

DISEÑO DE REDES DE TRANSPORTE URBANO SUSTENTABLE

SUSTAINABLE URBAN TRANSPORT NETWORK DESIGN

Patricia N. Dominguez^{a,b}, María L. Peinado^{a,b}, Víctor H. Cortínez^{a,b,c}

^a Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada, Facultad Regional Bahía Blanca,
Universidad Tecnológica Nacional, 11 de abril 461, Argentina; vcortine@hotmail.com

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

^c CONICET

Palabras clave: *Tráfico urbano, algoritmo Physarum, contaminación atmosférica, programación bi-nivel.*

Resumen. En este trabajo se propone una optimización bi-nivel para diseñar la modificación de una red de transporte urbano que contemple, simultáneamente, la mejor solución para el funcionamiento de la red completa (óptimo de sistema) y garantice a cada conductor el tiempo mínimo para realizar su viaje entre puntos de la ciudad (equilibrio de usuario). Para resolver el equilibrio de usuario se utiliza el algoritmo Physarum y para la optimización del sistema, la técnica metaheurística Recocido Simulado. Se tiene en cuenta el aspecto ambiental mediante restricciones en la emisión de contaminantes. Se presenta la formulación matemática y se muestra un ejemplo de aplicación.

Keywords: *Urban traffic, Physarum algorithm, atmospheric pollution, bi-level programming.*

Abstract. In this work, a bi-level optimization approach is proposed for designing modifications to an urban transport network that simultaneously considers the best solution for the overall network operation (system optimum) and ensures that each driver experiences the minimum travel time between city points (user equilibrium). To address the user equilibrium, the Physarum algorithm is employed, while the metaheuristic technique of Simulated Annealing is used for system optimization. Environmental aspects are taken into account through constraints on pollutant emissions. The mathematical formulation is presented, and an application example is provided.

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. Entre ellos, un problema creciente en las grandes ciudades es la congestión de tráfico y sus consecuencias inmediatas como son el ruido y la contaminación atmosférica. Si bien el avance de la tecnología resulta en vehículos cada vez menos contaminantes, el alto número de ellos hace que el problema no solo permanezca vigente sino que se agrave. Asimismo, el aumento del tiempo de viaje deriva en costos no solo a nivel salud y medioambiental, sino económicos. Por estas razones, se ha trabajado intensamente en el diseño de redes de transporte que contemplen simultáneamente el problema ambiental (Wang et al., 2022; Wang et al., 2023; Saravjeet et al., 2023).

Siendo éste un problema que afecta a toda la sociedad, la idea fundamental para resolverlo se basa en la aplicación de principios que atañen al comportamiento de la red entera. Sin embargo, los conductores de vehículos particulares tienden a elegir sus propias rutas sin considerar el efecto global. Por esta razón, en este trabajo se propone la optimización de una modificación de una red de transporte existente atendiendo tanto a los intereses sociales como a los particulares de los usuarios (Poorzahedy y Rouhani, 2007; Dominguez, 2013; Ferro et al. 2020).

La estructura matemática para resolver este tipo de enfoque es compleja pues lleva a problemas no convexos caracterizados por la presencia de muchos mínimos locales, razón por la cual en este trabajo se utiliza una técnica heurística, Recocido Simulado, para la optimización de las variables de diseño.

Por otra parte, para el cálculo de la estimación de flujos vehiculares y tiempos de viaje, de acuerdo a las elecciones de los usuarios, que es necesario realizar en cada paso de la optimización, se utiliza un algoritmo desarrollado a partir de una analogía con el comportamiento del organismo unicelular *Physarum Policephalum*. Tal organismo utiliza siempre los caminos más cortos en la búsqueda de fuentes de alimentación. El algoritmo ha sido ampliamente utilizado para resolver problemas de rutas mínimas (Tero et al., 2007), reducción de costos en redes de transporte y comunicaciones terrestres y, posteriormente, al problema de asignación clásico de Beckmann basado en flujos (Zhang, 2018; Xu et al., 2018). Asimismo, los autores han desarrollado recientemente una extensión del enfoque (Cortínez y Dominguez, 2018, 2021) para resolver el problema de asignación de tráfico en redes congestionadas basada en tiempos de viaje (Cortínez y Dominguez, 2017).

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Se estudia el tráfico en una ciudad, a una hora determinada del día (estado estacionario), que puede ser la hora pico, durante la cual se produce congestionamiento en muchas de las arterias o calles de la misma. La red de tráfico se representa esquemáticamente como un grafo dirigido de nodos j ($j=1,2,\dots, Nn$), que representan centros de zonas y que constituyen los orígenes y destinos de viajes, y un grupo de arcos a ($a=1,2,\dots, Na$) que conectan dichos nodos y representan la disponibilidad vial y posibilidad de movimiento vehicular entre dichas zonas (Figura 1). Se considera que

existe la posibilidad de modificar la capacidad C (veh/h) de ciertos tramos de la red para mejorar la circulación. El problema consiste, entonces, en determinar esas capacidades de manera que se cumplan dos objetivos simultáneamente: a) lograr el menor tiempo de utilización de la red de transporte por la totalidad de los usuarios, conocido como “óptimo de sistema” (OS), o segundo principio de Wardrop, y b) asegurar a cada conductor el tiempo mínimo de viaje entre puntos de la ciudad, conocido como “Equilibrio de usuario” (EU) o primer principio de Wardrop (Sheffi, 1985). Asimismo, se deben garantizar ciertas restricciones de diseño en cuanto a los valores de tales capacidades y, simultáneamente, asegurar que la emisión de contaminantes en cada arco no supere valores admisibles.

Las soluciones obtenidas en la resolución de cada uno de los problemas, OS y EU, no convergen a patrones de flujo iguales cuando las redes están congestionadas. En este punto es fundamental tener en cuenta que los usuarios toman sus decisiones en cuanto a la elección de ruta priorizando su propio beneficio (EU), que generalmente implica minimizar su tiempo de viaje. Por otra parte, el “óptimo de sistema” (OS) sólo es utilizado 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. De acuerdo a esto y debido a que se persiguen dos objetivos, que pueden ser contrapuestos, en este trabajo se propone resolver el problema mediante una formulación bi-nivel que trata el diseño de las modificaciones en el nivel superior utilizando el OS pero contemplando el EU en el nivel inferior. Matemáticamente esto se expresa de la siguiente manera:

$$\min F(\mathbf{C}) = \sum_a \bar{g}_a^* t_a^* (\bar{g}_a^*, C_a) \quad (1a)$$

s.a.:

$$C_a^{\min} \leq C_a \leq C_a^{\max} \quad (1b)$$

$$E_a(\bar{g}_a^*, V_a^*(\bar{g}_a^*)) \leq E_a^{\text{adm}} \quad (1c)$$

$$\bar{g}_a^* \in \Lambda(C_a, \bar{g}_a) \quad (1d)$$

donde F es la función a minimizar, en este caso el tiempo empleado por todos los usuarios de la red de transporte en toda la ciudad (OS), \mathbf{C} es el conjunto de las capacidades de las rutas a utilizar, que constituyen las variables de diseño y están sujetas a la restricción (1b) en cada tramo, \bar{g}_a^* y t_a^* corresponden al flujo (veh/h) y al tiempo de recorrido (h) en cada arco a de la red. Estos últimos se obtienen de la solución del problema de equilibrio de usuario $\Lambda(C_a, \bar{g}_a)$ (restricción 1d) que se detalla en la sección 2.1 y, finalmente, E_a alude a la emisión de algún tipo de contaminante, que depende de la velocidad de circulación en el arco $V_a^*(\bar{g}_a^*)$ y está limitada por valores admisibles de acuerdo a la restricción (1c).

A continuación, en la sección 2.1 se describe el modelo de tráfico urbano que brinda solución al problema de equilibrio de usuario y en la sección 2.2 se detalla el modelo de contaminación atmosférica.

2.1 Modelo de tráfico urbano: Enfoque Physarum.

El problema de asignación de tráfico de acuerdo al EU consiste en predecir el flujo de vehículos por hora en cada tramo de la red de transporte \bar{g}_a (veh/h) a partir del conocimiento de la tasa horaria de generación de viajes q_j^d (veh/h) en cada nodo j de la red hacia los diferentes destinos d ($d=1,2,\dots,Nd$) y de la topología de la red (capacidades,

velocidades máximas permitidas, sentidos de circulación). Se asume que cada arco tiene un sentido de circulación obligatorio, definido mediante $\bar{\lambda}_{ij}$ que es igual a 1 si el sentido de circulación es de i hacia j y -1 si va en sentido contrario (Figura 1c). Asimismo, se pretende obtener los tiempos de viaje u_j^d (h) desde cada nodo j al destino d . Si bien la forma clásica de formular este problema es como uno de optimización (formulación de Beckman), aquí se sigue un procedimiento alternativo que conduce a un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales.

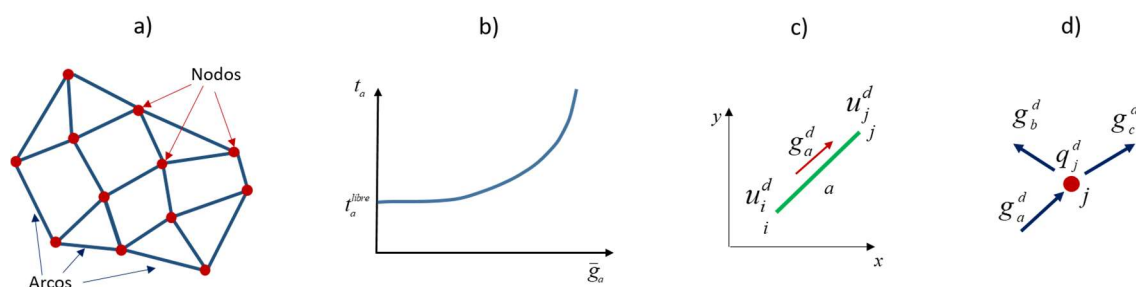


Figura 1: a) Esquema básico de una red de transporte, b) función de costo en un arco, c) un arco entre nodos y d) flujos concurrentes en un nodo de la red.

El efecto de la congestión de tráfico urbano se puede medir a través del tiempo necesario t_a (h) para transitar un segmento de ruta (por ejemplo, una cuadra). Se determina empíricamente que, en general, este tiempo aumenta conforme lo hace el flujo horario de vehículos por tal tramo (Figura 1b). La expresión analítica, denominada generalmente “función de costo”, tiene la siguiente forma (Cortínez y Dominguez, 2017):

$$t_a = H_a(\bar{g}_a) \quad (2)$$

Existen diferentes fórmulas empíricas para la función H_a , tal como la conocida fórmula BPR (Sheffi, 1985). En un arco a el flujo total \bar{g}_a puede expresarse como la suma del flujo g_a^d hacia los diferentes destinos d , circulando por el mismo arco:

$$\bar{g}_a = \sum_{d=1}^{Nd} g_a^d \quad (3)$$

Según el primer principio de Wardrop se puede expresar el tiempo de viaje u^d desde un punto genérico (x,y) del entramado urbano como $u^d = u^d(x,y)$, siendo por definición $u^d(x_d, y_d) = 0$, donde x_d e y_d corresponden a las coordenadas del destino d . En consecuencia, el tiempo de recorrido del tramo para un conductor dirigiéndose hacia un destino d será igual a la diferencia que adopta $u^d(x,y)$ en los puntos inicial y final del mismo, i y j respectivamente (Figura 1c), es decir:

$$t_a = t_a^d = u_i^d(x_i, y_i) - u_j^d(x_j, y_j), \quad u_i^d > u_j^d \quad (4)$$

Debe observarse que t_a^d es la expresión del tiempo de circulación en el arco a calculado a partir del tiempo de viaje total (función potencial) correspondiente al destino d , sin embargo, su valor será el mismo para todos los conductores circulando por el mismo arco, cualquiera sea el destino considerado, es decir, en equilibrio $t_a = t_a^d$.

Para formular el problema de asignación de tráfico debe considerarse, además de las

relaciones previas, la ley de conservación de vehículos, es decir que la cantidad de vehículos entrando y saliendo de un nodo es una cantidad conservativa. Por lo tanto, es posible formular las siguientes ecuaciones de continuidad para cada uno de los nodos de la red.

$$\sum_{a \in M_j} \pm g_a^d + q_j^d = 0 \quad j = 1, 2, \dots, Nn \quad d = 1, 2, \dots, Nd \quad (5)$$

donde M_j corresponde a la cantidad de enlaces vinculados al nodo j (Figura 1d). En (5) el signo + (-) se aplica cuando los flujos entran (salen). Si se multiplica y divide el primer término de (5) por t_a y considerando (4) en el numerador, se obtiene la siguiente expresión:

$$\sum_{i \in P_j} \xi_a^d \frac{g_a^d}{H_a (\sum g_a^d)} (u_i^d - u_j^d) + q_j^d = 0, \quad \xi_a^d = \begin{cases} 1 & \bar{\lambda}_{ij} (u_i^d - u_j^d) > 0 \\ 0 & \bar{\lambda}_{ij} (u_i^d - u_j^d) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

donde P_j corresponde al conjunto de nodos i vinculados al nodo j . El coeficiente ξ_a^d se ha incorporado en (6) para asegurar que el tiempo de viaje decrezca en la dirección permitida (esto sustituye los signos + y - de la ecuación (5)). Debe observarse que por consistencia entre (5) y (6) es posible expresar la siguiente identidad:

$$g_a^d = \xi_a^d \frac{g_a^d}{H_a (\sum g_a^d)} (u_i^d - u_j^d) \quad (7)$$

El sistema (6-7) junto con las condiciones $u^d(x_d, y_d) = 0$, constituye el sistema gobernante algebraico no lineal con $Nd(Nn+Na)$ incógnitas: g_a^d y u_j^d . Una vez resuelto tal sistema, se pueden obtener los tiempos de viaje en cada arco t_a a partir de (4) y luego invirtiendo (2), obtener los flujos totales en cada arco $\bar{g}_a = G_a(t_a)$.

Existen, en principio, diferentes maneras de resolver el sistema de ecuaciones (6-7). Una de las dificultades que presenta el sistema reside en el hecho de que si algunos arcos están descongestionados, el tiempo de arco tiende al de flujo libre, el flujo \bar{g}_a tiende a cero y entonces, el sistema queda indeterminado. Por consiguiente, se hace uso de un enfoque iterativo que puede trabajar adecuadamente aún ante la existencia de arcos descongestionados. El método seleccionado para tal fin es similar al Modelo Physarum (Xu et al., 2018). Los autores (Cortínez y Dominguez, 2018; Dominguez et al., 2021) han demostrado recientemente que dicha analogía corresponde a una solución iterativa del sistema (6-7) que transforma el problema no lineal en una sucesión de problemas lineales. Tal metodología se basa en aproximar en tal sistema $g_a^d \xi_a^d$ por D_a^d y F_a por L_a . En consecuencia, el sistema (6-7) se expresa aproximadamente como:

$$\sum_{i \in P_j} \frac{D_a^d}{L_a^d} (u_i^d - u_j^d) + q_j^d = 0, \quad (8)$$

$$g_a^d = \frac{D_a^d}{L_a^d} (u_i^d - u_j^d) \quad (9)$$

La expresión (8) corresponde a un sistema de ecuaciones lineales, para cada destino d . Una vez resuelto este sistema para cada centro d (habiendo impuesto previamente las

condiciones $u^d(x_d, y_d) = 0$), los flujos en cada tramo a dirigiéndose hacia d pueden ser obtenidos en función de u_i^d mediante las expresiones (9). Éstas, constituyen nuevas aproximaciones para los flujos de tramo por lo que se las notará como $g_a^{d,nueva}$. De la misma manera, con los u_i^d obtenidos se actualizan ξ_a^d que se denominan $\xi_a^{d,nueva}$. Siguiendo ahora, la idea del modelo Physarum se actualizan D_a^d y L_a de la siguiente manera:

$$D_a^{d,nueva} = (D_a^d + \xi_a^{d,nueva} g_a^{d,nueva}) / 2 \quad (10)$$

$$L_a^{nueva} = \left(L_a + F_a \left(\sum_d g_a^{d,nueva} \xi_a^{d,nueva} \right) \right) / 2 \quad (11)$$

Se debe observar que la sumatoria $\sum_d g_a^{d,nueva} \xi_a^{d,nueva}$ corresponde a los flujos totales actualizados \bar{g}_a . Con (10) y (11) se actualizan los sistemas (8) y (9) y se itera hasta convergencia. La solución obtenida de esta manera constituyen los flujos \bar{g}_a^* de la ecuación (1a).

2.2 Modelo de emisiones

El tráfico vehicular es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica en áreas urbanas. El aumento del número de vehículos y el tráfico congestionado contribuyen a la emisión de diversos contaminantes primarios (NO_x, SO₂, 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.

Una vez obtenidos los flujos vehiculares \bar{g}_a y los tiempos de circulación t_a se pueden calcular las velocidades de circulación V_a y luego, evaluar la emisión de un determinado contaminante en cada arco mediante:

$$E_a = \bar{g}_a l_a FE(V_a) \quad (12)$$

donde l_a (km) es la longitud del arco y FE un factor de emisión por kilómetro, de cada vehículo circulando por el tramo a . El factor de emisión FE depende del tipo de contaminante, del tipo de combustible, del tipo de motor y, fundamentalmente, de la velocidad media de circulación en el arco V_a (km/h), existiendo diversas fórmulas empíricas en tal sentido. Este enfoque tipo "bottom-up" permite una evaluación detallada y precisa de las emisiones al considerar las características específicas de los vehículos, de los conductores y de las condiciones de las calles, y es fundamental para comprender y abordar la contaminación del aire relacionada con el tráfico y desarrollar estrategias para su reducción.

3 SOLUCIÓN COMPUTACIONAL DEL PROBLEMA

Para la resolución del problema general, en este trabajo se utilizó la técnica de optimización meta-heurística "Simulated Annealing" (SA) o "Recocido Simulado". El algoritmo comienza con una solución inicial factible y genera a partir de ella nuevas soluciones en cada paso haciendo pequeñas modificaciones sobre la actual. Si las nuevas

soluciones cumplen las restricciones de diseño impuestas, se calculan los flujos y tiempos de viaje mediante el algoritmo Physarum descrito en la sección 2.1 y se verifica la restricción sobre las emisiones. Si la solución en cada iteración es factible, se evalúa la función objetivo. Si la nueva configuración disminuye el valor de la función objetivo (1a) la solución se acepta y se adopta como nueva solución, y si no, se acepta con una probabilidad $K = e^{-(\Delta F/T)}$, donde ΔF corresponde a la diferencia de la función objetivo entre el paso anterior y el actual 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. El algoritmo continúa generando y evaluando soluciones hasta que se cumple un número máximo de iteraciones o se alcanza un cierto valor de convergencia. La aceptación de soluciones “no mejores” permite al algoritmo no quedar estancado en mínimos locales. El esquema completo de solución del problema es el que se muestra en la Figura 2 y en este trabajo, toda la implementación computacional del mismo se realizó en Matlab.

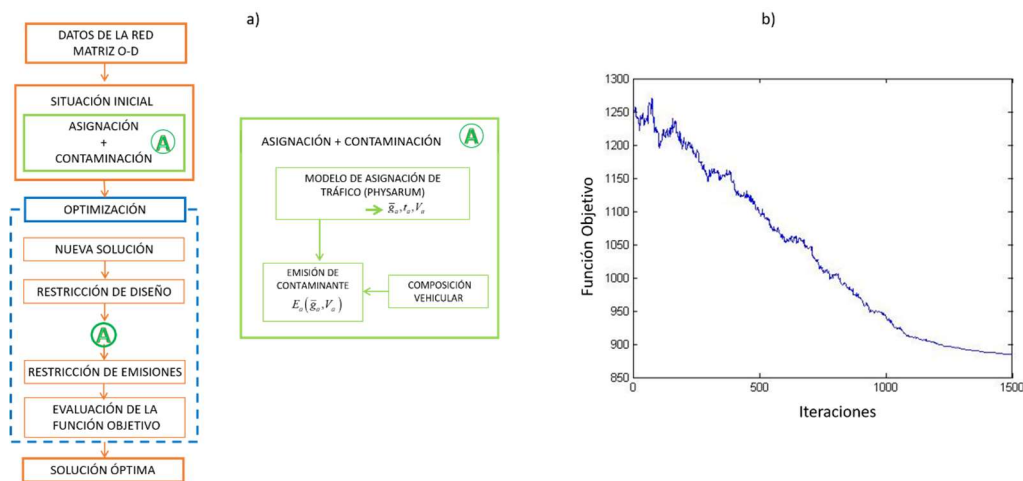


Figura 2: a) Diagrama de flujo del programa bi-nivel, b) Convergencia de la Función Objetivo (SA).

4 EJEMPLO NUMÉRICO

4.1 Descripción de la red original

Para ejemplificar la metodología descrita, el modelo se aplica a una red pequeña compuesta por 12 nodos, que pueden ser orígenes y destinos de viajes y 50 arcos (entre cada par de nodos existen 2 arcos, ij y ji) cuyas longitudes (en km) se muestran, entre paréntesis en la Figura 3a). Se adoptó la función de tiempo de viaje BPR $t_a = l_a / V_a (1 + 0.15(\bar{g}_a / C_a)^4)$ donde, en principio, las capacidades C_a de todos los arcos se fijaron en 800 veh/h menos en los tramos 7-8, 6-2, 4-3 y 6-3 donde se fijaron en 1000 veh/h . La velocidad de circulación a flujo libre (sin congestión) es, para todos los arcos, de 60 km/h . En la Figura 3b) se muestran las tasas de generación de viajes (veh/h) entre nodos. Para estimar la emisión de contaminantes, se adoptó, a manera de ejemplo, un solo tipo de vehículo gasolero Euro I y un solo tipo de contaminante, monóxido de carbono (CO) cuyo factor de emisión es $FE = 0.996 - 0.0188V + 0.000109V^2$ ($gr/veh/km$) (EMEP/CORINAIR).

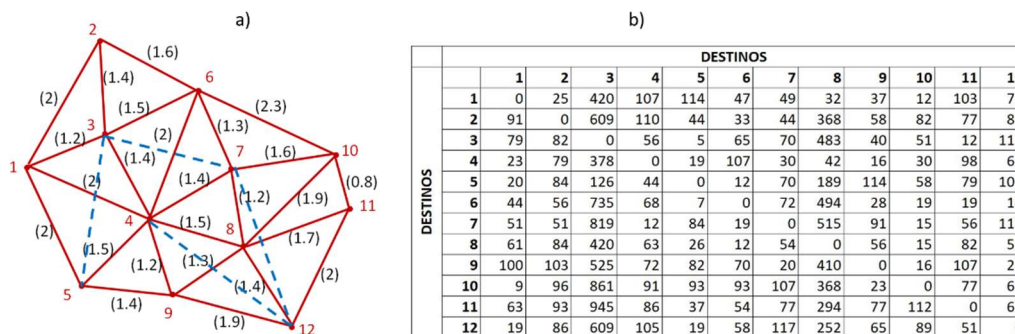


Figura 3: a) Esquema de la red de tráfico y b) matriz origen y destino de viajes.

4.2 Análisis de la situación original y modificaciones intuitivas

La situación original de la red que se estudia presenta la mayor congestión en los enlaces entre los nodos 3-4, 2-6, 7-8, 4-3, 6-3, 2-3, 6-2, 9-5, 5-1 y 1-3, entre otros, donde en muchos de ellos los flujos vehiculares superan en más de un 20% (límite aceptable) la capacidad del arco (Figura 4a). Esto, como ya se ha mencionado anteriormente, genera un aumento del tiempo de recorrido de los arcos y disminución de las velocidades (Figura 4b). Debido a que las emisiones de CO son mayores a bajas velocidades (hasta aproximadamente 60 km/h), se busca que las velocidades se aproximen a ese valor, lo que también disminuye el tiempo de recorrido de los tramos. Una solución intuitiva es ampliar el número de arcos, creando nuevas conexiones entre los nodos, de manera de generar la elección por parte de los usuarios de rutas alternativas y de esta manera aliviar el flujo en los arcos existentes y recuperar velocidad. Siguiendo esta idea, se pretende incorporar ocho nuevos enlaces en ambos sentidos entre los nodos 3-7, 7-12, 4-12 y 3-5 (líneas punteadas en la Figura 3a) y se fijó la capacidad de los mismos en 800 veh/h. Los resultados obtenidos para estas configuraciones intuitivas se pueden ver en la Figura 4.

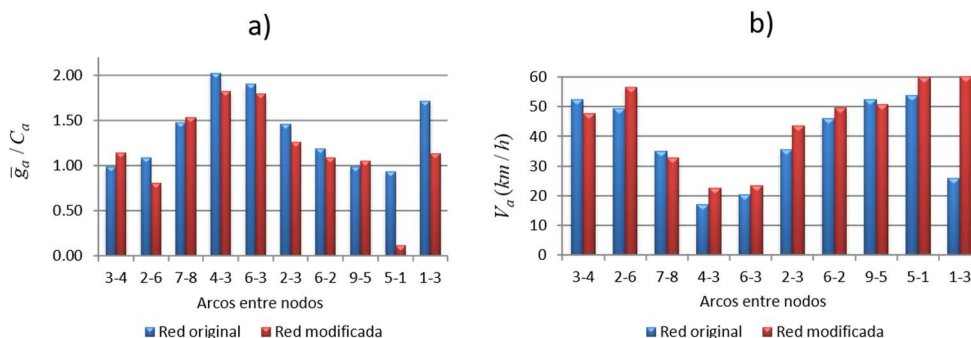


Figura 4. Comparación entre valores de la red original y la ampliada: a) Relación flujo/capacidad, b) Velocidades de circulación en los arcos.

Con la solución propuesta no se logra el objetivo de descongestionar los arcos mencionados, donde la relación entre el flujo y la capacidad, como se ve en la Figura 4a) no tiene una mejora sustancial. En el arco 5-1 el flujo cae a un valor muy bajo, mostrando que el link queda casi inutilizado. Además, se genera congestión en siete links adicionales no mostrados en la figura (8-4, 11-8, 6-10, 10-7 y 11-10, 7-3 (nuevo)) donde en algunos de ellos la capacidad se supera por el 50%. Lo mismo puede observarse con respecto a la variación de las velocidades, los cambios no son significativos, ya que solo en dos arcos, el 1-3 y el 5-1, se logra llegar al valor de velocidad a flujo libre. Con los cambios propuestos, las emisiones totales en la red disminuirían aproximadamente un 8%, valor que no resulta significativo en relación al alto costo que implica la construcción de nuevas

rutas. Como se puede apreciar, añadir arcos entre nodos que no estaban conectados, intuyendo como podría redistribuirse el tráfico para llegar a destino no basta para producir cambios (paradoja de Braess). En consecuencia es necesario trabajar sobre la totalidad de la misma, o en su defecto sobre una zona más amplia, para permitir que el tráfico se equilibre de una manera más beneficiosa. Modificar intuitivamente toda la red es una tarea sumamente compleja, de manera que la mejor solución es resolver el problema a través de una optimización involucrando la totalidad de los arcos.

4.3 Solución del problema de diseño

Por cuestiones de diseño los arcos que tienen la posibilidad de modificarse son los que unen los nodos: 1-3, 3-1, 1-4, 4-1, 4-5, 5-4, 4-9, 9-4, 8-9, 9-8, 7-8, 6-2, 3-2, 6-3, 8-4, 10-6, 6-7 y 10-11. No siempre resulta fácil de llevar a la práctica el aumento de las capacidades de las calles. Si el arco cuenta con carril de estacionamiento una forma sencilla y económica es por ejemplo quitar esa posibilidad. Otra manera es cambiar el sentido a uno de los carriles en determinado horario. Como restricción de diseño en cada arco se establecieron los siguientes límites a la capacidad $0.5C_a^{original} \leq C_a \leq 2C_a^{original}$ y como restricción de emisión en cada arco $E_a \leq 2kg/h$. En la programación de SA se eligió que cada nueva solución propuesta varíe solamente tres de los links mencionados en forma aleatoria. El tiempo de cálculo para cada interacción de SA con 50 iteraciones del método Physarum en cada una de ellas fue de 0.8 segundos. Se realizaron varias corridas para verificar la convergencia del método que fue en todos los casos satisfactoria. Una de estas corridas puede verse en la [Figura 2 b\)](#).

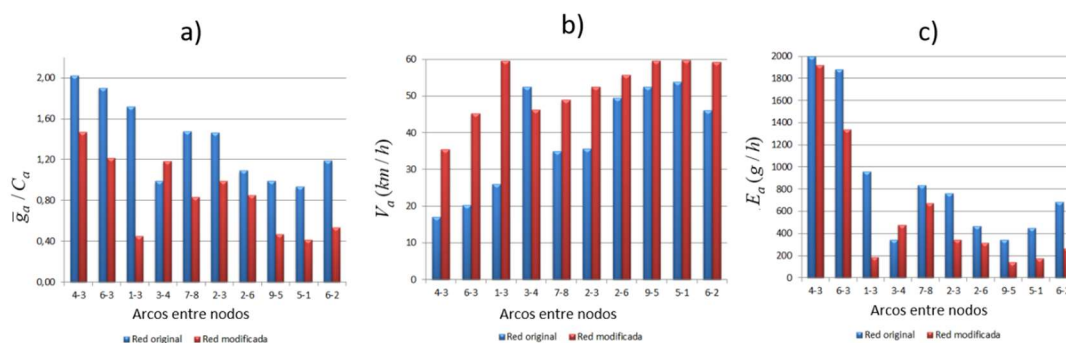


Figura 5: Comparación entre valores de la red original y la optimizada: a) Relación flujo/capacidad, b) velocidades medias y c) emisiones de CO.

Como resultado de la optimización, la FO disminuyó un 30% con respecto a la situación inicial, es decir, la permanencia en la red de la totalidad de los usuarios, bajó en ese porcentaje, lo que implica menores tiempos de viaje y menor emisión total en la red, que disminuyó un 17%. Obviamente, sobre los arcos modificados, la mejora es más evidente tal como se puede ver en la [Figura 5](#). En la [Figura 5a\)](#) se puede apreciar la disminución notable de la relación \bar{g}_a / C_a en la mayoría de los arcos modificados aunque aún se mantienen algo congestionados algunos de ellos. Sin embargo, en esos links más comprometidos, se logró aumentar la velocidad de circulación en el orden del 100%, siendo el incremento promedio en el resto de los arcos en estudio del 35%. Directamente relacionado con esto, el tiempo de recorrido de dichos arcos t_a (resultados no mostrados aquí) se redujo en igual proporción. En el mismo sentido, como la velocidad influye directamente en la emisión de contaminantes gaseosos, ya que el factor de emisión sigue una función cuadrática de la misma, cuyo mínimo está alrededor de los 60 km/h , las emisiones bajaron en un 33% en esos arcos y solamente en el arco 4-3 la emisión aumentó

ligeramente.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto una optimización bi-nivel para diseñar la modificación de una red de transporte urbano que contemple, simultáneamente, dos objetivos que pueden ser contrapuestos tales como el mejor comportamiento global de la red y las elecciones de rutas de los usuarios particulares. Se utilizó el algoritmo Physarum para resolver el problema de asignación de tráfico y la técnica metaheurística Recocido Simulado para la optimización, que contempló tanto restricciones de capacidad como de emisión de contaminantes. Como se ha mostrado en el ejemplo, la metodología propuesta resulta eficiente para el diseño de redes congestionadas.

6 BIBLIOGRAFIA

- Cortínez, V.H. y Dominguez, P.N. An anisotropic continuum model for traffic assignment in mixed transportation networks. *Applied Mathematical Modelling* 50, 340-350, 2017.
- Cortínez, V.H. y Dominguez, P.N. Una nueva interpretación del modelo Physarum para el problema de asignación de tráfico en equilibrio de usuario. *Mecánica Computacional* XXXVI, 2089-2098, 2018.
- Cortínez, V.H. y Dominguez, P.N. A finite element approach for the traffic assignment problem. *Transportation Research Procedia* 58, 13–20, 2021
- Dominguez, P. N. “Un nuevo modelo continuo de asignación de tráfico para el diseño óptimo de redes de transporte urbano” Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur, 2013.
- EMEP/CORINAIR <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>.
- Ferro, G., Miniardi, R., Parodi, L. y Robba, M. Optimal planning of charging stations and electric vehicles traffic assignment: a bi-level approach. *IFAC PapersOnLine* 53-2, 13275-13280, 2020.
- Poorzahedy, H., Rouhani, O., Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem. *European Journal of Operational Research* 182:578-596, 2007.
- Sheffi, Y., *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1985.
- Saravjeet, S., Jaiteg, S., Goyal, S., Sukhjit, S., Farman, A. Ayad Alkhafaji, M., Ramendra, S., A novel framework to avoid traffic congestion and air pollution for sustainable development of smart cities, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 56, 103125, 2023.
- Tero, A. Kobayashi, R. and Nakagaki, T. A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold. *Journal of theoretical biology* 244, 553-564, 2007.
- Wang, H., Sun, B. y Chen, L. An optimization model for planning road networks that considers traffic noise impact, *Applied Acoustics* 192, 108693, 2022.
- Wang, Y. y Zhong, H. Mitigation strategies for controlling urban particulate pollution from traffic congestion: Road expansion and road public transport, *Journal of Environmental Management* 345, 118795, 2023.
- Xu, S., Jiang, W., Deng, X. Y. y Shou, Y. A modified Physarum-inspired model for the user equilibrium traffic assignment problem, *Applied Mathematical Modelling* 55, 340-353, 2018.
- Zhang, X. A bio-inspired approach to traffic network equilibrium assignment problem. *IEEE Transactions on cybernetics*, 1304-1315, 2018.