

PRIMERAS JORNADAS REGIONALES DE ACÚSTICA AdAA 2009

19 y 20 de noviembre de 2009, Rosario, Argentina



AdAA2009-A057R

Un modelo continuo de asignación de tráfico para el estudio de ruido urbano

Víctor H. Cortínez^{(a), (c)}, Patricia N. Dominguez^(b).

(a) Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada (CIMTA), Universidad Tecnológica Nacional (FRBB), 11 de Abril 461, 8000, Bahía Blanca, Argentina. E-mail: vcortine@frbb.utn.edu.ar

(b) Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, 8000, Bahía Blanca. E-mail: pdoming@uns.edu.ar

(c) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, (CONICET), Argentina.

Abstract

Trip distribution and assignment in urban transportation networks is approximately governed by means of the first principle of Wardrop (user equilibrium). This principle establishes that each motorist chooses its minimum- travel-time route. The mathematical formulation of this principle leads to an optimization problem. It is a hard problem from the computational point of view because of the high number of unknowns involved (the traffic flows corresponding to the different streets of a city). A simplified approach having sufficient accuracy for analyzing the general features of traffic generated by potential urban changes, is given by means of the continuum model. This theory may be formulated as a system of non-linear partial differential equations. From its solution, the general characteristics of the traffic may be predicted. This work deals with the mathematical formulation of the continuum traffic model. The finite element method is used for solving the problem. Finally, the traffic noise may be predicted by coupling acoustic formulae with the aforementioned model.

Resumen

La distribución de viajes en una red de transporte urbano viene aproximadamente gobernada por el primer principio de Wardrop y se conoce como “equilibrio de usuario”. La formulación matemática de dicho principio lleva a un problema de optimización cuyas variables corresponden a los flujos de tráfico circulando por las diferentes arterias de una ciudad. Se trata de un problema computacional muy costoso atendiendo a la enorme cantidad de incógnitas. En este trabajo se plantea un enfoque simplificado, denominado modelo continuo, para analizar las características generales del tráfico ante diferentes modificaciones urbanas. Las ecuaciones resultantes son resueltas mediante el método de elementos finitos, obteniendo así el patrón aproximado de tráfico urbano. Acoplando tal modelo con una fórmula predictiva de ruido se analiza el impacto acústico provocado por diferentes modificaciones urbanas.

1 Introducción

Uno de los aspectos de la contaminación en las ciudades que hoy más preocupa a la sociedad es el aumento del nivel sonoro, que ha pasado, en muchos casos, de ser una molestia a constituir un riesgo para la salud. El ruido urbano se genera por un sinnúmero de causas: tránsito automotor, ferroviario y aéreo, obras en construcción, establecimientos industriales dentro del área urbana, animales domésticos, discotecas y lugares de recreación, entre otros. El ruido entorpece la comunicación y tiene efectos psicofísicos tales como disminución de rendimiento, incomodidad y estrés, pudiendo producir consecuencias más graves tales como trastornos del sueño y pérdida de audición.

Se ha realizado una gran cantidad de trabajo para caracterizar objetivamente el nivel de ruido en comunidades, tanto con enfoques experimentales como teóricos. Entre los trabajos en tal sentido pueden mencionarse los siguientes: Barrigón Morillas et al. (2002), Sommerhoff et al. (2004) y Cortínez et al. (2005). Un resultado común en todos los trabajos relacionados al tema, es la gran influencia del flujo vehicular sobre el nivel de ruido urbano. De hecho como regla general es el principal agente de la polución acústica en ciudades medianas y grandes, fundamentalmente en las horas pico de ingreso o egreso de establecimientos educativos, comerciales y laborales, cuando el flujo de automóviles puede alcanzar niveles de congestión. Por tal motivo, una gran cantidad de trabajos se orientaron al desarrollo de métodos de predicción de niveles sonoros a partir del conocimiento de los flujos vehiculares y otras variables morfológicas: ancho de calles, relación promedio entre altura de edificios y ancho de calle, tipo de calzada, composición del tráfico vehicular, etc. A partir de tales estudios, se dispone de una serie de modelos adecuados para la predicción de ruido a partir del flujo vehicular, Gaja, 1987, González, 2000, Li et al., 2002, Cortínez et al., 2006, entre otros. Por supuesto tales modelos pueden generalizarse también para tener en cuenta la existencia simultánea de fuentes fijas (Cortínez et al., 2008).

De lo dicho anteriormente, resulta entonces, que es fundamental el conocimiento de los flujos de vehículos en el área urbana, valores que pueden ser obtenidos por medición directa para cierta región y condiciones. Sin embargo, conocer qué caminos elegirán los conductores ante modificaciones en la topología o el propio funcionamiento de la red, exige la aplicación de un modelo matemático que permita predecir, lo más ajustadamente posible, dicho comportamiento. Uno de los modelos mejor establecidos en tal sentido es el análisis de equilibrio de sistemas de transporte que, básicamente, describe el comportamiento del conjunto de conductores usando una red de transporte, desde un punto de vista estacionario y promediado. Es decir, no considera las perturbaciones transitorias: aceleraciones, frenadas, cambio de carriles, etc., sino que utiliza como variables el flujo medio de vehículos circulantes por una zona determinada en un período dado de un día típico. Uno de los conceptos básicos de tal modelo es el costo de viaje (normalmente, el tiempo de viaje) en una calle determinada o en una unidad de longitud. Tal magnitud es una función creciente del flujo (horario) vehicular por la calle en cuestión y se determina en forma experimental, aunque existen expresiones generales, por ejemplo la conocida función BPR del Departamento de Transporte de Estados Unidos, que son extensamente usadas y dependen de características particulares de las vías consideradas.

La obtención de los flujos vehiculares en la red de transporte generalmente se realiza utilizando el proceso conocido como “proceso de 4 pasos” que involucra la generación de viajes, relacionada con el uso del suelo y la disposición de instalaciones, la distribución de los viajes hacia determinados destinos, la elección del modo de viajar, ya sea utilizando transporte público o privado y la asignación de viajes a la red de transporte que es el proceso

en el cual se determinan las rutas que se usarán y el número de vehículos que se espera en cada tramo de la red.

En este proceso se siguen, en general, dos enfoques. En el enfoque discreto, el más desarrollado y ampliamente utilizado, la ciudad se divide en zonas de características semejantes y se asume que toda la actividad de las mismas se concentra en “centroides” que son los que generan y atraen los viajes hacia y desde otras zonas y las calles e intersecciones se representan como arcos y nodos de un grafo dirigido. En este caso, cada arco tiene una función asociada que representa el costo de viajar en dicho tramo. Un tratamiento detallado de este enfoque tanto desde el punto de vista determinístico como estocástico puede encontrarse en Sheffi, 1984. La consideración de efectos ambientales en tal enfoque ha sido estudiado por Domínguez et al. (2009). En el enfoque continuo, la red densa es aproximada a un continuo donde los conductores son libres de elegir sus rutas en un espacio bidimensional, y se acepta que la variación en áreas cercanas es pequeña comparada con el sistema completo y en consecuencia las características del sistema de transporte tales como flujo y costo pueden ser representadas con funciones matemáticas continuas.

El enfoque continuo tiene algunas ventajas en redes densas (Sasaki et al. 1990) ya que requiere menor cantidad de información, no necesita la construcción detallada del grafo de la red, utiliza menos recursos computacionales y puede brindar una visión rápida del impacto que se produce ante un cambio en la red. Existen estudios, basados en este enfoque, tanto para resolver problemas de asignación, como problemas combinados de distribución-asignación (Wong y Sun, 2000; Ho et al., 2006) teniendo en cuenta además, la posibilidad de considerar múltiples clases de usuarios (Ho et al., 2003). Una detallada reseña de la literatura y las posibilidades de aplicación puede verse en Ho y Wong, 2006. En general, cuando se estudian problemas a gran escala, o cuando se pretende tener una tendencia general del cambio que una modificación en la red puede producir, el enfoque continuo puede ser preferible frente al discreto, debido a su más modesta demanda computacional y aun aceptable capacidad de predicción.

En este trabajo se utiliza el enfoque continuo para estudiar dos casos de modificaciones en la red de transporte y su impacto en el nivel sonoro. El objetivo es plantear una metodología sencilla para obtener en forma rápida la respuesta de la red ante los cambios producidos y predecir la variación del nivel de ruido.

2 Descripción del modelo continuo de tráfico

Tanto en el enfoque continuo como en el discreto, la obtención de los flujos de equilibrio en la red de transporte se basa en los dos principios básicos enunciados por 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 costo o 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” es utilizado, generalmente, en la etapa de diseño de la red por los planificadores urbanísticos, como un indicador del funcionamiento general de la misma, o en sistemas centralizados de tránsito donde las decisiones sobre la elección de rutas no dependen del conductor. Este trabajo está basado en el primer principio de Wardrop. Por otra parte, se utiliza una versión continua de tal teoría basado en la suposición general que las variables involucradas pueden adoptarse como distribuidas con continuidad en una dada región urbana.

2.1 Modelo de asignación-distribución

Se considera la ciudad como una región Ω delimitada por un borde exterior Γ_0 a través del cual no ingresan ni salen viajes. Los hogares donde se originan los viajes se encuentran distribuidos uniformemente en la ciudad. La red de transporte se aproxima con un continuo y se asume que los destinos de atracción O_i son zonas suficientemente compactas con respecto al área en estudio y se encuentran delimitadas por bordes Γ_i $i = 1, 2, \dots, N$, donde N es el número de centros de atracción. Para determinar la demanda por unidad de área se adopta un modelo de distribución gravitacional, de tal manera que $q_i(x, y)$ en cada punto es función del costo de viaje potencial $u_i(x, y)$ desde dicho punto hasta el i -ésimo centro de atracción.

$$q_i(x, y) = \beta(x, y) Q(x, y) e^{-\xi u_i(x, y)} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

donde $Q(x, y) = \sum_{i=1}^N q_i(x, y)$ es el total de la demanda generada en el punto (x, y) , ξ es una constante que mide la sensibilidad de la demanda con respecto al costo de viaje $u_i(x, y)$ y

$\beta = \frac{1}{\sum_{i=1}^N e^{-\xi u_i}}$ es un factor de distribución. Para cada destino O_i se debe verificar que

$\iint_{\Omega} q_i(x, y) d\Omega = D_i$ donde D_i es la totalidad de viajes atraídos por O_i . Se considera que el costo de viaje por unidad de distancia depende de la intensidad de flujo local y de la configuración de la red, pero no de la dirección y se puede expresar como:

$$c(x, y, \mathbf{f}) = a(x, y) + b(x, y) \sum_{i=1}^N |\mathbf{f}_i(x, y)|^{\gamma(x, y)} \quad (2)$$

donde $a(x, y)$, $b(x, y)$ y $\gamma(x, y)$ son escalares positivos y $\mathbf{f}_i(x, y) = (f_{x_i}(x, y), f_{y_i}(x, y))$ es el vector que representa el flujo de vehículos, de módulo $|\mathbf{f}_i(x, y)| = \sqrt{f_{x_i}(x, y)^2 + f_{y_i}(x, y)^2}$. El primer término de (2) representa el costo de viaje a flujo libre, y el segundo tiene en cuenta el efecto de la congestión. El costo de viaje dado por la expresión (2) puede medirse en unidades monetarias, aunque su más simple interpretación corresponde al tiempo de viaje por unidad de distancia.

El problema de equilibrio de usuario fue resuelto, para el enfoque discreto, por Beckmann, como un problema de minimización equivalente. En correspondencia con dicha formulación en el enfoque continuo, puede plantearse de la siguiente manera:

$$\min z(\mathbf{f}, \mathbf{q}) = \iint_{\Omega} a \sum_{i=1}^N |\mathbf{f}_i| + \frac{b}{\gamma+1} \left(\sum_{i=1}^N |\mathbf{f}_i| \right)^{\gamma+1} + \frac{1}{\xi} \sum_{i=1}^N (q_i \ln q_i - q_i) d\Omega \quad (3a)$$

s.a.

$$\nabla \cdot \mathbf{f}_i + q_i = 0 \quad \forall (x, y) \in \Omega, i = 1, 2, \dots, N \quad (3b)$$

$$\mathbf{f}_i \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \forall (x, y) \in \Gamma_0, i = 1, 2, \dots, N \quad (3c)$$

$$\sum_{i=1}^N q_i = Q \quad \forall (x, y) \in \Omega, i = 1, 2, \dots, N \quad (3d)$$

$$\iint_{\Gamma_i} \mathbf{f}_i \cdot \mathbf{n} d\Gamma - D_i = 0 \quad \forall (x, y) \in \Gamma_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (3e)$$

donde \mathbf{n} es el versor normal saliente al borde correspondiente. Este problema no tiene significado físico o económico, pero la solución satisface el equilibrio de usuario de Wardrop y los flujos satisfacen el modelo de distribución. Esta comprobación puede encontrarse en los trabajos de los autores antes mencionados (Wong y Sun, 2000; Ho et al., 2006). Aplicando el principio variacional se puede ver que la solución del programa (3) cumplirá (3b), (3c), (3d), (3e) y además:

$$\left(a + b \sum_{i=1}^N |\mathbf{f}_i|^{\gamma} \right) \frac{\mathbf{f}_i}{|\mathbf{f}_i|} - \nabla u_i = 0 \quad \forall (x, y) \in \Omega, i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\frac{1}{\xi} \ln q_i + u_i + \mu = 0 \quad \forall (x, y) \in \Omega, i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

donde u_i y μ son los multiplicadores de Lagrange asociados a las restricciones (3b) y (3d) respectivamente. De la ecuación (4):

$$\mathbf{f}_i = k_i \nabla u_i \quad \text{con} \quad k_i = \frac{|\mathbf{f}_i|}{a + b \sum_{i=1}^N |\mathbf{f}_i|^{\gamma}} \quad (6)$$

Introduciendo luego esta expresión en la ecuación (3b), se obtiene el sistema de ecuaciones diferenciales gobernantes:

$$\text{div}(k_i \nabla u_i) + q_i = 0 \quad (7)$$

Las condiciones de borde asociadas a estas ecuaciones son, en el límite exterior ausencia de flujo, y en los bordes internos costo potencial de viaje nulo.

Cabe destacar que en este modelo, al ser todas las funciones dependientes de la posición es posible dividir la ciudad en tantas zonas como se desee de acuerdo a las características de las calles y a la distribución de la demanda de viajes.

2.2 Modelo de distribución con demanda variable

En el caso de un solo punto de destino considerando una demanda variable en función del costo de viaje $q(x, y) = D(x, y, u(x, y))$, la función a minimizar es la correspondiente a la ecuación (8), donde U_1 es el costo "in situ" del punto de destino.

$$\min z(\mathbf{f}, \mathbf{q}) = U_1 Q + \iint_{\Omega} \left(a |\mathbf{f}| + \frac{b}{\gamma+1} |\mathbf{f}|^{\gamma+1} - \int_0^q D^{-1}(\zeta) d\zeta \right) d\Omega \quad (8a)$$

s.a.

$$\nabla \cdot \mathbf{f} + q = 0 \quad \forall (x, y) \in \Omega \quad (8b)$$

$$\mathbf{f} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \forall (x, y) \in \Gamma \quad (8c)$$

$$\iint_{\Gamma_i} \mathbf{f} \cdot \mathbf{n} d\Gamma + Q = 0 \quad \forall (x, y) \in \Gamma_i \quad i = 1 \quad (8d)$$

Procediendo como en el apartado anterior se llega a una única ecuación diferencial del mismo tipo que la ecuación (7). La condición en el borde externo es flujo cero y en el borde interno, que corresponde al centro de atracción de los viajes, el costo es igual al costo “in situ”.

3 Descripción del modelo de ruido urbano

Para la determinación del nivel sonoro, en este trabajo se aplica el modelo de ruido propuesto por Davies y Lyon (1973) basado a su vez en el trabajo de Shaw y Olson (1972). Según estos últimos autores, en el caso de fuentes uniformemente espaciadas en una zona circular de radio a sin barreras, el cuadrado de la presión en el centro de la zona puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$\overline{p^2}(O) = \frac{\rho c}{2} \frac{v w}{\pi a^2} (2 + \ln v) \quad (9)$$

donde ρ es la densidad del aire, c : la velocidad del sonido en el aire, v la cantidad total de fuentes y w la potencia acústica de cada fuente. Davies y Lyon (1973), generalizan el modelo anterior para aplicarlo en espacios semiconfinados teniendo en cuenta el efecto de barreras, que en el caso de una ciudad, por ejemplo, pueden corresponder a las paredes de los edificios. Asumen que la zona de fuentes, puede ser modelada como una región particionada en celdas cuadradas de lado L y altura h tal como se muestra en la figura 1.

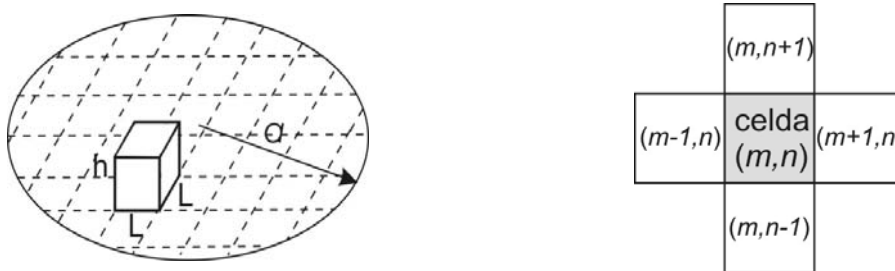


Figura 1. Región de fuentes sonoras y celdas del modelo de Davis y Lyon.

Las celdas contienen las fuentes y sus paredes son semipermeables al sonido, es decir que reflejan, absorben y transmiten el mismo. Las paredes están caracterizadas por los coeficientes de absorción α y de transmisión τ , siendo el coeficiente de reflexión $(1 - \alpha - \tau)$. El piso de las celdas se considera un reflector perfecto y el techo un absorbedor perfecto. Se define además un coeficiente efectivo de absorción $\bar{\alpha}$ para la celda que puede ser medido experimentalmente.

$$\bar{\alpha} = \frac{L^2 + 4Lh\alpha}{A_i} \quad (10)$$

donde

$$A_i = 2L^2 + 4Lh \quad (11)$$

El nivel de ruido dentro de la celda es el resultado del campo directo debido a las fuentes que se encuentran dentro de la misma y del campo reverberante generado por las reflexiones en las barreras y la transmisión a través de las mismas desde y hacia las celdas vecinas. Se asume que las celdas son semejantes y que el nivel sonoro es constante dentro de la celda. La ecuación de balance energético para el campo reverberante en la celda (m,n) , donde m y n son los índices en direcciones perpendiculares está dado por la ecuación:

$$(Lh\tau / 4\rho c)(\bar{p}_{m-1,n}^{-2} + \bar{p}_{m+1,n}^{-2} + \bar{p}_{m,n-1}^{-2} + \bar{p}_{m,n+1}^{-2} - 4\bar{p}_{m,n}^{-2}) + \nu w(1 - \bar{\alpha}) = (\bar{p}_{m,n}^{-2} / 4\rho c)\bar{\alpha}A_i \quad (12)$$

que luego de dividir por L^2 se puede reescribir de la siguiente forma:

$$(Lh\tau / 4\rho c)(\delta_m^2 \bar{p}_{m,n}^{-2} + \delta_n^2 \bar{p}_{m,n}^{-2}) - (\bar{p}_{m,n}^{-2} / 4\rho cL^2)\bar{\alpha}A_i = -\nu w(1 - \bar{\alpha}) / L^2 \quad (13)$$

donde δ_i^2 es el operador de diferencias finitas de segundo orden con respecto a i , para $i=m, n$. Si el número de celdas es grande, la ecuación (13) puede expresarse en forma diferencial

$$\nabla^2(\bar{p}_\eta^{-2}) - \lambda^2 \bar{p}_\eta^{-2} / L^2 = -\nu w \frac{4\rho c}{L^3 h \tau} (1 - \bar{\alpha}) \quad (14)$$

donde ∇^2 es el operador laplaciano y $\lambda^2 = (L^2 + 4Lh\alpha) / Lh\tau$. Es posible obtener una solución analítica simple de la ecuación (14) expresada en coordenadas polares si se considera un dominio circular con propiedades uniformes. Dos condiciones de borde pueden aplicarse que resultan de particular interés, cuando la región está rodeada de paredes que no permiten el ingreso de sonido a las celdas del borde y cuando la transmisión es total, en cuyo caso no hay campo reverberante en dichas celdas. En ambos casos, la solución analítica de la ecuación (14), salvo en el perímetro de la zona, es:

$$\bar{p}_\eta^{-2} = \frac{4\rho c \nu w}{R} \quad (15)$$

donde

$$R = \frac{A_i \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{A_i (L^2 + 4Lh\alpha)}{L^2 + 4Lh(1 - \alpha)} \quad (16)$$

Luego, el campo sonoro dentro de la celda con barreras resulta de la contribución del campo reverberante (15) más el aporte del campo directo. Este último puede obtenerse a partir de la expresión (9) si se supone que las fuentes están uniformemente espaciadas en la celda.

$$\bar{p}^{-2} = \frac{\rho c \nu w}{2L^2} \left(2 + \ln \nu + \frac{8L^2}{R} \right) \quad (17)$$

Por último, el nivel de presión sonora puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$L_p = 20 \log \frac{\bar{p}}{p_{ref}} \quad \text{con } p_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \quad (18)$$

En una ciudad, las celdas pueden considerarse como las marcadas con líneas discontinuas en la figura 2 y la cantidad de fuentes está determinada por la cantidad de automóviles en el área de cada celda. Este valor se calcula a partir del flujo y la velocidad media en el espacio, obtenidos de la resolución del problema de tráfico.

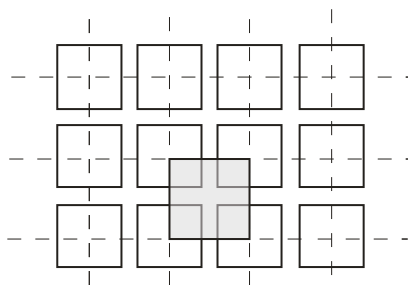


Figura 2. Estructura de celdas en zona urbana

4 Resolución del problema

Para la resolución del problema se utiliza el software FlexPDE que resuelve ecuaciones diferenciales a derivadas parciales sobre un dominio, utilizando el método de elementos finitos. Se implementa la solución a través del siguiente algoritmo iterativo controlado desde Matlab:

Paso 1: $n=1$. Adoptar valores de $k_i = k_i^1$ y de demanda constante igual a la demanda potencial $q_i = q_i^1$. Correr el programa y obtener una solución inicial \mathbf{u}_i^1 y una distribución de flujos \mathbf{f}_i^1 .

Paso 2: $n=n+1$. Calcular los nuevos valores $k_i = k_i^{n+1}$, el factor de balance β y la demanda $q_i = q_i^{n+1}$ y luego la nueva solución \mathbf{u}_i^{n+1} y la distribución de flujos \mathbf{f}_i^{n+1} .

Paso 3: Si $\|\mathbf{f}^n - \mathbf{f}^{n+1}\| < \varepsilon$, continuar con el Paso 4, sino, volver al Paso 2.

Paso 4: Calcular el nivel de la presión sonora con (18). Terminar

5 Ejemplos numéricos

Se presentan a continuación dos ejemplos numéricos para mostrar la metodología propuesta. En el primero, el objetivo es bajar el nivel sonoro en una zona residencial para lo cual se implementa una disminución de la velocidad máxima de circulación y se analiza la repercusión que dicha medida tiene tanto a nivel local como en el resto de la red. Para este caso se utiliza el modelo de tráfico descrito en el apartado 2.2. En el segundo caso, se estudia el impacto que la apertura de un nuevo centro de atracción produce en el nivel de ruido

utilizando el modelo de tráfico descrito en 2.1. En ambos casos se aplica luego el mismo modelo de ruido analizado en el apartado 3.

5.1 Modificación de condiciones de circulación en una zona

Se modela una ciudad 20x20 km² con un centro comercial-administrativo destino de los viajes generados en toda la ciudad. Se adopta una función de demanda $q = 250e^{-0,5u}$ veh/h/km². Inicialmente se considera una velocidad de circulación máxima a flujo libre de 60 km/h y una función de costo $c = 0,0167 + 0,189 \times 10^{-6} |f|^{1,2}$ con un costo local $U_1 = 0,15 h$. Luego se modifica la velocidad de circulación en una zona cercana al centro comercial de 2x2 km² bajando la velocidad máxima a 40 km/h y adoptando una función de costo $c = 0,025 + 0,284 \times 10^{-6} |f|^{1,2}$. En la figura 3 se puede ver la diferencia de flujo entre la situación original (flujo_60) y luego de bajar la velocidad (flujo_40).

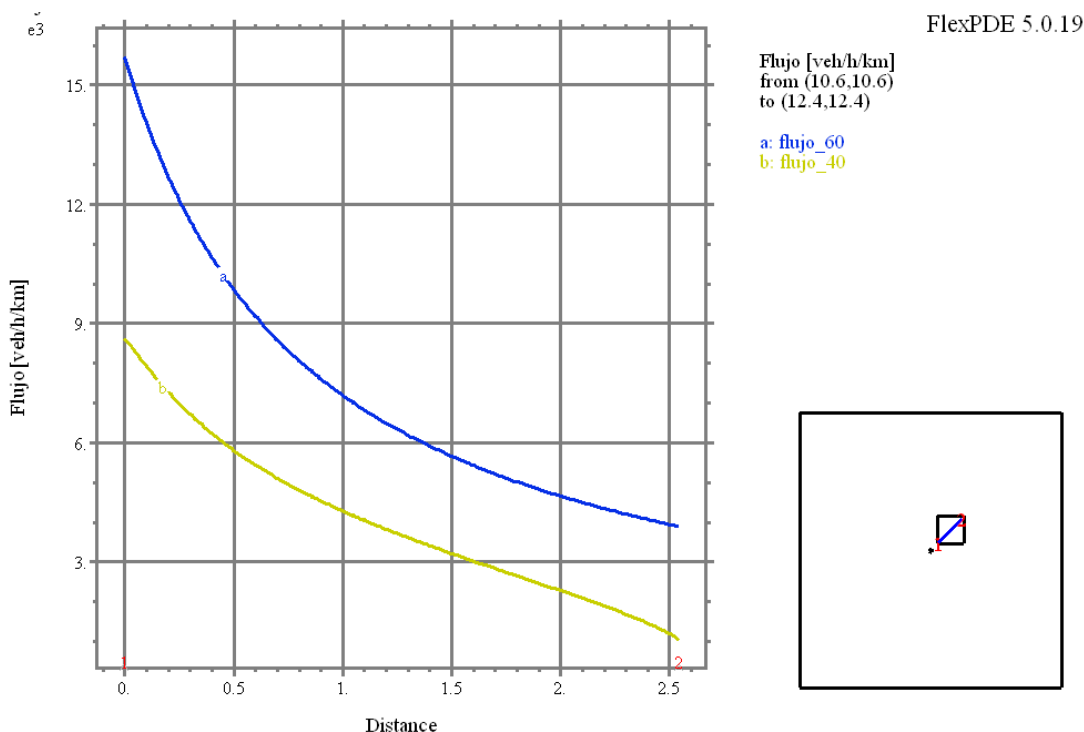


Figura 3. Variación del flujo de tráfico en la zona de estudio.

Para obtener el nivel sonoro se adoptan celdas cuadradas de 100 m de lado considerando edificios de 10 m de altura con anchos de calles de 10 m. Para el coeficiente de transmisión se adopta la relación propuesta por Davis y Lyon, el cociente entre el ancho de la calle y la distancia entre calles, en este caso $\tau = 0,1$ y como coeficiente de absorción se utiliza $\alpha = 0,2$. La potencia de la fuente empleada en el cálculo es la correspondiente a un automóvil $w = 0,01W$. En la figura 4 se pueden ver las curvas de nivel sonoro en la diagonal de la zona donde se aplica la disminución de velocidad. Como se puede apreciar el nivel sonoro se reduce entre 3 y 6 dB.

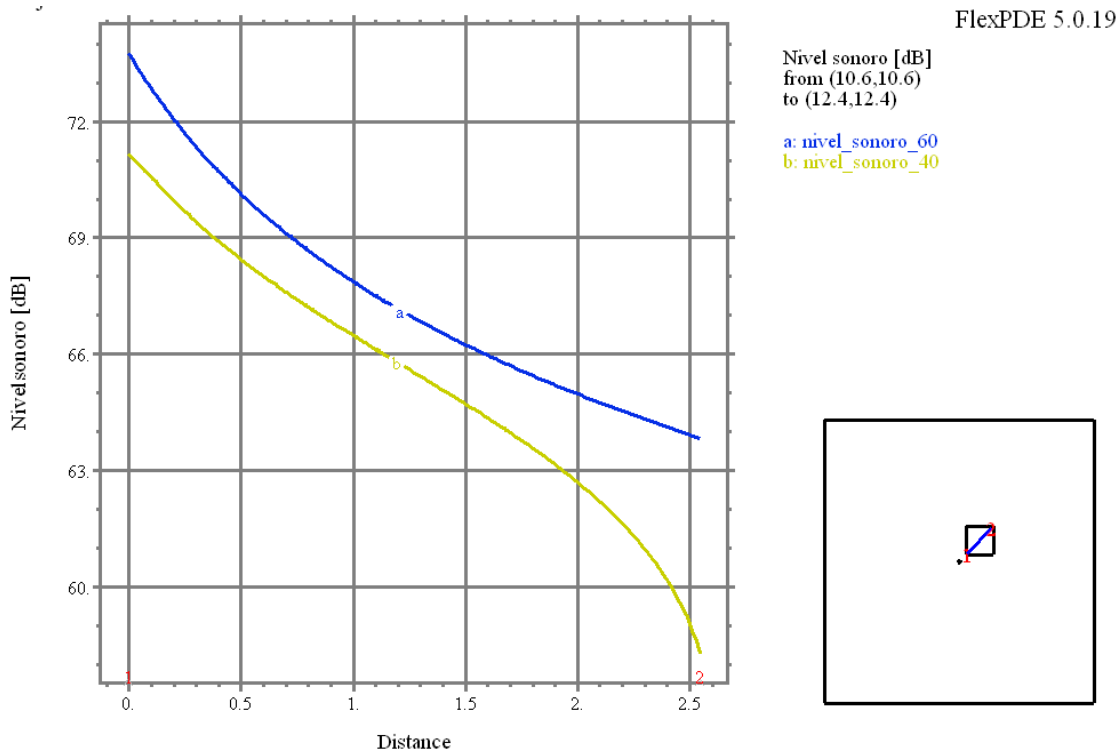


Figura 4. Variación del nivel sonoro en la zona de estudio.

Una de las medidas del funcionamiento general de la red está dada por $T = \iint_{\Omega} uq(u)d\Omega$, que representa la cantidad de vehículos circulando en la misma, en el intervalo de tiempo considerado de una hora (Ho et al., 2003; Wong et al., 2006). En el caso original $T=52235$ veh-h y luego de la modificación $T=52603$ veh-h, es decir la protección de una zona de la ciudad no perjudica el funcionamiento general de la red de transporte.

5.2 Incorporación de un nuevo centro de atracción de viajes

En este caso se aplica un modelo de distribución asignación en una ciudad extendida sobre una superficie de 45×25 km² aproximadamente que inicialmente cuenta con un solo centro comercial. Se compara luego con los resultados obtenidos al considerar la apertura de un nuevo centro. Se adoptan funciones de demanda $q_i(x, y) = \beta(x, y) Q e^{-\xi u_i(x, y)}$ con $Q = 250 \text{ veh/h/km}^2$ y $\xi = 0,5$ y una función de costo $c = 0,0167 + 0,189 \times 10^{-6} (|f_1| + |f_2|)^{1,2}$. En la figura 5 se muestra la distribución de flujo vehicular para 1 centro (flujo_1c) y para 2 centros (flujo_2c) y en la figura 6 el nivel sonoro correspondiente. Se puede apreciar que el nivel sonoro máximo baja 6 dB en el centro original. Como es lógico el aumento de nivel sonoro en las cercanías del nuevo centro es importante, alcanzando un incremento de 20 dB. En las figura 7 y 8 se muestran los mapas acústicos para 1 y 2 centros respectivamente.

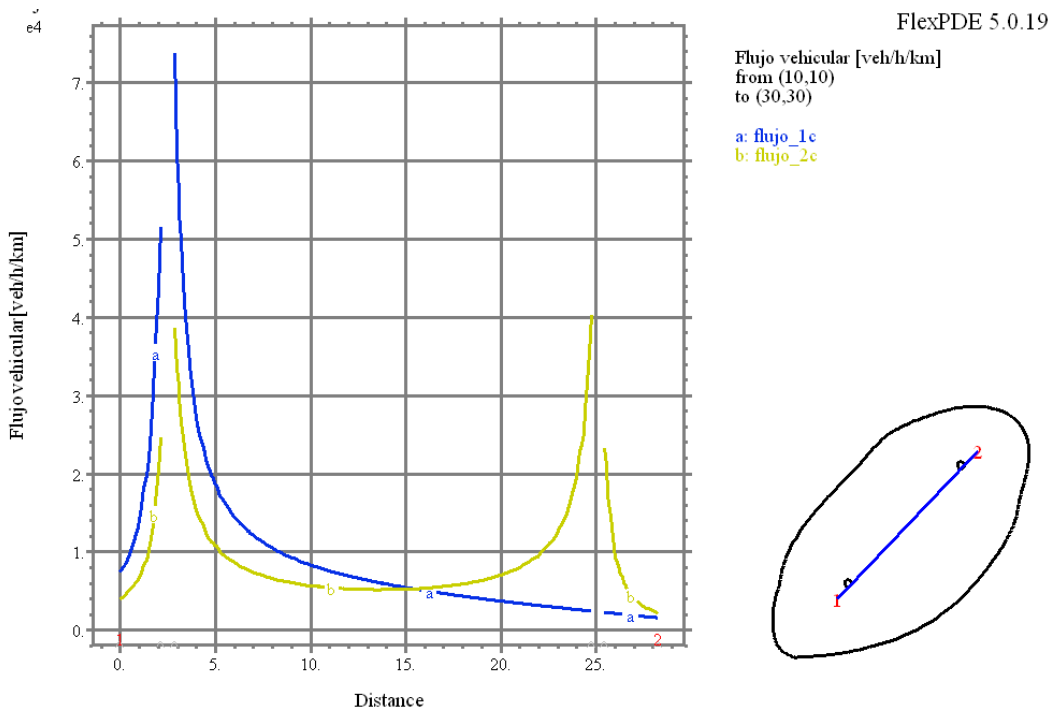


Figura 5. Flujo vehicular para 1 y 2 centros

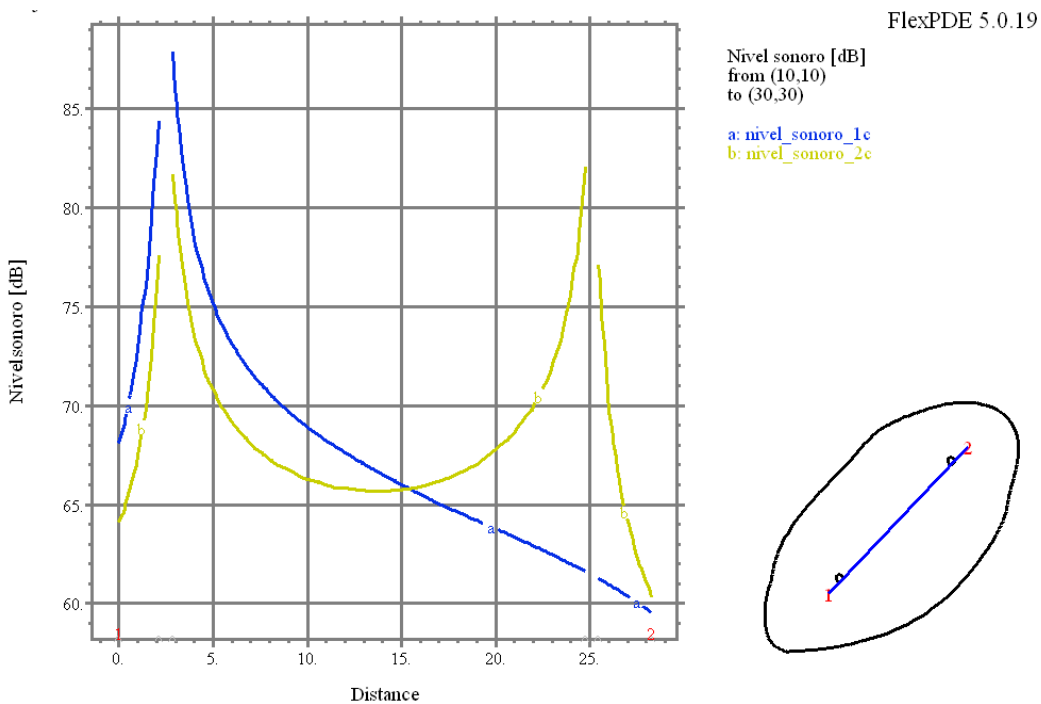


Figura 6. Comparación de Nivel sonoro para 1 y 2 centros

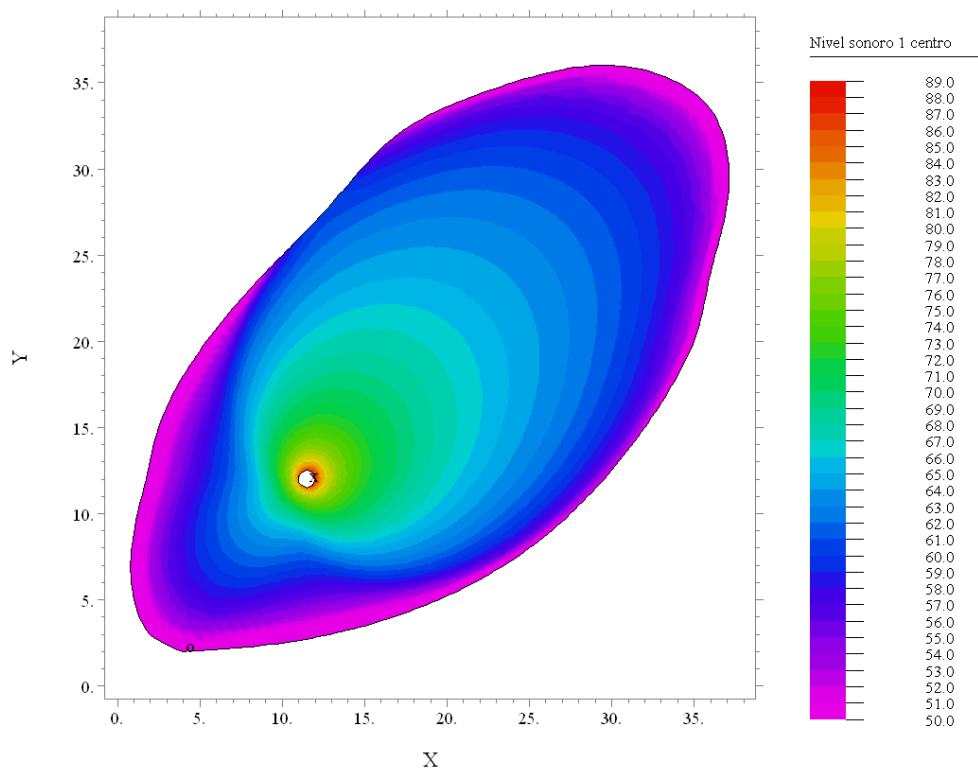


Figura 7. Mapa acústico para 1 centro de atracción de viajes

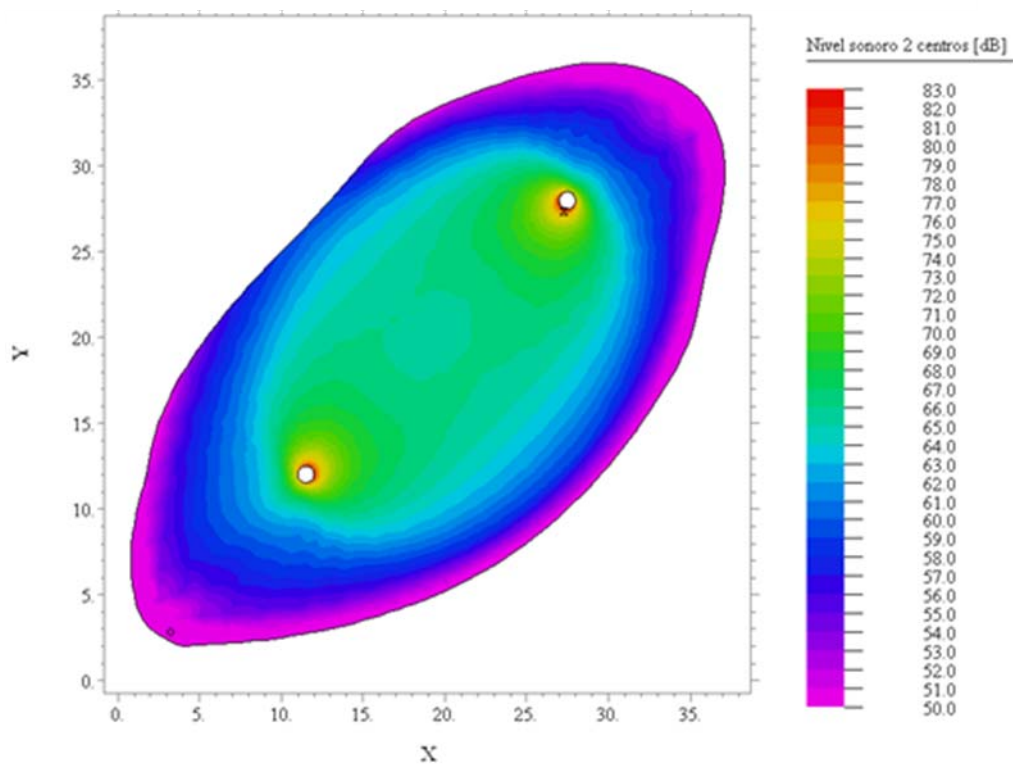


Figura 8. Mapa acústico para 2 centros de atracción de viajes.

En cuanto a los valores de T que marcan el comportamiento general de la red de transporte, en la situación original se obtuvo un valor $T=79560$ veh-h y con la incorporación de un segundo centro el valor se redujo a $T=66428$ veh-h, lo cual indica un mejoramiento general de la circulación.

6 Conclusiones

La utilización del enfoque continuo en la resolución de los problemas de equilibrio de tráfico se presenta como una herramienta poderosa y de fácil utilización que brinda rápidamente una visión general del funcionamiento de una red de transporte y sus efectos medioambientales. En este trabajo se presentaron dos ejemplos que mostraron el impacto sobre el nivel de ruido producido por diferentes modificaciones de una situación original. El modelo es extensible a otros tipos de contaminación como por ejemplo la contaminación atmosférica. Así mismo, es fácilmente modificable para tener en cuenta zonas con distinta disponibilidad vial, más de una clase de conductor con diferente percepción de costos, flujo a través de los límites de la zona en estudio o demanda diferenciada por zonas.

Agradecimientos

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

Referencias

- Barrigón Morillas, J. M.; Gómez Escobar, V.; Méndez Sierra, J. A.; Vélchez Gómez, R.; Trujillo Carmona, J. (2002). “An environmental noise study in the city of Cáceres, Spain”. *Applied Acoustics* 63, 1061-1070.
- Beckmann, M. J.; Mc Guire, C. B.; Weinstein C. B. (1956). “Studies in economics of transportation Yale University Press”, New Haven, Connecticut, USA.
- Cortínez, Víctor H.; Girón, Pablo G.; Azzurro, Adrián P.; Tonini, M.; Sequeira, Martín; Ercoli Liberto (2005). “An urban noise study in the city of Bahía Blanca, Argentina” *Proc. Internoise, Congress on Noise Control Engineering, Río de Janeiro, Brasil*.
- Cortínez, Víctor H.; Stoklas, Cecilia I; Girón, Pablo G.; Azzurro, Adrian P.; Ercoli Liberto (2006) “Modelos de predicción de ruido de tránsito para la ciudad de Bahía Blanca, Argentina” *Proc. V Congreso Iberoamericano de Acústica, Santiago de Chile, Chile*.
- Cortínez, Víctor H.; Sequeira Martín; Vidal Marta (2008). “Identificación de fuentes de ruido en ambientes urbanos industriales”. *Contaminación Atmosférica en Argentina, S.E.Puliafito y N. Quaranta (Eds.), Universidad Tecnológica Nacional*.
- Davies, H.; Lyon, R. (1973). “Noise propagation in cellular urban and industrial spaces”. *The Journal of the Acoustical Society of America* 54, 1565-1570.
- Domínguez, Patricia N.; Vidal, Marta C. y Cortínez, Víctor H. (2009). “Diseño óptimo de redes de transporte urbano considerando aspectos medioambientales”. *Mecánica Computacional Vol. XXVIII*, 2599-2624.
- Gaja Díaz, E. (1984). “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.
- González, Alicia E. (2000). “Contaminación sonora en ambiente urbano: optimización del tiempo de muestreo en Montevideo y desarrollo de un modelo predictivo en un entorno atípico”. Tesis doctoral, U. Montevideo, Uruguay.
- Ho, H.; Wong, S.; Loo, B. (2003). “A continuous traffic equilibrium model with multiple user classes”. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 5.
- Ho, H.; Wong, S.; Loo, B. (2006). “Combined distribution and assignment model for a continuum traffic equilibrium problem with multiple user classes”. *Transportation Research, B* 40, 633-650.

- Ho, H.; Wong, S. (2006). "Two dimensional continuum modeling approach to transportation problems". *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology* 6, 53-72.
- Li, B.; Tao, S.; Dawson, R.; Cao, J.; Lam, K. (2002). "A GIS based road traffic noise prediction model". *Applied Acoustics* 63, 679-691.
- Sasaki, T.; Iida, Y.; Yang, H. (1990). "User equilibrium traffic assignment by continuum approximation of network flow". 11th International Symposium of Transportation and Traffic Theory, Yokohama, Japan, 233-252.
- Shaw, E. A.; Olson, N. (1972). "Theory of Steady-State Urban Noise for an Ideal Homogeneous City". *The Journal of the Acoustical Society of America* 51, 1781-1793.
- Sheffi, Yosef. (1984). "Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods". Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA.
- Sommerhoff, J.; Recuero, M.; Suárez, E. (2004). "Community noise survey of the city of Valdivia, Chile". *Applied Acoustics* 65, 643-656.
- Wardrop, J. G. (1952). "Some theoretical aspects of road traffic research". *Institution of Civil Engineers II* (1), 325-378.
- Wong, S.; Sun, S. (2001). "A combined distribution and assignment model for continuous facility location problem". *Annals of Regional Science* 35, 267-281.
- Wong, S.; Du, Y.; Sun, L.; Loo, B. (2006). "Sensitivity analysis for a continuum traffic equilibrium problem".