

# Modelo de Simulación de circulación Vehículos en las calles de San José, Costa Rica

Mag Yari Guevara-Rivera, Bchr.  
Escuela de Ingeniería en Sistemas  
Universidad Nacional de Costa Rica  
Heredia, Costa Rica  
magyarigr@gmail.com

Eddy Ramírez-Jiménez, Msc.  
Escuela de Ingeniería en Sistemas  
Universidad Nacional de Costa Rica  
Heredia, Costa Rica  
eddy.ramirez.jimenez@gmail.com

**Abstract**—One of the most common problems in Costa Rica's capital, San Jose, is the heavy traffic jams we are usually exposed to. Any possible solutions is often applied and after a rate of success or failure, it is kept or discarded. It is mandatory to have a system available in the Ministry in charge of this issue a simulation model that involves all the characteristics of the local situations. This paper shows how this simulation system was developed according to the particular needs that exist in Costa Rica and the initial results of it.

**Keywords:** Computer Society, Probability distribution, Statistics, Simulation, Traffic Lights, Model.

## I. INTRODUCCIÓN

Un modelo de simulación es un sistema de computación que se encarga de representar por software la dinámica de un proceso complejo, donde normalmente otro tipo de análisis resulta muy costoso o en algunas ocasiones resulta imposible obtener resultados fidedignos en un tiempo razonable [1].

En el caso de Costa Rica, se presentan ciertas características dadas por la sociedad y la forma en como las personas manejan en los estrechos y poco reglamentados espacios de nuestra capital, donde las llamadas *presas* o embotellamientos son de todos los días.

Este proyecto desarrolla un sistema de simulación basado en las características propias de nuestra región particular y las fuentes para hacerlo fueron los entes gubernamentales encargados del tránsito en Costa Rica.

Este artículo cuenta con 8 secciones divididas de la siguiente manera:

- 1) La primera es esta sección de introducción.
- 2) La segunda trata sobre las características particulares que tiene la capital de Costa Rica con respecto a la circulación de vehículos.
- 3) La tercera parte sobre el problema y el detalle de la zona que se ve afectada mayormente.
- 4) La cuarta son las consideraciones que se tomaron en cuenta en la implementación del modelo, es decir el universo de discurso.
- 5) La quinta sección hace referencia a las distribuciones de probabilidad que se utilizaron para generar valores aleatorios que se asemejen con la situación en Costa Rica.

- 6) La sexta sección trata sobre los resultados y valores obtenidos del simulador
- 7) La séptima es el trabajo futuro sobre proyectos que utilizan como base al simulador
- 8) La octava y última muestra las conclusiones

## II. AMBIENTE PRESENTE EN EL PAÍS

En Costa Rica a lo largo de los años se ha podido observar como la gran cantidad de vehículos automotores saturan sus principales ciudades, en especial el caso de su capital, donde las calles fueron creadas a inicios del S. XX y han sufrido pocas modificaciones, salvo por la ampliación de la Avenida Juan Rafael Mora Porras. Para el 2012 y según el periódico La Nación alrededor de 19.000 buses y 260.000 autos luchan por un espacio para poder avanzar por las calles de San José [4]

Como parte de las medidas para mitigar problemas de embotellamientos, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (MOPT) puso en funcionamiento, en el 2007, un sistema de semáforos inteligentes el cual funcionaba para ese entonces en 180 intersecciones de la capital haciendo uso de unas 145 cámaras aproximadamente. Sin embargo, en muchas ocasiones en las que se circula por la capital, se puede notar en muchos casos, que un vehículo, luego de haber esperado por la luz verde en una intersección, no puede continuar avanzando en la siguiente intersección, esto por el hecho de que el semáforo de dicho lugar se encuentra en rojo. El sistema inteligente mantiene este tipo de problemas debido a que no es posible encontrar algún tipo de sensor el cual le conceda la propiedad de inteligente a este sistema.[5]

Por último, cuando las luces de los semáforos cambian en secuencia, aparentan saber que se aproximan carros hacia ellos y que por lo tanto deben realizar el cambio de luz, pero esto ocurre por coincidencias de los ciclos de luces asignados a cada semáforo o son causa de una sincronización llevada a cabo para realizar el cambio de luces de esta forma.

En una exhibición del sistema de control de tránsito, localizado en las oficinas del Centro de Control de Tránsito del MOPT en San José, dejaron en claro que no se trata de un sistema inteligente automatizado, sino de un sistema de control centralizado desde el cual los operadores humanos

pueden configurar los tiempos para los cambios de luces de los semáforos dentro de la red.

### III. PROBLEMÁTICA

#### A. El Problema y la solución Actual

La gran cantidad de vehículos automotores que circulan en las diferentes áreas de San José provocan día a día embotellamientos que aumentan el tiempo requerido para ir de un punto a otro, así como el consumo de combustible y por ende las emisiones de gases contaminantes. La situación se presenta más alarmante cuando el mismo alcalde de San José, el señor Johnny Araya afirma que la cantidad de autos mencionados anteriormente ocupan un 70% del espacio vial en la capital, pero únicamente trasladan el 30% del millón de personas que ingresan a San José todos los días.[4], lo que quiere decir que la gran mayoría de personas utilizan el transporte público para hacer su ingreso a San José.

De acuerdo con la entrevista realizada a Iver Brade Monge, del Centro de Control de Tránsito del MOPT, actualmente en Costa Rica el sistema con el que se cuenta es centralizado para permitir así el control de los semáforos, no obstante el proceso es manual. Donde los operadores analizan, de acuerdo con las estimaciones que realicen, aumentan o disminuyen el tiempo de duración de la luz verde de un semáforo particular, utilizando datos brindados por los contadores o cámaras localizados dentro de la red de semáforos. Los datos de los contadores se emplean para determinar cómo aumenta o disminuye la cantidad de automóviles de una determinada intersección, mientras que las cámaras se emplean para poder visualizar la posible existencia de congestiones en las calles.

#### B. Infraestructura Vial

Quizás uno de los principales causantes o factores que propician los embotellamientos a nivel nacional, corresponde a la forma en que fueron diseñadas las calles sobre todo en la capital. Un recorrido por éstas muestra aspectos el ancho de las calles que por lo general poseen dos carriles, alguno de los cuales puede ser utilizado como zona de parqueo, de carga y descarga o simplemente para permitir que automóviles del transporte público puedan cargar o descargar pasajeros. Presentándose alguno de los casos mencionados, la capacidad de vía de cada calle o avenida se reduce en un 50%.

#### C. Cultura y Sociedad en las Vías Públicas

El no disponer de una fluída circulación dentro de estas áreas responde a diferentes motivos, unos son culturales tal como lo menciona el autor de la siguiente nota: *"algunos choferes agravan los atascamientos debido a maniobras indebidas, al ignorar la luz roja de los semáforos o cuando irrespetan las zonas prohibidas para estacionarse... La gente no aplica la cortesía, no tiene paciencia y todo eso va perjudicando."* [4]

Una de las medidas que se han tomado es aplicar una restricción para circular por la capital basada en el número placa de cada automotor (salvo para el transporte público) de modo que se restringe a  $\frac{1}{5}$  de los autos que hay en Costa

Rica, su ingreso a la capital. A pesar de la existencia de legislaciones que buscan mejorar las condiciones dentro de las zonas más congestionadas de la capital, se han presentado ciertas ocasiones en el que problemas en esta materia han causado cambios por decisiones gubernamentales, tal y como ocurrió en junio del 2009 periodo durante el cual se dio la eliminación, temporal, de la restricción vehicular para ingresar a San José causando un aumento, para ese tiempo, del 25% de vehículos que trataban de llegar a sus destinos atravesando la capital. Con eso no sólo se dio incremento de automotores, sino que también se dieron aumentos en la duración de las horas de mayor concentración de los automóviles y que de acuerdo con datos de ingeniería de tránsito se estaban aumentando entre un 10% y 30% del tiempo empleado por los automóviles para llegar a su destino, así como producir un gasto de tres millones de dólares anuales en combustible.[6]

Si bien la restricción vehicular fue implementada como una forma de disminuir la cantidad de vehículos automotores, no todas las personas toman esto como un incentivo para hacer uso del transporte público, si no que más bien lo ven como un obstáculo que los obliga a buscar una ruta alterna a la tradicional.

No obstante, los eventos anteriores terminan viéndose intensificados por la falta de una regulación adecuada de los semáforos. Aún contando con el sistema mencionado, no es seguro que se logre reducir los problemas para circular con fluidez dentro de los lugares más visitados, ya que la cantidad de vehículos es cambiante, por lo cual al momento de realizar los ajustes mencionados, ésta puede estar variando de forma que se torna ineficiente la regulación de dichos tiempos.

### IV. EL MODELO DE SIMULACIÓN

Cualquier solución que busque mejorar el flujo del tránsito en San José, necesita poder demostrar su efectividad en un ambiente controlado, antes de su implementación en el ambiente real. Por lo tanto, es importante realizar un modelo de simulación que pueda ser suficientemente flexible y puntual para las necesidades particulares de nuestra capital.

#### A. Características a Simular

Dado la falta de datos como lo son los tiempos de espera promedio de los vehículos, cuando circulan por las calles de San José, resulta necesario llevar a cabo una simulación de los cambios de luces para los semáforos y del flujo de vehículos presentes en el área.

Existen diferentes escenarios por los cuales se puedan dar los problemas planteados anteriormente, para este trabajo se utilizará como zona de estudio la representada en la figura 1, sin embargo, el programa será lo suficientemente flexible para poder modelar diferentes zonas de tránsito.

Basado en dicha imagen, se plantea el problema de cambio de las luces de los semáforos tomando como referencia la **avenida:** 2, 4, 6 y 8, y las **calles:** 12, 10, 8 y 6. Para este caso la avenida segunda (Juan Rafael Mora Porras) se ve afectada fuertemente por los vehículos automotores que quedan en

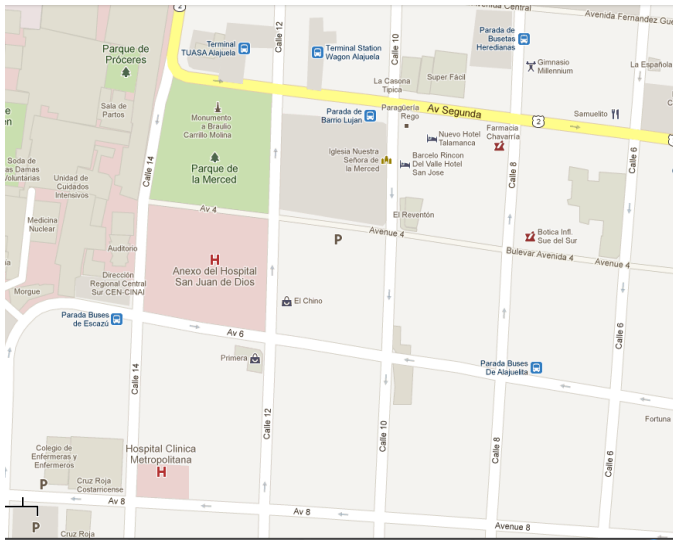


Fig. 1. Diagrama de Calles, San José Costa Rica (Google Maps)

medio de las intersecciones, si bien es ilegal, este se mantiene como un problema más cultural.

Dependiendo de las condiciones en ese momento, ya sea un alto número de vehículos automotores en la cercanía o la presencia de una fuerte lluvia que dificulte la conducción, es probable que se genere un efecto en cadena el cual culminará afectando, con igual o mayor rapidez, otras áreas.

Es aquí donde la primera parte de este trabajo (la simulación) se pone en funcionamiento. Para este caso la simulación sólo comprenderá escenarios normales dentro de la zona, si ningún evento o factor que altere la presencia o el flujo de vehículos dentro de la misma. Otro aspecto importante a considerar es que el periodo a evaluarse corresponde a la franja horaria de las 4pm a las 6pm, dado que según estimaciones realizadas en el MOPT, presenta una tendencia de flujo más constante en comparación con las horas de la mañana donde se obtienen picos pronunciados en menor tiempo, correspondientes al traslado de personas a su lugar de trabajo.

Siguiendo estas consideraciones, la simulación a implementar tomará en cuenta la llegada de vehículos a la zona por medio de las calles o avenidas que conducen hacia la zona, es decir, calles cuya dirección o sentido llevan a los conductores hacia el área mencionada. De igual forma, se debe garantizar la circulación de los vehículos en las calles. Por lo anterior, en caso de presentarse una obstrucción en algún carril los carros deben ser capaces de realizar el cambio a un carril adyacente, teniendo en cuenta que cada calle tiene al menos dos carriles disponibles, salvo los casos como la avenida segunda la cual cuenta hasta con cinco, o las calles y avenidas que posean zonas de carga y descarga que este puede reducirse a sólo uno, no obstante este caso sólo se presenta una vez dentro de la zona.

Finalmente, los vehículos han de circular dentro del área y en cada intersección tomarán una decisión si continúan en línea recta o si dan vuelta en la calle, esto basado en el

destino que cada automotor tenga. Para todos los casos a saber: cambios de carril, llegada de vehículos y tendencias de flujos de los mismo, se han de emplear distribuciones probabilísticas que permitan determinar cada uno de estos.

Por otro lado y como etapa posterior, se ha pensado en la incorporación a la simulación de diferentes factores que alteren el flujo normal del tráfico, éstos pueden darse de diferentes formas ya sea generando obstrucciones u obligando a reducciones de velocidades, sin importar el caso todos repercuten en cierta forma las calles por medio de los congestionamientos que generan.

## B. Factores a Considerarse

Los factores se obtienen con base en los eventos y condiciones que tienden a presentarse en la mayoría de zonas del país.

Cada factor consta de dos a tres niveles a ser tomados en cuenta, dichos niveles implica un diferente nivel de dificultad para el avance normal de los otros vehículos dentro de la zona. Los factores se explican a continuación.

1) *Accidentes de Tránsito:* Para la selección de estos se tomó como base el mapa de distribución espacial de accidentes para la zona obtenido del Estudio de la distribución espacial de accidentes de tránsito con víctimas en el cantón de San José el cual fue proporcionado por el Consejo de Seguridad Vial. Para estos casos se utilizaron calles o avenidas de la zona que, de acuerdo con el estudio, presentan una mayor concentración de accidentes.

2) *Zonas de Parqueos:* La idea de este factor corresponde a un hecho característico como lo son paradas de autobuses, zonas de descarga y terminales en las calles. Si se analiza considerando que las calles posean un máximo de 2 carriles se pueden notar los siguientes comportamientos: si se poseen terminales de buses, se habla de un carril prácticamente dedicado a estas, mientras que para el otro caso se poseen bloqueos temporales de un carril en ciertos puntos por un tiempo determinado como resultado de que los buses realicen paradas para subir o bajar pasajeros.

Cabe mencionar que para este caso sólo se considerarán casos de paradas permanentes, por el hecho de que realizar evaluaciones de otros resulta bastante difícil debido al grado de variación que se presenta, tal es el caso de el parqueo temporal de vehículos el cual dependerá de cada persona, según las habilidades y experiencia con las que cuentan para tardar más o menos tiempo en estacionar un vehículo.

3) *Eventos Meteorológicos:* Este factor varía mucho pero igual se encuentra presente dentro de los factores que afectan y resulta necesario ser considerado. Para este caso, la presencia de lluvia en San José será la principal circunstancia a evaluar tomando como punto de partida el hecho de que al presentarse, los conductores tienden a reducir la velocidad con el fin de evitar accidentes por las dificultades para manejar que se presentan con la calle mojada o la poca visibilidad en caso de una lluvia fuerte.

4) *Condiciones de los semáforos:* Uno de los principales factores que deben de considerarse es el estado de los

semáforos, indicando qué calles y avenidas están avanzando y cuáles están detenidas. Este factor debe de poder ser controlado de manera dinámica, para poder buscar mejoras posteriores, al ser el único sobre el cual se tiene control externo, a diferencia de los mencionados anteriormente.

## V. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD A EMPLEAR

Al entrevistar a expertos del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), Consejo de Seguridad Vial (COSEVI) y del MOPT, se lograron obtener registros del comportamiento muestral de los vehículos en los últimos años en nuestra capital.

### A. Entrada de vehículos

La hora (con segundos) de llegada de vehículos se obtiene a partir de una distribución de Poisson, cuya media varía de acuerdo con las horas del día. Donde la media de menor valor corresponde con el período comprendido entre las cuatro de la tarde y las siete de la noche, con una media de 5. Esto quiere decir que en promedio, entra un automóvil cada cinco segundos por cada una de las posibles entradas. Es interesante como una muestra similar se puede apreciar entre las siete y ocho de la mañana, sin embargo, en este evento, los autos transitan con mayor premura, debido a que muchos van a hacer su ingreso a su lugar de trabajo lo que agiliza significativamente el tránsito.

### B. Velocidad de los vehículos

Los vehículos mantienen una velocidad normal con media de 44 km/h y una desviación estándar de 3 km/h.

### C. Ceder el paso

En caso de algún bloqueo u obstrucción en la carretera, tal como pueden ser autobuses estacionados, accidentes de tránsito o cualquier otro tipo de evento, es importante encontrar cuál es la cantidad de vehículos que van a pasar antes de que uno le ceda el paso a otro vehículo que ve impedido su avance por el evento obstaculizador. Este número de vehículos que pasan sin ceder el campo está dado por una distribución geométrica y la probabilidad  $P$ , varía muy poco a pesar del número de vehículos o de la hora. Siendo la menor 0.1 y la mayor 0.2

### D. Giro en las intersecciones

En cada intersección la probabilidad de giro de un vehículo particular en una intersección cualquiera varía muy poco, dado que los usuarios normalmente utilizan la misma ruta siempre. Una vez más, para agilizar la ejecución de la simulación, se utilizó una distribución geométrica para indicar el número de vehículos que iban a continuar directamente sobre una intersección antes de que uno gire. Naturalmente esta probabilidad se ve afectada por eventos como obras en la vía, marchas de protesta o accidentes de tránsito, lo que debe de ser considerado por el sistema.

## VI. RESULTADOS

Como parte de los resultados que se pueden obtener del simulador en las siguientes secciones se mencionan en detalles los más importantes.

### A. Información de los carros

Para cada uno de los carros, se almacenan diferentes datos relativos a su permanencia dentro de la zona de evaluación, a saber: Tiempo de espera total, demora total, posición dentro de la línea actual. Para el caso del tiempo de espera, este corresponde a un valor acumulado que se incrementa en cada iteración de la simulación y cuyo valor final corresponde a la suma de los tiempos de espera acumulados por cada calle o avenida que el vehículo tuvo que circular hasta llegar a su destino fuera del área.

Por otro lado, la demora total corresponde a los tiempos acumulados para los carros, que se generen por eventos que causen atrasos a estos como el caso de obstrucciones en la vía o que las calles han llegado al máximo de su capacidad y por lo tanto tienen que esperar fuera de estas para poder ingresar y continuar con la ruta. Finalmente se cuenta con la posición de los automotores en cada calle, para este caso debe tenerse en cuenta que la posición es única para cada calle y al momento de que se pase a una nueva la misma será reiniciada al valor máximo posible dependiendo de la capacidad de la calle.

Como último dato y a modo de referencia, al iniciar su ingreso al área, cada vehículo contará con una decisión que tomar para determinar la ruta a seguir, esto basado en las distribuciones mencionadas anteriormente. A modo de evaluación posterior, se contará con un registro de las avenidas y calles recorridas de forma que pueda determinarse si la ruta tomada se vio afectada por algún evento o si esta puede corresponder a una ruta adecuada considerando el tiempo invertido por vehículo y el destino de éste.

### B. Información de los semáforos

A modo de registro, y como una forma de control y análisis de las decisiones tomadas, cada semáforo contará con un archivo de log o registro el cual permita en etapas posteriores, hacer revisiones de los movimientos realizados por esto. Dicha información se tiene en fin de poder hacer revisiones manuales en casos de buscar mejoras en comportamientos del semáforo cuando sea empleado en las etapas posteriores del proyecto.

## VII. TRABAJO FUTURO

Resulta destacable hay algunos datos que se obtienen que no pueden verificarse su exactitud debido a que a la fecha, ninguna entidad gubernamental o privada posee datos sobre ciertos tipos de comportamientos extraos en los ciudadanos, como el caso de un choque leve donde se arreglan por su parte y no se hace el reporte a la oficina de tránsito. Por lo que el modelo puede ser inexacto ante eventualidades como esta, de modo que si se instalan sensores que indiquen comportamientos extraos, entonces se puede retroalimentar al simulador.

Posterior a la realización del modelo de simulación, es importante encontrar un mecanismo que agilice el control del tránsito. En el proceso pretende lograr un modelo de red neuronal artificial que pueda ser implementada dentro de este red de semáforos y el cual permita que cada semáforo se comuniquen con otros (hermanos) localizados dentro de un rango de área considerable de forma que cada uno pueda tener una idea lo que ocurre en su entorno y no únicamente la información que puede ser recolectada por medio de los sensores en la intersección administrada por cada semáforo.

#### A. Uso de Redes Neuronales

La idea de usar redes neuronales, se basa en el hecho de que actualmente los semáforos no son realmente inteligentes a como fueron promocionados en un principio. Dado que hacen uso de tiempos fijos, preprogramados, las tendencias cambiantes del flujo puede no siempre lograr satisfacer de forma adecuada la demanda real. Si bien los flujos de vehículos siguen ciertas tendencias, de alzas o bajas, esto suele ser de constante cambio y en algunos momentos puede requerirse de ajustes inmediatos según datos que se hayan analizado.

Dado que las redes neuronales se entrenan para aprender a generalizar resultados, lo que se busca es lograr que esta luego de un entrenamiento pueda conocer los momentos en los que de se debe aumentar o disminuir el tiempo de la luz verde, basado en su conocimiento actual tanto de la información recopilada por sensores como el insumo brindado por otros semáforos cercanos.

#### B. Algoritmos alternativos

Otro algoritmos posible para contrastar el rendimiento pueden ser:

- 1) Cadenas de Markov
- 2) Redes Bayesianas
- 3) Modelo MM1 de colas
- 4) Modelo MMc de colas
- 5) Modelo MG1 de colas
- 6) Redes Causales

### VIII. CONCLUSIÓN

Como principal conclusión se tiene que se ha logrado desarrollar un modelo exitoso que permite la simulación de tránsito vehicular de la ciudad de San José con sus particularidades. También se cuenta con una herramienta de evaluación para las posibles políticas viales que se puedan proponer en nuestro ambiente.

Lo anterior obedece a que las particularidades del espacio vial se ven reflejadas de manera similar a la realidad en el sistema como son: las paradas inesperadas de taxistas, las probabilidades de ceder el paso, las posibilidades de choques, entre otros.

Las variables obtenidas de los expertos, permitieron que el modelo se completara y se pudiera ajustar a los detalles que satisfacen las condiciones precisas y los resultados obtenidos se pueden ajustar para diferentes horarios del día.

El modelo permitió apreciar en qué medida los factores tomados en cuenta afectan de manera directa el tiempo de los vehículos en atravesar el casco capitalino.

### APPENDIX A

#### ERLANG COMO LENGUAJE DE DESARROLLO

Las características de Erlang que permiten que la creación de hilos de manera sencilla, hizo que se pudieran modelar cada uno de los componentes del simulador como un hilo individual y se crearon funciones especializadas en coordinar la sincronización de los diversos hilos, de modo que cada uno de ellos fuera individual, haciendo más realista la simulación.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores les gustaría agradecer muy profundamente al COSEVI, CONAVI y MOPT por su invaluable apoyo, la atención brindada y los datos mostrados, sin los cuales este paper no habría sido posible. En particular a quienes han dedicado su tiempo en la revisión de este material para su validación.

### REFERENCES

- [1] H.Perros, *Computer Simulation Techniques: The definitive introduction!*, 2009. Computer Science Department. NC State University. Raleigh, NC. <http://www4.ncsu.edu/~hp/simulation.pdf>
- [2] S.Weppner, *Computational methods with depth and Flair*, September/October 2008. IEEE CS and the AIP. <http://www2.computer.org/cms/Computer.org/Computing-Now/bookreviews/archive/CiSE%204.pdf>
- [3] N.Daneshjo, *Computer Modeling and Simulation*, 2011. Sinaia, Romania. <http://www.ipcsit.com/vol8/12-S3.3.pdf>
- [4] J. Villegas and L.Herrera, *260.000 autos y 19.000 buses atascan San José cada día*, 2012, La Nación. San José, Costa Rica. <http://www.nacion.com/2012-03-17/ElPais/260-000-autos-y-19-000-buses-atascan-san-jose-cada-dia.aspx>
- [5] V.Loaiza, *Capital estrena semáforos inteligentes en 180 intersecciones*, 2007. La Nación. San José, Costa Rica. [http://www.nacion.com/ln\\_ee/2007/noviembre/28/pais1332560.html](http://www.nacion.com/ln_ee/2007/noviembre/28/pais1332560.html)
- [6] A.Mata, *Acceso libre a San José provoca colapso vial*, 2009. La Nación. San José, Costa Rica. [http://www.nacion.com/ln\\_ee/2009/junio/16/pais1997637.html](http://www.nacion.com/ln_ee/2009/junio/16/pais1997637.html)