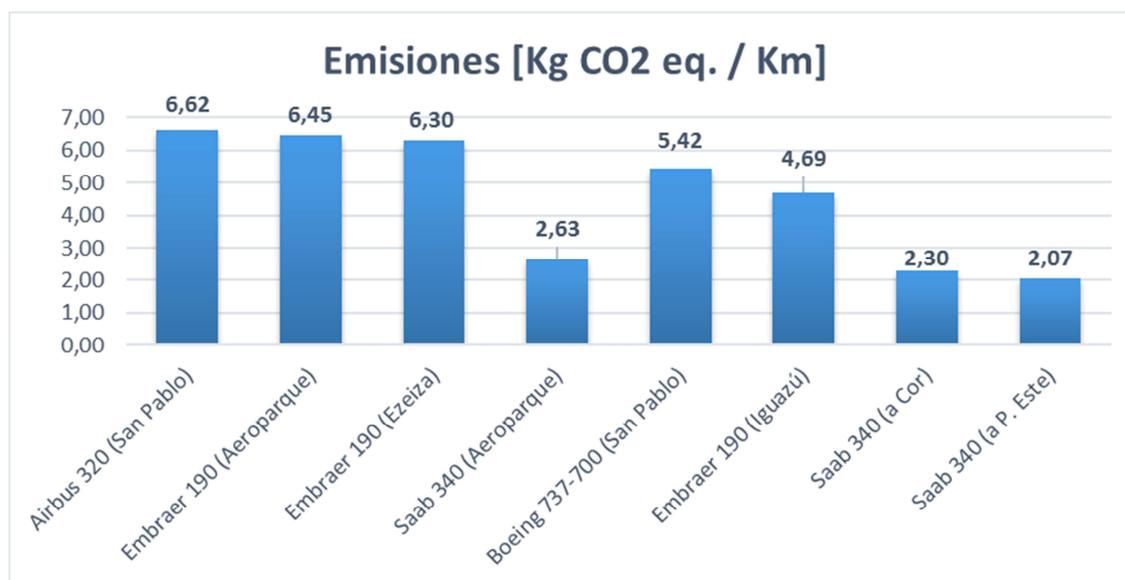


Figura 6: Comparativo de emisiones de Gases de Efecto invernadero de los distintos vuelos expresados en Kg CO2 eq. por km recorrido.

Comparación de consumos de combustible, emisiones y tiempos de viajes entre Rosario y Buenos Aires.

Si consideramos la frecuencia de vuelos que parten y llegan al Aeropuerto de Rosario, podemos ver que los vuelos a Buenos Aires son los de mayor cantidad. Por ese motivo, compararemos a

continuación el consumo de combustible, las emisiones de GEI y el tiempo de viaje para distintos medios de transporte entre Rosario y Buenos Aires, tomando una distancia común de 300 km.

| Medio de Transporte | Consumo Comb. [L] | Dif.* (%) | Emisiones Kg CO2 eq. | Dif.* (%) | Tiempo de Viaje (min) | Dif.* (%) |
|---------------------|-------------------|-----------|----------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| Airbus 320 | 1529 | - | 723,04 | - | 265,00 | - |
| Embraer 190 | 1421 | -7,05 | 672,00 | -7,06 | 265,00 | 0,00 |
| Auto Diesel | 20 | -98,69 | 54,85 | -92,41 | 180,00 | -32,08 |
| Auto Nafta | 20 | -98,69 | 46,93 | -93,51 | 180,00 | -32,08 |
| Ómnibus | 81 | -94,70 | 6,41 | -99,11 | 240,00 | -9,43 |
| Tren | 920 | -39,82 | 1,99 | -99,72 | 480,00 | 81,13 |

* Respecto del viaje en avión promedio

Tabla 10: Consumo de combustible total por viaje, Emisiones de CO2eq por pasajero y por viaje y tiempos de viaje Rosario-Buenos Aires, empleando distintos medios de transporte.

Para el cálculo del consumo de combustible de los aviones, consideramos el consumo estimado para el vuelo original, lo dividimos por los Km recorridos y lo multiplicamos por los Km entre Rosario y Buenos Aires. Las emisiones fueron estimadas considerando una ocupación media de 50 pasajeros. En cuanto al tiempo, en este caso tuvimos en cuenta el tiempo de vuelo, las horas necesarias en el aeropuerto y el traslado al aeropuerto. Para los cálculos en auto se consideraron las emisiones suponiendo que viaja una persona en el auto. Las emisiones resultantes salen de multiplicar el consumo de cada tipo de combustible por el correspondiente factor de emisión. Para el caso del ómnibus estimamos una ocupación promedio de 35 pasajeros. En el caso del tren los cálculos los desarrollamos para una formación con locomotora que puede traccionar 10 vagones, con una capacidad total de 900 pasajeros .

En la Tabla 11 presentamos la comparación de valores promedios por viaje entre Rosario y Buenos Aires, admitiendo que las distancias recorridas por los distintos medios de transporte es la misma.

En la presente comparación hemos considerado que la carga asociada a cada pasajero (esencialmente valijas) es la misma para todos los medios de movilidad.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En este trabajo hemos analizado el consumo de combustible y las emisiones correspondientes de gases de efecto invernadero del transporte aéreo tomando al aeropuerto de la ciudad de Rosario como punto de referencia. Detallamos a continuación los resultados más importantes:

- Cada aeronave presenta distintas performances según la distancia de vuelo, lo que las hace más o menos aptas, para el recorrido considerado, frente a otros aviones. El Embraer 190, da 43,30% más de emisiones que el Saab 340 para el viaje de Rosario a Buenos Aires (Aeroparque).
- De la comparación del consumo de combustible de los distintos aviones analizados que aterrizan y despegan desde el aeropuerto de Rosario, surge que el de mayor consumo por pasajero por Km, es el Embraer 190 con 0,067 Litro*Pasajero/Km, siguiéndole Saab 340 con 0,036 (L*Pasajero/Km), Boeing 737- 700 con 0,032 Litro*Pasajero/Km y el de menor consumo: Airbus 320 con 0,029 Litro*Pasajero/Km.
- En relación a los gases de efecto invernadero y de la proporcionalidad directa entre el uso de combustible y las emisiones de estos gases a la atmósfera las conclusiones son similares a las obtenidas en el ítem anterior.
- De la comparación de las emisiones de GEI de viajes entre Rosario y Buenos Aires, empleando distintos medios de transporte da por resultado que el tren presenta una reducción porcentual con respecto al avión de -99,90%, seguido por el ómnibus, con una reducción porcentual respecto al avión de 99,68%.

En conclusión, los resultados obtenidos permiten determinar el medio de transporte más adecuado a ser empleado en recorridos que tienen la ciudad de Rosario como punto de referencia (y en particular su aeropuerto), teniendo en cuenta diferentes criterios: reducción del consumo de combustible, minimización de emisiones contaminantes de GEI o tiempo de viaje.

BIBLIOGRAFÍA

- Agency, E. E. (2013). *Libro guía EMEP/EEA de inventario de emisiones a la atmósfera 2009*. (A. E. (EEA), Ed.) Copenhagen K, Denmark. doi:ISSN 1725-2237
- Barbero, J. A., & Rodríguez Tornquist, R. (2012). Transporte y cambio climático: hacia un desarrollo sostenible y de bajo carbono. (U. d. Aires, Ed.) *Transporte y Territorio*(6), 8 a 26.
- Bariloche, F. (2005). *Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de la República Argentina Año 2000* (Vol. II). Buenos Aires, Argentina.
- Charles, D. e. (1998). *Treatment of Uncertainties for National Estimates of Greenhouse Gas Emissions*. Estados Unidos de América: Global Atmosphere Division, Department of the Environment, Transport and the Regions.
- Cooper, E. J. (2013). *Scoping Study on Developing a Preferred Methodology and Tool to Estimate Citywide Transport Greenhouse Gas Emissions*,. unpublished.
- IPCC. (1999). Aviation and the Global Atmosphere. Cambridge, UK : Cambridge University Press.
- IPCC. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC. (2007). Climate Change - Fourth Assessment Report. .
- IPCC. (2014). Climate Change Mitigation - Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kristin Rypdal, W. W. (2004). *Uncertainties in greenhouse gas emission inventories evaluation, comparability and implications*.(E. S. Policy, Ed.)
- Llanes, J. M. (s.f.). Elaboración de inventarios de emisiones en aeropuertos. En CONAMA10 (Ed.), *Congreso Nacional de Medio Ambiente*. , (pág. 23). Obtenido de www.conama10.es
- McCullum, D. L. (2010). www.pewclimate.org. (P. C. Change, Ed.) Obtenido de Institute of Transportation Studies ITS UCDAVIS: <https://escholarship.org/uc/item/5nz642qb>
- Schipper, L. F. (2009). *Transport and Carbon Dioxide Emissions: Forecasts, Options Analysis, and Evaluation*.
- Wee Kean Fong, M. D., & Deng-Beck, C. (2014). Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories. En *Greenhouse Gas Protocols* (pág. 176). EEUU: An Accounting and Reporting Standard for Cities. doi:1-56973-846-7
- Winther, M. (December, 2006). *Emission Inventory Guidebook* (Vols. AIR TRAFFIC Activities 080501 - 080504). (T. N. Institute, Ed.) Denmark.
- World Resource Institute, ICLEI, C40 cities. (2014). *GPC - Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories*.

ABSTRACT

The role of cities as mayor contributors of Greenhouse Gases (GHG), determine the importance of measuring the relative emissions of energy consumption. In this work, we present the results of GHG emissions of aviation sector, analyzing three different methods to determine fuel consumption: a) Simplify Method, b) Flight Simulator, c) Emission Inventory Guidebook. We choose as fuel consumption criteria the average of the three mentioned methods, with 8,9% of uncertainty with respect of the extreme values. The yearly fuel consumption for aviation sector is 13.6 Ml. For the emissions calculations we analyze four methods. We come to the conclusion that the activity induced method is the more appropriate with a total value of 8.8 TnCO₂eq per year. We also compare the emissions of different transportation modes from Rosario to Buenos Aires with the aviation mode. The percentage difference of a diesel car is -98.69%, and for the train is -99,90%.