

DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE TRANSPORTE URBANO CONSIDERANDO ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES

Patricia N. Dominguez^b, Marta C. Vidal^{a,c}, Víctor H. Cortínez^{a,d}

^a, Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada,
Universidad Tecnológica Nacional (FRBB), 11 de abril 461 8000 Bahía Blanca
vcortine@frbb.utn.edu.ar

^b Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253 8000 Bahía Blanca, pdoming@uns.edu.ar

^c Departamento de Matemática, Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253 8000 Bahía Blanca, mcvidal@criba.edu.ar

^d CONICET

Palabras Clave: optimización de tráfico, programación bi-nivel, contaminación atmosférica, contaminación acústica.

Resumen. El crecimiento de las ciudades trae aparejados diversos inconvenientes entre los que se destacan los producidos por el aumento del tráfico vehicular, que se incrementa, tanto por el aumento de población como por las mayores distancias a recorrer debido a la expansión de las zonas urbanas. Las consecuencias inmediatas de este fenómeno son, la congestión de vehículos en determinadas arterias y horarios, con el consecuente incremento del tiempo de viaje, y la contaminación del medio ambiente. Para solucionar estos inconvenientes se suelen tomar medidas técnicas u organizativas tales como prohibición de estacionamiento en ciertas arterias para determinadas franjas horarias, ensanchamiento y/o apertura de calles y cambio de sentidos de circulación, entre otras. Sin embargo la efectividad de tales medidas depende del comportamiento de los usuarios de la red de tránsito una vez establecidas dichas modificaciones, por lo cual conocer las leyes que gobiernan la elección de rutas por parte de los mismos resulta determinante. En este trabajo, para tener en cuenta tanto el comportamiento de los usuarios como los intereses a nivel organizativo, se plantea un modelo que utiliza una programación en dos niveles. El objetivo en el nivel superior es minimizar los tiempos globales de permanencia en la red vial y la contaminación ambiental, y en el nivel inferior, optimizar los tiempos de viaje de los usuarios de dicha red. Para resolver el equilibrio de usuario del nivel inferior se utiliza el algoritmo de Frank Wolfe y en el nivel superior, para la optimización del sistema, la técnica metaheurística *simulated annealing*, todo desarrollado en ambiente Matlab.

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las ciudades modernas ha traído como un aspecto inherente la aparición o agudización de diversos inconvenientes cuya complejidad hace necesario un estudio científico a efectos de darles solución. En particular pueden citarse los siguientes problemas urbanísticos de gran importancia: la congestión del tráfico, la polución acústica y la contaminación atmosférica. Tales problemas tienen su causa principal en el transporte urbano, estando íntimamente relacionados entre sí. El primero de ellos se refiere fundamentalmente al aumento del tiempo necesario, y el consecuente costo, para que los habitantes efectúen los traslados urbanos normales. Por otra parte, la polución acústica generada por el tráfico se ha convertido en un serio problema, ya que los niveles sonoros en grandes ciudades alcanzan valores que generan molestia y en algunos casos afectan la salud. De la misma manera los vehículos emiten a través de sus escapes, diversas sustancias tóxicas, tales como monóxido de carbono. Los niveles de concentración de tales sustancias tóxicas dependen, como en el caso de polución acústica, del flujo de tráfico aunque también de las condiciones meteorológicas, especialmente del viento.

Ante tales problemas, la adecuada planificación urbana se torna un tema de vital importancia. Este tema involucra fundamentalmente a urbanistas y planificadores, sin embargo, la efectividad de las medidas que se adopten dependerá del comportamiento de los usuarios de la red de tránsito. Los objetivos de ambos suelen ser contrapuestos, mientras que en el diseño y la planificación de las redes de transporte el interés está puesto en el mejor funcionamiento de la totalidad de la misma, o en la disminución de la contaminación, los usuarios buscan su propio beneficio, fundamentalmente minimizar los costos de viaje individuales, problema conocido como equilibrio de usuario y que responde al primer principio de [Wardrop \(1952\)](#) y que se explica más adelante. Esto ha llevado a numerosos investigadores a resolver el problema con programación en dos niveles, un nivel superior que contempla el interés del administrador del sistema, esto es optimizar inversiones o minimizar accidentes y un nivel inferior que responde al interés del usuario. Este tipo de formulación ha sido utilizada en los problemas de diseño y operación de redes por [Marcotte \(1986\)](#), [Magnanti y Wong \(1986\)](#), [Yang y Bell \(1998\)](#), [Labbe et al. \(1998\)](#), [Brotcorne et al. \(2001\)](#), [Marcotte y Savard \(2002\)](#), [Marcotte et al. \(2009\)](#), [Poorzahedy y Abulghasemi \(2005\)](#) y [Poorzahedy y Rouhani \(2007\)](#). Una amplia revisión se puede consultar en [Colson et al. \(2007\)](#).

Con respecto a la predicción de condiciones de contaminación urbana acústica o atmosférica, se han realizado varios trabajos centrados en el desarrollo de formulaciones matemáticas que expresan la relación entre flujos vehiculares y el nivel de contaminación. En el caso de contaminación acústica se ha trabajado fundamentalmente en el desarrollo de métodos de predicción de los niveles sonoros continuos equivalentes en función del flujo, la composición vehicular y la morfología de las vías de circulación. Se pueden citar en este sentido los trabajos de [Gaja Díaz \(1984\)](#), [Barrigón Morillas et al. \(2002\)](#), [Sommerhoff et al. \(2004\)](#), [Cortínez et al. \(2005, 2006, 2007\)](#), [Azurro \(2003\)](#) y [González \(2000\)](#). Tales modelos predictivos se han utilizado y verificado en diversas ciudades del mundo.

De la misma manera, en el caso de polución atmosférica se han desarrollado modelos teóricos a los efectos de obtener las concentraciones de sustancias tóxicas emitidas por vehículos en función de flujos vehiculares y variables meteorológicas, viento y temperatura, muchos de los cuales han sido validados mediante mediciones de campo. Entre los muchos trabajos en tal dirección pueden mencionarse los siguientes: Venkatram et al. (1999), Venkatram y Horst (2005), Sivacoumar y Thanasekaran (1999), y especialmente para ciudades argentinas pueden citarse los trabajos de Venegas y Mazzeo (2006) y Bogo et al. (2001) para la ciudad de Buenos Aires, Nagornov et al. (2005) para la ciudad de San Nicolás y Puliafito (2004, 2005, 2007) para la ciudad de Mendoza. En cuanto a la caracterización de emisiones existe mucha investigación en este campo destacándose los trabajos de Ntziachristos y Samaras (2000a, b, 2001) autores además del programa COPERT (<http://lat.eng.auth.gr/copert/>) y Ntziachristos et al. (2002, 2004, 2007) en los que se basa la redacción de la guía EMEP/CORINAIR (2009) de la agencia europea de medioambiente de la cual se han tomado los datos para el presente trabajo.

Sin embargo, en la investigación en forma conjunta de modelos de contaminación y asignación de tráfico, existen relativamente pocos estudios, pudiéndose citar los artículos de Wendell (1973), quien desarrolló para el área de la ciudad de Chicago, un modelo combinado de transporte y de emisiones gaseosas vehiculares y el de Immers et al. (1991) quienes desarrollaron un modelo que modifica la elección de ruta de manera tal de cumplir restricciones de contaminación gaseosa y acústica. Un trabajo que combina optimización de costos de construcción, consumo de combustible y tiempos de permanencia en la red con restricciones en la contaminación es el de Guldmann y Kim (1996) desarrollado en un solo nivel y sin considerar el equilibrio de usuario y uno desarrollado en dos niveles que combina minimización de emisiones y concentraciones con equilibrio de usuario es el desarrollado por Hizir (2006) en su tesis de magister.

La utilización de un enfoque integrado es fundamental en la resolución de problemas de asignación de tráfico y esta es la idea que llevó a la realización del presente trabajo. Se pretende desarrollar una metodología que permita estudiar determinadas cuestiones de interés tales como minimizar concentración de contaminantes o niveles de ruido en ciertas zonas de la ciudad teniendo en cuenta el comportamiento de los usuarios, mediante una formulación del problema de optimización en dos niveles. La estructura matemática de tales problemas es compleja pues lleva a problemas no convexos caracterizados por la presencia de muchos mínimos locales, para los cuales los métodos clásicos resultan inaplicables, recurriéndose a diversas técnicas meta-heurísticas, tales como algoritmos genéticos, sistemas de hormigas y *simulated annealing* que es la aplicada en este trabajo.

En la siguiente sección se presenta una descripción general del problema conjuntamente a los modelos de tráfico, ruido, emisión y dispersión que se utilizan. En la sección 3 se detalla el método de resolución empleado en la solución del programa en dos niveles, en la sección 4 se presenta la aplicación del modelo a una red ficticia de transporte urbano, en la sección 5 se analizan los resultados obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones.

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

2.1 Problema general

El propósito de este trabajo es presentar una metodología para abordar el problema de rediseñar una red de tránsito existente con el fin de alcanzar determinados objetivos a partir de la modificación de una variable de diseño. En el ejemplo presentado se trata de mejorar la calidad de vida de una zona residencial disminuyendo los niveles de ruido y contaminación atmosférica, adoptándose como variable de diseño la modificación de la capacidad de las calles, dentro de ciertos límites, y fijando conjuntamente restricciones al nivel sonoro continuo equivalente y a la concentración de monóxido de carbono en dicha zona. Por los motivos ya expuestos el modelo se define como una programación en dos niveles, un nivel superior donde se busca a través de distintas funciones objetivo, minimizar el tiempo de permanencia en la red, y minimizar la contaminación tanto acústica como atmosférica, y un nivel inferior que garantiza a los conductores que circulan por el lugar minimizar sus tiempos de viaje. El modelo general comprende el acoplamiento de un modelo de tráfico, un modelo de ruido urbano y uno de contaminación atmosférica que incluye un modelo de emisiones y uno de dispersión.

2.2 Asignación de tráfico

Para resolver el problema de planificación del transporte urbano la ciudad se divide en zonas de acuerdo a características semejantes y de manera tal que se pueda asumir, con un error aceptable, que la actividad de las mismas se encuentra concentrada en un "centroide". Siguiendo un enfoque, ampliamente usado, conocido como "proceso de 4 pasos" se determina primeramente el número de viajes que se generan y terminan en cada zona, se realiza luego la distribución de dichos viajes a las otras zonas, y se efectúa la selección del modo de viajar, ya sea utilizando transporte público o privado con lo que se obtiene una matriz de viajes entre zonas denominada matriz Origen-Destino. El último paso consiste en la asignación de los viajes a la red de transporte, es decir la determinación de las rutas reales que se usarán y el número de vehículos que se espera en cada tramo de la red. En este momento entra en juego la relación oferta-demanda con una red física compuesta por calles e intersecciones y sus posibilidades de modificación por un lado y el número de viajes que se espera entre puntos de la red por otro. Las soluciones de este problema están basadas en los principios de [Wardrop \(1952\)](#). El primer principio dice que "para cada par origen-destino, el tiempo de viaje es igual sobre todos los caminos usados y también menor que o igual al tiempo de viaje que experimentaría un vehículo aislado por un camino no utilizado", es decir que todos los conductores elegirán las rutas de mínimo tiempo de recorrido y ninguno podrá experimentar un tiempo menor utilizando otra ruta. El segundo principio dice que "bajo condiciones de equilibrio social, en redes congestionadas se debe arreglar el tráfico de manera tal que minimice el costo medio (o total) de viajar en toda la red". El primer principio sustenta la solución conocida como "equilibrio de usuario" y la segunda lleva al estado "óptimo del sistema". Las soluciones obtenidas en la resolución del problema siguiendo estos principios no lleva a patrones de flujo iguales por los dos caminos cuando las redes están congestionadas. En este punto es fundamental tener en cuenta que los usuarios se comportan de manera egoísta, buscando siempre su propio beneficio (menor tiempo de viaje), por lo cual la solución del equilibrio de usuario es más estable que la basada en el segundo principio. Por esta razón el "óptimo de sistema" sólo se utiliza en la etapa de diseño de la red por los planificadores, como un indicador del funcionamiento general de la red, o en sistemas centralizados de tránsito donde las decisiones sobre la elección de rutas no dependen del conductor.

2.2.1 Equilibrio de usuario

El equilibrio de usuario asume una serie de presunciones, como por ejemplo, que los conductores tienen completa información, deciden correctamente y se comportan todos de igual manera. Esto implica un enfoque determinista, existiendo otro enfoque estocástico, que no se analiza en el presente trabajo. Asimismo se asume que el flujo, si bien varía según los momentos del día de acuerdo a la demanda, permanece estable en el período de tiempo considerado en el estudio, que en general es la hora pico, lo que lo convierte en un problema estacionario. La red se representa como un grafo dirigido $N(V,A)$ de nodos V y arcos A , R es el conjunto de nodos origen de viajes y S el conjunto de nodos destino. El problema de asignación es encontrar los flujos \mathbf{x} en los arcos, que satisfacen el criterio de equilibrio de usuario, cuando todos los viajes entre origen y destino de la matriz \mathbf{q} (ver expresiones 1) han sido apropiadamente asignados a la red.

Para resolver el problema de equilibrio de usuario se utiliza la transformación de Beckmann (1956) que involucra la formulación de un programa matemático de minimización equivalente, sin significado físico, cuya solución es el patrón de flujos \mathbf{x} en los arcos de la red. La equivalencia entre este programa y el primer principio de Wardrop puede verse en Sheffi (1984). En este contexto, la formulación del problema es la siguiente:

$$\min z(\mathbf{x}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (1a)$$

s.a.

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad (1b)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (1c)$$

donde

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \in A \quad (1d)$$

q_{rs} viajes entre el origen r y el destino s ; $(\mathbf{q})_{rs} = q_{rs}$

x_a flujo en el enlace a ; $\mathbf{x} = (\dots, x_a, \dots)$

t_a tiempo de viaje en el arco a ; $\mathbf{t} = (\dots, t_a, \dots)$

f_k^{rs} flujo en la ruta k entre el origen r y el destino s ; $\mathbf{f}^{rs} = (\dots, f_k^{rs}, \dots)$

$\delta_{a,k}^{rs}$ Indicador que relaciona arcos y rutas.

$$\delta_{a,k}^{rs} = \begin{cases} 1 & \text{Si } a \text{ pertenece a la ruta } k \text{ entre } r \text{ y } s \\ 0 & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

La restricción (1b) expresa el principio de conservación de flujo, según el cual la suma de todos los flujos sobre las rutas que unen origen y destino debe ser igual a la cantidad de viajes entre esos puntos dados por la matriz \mathbf{q} . La restricción (1c) sólo indica que el flujo en cada ruta entre r y s no puede ser negativo.

La función $z(\mathbf{x})$ está definida en los enlaces, mientras que la restricción de conservación de flujo está formulada sobre el conjunto de arcos consecutivos que forman las rutas entre origen y destino. Ambas se relacionan a través de (1d). Esta relación de incidencia expresa el flujo en el enlace en términos del flujo en la ruta y esto

significa además que las derivadas parciales del flujo en el arco pueden ser definidas con respecto al flujo en una ruta particular, es decir:

$$\frac{\partial x_a(f)}{\partial f_l^{mn}} = \frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} = \delta_{a,l}^{mn} \quad (2)$$

ya que $\frac{\partial f_k^{rs}}{\partial f_l^{mn}} = 0$ si $r - s \neq m - n$ o $k \neq l$.

Es importante destacar que esta formulación asume que el tiempo de viaje en un enlace depende sólo del flujo en el enlace y no del flujo en otros enlaces. En cuanto a la función t_a que representa el tiempo de viaje en el arco, puede asumir distintas formas aunque debe cumplir ciertos requisitos identificados por Spiess (1990). Algunas de las más usadas son la propuesta por el mismo Spiess, la de Overgaard (1967) y la ampliamente conocida y utilizada función BPR (3) propuesta por la U.S. Bureau of Public Roads (1964) que es la adoptada en este trabajo. Básicamente el tiempo requerido para atravesar el arco es:

$$t_a = t_{0a} \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

donde t_{0a} es el tiempo a flujo libre, C_a es la capacidad del arco y x_a el flujo en el mismo. α y β son coeficientes empíricos que dependen de las características de las vías tales como el tipo de calle, la ubicación de la misma (rural o urbana) y la cantidad de carriles.

2.2.2 Estado óptimo del sistema

El problema de optimización del sistema consiste en la resolución de un programa que minimiza el tiempo total gastado en la red. Este programa se puede expresar de la siguiente forma:

$$\min \tilde{z}(x) = \sum_a x_a t_a(x_a) \quad (4a)$$

s.a.

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad (4b)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (4c)$$

Al igual que el problema de equilibrio de usuario, este problema está formulado sobre los arcos con restricciones en las rutas, estando la relación entre rutas y arcos definida por la expresión (1d). El patrón de flujos obtenido por resolución del programa (4), generalmente no representa una situación de equilibrio, debido a que el usuario prioriza su beneficio personal sobre el de todos y si tiene libertad elige la ruta de acuerdo a su menor costo.

2.3 Contaminación acústica

El parámetro utilizado para determinar la contaminación acústica en las ciudades es el nivel sonoro continuo equivalente, de tal manera que un modelo de ruido urbano que sirva para tal fin debe correlacionar este valor con las características de las calles y la cantidad y tipos de vehículos que transitan. En su forma más sencilla esta relación

puede expresarse como:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{d\pi}{v} + 10 \log \sum_{i=1}^M a_i x_i + correcciones \quad (5)$$

$$a_i = 10^{\frac{L_{pmáx_i}}{10}} \quad (6)$$

donde M es la cantidad de categorías de vehículos consideradas, autos, motos, camiones, etc.; d es la distancia desde el receptor al centro de la calle, v es la velocidad de circulación, x_i es el flujo vehicular de cada categoría, $L_{pmáx_i}$ es el nivel sonoro máximo característico de cada tipo de vehículo y las *correcciones* son términos adicionales que tienen en cuenta efectos particulares debidos a la rugosidad del pavimento, la pendiente del terreno y la influencia de la velocidad entre otros.

La expresión (5) se obtiene a partir de la formulación teórica que corresponde al ruido emitido por un vehículo en movimiento considerándolo como una fuente puntual (Figura 1) y teniendo en cuenta luego el conjunto de vehículos que circulan en un intervalo de tiempo dado y la composición vehicular.

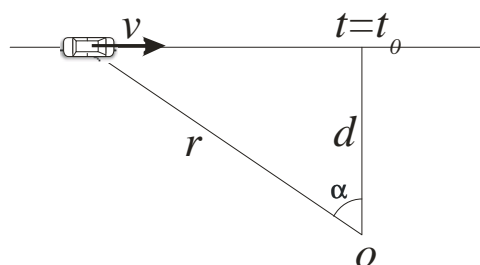


Figura 1: esquema de un vehículo pasando frente a un receptor

Con esta expresión y un conjunto de datos obtenidos por medición de L_{eq} es posible obtener, utilizando métodos de regresión, una fórmula de predicción de nivel sonoro equivalente en función del flujo vehicular. En este trabajo se adopta, a manera de ejemplo, la expresión (7) obtenida por [Gonzales \(2000\)](#) para la ciudad de Montevideo.

$$L_{eq} = 49,4 + 10 \log(A + 2,33 \cdot M + 9,01 \cdot B + 6,84 \cdot C) + 23,266 \cdot x^{-0,3811} - 10 \log d \quad (7)$$

donde A , M , B y C son respectivamente la cantidad de automóviles livianos, motos, ómnibus y camiones que circulan por hora y x es el flujo total. Si la velocidad supera los 60 km/h se le agrega un término de corrección por velocidad $\Delta v = 0,15 \cdot v - 8,67$.

Vale aclarar que en la elaboración de esta fórmula se tuvo en cuenta la influencia de ruidos “anómalos” tales como los producidos por bocinas, ladridos y escapes, entre otros, muy comunes en ciudades latinoamericanas lo que la acerca más a nuestra idiosincrasia que las fórmulas europeas o norteamericanas. La fórmula fue obtenida para calles semiabiertas, flujos entre 200 y 4000 veh/h y distancias entre fuente y observador de 3 a 15 metros.

2.4 Contaminación atmosférica

El tráfico urbano es el principal responsable de la contaminación atmosférica de las ciudades. Los vehículos emiten diversos contaminantes primarios (NO_x , SO_2 , COV, CO) directamente desde los escapes que además originan otros tipos de contaminantes secundarios al mezclarse con el aire. Estas emisiones se dispersan en la atmósfera disminuyendo su concentración pero sumándose al resto de las emisiones de la ciudad.

2.4.1 Emisiones gaseosas

La estimación de las emisiones de tráfico es compleja ya que en la misma intervienen una serie de características propias de los vehículos tales como peso, diseño, antigüedad, estado y tipo de combustible, entre otros y características de los conductores, de las calles y del flujo vehicular. Siguiendo el enfoque “bottom-up”, la emisión de un determinado tipo de contaminante E por unidad de longitud y de tiempo se puede calcular de la siguiente manera:

$$E = \sum_{i=1}^M FE_i \cdot x \cdot pm \quad (8)$$

donde i corresponde a las distintas categorías vehiculares siendo M la cantidad de las mismas, FE_i es el factor de emisión de un vehículo de determinado tipo o categoría para un contaminante específico, x es la cantidad de vehículos que transitan en la unidad de tiempo y pm es el porcentaje de vehículos de la categoría i en el flujo total. En la guía [EMEP/CORINAIR \(2009\)](#) se publican funciones que permiten obtener el factor de emisión de fuentes móviles en función de tipo y modelo de vehículo, el tipo de combustible y la velocidad de circulación. Asimismo existen varios programas de aplicación para calcular emisiones, entre ellos MOBILE 6 de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en Estados Unidos, el ya mencionado COPERT 4 europeo y MODEM en Chile.

2.4.2 Dispersión atmosférica

Obtenidos los valores de emisión en los arcos, que se consideran constantes en el período estudiado, es posible estimar la concentración del contaminante en cuestión en puntos receptores aplicando un modelo de dispersión. Uno de los más simples y usados es el modelo de dispersión gaussiana aplicado a fuentes de línea por [Guldman \(1996\)](#), [Venkatram y Horst \(2005\)](#), [Sivacoumar y Thanasekaran \(1999\)](#), entre otros. En el modelo gaussiano de fuente de línea la concentración en un receptor se calcula como la suma de las contribuciones de la serie de fuentes puntuales que representan la calle, considerando cada una de estas fuentes puntuales independientes una de otra. Para tener en cuenta la turbulencia generada cuando el tráfico es intenso, pueden usarse las funciones propuestas por [Chock \(1978\)](#). Asimismo no se considera en el modelo adoptado el “efecto cañón” que puede producirse en calles angostas con edificios altos, típicas de grandes ciudades. Una revisión de este tema puede verse en [Vardoulakis et al. \(2003\)](#).

Adoptando un sistema de ejes cartesianos x, y, z , con el eje z en la dirección vertical, el eje x en la dirección del viento, y el eje y transversal al mismo, la expresión general de la concentración en un punto ubicado a una distancia x viento abajo de una fuente puntual está dada por:

$$C(x, y, z) = \frac{E}{u} \cdot \frac{f}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{g}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \quad (9)$$

$$g = e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (10)$$

$$f = \int_{-L/2}^{L/2} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} dy \quad (11)$$

donde E es la tasa de emisión [g/m/s], g es la dispersión vertical considerando

reflexión en el suelo y sin considerar la dispersión debida a la capa de inversión elevada, f es la dispersión transversal, u [m/s] es la velocidad del viento y σ_y y σ_z [m] son los coeficientes de dispersión en las direcciones lateral y vertical respectivamente. Si tanto la fuente como el receptor se encuentran a nivel del piso, entonces $H = 0$ y $z = 0$.

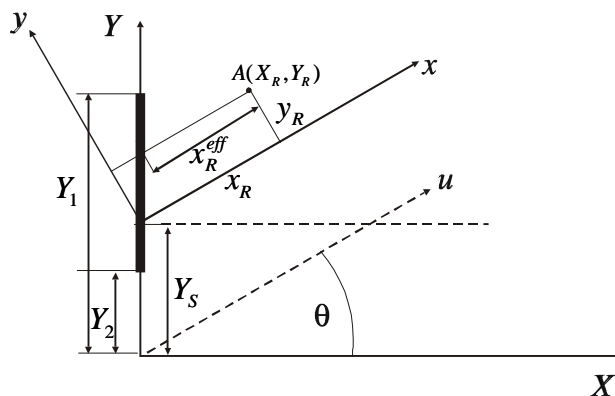


Figura 2: sistemas de coordenadas. Fuente de línea

Para una fuente de línea cuya normal forma un ángulo θ con respecto a la dirección del viento, y de acuerdo a los sistemas de ejes mostrados en la Figura 2, siguiendo el desarrollo de Venkatram y Horst (2005), la concentración en un receptor de coordenadas (X_R, Y_R) se puede calcular con la expresión (12).

$$C(X_R, Y_R) = \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{E}{\pi u \sigma_y(x_R) \sigma_z(x_R)} e^{\left(-\frac{y_R^2}{2\sigma_y^2(x_R)} \right)} dY_s \quad (12)$$

Como la mayor contribución en la integral corresponde a la zona donde $y_R = 0$, aceptando esta simplificación:

$$C(X_R, Y_R) = \frac{E}{\sqrt{2\pi} u \cos \theta \sigma_z^{ef}} [erf(u_1) - erf(u_2)] \quad (13)$$

donde

$$u_i = \frac{(Y_R - Y_i) \cos \theta - X_R \sin \theta}{\sqrt{2} \sigma_y^{ef}} \quad (14)$$

con $i = 1, 2$. El superíndice “*ef*” significa que los coeficientes de dispersión se evalúan a una distancia efectiva $x_R^{ef} = \frac{X_R}{\cos \theta}$. Cabe aclarar que esta expresión coincide para $Y_1 = -\infty$ e $Y_2 = \infty$ con la obtenida por Calder (1973) y usada como simplificación en varias publicaciones, Guldmann (1996), entre otras.

2.5 Modelo general

El modelo general se define como un programa bi-nivel. En el nivel superior se plantea la minimización, en una zona, o en toda la red, según el objetivo buscado, de una función que describe la contaminación ya sea sonora o atmosférica o la optimización del sistema, de acuerdo a los modelos descritos en los puntos anteriores y que se detallará oportunamente. Esta función depende del patrón de flujos y velocidades, solución del nivel inferior, donde se resuelve el equilibrio de usuario. La variable Z en el nivel superior representa la capacidad de expansión de las arterias y \bar{A}

es el conjunto de arcos de la zona a la que se aplica la función objetivo.

$$\min f(Z) = \sum_{a \in \bar{A}} F_a(x_a^*, Z) \tag{15a}$$

s.a.

$$Z_a^{\min} \leq Z_a \leq Z_a^{\max} \quad \forall a \in A \tag{15b}$$

$$L_{eqa}(x^*, Z) < L_{eqa}^{\max} \quad \forall a \in \bar{A} \tag{15c}$$

$$C_{Re}(x^*, v^*, Z) < C_{Re}^{\max} \quad \forall Re \in \bar{R} \tag{15d}$$

donde x_a^* es la solución del programa de equilibrio de usuario (1), la restricción (15b) corresponde a los límites inferior y superior de la capacidad de expansión en cada arco de la red, la expresión (15c) es la restricción sobre el nivel sonoro equivalente en los enlaces de la zona estudiada y la expresión (15d) establece la restricción sobre el nivel de concentración de CO en los receptores de la mencionada zona.

3 METODO DE RESOLUCIÓN

3.1 Programación en dos niveles

En la Figura 3 se puede ver el esquema de resolución del problema en un diagrama de flujo. Dicho esquema se basa en el método de SA para resolver el problema del nivel superior y la técnica de Frank Wolfe para el nivel inferior.

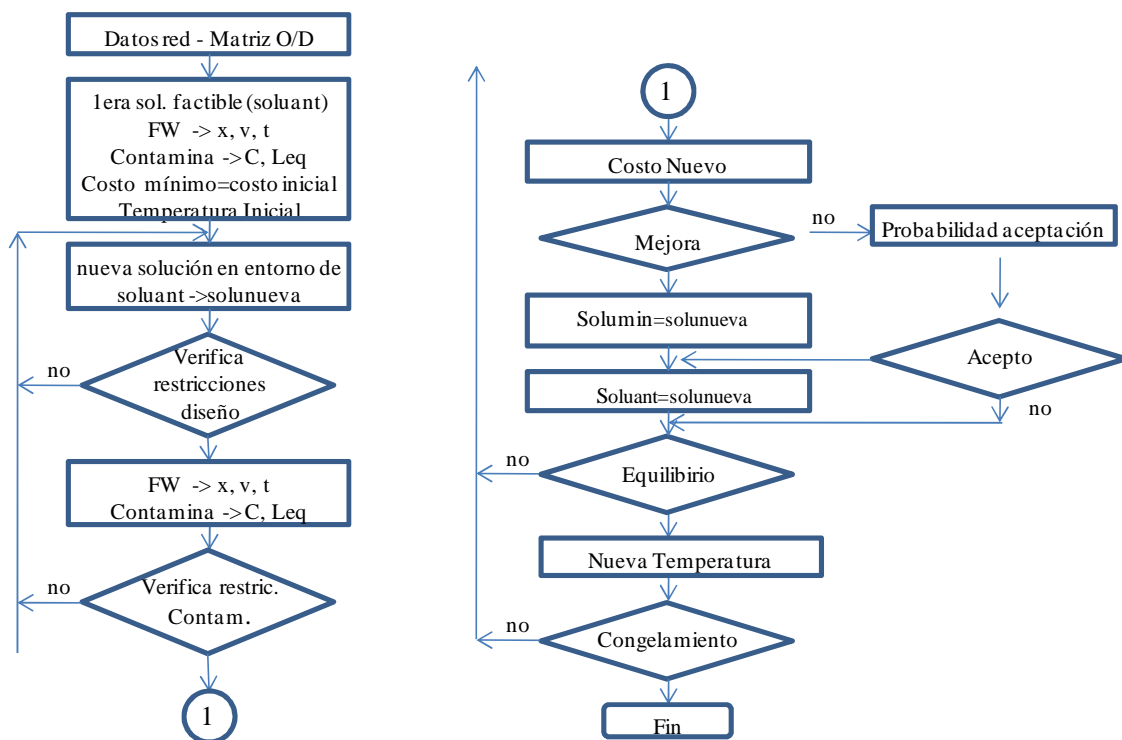


Figura 3: Diagrama de flujo del programa bi-nivel

3.2 Nivel Inferior

Para la resolución del problema (1) se utiliza un método de dirección factible conocido como método de Frank-Wolfe ya que fueron Frank y Wolfe (1956), quienes lo sugirieron por primera vez para resolver problemas de programación cuadrática con restricciones lineales. En los métodos de dirección factible básicamente se elige un punto inicial que satisface las restricciones impuestas y de allí se busca un punto mejor de acuerdo a un esquema iterativo. El procedimiento consta de dos pasos: 1) determinar la dirección de descenso y 2) determinar el tamaño del paso en dicha dirección. En el método de Frank-Wolfe el criterio de elección de la dirección de movimiento está basada en la maximización del producto de la tasa de descenso en la vecindad de x^n en la iteración n , en una dirección dada y la longitud de la región factible en esa dirección. Para encontrar la dirección de descenso el algoritmo busca en la totalidad de la región factible una solución auxiliar factible $y^n = (y_1^n, \dots, y_m^n)$ que maximice este producto o minimice el mismo cambiado de signo. Esta solución es la misma que la correspondiente a la de una aproximación lineal de la función objetivo en el punto actual de solución, esto es:

$$\min z^n(y) = \nabla z(x^n) \cdot (y)^T = \sum_i \frac{\partial z(x^n)}{\partial x_i} y_i \quad (16a)$$

s.a.

$$\sum_i h_{ij} y_i \geq b_j \quad \forall j \in J \quad (16b)$$

El tamaño del paso o del movimiento en la dirección $d^n = y^n - x^n$ desde el punto actual es aquel que minimiza la función $z(x)$ en esa dirección.

$$\min z[x^n + \alpha(y^n - x^n)] \quad (17a)$$

s.a.

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (17b)$$

Aplicada la ecuación (16a) a nuestro problema (1), y teniendo en cuenta que $\frac{\partial z(x)}{\partial x_b} = \frac{\partial}{\partial x_b} \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega = t_b$, la función objetivo del programa lineal puede escribirse:

$$\min z^n(y) = \sum_a t_a^n y_a \quad (18a)$$

s.a.

$$\sum_k g_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad (18b)$$

$$g_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (18c)$$

donde $y_a = \sum_r \sum_s \sum_k g_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}$ es la variable auxiliar que representa el flujo en el arco a y

g_k^{rs} es la variable auxiliar que representa el flujo en la ruta k que conecta el par origen-destino r - s . El tiempo de viaje en el arco es constante y en consecuencia la

minimización (18a) se logra asignando la totalidad del flujo entre r y s a la ruta mínima entre estos puntos, por eso el programa (18) se conoce como “**asignación todo o nada**” y está basada en la determinación de rutas mínimas que se detalla más adelante. Una vez obtenido el flujo en la ruta, el flujo en los enlaces se obtiene mediante la relación de incidencia (1d). El criterio de finalización del proceso iterativo puede establecerse por comparación directa de los valores en dos iteraciones sucesivas de la función objetivo, de los flujos en los arcos o de los tiempos de viajes en las rutas. Como en este caso, la función objetivo no tiene un significado concreto, conviene usar alguno de los otros criterios (Sheffi, 1984). En este trabajo se usó:

$$\frac{\sqrt{\sum_a (x_a^{n+1} - x_a^n)^2}}{\sum_a x_a^n} \leq \kappa' \quad (20)$$

En cuanto a la determinación de los caminos mínimos en una red existen distintos algoritmos que involucran conceptos de la teoría de grafos tanto para su representación como para su recorrido que pueden verse en Cormen et al. (1999). En este trabajo se adoptó un algoritmo cíclico conocido como “*método de corrección de etiqueta*” propuesto por Moore (1957) y modificado posteriormente por Pape (1974). Es importante destacar que este algoritmo de rutas mínimas se suele correr cientos de veces hasta lograr el equilibrio de usuario y por lo tanto, cuanto más rápido y eficiente sea, mejor. Sobre modificaciones al algoritmo original pueden verse los trabajos de Zhan y Noon (1998 y 2000).

3.3 Nivel Superior

Para la resolución del nivel superior se utilizó la meta-heurística *simulated annealing* (SA) o recocido simulado. Esta técnica está basada en una generación al random de soluciones factibles cuya principal característica es evitar la convergencia local en problemas de gran escala. El nombre de este método deriva de un proceso termodinámico de *annealing* o recocido, en el cual se somete un metal a una máxima temperatura de forma tal que se funda, luego se va disminuyendo la temperatura lentamente de manera que el metal fundido tienda a solidificarse hasta alcanzar un equilibrio térmico caracterizado por una energía mínima. Un esquema controlado de disminución de la temperatura evita defectos en el metal. En el problema de optimización el algoritmo comienza con una solución factible inicial y genera sucesivamente a partir de ella nuevas soluciones que son aceptadas como soluciones actuales de acuerdo a un cierto criterio probabilístico. La ecuación de distribución de probabilidades de Boltzmann junto con el criterio de Metropolis son las reglas que rigen la aceptación o no de una posible solución, es decir, si la nueva configuración disminuye el valor de la función objetivo se acepta y se adopta como nueva solución, sino se acepta con una probabilidad $e^{-\frac{\Delta f}{kT}}$, donde k es un factor de escalamiento conocido como constante de Boltzmann, f es la función objetivo o función costo, $\Delta f = f(x_{i+1}) - f(x_i)$ y T es el parámetro conocido como temperatura. A medida que

el algoritmo avanza se va disminuyendo T de manera tal de disminuir la probabilidad de aceptar soluciones factibles que no produzcan una mejora en la función objetivo.

4 APLICACIÓN DEL MODELO

4.1 Descripción de la red

Para ejemplificar la metodología descrita, el modelo se aplica a una red de 63 nodos y 220 enlaces como la mostrada en la Figura 4 que representa las principales vías de circulación de una ciudad hipotética. Cada enlace tiene una longitud de 1000 m entre intersecciones y la circulación es en ambos sentidos sin influencia mutua. Existen inicialmente 3 tipos de arterias, las correspondientes al anillo exterior de la ciudad, entre los nodos 1-9-63-55-1 con una capacidad de 2000 veh/h y velocidad máxima permitida de 90 km/h, las correspondientes a las avenidas principales que cruzan la ciudad en direcciones E-O y N-S en ambos sentidos entre nodos 28-36 y 5-59, con capacidad de 1800 v/h y velocidad máxima de 60 km/h y las que comprenden el resto de las calles con capacidad de 1200 v/h y velocidad máxima de 40 km/h.

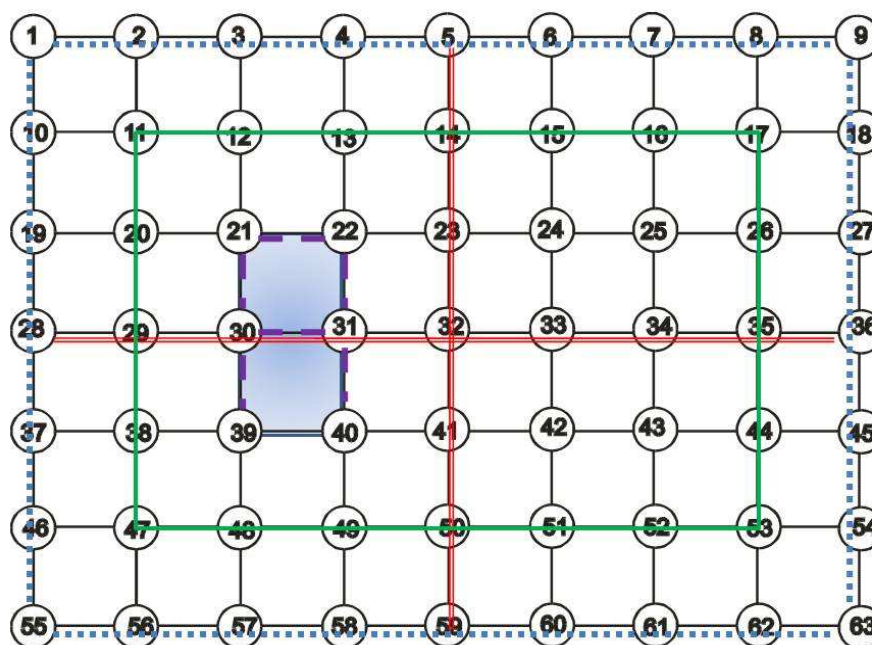


Figura 4: red de tránsito

El objetivo es tratar de crear una zona protegida, que puede corresponder a una zona residencial, disminuyendo los niveles de contaminación acústica y atmosférica. Esta zona está delimitada por los nodos 21, 22, 30, 31, 39 y 40. Los nodos 5, 11, 15, 17, 22, 32, 35, 39, 46, 59 y 62 corresponden a los centroides de zonas y son los generadores y atractores de viajes según el esquema de la Tabla 1. Se considera que los viajes particulares corresponden a la hora pico de la mañana fundamentalmente ingresando al centro de la ciudad, de los cuales el 10% se realizan en motos y ciclomotores y el 90% restante en automóviles. Del total de autos particulares, el 80% es naftero y el 20% consume gasoil. Se considera además una carga fija de 400 vehículos pesados por hora en el anillo externo, 160 colectivos en las avenidas principales y 80 en el resto de las arterias. Los vehículos pesados y colectivos se toman, para obtener el equilibrio de

usuario, equivalentes a 2 automóviles cada uno y las motos a medio automóvil según lo recomendado por el Manual de Capacidad de Carreteras HCM (2000).

Nodo	5	11	15	17	22	32	35	39	46	59	62
Genera	4968	5298	5394	5022	4914	3762	5202	4926	5202	5202	5010
Atrae	5220	1920	960	4680	5760	17280	2880	5640	2880	2880	4800

Tabla 1: cantidad de viajes generados y atraídos por los centroides

Los coeficientes adoptados para la función BPR (3) son los usualmente utilizados en la literatura: $\alpha = 0,15$ y $\beta = 4$. La distancia d utilizada en el cálculo de nivel sonoro equivalente se fija en 5 metros. Se analiza en este trabajo un solo tipo de contaminante, el monóxido de Carbono CO, pudiéndose aplicar la misma metodología para cualquier otro contaminante no reactivo. En cuanto a los factores de emisión de los vehículos se utilizan las fórmulas recomendadas por la guía EMEP/CORINAIR (2009) ya mencionada. Para un cálculo confiable de las emisiones es necesario disponer de datos que incluyen tipo, características y modelo de los vehículos y combustible que utilizan, ya que la emisión de CO es más baja a medida que los modelos son más nuevos como puede verse en las curvas de la Figura 5. En el ejemplo numérico para los vehículos nafteros se toma a modo de promedio la curva correspondiente a los modelos 78-80. Las expresiones usadas para cada categoría vehicular son las que se muestran en la Tabla 2.

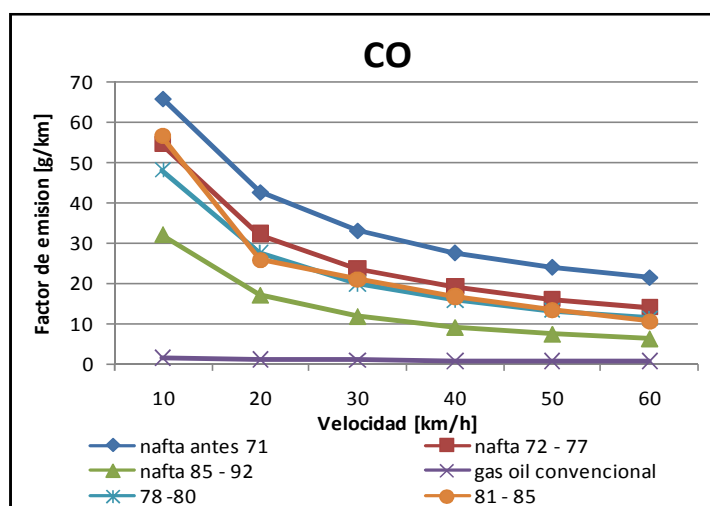


Figura 5: factores de emisión vehículos livianos

Tipo de vehículo	Factor de emisión [g/km]	Fuente	Observaciones
Autos nafteros	$300 * V^{-0.797}$	EMEP-CORINAIR	10-60 km/h
Autos gasoleros	$5.41301 * V^{-0.574}$	EMEP-CORINAIR	10-130 km/h
Motos 4 tiempos > 50 cm ³	20	EEA (1996)	s/modo conducir. Urbano
Colectivos	17	EEA (1996)	s/modo conducir. Urbano

Tabla 2: Factores de emisión

En la aplicación del modelo de dispersión se consideró una situación medianamente desfavorable con velocidad de viento de 2 m/s formando un ángulo de 30° con la dirección O-E. Los coeficientes de dispersión vertical (21a) y transversal (21b) que se adoptaron son los propuestos por Pasquill y Smith (1983) para terreno urbano y estabilidad atmosférica clase C:

$$\sigma_z = 0,2x \quad (21a)$$

$$\sigma_y = 0.22x(1+0.0004x)^{-\frac{1}{2}} \quad (21b)$$

Los receptores de monóxido de carbono se suponen colocados en las intersecciones a 10 m del centro de la calle. La expresión (3) para el cálculo del tiempo en el arco toma ahora la forma (22) para tener en cuenta los colectivos B y la capacidad de expansión Z .

$$t_a = t_{0a} \left[1 + 0,15 \left(\frac{x_a + B_a}{C_a + Z_a} \right)^4 \right] \quad (22)$$

4.2 Análisis de la situación original y modificaciones intuitivas

Del equilibrio de usuario (1) la situación original de la red en la zona que se estudia presenta las siguientes características: congestión en el enlace entre los nodos 30-31 de la avenida principal con relación x/C de 1,8, flujo mayor a 3000 veh/h, nivel sonoro equivalente muy alto con un máximo de 81.7 dBA en las calles principales y 80.4 dBA en promedio, alta concentración de CO, 9,2 mg/m³ en el receptor 31. Otros valores interesantes pueden verse en la [Tabla 4](#).

Debido a que la concentración de CO depende de las emisiones que a su vez son función inversa de la velocidad, una solución intuitiva es ampliar la capacidad de las calles de la zona para aliviar la congestión y de esta manera recuperar velocidad. Por otro lado, el ruido es función del flujo y sólo disminuye con la disminución del mismo, por lo tanto otra solución podría ser disminuir la capacidad de las calles y bajar la velocidad máxima para desalentar el tránsito en las mismas y una tercera opción es eliminar los colectivos de las calles en cuestión. Los resultados obtenidos para estas configuraciones intuitivas se pueden ver en las [Figuras 6 a 10](#).

Como se puede apreciar, aumentar la capacidad de las calles hace que el tiempo de recorrido baje y en consecuencia esos arcos se vuelvan más atractivos para los usuarios y aumente el flujo y el nivel sonoro en ellos. Las emisiones y las concentraciones en los receptores no varían demasiado, pero en el receptor 31 se supera el valor admisible. Es decir la solución no es efectiva para bajar los niveles de contaminación. Si por el contrario se disminuye la capacidad en 1 carril, es decir se asume $Z=-600$ veh/h, el flujo disminuye y se baja levemente el nivel de ruido, aunque no en los arcos más congestionados, pero se aumenta mucho el tiempo de permanencia en la red y la disminución de velocidad hace que aumenten las emisiones y la concentración de CO. En cuanto a la influencia de los colectivos, se puede apreciar que la eliminación de los mismos da lugar a otros vehículos. Por otro lado, como se puede ver en la [Tabla 4](#) la reducción de capacidad produce un aumento en el tiempo total de permanencia en la red del 10% aproximadamente.

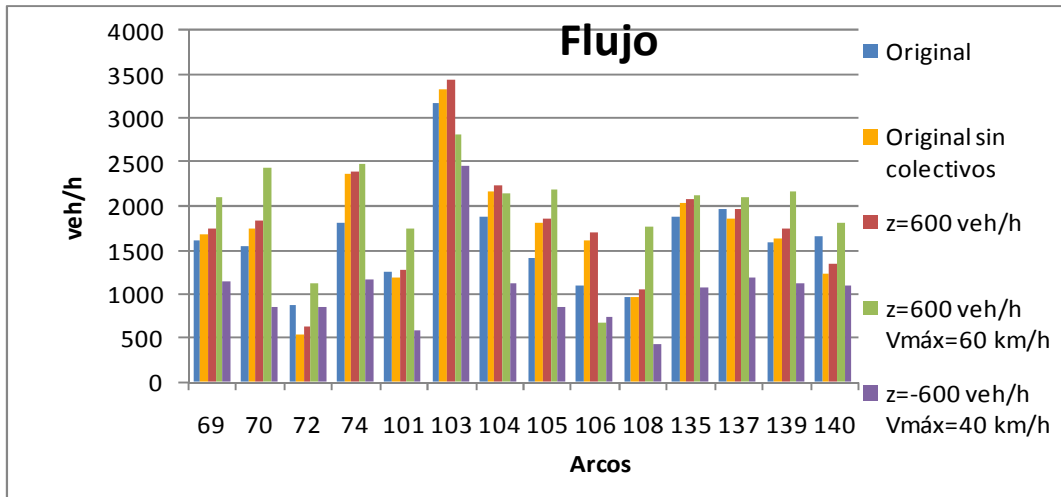


Figura 6: Flujo vehicular en los arcos de la zona estudiada

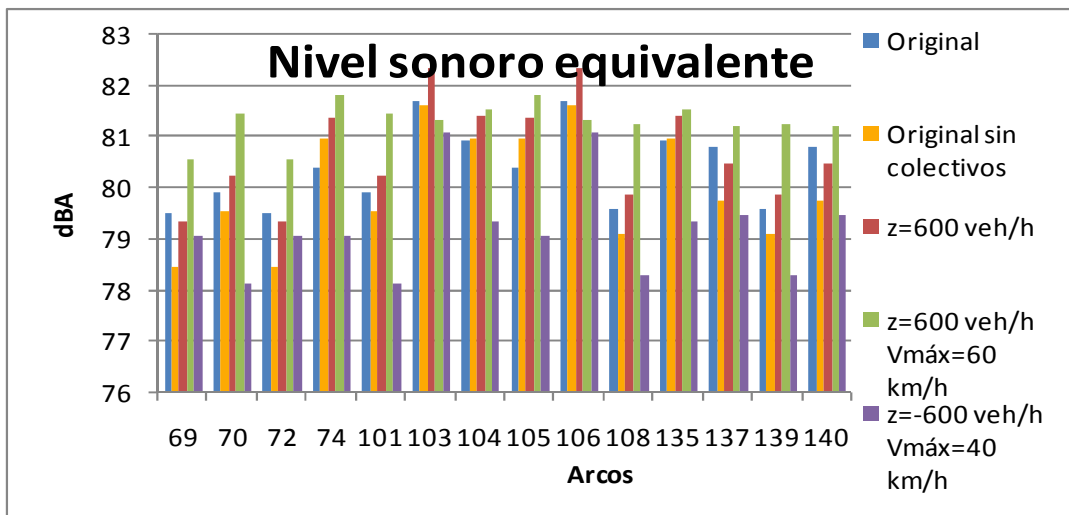


Figura 7: Nivel sonoro equivalente en los arcos de la zona estudiada

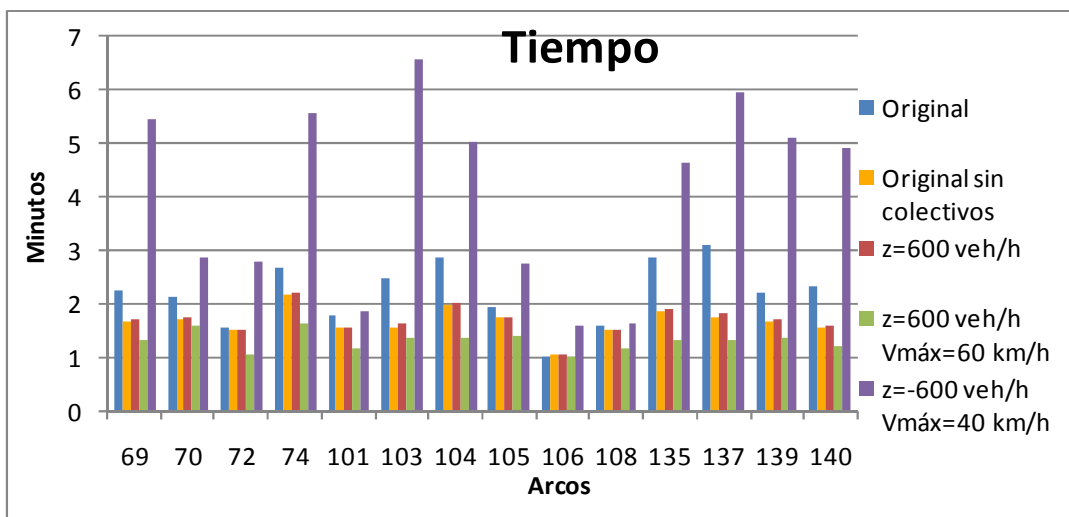


Figura 8: Tiempo de viaje en los arcos de la zona estudiada

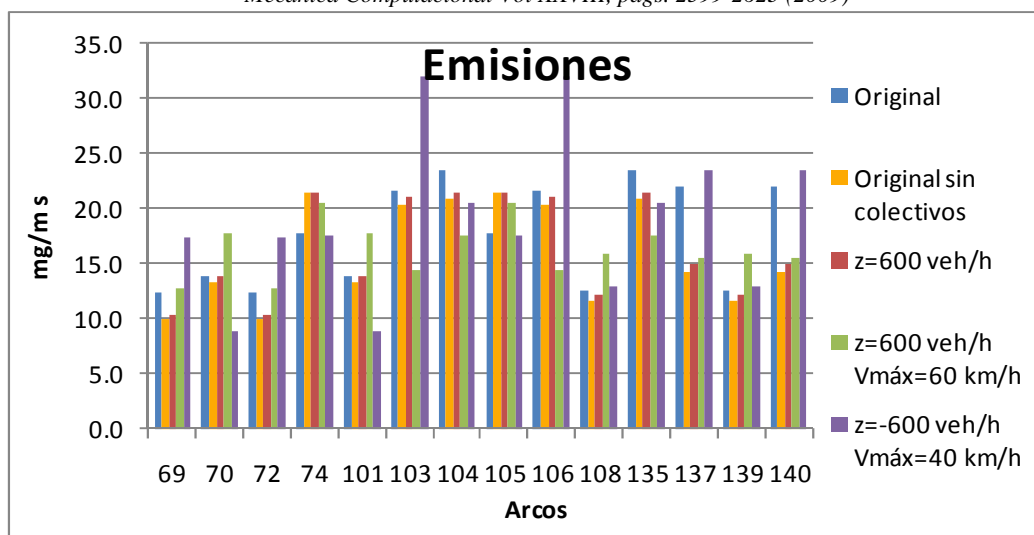


Figura 9: Emisiones de CO en los arcos de la zona estudiada

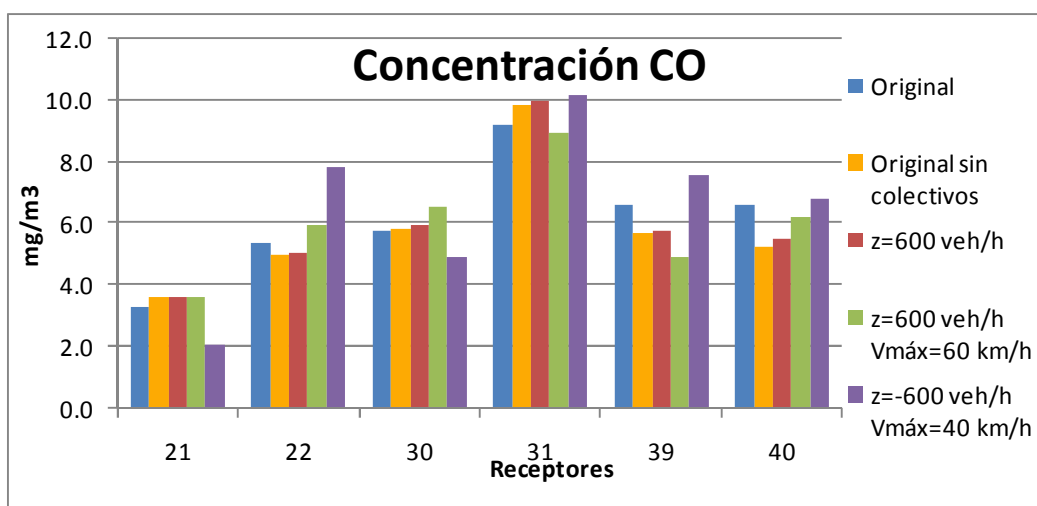


Figura 10: Concentración de CO en los receptores de la zona estudiada

Lo que se pone de manifiesto en las pruebas anteriores es que la modificación de la capacidad de las calles de la zona que se estudia no basta para producir cambios, ya que la red de transporte tiene un comportamiento sistémico y en consecuencia es necesario trabajar sobre la totalidad de la misma, o en su defecto una zona más amplia, para permitir que el tráfico se equilibre de una manera más beneficiosa. Modificar intuitivamente el resto de las calles es una tarea sumamente compleja, de manera que la mejor solución es plantearlo a través de un problema de optimización en la zona involucrando la totalidad de la red. Para ello en las secciones siguientes se plantean distintas funciones objetivo en el nivel superior y se busca resolver el problema variando la capacidad de expansión de los distintos grupos de calles de acuerdo a la [Tabla 3](#). Al anillo exterior no se le asigna capacidad de expansión.

Grupo	Arcos	Capacidad Original C [veh/h]	Cap. de expansión máxima $Z_{máx}$ [veh/h]	Cap. de expansión mínima $Z_{mín}$ [veh/h]	Velocidad máxima permitida [km/h]	
1	Avenidas principales	5-59, 28-36	1800	1200	0	60
2	Anillo central	11-17-53-47-11	1200	1200	0	60
3	Zona	21-22-40-39-21, 30-31	600-1200	1200	-600	40
4	Resto		1200	600	0	40

Tabla 3: Tipos de calles

4.3 Estado óptimo del sistema

Primeramente se buscó un estado óptimo de sistema en el nivel superior para obtener la configuración de capacidades según el criterio que es indicador del funcionamiento general de la red. De acuerdo a (15) la función objetivo a minimizar es la siguiente:

$$\min f(Z) = \sum_{a \in A} x_a^* t_a(x_a^*, Z) \quad (23)$$

Sujeta a las restricciones ya mencionadas (15b, 15c y 15d) y donde x_a^* es el flujo obtenido en el equilibrio de usuario del nivel inferior (1). En (15b) los valores correspondientes a $Z_a^{mín}$ y $Z_a^{máx}$ son los de la Tabla 3, en (15c) el nivel sonoro equivalente máximo $L_{eqa}^{máx}$ se fijó inicialmente en 80 dBA en todos los arcos de la zona en estudio y la restricción sobre la concentración de CO (15d) $C_{Re}^{máx}$ en 10 mg/m^3 en los 6 receptores de la zona. Para *simulated annealing* se tomó como temperatura inicial del sistema el valor del costo inicial, en este caso $\sum_a x_a t_a$ para la solución inicial del sistema, la temperatura en cada variación se adoptó como 0,8 del valor anterior, el criterio de equilibrio del sistema se fijó en 15 iteraciones para cada cambio de temperatura, y el criterio de congelamiento con el cumplimiento simultáneo de $temperatura < Temperatura\ inicial * 1e-2$ y número de no aceptaciones con respecto a la cantidad de iteraciones de la etapa de equilibrio igual a 1. La generación de nuevas soluciones se realizó con variaciones en más y en menos realizadas al azar sobre la solución anterior y la aplicación de un factor que disminuye cuando se encuentra una solución mejor. Esto permite mantenerse un poco más en la zona de valores mejorados probando opciones más cercanas. En cuanto al criterio de parada en el método de Frank-Wolfe se adoptó un valor de $1E-3$ para κ' de la ecuación (20).

No se encontró ninguna solución para el problema así planteado, de modo que se cambió la restricción que impedía la resolución del problema, el nivel sonoro continuo equivalente a $L_a^{máx} < 81 \text{ dBA}$ para obtener igualmente la mejor solución posible que resultó ser $Z_s = [1200 \ 1200 \ 600 \ 600]$ correspondiente a las capacidades de expansión de las zonas, 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Esta solución implica una ampliación al máximo de todo el conjunto de calles, lo cual es lógico en una red que originalmente estaba muy congestionada, ya que es lo que brinda fluidez al tráfico y disminuye los tiempos de viaje.

4.4 Minimización del ruido

Se buscó a continuación minimizar el ruido en la zona a proteger:

$$\min f(Z) = \sum_{a \in A} L_{eqa}(x_a^*, Z) \quad (24)$$

sujeta a las mismas condiciones que las descriptas en el caso anterior y donde L_{eqa} se calcula con la expresión (7) en función de los flujos obtenidos del nivel inferior (1) y de la capacidad de expansión Z correspondiente a cada arco de la red.

La solución encontrada fue $Z_s = [1200 \ 1200 - 600 \ 600]$ manteniendo la restricción $L_{eqa}^{máx} = 81 \text{ dBA}$. Buscando mantener el valor del nivel sonoro por debajo de 80 dBA se intentó una solución eliminando la circulación de colectivos en la zona a proteger logrando en este caso cumplir con la restricción y bajar el ruido con la misma solución que en el caso anterior.

4.5 Minimización de la contaminación atmosférica

El objetivo siguiente fue minimizar la concentración total en los receptores de la zona $\bar{\mathfrak{R}} = \{21, 22, 30, 31, 39, 40\}$

$$\min f(Z) = \sum_{\text{Re} \in \bar{\mathfrak{R}}} C_{\text{Re}}(x^*, v^*, Z) \quad (25)$$

sujeta a las mismas restricciones que los casos anteriores y donde C_{Re} se calcula con la ecuación (13). Se obtuvo una solución $Z_s = [1200 \ 1050 - 570 \ 575]$, muy parecida a la del problema anterior, que a los fines prácticos se puede asimilar a la solución obtenida en la minimización de ruido. En definitiva, para minimizar tanto la contaminación atmosférica como acústica en la zona que se estudia es necesario aumentar la capacidad de las avenidas y el anillo central en dos carriles, aumentar 1 carril en el resto y disminuir 1 carril en la zona a proteger.

5 COMPARACIÓN DE SOLUCIONES

En la [Tabla 4](#) se pueden ver algunos valores comparativos para la situación original, las soluciones intuitivas y los resultados obtenidos mediante optimización. Asimismo en las Figuras 11 a 15 se pueden ver los patrones de flujo, tiempo, nivel sonoro continuo equivalente y emisiones de CO en los arcos de la zona que se pretende proteger y la concentración de CO en los receptores de la misma zona.

	Red Total			Zona							
	x^*t	Leq máx.	C máx.	x^*t	x/C máx	t/to máx	Leq máx	Leq med.	E total	C máx	C med
Original	609622	84	22.5	52558	1.8	2.45	81.7	80.4	123.6	9.2	6.2
Original sin colec.	587146	84	22.7	40884	2.0	1.56	81.6	80.1	111.9	9.9	5.9
$z=600$ veh/h	590216	84	22.7	43597	1.4	1.47	82.4	80.7	115.6	10.0	6.0
$z=600$ veh/h $V_{máx}=60$ km/h	577454	84	22.4	38606	1.4	1.61	81.3	81.8	114.6	9.0	6.1
$z=-600$ veh/h $V_{máx}=40$ km/h	672169	84	20.9	38606	2.2	4.40	81.1	79.2	132.9	10.2	6.6

Óptimo de Sistema	392933	83.5	12.3	37930	1.1	1.23	80.9	80.3	100.5	6.7	5.0
Min. Cont. c/colec.	424992	83.8	12.0	38476	1.9	2.88	80.2	78.5	79.9	6.3	4.3
Min. Cont. s/colec.	416742	83.7	11.9	35635	1.9	2.80	78.6	77.5	79.7	6.0	4.3

Tabla 4: Comparación de resultados

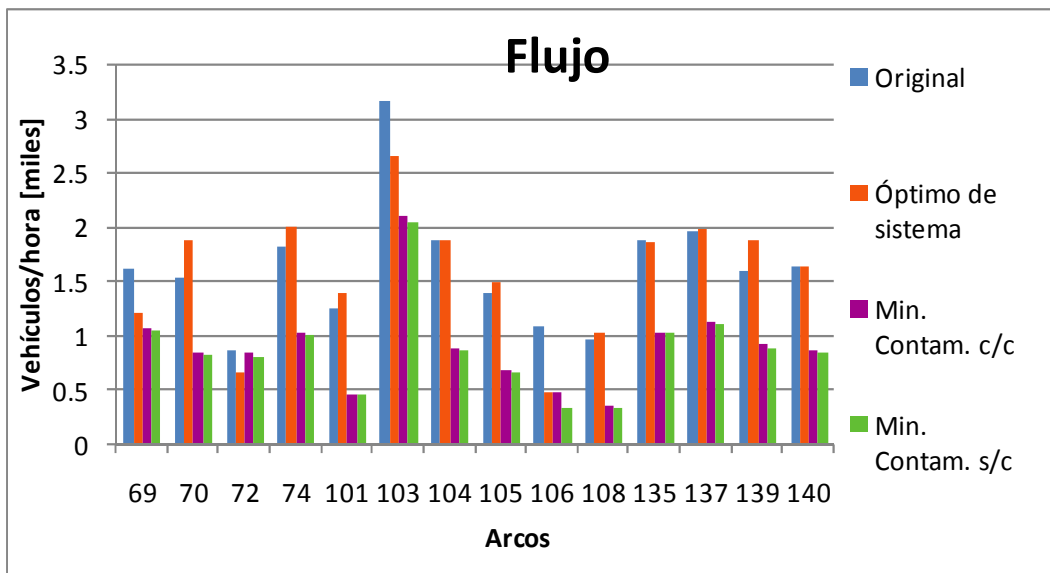


Figura 11: Flujo resultante luego de la optimización

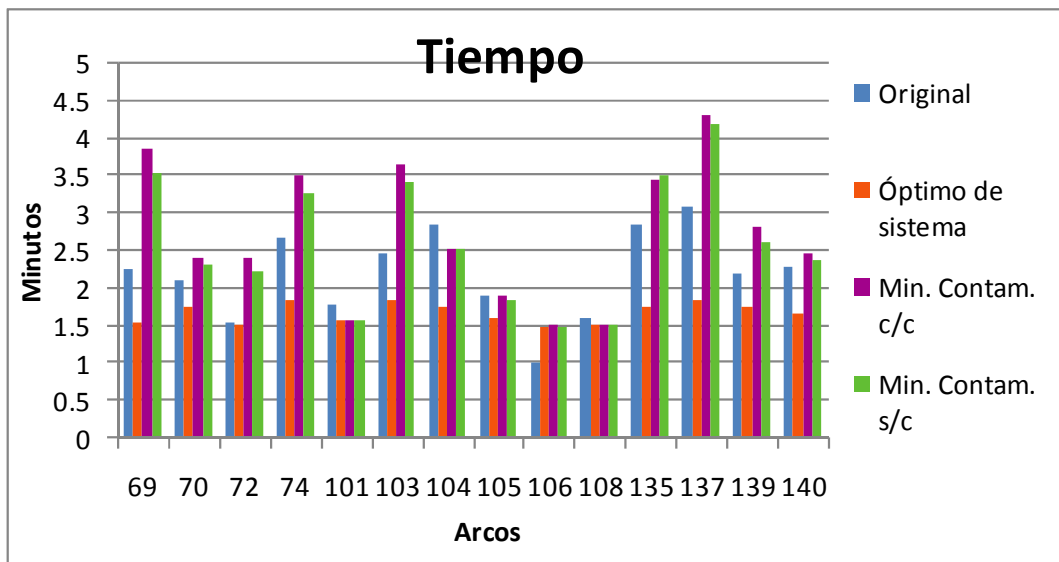


Figura 12: Tiempo de viaje luego de la optimización

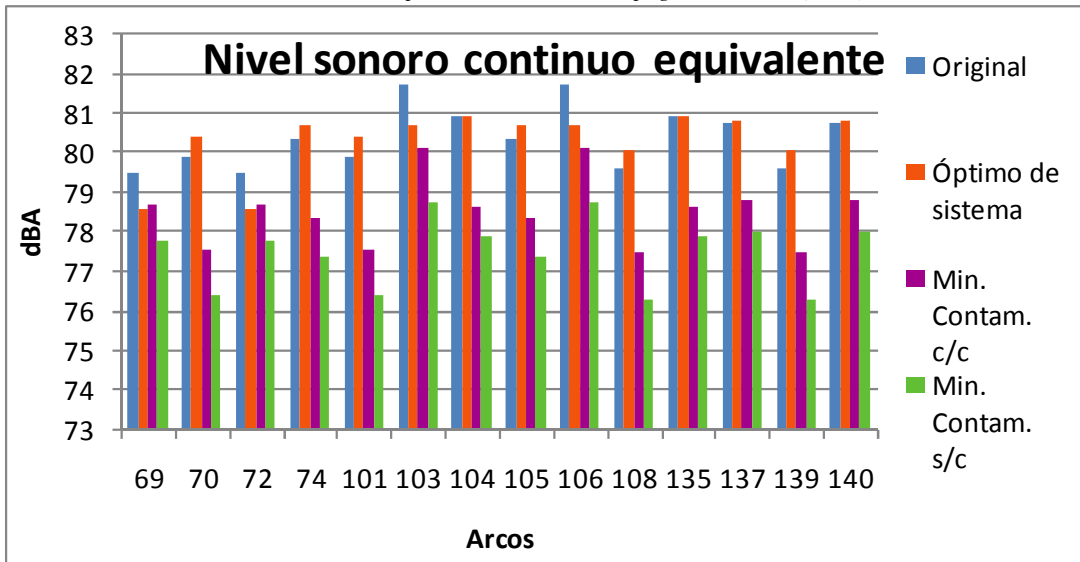


Figura 13: Nivel sonoro equivalente luego de la optimización

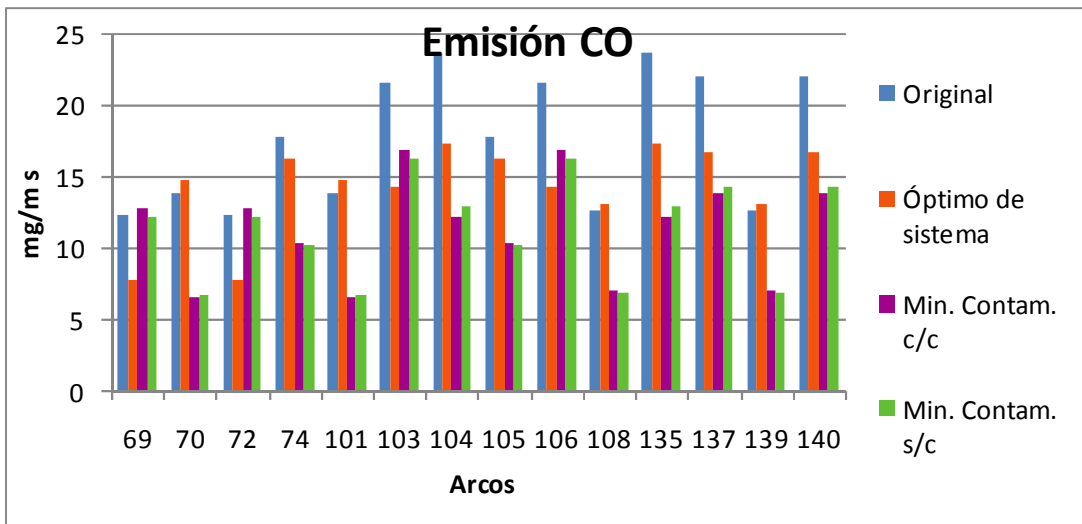


Figura 14: Emisiones de CO luego de la optimización

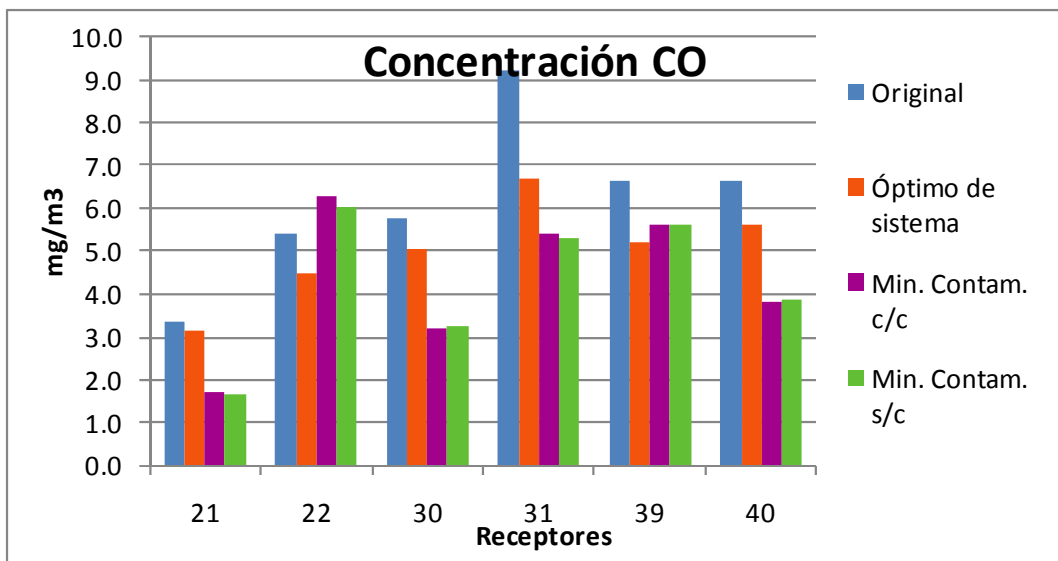


Figura 15: Concentración de CO en los receptores luego de la optimización

Como se puede ver en la [Tabla 4](#), buscar un óptimo de sistema es beneficioso para la totalidad de la red ya que el tiempo de permanencia disminuye un 35,5%, lo cual indica un funcionamiento más fluido. Esto influye directamente en la contaminación atmosférica que disminuye en el receptor más comprometido, el 32, un 54,7%. El nivel de ruido no se modifica de forma tan notable, ya que los valores máximos se producen en el anillo externo y corresponden fundamentalmente a la carga fija de vehículos pesados. En cuanto a los valores en la zona que se pretende proteger, se puede observar que si bien se reduce el flujo en la zona de estudio, no lo hace en valores significativos, apenas 3% en promedio, aunque en el enlace más conflictivo alcanza el 15,9%. Este comportamiento del flujo hace que el nivel sonoro equivalente disminuya apenas un máximo de 1,2 dBA y un promedio de 0,11 dBA, sin embargo sí es apreciable la disminución de las emisiones que alcanzan un máximo 36,6 % y un promedio de 16,7%, como también el nivel máximo de concentración de CO que disminuye un 27.6%. Esta mejora en los niveles de emisión se debe a la mayor fluidez en el tráfico ya que, como puede apreciarse en la [Figura 12](#), bajan los tiempos de recorrido, aumenta la velocidad y en consecuencia disminuye la emisión, a pesar de no disminuir el flujo. Sin embargo, el objetivo, de mantener el nivel sonoro equivalente por debajo de 80 dBA en la zona a proteger no se pudo alcanzar de esta manera. Tanto la minimización del nivel sonoro en la zona en cuestión, como la minimización de las concentraciones en los receptores de la zona, llevaron a una disminución marcada de flujo, 44,0 % y 46,5% respectivamente para los casos en que se consideró o no la existencia de colectivos en las calles de la mencionada zona. Las emisiones bajaron 34,65 % en promedio sin mayores diferencias entre ambas configuraciones y la concentración de CO siguiendo el mismo patrón disminuyó 29.6% pero con una reducción máxima en el punto más comprometido del 42 % bajando el nivel original de 9,2 mg/m³ a 5,3 mg/m³. En cuanto al nivel sonoro, el más difícil de modificar, sólo se logró bajar a un máximo de 78,7 dBA eliminando la circulación de colectivos. Por otro lado, se puede apreciar que la minimización de la contaminación en la zona estudiada no causa un costo demasiado elevado en el resto del sistema ya que sólo aumenta un 6% con respecto al óptimo de sistema.

6 CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue presentar un modelo que brinde soluciones al problema de tránsito y sus consecuencias inmediatas, la congestión y la contaminación acústica y atmosférica. Como se puede observar de los resultados obtenidos en el ejemplo analizado, las soluciones intuitivas pueden no ser confiables y producir resultados contrarios a los buscados. Un análisis de la red completa es fundamental ya que su comportamiento es sistémico y para lograr cambios en una zona determinada hay que hacerlos en una zona más amplia. La programación en dos niveles permite considerar tanto el interés de los usuarios individuales como el de planificadores o entidades que toman decisiones a nivel social. Un modelo integrado de tránsito y contaminación permite fijar distintos objetivos y obtener resultados que brinden opciones válidas a la hora de tomar decisiones en cuanto a modificar o ampliar una red existente. Sobre la base de un modelo general resulta sencillo modificar los modelos particulares utilizados en el tratamiento de cada tema, es decir, los modelos de tránsito, ruido, emisiones o dispersión de acuerdo a las características de cada ciudad o problema a tratar. El modelo de tránsito puede modificarse para tener en cuenta la demanda variable, las distintas modalidades de viaje o las distintas percepciones de los usuarios y el modelo de ruido puede reemplazarse con uno particular para una determinada ciudad. Asimismo se pueden adoptar otras funciones de emisión, evaluar otros contaminantes, distintas condiciones meteorológicas o tener en cuenta efectos no considerados como

por ejemplo el efecto cañón en ciudades con calles cerradas, mediante pequeñas modificaciones en los programas particulares. Si bien en este trabajo se utilizó una sola variable de diseño, la capacidad de expansión, un tratamiento análogo se puede hacer en base a otras variables, por ejemplo semáforos y peaje entre otras. En definitiva, tener un modelo general que involucre todos los aspectos fundamentales que entran en juego en las cuestiones de tránsito y medio ambiente brinda flexibilidad y mayor confiabilidad en las soluciones obtenidas, sin perder de vista que dichos modelos dependen fuertemente de los datos con que trabajan por lo que resulta fundamental contar con buena información del lugar que se estudia.

7 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto “Contaminación acústica en ambientes urbanos e industriales”, SCyT Universidad Tecnológica Nacional.

8 BIBLIOGRAFIA

- Azurro, A. P., *Dos modelos predictivos de ruido urbano para la ciudad de Bahía Blanca*, Tesis Magíster en Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, 2003.
- Barrigón Morillas, J. M., Gómez Escobar, V., Méndez Sierra, J. A., Vílchez Gómez, R. y Trujillo Carmona, J., An environmental noise study in the city of Cáceres, Spain. *Applied Acoustics*, 63:1061-1070, 2002.
- Beckmann, M. J., Mc Guire, C. B. y Weinstein C. B., *Studies in Economics of Transportation* Yale University Press, New Haven, Connecticut, 1956.
- Bogo, H., Gómez, D. R., Reich, S. L., Negri, R. M. y San Román, E., Traffic pollution in a downtown site of Buenos Aires city. *Atmospheric Environment*, 35:1717-1727, 2001.
- Brotcorne, L., Labbe, M., and Marcotte, P., A bilevel model for toll optimization on a multicommodity transportation network, *Transportation Science*, 35:345-358, 2001.
- Calder, L. K., On estimating air pollution concentrations from a highway in an oblique wind. *Atmospheric Environment* 29:1459-1463, 1973.
- Colson B., Marcotte P. and Savard G., An overview of bilevel optimization, *Ann Oper Res*, 153:235–256, DOI 10.1007/s10479-007-0176-2, 2007.
- Cormen, T., Leiserson, C. y Rives, R., *Introduction to Algorithms*, The MIT Press, McGraw Hill Book Company, N.York, ed. 23, 1999.
- Cortínez, V. H., Girón, P. G., Azzurro, A. P., Tonini, M., Sequeira, M. y Ercoli, L., An urban noise study in the city of Bahía Blanca, Argentina, *Proc. Internoise, Congress on Noise Control Engineering*, Río de Janeiro, Brasil, 2005.
- Cortínez, V. H., Stoklas, C. I., Girón, P. G., Azzurro, A. P. y Ercoli, L., Modelos de predicción de ruido de tránsito para la ciudad de Bahía Blanca, Argentina, *Proc. V Congreso Iberoamericano de Acústica*, Santiago de Chile, Chile, 2006.
- Cortínez, V. H., Vidal, M. C. y Girón, P. G., Optimización de las condiciones acústicas en recintos industriales, *Mecánica Computacional* XXVI: 59-73 (Eds. SA Elaskar, EA Pilotta y G. Torres), 2007.
- EMEP/CORINAIR (2009), <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>.
- Chock, D. P., A simple line-source model for dispersion near roadways, *Atmospheric Environment*, 12:823-829, 1978.
- Frank, M., y Wolfe, P., An algorithm for Quadratic Programming, *Naval Research Logistics Quarterly*, 3:95-110, 1956.
- Gaja Díaz, E., *Contribución al estudio de un modelo matemático sobre el ruido emitido por el tráfico urbano y los niveles de molestia en el municipio de Valencia*, Tesis

- doctoral ETS11-UPV, España, 1984.
- González, A. E., *Contaminación sonora en ambiente urbano: optimización del tiempo de muestreo en Montevideo y desarrollo de un modelo predictivo en un entorno atípico*, Tesis doctoral, Montevideo, marzo 2000.
- Guldmann, J. and Kim, W., Urban transportation network design, traffic allocation and air quality control: an integrated optimization approach, *European Regional Science Association*, 36h European Congress, ETH Zurich, Switzerland, Agosto 1996.
- Highway Capacity Manual: 2000, Transportation Research Board, 2000.
- Immers, B. H. y Oosterbaan, N. G. J., Model calculation of environment-friendly traffic flows in urban networks. *Transportation Research Record*, 1312:33-41, 1991.
- Hizir, A. E., *Using emission functions in mathematical programming models for sustainable urban transportation: an application in bilevel optimization*, Tesis of Master of Science, Subanci University, Agosto 2006.
- Labbe, M., Marcotte, P., and Savard, G., A bilevel model of taxation and its application to optimal highway pricing, *Management Science*, 44:1595-1607, 1998.
- Magnanti, T. L. y Wong, S. C., Network design and transportation planning: models and algorithms. *Transportation Science*, 18,1:1-55, 1984.
- Marcotte, P., Network design problem with congestion effects: a case of bilevel programming. *Mathematical Programming*, 34:23-36, 1986.
- Marcotte P. and Savard G., Bilevel programming approach to optimal price setting. *Decision and Control in Management Science*, 97-117, 2002.
- Marcotte P., Savard G., Zhu D., Mathematical structure of a bilevel strategic pricing model. *European Journal of Operational Research* 193:552-566, 2009
- Moore, E. F., The shortest path through a maze. Proc. Internat. Sympos. Theory Switching, Part II. *The Annals of the Computation Laboratory of Harvard University*, Harvard University, Cambridge, MA, 285-292, 1957.
- Metropolis, N.; Rosenbluth, A. W.; Rosenbluth, M.; Teller, A. H.; and Teller, E., Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *J. Chem. Phys.* 21: 1087-1092, 1953.
- Nagornov, O. V., Caligaris, R. E., Rodríguez, G. B., Quaranta, N. E. y Caligaris, M. G., Un enfoque del problema de difusión atmosférica. *Modelización Aplicada a la Ingeniería* (FRBA;UTN), 2005.
- Ntziachristos, L. and Samaras Z., COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport. *Technical Report*, 49:86, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 2000a
- Ntziachristos, L. and Samaras, Z., Speed Dependent Representative Emission Factors of Catalyst Passenger Cars and Influencing Parameters. *Atmospheric Environment*, 34:4611-4619, 2000b.
- Ntziachristos, L. and Samaras, Z., An empirical method for predicting exhaust emissions of regulated pollutants from future vehicle technologies. *Atmospheric Environment*, 35:1985-1999, 2001.
- Ntziachristos, L., Tzourlou, P. M., Samaras, Z., Geivanidis, S., Andrias, A. National and central estimates for air emissions from road transport. *Technical Report* 74:60, *European Environment Agency*, Copenhagen, Denmark, 2002.
- Ntziachristos, L., Mamakos, A., Xanthopoulos, A., Iakovou, E., Samaras, Z., Impact assessment/Package of new requirements relating to the emissions from two and three-wheel motor vehicles. Aristotle University, Thessaloniki, Greece. http://ec.europa.eu/enterprise/automotive/mveg_meetings/motos/meeting7/index.htm, 2004.
- Ntziachristos, L., Mellios, G., Fontaras, G., Gkeivanidis, S., Kousoulidou, M.,

- Gkatzoflias, D, Papageorgiou, Th., Kouridis, Ch. Updates of the Guidebook Chapter on *Road Transport*. LAT Report No 0706:63, 2007.
- Overgaard, K. R. Urban Transportation Planning: Traffic Estimation, *Traffic Quarterly*, 1967.
- Pape, U., Implementation and Efficiency of Moore - Algorithms for the Shortest Path Problem, *Math. Programming*, 7:212-222, 1974.
- Pasquill, F., Smith, F. B. Atmospheric Diffusion. John Wiley & Sons, New York, 1983.
- Poorzahedy, H., Abulghasemi F., Application of ant system to network design problem. *Transportation* 32:251-273, 2005.
- Poorzahedy, H., Rouhani, O., Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem. *European Journal of Operational Research* 182:578-596, 2007.
- Puliafito, S. E., A GIS model for urban quality analysis. *Mecánica Computacional*, XXIII:1787-1806, 2004.
- Puliafito S. E., Emissions and air concentrations of pollutant for urban area sources. *Mecánica Computacional*, 24:1389-1408, 2005.
- Puliafito, E., Allende, D. Emission patterns of urban air pollution. *Rev. Facultad de Ingeniería, Univ. Antioquía*, 42:36-56, 2007.
- Sheffi, Y., *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1984.
- Sivacoumar, R. y Thanasekaran, K., Line source model for vehicular pollution prediction near roadways and model evaluation through statistical analysis. *Environmental Pollution*, 104:389-395, 1999.
- Sommerhoff, J., Recuero, M. y Suárez E., Community noise survey of the city of Valdivia, Chile. *Applied Acoustics*, 65:643-656, 2004.
- Spiess, H., Conical Volume-Delay Functions, *Transportation Science*, 24:153-158, 1990.
- U.S. Bureau of Public Roads. *Traffic assignment Manual*. U.S. Department of Commerce, Washington D.C., 1964.
- Vardoulakis, S., Fisher, B., Pericleous, K., González Flesca, N., Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37:155-182, 2003.
- Venegas, L. E., Mazzeo, N. A., Modelling of urban background pollution in Buenos Aires city (Argentina). *Environmental Modelling & Software*, 21:577-586, 2006.
- Venkatram, A., Fitz, D., Bumiller, K., Du, S., Boeck, M. y Ganguly, C., Using a dispersion model to estimate emission rates of particulate matter from paved roads. *Atmospheric Environment*, 33:1093-1102, 1999.
- Venkatram, A., Horst, T., Approximating dispersion from a finite line source. *Atmospheric Environment* 40:2401-2408, 2005.
- Wardrop, J. G., *Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research*. Proceeding, Institution of Civil Engineers II (1):325-378, 1952.
- Wendell, R. E., Norco, J. E. y Croke, K. G., Emission prediction and control strategy: evaluation of pollution from transportation systems. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 23:91-97, 1973.
- Yang, H. y Bell, M. G. H., Models and algorithms for road network design: a review and some new developments. *Transport Review* 18,3:257-278, 1998.
- Zhan, F. B. and Noon, C. E., Shortest Path Algorithms: An Evaluation Using Real Road Networks. *Transportation Science*, 32:65-73, 1998.
- Zhan, F. B., and Noon, A., Comparison Between Label-Setting and Label-Correcting Algorithms for Computing One-to-One Shortest Paths. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* 4, 2:1-11, 2000.