

# **Un enfoque de lógica borrosa para el modelado de los flujos de pasajeros y el tiempo de parada**

**Aránzazu Berbey Álvarez**

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, República de Panamá. Aranzazu.berbey@utp.ac.pa

**Rony Javier Caballero George**

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, República de Panamá. Rony.caballero@utp.ac.pa

## **Abstract**

La estimación del flujo de pasajeros y el tiempo de parada en la estación constituyen importante tareas para la planificación de los sistemas de masivos de pasajeros. Sin embargo, los métodos clásicos son difíciles de aplicar para algunas aplicaciones prácticas. Este trabajo presenta un nuevo enfoque que modela el flujo de pasajeros y su efecto en los tiempos de abordaje y descenso de pasajeros en los sistemas de transporte masivos en presencia de incertidumbres. La técnica aplicada consiste en combinar el enfoque de las matrices origen destino con la aplicación de inteligencia artificial. El nuevo enfoque permite la inclusión de algún tipo de conocimiento intuitivo provisto a través de un motor de inferencia de lógica borrosa para predecir el flujo de demanda de los viajes de pasajeros, pasajeros descendiendo y abordando vagones en estaciones explícitas.

**Keywords:** modelado de flujo de pasajeros inferencia de lógica fuzzy, inteligencia artificial y incertidumbres.

## **1 INTRODUCCION**

Es bien conocido que el modelado del flujo de pasajeros es muy importante para evaluar no solo la efectividad de las instalaciones de las estaciones ferroviarias, sino también para el material rodante (Zhang et al, 2008). Este modelo refleja la influencia de estos dos factores en el proceso de abordaje y desabordaje de pasajeros en el tren. Por otro lado, es importante señalar que la estimación correcta del tiempo de parada es tan importante como las restricciones impuestas por la velocidad de la línea y la aceleración del tren (Harris, 2006).

El modelado del flujo de pasajeros ha sido abordado por muchos autores (Kikuchi et al, 1999),(Aldian and Taylor, 2003) ,(Watson and Prevedouros, 2006),(Cheng and Yang, 2009),(Berbey et al 2010). Para poder estimar el tiempo de parada, se han propuesto diferentes modelos. Mucho de estos involucran el calculo del flujo de pasajeros en el proceso de abordaje y descenso de pasajeros dentro de cada vagón del tren (Zhang et al, 2008), (Harris, 2006), (Harris and Anderson, 2007).

Sin embargo, se ha demostrado que esos métodos tienen limitaciones en ciertos espacios. Por tal motivo, los estudios de campo han demostrado que el flujo de pasajeros no es homogéneo entre las diferentes zonas de abordaje y descenso (Harris and Anderson, 2007), (Wiggenraad, 2001). Además, la distribución de este flujo de pasajeros ha probado ser no solo función del acceso a las instalaciones en la plataforma, sino además de la dinámica de interacción de diferentes grupos de personas, las cuales comparten un pequeño espacio (vestíbulo). El modelo de conducta de esos grupos humanos es complejo, debido a que este depende fuertemente de aspectos como el género, edad, profesión entre otros.

Existen muchos enfoques para modelar el comportamiento humano. Sin embargo, el uso de la lógica borrosa ha probado ser una herramienta prometedora porque esta integra fácilmente la experiencia del experto de planificación y el modelo de conducta de pasajeros (Aldian and Taylor, 2003),(Cheng and Yang, 2009),(Magnolo et al., 2009).

## 2 ESTIMACION DE LA DISTRIBUCION DE LOS PASAJEROS EN EL TREN POR MATRICES OD

El método matricial de las viajes por áreas OD es uno de los más usado para diseñar el movimiento de pasajeros (Ortuzar and Willumsen, 2011)(Mahla y Ovalle, 2010)(Myojo,2010)(Zha y Zhang, 2005). Este método puede ser usado para modelar el viaje de los pasajeros entre las diferentes estaciones. Sin embargo, debido a razones económicas y prácticas este modelo no considera como se distribuyen los pasajeros a lo largo de los distintos coches del tren. Consecuentemente, si se quiere estimar la distribución de los pasajeros en el tren, es necesario generar otro nivel en la matriz OD para cada vagón del tren, en cada estación. Esta nueva matriz puede ser construida subdividiendo la matriz OD original,

$\ddots$	$T_{12}$	...	$T_{1n}$	$O_{T1}$
$T_{21}$	$\ddots$	...	$T_{2n}$	$O_{T2}$
...	...	$\ddots$	...	...
$T_{n1}$	$T_{n2}$	...	$\ddots$	$O_{Tn}$
$D_{T1}$	$D_{T2}$	...	$D_{Tn}$	

Figura 1: Nueva matriz OD.

Donde  $D_T \in \mathbb{R}^{1 \times n}$  es el vector de descenso de pasajeros y  $O_T \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  corresponde al vector de abordaje de pasajeros en  $n$  estaciones. Aquí, cada elemento de los vectores de descenso  $D_{Tj}$  and abordaje  $O_{Ti}$  de pasajeros puede ser subdividido en  $m$  vagones de pasajeros, llegando a existir dos nuevos vectores.  $D \in \mathbb{R}^{1 \times n_s}$  y  $O \in \mathbb{R}^{n_s \times 1}$  donde:

$$\begin{aligned}
 O &= [O_{11} \ O_{12} \ \dots \ O_{1m} \ O_{21} \ O_{22} \ \dots \ O_{2m} \ \dots \ O_{n1} \ O_{n2} \ \dots \ O_{nm}] \\
 D &= [D_{11} \ D_{12} \ \dots \ D_{1m} \ D_{21} \ D_{22} \ \dots \ D_{2m} \ \dots \ D_{n1} \ D_{n2} \ \dots \ D_{nm}] \\
 n_s &= nm
 \end{aligned} \tag{1}$$

Además, la matriz de viaje  $T \in \mathbb{R}^{n \times n}$  se subdivide resultando en una matriz que analiza el movimiento de pasajeros entre las estaciones considerando los vagones de pasajeros  $M \in \mathbb{R}^{n_s \times n_s}$ ,

...			M <sub>1121</sub>	...	M <sub>112m</sub>	...	M <sub>11n1</sub>	...	M <sub>11nm</sub>	O <sub>11</sub>	O <sub>T1</sub>
			...		...		...		...	...	
			M <sub>1m21</sub>	...	M <sub>1m2m</sub>		M <sub>1mn1</sub>	...	M <sub>1mnm</sub>	O <sub>1m</sub>	
M <sub>2111</sub>	...	M <sub>211m</sub>	...			...	M <sub>21n1</sub>	...	M <sub>21nm</sub>	O <sub>21</sub>	O <sub>T2</sub>
...		...					...		...	...	
M <sub>2m11</sub>	...	M <sub>2m1m</sub>					M <sub>2mn1</sub>	...	M <sub>2mnm</sub>	O <sub>2m</sub>	
...			...			...	...			...	
M <sub>n111</sub>	...	M <sub>n11m</sub>	M <sub>n121</sub>	...	M <sub>n12m</sub>	...	...			O <sub>n1</sub>	O <sub>Tn</sub>
...		...	...		...					...	
M <sub>nm11</sub>	...	M <sub>nm1m</sub>	M <sub>nm21</sub>	...	M <sub>nm2m</sub>					O <sub>nm</sub>	
D <sub>11</sub>	...	D <sub>1m</sub>	D <sub>21</sub>	...	D <sub>2m</sub>					D <sub>n1</sub>	
D <sub>T1</sub>			D <sub>T2</sub>				D <sub>Tn</sub>				

Figura 2: La Matriz de viaje  $T \in \mathbb{R}^{n \times n}$ .

Donde cada elemento de los vectores de descenso y abordaje de pasajeros debe satisfacer las siguientes condiciones:

$$D_{Tj} = \sum_{k=1}^m D_{jk} \quad (2)$$

$$O_{Ti} = \sum_{k=1}^m O_{ik} \quad (3)$$

$$T_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m M_{ijj} \quad (4)$$

$$D_{ij} = \sum_{i=1}^{n_s} M_{iji} \quad \forall_j = 1 \dots n_s \quad (5)$$

$$O_{ji} = \sum_{j=1}^{n_s} M_{ijj} \quad \forall_i = 1 \dots n_s \quad (6)$$

### 3 ESTIMACION DE LOS ELEMENTOS DE LA MATRIZ OD

Una forma de estimar los elementos de la matriz de viaje es asumiendo que el sistema está gobernado por el principio de máxima entropía. Sin embargo, la estimación podría ser mejorada con la incorporación de información, si esta es precisa. La interacción y la dinámica de la conducta de diferentes grupos de pasajeros

podrían ser incluidas aplicando técnicas de inteligencia artificial y más específicamente en técnicas basadas en la lógica borrosa.

La aplicación del modelo de distribución está basada en las siguientes hipótesis:

- a)  $T_{IJ}$ ,  $O_{TI}$  y  $D_{TJ}$  tienen poca incertidumbre dentro de un horizonte de planificación. Cada elemento del vector  $O_{Ji}$  or  $D_{Tj}$  puede representarse como una función de los vectores de abordaje  $O_{TI}$  o vector de descenso de pasajeros  $D_{TJ}$  respectivamente y una función potencial con exponentes  $C_{DIj}$  or  $C_{OJi}$ .

$$D_{Ij} = \frac{2^{C_{DIj}}}{\sum_{k=1}^m 2^{C_{DIk}}} D_{TJ} \quad (7)$$

$$O_{Ji} = \frac{2^{C_{OJi}}}{\sum_{k=1}^m 2^{C_{OJk}}} O_{TI} \quad (8)$$

- b) Cada elemento de una matriz de viaje  $M_{IiJj}$  puede ser representado como una función de  $T_{IJ}$  y una función exponencial con exponente  $C_{MIiJj}$ .

$$M_{IiJj} = \frac{2^{C_{MIiJj}}}{\sum_{r=1}^m \sum_{s=1}^m 2^{C_{MIrJs}}} T_{IJ} \quad (9)$$

- c)  $C_{DIj}$ ,  $C_{OJi}$  y  $C_{MIiJj}$  provienen de un motor de inferencia borrosa basado en la experiencia de un experto.

Es importante indicar que los exponentes  $C_{DIj}$  y  $C_{OJi}$  se refieren al nivel de importancia que la estación ferroviaria tiene en un horizonte de planificación. Si esos exponentes son cero, la estimación corresponderá a la máxima entropía, mientras si se tiene un número positivo o negativo corresponde a una estación ferroviaria con un nivel bajo y alto de demanda respectivamente.

#### 4 LA ESTIMACION DEL TIEMPO DE PARADA

La correcta estimación del tiempo de parada es crítico para la planificación apropiada. Se ha demostrado que el tiempo de parada es una función del material rodante, como del flujo de pasajeros en los andenes y de los pasajeros a bordo del tren.

El número de pasajeros a bordo del vagón  $k$  en la estación  $l$  queda definido por,

$$M_{Tlk} = \sum_{j=l+1}^n \sum_{I=1}^{l-1} \sum_{i=1}^m M_{Iiljk} \quad (10)$$

y el tiempo de apertura y cierre de las puertas en el tren  $k$  en la estación  $l$  puede aproximarse como:

$$t_{oclk} = t_{ocm} + \left( 1.5 \left[ 1 + 0.9 \frac{M_{Tlk}}{V_c} \right] \frac{D_{lk}^a}{n_d} \right) + \left( 1.3 \left[ 1 + 0.8 \frac{M_{Tlk}}{V_c} \right] \frac{O_{lk}^b}{n_d} \right) + 0.027 \frac{D_{lk} O_{lk}}{n_d^2} \quad (11)$$

Por lo tanto, el tiempo de parada se define como:

$$t_{dl} = \max(t_{ocl1}, t_{ocl2}, \dots, t_{oclm}) \quad (12)$$

Donde,

$a = 0.7$

$b = 0.7$

$t_{ocm} = 15$

$V_c$  = Capacidad del vestíbulo (con la hipótesis de ocupación de  $0.14 \text{ m}^2$  por persona)

$t_{dl}$  = Tiempo de parada en la estación  $l$

$nd$  = Número de puertas

## 5 MOTOR DE INFERENCIA BORROSO.

Los exponentes  $C_{Dij}$ ,  $C_{Oji}$  y  $C_{MIij}$  pueden ser diseñados con la ayuda de la lógica borrosa. Para este caso particular parece razonable el uso de las funciones de pertenencia triangulares (Figura 3). Esos exponentes pueden ser estimados considerando:

1. Que durante el proceso de abordaje existen escaleras y ascensores más cerca de algunos coches en el andén. Esto usualmente conlleva a que estos coches presenten un mayor flujo de pasajeros con respecto a otros. Por otro lado, existen grupos de pasajeros más experimentados que usualmente esperan en lugares más distantes sobre la plataforma porque conocen la posición exacta de la apertura de las puertas durante el arribos de los trenes durante las horas pico (Wiggenraad, 2001).
2. Que durante el proceso de descenso de pasajeros del tren, se evidencia que muchos conocen la localización de ascensores y escaleras eléctricas en el andén de la estación de destino. Lo que usualmente conlleva a que los vagones (coches) que se encuentren más cerca de estas facilidades presenten un mayor flujo de pasajeros.
3. El nivel ocupación de los coches. Dependiendo del motivo del viaje (trabajo, estudios, ocio, turismo, compras, entre otros), el género y edad de los pasajeros se preferirá los coches que viajen con menor nivel de ocupación o no se tendrá preferencia por ninguno (Daamen and Hoogendoorn, 2003).

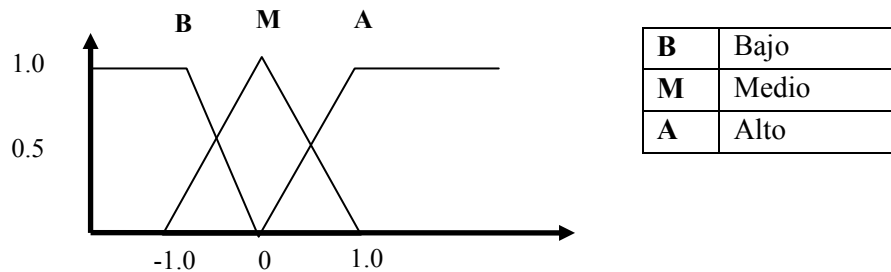
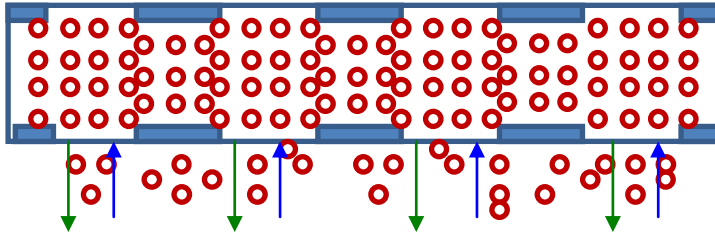
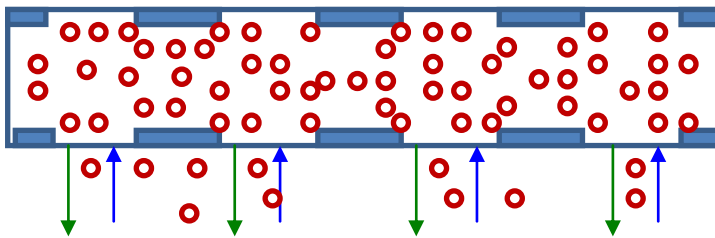


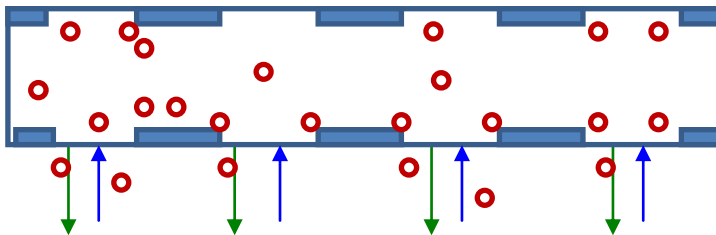
Figura 3: Funciones de pertenencia para  $C_{Dij}$ ,  $C_{Oji}$  y  $C_{MIij}$



Nivel alto



Nivel medio



Nivel bajo

**Figure 4: Niveles congestión de las funciones de pertenencia para los vagones (carros) de trenes.**

Los niveles de las funciones de pertenencias de las tasas de abordaje y desabordaje en cada vagón del tren se muestran en la figura 4. En esta figura se presentan tres niveles de flujo de pasajeros. Aquí, el nivel alto corresponde a una gran congestión, por otro lado el nivel bajo representa un flujo de pasajeros débil.

## 6 ALGORITMO PROPUESTO

a) Estimar los exponentes  $C_{Dij}$ ,  $C_{Oji}$  y  $C_{Mij}$  basados en la información imprecisa disponible. .

b) Estimar los vectores de atracción y generación  $D_{ij}$  and  $O_{ji}$ , para las estaciones usando,

$$D_{ij} = \frac{2^{C_{Dij}}}{\sum_{k=1}^m 2^{C_{Dik}}} D_{Tj} \quad (13)$$

$$O_{ji} = \frac{2^{C_{Oji}}}{\sum_{k=1}^m 2^{C_{Oik}}} O_{Ti} \quad (14)$$

c) Estimar el tiempo la matriz de viaje  $M_{iij}$ , usando,

$$M_{iij} = \frac{2^{C_{Mij}}}{\sum_{r=1}^m \sum_{s=1}^m 2^{C_{Mirs}}} T_{IJ} \quad (15)$$

d) Verificar si  $O_{ji} = \sum_{j=1}^{n_s} M_{iij} \forall i = 1 \dots n_s$ . Consecuentemente, si  $\left| \sum_{j=1}^{n_s} M_{iij} - O_{ji} \right| < \varepsilon$  es cierto para un nivel o cota dada, si esto es así se acepta. Mientras, que si no es así, el valor de los elementos de la matrices son corregidos mediante

$$M_{iij} \leftarrow \frac{O_i M_{iij}}{\sum_{j=1}^{n_s} M_{iij}} \quad (16)$$

d) Verificar si,  $D_{ij} = \sum_{i=1}^{n_s} M_{iij} \forall j = 1 \dots n_s$ . Consecuentemente, si  $\left| \sum_{i=1}^{n_s} M_{iij} - D_{ij} \right| < \varepsilon$  se cumple, entonces se acepta. Mientras que si no se cumple, los valores de los elementos de la matriz son corregidos con

$$M_{iij} \leftarrow \frac{D_j M_{iij}}{\sum_{i=1}^{n_s} M_{iij}} \quad (17)$$

f) Verificar si,  $T_{IJ} = \sum_{i=1+m_B(I)}^{m_E(I)} \sum_{j=1+m_B(J)}^{m_E(J)} M_{iij}$ , para todo  $i, j, I, J$ . Consecuentemente, si

$\left| \sum_{i=1+m_B(I)}^{m_E(I)} \sum_{j=1+m_B(J)}^{m_E(J)} M_{iij} - T_{IJ} \right| < \varepsilon_m$  se satisface, entonces de acepta. Mientras tanto, si no es así, el valor de los elementos de la matriz se corrigen con

$$M_{iIj} \leftarrow \frac{T_{IJ} M_{iIj}}{\sum_{i=1+m_B(I)}^{m_E(I)} \sum_{j=1+m_B(J)}^{m_E(J)} M_{iIj}} \quad (18)$$

g) Se retorna al paso d, si la tolerancia no se cumple.

h) Finalmente,

$$M_{Tlk} = \sum_{j=l+1}^n \sum_{I=1}^{l-1} \sum_{i=1}^m M_{Iiljk} \quad (19)$$

$$t_{oclk} = t_{ocm} + \left( 1.5 \left[ 1 + 0.9 \frac{M_{Tlk}}{V_c} \right] \frac{D_{lk}^a}{n_d} \right) W + \left( 1.3 \left[ 1 + 0.8 \frac{M_{Tlk}}{V_c} \right] \frac{O_{lk}^b}{n_d} \right) W + 0.027 \frac{D_{lk} O_{lk}}{n_d^2} \quad (20)$$

$$t_{dl} = \max(t_{oc1}, t_{oc2}, \dots, t_{oclm}) \quad (21)$$

## 7 CONCLUSIONES

Los resultados preliminares han mostrado el potencial y la eficiencia de esta nueva metodología. Este nuevo algoritmo propuesto ha sido desarrollado usando la ayuda de la lógica fuzzy para predecir la demanda de viajes de pasajeros, tiempo de abordaje y descenso de los pasajeros de los vagones en estaciones explícitas. Como una guía para futuros trabajos de investigación, resultaría interesante mejorar más el motor de inferencia borrosa y su data real. Adicionalmente otros recursos de información pudiesen ser incorporados sin limitar la información a un solo experto.

## REFERENCES

- Zhang Qi, Han Baoming, Li Dewei, (2008). *Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations*. Transportation Research Part C 16 (2008) 635–649. 2008
- Harris, N.(2006). *Train Boarding and Alighting Rates at High Passenger Loads*. Journal of Advanced Transportation, Vol. 40, No. 3, pp. 249-263. 2006
- S. Kikuchi y D. Miljkovic.(1999). *Method To Preprocess Observed Traffic Data for Consistency Application of Fuzzy Optimization Concept*. TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 1679 Paper No. 99-0129 73. 1999.
- Aldian, A. y Taylor, M. (2003). *Fuzzy multicriteria analysis for inter-city travel demand modelling*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, October, 2003
- Watson, J. R. y Prevedouros, P. D. (2006) *Derivation of Origin–Destination Distributions from Traffic Counts Implications for Freeway Simulation*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1964, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2006, pp. 260–269. 2006.
- Cheng, Y.H. y Yang, Li-An.(2009) *A Fuzzy Petri Nets approach for railway traffic control in case of abnormality: Evidence from Taiwan railway system*. Expert Systems with Applications 36 (2009) 8040–8048. 2009



A. Berbey, R. Caballero, R. Galán, J.D. Sanz Bobi (2010). *A fuzzy logic inference approach for the estimation of the passengers flow demand*. Proceedings of the International Conference on Fuzzy Computation and 2nd International Conference on Neural Computation, pages 125-129. Valencia, Spain. October. 2010

Harris, N., Anderson, R. (2007) *An international comparison of urban rail boarding and alighting rates*. Proc. IMechE Vol. 221 Part F: J. Rail and Rapid Transit. 2007

Paul B.L. Wiggendaad. (2001) *Alighting and boarding times of passengers at Dutch railway stations*. Analysis of data collected at 7 railway stations in October 2000. TRAIL Research School. December 2001

Magnolo, E., Manenti, L., Manzoni, S., Sartori, F. (2009) *Towards a MAS Model for Crowd Simulation at Pop-Rock Concerts Exploiting Ontologies and Fuzzy Logic*. 2009

Ortúzar, J.D., Willumsen, L.G. (2011) *Modelling transport*. John Wiley & Sons Inc 2011.

Daamen, W.; Hoogendoorn, S. (2003) *Research on pedestrian traffic flow in the Netherlands*. In proceedings Walk 21 IV (pp. 101-117) Portland, Oregon. United States. Walk 21 Conference. 2003

C. Eksin, M. Güzelkaya, E. Ye\_il, I. Eksin. (2008) *FUZZY LOGIC APPROACH TO MIMIC DECISION MAKING BEHAVIOR OF HUMANS IN STOCK MANAGEMENT GAME*. Proceedings of the 2008 System Dynamics Conference 2008

Railway Consultancy. (2000). *Station capacity at Norreport*. Report for Danish Government, 2000, available from <http://www.trm.dk/sw677.asp> (available online on the Danish Government, website). 2000.

Mahla, I. y Ovalle, R. Ingeborg Mahla Ricardo Ovalle. *A NEW HYBRID DYNAMIC METROPOLITAN TRAIN MODEL. UN NUEVO MODELO DINÁMICO HÍBRIDO DE TREN METROPOLITANO*. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 18 N° 3, 2010, pp. 302-315 2010. 2010.

Shuichi Myojo. *Daily Estimation of Passenger Flow in Large and Complicated Urban Railway Network*. Railway Technical Research Institute, Tokyo, Japan. 2010.

Zha, W.X. y Zhang, J. Wei Xiong ZHA and Jun ZHANG. *CALCULATION MODEL AND ALGORITHM DESIGN FOR RAILWAY PASSENGER OD-MATRIX*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 318 - 327, 2005.

## Reconocimientos

Los autores de este trabajo queremos expresar nuestro agradecimiento a la Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnológica (SENACYT) del gobierno de la República de Panamá por financiar este estudio a través del proyecto de I+D “*Metodologías e índices de desempeño de sistemas de transporte ferroviario*” adjudicado mediante convocatoria para el fomento de las actividades de I+D (MDEPRB09-001). Adicionalmente, a la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP).

## Autorización y Renuncia

*Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito*