

# ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE HURST DE LAS SERIES TEMPORALES DE TRÁFICO VEHICULAR EN ZONAS URBANAS POR RANGO REESCALADO

*HURST COEFFICIENT ESTIMATION OF TRAFFIC TIME SERIES IN URBAN AREAS BY RANGE RESCALED*

HEIDI MANCERO<sup>1</sup>, BYRON MORALES<sup>2</sup>, ALFONSO TIERRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE, UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS “ESPE”. Av. General Rumiñahui s/n. Sangolquí, Ecuador. Email: hgmancero@espe.edu.ec.

<sup>2</sup>GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOESPACIAL, DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN, UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS “ESPE”. Av. General Rumiñahui s/n. Sangolquí, Ecuador. Email: artierra@espe.edu.ec, byronmoraless\_76@yahoo.com.

Recibido: 10 de mayo de 2017/Aceptado:23 de junio del 2017

## RESUMEN

La congestión vehicular es un problema que presentan la mayoría de ciudades y Quito no es la excepción, aunque, varias han sido las medidas implementadas, lejos de solucionarlo este se agrava cada día. Por tal motivo, en esta investigación se aplicó nuevas teorías que aporten una ayuda a los métodos de planificación actualmente utilizados. Así, mediante la estimación del coeficiente de Hurst se determinó el comportamiento dinámico que presentó el tráfico vehicular en tres intersecciones conflictivas de la ciudad. Para cumplir con este objetivo el coeficiente de Hurst se calculó mediante el Análisis de Rango Reescalado, utilizando series temporales de conteo vehicular por hora proporcionados por la Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas, para optimizar este proceso se lo realizó mediante el software MATLAB a través de su herramienta GUIDE para desarrollar una interfaz interactiva. Los resultados obtenidos variaron de acuerdo a la zona y al periodo de tiempo en los cuales fueron analizados, así se presentaron comportamientos persistentes, aleatorios y antipersistentes. Siendo, la intersección centro de la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria la que en la mayoría de análisis presentó comportamiento persistente, lo que indica aumento de la problemática, por lo que es necesario realizar una intervención inmediata para el mejoramiento de la congestión vehicular.

**Palabras Clave:** Coeficiente de Hurst, comportamiento dinámico, rango reescalado, tráfico vehicular

## ABSTRACT

Vehicle's overcrowding is a problem of most cities and Quito isn't exception, although, several measures have been implemented, this is aggravated every day. For this reason, this research applied new theories that provide an aid to the planning methods currently used. Thus, through the estimation of the Hurst coefficient, the dynamic behavior of the vehicular traffic in three conflicting intersections of the city was determined. To meet this aim, Hurst coefficient was calculated through Range Rescaled Analysis, using time series of vehicle counts by hour provided by the Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas, to optimize this process was done using MATLAB software through its GUIDE tool to develop an interactive interface. The results obtained varied according to the area and the time frame, in which they were analyzed, thus they presented persistent, random and antipersistent behaviors. Thus, the center intersection of Av. 6 de Diciembre and Av. Patria which in the majority of analyzes presented persistent behavior, which indicates an increase of the problem, reason why it's necessary to make an immediate intervention for the improvement of vehicle's overcrowding.

**Keywords:** Hurst coefficient, dynamic behavior, range rescaled, Vehicle's overcrowding

## 1. INTRODUCCIÓN

La congestión vehicular es uno de los principales problemas que presentan actualmente las ciudades y todo indica que continuará agravándose (Bull, 2003). Quito al ser la capital del Ecuador presenta este problema, por lo que mediante el Plan Maestro de Movilidad se han implementado varias medidas sin obtener los resultados esperados. Una de ellas es el pico y placa, que restringe la circulación del parque automotor, de acuerdo al último dígito de las placas, cinco horas al día. Sin embargo, los beneficios alcanzados en sus primeros meses, fueron disminuyendo paulatinamente debido al crecimiento del parque automotor, provocando que en menos de dos años y medio el número de vehículos en las vías vuelva ser el mismo que se trató inicialmente, información presentada en el Diagnóstico de la Movilidad en el Distrito Metropolitano de Quito para el Plan Metropolitano de Desarrollo Territorial realizado por la Secretaria de Movilidad en el 2014.

En los últimos años varios autores han utilizado el coeficiente de Hurst (H) como indicador para determinar el comportamiento dinámico del flujo vehicular en diferentes condiciones. Así, se han desarrollado varias investigaciones entre las cuales están, la comparación del flujo vehicular urbano recopilado en Beijing - China y datos de autopista de Washington – EEUU de 6:00am a 10:00pm, obteniendo como resultado valores cercanos a uno (Wang et al, 2009). Como indicador para determinar la existencia de estructura fractal aleatoria en sistemas de flujo de tráfico alto, bajo y total utilizando datos de observaciones diarias en la autopista Ji-Qing (Chen & Zhang, 2007). Para determinar las características cuantitativas del patrón de llegada de vehículos en carreteras utilizando datos recolectados en Kuala Lumpur - Malasia, demostrando además que el avance de tiempo de los vehículos en las carreteras sigue la distribución de cola pesada en lugar de la distribución exponencial clásica (Meng & Khoo, 2009). Indicador de intensidad de autosimilitud para el mejoramiento de desempeño de las plazas de peaje, utilizando datos de tráfico vehicular por hora, recolectados en India (Perati, Raghavendra, Koppula, Doodipala, & Dasari, 2012).

En Ecuador, con respecto al flujo de tráfico vehicular varios han sido los estudios realizados entre ellos: análisis del comportamiento dinámico y calidad de servicio, a través de variables de flujo, longitud de cola y tiempo de demora para el desarrollo de modelos de tráfico vehicular en diferentes zonas críticas representativas de la ciudad de Quito (Cerón, 2007). Modelación vehicular mediante el software AIMSUN utilizando variables de velocidad y tiempos semafóricos con datos de conteo vehicular para la determinar el tráfico de promedio diario anual, para plantear soluciones a los problemas de congestión vehicular (Oña, Rodríguez, & Venegas, 2012).

Como se detalla en los párrafos anteriores, en la ciudad de Quito aunque varias han sido las medidas implementadas para solucionar el problema de congestión vehicular, lejos de conseguirlo, este se agrava cada día; por este motivo, en esta investigación se aplica nuevas teorías aún no investigadas en el país, que aporten a los métodos de planificación ya conocidos e implementados, así mediante la estimación de H se

determinará el comportamiento dinámico que presenta el tráfico vehicular en tres intersecciones conflictivas de la ciudad.

La investigación consiste en realizar el análisis del H obtenido mediante Rango Reescalado (R/S) utilizando series de tiempo de tránsito vehicular por hora, con datos proporcionados por la Empresa Pública Metropolitana de Movilidad de Obras Públicas (EPMOP), en intersecciones al norte, centro y sur de la ciudad que se caracterizan por ser nodos de conexión. Complementario a esto se realizará una comparación de las diferentes intersecciones de la zona de estudio, a través de diferentes criterios temporales, para un mejor análisis y comprensión del comportamiento dinámico del tráfico vehicular.

Para la estimación de H mediante R/S, en las próximas secciones de este artículo se describirá lo siguiente: sección 2, explicación general para el cálculo e interpretación del H. La sección 3 la metodología utilizada a lo largo de la investigación. La sección 4 y 5, se presenta el análisis y discusión resultados respectivamente obtenidos del coeficiente de Hurst en los diferentes criterios analizados. Finalmente, en la sección 6 se indicarán las conclusiones del trabajo.

## 2. COEFICIENTE DE HURST

El coeficiente de Hurst fue desarrollado como una nueva metodología estadística para evaluar la ocurrencia de eventos poco comunes, por el hidrólogo inglés Harold Hurst, quien estudió las fluctuaciones de las alturas del nivel del Río Nilo, por largos períodos de tiempo, para proyectar las capacidades de las reservas de agua y así tomar medidas de precaución (Hurst, 1956).

El parámetro que resulta del análisis de Rango Reescalado se lo denomina coeficiente de Hurst, que es una medida de independencia de las series de tiempo e indica si la misma está condicionada a la memoria de largo plazo (la presencia de memoria indica si el presente es el resultado de hechos anteriores). De igual manera se obtiene una medida de correlación, que indica el impacto que tiene el presente en el futuro (y el pasado en el presente) (Sierra, 2007; Casparri & Moreno, 2004).

Basándose en Quintero & Ruiz (2011), se presenta la metodología desarrollada por Hurst para el cálculo del coeficiente:

1. Se inicia con una serie de tiempo de tamaño N.
2. Este periodo de tiempo N se divide en A subperiodos contiguos de longitud n. Se nombra cada uno de los subperiodos  $I_a$ , con  $a=1,2,3,\dots,A$ . Cada elemento en  $I_a$ , es etiquetado  $N_{k,a}$  tal que  $k=1,2,3,\dots,n$ . Para cada subperiodo  $I_a$  de longitud n, el valor promedio ( $e_a$ ) está definido por la siguiente expresión:

$$e_a = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N_{k,a} \quad (1)$$

- Las diferencias de cada elemento  $N_{k,a}$  con respecto a la media  $e_a$  para cada subperiodo  $I_a$ , se van sumando para obtener la serie de tiempo acumulada ( $X_{k,a}$ ), definida como:

$$X_{k,a} = \sum_{i=1}^k (N_{i,a} - e_a), \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

- El rango  $RI_a$  se define como la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de  $X_{k,a}$  para cada subperiodo  $I_a$ :

$$RI_a = M_{ax}(X_{k,a}) - M_{in}(X_{k,a}), \quad \text{donde } 1 \leq k \leq n \quad (3)$$

- Se calcula la desviación estándar ( $SI_a$ ) de la forma tradicional para cada periodo  $I_a$ :

$$SI_a = \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (N_{k,a} - e_a)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

- Para cada periodo  $I_a$ , su rango  $RI_a$  se normaliza dividiendo por su desviación estándar muestral  $SI_a$  correspondiente. Por lo tanto, el rango reescalado para cada subperiodo  $I_a$  es igual a  $RI_a/SI_a$ .
- La longitud o el tamaño del subperiodo se realizó siguiéndola distribución de la ley de potencias. Para generar los subperiodos se lo realiza a partir de  $\frac{N}{2^\alpha}$  donde  $\alpha \geq 1$  hasta  $N \geq 3$  (ver figura 1) y se repiten los pasos del 1 al 6 partiendo con la serie completa.

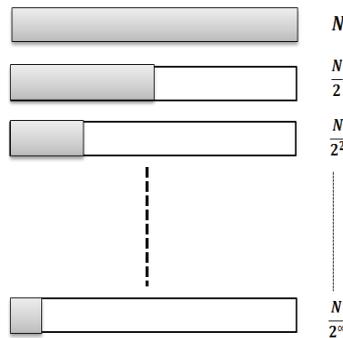


Figura 1. Subperiodos siguiendo la distribución de ley de potencias

- Finalmente se aplica una regresión de mínimos cuadrados de  $\log(RI_a/SI_a)$  contra  $\log(n)$  de cada subperiodo  $I_a$ . La pendiente en ecuación 5 es la estimación del coeficiente de Hurst (H).

$$\log \left( \frac{R}{S} \right)_n = \log(a) + H \log(n) \quad (5)$$

Los valores del coeficiente de Hurst pueden ser interpretados de la siguiente manera:

- Entre el rango  $0 < H < 0.5$  se tiene un comportamiento antipersistente o correlación negativa en la serie de tiempo, al que con frecuencia se denomina reversión a la media, es decir, un incremento en los sucesos del pasado, supone un descenso de

sucesos futuros y viceversa. Se considera que esta serie tiene ruido rosa, que es común en la naturaleza (Rivas, 2013; Luegas, Ardila, & Moreno, 2010).

- Si  $H=0.5$  indica, ausencia de correlación, los datos son independientes, se dice que no hay memoria. Es una serie aleatoria que cumple con todas las características del movimiento browniano estándar, y se dice que presenta ruido blanco (Luegas, Ardila, & Moreno, 2010; Andrade, 2015).
- Entre el rango  $0,5 < H < 1$ , las series son persistentes, refuerza la tendencia está caracterizada por efectos de larga memoria. Los sucesos que ocurren hoy impactan en los sucesos futuros, es decir, si la serie estaba arriba de su media en el período anterior, lo más probable es que continúe arriba en el período siguiente y viceversa. En este intervalo el color de ruido es negro aparece en procesos cíclicos de largo plazo (Gutiérrez, 2008; Luegas, Ardila, & Moreno, 2010).

El coeficiente de Hurst como medida de memoria de una serie de tiempo, permite discriminar entre procesos generados puramente estocásticos como lo son los de ruido blanco (proceso no correlacionado), frente a los otros procesos, deterministas o estocásticos, que generan ruidos negro (comportamiento del proceso persistente refuerza lo que atribuye un grado a mantener la tendencia) y ruido rosa (comportamiento ergódico donde se espera que la serie presente cambios de dirección en el tiempo) que son clasificados de acuerdo al valor del coeficiente de Hurst (Rodríguez, 2013)

## 2.1. AUTOSIMILITUD

El concepto de autosimilitud se encuentra asociado a los fractales, el caos y las leyes de potencia, siendo aquellos en los que no existe variación en su estructura con el cambio de escala (una copia de menor tamaño de sí misma); se caracterizan por ser isotrópicos (mismas propiedades en todas las direcciones) permanecen invariantes cuando cambia la escala, uniformemente en todas las direcciones. La autosimilitud es un atributo de muchas leyes de la naturaleza e innumerables fenómenos del mundo que nos rodean (Pérez, 2007; Vindel, 2013; Batlle & Grébol, 2009).

Un objeto autosimilar es exactamente o estadísticamente similar en sus partes a un todo, para lo cual el coeficiente de Hurst será de gran utilidad debido a que cuantifica la autosimilaridad. Sólo existe autosimilaridad si  $H$  varía entre 0,5 y 1, siendo 1 el más alto grado (Rabinovich, Osimani, & Olocco, 2013).

## 2.2. PRUEBA DE SIGNIFICANCIA DEL COEFICIENTE DE HURST

Una vez estimado el coeficiente de Hurst, cabe cuestionarse el valor de los resultados obtenidos, ya que es necesario distinguir si el valor de  $H$  cercano a 0,5 por lo que es necesario realizar una prueba de significancia con las siguientes hipótesis (Rodríguez, 2012):

$H_0$ : El proceso es aleatorio ( $H=0,5$ ).

$H_1$ : El proceso es persistente o antipersistente ( $H > < 0,5$ ).

Para determinar el valor esperado de Rango Reescalado  $E(R/S_n)$ , se lo realiza mediante la ecuación 6 (Annis & Lloyd, 1976).

$$E(R/S_n) = \left(\frac{n-0.5}{n}\right) \left(\frac{n\pi}{2}\right)^{-0.5} \sum_{r=1}^{n-1} \sqrt{\frac{n-r}{r}} \quad (6)$$

Una vez obtenidos los valores esperados de  $E(R/S_n)$ , con los valores enteros de los subperiodos que fueron utilizados en la serie temporal original, siguiendo el paso 8 de la sección 2, se procede a estimar el valor esperado del coeficiente de Hurst ( $E[\hat{H}]$ ). Finalmente, para realizar la prueba, se utiliza para el contraste de hipótesis el siguiente estadístico (Escot, 2000):

$$Z_E = \frac{H - E[\hat{H}]}{\sqrt{\text{Var}(E[\hat{H}])}} \quad (7)$$

### 3. METODOLOGÍA

Para la investigación se seleccionó tres intersecciones de la ciudad de Quito, al norte la Av. Eloy Alfaro y Av. Granados, al centro la Av. Patria y Av. 6 de Diciembre y al sur la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro (ver figura 2), las cuales se caracterizan por presentar gran carga vehicular. Además, de localizarse en el hipercentro zona de la ciudad con mayor concentración de población, equipamiento y actividad económica.

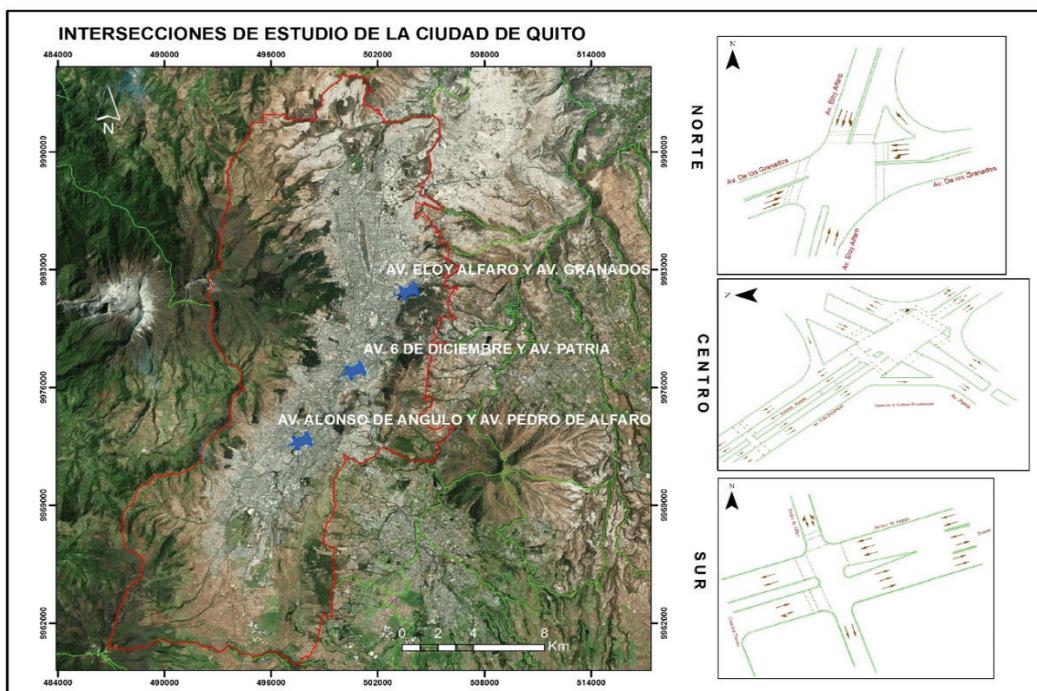


Figura 2. Ubicación de las intersecciones de estudio

En la tabla 1 se detallan los sentidos de las diferentes intersecciones en estudio, al norte la de la Av. Eloy Alfaro y Av. Granados con 6, al centro la de la Av. Patria y Av. 6 de Diciembre con 4 y al sur la de la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro con 3.

Tabla 1. Sentidos de las intersecciones de estudio

<b>Intersección</b>	<b>Sentido</b>
<b>Av. Eloy Alfaro y Av. Granados</b>	Norte – Sur (N_S)
	Giro Norte – Oriente (GN_Or)
	Occidente – Oriente (Or_Occ)
	Sur – Norte (S_N)
	Oriente – Occidente (Or_Occ)
	Giro Oriente – Sur (GOr_S)
<b>Av. 6 de Diciembre y Av. Patria</b>	Oriente – Occidente (Or_Occ)
	Sur – Norte (S_N)
	Occidente – Oriente (Occ_Or)
	Norte – Sur (N_S)
<b>Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro</b>	Oriente - Occidente (Or_Occ)
	Occidente – Oriente (Occ_Or)
	Norte – Sur (N_S)

Estas intersecciones se encuentran influenciada por diversas infraestructuras que provocan la confluencia de gran cantidad de personas así al norte se encuentra la Estación Río Coca, la UDLA; al centro la Casa de la Cultura, la Plaza Foch, Universidad Católica y Salesiana; al sur El Recreo, Terminal Sur, Colegio Amazonas y Benito Juárez, entre otras que provoca caos.

Para la estimación del coeficiente de Hurst se utilizó datos de conteo vehicular por hora proporcionados por la EPMOP, lo primero que se realizó fue una inspección previa en la que se constató la existencia de huecos y mala toma de datos, los que de acuerdo al análisis se generaron o se eliminaron para evitar errores al momento del cálculo. Para el cálculo del H de forma automatizada, se realizó un programa en el software Matlab siguiendo la metodología de Análisis de Rango Reescalado (R/S) descrita anteriormente en las ecuaciones del 1 al 5. Además, para facilitar el manejo del mismo por otro usuario y hacerlo más interactivo se utilizó el comando GUIDE, para el diseño de la interfaz.

Para el análisis del comportamiento del H en diferentes condiciones, no solo se las analizó en distintos sectores de igual manera por periodos de tiempo los cuales fueron anuales, semestrales, mensuales, semanales, por hora, horas pico y por días de la semana, las mismas que son útiles para determinar el comportamiento dinámico que presenta el tráfico vehicular en condiciones variadas. En la figura 3, se observa las interfaces generadas en GUIDE para los diferentes análisis temporales, en los que se aprecia a la izquierda parte superior la descripción de la zona de estudio seguida de la serie de tiempo con los datos de conteo vehicular, a la derecha arriba se aprecia el resultado de H y el rango del coeficiente de Hurst seguido del ajuste lineal, en la que cada uno de los puntos representa los subperiodos generados al momento de realizar el cálculo.

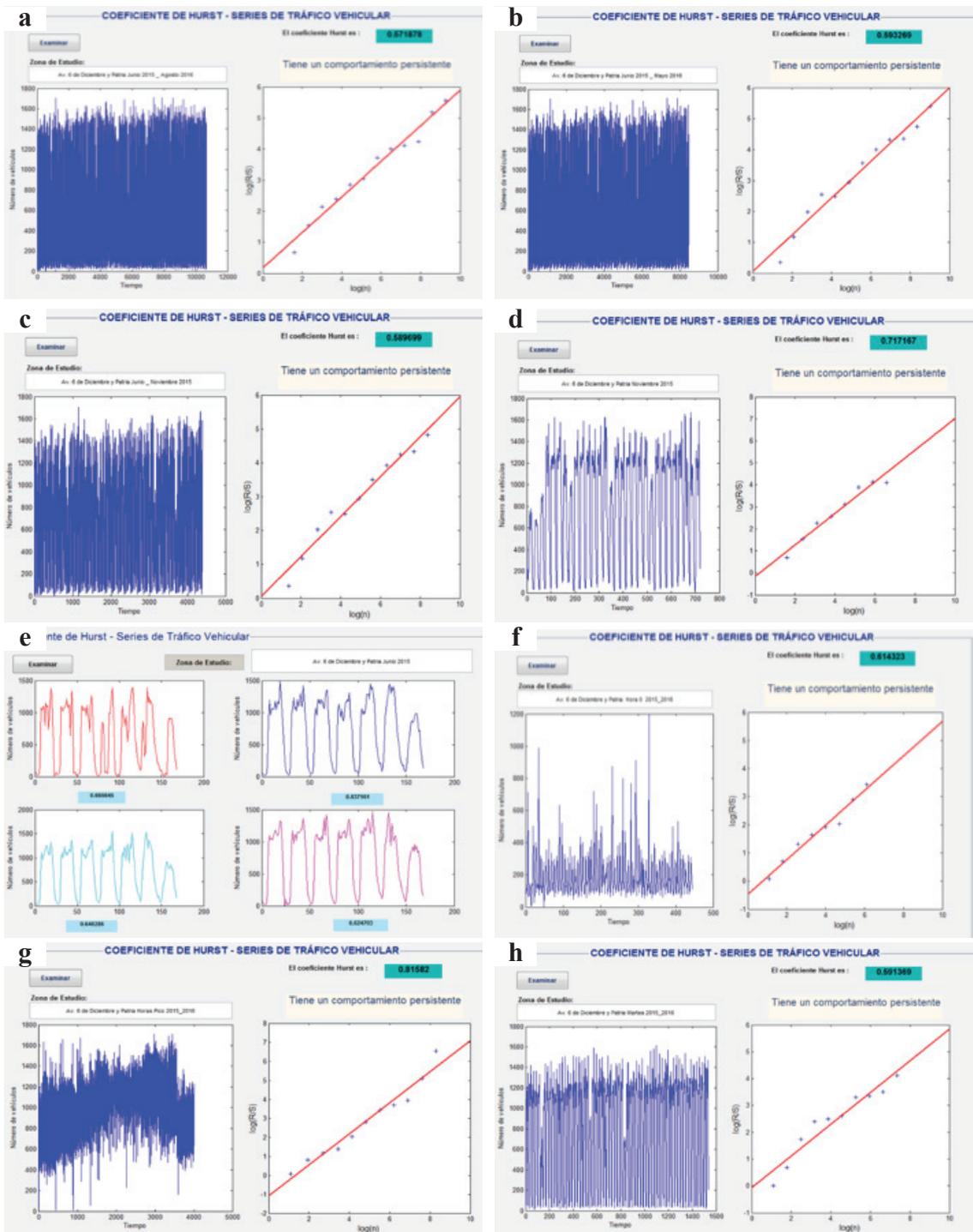


Figura 3. Interfaz de las series de tiempo a) totales, b) anuales, c) semestrales, d) mensuales, e) semanales, f) horas, g) horas pico h) días de la semana

Al calcular el coeficiente de Hurst bajo las condiciones anteriores se obtuvieron valores variados del mismo, siendo algunos muy cercanos a 0,5 y otros que se debían comprobar ya que al calcular su error estándar no se podía determinar a qué rango pertenecían. Por lo que para corroborar estos resultados se realizó dos pruebas de hipótesis de acuerdo a las ecuaciones (6)(7). El valor obtenido en la ecuación (7) se contrasta con las tablas de probabilidad de la distribución normal y la hipótesis nula se aceptó con un 95% de confianza.

Una vez realizadas las pruebas de hipótesis necesarias se verificó el rango en el que se encuentran los valores que presentaron este inconveniente, obteniéndose los resultados finales para el posterior análisis.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en las diferentes condiciones propuestas, aunque teóricamente la mayoría sobrepasa el valor de 0,5, en varios de estos se aplicó las pruebas de significancia para corroborar el rango al que pertenecen. Así aquellos valores que se encuentran en las tablas en rojo son en los que presentan comportamiento aleatorio, en azul antipersistente y en negro persistente.

##### 4.1. SERIES DE TIEMPO TOTALES, ANUALES Y SEMESTRALES

En la Tabla 2 se observa los resultados del coeficiente Hurst ( $H$ ) que se obtuvo en series de tiempo totales, anuales y semestrales. En la intersección de la Av. Eloy Alfaro y Av. Granados no existen  $H$  en el análisis anual y 2° semestre debido a que solo existió toma de datos hasta el 20 de abril del 2015 por la construcción del Metro. En la intersección de la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria presentó los resultados más altos, por lo que no existieron valores en rojo, además en el sentido N\_S por daños del equipo no hubo la cantidad de datos suficientes para realizar el análisis anual y de 2° semestre. La intersección de la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro presentó la mayor cantidad valores de  $H$  en rojo.

En la tabla 2, se observa los resultados del coeficiente Hurst ( $H$ ) que se obtuvo en series de tiempo totales, anuales y semestrales. En la intersección norte, no existen  $H$  en el análisis anual y 2° semestre debido a que solo existió toma de datos hasta el 20 de abril del 2015 por la construcción del intercambiador de la Granados. La intersección centro  $H$  presentó los resultados más altos, por lo que no existieron valores en rojo ni azul, además en el sentido N\_S por daños del equipo no hubo la cantidad de datos suficientes para realizar el análisis anual y de 2° semestre.

Tabla 2. Coeficiente de Hurst en series de tiempo totales, anuales y semestrales

Intersección	Sentido	Total	Anual	1° Semestre	2° Semestre
Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	N_S	0,563	-----	0,506	-----
	GN_Or	0,623	-----	0,579	-----
	Occ_Or	0,649	-----	0,610	-----
	S_N	0,589	-----	0,501	-----
	Or_Occ	0,597	-----	0,571	-----
	GOr_S	0,596	-----	0,640	-----
Av. 6 de Diciembre y Av. Patria	Or_Occ	0,644	0,655	0,660	0,636
	S_N	0,646	0,651	0,670	0,681
	Occ_Or	0,572	0,593	0,590	0,601
	N_S	0,609	-----	0,614	-----
Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro	Or_Occ	0,551	0,572	0,580	0,507
	Occ_Or	0,500	0,529	0,551	0,480
	N_S	0,561	0,577	0,561	0,522

Con los resultados obtenidos, en la única intersección en la que las series presentan un comportamiento persistente (ruido negro) en todos sus sentidos fue en la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria, lo que indica que presenta memoria a largo plazo, es decir, lo que sucede en el presente impactará en el futuro reforzando la tendencia. Los sentidos S\_N y Or\_Occ con los valores más altos de H en este análisis, siendo el último el que posee la mayor media de la zona.

La intersección norte presentó una variación de resultados en todos sus sentidos. Así, el sentido Occ\_Or es el único que presentó comportamiento persistente en este análisis, el N\_S presentó comportamiento antipersistente, es decir, la tendencia que presenta actualmente en el futuro cambiará y el Or\_Occ comportamiento aleatorio

En la intersección sur ninguno de los sentidos presentaron comportamiento persistente, mientras el Occ\_Or, con la media y los valores más bajos de de la intersección presenta comportamiento antipersistente, en cambio los sentidos Or\_Occ y N\_S presentan comportamiento aleatorio, es decir, no existe correlación un proceso independiente.

## 4.2. SERIES DE TIEMPO MENSUALES

El análisis realizado en periodos mensuales, permitió establecer el comportamiento del coeficiente de Hurst durante todo el año, como se aprecia en la tabla 3, donde H va desde 0,466 a 0,801 por lo que en varios de estos se aplicó la prueba de significancia; los casilleros vacíos se deben a que no existió datos en esos meses, siendo la intersección de la Av. Eloy Alfaro y Av. Granados la que presentó mayor cantidad de meses (junio, septiembre, marzo y abril) con comportamiento antipersistente y aleatorio, contrario a lo ocurrido en la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria.

Tabla 3. Coeficiente de Hurst en series de tiempo mensuales

Intersección	Sentido	Junio	Julio	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	Mayo
Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	N_S	0,482	0,588	0,607	0,484	0,593	0,697	0,575	0,741	0,672	0,554	-----	-----
	GN_Or	0,547	0,714	0,618	0,538	0,608	0,721	0,622	0,768	0,692	0,733	-----	-----
	Occ_Or	0,549	0,748	0,650	0,599	0,650	0,795	0,681	0,800	0,725	0,643	0,677	-----
	S_N	0,492	0,616	0,633	0,497	0,610	0,740	0,621	0,743	0,691	0,584	0,596	-----
	Or_Occ	0,466	0,671	0,513	0,451	0,495	0,618	0,547	0,712	0,652	0,557	0,576	-----
	Gor_S	0,504	0,665	0,639	0,542	0,624	0,742	0,621	0,765	0,703	0,617	0,601	-----
Av. 6 de Diciembre y Av. Patria	Or_Occ	0,682	0,642	0,604	0,539	0,635	0,748	0,616	0,781	0,712	0,612	0,559	0,622
	S_N	0,572	0,775	0,743	0,625	0,705	0,825	0,671	0,849	0,787	0,654	0,613	0,684
	Occ_Or	0,621	0,660	0,605	0,513	0,629	0,717	0,608	0,747	0,694	0,568	0,504	0,629
	N_S	0,602	0,735	0,730	0,600	0,674	0,801	0,660	-----	-----	-----	-----	0,749
Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro	Or_Occ	0,527	0,694	0,603	0,518	0,599	0,692	0,597	0,686	-----	-----	0,722	0,589
	Occ_Or	0,485	0,649	0,554	0,482	0,563	0,674	0,557	0,721	-----	-----	0,729	0,595
	N_S	0,536	0,605	0,557	0,479	0,538	0,686	0,533	0,699	-----	-----	0,712	0,539

Los valores más altos de H corresponden a los meses de noviembre, enero y febrero presentaron comportamiento persistente en todas las intersecciones de estudio, lo que indica un reforzamiento de la tendencia que aumenta mientras más se acerca a este valor. Los H más bajos correspondieron a los meses de junio y septiembre que presentaron comportamiento antipersistente principalmente en la intersección norte y sur.

En el mes de marzo, aunque existieron valores bajos y altos del coeficiente de Hurst, en varios se mantuvo el comportamiento aleatorio por lo que esto depende del sentido e intersección de estudio en el que se esté analizando.

## 4.3. SERIES DE TIEMPO SEMANALES

En las series de tiempo realizado en periodos semanales, en las tres intersecciones se presentó la misma situación en la que los valores de H fueron próximos a 1, por lo cual no fue necesario realizar las pruebas de significancia. En la figura 4 se comparan las 4 semanas del mes de junio del 2015 en el sentido Occidente \_Oriente, en la que inclusive las gráficas son similares independiente de la intersección. Además, se aprecia que los

resultados de H son mayores a 0,57 lo que indica comportamiento persistente, a pesar de que en el mes de junio en el análisis anterior presentó comportamiento aleatorio.

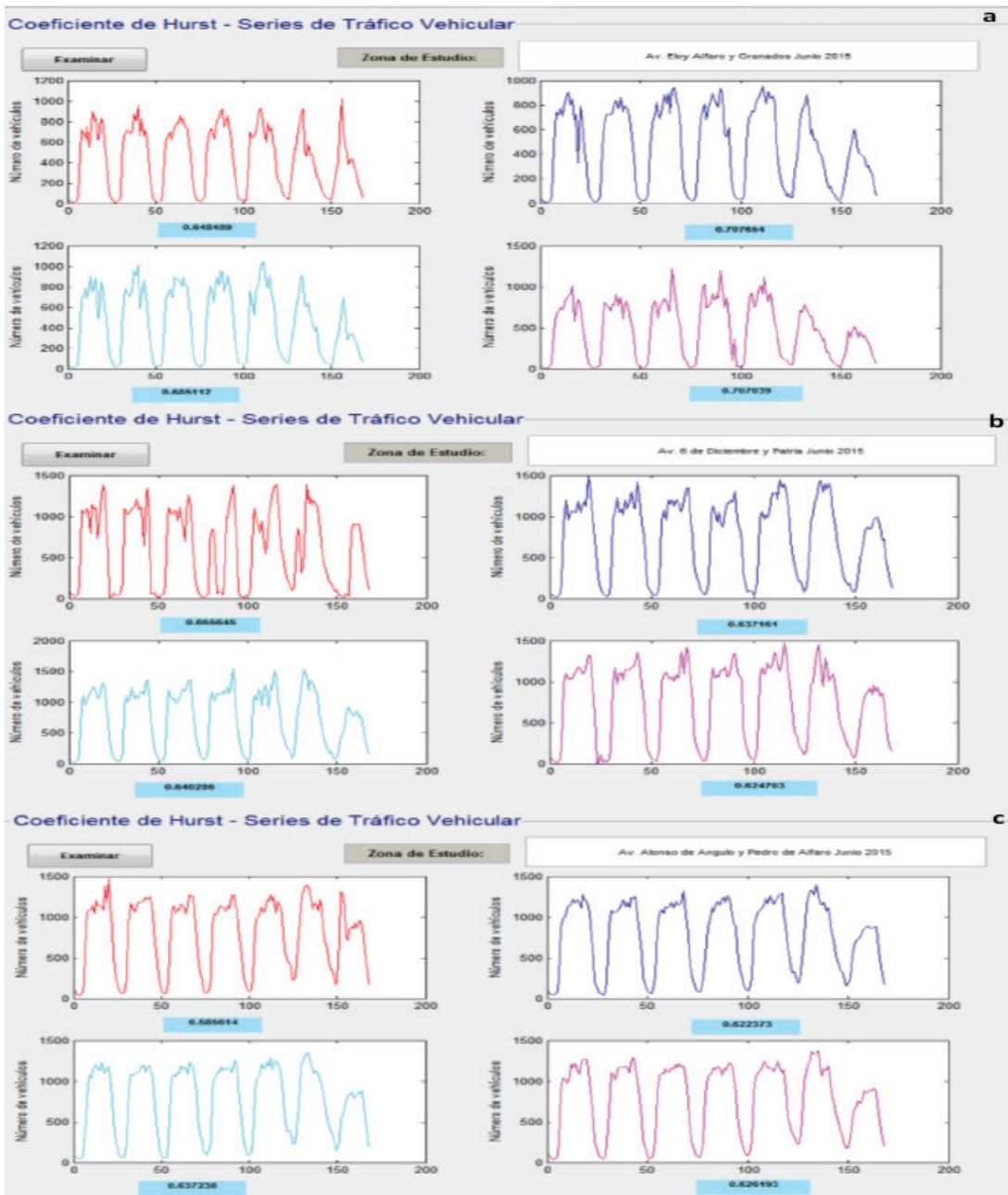


Figura 4. Interfaces de series de tiempo semanales mes junio 2015 intersección Occidente-Oriente. a) norte, b) centro y c) sur

Con los resultados obtenidos del coeficiente de Hurst se confirma que el comportamiento de tráfico vehicular es autosimilar en las tres intersecciones en estudio, en este tipo de análisis.

#### 4.4. SERIES DE TIEMPO POR HORAS PICO

En esta etapa se analizaron los datos de alto flujo vehicular de las tres intersecciones conocidas como horas pico cuales van desde las 7:00 a 10:00 y de 16:00 a 20:00 horas donde existe mayor afluencia de vehículos en la ciudad de Quito.

Los resultados del coeficiente de Hurst que se obtuvo durante este análisis fueron los más cercanos a 1, lo que indica la presencia de correlación a largo alcance. Esto se aprecia en la Tabla 3 donde va desde 0,739 a 0,952, donde los valores más altos se presentaron en la intersección de la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro. Siendo el sentido en la intersección norte N\_S, en el centro N\_S y en la sur Or\_Occ, la que posee los valores más cercanos 1

Tabla 3. Coeficiente de Hurst en series de tiempo por horas pico

Intersección	Sentido	
Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	N_S	0,866
	GN_Or	0,844
	Occ_Or	0,739
	S_N	0,793
	Or_Occ	0,851
	Gor_S	0,831
Av. 6 de Diciembre y Av. Patria	Or_Occ	0,805
	S_N	0,805
	Occ_Or	0,816
	N_S	0,883
Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro	Or_Occ	0,952
	Occ_Or	0,910
	N_S	0,891

#### 4.5. SERIES DE TIEMPO POR HORAS

En la tabla 4, se observa los resultados obtenidos en las diferentes intersecciones, los que después de realizar las pruebas de significancia cada intersección presentó diferentes características, así, en la intersección norte, en sus seis sentidos existió una variación en los resultados, en la que de 01:00 a 3:00 horas presentaron comportamiento antipersistente. La intersección centro con los resultados más altos de así, el sentido S\_N solamente tuvo presencia de comportamiento persistente, mientras que el N\_S presentó comportamiento antipersistente en el mayor número de horas. La intersección sur, presentó solamente comportamiento antipersistente en sus tres sentido de 00:00 a 03:00 y 23:00 horas, siendo el Occ\_Or el que tuvo más horas con este comportamiento 04:00, 09:00 y 22:00 a parte de los ya mencionados.

Las horas que presentaron los valores de más cercanos a 1 fueron las 06:00, 07:00, 13:00, 16:00 y 19:00 horas de alto flujo vehicular en las que por sus resultados se reforzará la tendencia en el siguiente periodo.

Tabla 4. Coeficiente de Hurst en series de tiempo por horas

Hora	Norte							Centro				Sur			
	N S	GN Or	Occ Or	S N	Or Occ	Gor S	Or Occ	S N	Occ Or	N S	Or Occ	Occ Or	N S		
0	0,501	0,562	0,560	0,553	0,631	0,570	0,614	0,609	0,627	0,447	0,550	0,458	0,484		
1	0,489	0,543	0,555	0,491	0,614	0,508	0,594	0,812	0,644	0,412	0,525	0,464	0,466		
2	0,478	0,510	0,506	0,447	0,592	0,524	0,544	0,732	0,566	0,382	0,492	0,430	0,479		
3	0,486	0,450	0,549	0,493	0,695	0,563	0,506	0,810	0,550	0,390	0,489	0,457	0,443		
4	0,583	0,706	0,853	0,641	0,862	0,691	0,687	0,716	0,610	0,522	0,595	0,487	0,571		
5	0,695	0,591	0,860	0,678	0,607	0,696	0,668	0,747	0,655	0,827	0,807	0,790	0,699		
6	0,744	0,784	0,842	0,751	0,741	0,751	0,632	0,730	0,669	0,717	0,793	0,777	0,787		
7	0,652	0,763	0,721	0,724	0,757	0,615	0,669	0,849	0,715	0,754	0,820	0,824	0,723		
8	0,729	0,602	0,586	0,686	0,754	0,555	0,719	0,867	0,667	0,546	0,691	0,623	0,642		
9	0,703	0,737	0,619	0,684	0,721	0,669	0,792	0,740	0,653	0,512	0,627	0,546	0,637		
10	0,754	0,726	0,691	0,793	0,724	0,656	0,798	0,776	0,630	0,490	0,681	0,571	0,689		
11	0,770	0,799	0,733	0,765	0,751	0,738	0,810	0,853	0,714	0,492	0,605	0,555	0,720		
12	0,750	0,705	0,770	0,784	0,738	0,721	0,801	0,871	0,691	0,535	0,667	0,560	0,817		
13	0,753	0,810	0,785	0,777	0,650	0,735	0,785	0,729	0,687	0,596	0,753	0,694	0,800		
14	0,624	0,727	0,701	0,738	0,599	0,591	0,733	0,727	0,688	0,575	0,688	0,634	0,746		
15	0,619	0,637	0,617	0,705	0,765	0,590	0,717	0,808	0,692	0,580	0,639	0,570	0,762		
16	0,666	0,665	0,629	0,720	0,790	0,599	0,699	0,697	0,667	0,577	0,609	0,571	0,778		
17	0,686	0,737	0,573	0,756	0,715	0,577	0,717	0,734	0,688	0,567	0,595	0,555	0,748		
18	0,713	0,633	0,647	0,768	0,754	0,588	0,756	0,790	0,621	0,527	0,621	0,576	0,799		
19	0,684	0,603	0,622	0,699	0,695	0,711	0,677	0,770	0,614	0,571	0,647	0,672	0,751		
20	0,602	0,586	0,635	0,591	0,657	0,612	0,713	0,769	0,632	0,500	0,612	0,638	0,683		
21	0,629	0,672	0,740	0,656	0,649	0,631	0,678	0,745	0,648	0,501	0,651	0,583	0,636		
22	0,516	0,650	0,690	0,573	0,603	0,534	0,522	0,720	0,602	0,518	0,603	0,563	0,589		
23	0,502	0,510	0,520	0,580	0,655	0,596	0,626	0,783	0,613	0,514	0,546	0,500	0,504		

#### 4.6. SERIES DE TIEMPO POR DÍAS DE LA SEMANA

En la tabla 5, se observa los resultados obtenidos en el análisis realizado por los diferentes días de la semana, así, la intersección de la Av. Eloy Alfaro y Av. Granados de miércoles a domingo estos días presentaron comportamiento antipersistente en la mayoría de los sentidos, el viernes aleatorio (N\_S, GN\_Or, Occ\_Or y S\_N), mientras que el lunes (GN\_Or y Occ\_Or) y el martes (GN\_Or, Occ\_Or y Or\_Occ) presenta comportamiento persistente.

En la intersección de la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria el sábado presentó comportamiento persistente, siendo el S\_N el que presenta este tipo en la mayoría de los días, contrario al N\_S que tuvo más presencia de comportamiento antipersistente. La intersección de la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro, es el que presenta mayor comportamiento antipersistente en sus tres sentidos exceptuando el N\_S que el lunes y martes presenta comportamiento aleatorio.

Tabla 5. Coeficiente de Hurst en series de tiempo por días de la semana

Intersección	Sentido	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	N_S	0,572	0,563	0,524	0,535	0,608	0,554	0,542
	GN_Or	0,641	0,639	0,576	0,568	0,585	0,554	0,549
	Occ_Or	0,650	0,642	0,560	0,577	0,599	0,548	0,528
	S_N	0,579	0,578	0,520	0,530	0,586	0,589	0,522
	Or_Occ	0,579	0,597	0,535	0,538	0,519	0,514	0,562
	Gor_S	0,554	0,558	0,501	0,505	0,560	0,531	0,535
Av. 6 de Diciembre y Av. Patria	Or_Occ	0,604	0,665	0,614	0,559	0,575	0,633	0,624
	S_N	0,594	0,559	0,593	0,559	0,645	0,703	0,616
	Occ_Or	0,587	0,591	0,542	0,57	0,568	0,571	0,589
	N_S	0,569	0,581	0,502	0,553	0,530	0,590	0,533
Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro	Or_Occ	0,574	0,536	0,507	0,527	0,550	0,590	0,487
	Occ_Or	0,529	0,507	0,455	0,473	0,475	0,494	0,493
	N_S	0,583	0,587	0,483	0,516	0,528	0,521	0,546

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados que se obtuvo en series de tiempo de conteo total, anual y semestral en las diferentes intersecciones fue variada, así la de la Av. Eloy Alfaro y Granados (norte) se presentó los tres tipos de comportamientos, mientras que la de la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria (centro) solamente persistencia y la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro (sur) antipersistencia y aleatoriedad. Por lo que no existió similitud con ninguno de los estudios anteriormente realizados, debido a que en todo el tráfico vehicular solo exhibió comportamiento persistente o memoria de larga dependencia, los mismos que fueron realizados en ciudades de China, India y Estados Unidos que poseen mucha más población que Quito.

La ciudad de Quito presenta horas en los que existe alto volumen vehicular, por lo que a partir de las 7:00 a 10:00 y de 16:00 a 20:00, se realizó el análisis por horas pico en el cual los resultados del coeficiente de Hurst fueron los más cercanos a 1, lo que indica el aumento de la problemática en este horario. Siendo, comparable con lo realizado en la ciudad de Beijing y Washington en la que en horas pico en la que se obtuvo valores cercanos a 1 (Wang et al, 2009).

Los periodos semanales presentaron resultados de H que comparados con el error estándar no cambiaron de rango, por lo que al ser mayores de 0,5 indicaron la presencia de autosimilitud en las series de tráfico vehicular, lo que es un primer indicio de presencia de fractales en este tipo de series al ser indicador de autosimilitud (Zhang & Guan, 2011). Las primeras horas del día presentaron los valores más bajos de  $H$ , en este análisis por lo que al realizar las pruebas de significancia, presentaron comportamiento antipersistente a partir de la 01:00 a 03:00 horas la intersección sur en sus tres sentidos y en la norte el

N\_S, GN\_Or, Occ\_Or y S\_N, debido al bajo flujo vehicular con tendencia a aumentar debido al crecimiento del parque automotor. Estudio similar fue realizado en una plaza de peaje de India con conteo vehicular a estas horas, en la que se obtuvo valores de mayores a 0,7 pero con flujo vehicular superior a 654 vehículos por hora (Perati, Raghavendra, Koppula, Doodipala, & Dasari, 2012).

A partir de los resultados que se obtuvieron en esta investigación, se presenta una nueva metodología para mejorar la gestión del tráfico no solo en Quito sino en todo el país. Esta puede ser ampliada analizándola con otros factores como lo son el volumen vehicular, nivel de servicio, velocidad de tráfico, así, como la zona de influencia. De esta manera, permitirá tomar las medidas adecuadas que mejoren realmente la congestión vehicular debido a que, a partir de éstos, se puede tomar acciones, como el contraflujo en la vía de circulación con menos complicación, modificación geométrica de las vías, pero tomando en cuenta todos los sentidos, por los que, se presentan los conflictos en esa zona y vías alternas de desfogue. Además, para aplicar esto la Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas cuenta con contadores en las principales intersecciones de la ciudad de Quito, permitiendo monitorear constantemente el estado de que presentan cada uno de los sentidos de circulación.

## 6. CONCLUSIONES

Para el análisis adecuado del coeficiente de Hurst se lo valoró no solo por intersección, también en diferentes periodos de tiempo, concluyendo que el valor de  $H$  varía de acuerdo a la condición que se analiza, no estableciéndose similitud en ninguno de estos criterios, ya que cada intersección y sentido de estudio posee sus propias características.

La intersección centro de la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria presentó los valores más altos de  $H$  en los diferentes análisis, siendo la que necesita intervención inmediata para el mejoramiento del tránsito vehicular, ya que al presentar comportamiento persistente indica aumento de la problemática, sobre todo los sentidos S\_N y Or\_Occ siendo la que presenta los resultados más altos en esta zona.

La intersección norte de la Av. Eloy Alfaro y Av. Granados presentó gran cantidad de resultados con comportamiento antipersistente y aleatorio en los análisis realizados, sin embargo, el sentido Occ\_Or mantuvo comportamiento persistente en la mayoría de los análisis, siendo el que necesita mayor atención de la zona.

La intersección sur de la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro en el análisis de series de tiempo de datos totales, anuales y semestrales, presentó en sus tres sentidos comportamiento aleatorio y antipersistente, esto debido a la variación del flujo vehicular a lo largo del día, ya que en determinadas horas se encuentra tráfico fluido y en otras atascones.

La obtención del coeficiente de Hurst es importante para la identificación de zonas problemáticas y plantear de manera sustentada una adecuada planificación de tráfico y maneras de intervención por parte de los profesionales dedicados a la Ingeniería de Tráfico.

## AGRADECIMIENTOS

A la Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas (EPMMOP), por facilitar los datos utilizados en este estudio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, C. (2015). Análisis Multifractal de imágenes para la caracterización de la corrosión en el acero inoxidable AISI-304 (tesis pregrado). Xalapa, México: Universidad Veracruzana.
- Annis, A., & Lloyd, E. (1976). The expected value of the adjusted rescaled Hurst range of independent normal summands. *Biometrika*, 63(1), 111-116.
- Battle, A., & Grébol, S. (2009). *Fractales en los mercados financieros* (tesina masterado). Barcelona, España: Barcelona School of Management.
- Bull, A. (2003). Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo (No. 87). United Nations Publications (87).
- Casparri, M. & Moreno, A. (2004). *Geometría fractal y mercados financieros* (tesis pregrado). Buenos Aires, Argentina: Centro de Investigación en Métodos Cuantitativos Aplicados a la Economía y la Gestión.
- Cerón, O. (2007). Análisis de tráfico vehicular en una zona crítica de Quito (tesis pregrado). Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Chen, W., & Zhang, T. (2007). System Analysis of Multifractal Structure in Expressway's Traffic Flux. *International Conference on Transportation Engineering 2007*, 4092-4097.
- Escot, L. (2000). *Dinámica económica caótica: una aplicación al estudio del ciclo y el crecimiento económico*. (tesis doctoral). Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.
- Gutiérrez, H. (2008). *Estudio de geometría fractal en roca fracturada y series de tiempo* (tesis pregrado). Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.
- Hurst, H. (1956). The problem of Long-Term Storage in Reservoirs. *Hydrological Sciences Journal*, 1(3), 13-27.
- Luegas, D., Ardila, E., & Moreno, J. (2010). *Metodología e interpretación del coeficiente de Hurst* (tesis maestrado). Bogotá, Colombia: Universidad Externado de Colombia.
- Meng, Q. & Khoo, H. (2009). Self-similar characteristics of vehicle arrival pattern on highways. *Journal of Transportation Engineering*, 135(11), 864-872.
- Oña, L., Rodríguez, G., & Venegas, T. (2012). *Estudio de tráfico y de accesibilidad en las intersecciones América-La Gasca y La Gasca- Gaspar de Carvajal de la ciudad de Quito* (tesis pregrado). Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Perati, M., Raghavendra, K., Koppula, H., Doodipala, M., & Dasari, R. (2012). Self-Similar behavior of highway road traffic and performance analysis at toll plazas. *Journal of Transportation Engineering*, 138(10), 1233-1238.
- Pérez, G. (2007). *Modelo para describir el comportamiento del tráfico de datos en una red local ethernet y WIFI empleando geometría fractal* (tesis maestrado). Medellín, Colombia: Universidad nacional de Colombia.

- Quintero, O., & Ruiz, J. (2011). Estimación del Exponente de Hurst y la dimensión Fractal de una superficie topográfica a través de la extracción de perfiles. *Geomática UD.GEO* (5), 84-91.
- Rabinovich, D., Osimani, C., & Olocco, G. (2013). Dimensionamiento de redes inalámbricas de banda ancha utilizando NS-3 mediante síntesis de tráfico autosimilar. *Proc. CONAIIIS'13*, 25-35
- Rivas, J. (2013). Análisis de autosimilaridad para fuentes sintéticas de video. Manizales, España: Universidad Católica de Manizales.
- Rodríguez, R. (2012). El coeficiente de Hurst y el parámetro  $\alpha$ -estable para el análisis de series financieras aplicación al mercado cambiario mexicano. *Contaduría y Administración*, 59(1), 149-173.
- Rodríguez, R. (2013). Predicción de crisis financieras a través de la volatilidad implícita del precio de las opciones, asumiendo distribuciones estables (tesis doctorado). México DF, México: Instituto Politécnico Nacional.
- Sierra, G. (2007). Procesos Hurst y movimiento browniano fraccional en mercados fractales: Evaluación y aplicaciones a los derivados y finanzas (tesis pregrado). México, México DF: Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey.
- Vindel, J. (2013). Estudio de la intermitencia de laturbulencia en la capa límite atmosférica y aplicación a los mercados financieros (tesis doctoral) . Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Wang, Y., Hu, J., Li, L., Chen, Y., Li, Z., & Yao, D. (2009). Traffic flow volume fluctuation analysis using MF-DFA. *International Conference on Transportation Engineering 2009*, 4184-4191.