

## Modelo origen destino para estimar el flujo de tráfico usando algoritmos genéticos

**Milton R. Aldás S.<sup>1,2</sup>, Marco J. Flores C.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Facultad de Diseño Arquitectura y Artes, Universidad Técnica de Ambato, Avenida los Chasquis y Calle Rio Payamino, Ambato, Ecuador, 18-01-334.

<sup>2</sup> Dirección de Tránsito y Movilidad, GAD Municipalidad de Ambato, Calle Valencia y calle Quis Quis, Ambato, Ecuador, 18-01-542.

<sup>3</sup> Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de la Fuerzas Armadas, ESPE, Gral. Rumiñahui s/n, Quito, Ecuador, PBX: 1171-5-231B.

Autores para correspondencia: mr.aldas@uta.edu.ec, mjflores@espe.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

### RESUMEN

En este trabajo se ha desarrollado un nuevo método basado en Inteligencia Artificial para resolver un problema del matriz origen-destino (O-D) aplicado al caso de una red de tráfico vehicular en la ciudad de Ambato. El método implementado, basado en algoritmos genéticos (AG), resuelve el problema de minimización asociado al problema de matriz O-D. Para validar la técnica, se ha utilizado una red vial correspondiente a la zona del Mercado Modelo en la ciudad de Ambato, que es una zona de alta congestión vehicular.

Palabras clave: Redes de tráfico, algoritmos genéticos, optimización.

### ABSTRACT

A new method, based on Artificial Intelligence for solving the Origin-Destination problem (O-D), was developed and applied to the vehicular traffic network of the city of Ambato. The method, based on genetic algorithms (GA), solves the minimization problem associated with the O-D problem. To validate the technique, it has been used the Mercado Modelo network from the Ambato city, which is an area of high vehicular traffic congestion.

Keywords: Traffic networks, genetic algorithms, optimization.

## 1. INTRODUCCIÓN

El tráfico vehicular es actualmente uno de los problemas que más influyen en la calidad de vida de los residentes urbanos. Este problema se ha acentuado en las últimas décadas en todo el Ecuador, debido al aumento de la venta de automóviles. En el caso de la ciudad de Ambato, su topografía y la creciente presencia de autos, sumados a la concentración de entidades públicas y privadas en ciertas zonas céntricas, la creciente actividad comercial de los mercados e industrias, la gran concentración de estudiantes alrededor de los centros educativos, etc., complican el tránsito. Por ello, el Cabildo se encuentra realizando estudios para implementar un sistema de transporte masivo municipal y decidir si éste puede operar en conjunto con los actuales buses de transporte público. Para la Dirección de Tránsito y Movilidad de Ambato (DTM Dirección de Tránsito y Movilidad, 2006), la prioridad actual es solucionar los problemas ocasionados por el aumento de autos en su territorio, de apenas 909,1 km<sup>2</sup>, en donde viven aproximadamente 220 mil personas. Las medidas propuestas se centran en la optimización del tráfico. Así, por ejemplo, el Plan de Ordenamiento Territorial de Ambato, proyectado

para 2020, posibilitaría que el centro de la ciudad, lugar de concentración de entidades públicas y privadas, sea más transitable para peatones y autos. Además, hace poco tiempo entró en operación un aparcamiento tarifado, para unos 5.000 vehículos, y en la actualidad se trabaja en un plan de semaforización centralizado o inteligente utilizando varias estrategias.

En la última década, el uso del auto particular ha ido en aumento, especialmente, en el casco urbano, donde confluyen el 74% de viajes diarios. Según registros de la Agencia Nacional de Tránsito de Tungurahua, se matricularon 25.510 autos en 2006; para el año 2011, la cifra subió a 50.000 vehículos; de los cuales, 400 son buses, 3.500 son taxis, 2.000 son camionetas y el resto corresponden a vehículos particulares, que son los que generan el problema de tráfico, aumentando los tiempos en el recorrido entre intersecciones, en especial, en el casco urbano de la ciudad.

Para solucionar este tipo de problemas, se propone construir un método para estimar el flujo de tráfico en la red de transporte de una parte de la ciudad de Ambato. El modelo servirá para predecir el tráfico, desviar su flujo, plantear proyectos de semaforización inteligente, etc. Como elemento esencial tenemos el problema de estimación de la matriz O-D, que es un problema frecuentemente discutido en la literatura del área de transporte (Tebaldi & West, 1998; Castillo, 2008), o en el área de comunicaciones e internet, (Vaton & Bedo, 2004; Zhang, 2006), etc.

En la Sección 2 se presenta la formulación matemática del problema de la matriz O-D. La Sección 3 está dedicada al estado de arte, y la Sección 4 presenta los AG y propone un método de solución para el modelo de la matriz O-D; al mismo tiempo, se presentan los resultados al aplicar este método sobre la red de transporte del Mercado Modelo de la ciudad de Ambato. Finalmente en la Sección 5 se presentan las conclusiones a las que se ha llegado en esta investigación.

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema de flujo de tráfico se puede describir a través de la matriz O-D (Vardi, 1996), representada por:

$$Y = AX \quad (1)$$

donde  $Y = (y_1, \dots, y_r)^t$  denota el vector fila que es número de enlaces, es decir, representa los conteos en las intersecciones de ingreso y salida de cada enlace.  $X = (x_1, \dots, x_c)^t$  es el vector columna de los pares origen-destino (O-D), que representan el flujo vehicular de cada ruta.  $A = (a_{ij})$  es la matriz de rutas definida por:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{el enlace } i \text{ forma parte de la ruta } j \\ 0 & \text{en otra forma} \end{cases} \quad (2)$$

En A sus filas ( $r$ ) representan los enlaces de la red y sus columnas ( $c$ ) representan los pares. Generalmente,  $r \ll c$  motivo por el cual, este sistema es altamente indeterminado (Vaton & Bedo, 2004), con tamaño del espacio de soluciones igual a  $c-r$ . En este tipo de problema, el objetivo es calcular el vector no observado X, que en términos de tráfico significa el número de vehículos que transitan de los orígenes a los destinos.

## 3. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, se han propuesto muchos métodos para la estimación de parámetros en la matriz O-D, usando métodos estadísticos y no estadísticos (Vaton & Bedo, 2004). En los primeros, se han utilizado, los métodos bayesianos y no bayesianos. La metodología propuesta por Tebaldi (1998), utiliza un enfoque bayesiano bajo un modelo Poisson. La dificultad de esta propuesta radica en que,

para inicializar el algoritmo es necesario partir de un punto cercano a la solución, punto que en la mayoría de problemas reales es difícil de encontrar. También Zhang (2006), ha utilizado una técnica basada en un enfoque de inversión bayesiana utilizando funciones aleatorias gaussianas y la expansión Karhunen-Loeve. Vaton & Bedon (2004) han utilizado el algoritmo de Gibbs, la descomposición de Tebaldi (1998) y el algoritmo EM para calcular una solución. Por último, (Cao *et al.*, 2000) han estudiado el problema de tiempo variante del tráfico, utilizando variables aleatorias con distribución normal y el método de máxima verosimilitud para la estimación de parámetros. Finalmente Zhang (2006) propone un método denominado problema lineal inverso.

En estos métodos es difícil inicializar el algoritmo, por ejemplo, Tebaldi (1998) dedica una sección a describir las dificultades que pueden surgir al tratar de utilizar su técnica en problema de un tamaño relevante, como el que se desarrolla en esta investigación.

#### 4. ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos son algoritmos de optimización que buscan sucesivamente la mejor solución de entre un conjunto de soluciones factibles, emulando la evolución biológica de la selección natural, utilizando las operaciones de selección, mutación y cruce (Haupt & Haupt, 2014; Cortez *et al.*, 2011). Estos algoritmos son parte de una familia denominada de meta-heurísticas, con la que se resuelven problemas de la forma:

$$\min \sum_{x \in T} F(x) \quad (3)$$

T satisface ciertas restricciones sobre S

es decir, este algoritmo busca una solución óptima para la función de coste,  $F(x)$ , bajo ciertas restricciones sobre un conjunto de soluciones S, para ello, utiliza el esquema de la Fig. 1 (Haupt & Haupt, 2004).

Las soluciones de algoritmos genéticos (AG) están en la forma definida por las condiciones del problema, de manera que se tiene los siguientes elementos:

##### A. Representación del gen

En este trabajo, un gen está representado por una matriz de tamaño 1 por c (número de columnas de A) compuesta de enteros que respetan las restricciones, dadas por (5). En la Tabla 1, se presenta un ejemplo de gen.

##### B. Población inicial y cromosoma

La población inicial está compuesta por un conjunto de genes que respetan las condiciones impuestas por (3) y son generadas con el método propuesto en A. El tamaño de la población, en la mayoría de casos, se elige experimentalmente de acuerdo al problema.

##### C. Función de coste

El propósito de cualquier AG es la búsqueda de la solución que minimice una función objetiva. El primer paso para resolver un problema con AGs es identificar esta función y las variables objetivo de las cuales deseamos encontrar sus valores óptimos.

La función de coste,  $F(X)$ , utilizada para resolver el problema de la matriz O-D es:

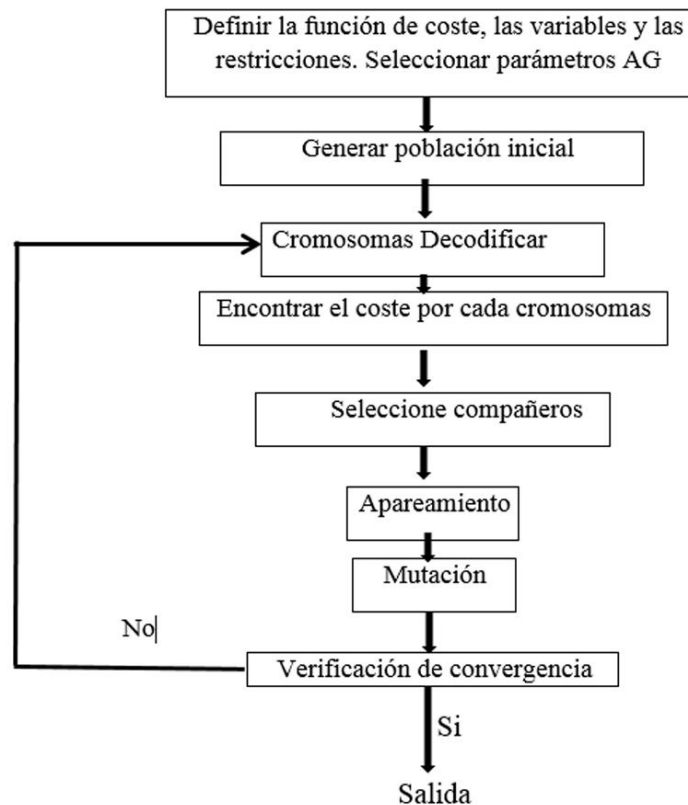
$$\min_X F(X) = \|Y - AX\|_2 \quad (4)$$

sujeto a la restricción:

$$X \geq 0 \quad (5)$$

donde el objetivo es encontrar la solución X que satisfaga las restricciones impuestas en (5).

Con la restricción se impide que se tenga un flujo de tráfico negativo, lo cual, violaría la realidad, de tener una calle al menos vacía.



**Figura 1.** Diagrama de flujo de un AG.

**Tabla 1.** Representación del gen.

24	15	12	17	5
----	----	----	----	---

#### D. Selección

El objetivo de la selección es crear una función de adaptación que permita dar selectividad al problema: los padres con mejor adaptabilidad deben tener más hijos, e inversamente, los padres con poca adaptabilidad deben tener pocos hijos.

Existen varias estrategias para la selección, que puede ser, por escalonamiento, por torneo, por ruleta, etc. (Haupt & Haupt, 2004). Para el propósito de este trabajo, cada individuo de la población tiene un peso proporcional a su importancia; de manera que, los individuos más importantes recibirán un mayor peso y, por ende, generarán más hijos en la siguiente generación.

#### E. Apareamiento

El apareamiento es la creación de uno o más hijos a partir, de los padres seleccionados en el proceso de emparejamiento. En problemas reales en los que se aplican los algoritmos genéticos, existe la tendencia a la homogenización de la población, es decir, a que todos los individuos de la misma sean idénticos. Esto impide que el algoritmo siga explorando nuevas soluciones, con lo que podemos quedar estancados en un mínimo local no muy bueno.

En el algoritmo, dos padres son elegidos y la descendencia es una combinación de estos padres. Los métodos más simples consiste elegir uno o más puntos en el cromosoma, y marcar es como a puntos de cruce. Entonces las variables se intercambian entre los dos padres. A efectos de ejemplo, supóngase que los dos padres son.

$$\begin{aligned} \text{padres}_1 &= [P_{m1}, P_{m2}, P_{m3}, P_{m4}, P_{m5}, P_{m6}, \dots, P_{mN_{var}}] \\ \text{padres}_2 &= [P_{d1}, P_{d2}, P_{d3}, P_{d4}, P_{d5}, P_{d6}, \dots, P_{dN_{var}}] \end{aligned} \quad (6)$$

Se selecciona los puntos de cruce al azar, y luego las secciones intermedias se intercambian:

$$\begin{aligned} \text{descendencia}_1 &= [P_{m1}, P_{m2}, \uparrow P_{m3}, P_{m4}, \uparrow P_{m5}, P_{m6}, \dots, P_{mN_{var}}] \\ \text{descendencia}_2 &= [P_{d1}, P_{d2}, \uparrow P_{d3}, P_{d4}, \uparrow P_{d5}, P_{d6}, \dots, P_{dN_{var}}] \end{aligned} \quad (7)$$

En la selección de puntos  $N_{var}$  y al azar la elección, los dos padres contribuirán su variable en cada posición. De esta manera, uno va por la línea de los cromosomas, en cada variable elegida al azar, y se intercambia información entre los dos padres. Este método se llama cruce uniforme:

$$\begin{aligned} \text{descendencia}_1 &= [P_{m1}, P_{d2}, P_{d3}, P_{d4}, P_{d5}, P_{m6}, \dots, P_{dN_{var}}] \\ \text{descendencia}_2 &= [P_{d1}, P_{m2}, P_{m3}, P_{m4}, P_{m5}, P_{d6}, \dots, P_{mN_{var}}] \end{aligned} \quad (8)$$

El problema con estos métodos es que con el punto de cruce no se introduce ninguna información nueva: cada valor continuo que se inició de forma aleatoria en la población inicial se propaga a la siguiente generación, sólo ya en diferentes combinaciones.

Los métodos de mezcla solucionan este problema mediante la búsqueda de formas de combinar los valores de variables de los dos padres en nuevos valores de las variables en la descendencia. Una sola muestra valor de la variable,  $P_{new}$  proviene de una combinación de los dos valores de la variable descendencia.

$$P_{new} = \beta P_{mn} + (1 - \beta) P_{dn} \quad (9)$$

donde:

$\beta$  = número aleatorio en el intervalo [0, 1]

$P_{mn}$  = Variable n en el cromosoma madre

$P_{dn}$  = Variable n en el cromosoma padre

#### F. Mutación

Se debe tener cuidado, el AG puede converger demasiado rápido en una región de la superficie de coste. Si esta área se encuentra en la región del mínimo global, es correcto. Sin embargo, algunas funciones, como la que estamos modelando, tienen muchos mínimos locales. Si no hacemos nada para resolver esta tendencia a converger rápidamente, podríamos terminar en un local en lugar de un mínimo global. Para evitar este problema de convergencia demasiado rápida, se fuerza la rutina a explorar otras áreas de la superficie de coste mediante la introducción de cambios al azar, o mutaciones, en algunas de las variables.

## 5. SOLUCIÓN DEL AG EN LA ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE TRÁFICO USANDO LA RED DEL MERCADO MODELO

**Tabla 2.** Datos de rutas para la red del mercado modelo de la ciudad de Ambato.

Xa	a(i,j)	Xa	a(i,j)
X <sub>1</sub>	75 – 74	X <sub>15</sub>	63 – 64, 64-73
X <sub>2</sub>	75-74,74 – 73	X <sub>16</sub>	63 – 64
X <sub>3</sub>	75-61, 61-62, 62 – 63, 63-64	X <sub>17</sub>	62- 74, 74-75
X <sub>4</sub>	75 – 74, 74-73,73-63	X <sub>18</sub>	62 – 74
X <sub>5</sub>	75 – 61, 61-62	X <sub>19</sub>	62-74, 74-73
X <sub>6</sub>	75 – 61	X <sub>20</sub>	62-63, 63-64
X <sub>7</sub>	74 – 75	X <sub>21</sub>	62 – 63
X <sub>8</sub>	74 – 73	X <sub>22</sub>	62 – 74, 74-75, 75-61
X <sub>9</sub>	74-75, 75-61, 61- 62, 62- 63, 63 - 64	X <sub>23</sub>	61 – 75
X <sub>10</sub>	74-73, 73-63	X <sub>24</sub>	61-75, 75-74
X <sub>11</sub>	74-75, 75-61,61-62	X <sub>25</sub>	61-75,75-74,74-73
X <sub>12</sub>	74-75, 75-61	X <sub>26</sub>	61-62, 62-63, 63-64
X <sub>13</sub>	73 – 63	X <sub>27</sub>	61-62, 62-63
X <sub>14</sub>	64 – 73	X <sub>28</sub>	61-62

**Tabla 3.** Estructura de los enlaces y flujos de tráfico del Mercado Modelo.

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27	X28
y1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
y2	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
y3	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
y4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y5	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
y6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y7	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
y8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
y9	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
y10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
y11	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0

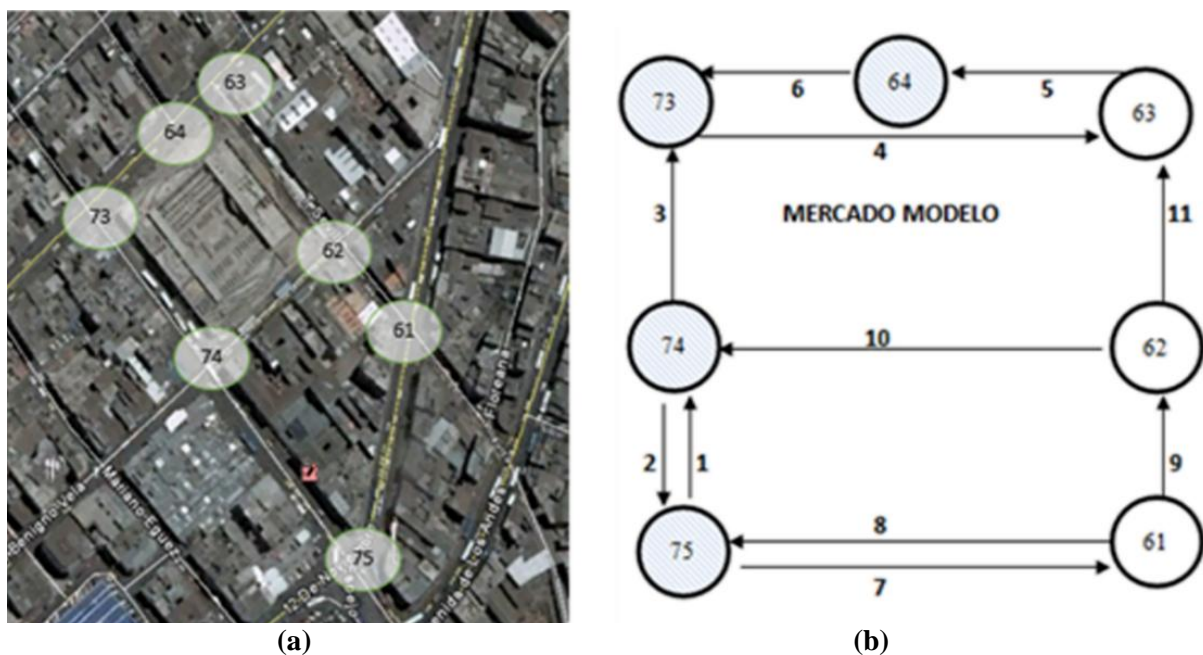
Para este trabajo se considera la red de flujo de tráfico del Mercado Modelo de la ciudad de Ambato. Esta zona tiene altos niveles de congestión y es un lugar donde confluyen muchos comercios, empresas de transporte, etc. La Fig. 2(a) indica la zona de estudio, y la Fig. 2(b) indica su grafo asociado, que representa la red del flujo de tráfico.

Los datos utilizados en este trabajo fueron tomados del día 10 de febrero del 2010 en el intervalo de 8:00, 8:15, 8:30, 8:45, horas, donde el flujo alcanzaba los mayores niveles de congestión. La Tabla 2 muestra las rutas (vector X).

Los flujos Y, en los once arcos se describirán más adelante en la Tabla 3. La matriz A, de incidencia de rutas, asociado a la de la Fig. 2(b), tiene 7 nodos y 11 arcos, de donde se obtiene, 42 (= 7\*6) pares O-D.

Sin embargo en la realidad, que no todos los 42 pares O-D son realizables o ciertos, por ejemplo, no es posible la ruta del origen 73 al destino 75 puesto que las calles tienen un sentido contrario. Por esto, sólo resultan 28 pares O-D válidos, los mismos que se describen en la Tabla 2.

Los parámetros del AG se presentan en la Tabla 4.



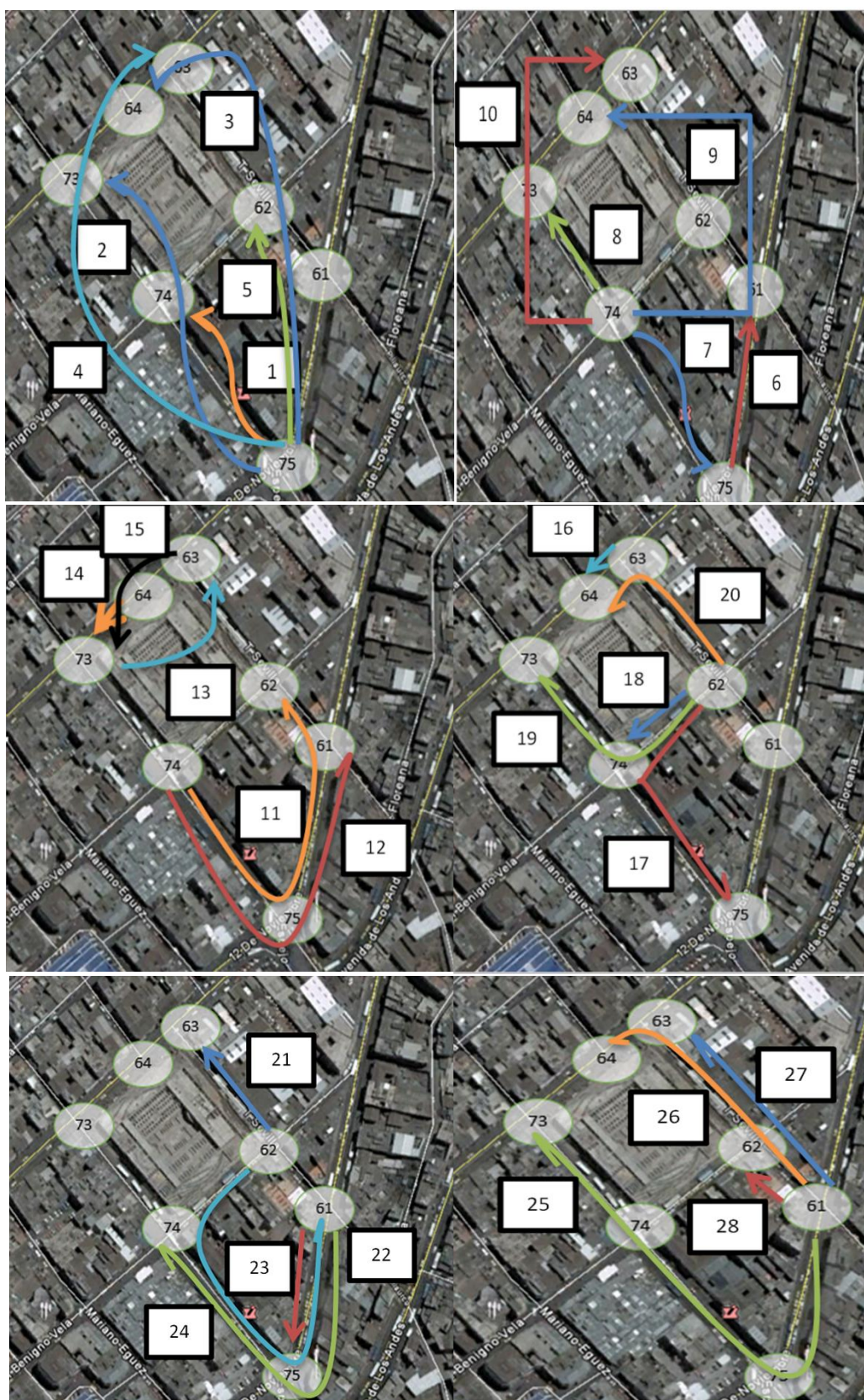
**Figura 2.** Red de transporte de la zona correspondiente al Mercado Modelo de la ciudad de Ambato, (a) mapa real, (b) red del flujo de tráfico.

**Tabla 4.** Parámetros del AG

Prob. Selección	0.3
Prob. Mutación	0.3
Prob. Apareamiento	0.5
Num. Generaciones	5000
Tam. Población	1000

La implementación computacional del AG se presenta en la Tabla 5. Para resolver el problema se ha utilizado un ordenador, con procesador Intel (R) Core (TM) i7-3612QM CPU @ 2.10 GHz, con 8 Gb de RAM. Los tiempos de cómputo para varias instancias de tiempo en la red de tráfico del Mercado Modelo se presentan en la Tabla 6.





**Figura 3.** Representación de las rutas (X) para el área de Mercado Modelo sobre el plano de la zona en estudio.



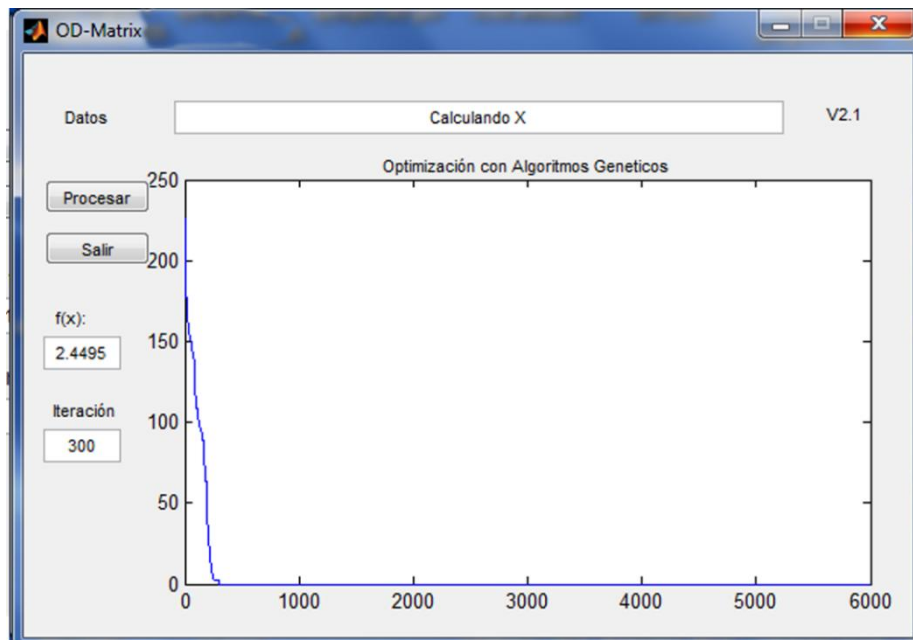
**Tabla 5.** Datos de enlace para la red del Mercado Modelo.

ENLACES		FLUJO DE DATOS EN HORAS PUNTA			
$Y_i$	$S_{(i,j)}$	8:00	8:15	8:30	8:45
Y1	75 - 74	199	187	184	190
Y2	74 - 75	53	48	70	53
Y3	74 - 73	156	144	142	131
Y4	73 - 63	182	158	186	140
Y5	63 - 64	130	160	168	134
Y6	64 - 73	121	146	149	121
Y7	75 - 61	196	193	182	199
Y8	61 - 75	209	197	208	214
Y9	61 - 62	57	49	80	57
Y10	62 - 74	268	213	222	265
Y11	62 - 63	34	39	66	44

**Tabla 6.** Iteraciones y tiempos empleados en el software del AG.

Valor optimo	Caso	# de iteraciones	Tiempo
2.45	8:00	300	1h40min
1.73	8:15	280	1h45min
2.65	8:30	300	1h50min
2.65	8:45	280	1h58min

El valor óptimo  $X$  se encuentra en la Tabla 6 y en la Fig. 4 se observa la evolución de la función de coste a lo largo de las generaciones, en el proceso de optimización.



**Figura 4.** Evolución de la función de coste.

En la Tabla 7 muestra la representación de la solución óptima como parte de los distintos enlace de la red del Mercado Modelo.

**Tabla 7.** Valor óptimo de x para el problema  $Y = AX$  usando AG.

RUTAS		FLUJOS DE DATOS CALCULADOS CON AG			
		8:00	8:15	8:30	8:45
X1	75-74	50	55	88	90
X2	75-73	1	35	7	17
X3	75-64	1	13	41	18
X4	75-63	48	19	45	11
X5	75-62	14	32	22	35
X6	75-61	127	100	48	93
X7	74-75	1	1	1	1
X8	74-73	61	111	59	83
X9	74-64	60	35	90	38
X10	74-63	1	1	1	1
X11	74-62	109	78	64	112
X12	74-61	105	88	87	101
X13	73-63	9	8	18	17
X14	64-73	21	15	3	6
X15	63-73	51	45	68	50
X16	63-64	1	41	1	30
X17	62-75	99	77	43	71
X18	62-74	1	1	1	1
X19	62-73	1	1	2	1
X20	62-64	1	1	1	1
X21	62-63	38	1	12	1
X22	62-61	1	1	1	1
X23	61-75	1	1	1	1
X24	61-74	1	1	2	1
X25	61-73	1	1	1	1
X26	61-64	1	1	1	1
X27	61-63	133	138	139	128
X28	61-62	58	102	16	59

## 6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para la interpretación de los resultados introduciremos varios conceptos, los mismos que ayudaran a comprender de mejor manera las soluciones del modelo matemático. De esta manera se facilitará el trabajo de planificación del tráfico.

- i. *Longitud de la ruta:* se definen dos tipos de rutas, corta y larga. Se dice que una ruta es corta cuando une dos nodos. Se dice que una ruta es larga cuando une tres o más nodos.
- ii. *Importancia de ruta:* se definen dos tipos de rutas, importante y no importante. Se dice que una ruta es importante si tiene transporte público, en al menos más de la mitad de su trayectoria. En caso contrario se denomina no importante.
- iii. *Relevancia de la ruta:* Se definen dos tipos de rutas, relevantes e irrelevantes. Se dice que una ruta es relevante si es importante y tiene alto tráfico, es decir transitan más de 50 vehículos. Se dice que una ruta es irrelevante si es no importante y tiene bajo tráfico, es decir, transitan a lo más 50 vehículos.

En una ciudad es deseable disponer de un buen sistema de transporte público para poder predecir o al menos sustituir el transporte privado, de ahí la definición dada en ii. La importancia del tráfico, en iv, se define en función en la experiencia en la DTM.

A continuación, utilizando estas definiciones, se pueden realizar las siguientes consideraciones respecto a las rutas más importantes:

- X<sub>1</sub> Es ruta corta, con alto tráfico, tiene transporte público, dispone de entrada a garaje privado, poco respeto a las señales de tránsito, se solucionan con cultura vial a conductores.
- X<sub>2</sub> Es ruta es larga, con bajo tráfico, tiene transporte público, por tanto puede recibir mayor capacidad de otras rutas. Es decir puede ayudar a equilibrar el tráfico en esta zona.
- X<sub>3</sub> Es ruta es larga, con poco tráfico, tiene transporte público, por tanto es no relevante y se podría usar para equilibrar el tráfico.
- X<sub>4</sub> Es ruta es larga, con tráfico público alto, es relevante e importante. El exceso de volumen de tráfico de esta ruta puede ser repartido a otras.
- X<sub>5</sub> Es ruta larga, con alto tráfico, tiene transporte público, dispone de paradas de buses, ingreso a centro artesanal y comercios, solución es desviar el tráfico hacia otras rutas.
- X<sub>6</sub> Es ruta corta, de tráfico alto, existen varias líneas de buses que hacen esta ruta, es relevante, hay mucha gente que utiliza esta ruta, la solución es desviar el tráfico hacia otras rutas.
- X<sub>8</sub> Esta ruta es corta, con tráfico alto, dispone de transporte público, es relevante, existen paradas de buses de transporte público e ingreso al garaje público Municipal. Para aliviar la congestión su tráfico puede ser reubicado en otras rutas.
- X<sub>9</sub> Es ruta larga, con alto tráfico, dispone de transporte público, existen paradas de buses de transporte público, e ingreso a garaje privado, para aliviar la congestión puede ser reubicado a otras rutas.
- X<sub>11</sub> Es ruta largo, con alto tráfico, tiene transporte público, dispone de ingreso al mercado artesanal, su tráfico debe ser reubicado a otras rutas.
- X<sub>12</sub> Es ruta larga, con alto tráfico, tiene transporte público, dispone de ingreso a garaje privado la solución es controlar el transporte privado.
- X<sub>17</sub> Es ruta corta, con alto tráfico, dispone de transporte público, existen para das para dos líneas de buses, hay mucha gente que realiza esta ruta, existe puertas de entrada y salida al Mercado Modelo la solución es desviar el tráfico hacia otras rutas.
- X<sub>18</sub> Es ruta corta, poco tráfico, dispone de transporte público, dispone de parada de buses.
- X<sub>27</sub> Es ruta larga, alto tráfico, no tiene transporte público, tiene parqueadero tarifado, la solución gestionar transporte público y eliminar el parqueadero tarifado.
- X<sub>28</sub> Es ruta corta, tráfico alto, no dispone de transporte público, tiene área de carga y descarga de productos, irrespetan señales horizontales y verticales, la solución es reubicar a otras rutas.

## 7. CONCLUSIONES

En la investigación se ha resuelto el problema de la matriz O-D mediante el uso de Algoritmos Genéticos, para la optimización del problema matemático subyacente. El método ha sido probado sobre la red de tráfico del Mercado Modelo de la ciudad de Ambato; los resultados permiten visualizar el flujo de tráfico en las rutas, en donde se produce la congestión de vehículos de transporte público. En el futuro se desarrollaran más experimentos, para solucionar redes de mayor tamaño, con el fin de construir un plan de mejora de la movilidad integral del casco urbano de Ambato.

## AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue desarrollado gracias al apoyo técnico del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipalidad de Ambato y de la Universidad Técnica de Ambato.

## REFERENCIAS

- Cao, J., 2000. Time-varying network tomography- Router Link Data. *Journal of the American Statistical Association*, 95(452), 1063-1075.
- Castillo, E., 2008. Traffic estimation and optimal counting location without path enumeration using bayesian networks. *Computer Aided and Infrastructure Engineering*, 23, 189-207.
- Cortez, C., W. Contreras, L. Mota, 2011. Análisis y Diseño de redes viales de transporte urbano usando algoritmos genéticos, Caso Lima Metropolitana. *Revista de Investigación de Sistemas e Informática (RISI)*, 8(2), 53-65.
- DTM Dirección de Tránsito y Movilidad, 2006. *Departamento encargado del control de tránsito de la Ciudad de Ambato*. Sección Técnica de Señalización Vial.
- Haupt, R.L., S.E. Haupt, 2004. *Practical genetic algorithms* (2ª ed.). John Wiley & Sons, Ltd., 261 pp.
- Tebaldi, C., M. West, 1998. Bayesian Inference on network traffic using link count data. *Journal of the American Statistical Association*, 93(442), 557-573.
- Vardi, Y., 1996. Network tomography: estimating source-destination traffic intensities from link data. *Journal of the American Statistical Association*, 91(433), 365-377.
- Vaton, S., J.S. Bedo, 2004. *Network traffic matrix: how can one learn the prior distributions from the link counts only*. IEEE International Conference on Communications Society, 2138-2142.
- Zhang, J., 2006. *Origin-destination network tomography with Bayesian Inversion approach*. IEEE/ACM International Conference on Web Intelligence, 8 pp.