

Optimización del transporte público en la ciudad de Mendoza y consideraciones ambientales

Ayelen Zanitti^{1,3}, Enrique Puliafito^{1,2}

¹ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

² Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza/CONICET, Rodríguez 273, (M5502AJE), Ciudad de Mendoza, Argentina

³ Université de Technologie de Troyes, 12 Rue Marie Curie, BP 2060, 10010 Troyes, Francia

maria.ayelen.zanitti@gmail.com

Recibido el 28 de abril de 2016, aprobado el 20 de julio de 2016

Resumen

El transporte público en la ciudad de Mendoza está compuesto por trolebuses, trenes, autobuses y minibuses. El 30% de su población utiliza el sistema de transporte público regularmente, y el resto utiliza el coche para sus traslados diarios, cuando el promedio de ocupantes que viajan en los vehículos propios es de 1,4 pasajeros. Ambos factores conllevan a que la ciudad esté cada vez más congestionada y contaminada. El objetivo de este artículo es la búsqueda de una metodología que permita lograr la optimización y distribución eficaz de los vehículos que conforman el transporte público en la ciudad de Mendoza, que minimice el consumo de combustible, y produzca la menor emisión, a partir de un parque automotor y recorridos dados. La continuación de esta investigación está orientada a desarrollar un modelo que permita lograr una mejora significativa en el sistema de transporte público y en la calidad del aire en esa ciudad.

PALABRAS CLAVE: TRANSPORTE PÚBLICO – OPTIMIZACIÓN - CALIDAD DEL AIRE – EMISIONES - MENDOZA

Abstract

Public transport in this city is made up of trolley buses, trains, buses and minibuses. 30% of the population in Mendoza regularly use the public transport system, and the rest use the car for their daily trips, when the average number of occupants traveling in own vehicles is 1.4 passengers. Both factors lead to the city is increasingly congested and polluted. The aim of this article is the search for a methodology to achieve optimization and efficient distribution of vehicles that make up public transport in the city of Mendoza, which minimizes fuel consumption and produce lower emissions, from a park automotive and tours given. The continuation of this research is aimed to develop a model to achieve a significant improvement in the public transport system and air quality in the city of Mendoza.

KEYWORDS: PUBLIC TRANSPORT - OPTIMIZATION - AIR QUALITY - EMISSIONS – MENDOZA

El presente artículo forma parte del trabajo de tesis "*Optimization of public transport and environmental study of the city of Mendoza*" para optar al grado de Master en Optimización y seguridad de sistemas de la Universidad Tecnológica de Troyes, dirigida por el Dr. Enrique Puliafito

Introducción

La contaminación atmosférica es un fenómeno típicamente asociado a centros urbanos y regiones industrializadas. De esta forma, la contaminación del aire aparece sistemáticamente como una de las principales inquietudes ambientales, y la responsable de varios efectos adversos en la salud de las personas. Sin embargo, en muchas ciudades no se han tomado las precauciones adecuadas en proporción a la preocupación mundial manifestada. En cambio, sí se encuentran muy bien identificados y documentados los efectos que los contaminantes atmosféricos pueden producir tanto sobre diversos tipos de ecosistemas (Fowler *et al.*, 2009) como los daños a materiales (Muller y Mendelsohn, 2007) y a las obras culturales.

Uno de los principales problemas asociados a la urbanización es el tema de la movilidad. Las estrategias de mitigación que puedan sugerirse deben enmarcarse dentro de un enfoque realista respecto de las necesidades de movilidad que tiene la sociedad actual, ya que ella está asociada al crecimiento económico y a las libertades personales.

Muchas son las razones por las cuales se elige mayoritariamente el transporte privado frente al transporte público, entre otras: la comodidad, la ambientación climática frente a las temperaturas externas y la certeza en los horarios de salida y arribo.

Desde una visión más amplia, una movilidad sustentable implica para la industria del sector transporte (ST): a) adaptar el diseño del vehículo particular para mejorar su capacidad, su rendimiento, sus emisiones, el consumo de combustibles, la seguridad; b) reducir drásticamente sus emisiones lo que puede significar, la transición a otros combustibles alternativos.

Según los modos de transporte, la movilidad sustentable requiere: c) proveer accesibilidad a aquellos que no tienen posibilidad de poseer un vehículo privado, mejorando la relación entre el transporte público y privado; d) resolver adecuadamente la competencia por recursos y acceso a la infraestructura entre el transporte personal y de carga en las zonas urbanizadas; e) anticiparse a la congestión urbana, desarrollando un conjunto de opciones de movilidad de personas y carga. Para la planificación regional

y urbana se requiere: c₁) mejorar el desarrollo, financiamiento y manejo de la infraestructura de movilidad, c₂) asegurar que el sistema de transporte coopere en el desarrollo económico, ya que la movilidad es una necesidad humana y mejora la calidad de vida.

Tanto en Argentina, como a nivel global el consumo per cápita de energía y la tasa de motorización están en constante aumento. Esto se manifiesta en una creciente movilidad en términos de traslados de personas-km o toneladas de cargas-km anuales asociados a un mayor consumo, mayores tasas de urbanización y una mayor extensión de las zonas periurbanas en las grandes ciudades. Por otra parte, la tendencia creciente a vivir fuera de las zonas urbanas, agravado por los crecientes problemas de inseguridad, ha potenciado el uso del vehículo particular para acceder a los lugares de trabajo y estudio en las zonas urbanas, generando un aumento de la tasa de motorización.

El informe anual de Asociación de Fábricas de Automotores de Argentina (ADEFA) (2015) dio cuenta de que en el país hay más de 11,5 millones de vehículos en las calles, y arrojó otro dato muy interesante: Argentina es el país de la región con más vehículos por habitante, ya que tenía 3,8 habitantes por unidad al cierre de 2014. El anuario agrega que un 86,7% son automóviles, un 9,7% vehículos comerciales livianos y un 3,6% de pesados, incluyendo en este último segmento camiones y autobuses, con una antigüedad promedio de 12,1 años. Por otra parte, se observa que el 50% de la flota se encuentra concentrada en la provincia de Buenos Aires y Ciudad Autónoma de Buenos Aires, secundado por Córdoba y Santa Fe que en conjunto suman 19,4 por ciento. En lo que respecta al tipo de combustible, en los últimos años hubo un crecimiento importante de conversiones a GNC, lo que hace que en la flota actual el 14% de los vehículos que circulan son a gas, 51% son exclusivamente a nafta y el 35% restante diésel. La flota de vehículos híbridos (nafta/eléctrico) es escasa, menor a 30 vehículos del universo total en Argentina, y solo tres modelos se comercializan con este tipo de motorización en el país. En 2014, la flota incorporada de vehículos a nafta fue de 76,5% y la de vehículos diésel de 13,5%, porcentaje que fue favorecido por el incremento en las ventas de minibús y de vehículos más pesados.

Por lo tanto, ante este crecimiento de la tasa de motorización se hace necesario diseñar un sistema integral de movilidad que permita el acceso a aquellos que no tienen motorización individual, y que promueva medios de transporte de baja carbonización. Estos modos de baja emisión de carbono no solo disminuyen el consumo de energía específico y las emisiones de gases de efecto invernadero sino también otros gases y material particulado que inciden sobre la calidad del aire, generando un doble beneficio (o las así llamadas *win-win opportunities*). Una discusión más detallada de opciones específicas de mitigación del sector transporte en Argentina se ha publicado en Puliafito y Castesana, (2010).

La ciudad de Mendoza no escapa a la problemática común de los grandes centros urbanos. Enmarcado en esta problemática, el presente trabajo presenta una herramienta que optimiza el número de vehículos y sus frecuencias para los recorridos del transporte público establecidos por el Ministerio de Transporte Público de la Provincia de Mendoza.

Materiales y métodos

Área de estudio

La zona de estudio es el Área Metropolitana del Gran Mendoza (AMGM) (33°S, 68°W, s. l. de 750 m. a. N.), que incluye los departamentos de: Maipú, Luján, Guaymallén, Godoy Cruz, Capital y Las Heras. Este centro urbano está ubicado al oeste de la República Argentina, en el piedemonte de la Cordillera de Los Andes, El Gran Mendoza se extiende de forma casi regular hacia el Nordeste, Este y Sur, mientras que las estribaciones de la Cordillera, impiden el crecimiento en las direcciones Norte y Oeste. Se trata de la cuarta aglomeración del país con 1.230.000 habitantes, siendo la más importante fuera de la Pampa Húmeda. Ninguna de estas localidades departamentales del Gran Mendoza es dominante en la composición demográfica, ya que la población se distribuye uniformemente en toda el área. Esta zona tiene una extensión urbana aproximada de 370 kilómetros cuadrados y una densidad demográfica media urbana de 2800 hab/km². La provincia de Mendoza participa con el 4,5% del PBI nacional, mientras que el área metropolitana alcanza los 2,5%. La ciudad se ubica en una zona árida a semiárida, de precipitacio-

nes bajas, 120-400 mm anuales, principalmente en meses de verano. La cercanía de la Cordillera de Los Andes tiene una fuerte influencia en la meteorología y en la calidad de aire locales, debido a la circulación típica valle-montaña de variación diaria. La velocidad del viento media anual es alrededor de 1,9 m/s con un 26% de calmas. Las direcciones predominantes son S, S-SW, E-SE y E. El área presenta baja humedad relativa (50%), baja incidencia de niebla y pocos días cubiertos (65-75 días /año). Estas características añadidas a su topografía hacen que sea más propicia a la contaminación por fuentes fijas y móviles, tales como: el transporte, la producción de electricidad, la incineración de residuos, el consumo de combustible industrial y el hogar y en otros procesos industriales.

Características del transporte público en Mendoza

Los estudios de movilidad realizados para AMGM (PTUMA, 2010; Puliafito et al., 2010) indican que en el año 2000 se observaba un promedio de 4,72 personas por auto privado y el 51% de los hogares contaban con vehículo propio, mientras que hoy en día es cada vez más fácil acceder a uno. Es por esto que principalmente en las horas pico, se generan problemas de congestión y en consecuencia de contaminación. La población sin movilidad propia o que solo tiene bicicleta, ascendía al 49,34% de las familias en Mendoza, las cuales dependían exclusivamente del transporte público. Hoy en día, el 36% de la población viaja diariamente por trabajo o estudio. El transporte público transporta 180 millones de pasajeros anuales en 1,9 millones de frecuencias recorriendo aproximadamente 84 millones de kilómetros anuales. Por su parte el transporte privado realiza 480 mil viajes diarios (320 mil viajes como conductor y 160 mil viajes como acompañante), con una longitud media de 13 km por viaje.

A partir de fuentes de elaboración propia se deduce que el principal medio de transporte es el coche privado, que alcanza el 50%. Los traslados en bicicleta y a pie llegan a casi el 20%, y el 30% utiliza el transporte público.

El Transporte Público de Mendoza (TPM) está conformado por cinco tipos de vehículos: autobuses simples (SAB), autobuses doblemente articulados (DAB), trolebuses, tranvías y minibuses según sea el recorrido establecido o ruta

de acceso. Entre los servicios contratados en forma privada, podemos encontrar autobuses, minibuses, taxis y remises. Los recorridos a considerar son trece que son operados por sendos grupos, que podrán usar uno o más tipos de vehículos, según el tipo de recorrido u horario.

Trolebuses: Es un medio de transporte eléctrico que funciona en la provincia desde 1958 y es un servicio prestado por la Empresa Provincial de Transporte. Este medio cuenta con calefacción, aire acondicionado, arrodillamiento (el colectivo se inclina hacia uno de sus lados para que se pueda colocar la rampa para discapacitados) y capacidad para 80 personas¹.

Tranvías: Es un medio de transporte eléctrico, moderno, rápido, eficaz y sostenible que contribuye a racionalizar el uso del espacio público urbano; reduciendo la contaminación sonora y la emisión de gases tóxicos. Es un vehículo doble (dupla) con capacidad para 130 personas.

Minibuses: Los minibuses son vehículos medianos con capacidad para 25-40 pasajeros, sirven de apoyo a la logística urbana para el transporte público en la ciudad de Mendoza, ya que se utilizan simplemente en algunos recorridos donde la demanda es muy variable dependiendo del día de la semana o del horario. Pueden asociarse a servicios diferenciales con mejor servicio y recorridos más directos.

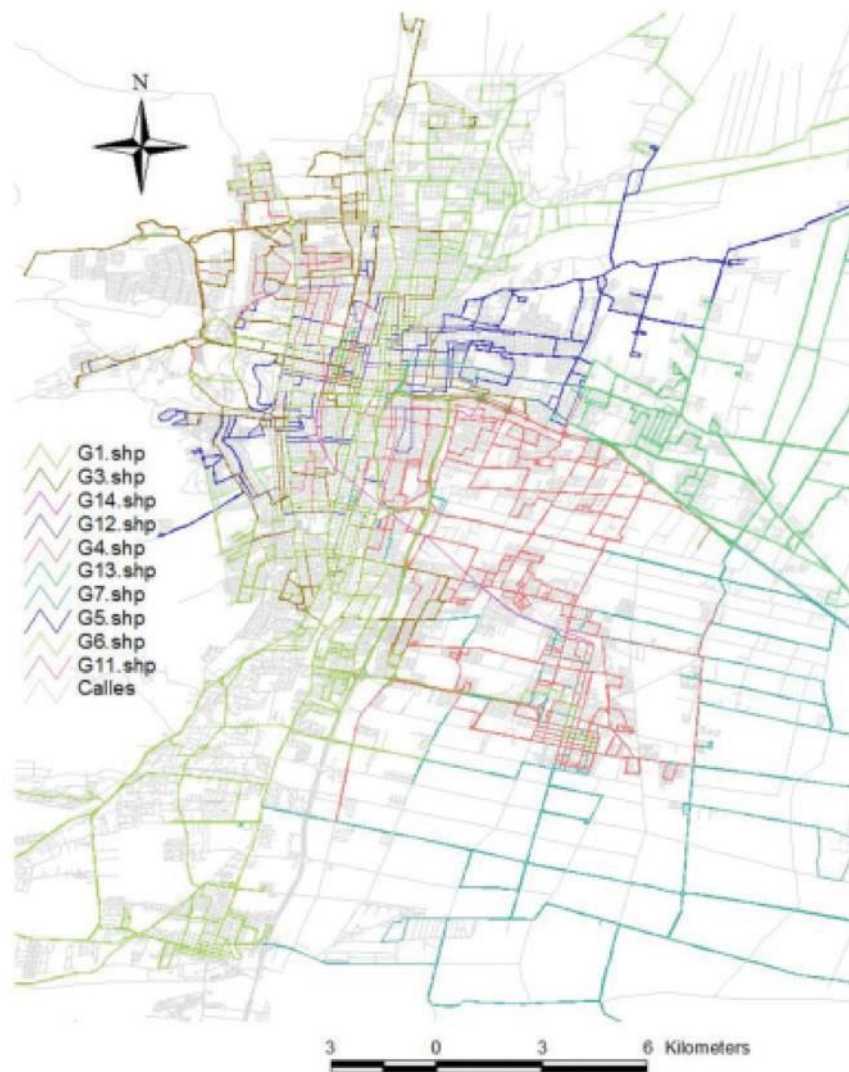


Fig. 1. Recorridos del Transporte Público de Pasajeros en el Gran Mendoza (por grupos de líneas)

¹ Mendoza Nuevo Gobierno, Dirección de Transporte (2015). Secretaría de Servicios Públicos.

Los recorridos: Existen en AMGM trece grupos de recorridos. Cabe destacar que cada grupo tiene implícitos cientos de distintas ramificaciones que dependen del día de la semana y el horario. Pero a fin de simplificar este trabajo se tomaron las líneas troncales de cada grupo de recorrido. De estos trece grupos hay uno que es exclusivamente conformado por trolebuses (grupo 11) y otro que es propio de los tranvías (que circulan sobre rieles, grupo 13). En todos los recorridos pueden usarse los diversos tipos de vehículos disponibles, con la restricción de que los tranvías sólo pueden usarse en el recorrido 13 y los troles solo en el recorrido 11. Sin embargo si la demanda no puede cumplirse con tranvías en el recorrido 13 (o troles en el recorrido 11) estos pueden suplementarse con otros tipos de vehículos (autobuses o minibuses). La Figura 1 muestra los recorridos establecidos para los distintos grupos de oferentes del TPM.

Consumo de combustible y emisiones a la atmósfera

A fin de enmarcar el peso de las emisiones del sector transporte público es interesante con-

signar primeramente las emisiones totales de la actividad vehicular carretera producidas por el consumo de combustible en Mendoza, tanto de vehículos privados, de carga y transporte de pasajeros (Puliafito, 2014, 2015). El consumo de la Provincia de Mendoza (para el año 2014) fue de 457 mil m³ de gas oil, 286 mil m³ de naftas y 174 millones de m³ de GNC, correspondiendo al 6%, 4% y 7% respectivamente del consumo nacional. Esto significa para Mendoza un consumo de 0,270 m³/año por persona de gas-oil, 0,179 m³/año por persona de naftas, y 91,62 m³/año por persona de GNC. Para los departamentos del AMGM (Capital, Godoy Cruz, Guaymallén, Las Heras, Maipú y Luján), el transporte consume 274 mil m³ de gas-oil, 173 mil m³ de naftas y 104 millones de m³ de GNC, lo cual representa el 60% del consumo provincial.

La Tabla 1 muestra los principales indicadores de consumo y emisiones para el sector transporte en el Gran Mendoza en función del producto bruto geográfico (PBG) y población. Los productos que se emiten en mayor proporción debido a los motores de combustión interna de los vehículos son: óxidos nitrosos (NOx), mo-

Tabla 1. Indicadores del sector transporte para el Gran Mendoza

Fuente elaboración propia

| a) Energía | Unidades / año | 1994 | 2004 | 2014 |
|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| GNC | TJ | 1.044 | 4.957 | 4.052 |
| Gas-Oil | TJ | 4.832 | 6.572 | 9.896 |
| Nafta Común | TJ | 1.916 | 446 | 12 |
| Nafta Especial | TJ | 3.117 | 1.260 | 3.955 |
| Nafta ultra | TJ | 0 | 341 | 1.534 |
| Total | TJ | 10.909 | 13.575 | 19.449 |
| energía/cap | MJ/hab | 12,30 | 13,76 | 17,92 |
| energía /PBG | MJ/\$ | 2,2 | 2,2 | 1,9 |
| PBG/cap | \$/hab | 5,5 | 6,4 | 9,6 |

| b) Emisiones | Unidades / año | 1994 | 2004 | 2014 |
|--------------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
| Emisiones CO | ton | 38.366 | 19.556 | 44.723 |
| Emisiones NOx | ton | 3.036 | 3.602 | 5.070 |
| Emisiones HC | ton | 6.184 | 3.259 | 7.358 |
| Emisiones PM10 | ton | 605 | 636 | 1.030 |
| Total emisiones sin CO2 | ton | 48.192 | 27.052 | 58.181 |
| emisiones /cap | kg/hab /año | 54,29 | 27,41 | 53,59 |
| emisiones /PBG | kg/\$ / año | 9,92 | 4,31 | 5,59 |
| Total Emisiones CO2 | miles ton | 762 | 902 | 1.334 |
| emisiones CO2 /cap | kg/hab / año | 858 | 914 | 1.229 |
| Emisiones CO2 /PBG | kg/\$ / año | 157 | 144 | 128 |

Tabla 2. Característica de los vehículos

Fuente elaboración propia

| j | tipo de vehículo | a) Cantidad n | b) Capacidad Pasajeros | c) Velocidad km/h | d) Consumo l/km |
|---|----------------------|------------------|---------------------------|----------------------|--------------------|
| 1 | Tranvía | 10 | 180 | 35 | 1,46 |
| 2 | Trolebús | 74 | 80 | 30 | 0,84 |
| 3 | Bus doble articulado | 150 | 100 | 20 | 0,32 |
| 4 | Bus simple | 450 | 60 | 25 | 0,2 |
| 5 | Minibús | 100 | 40 | 50 | 0,18 |

nóxido de carbono (CO), dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles (HC) y también macropartículas (PM10).

Como puede observarse en la Tabla 1, el transporte (público y privado) constituye una fuente principal de contaminación en Mendoza, lo que se ve agravado por el incremento del parque automotor en los últimos años. Si bien las tecnologías han mejorado, como también lo ha hecho la calidad de los combustibles, esta mejora se ve contrarrestada por la enorme cantidad de vehículos, que se incorporan al parque automotor circulante año a año (Puliafito et al. 2010).

Objetivo

El principal objetivo es determinar la cantidad y tipo de vehículos que deberán incluirse en cada recorrido y con qué frecuencia a fin de cumplir con la demanda diaria de transporte público teniendo en cuenta las unidades que actualmente existen en el sistema de transporte público de la AMGM, optimizando el consumo de combustible y las emisiones a la atmósfera. De esta manera, se pueden identificar dos variables. La primera de ellas es el número de vehículos que circulará por cada recorrido o camino y la segunda es la cantidad de veces que ese mismo vehículo recorrerá esa ruta. Por lo cual, el problema a resolver es de optimización no lineal con restricciones no lineales, ya que tal como se desarrolla más adelante, ambas incógnitas se multiplican en las matrices de optimización y en las restricciones.

Metodología propuesta

Como simplificación en el método se han considerado la longitud promedio de cada grupo de recorrido pero no se ha tenido en cuenta su ubicación geográfica o por localidad. Se ha considerado la demanda total de cada grupo a

partir de las matrices de origen y destino, optimizando el consumo de combustible de cada recorrido. Otro punto a tener en cuenta, son las distintas demandas según el día de la semana que se trate. En este análisis de optimización no se ha tenido en cuenta ni la distribución horaria ni la semanal, solo se deja en claro que al momento de dividir estas frecuencias y vehículos que nos arroja la optimización el usuario debe asignar el 81% para los días hábiles, el 11% para los sábados y el 8% para los domingos. Finalmente, quedan fuera del alcance de este análisis los eventos de tiempos de espera, de optimización por ocupación de vehículo y de optimización por pasajero-kilómetro.

La primera restricción lineal que encontramos en este problema es la cantidad de vehículos que hay de cada tipo. Mendoza cuenta con una flota de 784 vehículos. La Tabla 2 (columna a) indica las cantidades por cada tipo.

Los tranvías y trolebuses son vehículos eléctricos, mientras que los otros 3, son vehículos a combustión. Esto nos da una regla de restricción, que es que en los recorridos donde no están los rieles tendidos, no pueden circular tranvías o trolebuses, mientras que en donde están los rieles y cables, si pueden circular los autobuses y minibús, pudiendo hacer caminos alternativos pero que llevan a los pasajeros a un mismo lugar.

Por lo cual, en los recorridos 11 y 13, que corresponden al trolebús y al tranvía respectivamente, pueden incluirse todos los medios de transporte, mientras que en todos los demás recorridos (del primero al décimo y el número 12), no podemos tener ni trolebuses ni tranvías, ya que no se evalúa en este estudio la opción de invertir en infraestructura, aunque sí puede recomendarse esto en el largo plazo.

Tabla 3. Característica de los recorridos o grupos

Fuente elaboración propia

| Grupo o Recorrido | a) Pasajeros máximos | b) Longitud media |
|-------------------|----------------------|-------------------|
| i | | km |
| 1 | 10.783.053 | 38,70 |
| 2 | 8.006.067 | 27,37 |
| 3 | 13.548.900 | 23,63 |
| 4 | 13.224.450 | 29,01 |
| 5 | 11.892.802 | 30,43 |
| 6 | 8.852.802 | 28,96 |
| 7 | 4.642.988 | 36,12 |
| 8 | 6.793.653 | 29,18 |
| 9 | 9.806.156 | 46,55 |
| 10 | 2.412.561 | 16,85 |
| 11 | 3.154.870 | 11,35 |
| 12 | 10.558.437 | 41,58 |
| 13 | 970.56 | 11,04 |

Tabla 4. Tiempos de frecuencia completa por cada tipo de vehículo en cada recorrido

Fuente elaboración propia

| T(i,j) | Recorridos | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| horas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Tranvía | 2,763 | 1,955 | 1,688 | 2,072 | 2,174 | 2,069 | 2,580 | 2,084 | 3,325 | 1,204 | 0,811 | 2,970 | 0,789 |
| Trolebús | 3,225 | 2,281 | 1,969 | 2,418 | 2,536 | 2,413 | 3,010 | 2,432 | 3,879 | 1,404 | 0,946 | 3,465 | 0,920 |
| Bus doble articulado | 4,838 | 3,421 | 2,954 | 3,626 | 3,804 | 3,620 | 4,515 | 3,648 | 5,819 | 2,106 | 1,419 | 5,198 | 1,380 |
| Bus simple | 3,870 | 2,737 | 2,363 | 2,901 | 3,043 | 2,896 | 3,612 | 2,918 | 4,655 | 1,685 | 1,135 | 4,158 | 1,104 |
| Minibús | 1,935 | 1,369 | 1,182 | 1,451 | 1,522 | 1,448 | 1,806 | 1,459 | 2,328 | 0,843 | 0,568 | 2,079 | 0,552 |

También se tiene en cuenta en el análisis, la capacidad que tiene cada unidad de transporte de llevar pasajeros sentados $C(j)$. La Tabla 2 columna b) indica la capacidad de cada tipo de vehículo y en la columna c) se indica las velocidades promedio por tipo de vehículo.

La demanda anual de pasajeros de cada recorrido o grupo se muestra en la Tabla 3 (columna a), $D(i)$ es el número máximo de pasajeros a transportar para cada uno de los grupos en cifras anuales. Se ha elevado el número real a un 15% de modo que la optimización se asegure de cumplir con todos los pasajeros. La Tabla 3 (columna b) indica la longitud media de cada recorrido.

Tiempos y frecuencias

Para nuestro análisis fue muy importante contar con la información de las velocidades promedio de cada vehículo y las longitudes que

recorre, y con ambos datos, poder hallar los tiempos que lleva hacer cada frecuencia según el vehículo y el recorrido. A su vez, los tiempos de las frecuencias sirven para hallar las frecuencias máximas que puede hacer un vehículo en un año.

Llamaremos $V(i,j)$ al número de vehículos de cada tipo en cada recorrido y $F(i,j)$ a la frecuencia de cada tipo de vehículos en cada recorrido, siendo i el recorrido y j el tipo de vehículo. Estas son las dos variables a optimizar. Entonces, podemos construir una matriz en la que se dividan las longitudes por las velocidades, y nos da como resultado las horas que tarda un vehículo en hacer un determinado recorrido. Esta matriz se denomina $T(i,j)$ (Tabla 4). Debe notarse que como simplificación adicional se consideraron los recorridos solo de ida, para ello se dividió la demanda por dos. A la matriz resultante, se la multiplica por 2,5 ya que además de hacer el viaje de regreso para poder volver a salir del lu-

gar de origen, se pierde tiempo en las estaciones terminales, cargando combustible, haciendo los controles, o simplemente dando tiempo para ofrecer un servicio espaciado.

Tenemos en el año 8760 horas totales. Entonces la matriz de frecuencias máximas puede armarse dividiendo estas horas totales sobre la matriz $T(i,j)$, y esto nos dará la cantidad de veces que un vehículo puede salir desde un mismo punto en el año. De esta manera, logramos restringir en nuestro programa la cantidad de frecuencias anuales que puede hacer cada vehículo.

$$F_{MAX}(i,j) = 8760/T(i,j) \quad (1)$$

Eficiencia de los vehículos

Los autobuses y minibús llevan como combustible al diésel (adoptando Diésel 150 para el cumplimiento de Normas EURO III vigentes en Argentina)².

Debe notarse que los trolebuses y los trenes no consumen combustible directamente como lo hacen los autobuses y minibuses, es decir que no son vehículos de combustión interna y no emiten gases a la atmósfera en forma local. Los trolebuses y los tranvías se componen de un motor eléctrico conectado en serie, el cual es alimentado a través de la línea aérea de contacto, que a su vez, son alimentadas por los puestos de rectificación. Pero a fin de ponderar y medir su consumo para compararlos justamente con los demás vehículos a diésel se calcula el combustible que se quema en las centrales eléctricas para generar la cantidad de KWh que necesitan para poder funcionar por kilómetro.

La tecnología en cada una de las centrales de generación en nuestro país es diferente, por lo cual el consumo de combustible en cada una de ellas es distinto, pero la media nacional es de unos 277 g de petróleo por cada kilowatt-hora generado. Otro de los datos con los que contamos es la densidad del petróleo, que va desde 0,66 g/ml a 0,9785 g/ml. Se toma la densidad más grande para el siguiente cálculo; entonces el volumen es igual a la masa dividido la densidad, dando como resultado 283,08 ml/KWh. Con esta información, podemos concluir que se necesitan 0,28 litros de diésel para la generación de 1 KWh.

Pero las eficiencias según trolebuses y tranvías varían, necesiéndose 5,2 KWh para que el tranvía pueda realizar 1 km y 3 KWh para que lo puedan hacer los trolebuses. Entonces, para calcular los litros que consume por kilómetro el tranvía debemos multiplicar 5,2 KWh/km por 0,28 litros/KWh, dando como resultado 1,46 litros/km y en el caso de los trolebuses, 0,84 litros/km. La Tabla 2 columna d) muestra la matriz de $E(j)$ para cada tipo de vehículo.

La función de costo

Esta función minimiza los litros de combustible para abastecer la demanda de transporte público y se calcula de la siguiente manera:

$$C(i) = f(F(i,j); E(j); L(i)) \quad (2)$$

Donde

C (litros) es el combustible consumido en cada recorrido i ,

F es la frecuencia de cada tipo de vehículo j en los recorridos i , E (l/km) es la eficiencia de cada tipo de vehículo y

L (km) es la longitud de cada recorrido.

Específicamente la Ec. 2 se puede expresar como:

$$C(i) = V(i,j) * F(i,j) * E(j) * L(i) \quad (3)$$

Donde

$V(i,j)$ es la cantidad de vehículos disponibles de cada tipo j en los recorridos i .

El costo de cada recorrido $C(i)$ es función de la frecuencia, el número de vehículos que cumplen con la frecuencia, su eficiencia y el largo del recorrido en cuestión. La función de costo total será la suma de las funciones de costo de todos los recorridos.

$$C_{TOT} = \sum C(i) ; \quad 1 \leq i \leq 13 \quad (4)$$

Programación

La programación se realizó en Matlab. Las fases para simular el modelo matemático que se expone a continuación

Variables:

$V(i,j)$: cantidad de vehículos tipo j en el cami-

² Los vehículos a GNC no se han tenido en cuenta en este trabajo ya que en Mendoza, si bien se han creado grandes vehículos a GNC, no se han implementado en la práctica, y todos sus medios de transporte son a diesel hoy en día.

no o recorrido i

$F(i, j)$: frecuencia de los vehículos tipo j en el camino o recorrido i

Donde se cumple que:

j [1;5]: tipo de vehículo

i [1;13]: caminos o recorridos

Parámetros:

$C(j)$: cantidad máxima de pasajeros que puede llevar cada tipo de vehículo j

$E(j)$: eficiencia de un vehículo j [litros/km]

$L(i)$: longitud de un camino i [km]

Límites:

$D(i)$: demanda de pasajeros de un camino i

$NV_{max}(j)$: cantidad de vehículos j disponibles.

$VR_{max}(i)$: cantidad máxima de vehículos posibles en un camino i

Restricciones lineales

Existe una cantidad máxima de vehículos totales.

$$NV_{max}(j) \geq \sum_{i=1}^{13} V(i, j) \quad (5)$$

Los tranvías ($j=1$) solo están en el recorrido 13. Entonces:

$$NV_{max}(1) = V(13,1) \leq 10$$

Los trolebuses ($j=2$) están solo disponibles en el recorrido 11:

$$NV_{max}(2) = V(11,2) \leq 74$$

Los DAB ($j=3$), SAB ($j=4$) y minibuses ($j=5$) pueden disponerse en cualquier camino:

$$NV_{max}(3) \geq \sum_{i=1}^{13} V(i, 3) \leq 150$$

$$NV_{max}(4) \geq \sum_{i=1}^{13} V(i, 4) \leq 450$$

$$NV_{max}(5) \geq \sum_{i=1}^{13} V(i, 5) \leq 100$$

Y para cada recorrido, también hay una suma total máxima de vehículos de diferentes tipos, a modo que no todos los vehículos estén en un mismo grupo.

$$VR_{max}(i) \geq \sum_{j=1}^5 V(i, j) \quad (6)$$

Para cada recorrido la restricción es:

$$VR_{max}(1) \geq \sum_{j=3}^5 V(1, j) \leq 157$$

$$VR_{max}(2) \geq \sum_{j=3}^5 V(2, j) \leq 125$$

$$VR_{max}(3) \geq \sum_{j=3}^5 V(3, j) \leq 189$$

$$VR_{max}(4) \geq \sum_{j=3}^5 V(4, j) \leq 146$$

$$VR_{max}(5) \geq \sum_{j=3}^5 V(5, j) \leq 129$$

$$VR_{max}(6) \geq \sum_{j=3}^5 V(6, j) \leq 121$$

$$VR_{max}(7) \geq \sum_{j=3}^5 V(7, j) \leq 100$$

$$VR_{max}(8) \geq \sum_{j=3}^5 V(8, j) \leq 200$$

$$VR_{max}(9) \geq \sum_{j=3}^5 V(9, j) \leq 110$$

$$VR_{max}(10) \geq \sum_{j=3}^5 V(10, j) \leq 105$$

$$VR_{max}(11) \geq \sum_{j=1}^5 V(11, j) \leq 100$$

$$VR_{max}(12) \geq \sum_{j=3}^5 V(12, j) \leq 100$$

$$VR_{max}(13) \geq \sum_{j=1}^5 V(13, j) \leq 100$$

Restricciones no lineales

La función de esta restricción sirve para forzar que la cantidad de vehículos, por la cantidad de veces que se dirige en una dirección en el año, por la capacidad que tiene cada vehículo, sea superior o igual a la demanda en tal grupo.

$$\sum_{j=1}^5 V(i, j) * F(i, j) * C(j) \geq D(i) \quad (7)$$

Entonces, en el grupo 1 (tranvías) por ejemplo:

$$V(1,1) * F(1,1) * C(1) + V(1,2) * F(1,2) * C(2) + V(1,3) * F(1,3) * C(3) + V(1,4) * F(1,4) * C(4) + V(1,5) * F(1,5) * C(5) \geq D(1)$$

Siendo $V(1,1)$ la cantidad de tranvías que hacen el recorrido 1; $F(1,1)$ la frecuencia de tranvías que hacen el recorrido 1, y $C(1)$ la capacidad de transporte de pasajeros de los tranvías. Debe notarse que en este ejemplo si la demanda no puede ser satisfecha con tranvías, deberían incluirse otros medios de transporte por rutas paralelas. Cada recorrido se puede analizar en forma equivalente, variando los medios de transporte disponibles para cada recorrido.

Función de Optimización

El costo de un recorrido i es:

$$C(i) = \sum_{j=1}^5 V(i, j) * F(i, j) * E(i, j) * L(i, j) \quad (8)$$

Entonces, el costo para el total de los recorridos es:

$$C_{TOT} = \sum_{i=1}^{13} C(i) \quad (9)$$

Resultados de la optimización

Los resultados para una de las optimizaciones corridas por el programa fueron:

a) Matriz de números de vehículos por recorrido $VR(i, j)$ (Tabla 5): pueden observarse los vehículos de la matriz distribuidos óptimamente en

Tabla 5. Distribución óptima de vehículos

Fuente elaboración propia

| Recorrido | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----------------------|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Tranvía | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| Trolebús | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 74 | 0 | 0 |
| Bus Doble Articulado | 91 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31 | 0 | 24 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| Bus simple | 0 | 42 | 124 | 146 | 0 | 0 | 0 | 0 | 87 | 0 | 0 | 51 | 0 |
| Minibús | 0 | 0 | 0 | 0 | 52 | 0 | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24 | 0 |

Tabla 6. Distribución óptima de frecuencias

Fuente elaboración propia

| Recorrido | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Tranvía | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 11.103 |
| Trolebús | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 9.260 | - | - |
| Bus Doble Articulado | 1.811 | - | - | - | - | 2.420 | - | 2.401 | - | 4.160 | - | - | - |
| Bus simple | - | 3.201 | 3.707 | 3.020 | - | - | - | - | 1.882 | - | - | 2.107 | - |
| Minibús | - | - | - | - | 5.756 | - | 4.850 | - | - | - | - | 4.214 | - |

cada recorrido.

b) Matriz de Frecuencias anuales por recorrido $FR(i,j)$ (Tabla 6):

longitud total recorrida por tipo de vehículo y frecuencia por recorrido, entonces

$$A(i) = \sum_{j=1}^5 VR(i,j) * FR(i,j) * L(i,j)$$

(11)

Consumo de combustible y emisiones

Las emisiones de contaminantes se calculan como el producto de la actividad por un factor de emisión específico para cada contaminante (k), combustible (n) y tipo de vehículo (i):

$$Em(k, i, l) = A(n, i) * FE(k, n, l) \quad (10)$$

La actividad A (km) puede calcularse como la

Para esta actividad el factor de emisión FE se define en términos de g/km para cada tipo de contaminante y tipo de vehículo. Una forma alternativa de estimar la actividad es a partir del consumo total de combustible, multiplicado por un factor de emisión típico para cada tipo de combustible. Para ello se requiere incorporar la eficiencia de consumo cada tipo de vehículo E(j):

Tabla 7. Frecuencias anuales por recorrido

Fuente elaboración propia

| Tipo/ Recorrido | Tranvía | Trolebús | Bus Doble Articulado | Bus simple | Minibús |
|-----------------|---------|----------|----------------------|------------|---------|
| 1 | - | - | 164.801 | - | - |
| 2 | - | - | - | 134.442 | - |
| 3 | - | - | - | 459.668 | - |
| 4 | - | - | - | 440.920 | - |
| 5 | - | - | - | - | 299.312 |
| 6 | - | - | 75.020 | - | - |
| 7 | - | - | - | - | 116.400 |
| 8 | - | - | 57.624 | - | - |
| 9 | - | - | - | 163.734 | - |
| 10 | - | - | 20.800 | - | - |
| 11 | - | 685.240 | - | - | - |
| 12 | - | - | - | 107.457 | 101.136 |
| 13 | 111.030 | - | - | - | - |

Tabla 8. Litros anuales consumidos por cada recorrido

Fuente elaboración propia

| Tipo/ Recorrido | Tranvía | Trolebús | Bus Doble Articulado | Bus simple | Minibús | Litros por Recorrido |
|--------------------|-----------|-----------|-------------------------|------------|-----------|-------------------------|
| 1 | - | - | 2.040.896 | - | - | 2.040.896 |
| 2 | - | - | - | 735.936 | - | 735.936 |
| 3 | - | - | - | 2.172.391 | - | 2.172.391 |
| 4 | - | - | - | 2.558.218 | - | 2.558.218 |
| 5 | - | - | - | - | 1.639.452 | 1.639.452 |
| 6 | - | - | 695.225 | - | - | 695.225 |
| 7 | - | - | - | - | 756.786 | 756.786 |
| 8 | - | - | 538.070 | - | - | 538.070 |
| 9 | - | - | - | 1.524.364 | - | 1.524.364 |
| 10 | - | - | 112.154 | - | - | 112.154 |
| 11 | - | 6.533.078 | - | - | - | 6.533.078 |
| 12 | - | - | - | 893.612 | 756.942 | 1.650.555 |
| 13 | 1.784.723 | - | - | - | - | 1.784.723 |

Tabla 9. Factores de emisión para autobuses (g/km) que emanan los diferentes combustibles y tecnologías de postprocesamiento

Fuente Embarq (2012), Nylund *et al*, 2004, Nylund y Erkkilä (2005), Posadas (2000). Debe notarse que los valores aquí mostrados corresponden a promedios de mediciones realizados en diversas ciudades sobre ómnibus con diversas tecnologías y combustibles. (Abreviaturas ver Anexo A).

| Tecnología y combustible | NOX | CO | CO2 | PM | HCT |
|--------------------------|------|-----|-------|------|-------|
| GNL | 8,7 | 4,1 | 1.320 | 0,03 | 9,56 |
| D50 + DPF | 10,9 | 1,4 | 1.275 | 0,14 | 0,02 |
| D50 | 11,3 | 2,8 | 1.176 | 0,36 | 0,07 |
| D15 + SCR | 6,9 | 3,9 | 1.096 | 0,06 | 0,01 |
| D15 + OC | 8,5 | 0,4 | 1.179 | 0,09 | 0,07 |
| D15 + EGR | 8,3 | 0,4 | 1.421 | 0,07 | 0,04 |
| D15 + DPF | 13,1 | 0,5 | 1.445 | 0,03 | 0,03 |
| D15 | 12,2 | 2,3 | 1.538 | 0,31 | 0,17 |
| D150 + OC | 10,1 | 2,5 | 1.134 | 0,28 | 0,22 |
| D150 | 16,3 | 5,8 | 1.221 | 0,34 | 0,51 |
| GNC + OC | 9,9 | 0,6 | 1.181 | 0,01 | 7,25 |
| GNC + TWC | 2,3 | 1,5 | 1.159 | 0,02 | 0,40 |
| GNC | 15,1 | 8,5 | 1.315 | 0,03 | 13,95 |

$$C(i) = \sum_{j=1}^5 VR(i,j) * FR(i,j) * L(i) * E(j) \quad (12)$$

El total de litros consumidos asciende a 22.741.846. La Tabla 7 muestra las frecuencias totales por recorrido y la Tabla 8 el consumo total por recorrido y tipo de vehículo. Ahora bien, para calcular la cantidad de contaminantes que se emiten a la atmósfera, se debe multiplicar la actividad por un factor de emisión de los distintos contaminantes.

Se analizaron cuatro contaminantes: el CO₂, los HCT (hidrocarburos), los NO_x y el material particulado. La Tabla 8 usada corresponde a autobuses pero no discrimina su tamaño, se ha adoptado un factor de emisión del 100% para los autobuses doblemente articulados, el 76% para los autobuses simples y un 25% para los minibuses, habiendo derivado este análisis comparando con los factores de emisión para distintos tamaños de vehículos.

La Tabla 9 muestra factores de emisión para

Tabla 10. Emisiones para DIÉSEL 150 y variaciones relativas usando OC y DPF

Fuente elaboración propia

| Contaminante | Emisiones Tn/año | | Reducción | |
|-----------------|------------------|--|-----------|---------|
| | D150 | | con OC | con DPF |
| CO ₂ | 54.851 | | -7% | 8% |
| PM | 15,27 | | -18% | -61% |
| HCT | 22,91 | | -57% | -71% |
| NOx | 732,24 | | -38% | -4% |

Tabla 11. Componentes mayoritarios del aceite esencial

Fuente elaboración propia

| Contaminante | Emisiones Tn/año | | Reducción | |
|-----------------|------------------|--|-----------|---------|
| | GNC sin postpr. | | con OC | con TWC |
| CO ₂ | 59.074 | | -10% | -12% |
| PM | 1,34 | | -67% | -33% |
| HCT | 627 | | -48% | -97% |
| NOx | 678 | | -34% | -85% |

autobuses para distintos tipos de combustibles y tecnologías de post procesamiento. En el Anexo A se da un breve detalle de las tecnologías mencionadas.

A fin de analizar la solución obtenida a partir del consumo de combustibles, se compararon diversas opciones de filtros (OC y DPF) usando como referencia el diésel150 (D150) que es el combustible que cumple con el tipo de normas Euro III vigente en Argentina. La Tabla 10 muestra los resultados comparativos.

Las emisiones totales anuales del sistema de transporte público usando diésel D150 y sistema eléctrico (tranvías y troles) combinado son: 54,851 Tn de CO₂; 15,27 de material particulado (PM); 22,91 Tn de hidrocarburos totales (HCT) y 732,24 Tn óxidos de nitrógenos (NOx). Estos valores pueden reducirse si se usan filtros de posprocesamiento.

Por último, en la Tabla 11, se muestran los resultados utilizando GNC, sin postratamiento, con tratamiento OC y con el catalizador TWC.

Se aprecia la notable reducción de las emisiones de PM si se usa GNC aunque con valores mayores de hidrocarburos respecto del diésel D150. Debe notarse que la reducción de PM es un objetivo importante para reducir nume-

rosas enfermedades respiratorias.

Conclusiones

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una metodología que permitiera lograr la optimización y distribución eficaz de los vehículos que conforman el transporte público en la ciudad de Mendoza, que satisficiera la demanda de pasajeros actuales. El transporte público en dicha ciudad está compuesto por trolebuses, tranvías, autobuses y minibuses, y deben recorrer 13 distintos grupos de recorridos.

En relación con la herramienta utilizada dado que las incógnitas son el número de vehículos $V(i,j)$ y la frecuencia en cada recorrido $F(i,j)$, y que ambas variables se encuentran tanto en la ecuación de costo como en las restricciones multiplicándose, se puede concluir que es un problema de optimización no lineal con restricciones no lineales. Además el tipo de variable es entera, es decir, no se puede tener entre 1 y 2 vehículos, lo mismo pasa con la variable frecuencia. Pero, debido a la complejidad del sistema, no se han utilizado técnicas de programación entera. Simplemente se puede obtener una solución fraccionaria y luego redondear y verificar que se cumplan las restricciones.

La solución debía satisfacer una demanda de pasajero determinada, pero debía minimizar el consumo de combustible total producido por el sistema de transporte público, con las restricciones de cantidad y tipo de vehículo disponible según el recorrido. Una vez calculado el combustible total, se calcularon las emisiones de contaminantes producido por el sistema, adicionalmente se analizaron diversas estrategias de reducción de los contaminantes aplicando diversos filtros de postprocesamiento.

Cuando se compara la mejor tecnología disponible para diésel y el GNC, los autobuses diésel nuevos con postratamiento también pueden obtener emisiones muy bajas que cumplan con las normas Euro V y Euro VI. El gran desafío es que se requiere un combustible de muy bajo contenido de azufre (< a 15 ppm) para que estos filtros funcionen bien. Por ello la tecnología GNC (con postratamientos) puede ser una alternativa aceptable si no se cuenta con este tipo de combustible de bajísimo azufre.

Entre las recomendaciones en cuanto a medidas para mejorar la calidad del aire en la ciudad y

bajar los niveles de emisiones producidos por las unidades, lo ideal es tener una flota eléctrica en todo el Gran Mendoza, combinando trolebuses, tranvías y autobuses eléctricos, aunque desde el punto de vista del cambio global y las emisiones de CO₂, esto no influye demasiado, ya que la electricidad en Argentina es producida en un 70% por generación térmica (solo un 30% es por la hidroeléctrica). Lo que si se eliminaría de este modo serían las emisiones y los ruidos en las calles, siendo las emisiones más fáciles de controlar en una central generadora. La ciudad de Mendoza podría incorporar tecnología híbrida y/ o eléctrica (celdas de hidrógeno), quedando a resolver ciertas cuestiones como ser los futuros sistemas de carga, la disposición de baterías en desuso, etc.

Agradecimientos

Al Dr. Ing. Fernando Gache, al Mg. Ing. Lucio Martínez Garbino, al Ing. Raúl Sack.

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional y CONICET por el soporte brindado a esta investigación.

Referencias

- ADEFA (2015). Asociación de Fábricas de Automotores de Argentina. Anuario 2014. <http://www.adefa.org.ar/> (último acceso 15/7/2016).
- ARGENTINA, (2007). Second National Report to IPCC. www.ambiente.gov.ar
- BALLS, G. (8 de Febrero de 2010). Esi Gas. Obtenido de <http://www.esigas.com.ar/es/mendoza-crea-el-primer-motor-a-gas-del-pais/>
- DIESEL, F. (s.f.). Filtros Diesel. Obtenido de www.filtrosdiesel.cl
- FOWLER, D. ET AL. (2009). Atmospheric composition change: Ecosystems-Atmosphere interactions. *Atmospheric Environment*, 43(33), pp.5193-5267.
- GANTUZ, M.; PULIAFITO, S.E. and PULIAFITO, J.L. (2009) Modeling mobile source emissions by on-board characterization of roadways, in *Urban Transport 2009*, C. Brebbia, (Ed.). Editorial WIT Press, Southampton, Boston, Computational Mechanics Publications. ISBN 978-1-84564-190-0, ISSN 1746-4498, pp 541-552. <http://www.witpress.com/transport-engineering.html>
- IPCC (2006) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories:
- MULLER, N.Z. & MENDELSON, R. (2007) Measuring the damages of air pollution in the United States. *Journal of Environmental Economics and Management*, 54(1), pp.1-14.
- NYLUND N. and K. ERKKILÄ (2005). Bus Emission Evaluation: 2002–2004 Summary Report. VTT Finland. <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/BusEmissionEvaluation.pdf>. [ultimo enlace, 14/09/2015].
- NYLUND N., ERKKILÄ K., LAPPINEN M., IKONEN M., 2004. Transit Bus Emission Study: Comparison of Emissions from Diesel and Natural Gas Buses - The Evaluation of Exhaust Emissions Performance of City Buses Using Transient Heavy-Duty Chassis Dynamometer EURO", VTT Research report, 15/10/2004. <http://www.cti2000.it/Bionett/BioG-2004-001%20Transit%20Bus%20Emission%20Study.pdf>, [ultimo enlace, 14/09/2015].

POSADAS, F. (2000). CNG Bus Emissions Roadmap: from Euro III to Euro VI, International Council on Clean Transportation (ICCT), www.theicct.org, [ultimo enlace, 14/09/2015].

PULIAFITO, C. (1998). Contaminación del aire en mendoza. Universidad de mendoza (um) Instituto para el estudio del medio ambiente (Tema): "III Simposio de Ecología y Medio Ambiente" Mendoza, 13 y 14, 15 de Octubre de 1998.

PULIAFITO, E., CASTESANA, P.: "Emisiones de carbono del sector transporte en Argentina". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 14, pp 07.01 -07.08; 2010. ISSN 0329-5184, <http://www.asades.org.ar/>

PULIAFITO, D. E. (2015). Informe breve sobre alternativas técnico-ambientales para el transporte público. Mendoza, Argentina.

PULIAFITO, S.E.; ALLENDE, D.; PINTO, S. and CASTESANA, P. (2015) High resolution inventory of GHG emissions of the road transport sector in Argentina, Atmospheric Environment 101, 303-311.

PULIAFITO, S.E.; CASTRO, F.; ALLENDE, D. and CASTESANA, P. (2014) Mitigation of road transport carbon emissions in Argentina, Int. J. Environment and Pollution, Vol. 56, Nos. 1/2/3/4, pp.129 -152.

PULIAFITO, S.E.; GANTUZ, M. and PULIAFITO J.L. (2010) Characterizing mobile emissions by on-board measurements; International Journal for Applied Environmental Studies Vol. 5, N. 2, 2010, pp. 297–316. ISSN 0973-6077. <http://www.ripublication.com/Volume/ijaesv5n2.htm>.

PTUMA (2010), Encuesta de Origen y Destino 2010, Movilidad en el Área Metropolitana de Mendoza, <http://uecmovilidad.gob.ar/category/publicaciones/encuestas/> último acceso 15/7/2016.

ANEXO A

La Tabla A1 muestra las tecnologías y combustibles utilizados en ese estudio, normalmente usados en los sistemas de transporte público internacionalmente.

Tabla A1: Tecnologías y combustibles considerados

| Tecnologías | Abrev. | Combustibles | Abrev. |
|------------------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| Oxidación catalítica | OC | Gas natural licuado | GNL |
| Catalizador de tres vías | TWC | Gas natural comprimido | GNC |
| Filtros de particulado para diesel | DPF | Diesel > 150 ppm azufre | D150 |
| Recirculación de gases de escapes | EGR | Diesel < 50 ppm azufre | D50 |
| Reducción catalítica selectiva | SCR | Diesel < 15 ppm azufre | D15 |

Filtros de partículas para diésel (DPF)

Los vehículos a diésel tienen emisiones de NOx y de material particulado más altas que los vehículos a nafta. Las normas Euro son cada vez más estrictas. A fin de que los vehículos diésel pudieran cumplir con los nuevos lineamientos, los fabricantes insertaron los filtros DPF, que funcionan gracias a una combinación de mecanismos de filtración. Las partículas capturadas se eliminan del filtro, de forma continua o periódica, a través de la regeneración térmica. Son muy eficaces en el control de las emisiones de partículas sólidas (como el hollín) y la emisión de humo negro, pero pueden ser ineficaces en el control de las fracciones líquidas de PM de emisiones. Las reducciones que pueden ser alcanzadas usando un filtro DPF son:

Tabla A2: Reducciones alcanzables usando DPF

| Contaminante | Material Particulado | CO | HC | Aldehídos | NOx |
|---------------------|-----------------------------|-----------|-----------|------------------|------------|
| Reducción | 50-60% | 80% | 60% | 60% | 0% |

Oxidación Catalítica (OC)

Su función es acelerar las reacciones químicas que transforman el monóxido de carbono y otros compuestos orgánicos en dióxido de carbono, sin participar directamente, permitiendo que las reacciones ocurran a temperaturas mucho más bajas que en otros sistemas. Además, no requieren el consumo de energía y permiten un tiempo de residencia más corto dentro del reactor. A continuación se detallan las reducciones alcanzadas usando el catalizador OC, y las diferencias entre uno nuevo y uno usado:

Tabla A3: Reducciones alcanzables usando OC

| Contaminante | Catalizador nuevo | Catalizador a 16.000 horas |
|--------------|-------------------|----------------------------|
| CO | 91% | 82% |
| NMHC | 47% | 39% |

Catalizador de tres vías (TWC)

Su función se basa en el control y la reducción de los gases nocivos expulsados por el motor de combustión interna, pudiéndose usar tanto en los motores de gasolina (nafteros) o en los motores diésel. Las reducciones alcanzadas usando TWC son:

Tabla A4: Reducciones alcanzables usando TWC

| Contaminante | NOx | CO | HC | CH2O |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| Reducción | 90-99% | 90-99% | 50-90% | 80-95% |