



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TEMA: ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE HURST DE
LAS SERIES TEMPORALES DE TRÁFICO VEHICULAR EN
ZONAS URBANAS**

AUTOR: MANCERO CAGUANA, HEIDI GABRIELA

DIRECTOR: DR. TIERRA CRIOLLO, ALFONSO RODRIGO

SANGOLQUÍ

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICADO

Certifico que el trabajo de titulación, “ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE HURST DE LAS SERIES TEMPORALES DE TRÁFICO VEHICULAR EN ZONAS URBANAS” realizado por la señorita HEIDI GABRIELA MANCERO CAGUANA, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señorita HEIDI GABRIELA MANCERO CAGUANA para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, junio del 2017

Dr. Alfonso Rodrigo Tierra Criollo

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, HEIDI GABRIELA MANCERO CAGUANA, con cédula de identidad No. 1719353235, declaro que este trabajo de titulación “ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE HURST DE LAS SERIES TEMPORALES DE TRÁFICO VEHICULAR EN ZONAS URBANAS” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, junio de 2017

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a horizontal line at the bottom, positioned above the name of the author.

Heidi Gabriela Mancero Caguana



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Yo, HEIDI GABRIELA MANCERO CAGUANA, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE HURST DE LAS SERIES TEMPORALES DE TRÁFICO VEHICULAR EN ZONAS URBANAS” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, junio 2017

Heidi Gabriela Mancero Caguana

DEDICATORIA

A mi madre Josefa, por ser la mujer más importante en mi vida la que con amor me ha inculcado y enseñado a ser perseverante y decidida, gracias a ella hoy puedo disfrutar de este momento.

A mi padre Vinicio, por ser la persona que siempre confió en mí y en mis capacidades y que con sus palabras de aliento me animaba a continuar hasta conseguir lo que me propusiera.

A mi hermana Melani, que a pesar de su corta edad siempre ha sido la persona que ha logrado mantenerme equilibrada y me ha aconsejado cuando más lo he necesitado.

A mi hermana María José, por ser un ejemplo de perseverancia y alegría la que aun a pesar de todas las pruebas a las que se ha enfrentado, jamás se ha dado por vencida.

A mis hermosas sobrinas Mayerli y Amy, que con sus abrazos y ocurrencias siempre logran sacarme una sonrisa y me enseñan que la vida es más simple de lo que parece.

A aquel que me brindó la oportunidad de ser una mejor persona.

AGRADECIMIENTO

En esta vida nada es sencillo, pero con las personas correctas todo se vuelve más fácil, quiero agradecer a Dios por todas las bendiciones que me ha brindado y haberme permitido conocer a personas tan maravillosas, las que me han ayudado a culminar esta etapa de mi vida.

Al iniciar esta aventura, aún estaba insegura si la decisión que había tomado era la correcta, pero la vida me permitió saber que sí, por lo que quiero agradecer a un gran amigo Fernando que desde el primer día me ayudo de manera incondicional compartiendo sus conocimientos lo que me dio el empujón para empezar esta etapa. A mi pequeño amigo Daniel (Dianito) al que, si escribiría lo que debo agradecer me faltarían hojas, por eso solo te diré gracias por estar conmigo en las buenas y en las malas. A mi amiga Dianita porque entre las dos lo que no faltaban eran risas, gracias por ser mi cómplice, creó que muy pocas veces en la vida encuentras a alguien con quien puedas molestar a los demás. A Lenin, Alejandra, Michelle, Nathy, José y Omar que han estado conmigo viviendo la mejor etapa la vida universitaria y entre risas, bebidas y almuerzos hemos construido más que una amistad.

A mis amigos Eduardo, Diego, Tefa, Evelyn, Ximena y Mishelle, que aun a pesar de la distancia han sido incondicionales y juntos hemos aprendido que cuando una amistad es verdadera es para siempre.

A Ronny por siempre confiar en mí, darme ánimo para continuar, por jamás permitirme dudar que lo que me proponga lo voy a conseguir y sobretodo por apoyarme en el momento que más lo necesite siempre permaneciendo a mi lado. Gracias amor de mi vida por estos años llenos de risas, comprensión y amistad.

A mis compañeros, definitivamente el mejor curso, los momentos que compartimos han sido únicos gracias por todas las sonrisas, giras, conversaciones nocturnas en la que me contaron todos sus secretos.

Mi infinito agradecimiento a mi director de tesis Dr. Alfonso Tierra por todo el apoyo que me brindo durante la ejecución de este proyecto y sobretodo por motivarme a diario a ser una mejor profesional y a cumplir las metas que me proponga.

ÍNDICE

CERTIFICADO	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Definición del Problema.....	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivo	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5
1.4.3. Metas.....	5
CAPÍTULO II	6
2.1. Series de Tiempo.....	7
2.1.1. Definición.....	7
2.1.2. Aplicaciones de las series de tiempo.....	7

2.1.3. Objetivos de las series de tiempo	8
2.1.4. Clasificación descriptiva de las series de tiempo	8
2.1.5. Modelos de series de tiempo	9
2.1.6. Componentes de una serie de tiempo	9
2.2. Coeficiente de Hurst.....	10
2.2.1. Antecedentes del Proceso de Hurst	10
2.2.2. Rango Reescalado (R/S)	12
2.2.3. Prueba de significancia del coeficiente de Hurst	14
2.3. Geometría Fractal.....	16
2.3.1. Fractales	16
2.3.2. Tipos de fractales	16
2.3.3. Dimensión fractal	18
2.4. Ley de Potencia	19
2.4.1. Ley de potencia y percepción de autosimilaridad	20
2.5. Autosimilitud	21
2.5.1. Autosimilitud, estadísticamente autosimilar y autoafín	21
2.5.2 Procesos autosimilares	23
2.6. Memoria de larga dependencia	24
2.7. Movimiento browniano y coeficiente de Hurst.....	26
2.7.1. Movimiento browniano estándar.....	27
2.7.2. Movimiento browniano fraccional (fBm)	28
2.8. Valores del Coeficiente de Hurst	30
CAPÍTULO III	31
3.1. Introducción	31

3.2. Recopilación de información	32
3.3. Descripción de la zona de estudio	33
3.3.1. Norte: Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	35
3.3.2. Centro: Av. Patria y Av. 6 de Diciembre	37
3.3.3. Sur: Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro.	39
3.4. Obtención de datos de densidad vehicular	41
3.5. Análisis de datos	43
3.5.1. Validación de datos	44
3.5.2. Generación de datos faltantes.....	45
3.6. Análisis de estadísticos de datos	47
3.7. Creación y diseño del algoritmo en Matlab	48
3.7.1. Generación del código en Matlab	48
3.8. Generación de series de tiempo y obtención de coeficiente de Hurst.....	51
3.9. Cálculo de error estándar y obtención del coeficiente de Hurst.....	54
3.10. Prueba de hipótesis.....	55
3.10.1. Primera prueba de hipótesis	56
3.10.2. Segunda prueba de hipótesis	57
CAPITULO IV	58
4.1. Análisis temporal	58
4.1.1. Series de tiempo totales, anuales y semestrales	59
4.2.2. Series de tiempo mensuales	61
4.1.3 Series de tiempo semanales.....	64
4.1.4. Series de tiempo por horas pico	66
4.1.5. Series de tiempo por horas	66
4.1.6. Series de tiempo por días de la semana.....	69

	x
4.2. Discusión de resultados.....	70
CAPÍTULO V	72
5.1. Conclusiones	72
5.2. Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Subperiodos siguiendo la distribución.....	13
Figura 2 Construcción de la Curva de Von Koch	17
Figura 3 Conjunto de Mandelbrot.....	17
Figura 4 Series de tiempo con diferentes H	19
Figura 5 a) Histograma de distribución, b) Gráfica log – log	20
Figura 6 a) Fractal Autosimilar vs b) Autoafín.....	22
Figura 7 Movimiento browniano esquematizado en un plano XY	23
Figura 8 Esquema general de la metodología de trabajo	32
Figura 9 Tendencia de crecimiento de desplazamientos motorizados del 2008 – 2025.....	34
Figura 10 Ubicación de las intersecciones de estudio.....	35
Figura 11 Zona de influencia intersección norte.....	36
Figura 12 Dirección de los sentidos intersección norte	37
Figura 13 Zona de influencia intersección centro	38
Figura 14 Dirección de los sentidos intersección centro.....	39
Figura 15 Zona de influencia sur	40
Figura 16 Dirección de los sentidos intersección sur.....	41
Figura 17 Interfaz del Sistema de control de Tráfico Urbano Optimus 7	42
Figura 18 Interfaz de los datos de conteo vehicular en Excel.....	43
Figura 19 Generación de datos faltantes. a) Organización de tabla por hora.	45
Figura 20 Base de conteo vehicular con datos faltantes	46
Figura 21 Codificación del programa en Matla	49
Figura 22 Interfaz Coeficiente de Hurst generada en GUIDE	50
Figura 23 Formato del archivo de Excel	51
Figura 24 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.....	54

Figura 25 Prueba de hipótesis unilateral	56
Figura 26 Prueba de hipótesis bilateral	57
Figura 27 Interfaces de series de tiempo totales	61
Figura 28 Variación mensual del coeficiente de Hurst	62
Figura 29 Interfaces de series de tiempo mensuales intersección norte sentido Giro Norte_Oriente. a) septiembre 2015 y b) noviembre 2015.....	64
Figura 30 Interfaces de series de tiempo semanales mes junio 2015.....	65
Figura 31 Variación por hora de H	67
Figura 32 Variación de H acuerdo al día de la semana	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sentidos de la intersección norte.....	36
Tabla 2 Sentidos de la intersección centro.....	38
Tabla 3 Sentidos de la intersección sur.....	40
Tabla 4 Datos faltantes en las tres intersecciones.....	43
Tabla 5 Datos faltantes en las intersecciones centro y sur.....	44
Tabla 6 Datos erróneos en las intersecciones.....	44
Tabla 7 Periodos de datos utilizados para el estimar H	46
Tabla 8 Estadísticos de datos totales en las tres intersecciones.....	47
Tabla 9 Error estándar de la estimación del coeficiente de Hurst.....	55
Tabla 10 Resultado de la primera prueba de hipótesis.....	56
Tabla 11 Resultado de la segunda prueba de hipótesis.....	57
Tabla 12 Coeficiente de Hurst en series de tiempo totales, anuales y semestrales....	59
Tabla 13 Coeficiente de Hurst en series de tiempo mensuales.....	62
Tabla 14 Coeficiente de Hurst en series de tiempo por horas pico.....	66
Tabla 15 Coeficiente de Hurst en series de tiempo por horas.....	68
Tabla 16 Coeficiente de Hurst en series de tiempo por días de la semana.....	70

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:

- 1. COEFICIENTE DE HURST**
- 2. COMPORTAMIENTO DINÁMICO,**
- 3. RANGO REESCALADO**
- 4. 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:

1. **HURST COEFFICIENT**
2. **DYNAMIC BEHAVIOR**
3. **RANGE RESCALED**
4. **VEHICLE'S OVERCROWDING**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Harold Hurst hidrólogo inglés en su investigación “The problem of Long-Term Storage in Reservoirs” estudió las fluctuaciones de las alturas del nivel del Río Nilo, por largos periodos de tiempo, para proyectar las capacidades de las reservas y así tomar medidas de precaución. Creando una nueva metodología estadística conocida actualmente como el coeficiente de Hurst, como una medida de independencia de las series de tiempo y elemento para distinguir series fractales (Hurst, 1956).

Cerón (2007), quien realizó la investigación “Análisis de tráfico vehicular en una zona crítica de la ciudad de Quito”, seleccionando las zonas críticas representativas de la ciudad, realizó un análisis del comportamiento dinámico utilizando indicadores a través de variables de flujo, con el fin de desarrollar modelos de Tráfico Vehicular.

Chen & Zhang (2007), quienes realizaron la investigación “System Analysis of Multifractal structure in expressways traffic flux”, utilizando como datos observaciones diarias del tráfico de la autopista Ji-Qing desde el 1 enero del 2002 hasta 30 abril del 2006, los cuales fueron analizados en flujo de tráfico alto, bajo y total, en las que se aplicaron pruebas de geometría fractal, estadística, teoría de sistemas dinámicos, para apoyar la estructura fractal aleatoria para el sistema de flujo de tráfico, en la que se obtuvo como exponente de Hurst el valor 0,8359 para el flujo de tráfico alto; 0,8448 para el bajo y 0,8425 para el tráfico total, continuando con la determinación de estructura multifractal en la zona de estudio.

Wang et al. (2009), realizaron la investigación “Traffic Flow Volume Fluctuation Analysis MF-DFA” utilizando como datos de flujo urbano recopilados en Bei-jing, China y los datos de flujo de tráfico de autopista en Washington, Estados Unidos en horas punta de 6:00 am a 10:00pm, determinando el comportamiento que se produce a diferentes escalas, utilizando el método de Rango Reescalado para determinar el exponente de Hurst con lo que se obtuvo valores cercanos a 1 en las horas punta, lo

que indica la existencia de correlación de largo alcance en las series temporales de flujo de tráfico urbano.

Zhang & Guan (2011), quienes realizaron la investigación “Empirical Study of Fractal Characteristics of Traffic Time Series” en las que se analizan las características fractales de la velocidad del flujo tráfico en condiciones libres, atascadas y sincronizadas, los mismos que fueron recolectados en el puente Guanyuan de Beijing en diversos periodos de tiempo de 9:30 a 10:15, 17:10 a 18:20 y de 22:00 a 23:30, con lo que se calculó la dimensión de correlación, el coeficiente de Hurst y la longitud de memoria en los tres tipos de flujo. Obteniéndose como resultados del coeficiente de Hurst 0,853, 0,849 y 0,707 para condiciones sincronizadas, atascadas y libres respectivamente, que complementada con la dimensión de correlación y la longitud de memoria se determinó que presentan características fractales diferentes.

Rodríguez (2012), en su investigación “Hidrología de Hurst y Box Counting para el análisis de persistencia, volatilidad y riesgo en dos series de tiempo colombianas” determinó el coeficiente de Hurst y la dimensión fractal de dos series de tiempo diferentes una hidrológica y otra financiera mediante dos métodos, permitiéndole establecer el grado de persistencia y volatilidad.

Perati M. et al. (2012), quienes investigaron “Self Similar behavior of Highway Road Traffic and performance analysis at Toll Plazas” utilizando datos de tráfico vehicular por hora durante todo el día, recolectados en una plaza de peaje en India desde el 14 al 20 de junio del 2010, para el cálculo del coeficiente de Hurst como indicador de intensidad de autosimilitud el mismo que se obtuvo por diferentes métodos como lo son el del Periodograma, Regresión de Residuales y Percentiles propuesto por el autor obteniéndose como resultados 0,746; 0,7546 y 0,7675 respectivamente, para proceder al modelado como sistema de colas, calculando la longitud media de la cola y la distribución del período ocupado. Los resultados numéricos demuestran claramente que el análisis presentado en este documento puede ser útil para diseños mejorados de plazas de peaje.

1.2. Definición del Problema

La congestión del tránsito vehicular ha ido en aumento en gran parte del mundo y todo indica que seguirá agravándose, constituyendo un peligro para la calidad de vida urbana. Su principal manifestación es la progresiva reducción de las velocidades de circulación, que se traduce en incrementos de tiempos de viaje, de consumo de combustibles, de otros costos de operación y de polución atmosférica (Bull, 2003), por lo que es de vital importancia la Gestión del Tráfico que tiene como propósito el integrar de manera eficiente el flujo de vehículos y los peatones en un sistema vial.

El Municipio de Quito para esto cuenta con el Plan Maestro de Movilidad (PMM) 2009 – 2025 como guía de referencia dinámica para la gestión del desarrollo sustentable de la movilidad metropolitana, siendo también un instrumento de participación de la comunidad, en la gestión integral de todos sus componentes (EPMMOP, 2009)

En el PMM se plantean varias medidas para dar solución a uno de los problemas más graves que presenta la ciudad como lo es la congestión vehicular ya que en las denominadas horas pico existen avenidas donde se aprecian varias cuerdas con filas de vehículos. Entre las medidas adoptadas está el pico y placa vigente desde mayo del 2010, el cual restringe la circulación del 17% del parque automotor, de acuerdo al último dígito de las placas, dos por día, de 07h00 a 09h30 y de 16h00 a 19h30 (cinco horas al día); sin embargo, los beneficios alcanzados en sus primeros meses, fueron disminuyendo paulatinamente debido al aumento del parque automotor, que presenta una tasa de crecimiento que oscila entre 5% y 10%, por lo cual en menos de dos años y medio el número de vehículos en las vías vuelva ser el mismo que se estaba tratando inicialmente, con tendencia a seguir creciendo (Secretaría de Movilidad, 2014)

Otros de los problemas a tratarse en el PMM es el mejoramiento del transporte público garantizando que los desplazamientos se realicen en condiciones de eficiencia, precautelando la seguridad e integridad de las personas, asegurando la conectividad entre las diferentes partes de la ciudad para de esta manera incentivar su uso y por ende disminuir el crecimiento del parque automotor. Pero lejos de cumplirse con este objetivo según la Secretaria de Movilidad (2014), del año 2011 al

2014 se redujo del 72,7% a 61,3%, en consecuente aumentando el parque automotor. Así según El Comercio en un artículo publicado el 27 de diciembre del 2014 con información de la Agencia Metropolitana de Tránsito al finalizar ese año notificó un aumento en la tasa de crecimiento de un 2% lo que implicó 50000 unidades nuevas.

Por esto es preciso buscar nuevas teorías que aporten una ayuda a los métodos de planificación que hasta hoy están siendo utilizados, debido a que no están dando los resultados esperados, ya que es necesario un análisis más amplio que permita dar soluciones eficaces al problema de congestión vehicular, de esta manera mediante la estimación del coeficiente de Hurst se determinará el comportamiento dinámico que presenta este fenómeno ya que nos permitirá analizarlo a través del tiempo.

1.3. Justificación

En la actualidad la planificación adecuada del territorio se ha convertido en una necesidad para garantizar un ambiente sustentable y productivo, pero para conseguir esto se debe complementar todos los factores que integran una ciudad, siendo un tema de gran importancia para todos los gobiernos.

Ecuador es un país que ha dejado de lado la planificación del territorio, siendo así a raíz de la vigencia de la última Constitución en el Ecuador, desde 2008, se desarrolla el primer sistema nacional de planificación (López, 2015); situación que ha provocado graves problemas tanto a nivel nacional como cantonal, uno de ellos es la congestión vehicular que genera malestar en los pobladores. La ciudad de Quito al ser la capital político - administrativa del país presenta este problema en grandes proporciones aunque varias han sido las medidas tomadas, lejos de solucionar el problema, cada día se agrava más por lo que es imperante incorporar nuevas teorías y metodologías provenientes de otras disciplinas.

De esta manera en esta investigación se pretende dar los primeros indicios para aplicar nuevas teorías que aporten una ayuda a los métodos de planificación ya conocidos e implementados por el Municipio de Quito, así mediante la estimación del coeficiente de Hurst se determinará el comportamiento dinámico que presenta el

tráfico vehicular en tres intersecciones conflictivas al norte, centro y sur de la ciudad de Quito, de igual manera analizando sus características fractales que en la actualidad se ha convertido en una herramienta de análisis y diseño que consideran aspectos reales y existentes, tales como redes sociales, tecnológicas, culturales, entre otras, de esta manera se transforman en un complemento para la planificación (Unibazo & Suazo, 2009); convirtiéndose así en el primer estudio en el país el cual incorpora otras disciplinas a los métodos de planificación hasta hoy utilizados

1.4.Objetivo

1.4.1. Objetivo General

Estimar el coeficiente de Hurst con la finalidad de determinar el comportamiento dinámico del tráfico mediante el uso de Rango Reescalado (R/S)

1.4.2. Objetivos Específicos

- Establecer las zonas de mayor conflicto de tráfico vehicular en la zona urbana de Quito a partir de la base de datos de la EPMMOP, para un análisis de la situación actual.
- Analizar las series temporales mediante técnicas estadísticas descriptivas para un análisis previo del comportamiento de los datos.
- Estimar el coeficiente de Hurst en diferentes intervalos de tiempo para establecer su comportamiento temporal en las diferentes zonas urbanas mediante la metodología de Rango Reescalado (R/S).

1.4.3. Metas

- Establecer tres zonas de conflicto vehicular en el norte, centro, sur de Quito.
- Establecer una serie temporal de por lo menos doce meses en las tres zonas.
- Realizar series diarias, semanales, mensuales, semestrales y anuales.
- Determinar los estadísticos para un análisis previo de las series de tiempo.

- Desarrollar un programa para el cálculo del coeficiente de Hurst utilizando el software Matlab.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Series de Tiempo

2.1.1. Definición

Una serie de tiempo se define como un proceso estocástico (sucesión de variables aleatorias que se desarrollan a través de otra variable) de observaciones de una variable en particular sobre incrementos sucesivos de tiempo, ordenado según el instante en el cual fueron tomados, usualmente en intervalos iguales (Brockwell, 2002; Murillo, Trejos, & Olaya, 2003).

2.1.2. Aplicaciones de las series de tiempo

Resulta difícil en la actualidad imaginar algún área científica en la que no aparezcan datos que puedan ser considerados como series temporales. Estudiar el comportamiento de una variable en el pasado es de gran utilidad al momento de predecir su comportamiento en el futuro, aunque este no sea con total exactitud. Lo que permitirá tomar acciones que se deberán llevar a cabo, ya sea para conservar la evolución actual o para modificarla (Guzman, 2014). Algunas de las áreas de aplicación son (Ríos G. , 2008):

- *Economía*. Tasa de desempleo, inflación, índice de precios, precio del dólar, cobre, acciones, ingreso nacional bruto.
- *Meteorología*. Cantidad de agua caída, temperatura máxima diaria, velocidad del viento, energía solar.
- *Geofísica*. Sismología.
- *Química*. Viscosidad y temperatura de un proceso.
- *Demografía*. Tasa de natalidad y mortalidad.
- *Medicina*. Electrocardiograma, electroencefalograma.
- *Marketing*. Gastos, utilidades, ventas, ofertas.
- *Telecomunicaciones*. Análisis de señales.
- *Transporte*. Tráfico vehicular, motivo de la investigación.

2.1.3. Objetivos de las series de tiempo

Entre los objetivos principales del análisis de una serie de tiempo, están: descripción, explicación, predicción y control, a continuación, se explicará cada uno de ellos (Chatfield, 2003 citado en Méndez, 2013, pág. 16; Guzman, 2014):

- *Descripción.* Para el análisis de una serie de tiempo lo primero es graficar las observaciones, así se obtienen medidas simples y sus propiedades principales.
- *Explicación.* Cuando las observaciones son tomadas en dos o más variables, es posible usar la variación en una serie de tiempo para explicar el comportamiento en otra.
- *Predicción.* Es la estimación de valores futuros de una variable en función del comportamiento pasado de la serie.
- *Simulación.* Se emplea en investigación aplicada, cuando el proceso es muy complejo para ser estudiado de forma analítica.
- *Control.* Una serie de tiempo se analiza con el fin de mejorar el control sobre algún sistema físico o económico.

2.1.4. Clasificación descriptiva de las series de tiempo

Las series de tiempo se pueden clasificar en (Villavicencio, 2010; Ríos G. , 2008):

- *Serie no estacionaria:* Son aquellas en las cuales la tendencia o variabilidad cambian, es decir, sus características de media, varianza y covarianza cambian a través del tiempo lo que dificulta su modelamiento. Los cambios en la media determinan una tendencia a crecer o decrece a largo plazo, por lo que la serie no oscila alrededor de un valor constante.
- *Serie estacionaria:* Son aquellas que son estables, es decir, la media y varianza no cambian a través del tiempo y cuya covarianza sólo es función del rezago, lo que se refleja gráficamente ya que los valores de la serie oscilan alrededor de una media constante, de igual manera su variabilidad. Gracias a estas características se puede modelar el proceso subyacente a partir de los datos pasados.

2.1.5. Modelos de series de tiempo

Alfares y Nazeeruddin citado en Guzman (2014), se refieren al término modelo como la forma de representar un proceso o sistema físico complejo por medio de la abstracción, siendo una forma de experimentar la realidad, permitiendo a un fenómeno ser repetido varias veces, conocido también como simulación. Los modelos de series de tiempos lineales se pueden generalizar en la siguiente clasificación (Guzman, 2014):

- *Modelos univariantes*. Se emplea únicamente la variable a predecir en la serie de tiempo.
- *Modelos multivariantes*. Se utiliza además de la serie de tiempo de estudio, otras series de tiempo que podrían influenciaren la predicción de la variable.

2.1.6. Componentes de una serie de tiempo

Una manera de analizar una serie de tiempo es dividiéndola en componentes. Dándole un enfoque estándar que consiste en encontrar características que correspondan a una tendencia a largo plazo, algún comportamiento cíclico, un componente estacional y una parte irregular. Algunos de estos aspectos esenciales de los procesos no son directamente observables, es por ello que es importante disponer de procedimientos que permitan extraer esos aspectos de las observaciones (Méndez, 2013).

Según Murillo, Trejos & Olaya (2003) la descomposición clásica es un método que se basa en el supuesto que la serie de datos se pueden desagregar en componentes como: tendencia, ciclo, estacionalidad e irregularidad; que se describen a continuación:

- *Tendencia*. Es aquella que contiene una componente a largo plazo que representa el crecimiento o descenso de la serie a través de un amplio período de tiempo.

- *Estacional*. Es aquella que presenta un patrón de cambio similar año tras año, por lo regular, el desarrollo de una técnica de pronóstico estacional se lo realiza a partir de la historia de la serie de tiempo.
- *Ciclo*. Se define como la fluctuación en forma de onda alrededor de la tendencia, los patrones cíclicos tienden a repetirse en los datos cada dos, tres o más años. Es difícil establecer un modelo para estos patrones cíclicos, ya que no son estables.
- *Irregular*. Es el factor residual, es decir, todo lo que sobra y toma en consideración las desviaciones de los valores reales en comparación con los esperados, es el elemento aleatorio.

2.2. Coeficiente de Hurst

2.2.1. Antecedentes del Proceso de Hurst

Harold Edwin Hurst hidrólogo británico (1880 – 1978) fue el primero en estudiar las series fractales, sus ideas fueron retomadas posteriormente por Benoit Mandelbrot quien, generalizó su trabajo y lo denominó análisis de Rango Reescalado (R/S). El R/S es un método estadístico que permite evaluar la ocurrencia de eventos poco comunes, siendo una herramienta ideal para procesos físicos y financieros (Gutiérrez, 2008). Además por sus características puede ser utilizado en cualquier serie de tiempo como lo es en el tráfico vehicular motivo de esta investigación

El parámetro que resulta del análisis de R/S se lo denomina coeficiente de Hurst (H), 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).

Hurst ingeniero hidrólogo a los 26 años intervino en la construcción de la presa del río Nilo, inicialmente por una corta temporada que se extendió por 62 años. Su trabajo consistía en encontrar la solución para poder controlar las reservas de la presa, ya que en periodos de tiempo se vaciaba proporcionalmente y no existía suficiente

reserva. La importancia para Egipto en el comportamiento del río Nilo, se debía a que sus crecidas anuales son la base de la agricultura. Hurst para cumplir su objetivo estudio los registros de 847 años, datos tomados por los egipcios desde el 622 A.C. al 1469 D.C., donde observó que los registros no parecían ser aleatorios, es decir, a crecidas le siguen crecidas mayores y a sequías le seguían más sequías. Los cuales se presentaban como ciclos, pero no periódicos, lo que indicaba que el sistema era incontrolable y no existía una correlación estadística significativa, por lo que Hurst desarrolló su propio método estadístico (Gutiérrez, 2008; Muller, 2008; Quezada, 2006).

Para cumplir con su objetivo Hurst se basó en el trabajo realizado por Einstein sobre el movimiento browniano, quien había encontrado que la distancia (D) de una partícula errática suspendida en un fluido se incrementa con la raíz cuadrada del tiempo (T), la cual se describe en la ecuación 1, la cual es conocida como regla de un medio utilizada principalmente en estadística (Sierra, 2007).

$$D = T^{0.50}$$

(1)

Para aplicar este concepto se debe considerar una ecuación que tome en cuenta que los componentes de las series de tiempo no son independientes. Por lo que Hurst para cumplir con su objetivo y solucionar el problema desarrolló la siguiente ecuación (Sierra, 2007):

$$\left(\frac{R}{S}\right)_n = cp^H$$

(2)

Donde:

$\left(\frac{R}{S}\right)_n$ = Estadístico Rango Reescalado

c = constante

p = indicador del valor de la serie de tiempo

H = coeficiente de Hurst

2.2.2. Rango Reescalado (R/S)

Análisis de Rango Reescalado (R/S) uno de los métodos utilizados para determinar el coeficiente de Hurst, es un análisis no paramétrico que no requiere de una distribución específica. R/S tiene una media cero y se expresa en términos de desviación estándar, estos valores aumentan de acuerdo al número de datos, por el valor de la ley de potencias (ecuación 2) igual al exponente de Hurst, siendo la primera conexión con la geometría fractal. (Sierra, 2007).

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:

$$e_a = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N_{k,a} \quad (3)$$

3. 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:

$$X_{k,a} = \sum_{i=1}^k (N_{i,a} - e_a), \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

4. 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 :

$$RI_a = M_{ax}(X_{k,a}) - M_{in}(X_{k,a}), \quad \text{donde } 1 \leq k \leq n \quad (5)$$

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

$$SI_a = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (N_{k,a} - e_a)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

6. 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 .
7. La longitud n o el tamaño del subperíodo se realizó siguiendo la distribución de la ley de potencias (ver sección 2.4). Para generar los subperíodos 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.

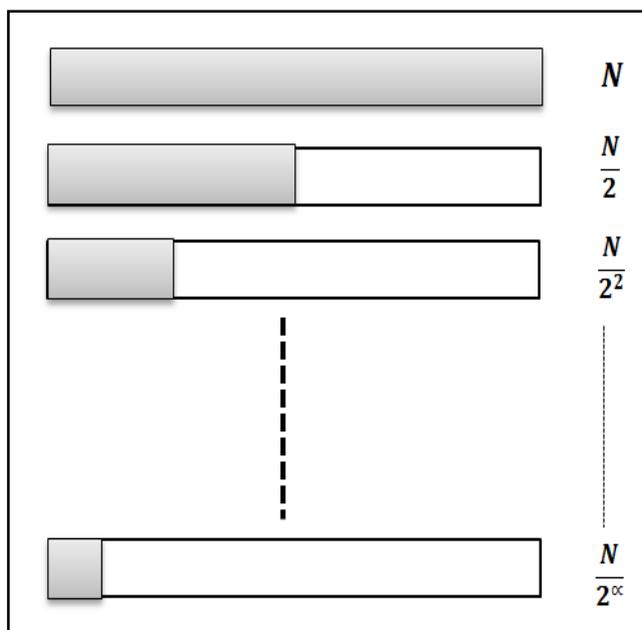


Figura 1 Subperíodos siguiendo la distribución de Ley de potencias

8. Finalmente se aplica una regresión de mínimos cuadrados de $\log(RI_a/SI_a)$ contra $\log(n)$ de cada subperíodo I_a . La pendiente en ecuación 7 es la estimación del coeficiente de Hurst (H).

$$\log \left(\frac{R}{S} \right)_n = \log(a) + H \log(n) \quad (7)$$

2.2.3. Prueba de significancia del coeficiente de Hurst

La metodología presentada en la sección anterior se utilizó para la estimación del coeficiente de Hurst (H). Sin embargo, cabe cuestionarse el valor de H obtenidos, ya que en varios de estos al calcular el error estándar (véase sección 3.7), se encuentran en un rango en el que es necesario distinguir si H sigue un proceso aleatorio o con tendencia (persistente o antipersistente); por lo que para estos casos se realizó una prueba de significancia.

En principio Hurst planteó su hipótesis nula sobre la distribución binomial y el lanzamiento de monedas, el resultado obtenido se expresa en la ecuación 8 (Peters, 1994).

$$\left(\frac{R}{S}\right)_n = (n * \pi/2)^{0.50}$$

(8)

Lo anterior fue retomado por Feller que encontró un resultado similar, pero se basó en el rango ajustado, es decir, en las desviaciones acumuladas con el medio de la muestra suprimido y desarrolló el valor esperado del rango ($E(R'(n))$) y su varianza ($Var(E(R'(n)))$) que se expresan en las ecuaciones 9 y 10 respectivamente (Peters, 1994).

$$E(R'(n)) = (n\pi/2)^{0.5}$$

(9)

$$Var(E(R'(n))) = (\pi^2/6 - \pi/2) * n$$

(10)

Annis & Lloyd (1976), corrigieron la ecuación 9 para la determinación específica del valor esperado del rango reescalado ($E(R/S)_n$), bajo la hipótesis nula desarrollaron la ecuación 11, que eludía la desviación sistemática del estadístico

$(R/S)_n$ para un pequeño número de observaciones, problema que se presentaba en la ecuación 9 obtenida por Feller.

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

(11)

Una vez obtenidos los valores esperados de $E(R/S)_n$ y con la longitud n de los subperiodos, se realiza la regresión de mínimos cuadrados siguiendo el paso 8 de la metodología descrita en la sección 2.2.2, obteniendo como resultado valor esperado del coeficiente de Hurst $E[\hat{H}]$, bajo la hipótesis nula, cuya varianza es representada en la siguiente ecuación (Escot, 2000):

$$Var(E[\hat{H}]) = \frac{1}{N}$$

(12)

Donde N es el número total de observaciones.

Rodríguez R. (2012), planteó las siguientes hipótesis, para evaluar la significancia estadística del coeficiente de Hurst:

H_0 : El proceso es aleatorio e independiente (ruido blanco, $H = 0,5$).

H_1 : El proceso está correlacionado (positiva o negativamente, $H >< 0,5$).

Escot (2000), para calcular el estadístico Z_E específico para el coeficiente de Hurst, planteó la ecuación 13, en el que se utiliza los dos estimados del coeficiente de Hurst, H y $E[\hat{H}]$ obtenidos en la sección 2.2.2 y 2.2.3 respectivamente.

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

(13)

El estadístico Z_E se contrasta con las tablas de probabilidad de la distribución normal y la hipótesis nula se aceptará con un 95% de confianza (Rodríguez E. , 2012).

2.3. Geometría Fractal

2.3.1. Fractales

La palabra fractal proviene del adjetivo latino fractus (irregular) y del verbo frangere (romper en pedazos) confluyendo ambos significados en el término fragmento. Fractal es todo objeto irregular y con estructura compleja, que se caracteriza porque mantienen estructura similar en todas sus escalas, es decir, que la parte es semejante al todo lo cual es conocido como autosimilitud (Mandelbrot, 1997; Solé & Manrubia, 2001; Torres, 2007). Algunas de las características principales que presentan los fractales son las siguientes:

- Conjunto irregular que no puede ser descrito con la geometría tradicional, es decir, por la geometría euclidiana (Quezada, 2000 citado en Torres, 2007).
- Poseen estructura fina, es decir, tienen detalles en todas las escalas que se las observa (Quezada, 2000 citado en Torres, 2007).
- La propiedad más importante de los fractales es la autosimilaridad, que quiere decir que sus partes más pequeñas tiene alguna relación (Rodríguez R. , 2012) estadística con el todo, repitiendo tales detalles de manera infinita. (Sierra, 2007; Gutiérrez, 2008).
- Generalmente la dimensión fractal es más grande que la dimensión topológica, ya que los objetos se caracterizan por poseer dimensión fraccionaria (Quezada, 2000 citado en (Torres, 2007; Gutiérrez, 2008).

2.3.2. Tipos de fractales

Una de las propiedades de los fractales es la autosimilitud (véase sección 2.5), de la cual se derivan dos tipos de fractales que se explican a continuación (Torres, 2007; Sierra, 2007):

- *Fractales Lineales*. Son aquellos con un simple cambio en la variación de sus escalas, es decir son idénticos al aumentar al infinito, por lo que son

estrictamente autosimilares. Entre este tipo de fractales están: el Triángulo de Sierpinski, el conjunto de Cantor, y la curva de Von Koch (ver figura 2).

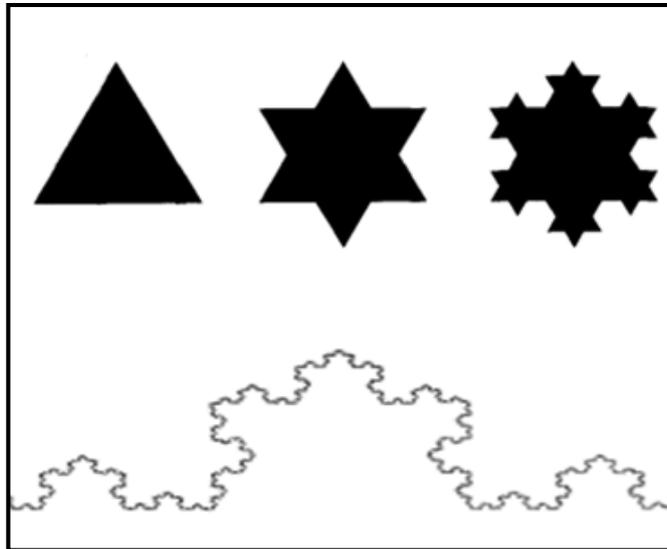


Figura 2 Construcción de la Curva de Von Koch

Fuente: (Mandelbrot, La Geometría Fractal de la Naturaleza. (Traducido al español de The Fractal Geometry of Nature), 1997)

- *Fractales No Lineales*. Se generan a partir de distorsiones complejas, por lo que son muy aproximados en todas sus escalas a la figura original, la mayoría de los objetos fractales puramente matemáticos y naturales son de este tipo al no tener una autosemejanza perfecta. Entre este tipo de fractales están: el conjunto de Mandelbrot (ver figura 3) y el conjunto de Julia.

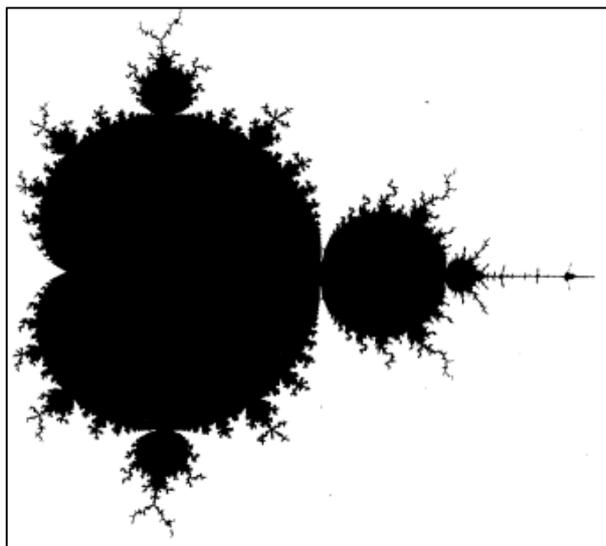


Figura 3 Conjunto de Mandelbrot

Fuente: (Mandelbrot, 1997)

2.3.3. Dimensión fractal

La dimensión fractal se basa en los grados de libertad asociados, así una curva se la define a través de su longitud, un objeto por su área, es decir, es el número que refleja la medida topológica de un conjunto fractal a distintas escalas (Gutiérrez, 2008; Luegas, Ardila, & Moreno, 2010). Una forma de calcular la dimensión fractal (Df) es a través del coeficiente de Hurst (H) y la dimensión euclidiana (De) ya que se encuentran relacionados por la siguiente ecuación (Schroeder 1991, Addison 1997 citado en Vindel, 2013):

$$Df = De + 1 - H$$

(15)

Con los distintos valores del coeficiente de Hurst, se tiene que si $H = 0,5$ entonces $Df = 1,5$ ambos valores de un sistema aleatorio e independiente; $H > 0,5$ la dimensión fractal disminuirá y la representación gráfica de la serie asociada tenderá a acercarse a una recta, dando como resultado series de tiempo persistentes con líneas más suaves y con menos picos que en una serie aleatoria; $H < 0,5$ la dimensión fractal aumentará y la representación gráfica se acercará a una superficie, dando como resultado series de tiempo antipersistentes. Cuanto mayor es la persistencia menor es la variabilidad de la serie y, en consecuencia, menor es la dimensión fractal, lo contrario ocurre con las series antipersistencia (Luegas, Ardila, & Moreno, 2010; Vindel, 2013; Ojeda, 2004).

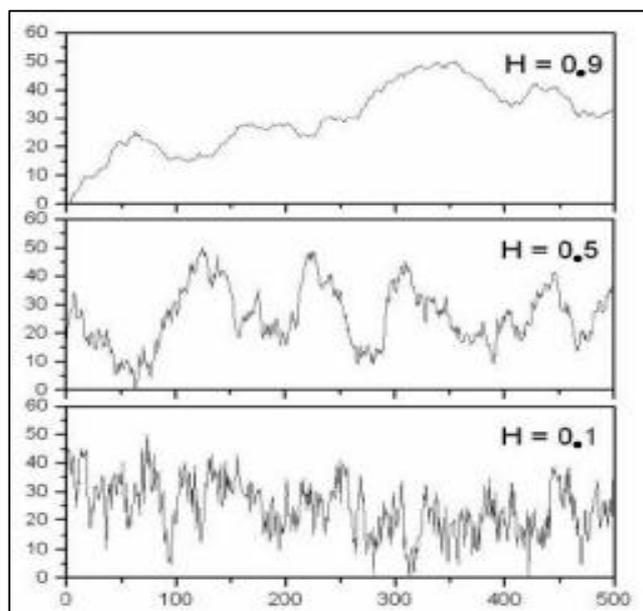


Figura 4 Series de tiempo con diferentes H

Fuente: (Ortiz, 2008)

2.4. Ley de Potencia

La ley de potencia describe la invarianza de escala en muchos fenómenos dispersos siendo una forma de auto-organización de los sistemas complejos, debido a que presentan gran cantidad de elementos que interaccionan entre sí para producir una estructura de nivel superior. Los sistemas que se encuentran gobernados por una ley de potencias cuando la probabilidad de ocurrencia de sus eventos o fluctuaciones de grandes magnitudes es baja, contrario a lo que sucede con los eventos de magnitudes pequeñas ocurren con más frecuencia, las cuales se encuentran relacionadas por una potencia con exponente característico. Un ejemplo para entender mejor esta idea se muestra en la figura 5a, donde el histograma de la curva decae asintóticamente hacia la derecha, lo que significa que mientras una distribución tiene medidas por debajo de la media estándar, existe un pequeño número con valor más alto al típico, por lo que el mismo histograma en gráfica log-log ese aproxima a una recta como se aprecia en la figura 5b (Gálvez, 2005; Contreras, 2007; Ayala, 2012).

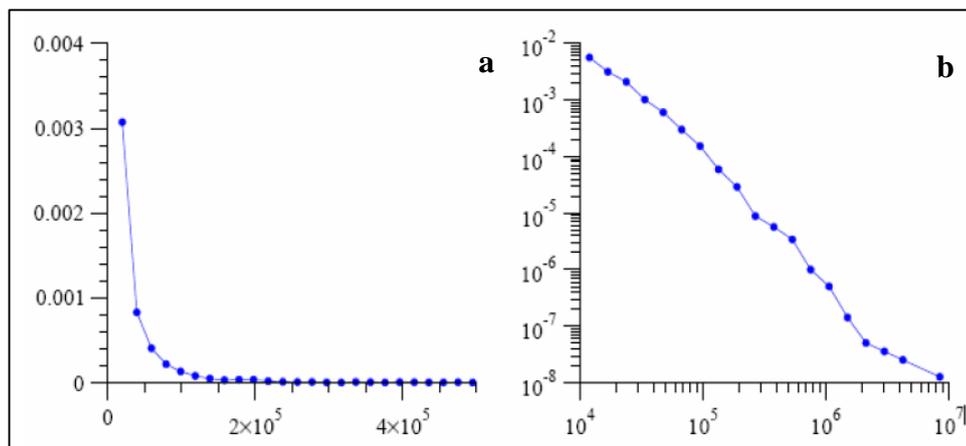


Figura 5 a) Histograma de distribución, b) Gráfica log – log

Fuente: (Contreras, 2007)

Sea $p(x)dx$ la división de los valores que se encuentran entre $(x ; x + dx)$. Si el histograma en la gráfica de log-log es una línea recta (ver figura 5b), entonces $\ln(p(x)) = -\alpha \ln x + c$, donde $\alpha > 0$ y c constante de proporcionalidad. Al aplicar el exponencial a ambos lados a la expresión anterior, se tiene la ecuación 15 (Contreras, 2007).

$$p(x) = cx^{-\alpha} \quad (15)$$

Cuando una función se comporta de acuerdo a la ecuación 15 cumple con la ley de potencia, esto indica que el valor de $p(x)$ se determina a diferentes escalas dependiendo del valor de α (Contreras, 2007).

2.4.1. Ley de potencia y percepción de autosimilaridad

Como se mencionó anteriormente una de las principales propiedades de los conjuntos fractales es la autosimilaridad, la que es caracterizada por la ley de potencia en una amplia gama de escalas temporales y espaciales. A continuación, se explica la relación entre la ley de potencia y la percepción de autosimilitud.

Al salir a el parque se observa un gran número de globos de diferentes tamaños flotando a través del cielo, los cuales siguen la distribución de la ley de potencia (ecuación 15). Como humanos a través de la percepción visual se puede identificar entre los diferentes tamaños grandes, medianos y pequeños, pero esto se lo realiza

porque arbitrariamente se determina a uno de estos como referencia (debido a la gran cantidad que se observa), al que se lo determina con escala x_0 , a partir de esto se podrá identificar escalas como $2x_0, \frac{x_0}{2}$, etc., lo que queda expresado en la ecuación 16 (Gao, Cao, Tung, & Hu, 2007).

$$\frac{p(2x_0)}{p(x_0)} = \frac{p(x_0)}{p(x_0/2)} = 2^{-\alpha}$$

(16)

Donde α es independiente de x_0

2.5. Autosimilitud

2.5.1. Autosimilitud, estadísticamente autosimilar y autoafín

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, uniforme en todas las direcciones. Como se observa en la figura 6a en la parte superior la estructura original y en la inferior una ampliación de una fracción que es exactamente igual en la misma dirección de 3x en ancho y alto. Siendo este 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 fractal es autoafín cuando sus formas son invariantes a través de las transformaciones que escalan las coordenadas en diferentes cantidades, lo que se traduce a que presenten características anisotrópicas (diferentes propiedades en todas las direcciones). A pesar de sus diferencias, en la escala de transformación, las direcciones no son completamente diferentes, como se aprecia en la figura 6b en donde, la fracción similar de la estructura original se repite en diferente dirección en 3x en largo y 2x en alto (Gutiérrez, 2008; Batlle & Grébol, 2009).

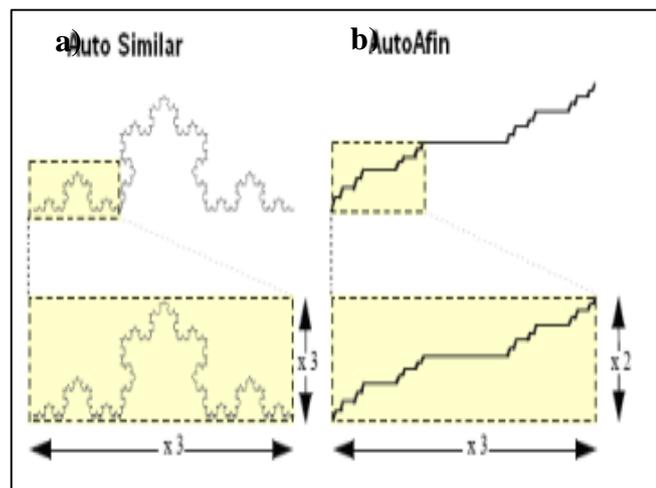


Figura 6 a) Fractal Autosimilar vs b) Autoafín

Fuente: (Gutiérrez, 2008)

La autosimilitud puede ser determinista o estadística, el primer tipo se refiere a los fractales que son exactamente igual al todo a cualquier escala, son los fractales más simples (fractales lineales), la autosimilitud estadística se refiere a aquellos que conservan sus propiedades en escala estadística, es decir, son similares e independientes del submuestreo (Mandelbrot, 1983; Turner et al, 1998 citado en Miranda, y otros, 2006; Gutiérrez, 2008).

Con este preámbulo, un caso particular de los conjuntos autosimilares es el autoafín, cuyo escalamiento (preservación de la forma o de los momentos estadísticos) se efectúa de diferente manera a lo largo de distintas direcciones geométricas, es decir, su escalonamiento no es autosimilar sino aproximado o estadístico. Entre los objetos que describen esta característica se tiene los perfiles generados por movimientos brownianos (ver sección 2.7), que mantienen su aspecto durante el escalamiento, si este se hace diferente en al menos una de las direcciones, siendo anisotrópicos característica de los fractales autoafines. Otro ejemplo, se ilustra en la figura 7 del movimiento browniano proyectado en un plano (x,y), donde, el recorrido de la partícula es estadísticamente el mismo, independiente de la magnitud (Carr, 1997 citado en Miranda, y otros, 2006; Gutiérrez, 2008; González & Guerrero, 2001; Hinojosa, Aldaco, & Castillo, 2016).

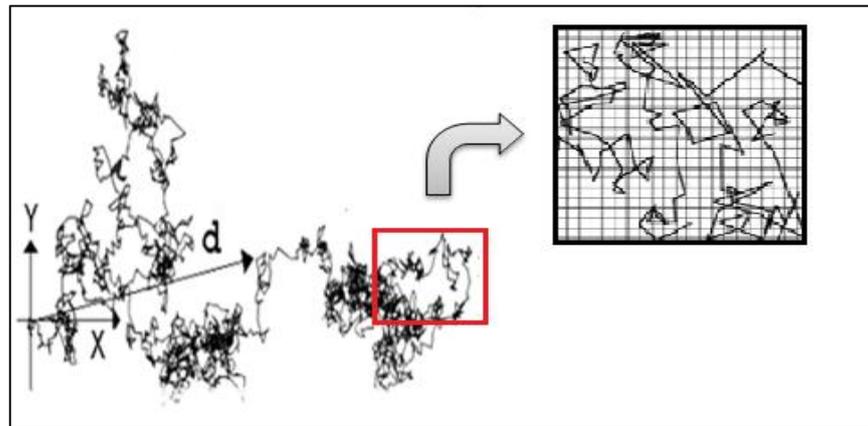


Figura 7 Movimiento browniano esquematizado en un plano XY

Fuente: (González & Guerrero, 2001)

2.5.2 Procesos autosimilares

En la sección anterior se explicó la autosimilitud, en la investigación, la definición y el entendimiento de estos conceptos será de vital importancia, ya que con lo anterior un objeto autosimilar es exactamente o estadísticamente similar en sus partes a un todo. Para lo cual el coeficiente de Hurst (H) será de gran utilidad debido a que cuantifica la autosimilaridad, así, como para determinar la longitud de la dependencia a largo plazo de un proceso estocástico. Solo existe autosimilaridad si H varía entre 0,5 y 1, siendo 1 el grado más alto, por lo que si $H = 0,5$ indica la ausencia de autosimilitud (Rabinovich, Osimani, & Olocco, 2013; Bravo, 2004; Pérez, 2007).

Se dice que un proceso $X(t)$ es autosimilar, si cumple con la ecuación 17, donde $b = g^H$; donde H es el exponente de autosimilitud. El símbolo \approx significa igualdad en sentido estricto, si se trata de autosemejanza determinista; si la autosemejanza es tan solo estadística, ese símbolo indica que ambos miembros de la ecuación tienen la misma distribución de probabilidad (Muñoz, 2005; Vindel, 2013):

$$\forall g \ni b/X(gt) \approx bX(t)$$

(17)

2.6. Memoria de larga dependencia

La presencia de autosimilitud en series de tiempo está vinculado directamente con la presencia de memoria de larga dependencia, y por ende con el coeficiente de Hurst (H) al ser medida del nivel de autosimilitud, es decir, que el comportamiento actual depende de valores del pasado. Como se explicó anteriormente cuando H toma valores mayores a 0,5 aparece este fenómeno y mientras más se acerca a 1, mayor es el grado de persistencia, de igual manera si $H = 0,5$ indica ausencia absoluta de memoria de larga dependencia (Millán, 2013; Herrera, 2007; Pérez, 2007).

Se puede definir la memoria de larga dependencia de acuerdo el comportamiento de la autocovarianza ($C(\tau)$) a medida que τ aumenta. Para procesos estacionarios la autocorrelación $C(\tau) = \text{corr}(X_t, X_{t+\tau})$ decae como la potencia de retardo (τ) (Herrera, 2007)

$$C(\tau) = \text{corr}(X_t, X_{t+\tau}) \tau \simeq \infty \frac{L(\tau)}{\tau^{1-2d}}; \quad 0 < d < \frac{1}{2}$$

(18)

La propiedad de poseer larga dependencia, está relacionado con el comportamiento de la autocorrelación para τ el cual es difícil de estimar empíricamente, por esto los modelos de memoria de larga dependencia son formulados en términos de procesos autosimilares, que extrapola escalas de tiempo y deduce comportamientos de largo tiempo a partir de un comportamiento de corto tiempo el cual es más sencillo de identificar (Palomas, 2002).

En un proceso dependiente de corto plazo satisface la condición de que su autocovarianza decae tan rápidamente como una exponencial (Pérez, 2007):

$$C(K) \approx a^{|K|} \text{ a medida que } |K| \rightarrow \infty, \quad 0 < a < 1$$

(19)

Donde \approx denota que las expresiones a ambos lados son asintóticamente proporcionales una a otra.

Un proceso dependiente de largo plazo tiene una covarianza que decae hiperbólicamente como se expresa en la ecuación 20.

$$C(K) \approx |K|^{-\beta} \text{ a medida que } |K| \rightarrow \infty, 0 < \beta < 1$$

(20)

Donde β se relaciona con el coeficiente de Hurst mediante:

$$H = 1 - \frac{\beta}{2}, 1/2 < H < 1$$

(21)

La memoria de dependencia a largo plazo refleja intuitivamente el fenómeno de persistencia en un proceso autosimilar. El espectro de densidad de potencias (ω) obedece a una ley de potencia cerca del origen (Pérez, 2007):

$$S(\omega) \approx \frac{1}{|\omega|^\gamma} \text{ si } \omega \rightarrow 0, 0 < \gamma < 1$$

(22)

Donde puede demostrarse que $\gamma = 1 - \beta = 2H - 1$ por lo que existe relación con el coeficiente de Hurst.

Fueron Mandelbrot & Van Ness (1968), quienes encontraron el nexo entre el proceso autosimilar y la larga dependencia de series de tiempo estacionarias, a través de Ruido Fraccional Gaussiano (fGn), calculado la densidad espectral ($f(\lambda)$):

$$f(\lambda) \sim C_H |\lambda|^{1-2H}, (1/2 < H < 1)$$

(23)

Esto debido a que un ejemplo típico de autosimilitud es el ruido fraccional browniano donde los incrementos presentan memoria de larga dependencia. El movimiento fraccional Browniano (ver sección 2.7.2) con coeficiente de Hurst $H \in [0,1]$, como indicador de presencia de autosimilitud, es un proceso Gaussiano real centrado con incrementos estacionarios $(B_t^H)_{t \geq 0}$ con función de covarianza que se expresa como en la ecuación 24.

$$\text{cov}(B_t^H, B_s^H) = \frac{1}{2} (|t|^{2H} + |s|^{2H} - |t - s|^{2H})$$

(24)

Donde para $H = 1/2$ se tiene movimiento browniano, cuando $H \neq 0$, la covarianza de los incrementos decae muy lentamente, con la potencia de retardo, $H > 1/2$ representa larga dependencia en los incrementos (Samorodnitsky & Taqqu, 1994 citado en (Herrera, 2007); (Mandelbrot & Van Ness, 1968).

El proceso de memoria de larga dependencia presenta las siguientes características (Herrera, 2007; Djaparidze, 2006):

- Existen períodos relativamente largos en los cuales las observaciones tienden a mantenerse altas y períodos largos con niveles bajos.
- En períodos de tiempo cortos, se observan ciclos o tendencias locales. Sin embargo, si se analiza toda la serie, no hay ciclos o tendencias aparentes, pareciera que los ciclos se producen en casi todas las frecuencias, superpuestos y de manera aleatoria.
- La serie parece estacionaria.
- La varianza de la media muestral parece decaer a cero o a una tasa menor que $1/N$ donde N es el tamaño de la muestra.
- La autocorrelación de la muestra decae a cero a una tasa que es aproximadamente proporcional a τ^a para algún $0 > a > 1$.

2.7. Movimiento browniano y coeficiente de Hurst

El movimiento browniano es una sucesión de pequeños desplazamientos en cualquier dirección sin ninguna norma, es decir, se trata de un movimiento caótico que puede estudiarse como un fractal estadístico. Recibe su nombre en honor a Robert Brown botánico inglés 1827 observó este comportamiento en el movimiento de partículas de polen en el agua esto se debe en las colisiones muy suaves de la partícula de polen con las moléculas del entorno, siendo estas colisiones las que rigen el desplazamiento o movimiento de la partícula. Este mismo fenómeno fue observado

sobre partículas de carbón en alcohol por Jan Ingenhousz en 1785 (Herrera, 2007; Torres, 2007).

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 R. , 2013).

2.7.1. Movimiento browniano estándar

El movimiento browniano estándar (ruido blanco), quedó perfectamente sistematizado por Norbert Weiner en 1923 quien formuló un modelo geométrico diferenciable y aleatorio, que junto con Paúl Lévy elaboraron un modelo que supone: una partícula en cada instante se desplaza de manera independiente de su pasado, es decir, continua en un procedimiento al azar cambia en todo punto de dirección y de velocidad (Torres, 2007; Escot, 2000).

Weiner citado en Torres (2007) supuso dos propiedades básicas que son:

- Las trayectorias deben de ser continuas.
- Una vez que la partícula fue observada en el instante $t = 0$ (posición conocida), su posición aleatoria en un instante posterior t' debe estar regido por la Ley de Gauss, que depende del tiempo transcurrido.

Con este preámbulo se tiene que el movimiento browniano estándar $\{B(t); t \geq 0\}$, en un espacio de probabilidad fijo, definido por las siguientes propiedades (Luegas, Ardila, & Moreno, 2010; Sierra, 2007; Torres, 2007):

1. $B(0) = 0$ (con probabilidad 1).

2. Los incrementos $B(t) - B(s)$ para $t > s$, son independientes del comportamiento pasado, es decir, son independientes de $B(u)$ con $0 \leq u \leq s$.
3. Los incrementos $B(t) - B(s)$ para $t > s$ tiene distribución normal con media 0 y varianza $t - s$
4. Si $s > t$ entonces $B(t) - B(s)$ se distribuye como $N(0, t - s)$.

2.7.2. Movimiento browniano fraccional (fBm)

El movimiento browniano fraccional (fBm) fue definido originalmente por Kolmogorov en un espacio de Hilbert, posteriormente Mandelbrot y Van Ness le otorgaron este nombre en la que se permite que la tendencia estocástica del desplazamiento total acumulado del proceso sea una función no lineal del tiempo. El fBm juega un papel importante en la construcción de modelos estocásticos (modelos matemáticos para situaciones en las que interviene el azar y que evolucionan con el tiempo) que describan adecuadamente cierto tipo de fenómenos (Sierra, 2007; Escot, 2000; Torres, 2007).

El movimiento browniano fraccional (fBm) como una generalización de $X(t)$, y usa la notación $B_H(t)$ para tal función. El fBm es un proceso estocástico Gaussiano de media cero no estacionario (sus principales propiedades estadísticas dependen del tiempo) dependiente del coeficiente de Hurst H , $\{B(t); t \geq 0\}$ donde $0 \leq H \leq 1$, que se define por las siguientes propiedades (Luegas, Ardila, & Moreno, 2010; Sierra, 2007; Restrepo, Mesa, & Arango, 2001):

1. $B_H(0) = 0$
2. $E[B_H(t)] = 0$ para todo $t \in R$
3. El carácter no estacionario está dado por la estructura de la covarianza dado para dos instantes $\tau, t \in R$ que se describe a continuación (Restrepo, Mesa, & Arango, 2001):

$$C_\tau = cov\{B_H(t), B_H(t + \tau)\} = \frac{\sigma^2}{2} [|t|^{2H} + |t - \tau|^{2H} - |\tau|^{2H}]$$

(25)

$$C_0 = cov\{B_H(t), B_H(t)\} = \sigma^2 |t|^{2H}$$

(26)

Donde $\sigma^2 = var\{B_H(t)\}$, τ el retardo y s_0 la covarianza cuando no hay rezago.

La secuencia de autocorrelación (SAC) con el rezago se define:

$$\rho_\tau = \frac{C_\tau}{C_0}$$

(27)

Donde τ puede tomar cualquier valor real, $-1 < \rho_\tau < 1$ además la secuencia $\{C_\tau\}$ está definida positivamente. Si se toma como referencia $B_H(0) = 0$, se define los incrementos pasados y futuros como $-B_H(t), B_H(t)$ respectivamente se tiene que la SAC de los incrementos para el fBm es:

$$\rho_\tau = \frac{cov\{-B_H(-t), B_H(t)\}}{C_0} = 2^{2H-1} - 1$$

(28)

Otra de las características principales de los movimientos brownianos fraccionales es el lapso de independencia entre los incrementos, se dice es infinito. Entre las que se tiene fluctuaciones en sólidos, niveles de ríos, líneas de costa llamadas ruido fraccional $\frac{1}{f}$, debido a que la densidad espectral va como λ^{1-2H} , donde λ es la frecuencia y H es un número que se encuentra entre $1/2 < H < 1$ y por lo general este valor es cercano a cero, una de las características más resaltantes de este tipo de ruido es su comportamiento de baja frecuencia donde se concentra la mayor potencia del espectro (Herrera, 2007).

La existencia de diferentes ruidos implica que los cambios o desplazamientos de un proceso estocástico que siguen un movimiento browniano fraccionario pueden presentar cierta memoria con respecto al pasado (Escot, 2000). Dependiendo del valor de H muestra cual es el carácter de dicha memoria o tendencia respecto al pasado, la SAC (ver ecuación 29) y el tipo de ruido definido en tres clases que son ruido blanco, rosa y negro (Escot, 2000; Herrera, 2007; Restrepo, Mesa, & Arango, 2001).

2.8. Valores del Coeficiente de Hurst

Una vez aclarados estos conceptos, a continuación se presenta la interpretación de los valores del coeficiente de Hurst (Rivas, 2013; Luegas, Ardila, & Moreno, 2010; Andrade, 2015; Gutiérrez, 2008; Escot, 2000; Herrera, 2007; Restrepo, Mesa, & Arango, 2001) :

- Entre el rango $0 < H < 1/2$ se tiene comportamiento antipersistente o correlación negativa entre los incrementos $\rho_\tau \neq 0$ independientemente de τ , se les denomina con reversión a la media, que se caracteriza por un mayor contenido de alta frecuencia. En este caso una tendencia creciente en el pasado implica una tendencia decreciente en el futuro y viceversa; este tipo de correlación permite modelar fenómenos que fluctúen fuertemente alrededor de la media. Las curvas parecen oscilar de forma más irregular, la intensidad de este comportamiento dependerá de que tan cercano sea el valor de H a cero. Se considera que esta serie tiene ruido rosa (ruido con correlación temporal negativa o ruido con antipersistencia temporal), que es común en la naturaleza y está relacionado con procesos de relajación (equilibrio dinámico) y turbulencia
- Si $H = 0.5$ indica ausencia de correlación entre los incrementos, $\rho_\tau = 0$ para todo $\tau \neq 0$, 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 (ruidos sin correlación temporal o ruidos independientes en el tiempo).
- Entre el rango $1/2 < H \leq 1$, presenta comportamiento persistente se refuerza la tendencia, está caracterizada por efectos de larga memoria que ocurren independientemente de la escala de tiempo. Esto indica que, si en algún tiempo pasado hubo una tendencia al aumento, entonces en el futuro también se tendrá aumento y viceversa, es decir, si la serie está arriba de su media en el período anterior, lo más probable es que continúe arriba en el siguiente período, la cual es creciente a medida que H se acerca a 1. La correlación positiva entre los

incrementos, $\rho_\tau \neq 0$ independientemente de τ , lo hace que el fBm pueda modelar fenómenos que tiendan a agruparse primero a un lado de la media y luego al otro. En este intervalo el color de ruido negro (correlación temporal positiva o persistencia temporal) aparece en procesos cíclicos de largo plazo.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En este capítulo se explicará la metodología utilizada a lo largo de la investigación para la obtención del coeficiente de Hurst, en series de tráfico vehicular de tres zonas de la ciudad de Quito, que se caracterizan por presentar congestión vehicular y ser nodos de conexión. Para cumplir con los objetivos planteados la metodología se dividió en las siguientes etapas (ver figura 8):

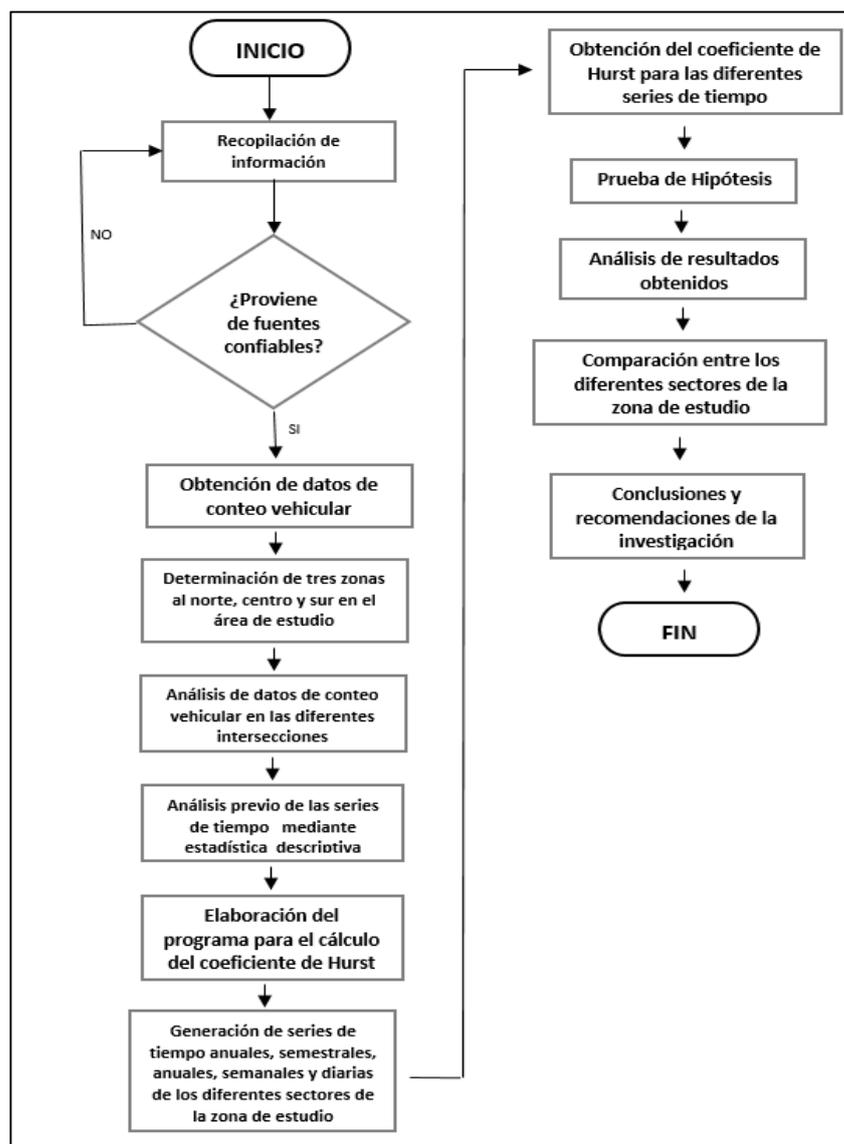


Figura 8 Esquema general de la metodología de trabajo

3.2. Recopilación de información

Como primera etapa de la investigación se realizó la búsqueda de información, esto con la finalidad de determinar la viabilidad del proyecto. Para garantizar la confiabilidad de las fuentes investigadas se realizó la búsqueda de libros, tesis y artículos científicos en las bases de datos digitales como: ASCE, Springerlynk, ResearchGate, entre otras. De esta manera se logró recopilar la información necesaria para establecer el método de análisis del coeficiente de Hurst en series de tiempo de tráfico vehicular. Esta etapa de la metodología se lo realizó durante toda la investigación debido a que mientras más se avanzaba, la necesidad de más información

era indispensable para una mejor comprensión que permita el análisis de los resultados obtenidos.

3.3. Descripción de la zona de estudio

El Distrito Metropolitano de Quito al ser la capital política-administrativa del Ecuador posee importancia geopolítica estratégica; localizado en la provincia de Pichincha con una superficie de 423000 has, de las cuales 18860 has corresponden a la macrocentralidad o ciudad de Quito; dividido 64 parroquias, agrupadas en 9 administraciones zonales (EPMMOP, 2009; PDOT DMQ, 2012).

Desde el año 1950, la población se ha multiplicado siete veces hasta alcanzar 2'239191 habitantes en el año 2010, ubicándose la mayor parte en la macrocentralidad, aunque en los últimos 25 años se ha venido el proceso de urbanización en los valles orientales, hacia el norte y el sur, es decir, a las zonas periféricas, debido al menor costo del suelo y mejores condiciones ambientales, por lo que presenta una tasa de crecimiento anual en la zona urbana de 1,8% y en la zona rural de 4,2% (INEC, 2010; EPMMOP, 2009).

Con este número de habitantes, se generan un total global de 4'600000 viajes (desplazamiento realizado de un origen a un destino y un motivo específico) y 5'300000 etapas (desplazamiento en cada uno de los trayectos de un mismo viaje, realizados en vehículos (de transporte público o privado) diferentes), los cuales se distribuyen en los distintos modos de transporte, sean motorizados o no motorizados (Secretaría de Movilidad, 2014).

El crecimiento de la ciudad de Quito debido a su morfología ha sido en sentido Norte-Sur, presentando la mayor concentración de población, equipamiento y actividad económica en el centro y centro – norte conocido como hipercentro (delimitada entre los ejes Av. Tomás de Berlanga al Norte; Av. Alonso de Angulo al Sur; Av. América, Av. Universitaria y Av. Mariscal Sucre al Oeste; y, Av. 6 de Diciembre, Av. Gran Colombia y Av. Maldonado al Oriente), lugar donde se generan el mayor número de viajes. Como se ilustra en la figura 9a, el número de

desplazamientos motorizados al hipercentro son un total de 700000 en el 2008, el cual incrementará en un 6,3% para el año 2025, como se observa en la figura 9b en el que el total es de 3240000 viajes a este sector (EPMMOP, 2009; Zevallos, 2014).

A esto, se le debe sumar el acelerado proceso de crecimiento del parque automotor, la distancia de viaje de los usuarios que habitan en las zonas en proceso de urbanización para dirigirse a sus actividades diarias, la deficiencia del transporte público; esto en conjunto con la escasa planificación por la que históricamente se ha caracterizado la ciudad agrava más el problema de movilidad (EPMMOP, 2009; Zevallos, 2014).

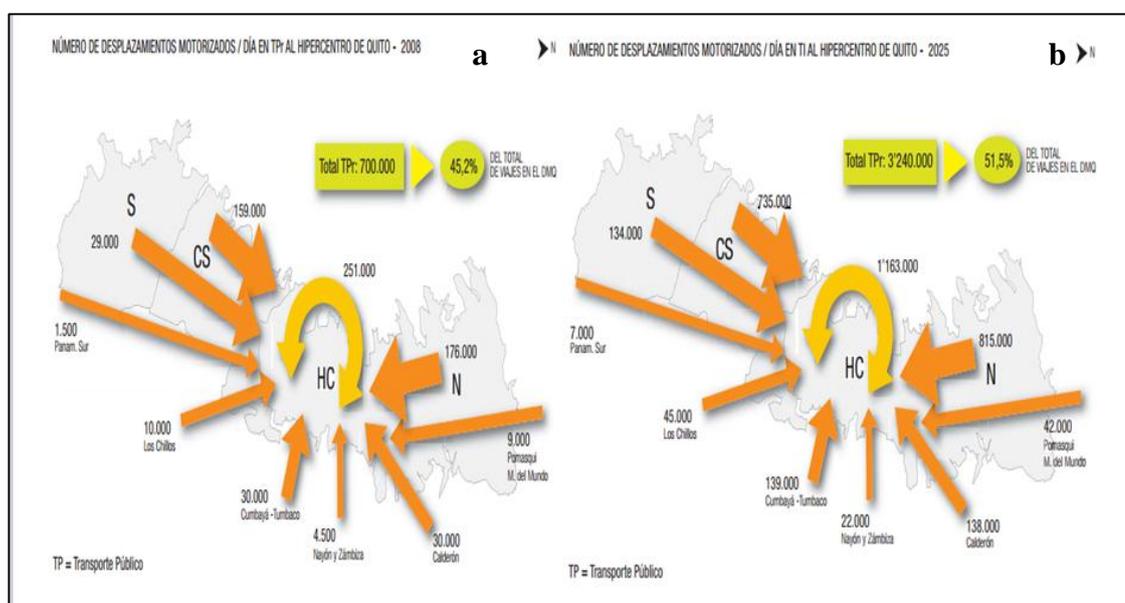


Figura 9 Tendencia de crecimiento de desplazamientos motorizados del 2008 – 2025

Fuente: (EPMMOP, 2009)

Para la investigación se seleccionó tres intersecciones (unión de varias vías por los que el tráfico vehicular se mueve en varios sentidos), al norte, centro y sur de la ciudad que se caracterizan por presentar mayor carga vehicular siendo cruces de vías donde las filas de autos pueden llegar a ocupar cuatro, cinco o seis cuadras y el paso de los vehículos se vuelve lento (Jácome, 2015; Oña, Rodríguez, & Venegas, 2012).

En la figura 10 se observa las intersecciones seleccionadas en el norte, centro y sur que se localizan en el hipercentro de la ciudad de Quito, de esta manera 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.

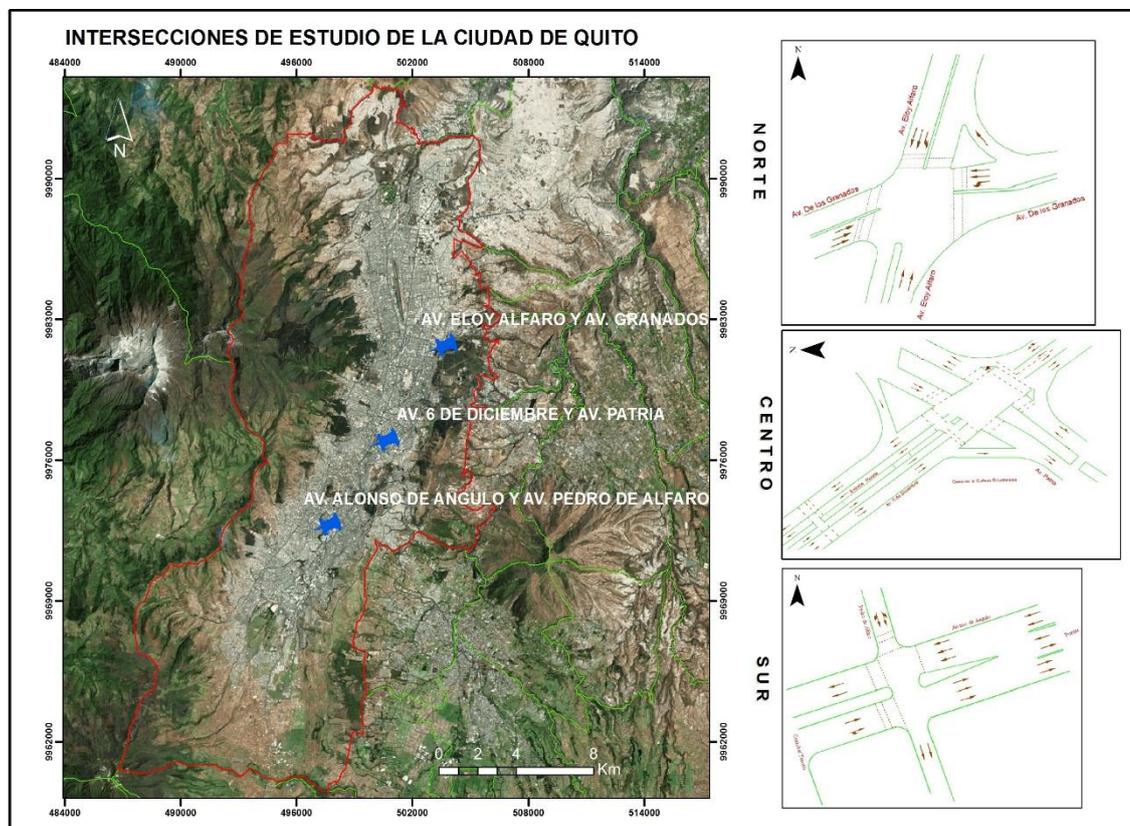


Figura 10 Ubicación de las intersecciones de estudio

3.3.1. Norte: Av. Eloy Alfaro y Av. Granados

La intersección seleccionada al norte de Quito fue el de la Av. Eloy Alfaro y Av. Granados, que se caracteriza por ser un sector que está rodeado de varias infraestructuras primordiales que provocan la confluencia de gran cantidad de personas, como lo son la Universidad de las Américas (UDLA), la Estación Río Coca terminal central de buses de la zona norte, siendo la conexión del hipercentro, con la periferia norte y el resto de la ciudad, entre otras como se observa en la figura 11.

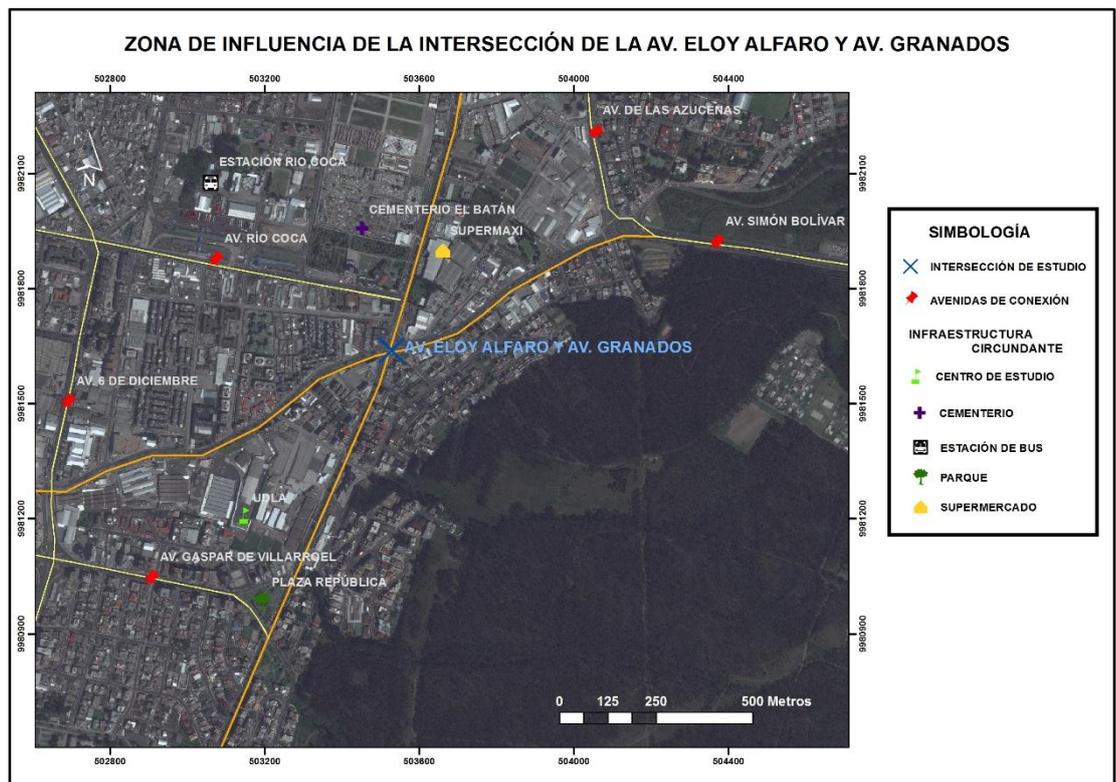


Figura 11 Zona de influencia intersección norte

Esta intersección cuenta con seis sentidos como se aprecia en la tabla 1, las cuales confluyen a diferentes avenidas de primer orden como lo son la Av. Simón Bolívar, Av. 6 de Diciembre, Av. Río Coca, Av. De las azucenas y Av. Gaspar de Villarreal, siendo las dos primeras conexiones entre el norte y sur de Quito.

Tabla 1
Sentidos de la intersección norte

Intersección	Sentido
Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	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)

En la figura 12 se aprecia la dirección de los seis sentidos con respecto a las avenidas, siendo el Giro Oriente – Sur el que presenta mayor flujo vehicular proveniente de la Av. Simón Bolívar (sur) o la Av. De las azucenas (norte) confluyendo hacia la Av. Eloy Alfaro o a la Av. Gaspar de Villarreal. El menor flujo

lo presenta el sentido Occidente – Oriente con dirección a las dos primeras avenidas mencionadas.

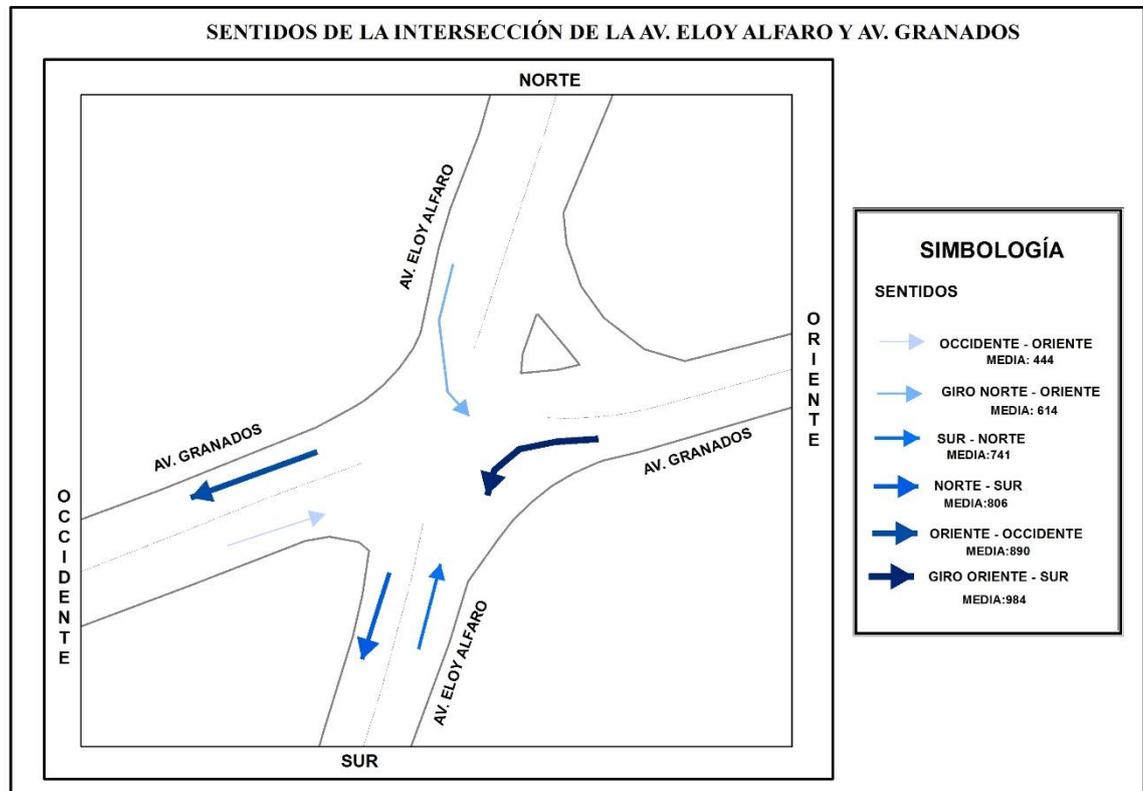


Figura 12 Dirección de los sentidos intersección norte

3.3.2. Centro: Av. Patria y Av. 6 de Diciembre

Al centro la intersección seleccionada fue la de la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria, en la que se encuentra diferentes lugares de gran confluencia de personas como el parque El Ejido, la Casa de la Cultura, la Plaza Foch sector de esparcimiento y diversión, además de dos de las principales universidades de la ciudad de Quito, entre otras (ver figura 13).



Figura 13 Zona de influencia intersección centro

La intersección de la zona centro cuenta con cuatro sentidos que se describen en la tabla 2, las cuales confluyen a varias de las principales avenidas de la ciudad como lo son la Av. 10 de Agosto, Av. 12 de Octubre, Av. Cristóbal Colón y Av. Tarqui, siendo esta la intersección donde inicia sector administrativo de la ciudad.

**Tabla 2
Sentidos de la intersección centro**

Intersección	Sentido
Av. 6 de Diciembre y Av. Patria	Oriente – Occidente (Or_Occ)
	Sur – Norte (S_N)
	Occidente – Oriente (Occ_Or)
	Norte – Sur (N_S)

En la figura 14 de aprecia la dirección de los cuatro sentidos pertenecientes a la intersección centro, en la que los sentidos Occidente – Oriente y Oriente - Occidente fueron los que presentaron mayor flujo vehicular siendo estas las vías de circulación de los buses de conexión del sur y centro de la ciudad. Contrario con los sentidos Norte – Sur y Sur – Norte, donde existe una notable diferencia éntrelas medias de las primeras.

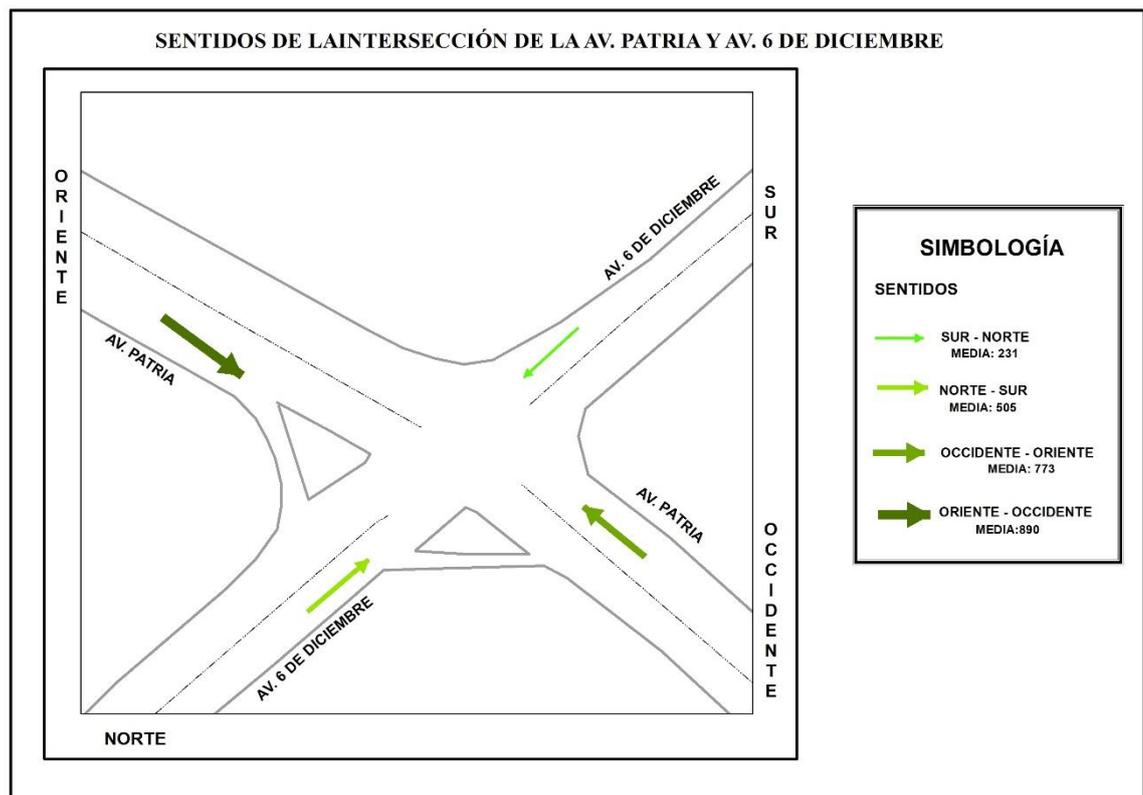


Figura 14 Dirección de los sentidos intersección centro

3.3.3. Sur: Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro.

La intersección seleccionada al sur fue el de la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro, esta zona se caracteriza por encontrarse en el límite sur del hipercentro de Quito. Al igual que las otras intersecciones alrededor de estas se encuentran infraestructuras como los dos de los principales colegios del sur de la ciudad, el centro comercial El Recreo primer y más grande de la zona, así como la Estación Terminal Sur terminal de troles, corredores y buses de conexión con los diferentes sectores del sur de Quito, entre otros (ver figura 15).



Figura 15 Zona de influencia sur

Esta intersección cuenta con tres sentidos que se detallan en la tabla 3, las cuales se intersecan varias avenidas principales de la ciudad como lo son la Av. Teniente Hugo Ortiz, Av. Pedro Vicente Maldonado, Av. Napo, Av. Rodrigo de Chávez y Av. Lauro Guerrero, avenidas que presentan igual problema de congestión vehicular que la que se encuentra en estudio.

Tabla 3
Sentidos de la intersección sur

Intersección	Sentido
Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro	Oriente - Occidente (Or_Occ)
	Occidente – Oriente (Occ_Or)
	Norte – Sur (N_S)

En la figura 16 se aprecia las diferentes direcciones de los sentidos de estas dos avenidas, en la cual el sentido Occidente – Oriente presenta el mayor flujo vehicular contrario al Oriente – Occidente que presenta una notable diferencia compara con la mencionada anteriormente.

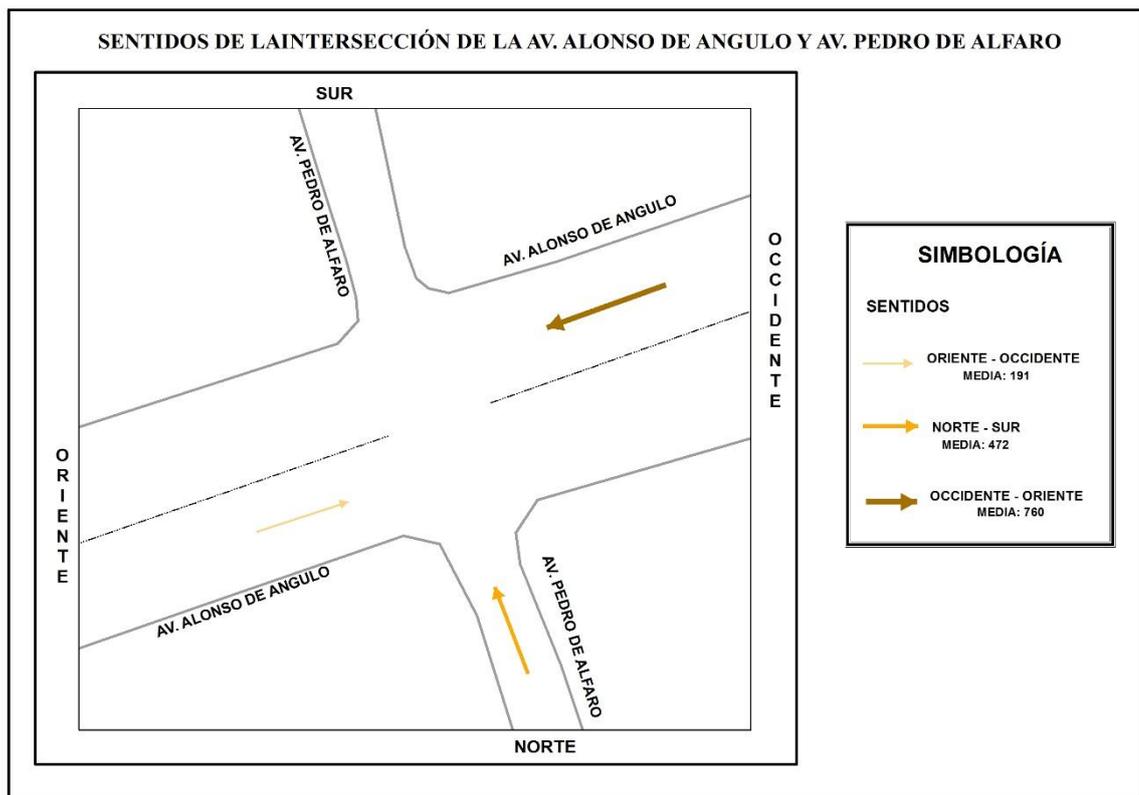


Figura 16 Dirección de los sentidos intersección sur

3.4. Obtención de datos de densidad vehicular

La Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas (EPMMOP) con el objetivo de tener un mayor control del tráfico vehicular en las diferentes intersecciones de Quito, a través de la empresa Schneider Electric ha implementado un sistema de control de tráfico urbano Optimus 7. Este sistema consiste en la instalación de semáforos automatizados, cámaras de video detección y sistema de vigilancia de tránsito (STV) en más de 600 intersecciones de la ciudad que es manejado desde el Centro de Gestión de la Movilidad (EPMMOP, 2014; Ríos L. , 2016). En la figura 17, se observa la interfaz de control de este sistema, con las diferentes vías de la ciudad, en la que los puntos en azul indican la intersección que cuenta con estos equipos.

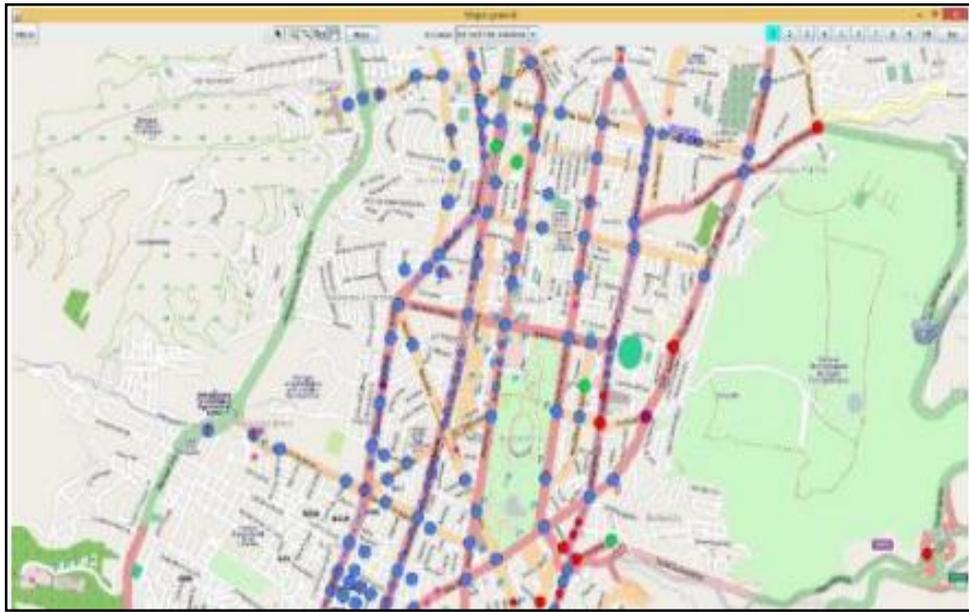


Figura 17 Interfaz del Sistema de control de Tráfico Urbano Optimus 7

Fuente: EPMMOP, sf citado por (Ríos L. , 2016)

Por medio de estos equipos es posible registrar los flujos vehiculares en tiempo real, datos que son recibidos y almacenados en el Centro de Gestión de la Movilidad, para generar planes de tráfico y mejorar la funcionalidad de la intersección (EPMMOP, 2014).

Para la realización de esta investigación la EPMMOP proporciono información de conteo vehicular por hora de los diferentes sentidos desde junio del 2015 hasta enero del 2017 el cual será explicado con más detalles en el siguiente capítulo. La información fue entregada en un archivo de Excel como se observa en la figura 18, en la que en la primera columna se describe la fecha, la segunda la hora, en los siguientes los sentidos que tiene cada intersección en la que en las dos primeras filas se describe la dirección y el código, junto con un croquis de ubicación.

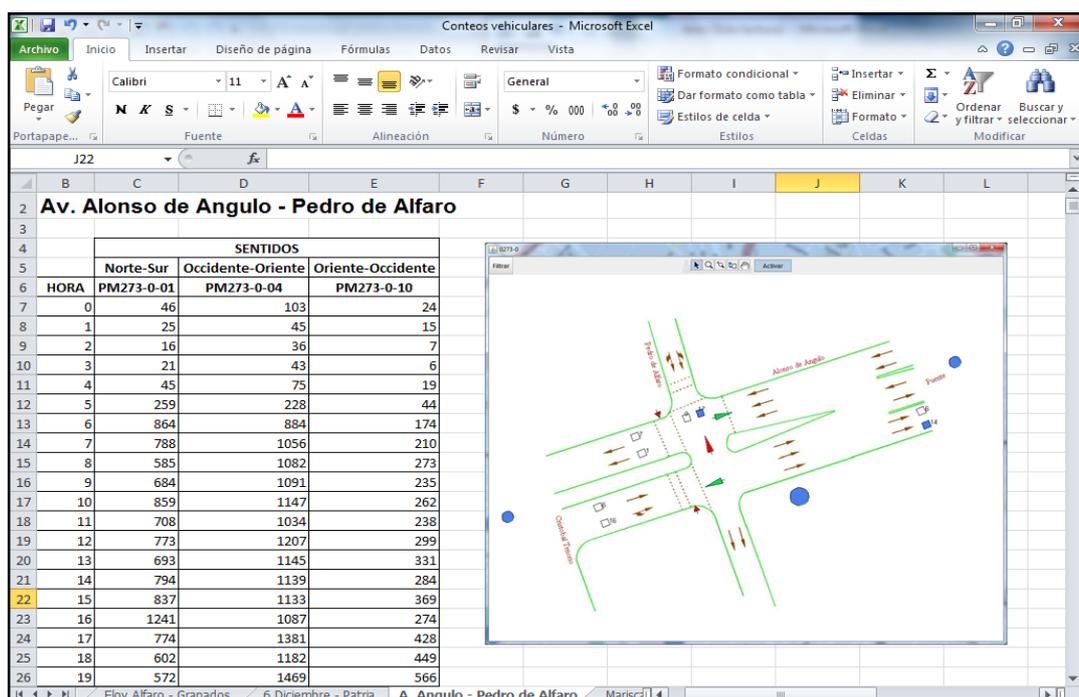


Figura 18 Interfaz de los datos de conteo vehicular en Excel

3.5. Análisis de datos

Lo primero que se realizó fue la inspección de datos faltantes, en cada uno de los sentidos de las tres zonas, con lo que se constató la existencia de huecos en la toma de datos. En la tabla 4, se puede apreciar las fechas y las horas a las que existió este problema en las tres intersecciones en estudio de la ciudad de Quito

Tabla 4
Datos faltantes en las tres intersecciones

Intersección	Datos faltantes
Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	13/07/2015 _ 20:00 a 14/07/2015_07:00
	16/10/2015 _ 12:00
	05/12/2015 _ 23:00
Av. 6 de Diciembre y Av. Patria	26/12/2015 _ 15:00 a 21:00
	30/12/2015 _ 9:00
Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro	02/01/2016 _ 19:00 a 14/01/2016 02:00
	21/02/2016 _ 01:00 a 14:00
	01/03/2016 _ 19:00 a 02/03/2016 19:00
	08/03/2016 _ 07:00

En la tabla 5 se tiene los huecos de datos existentes en las intersecciones de la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria de la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro, aparte de los ya mencionados en la tabla 4, debido a que la causa de varios de estos son fallas técnicas del equipo, en ese sentido en específico.

Tabla 5
Datos faltantes en las intersecciones centro y sur

Intersección	Sentidos	Datos faltantes
Av. 6 de Diciembre y Av. Patria	Todos los sentidos	18/07/2015_ 20:00 a 21:00
		19/7/2015 1:00
	Norte – Sur	15/09/2015 _ 13:00 a 14:00
		01/02/2016 0:00 a 10/05/2016 23:00
Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro	Todos los sentidos	28/11/2015_ 00:00 a 20/04/2015_ 23:00
		12/09/2016_ 20:00 a 13/09/2016_10:00
	Norte – Sur	11/09/2016 _ 05:00 a 08:00
		21/10/2016 21:00 a 22/10/2016 02:00
		03/11/2016_11:00 a 15:00
		04/11/2016_08:00 a 09:00

3.5.1. Validación de datos

Complementario al análisis de los datos se realizó una validación de los mismos con lo que se encontró que existía toma errónea de datos, siendo los mismos ilógicos a la hora en la que habían sido tomados. En la tabla 6, se detalla las fechas con horas de donde existieron datos erróneos, los cuales fueron identificados debido a que presentaban similar número de vehículos a toda hora del día, ya que esto sucedió por largos periodos la mejor opción fue eliminar estos datos.

Tabla 6
Datos erróneos en las intersecciones

Intersección	Datos erróneos
Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro	28/11/2015_ 00:00 a 20/04/2015_ 23:00
Av. 6 de Diciembre y Av. Patria	01/01/2016_ 00:00 a 31/01/2016_ 23:00

Por tal motivo los datos proporcionados por la EPMMOP del 1 de junio del 2015 al 31 de agosto del 2016 fueron utilizados para la Av. Eloy Alfaro y Av. Granados y

Av. 6 de Diciembre y Av. Patria para la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro, se solicitó datos hasta el 22/01/2017, para completar la serie.

3.5.2. Generación de datos faltantes

Una vez identificado los huecos de datos se procedió a generarlos, realizando un promedio con los vecinos más cercanos, es decir, el mes, dos semanas posteriores y dos siguientes al mes donde se encuentra la fecha con hora del dato faltante. Para realizar este proceso de manera más sencilla como primer paso se procedió a organizar la base de datos por hora como se observa en la figura 19a, ya que de esta manera facilita localizar los vecinos más cercanos que se encuentra en color amarillo, naranja, lila y verde para diferenciar cada sentido y el dato faltante en rojo, como se aprecia en la figura 19b.

		Sentidos _ Av. 6 de Diciembre y Patria				
		Norte-Sur	Occidente-Oriente	Sur-Norte	Oriente-Occidente	
FECHA	HORA	PM363-0-01	PM363-0-04	PM363-0-07	PM363-0-10	
1	01/06/2015	0	59	70	20	66
25	02/06/2015	0	99	66	20	93
49	03/06/2015	0	128	18	60	138
73	04/06/2015	0	95	48	36	104
97	05/06/2015	0	25	17	55	174
121	06/06/2015	0	355	328	225	712
145	07/06/2015	0	296	253	63	239
169	08/06/2015	0	38	56	7	64
193	09/06/2015	0	87	110	17	73
217	10/06/2015	0	119	105	31	87
241	11/06/2015	0	165	195	30	113
265	12/06/2015	0	257	76	47	146
289	13/06/2015	0	477	296	83	124
313	14/06/2015	0	320	214	60	5
337	15/06/2015	0	57	62	10	55
361	16/06/2015	0	84	92	17	11
385	17/06/2015	0	150	165	37	146
409	18/06/2015	0	220	137	28	133
433	19/06/2015	0	210	164	54	163
457	20/06/2015	0	430	350	215	503
481	21/06/2015	0	278	252	66	261
06/02/2016	1	0	220	49	225	
07/02/2016	1	0	124	17	154	
08/02/2016	1	0	67	11	58	
09/02/2016	1	0	89	15	80	
10/02/2016	1	0	51	11	63	
11/02/2016	1	0	86	12	72	
12/02/2016	1	0	136	22	119	
13/02/2016	1	0	217	61	212	
14/02/2016	1	0	271	49	240	
15/02/2016	1	0	56	10	44	
16/02/2016	1	0	73	14	56	
17/02/2016	1	0	73	12	78	
18/02/2016	1	0	133	14	93	
19/02/2016	1	0	115	19	90	
20/02/2016	1	0	238	52	252	
21/02/2016	1	0	0	0	0	
22/02/2016	1	0	41	9	36	
23/02/2016	1	0	48	15	59	
24/02/2016	1	0	70	10	69	
25/02/2016	1	0	74	17	82	
26/02/2016	1	0	96	23	82	
27/02/2016	1	0	569	99	1758	
28/02/2016	1	0	200	35	172	
29/02/2016	1	0	39	5	39	
01/03/2016	1	0	60	0	62	

Figura 19 Generación de datos faltantes. a) Organización de tabla por hora. b) Vecinos cercanos al dato faltante

Una vez realizado este proceso se obtiene el promedio de datos vecinos y con este valor se completa el dato faltante, este procedimiento se vuelve a repetir con cada uno de los datos faltantes especificados en las tablas 4 y 5 de esta manera se completó la base de datos de conteo vehicular, que se observa de color rojo en la figura 20.

1023	1020	13/07/2015	11	344	1123	301	1288
1024	1021	13/07/2015	12	889	1163	419	1129
1025	1022	13/07/2015	13	872	1186	456	1261
1026	1023	13/07/2015	14	869	1170	421	1346
1027	1024	13/07/2015	15	921	1202	517	1344
1028	1025	13/07/2015	16	890	1109	599	1313
1029	1026	13/07/2015	17	932	1148	523	1140
1030	1027	13/07/2015	18	1076	1376	398	1066
1031	1028	13/07/2015	19	1002	1560	312	1122
1032	1029	13/07/2015	20	444	736	151	749
1033	1030	13/07/2015	21	326	588	130	523
1034	1031	13/07/2015	22	230	274	93	288
1035	1032	13/07/2015	23	151	157	34	155
1036	1033	14/07/2015	0	80	110	22	90
1037	1034	14/07/2015	1	46	50	13	49
1038	1035	14/07/2015	2	30	36	10	37
1039	1036	14/07/2015	3	21	36	7	39
1040	1037	14/07/2015	4	30	65	13	83
1041	1038	14/07/2015	5	65	181	49	275
1042	1039	14/07/2015	6	333	834	197	1351
1043	1040	14/07/2015	7	457	995	447	1652
1044	1041	14/07/2015	8	480	1020	240	1332
1045	1042	14/07/2015	9	857	976	381	1325
1046	1043	14/07/2015	10	851	1005	434	1312
1047	1044	14/07/2015	11	1015	1081	491	1205

Figura 20 Base de conteo vehicular con datos faltantes

Una vez analizados, validados y completados los datos, las bases de conteo vehicular de las tres intersecciones para la estimación del coeficiente de Hurst, quedaron de la siguiente manera, la cual se puede apreciar en la tabla 7.

Tabla 7
Periodos de datos utilizados para el cálculo

Intersección	Sentido	Datos
Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	Norte – Sur	01/06/2015 – 28/03/2016
	Giro Norte - Oriente	01/06/2015 – 08/03/2016
	Occidente - Oriente	
	Sur – Norte	01/06/2015 – 14/04/2016
	Giro Oriente – Sur	
	Oriente - Occidente	01/06/2015 – 20/04/2016
Av. 6 de Diciembre y Av. Patria	Norte – Sur	01/06/2015 – 31/12/2015 a 11/05/2016 – 31/08/2016
	Occidente - Oriente	
	Sur – Norte	01/06/2015 - 31/08/2016
	Oriente - Occidente	
	Norte – Sur	

Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro	Occidente – Oriente	01/06/2015 - 27/11/2015 a
	Oriente – Occidente	21/04/2016 – 22/01/2017

Una vez realizado el análisis de datos, el cual fue indispensable antes de calcular el coeficiente de Hurst, debido a que no solo existieron huecos también mala toma de estos, por lo que dependiendo del número de datos que presentaron este inconveniente fueron generados o eliminados. La mayor cantidad de datos generados fueron desde el 1 de marzo del 2016 a las 19:00 al 2 de marzo del 2016 a las 19:00 un total de 25, estableciendo ese valor como límite para generación de datos, por lo que desde el 2 de enero al 14 de enero del 2016 se optó como mejor opción por eliminar este periodo.

3.6. Análisis de estadísticos de datos

Para realizar un primer análisis se escogieron los estadísticos que se observan en la tabla 8, en la que los resultados de las tres intersecciones de estudio, la curtosis en todos los casos es positivas lo que indica que la distribución tiene colas más pesadas y un pico más pronunciado que la distribución normal, la asimetría en la mayoría de los sentidos es negativa lo que indica que la cola de la distribución se alarga para valores inferiores a la media. La media más alta corresponde al sentido GOr_S de la intersección norte, pero con asimetría positiva, mientras que la más baja corresponde al sentido N_S de la intersección sur con asimetría negativa.

Tabla 8
Estadísticos de datos totales en las tres intersecciones

Intersección	Sentido	Media	Máximo	Mínimo	Desv. Est	Curtosis	Asimetría
Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	N_S	806	2294	17	492,06	1,56	-0,28
	GN_Or	614	2236	10	406,32	1,61	-0,11
	Occ_Or	444	1912	4	322,56	1,65	0,08
	S_N	741	2158	5	426,30	1,67	-0,40
	Or_Occ	890	2171	1	596,89	1,70	-0,01
	Gor_S	984	2694	4	671,17	1,63	0,04
Av. 6 de Diciembre y Av. Patria	Or_Occ	505	1703	5	334,67	1,73	0,12
	S_N	773	1712	3	486,91	1,54	-0,26
	Occ_Or	231	4428	1	196,76	24,35	1,64
	N_S	890	2171	1	596,89	1,70	-0,01

3.7. Creación y diseño del algoritmo en Matlab

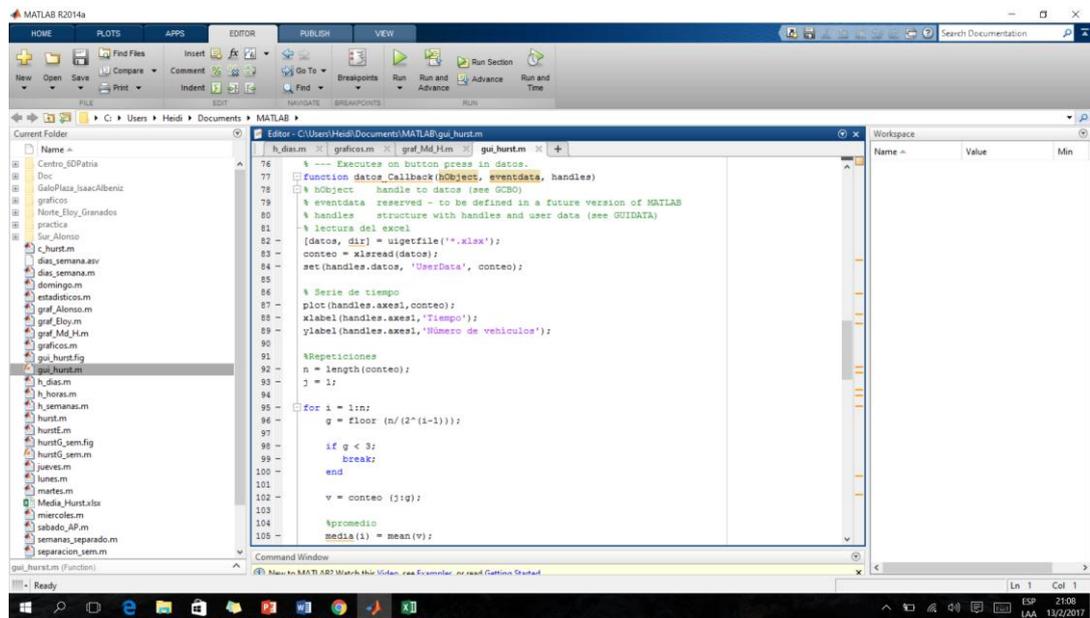
Para realizar el cálculo del coeficiente de Hurst en series de tiempo de tráfico vehicular, fue necesario elaborar algoritmos que nos permitirá calcular el coeficiente de forma automatizada.

El software utilizado fue Matlab que es una herramienta que permite el desarrollo de programas de manera automatizada, además para facilitar el manejo del mismo por otro usuario y hacerlo más interactivo se utilizó el comando GUIDE, que permite diseñar una interfaz gráfica acorde al programa que se está elaborando.

3.7.1. Generación del código en Matlab

El código primero se lo elaboró en Matlab para facilitar la programación en GUIDE, siguiendo la metodología descrita en la sección 2.2.2, el cual fue optimizado hasta lograr los resultados esperados y así conseguir un comportamiento eficaz del programa (ver figura 21). El código consta de las siguientes fases (ver anexo 1):

- Lectura de datos
- Gráfica de serie de tiempo de tráfico vehicular
- Generación de subperiodos
- Cálculo del (R/S)
- Ajuste Lineal
- Gráfica de ajuste lineal de datos
- Despliegue del coeficiente de Hurst y clasificación de acuerdo al valor obtenido.



Con el objetivo de crear una interfaz más amigable y comprensible en la interpretación de los valores obtenidos del coeficiente de Hurst se utilizó la herramienta GUIDE del software MATLAB, que consta de las siguientes componentes (ver figura 22), la cual facilitará el manejo por parte de cualquier usuario.

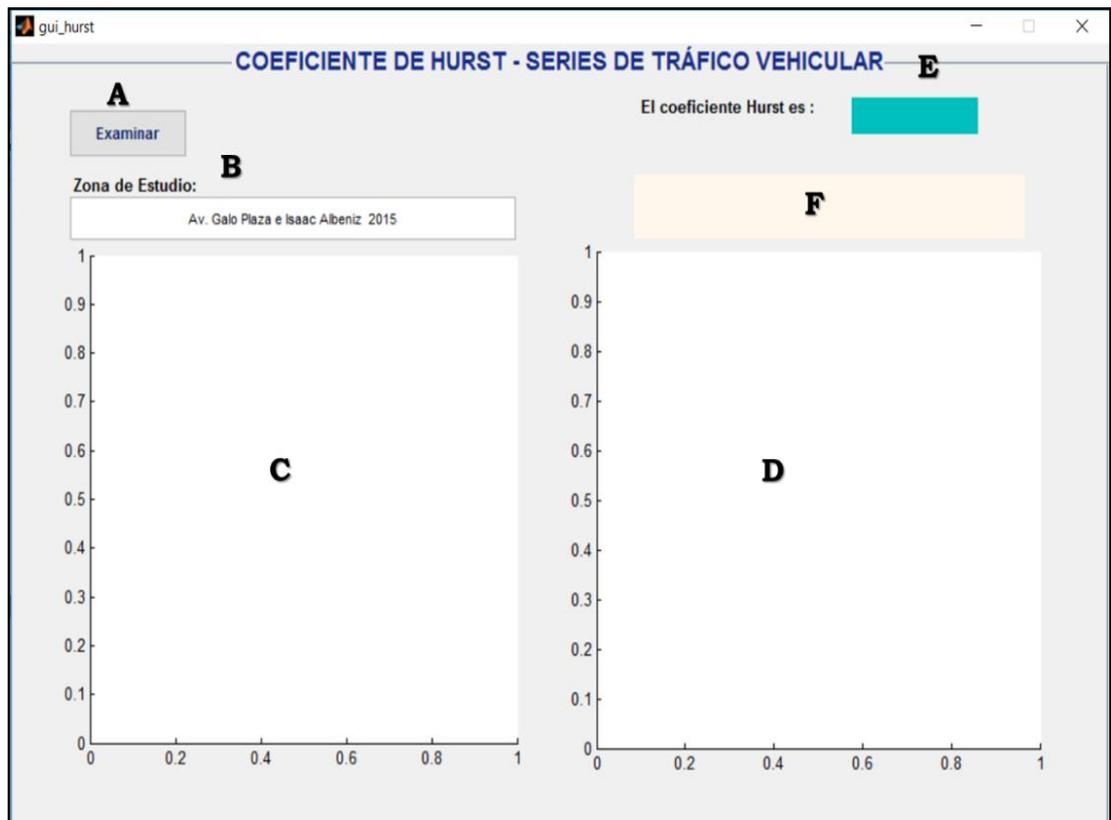


Figura 22 Interfaz Coeficiente de Hurst generada en GUIDE

- *A.* Al presionar este botón se realizará la lectura de los datos que se van a utilizar, el programa se generó con la capacidad de leer archivos Excel (.xls). La lectura de datos es sencilla al presionar el botón este direccionará al equipo donde se buscará y se seleccionará el documento con el que se desea trabajar.
- *B.* Este es un espacio libre donde el usuario podrá agregar un título de la zona de la que se obtiene el coeficiente de Hurst.
- *C.* En este espacio aparece el gráfico de la serie de tiempo que se está trabajando
- *D.* Se observa el gráfico del ajuste lineal realizado para la obtención del coeficiente de Hurst.
- *E.* Aparece el resultado del coeficiente de Hurst obtenido.
- *F.* En este recuadro aparece la interpretación de acuerdo al valor del coeficiente de Hurst, explicado en la sección 2.2.3.

Las cuatro últimas componentes aparecerán después de seleccionar el archivo, para esto el Excel solo debe contener una columna con el número de conteo vehicular (float)

también podrá contener una columna de la fecha de la toma de los datos como se observa en la figura 23.

	A	B	C	D	E	F
1		Occidente-Oriente				
2	FECHA	PM070-0-04				
3	01/06/2015	31				
4	01/06/2015	10				
5	01/06/2015	10				
6	01/06/2015	13				
7	01/06/2015	25				
8	01/06/2015	72				
9	01/06/2015	486				
10	01/06/2015	721				
11	01/06/2015	688				
12	01/06/2015	630				
13	01/06/2015	749				
14	01/06/2015	543				
15	01/06/2015	628				
16	01/06/2015	903				
17	01/06/2015	802				
18	01/06/2015	839				
19	01/06/2015	613				
20	01/06/2015	633				
21	01/06/2015	833				
22	01/06/2015	757				
23	01/06/2015	582				
24	01/06/2015	415				

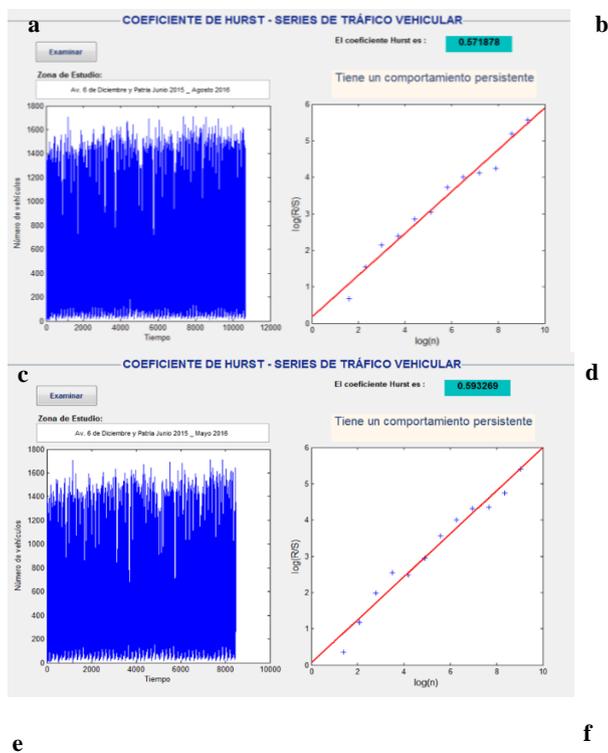
Figura 23 Formato del archivo de Excel

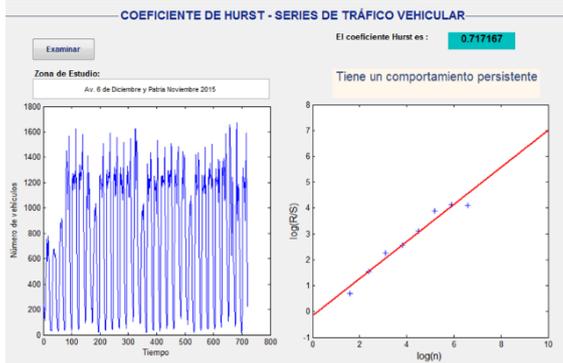
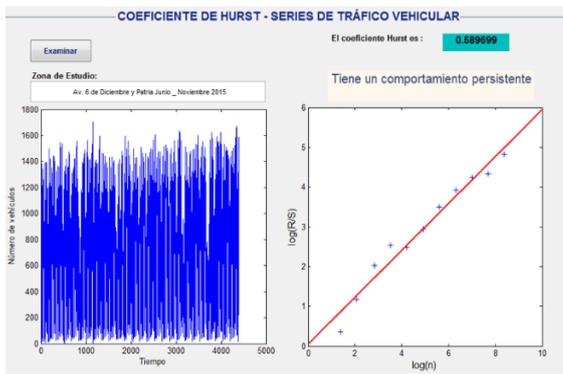
3.8. Generación de series de tiempo y obtención de coeficiente de Hurst

Para un adecuado análisis del comportamiento dinámico del tráfico vehicular en las zonas críticas de la ciudad de Quito, se generó series con diferentes periodos de tiempo. Ampliando las condiciones bajo las que se obtuvo H , ya que no solo será por sector sino también mediante un análisis temporal. De esta manera las series de tiempo generadas fueron con datos totales, anuales, semestrales, mensuales, semanales, horas, por horas pico, por días de la semana.

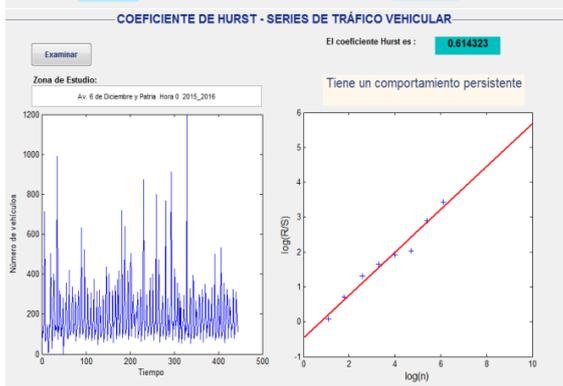
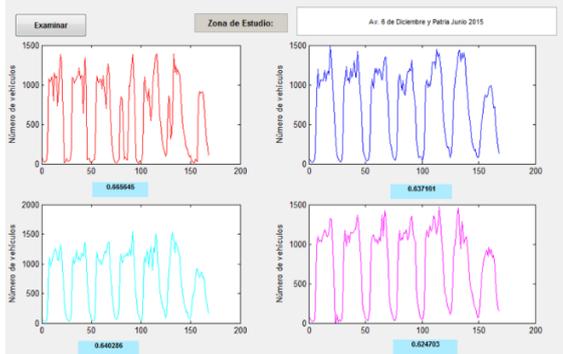
En la figura 24, se observa las interfaces generadas en GUIDE para los diferentes análisis temporales (ver anexo 2), en los que se aprecia a la izquierda parte superior la descripción de la zona de estudio seguida de la serie de tiempo con los datos de conteo vehicular, a la derecha arriba se aprecia 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.

La figura anterior está organizada de la siguiente manera figura 24a GUIDE serie de tiempo de datos totales en la que se utilizó de 7488 hasta 10968. Figura 24b GUIDE serie de tiempo anual en la que se utilizó de 5568 hasta 8976 datos. Figura 24c GUIDE serie de tiempo semestral en la que se utilizó de 4080 hasta 4656 datos. Figura 24d GUIDE serie de tiempo mensual en la que se utilizó de 192 hasta 744 datos. Figura 24e GUIDE serie de tiempo semanal en la que se utilizó de 168 datos. Figura 24f GUIDE serie de tiempo por hora en la que se utilizó de 269 hasta 445 datos. Figura 24g GUIDE serie de tiempo por horas pico en la que se utilizó de 2808 hasta 4113 datos. Figura 24h GUIDE serie de tiempo por días de la semana en la que se utilizó de 720 hasta 1584 datos.





Coeficiente de Hurst - Series de Tráfico Vehicular



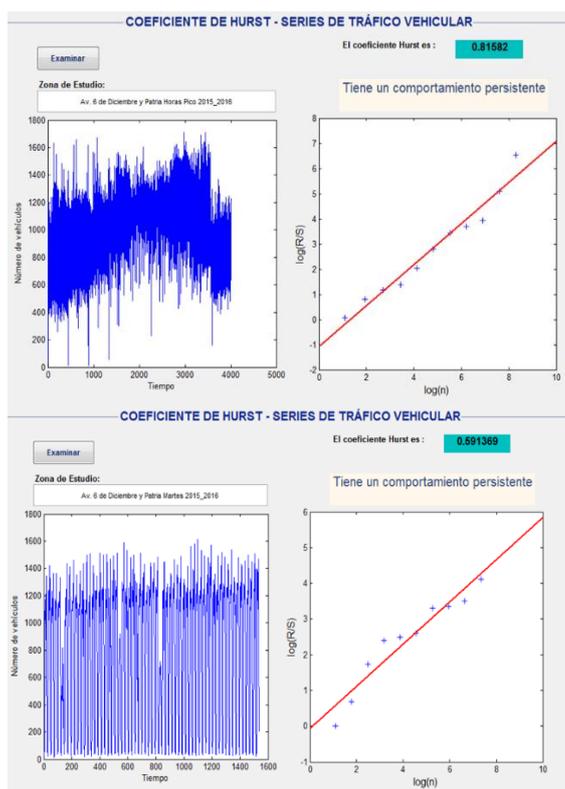


Figura 24 Interfaz de las series de tiempo a) totales, b) anuales, c) semestrales, d) mensuales, e) semanales, f) horas, g) horas pico h) días de la semana

3.9. Cálculo de error estándar y obtención del coeficiente de Hurst

Una vez estimado H mediante la metodología descrita en la sección 2.2.2. el paso final fue aplicar una regresión de mínimos cuadrados (ecuación 7), por lo que fue necesario determinar el error que presenta este cálculo. Para esto se utiliza el error estándar (SE) (ecuación 29), que permite cuantificar la incertidumbre de estimación, mediante la desviación estándar de los valores originales de la muestra y los que se obtuvo mediante la ecuación 11, es decir, su estimación (Stephen & Dean, 2011) .

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

(29)

En la tabla 9, se observa los valores del coeficiente de Hurst y los errores estándar que se obtuvo en las tres intersecciones (ver anexo 3) con series de tiempo de datos totales, anuales y semestrales, los casilleros vacíos se deben a que no existió datos para

completar la serie a ser analizada. Los errores van desde 0,6 a 1,2 que posteriormente se compararon con el valor de H de esta manera se estableció a los que se les aplicó las pruebas de significancia (véase sección 2.2.3), que se encuentran en negrilla en la tabla.

Tabla 9
Error estándar obtenido de la estimación del coeficiente de Hurst

Intersección	Sentido	Total		Anual		1° Semestre		2° Semestre	
		H	SE	H	SE	H	SE	H	SE
Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	N_S	0,563	0,12	---	---	0,506	0,08	---	---
	GN_Or	0,623	0,08	---	---	0,579	0,09	---	---
	Occ_Or	0,649	0,09	---	---	0,610	0,08	---	---
	S_N	0,589	0,14	---	---	0,501	0,09	---	---
	Or_Occ	0,597	0,10	---	---	0,571	0,09	---	---
	Gor_S	0,596	0,10	---	---	0,640	0,08	---	---
Av. 6 de Diciembre y Av. Patria	Or_Occ	0,644	0,06	0,655	0,07	0,660	0,08	0,636	0,10
	S_N	0,646	0,08	0,651	0,08	0,670	0,09	0,681	0,09
	Occ_Or	0,572	0,07	0,593	0,08	0,590	0,08	0,601	0,11
	N_S	0,609	0,09			0,614	0,07		
Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro	Or_Occ	0,551	0,07	0,572	0,07	0,580	0,08	0,507	0,10
	Occ_Or	0,500	0,06	0,529	0,08	0,551	0,09	0,48	0,10
	N_S	0,561	0,06	0,577	0,08	0,561	0,08	0,522	0,09

3.10. Prueba de hipótesis

Una vez calculado el coeficiente de Hurst y al compararlo con el error estándar (véase sección 3.7) deja la incertidumbre si estos son mayores, menores o iguales a 0,5 para solucionar este inconveniente e identificar al rango al que pertenecen, se aplicó dos pruebas de hipótesis.

Para realizar estas pruebas primero se calculó el rango reescalado esperado ($E\left(\frac{R}{S_n}\right)$) (ecuación 11), que permita obtener el coeficiente de Hurst esperado ($E[\hat{H}]$) (véase sección 2.2.3), para determinar el estadístico Z_E (ecuación 13), el mismo que se contrastó con las tablas de probabilidad de la distribución normal y la hipótesis nula se aceptará con un 95% de confianza, el nivel de significancia se designó mediante α , el valor crítico $Z_\alpha = 1,645$.

3.10.1. Primera prueba de hipótesis

La primera prueba de hipótesis de una cola (ver figura 25) fue realizada para determinar si el coeficiente de Hurst era mayor igual que 0,5 o menor que 0,5. De esta manera las hipótesis planteadas quedaron establecidas de la siguiente manera:

$$H_0 : H \geq 0,5 \text{ (proceso aleatorio o persistente)}$$

$$H_1 : H < 0,5 \text{ (proceso antipersistente)}$$

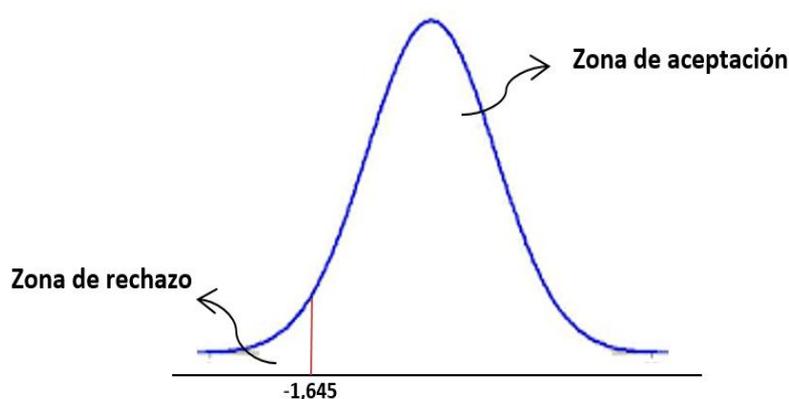


Figura 25 Prueba de hipótesis unilateral

En la tabla 10, se observan los resultados obtenidos de la primera prueba de hipótesis de las series de tiempo con datos totales, anuales, 1° semestre y 2° semestre de las intersecciones norte y sur, no teniendo resultados del centro debido a que no hubo que realizar prueba de hipótesis para estos periodos (ver tabla 9). Si se rechaza H_0 (color amarillo) el proceso que seguirá la serie será antipersistente, pero si este se acepta (color verde) el proceso será aleatorio o persistente (ver anexo 4).

Tabla 10
Resultados de la primera prueba de hipótesis

Intersección	Sentido	Datos	H	E(H)	E(Z)	P_Hipótesis	Conclusión
Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	N_S	Total	0,563	0,596	-2,696	Se rechaza	Antipersistente
		1°Semestre	0,506	0,588	-5,435	Se rechaza	Antipersistente
	GN_Or	1°Semestre	0,579	0,588	-0,574	Se acepta	Aleatorio o persistente
		S_N	Total	0,589	0,593	-0,300	Se acepta
	1°Semestre		0,501	0,588	-5,752	Se rechaza	Antipersistente
	Or_Occ	Total	0,597	0,593	0,330	Se acepta	Aleatorio o persistente
1°Semestre		0,571	0,588	-1,103	Se acepta	Aleatorio o persistente	
GOr_S	Total	0,596	0,593	0,223	Se acepta	Aleatorio o persistente	
	Av · Al on	Or_Occ	Total	0,065	0,566	-1,607	Se acepta

	Anual	0,073	0,577	-0,515	Se acepta	Aleatorio o persistente
	1°Semestre	0,082	0,588	-0,525	Se acepta	Aleatorio o persistente
	2°Semestre	0,104	0,586	-5,370	Se rechaza	Antipersistente
	Total	0,063	0,566	-6,886	Se rechaza	Antipersistente
Occ_Or	Anual	0,078	0,577	-4,583	Se rechaza	Antipersistente
	1°Semestre	0,086	0,588	-2,451	Se rechaza	Antipersistente
	2°Semestre	0,103	0,586	-7,207	Se rechaza	Antipersistente
	Total	0,063	0,566	-0,572	Se acepta	Aleatorio o persistente
N_S	Anual	0,078	0,577	-0,009	Se acepta	Aleatorio o persistente
	1°Semestre	0,083	0,588	-1,790	Se rechaza	Antipersistente
	2°Semestre	0,087	0,586	-4,332	Se rechaza	Antipersistente

3.10.2. Segunda prueba de hipótesis

La segunda prueba de hipótesis unilateral (ver figura 26), se aplicó a aquellos resultados en los que se aceptó H_0 , ya que todavía quedaba la incertidumbre de si era igual o mayor que 0,5. Para lo cual las hipótesis planteadas fueron las siguientes:

$$H_0 : H = 0,5 \text{ (proceso aleatorio)}$$

$$H_1 : H > 0,5 \text{ (proceso persistente)}$$

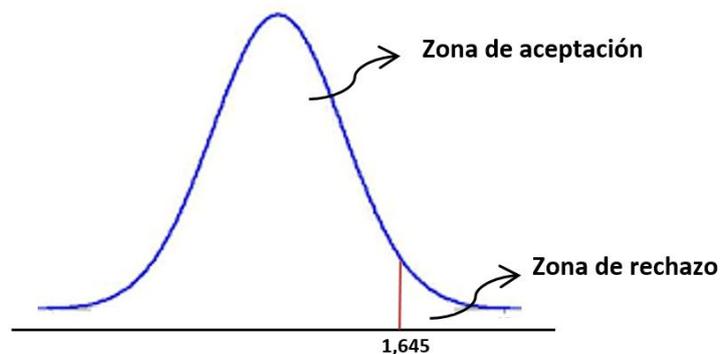


Figura 26 Prueba de hipótesis bilateral

En la tabla 11, se observa los resultados que se obtuvieron al realizar la segunda prueba de hipótesis (ver anexo 5), a partir de los resultados de la tabla 10, ya que solo se aplicó esta en los que se aceptó la primera hipótesis nula. De esta manera se despejó la incertidumbre de a que rango pertenecía, la mayoría siguieron un proceso aleatorio, es decir, se aceptó H_0 .

Tabla 11
Resultados de la segunda prueba de hipótesis

Intersección	Sentido	Datos	H	E(H)	E(Z)	P_Hipótesis	Conclusión
--------------	---------	-------	---	------	------	-------------	------------

Av. Eloy Alfaro y Av. Granados	GN_Or	1°Semestre	0,579	0,588	-0,574	Se acepta	Aleatorio
	S_N	Total	0,589	0,593	-0,300	Se acepta	Aleatorio
	Or_Occ	Total	0,597	0,593	0,330	Se acepta	Aleatorio
		1°Semestre	0,571	0,588	-1,103	Se acepta	Aleatorio
	GOr_S	Total	0,596	0,593	0,223	Se acepta	Aleatorio
Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro	Or_Occ	Total	0,065	0,566	-1,607	Se acepta	Aleatorio
		Anual	0,073	0,577	-0,515	Se acepta	Aleatorio
		1°Semestre	0,082	0,588	-0,525	Se acepta	Aleatorio
	N_S	Total	0,063	0,566	-0,572	Se acepta	Aleatorio
		Anual	0,078	0,577	-0,009	Se acepta	Aleatorio

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez aplicada la metodología descrita anteriormente, en este capítulo se realizó el análisis del valor del coeficiente de Hurst (H) obtenido en las tres intersecciones de estudio de la ciudad de Quito. Al norte (Av. Eloy Alfaro y Av. Granados), centro (Av. 6 de Diciembre y Av. Patria) y sur (Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro), que se analizaron en diversas condiciones temporales, con el fin de averiguar el comportamiento dinámico en las diferentes situaciones propuestas.

4.1. Análisis temporal

Los resultados obtenidos en las diferentes condiciones propuestas, aunque teóricamente la mayoría sobrepasa el valor de 0,5 como se explicó en la sección 3.7 y 3.8, en varios de estos se aplicó las pruebas de significancia para corroborar el rango

al que pertenecen. Así aquellos valores que se encuentran en rojo son en los que presentan comportamiento aleatorio, en azul antipersistente y en negro persistente.

4.1.1. Series de tiempo totales, anuales y semestrales

En la tabla 12, 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 intercambiador de la Granados. La intersección de la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria 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. La intersección de la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro presentó solamente valores de H en rojo y en azul.

Tabla 12
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 de la Av. Eloy Alfaro y Av. Granados 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 de la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro ninguno de los sentidos presentaron comportamiento persistente, mientras el Occ_Or, con la media y los valores más bajos de H 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.

En la Figura 27 se observa a) la serie de tiempo generada en la intersección de la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria sentido S_N, la cual presenta un comportamiento persistente, b) serie de tiempo con comportamiento aleatorio de la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro sentido Or_Occ, entre las cuales no se puede apreciar una diferencia significativa en sus gráficas de series tiempo debido a la cantidad de datos que se utilizaron al momento de realizar el cálculo.

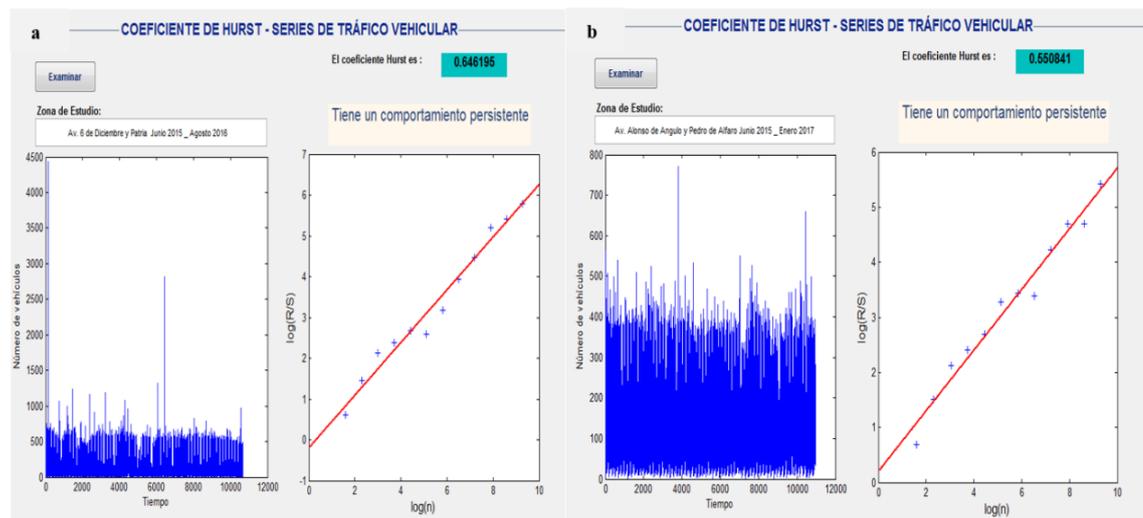


Figura 27 Interfaces de series de tiempo totales

4.2.2. 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 figura 28 en el que los valores más altos de H corresponden a los meses de noviembre, enero y febrero y los más bajos a los meses de junio y septiembre, situación que se presenta en todas las intersecciones.

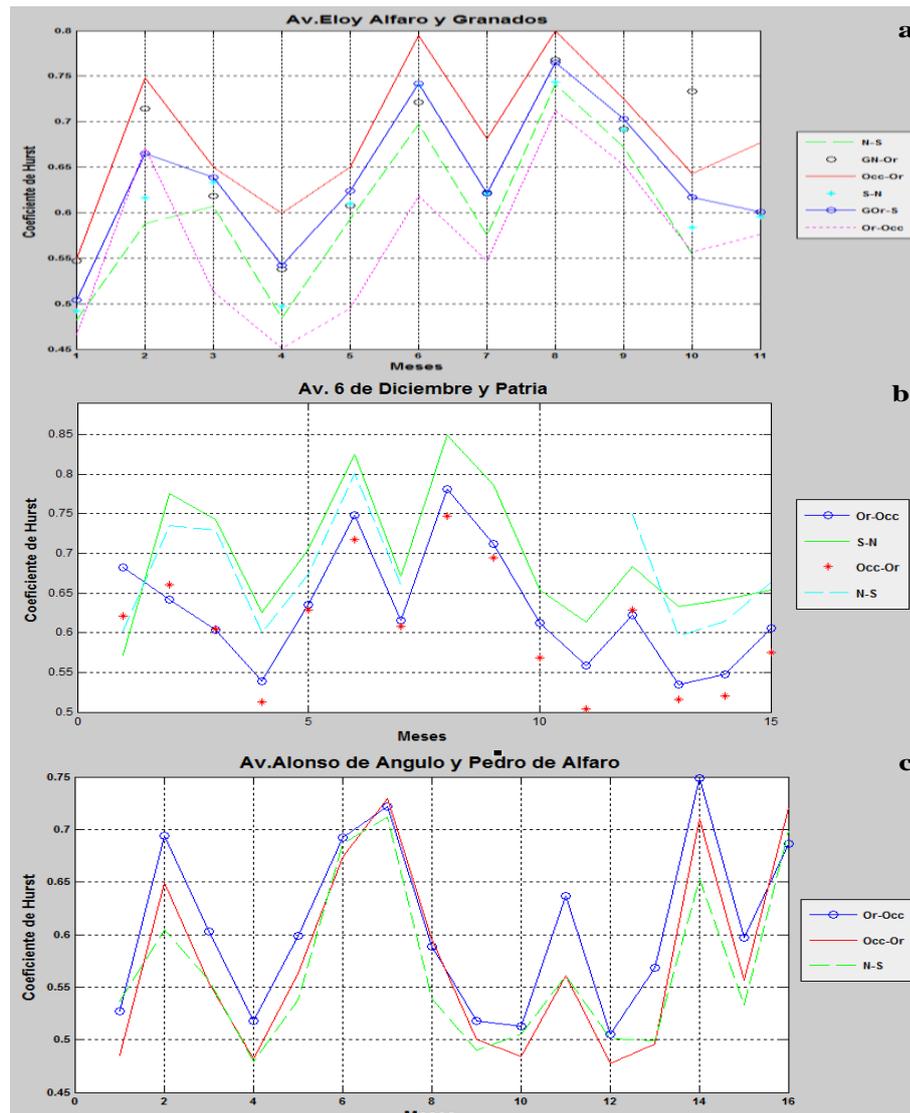


Figura 28 Variación mensual del coeficiente de Hurst
a) Norte, b) Centro y c) Sur

Los resultados de la figura 28 se corroboran en la tabla 13 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 13
Coeficiente de Hurst en series de tiempo mensuales

Intersección	Sentido	Junio	Julio	Agosto	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

En la intersección norte el sentido Or_Occ presenta mayor cantidad de meses con comportamiento antipersistente (junio, agosto, septiembre, octubre, diciembre y abril) y el N_S comportamiento aleatorio (julio, diciembre y marzo). En la intersección centro los sentidos que presentaron comportamiento antipersistente en septiembre (Or_Occ y Occ_Or) y abril (Occ_Or), mientras que comportamiento aleatorio solo presentaron los meses de junio (S_N) y marzo (Occ_Or). En la intersección sur, el sentido N_S presenta la mayor cantidad de meses con comportamiento antipersistente (junio, septiembre y diciembre) y aleatorio (agosto, octubre y mayo).

Con lo descrito anteriormente, los meses de noviembre (figura 29b), enero y febrero presentaron comportamiento persistente en todas las intersecciones de estudio, siendo los resultados de H más cercanos a 1 lo que indica un reforzamiento de tendencia y esto aumenta mientras más se acerca a este valor. Los sentidos en la intersección norte GN_Or, Occ_Or, en la centro Or_Occ y S_N y en la sur Or_Occ las que presentaron mayor cantidad de meses con comportamiento persistente.

Contrario ocurrió en los meses de junio y septiembre (Figura 29a), en que se presentaron valores bajos siendo 0,6 el más alto entre estos dos meses, por lo que todos los sentidos de la intersección norte y sur presentaron comportamiento antipersistente. 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.

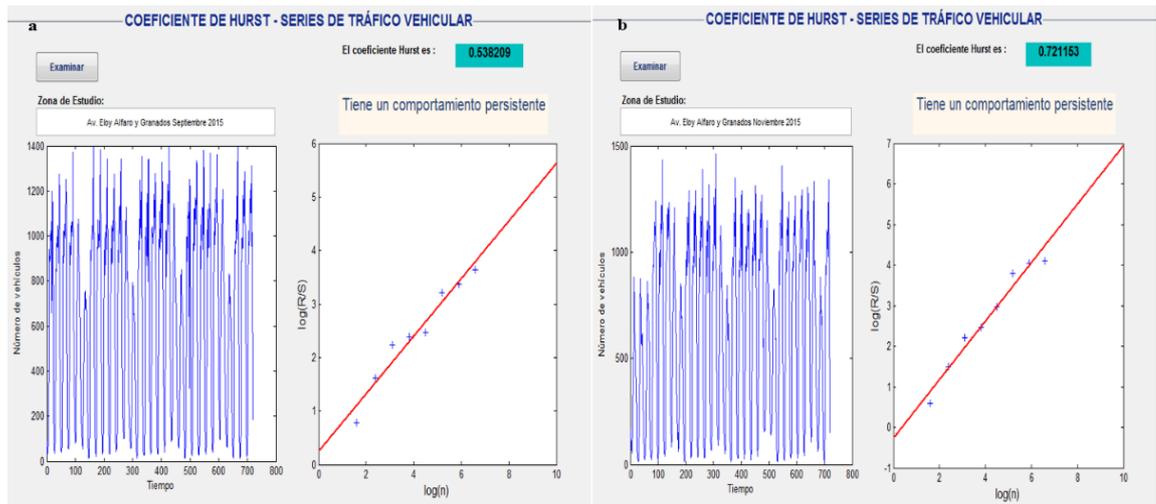


Figura 29 Interfaces de series de tiempo mensuales intersección norte sentido Giro Norte_Oriente. a) septiembre 2015 y b) noviembre 2015

4.1.3 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 del coeficiente de Hurst fueron próximos a 1, por lo cual no fue necesario realizar la prueba de significancia ya que sus errores estándar de igual manera fueron valores bajos.

En la figura 30 se compara las 4 semanas del mes de junio del 2015 de las tres intersecciones 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 un comportamiento persistente, a pesar de que en el mes de junio en el análisis mensual presento comportamiento antipersistente en la intersección norte (ver figura 30a) y sur (ver figura 30c).

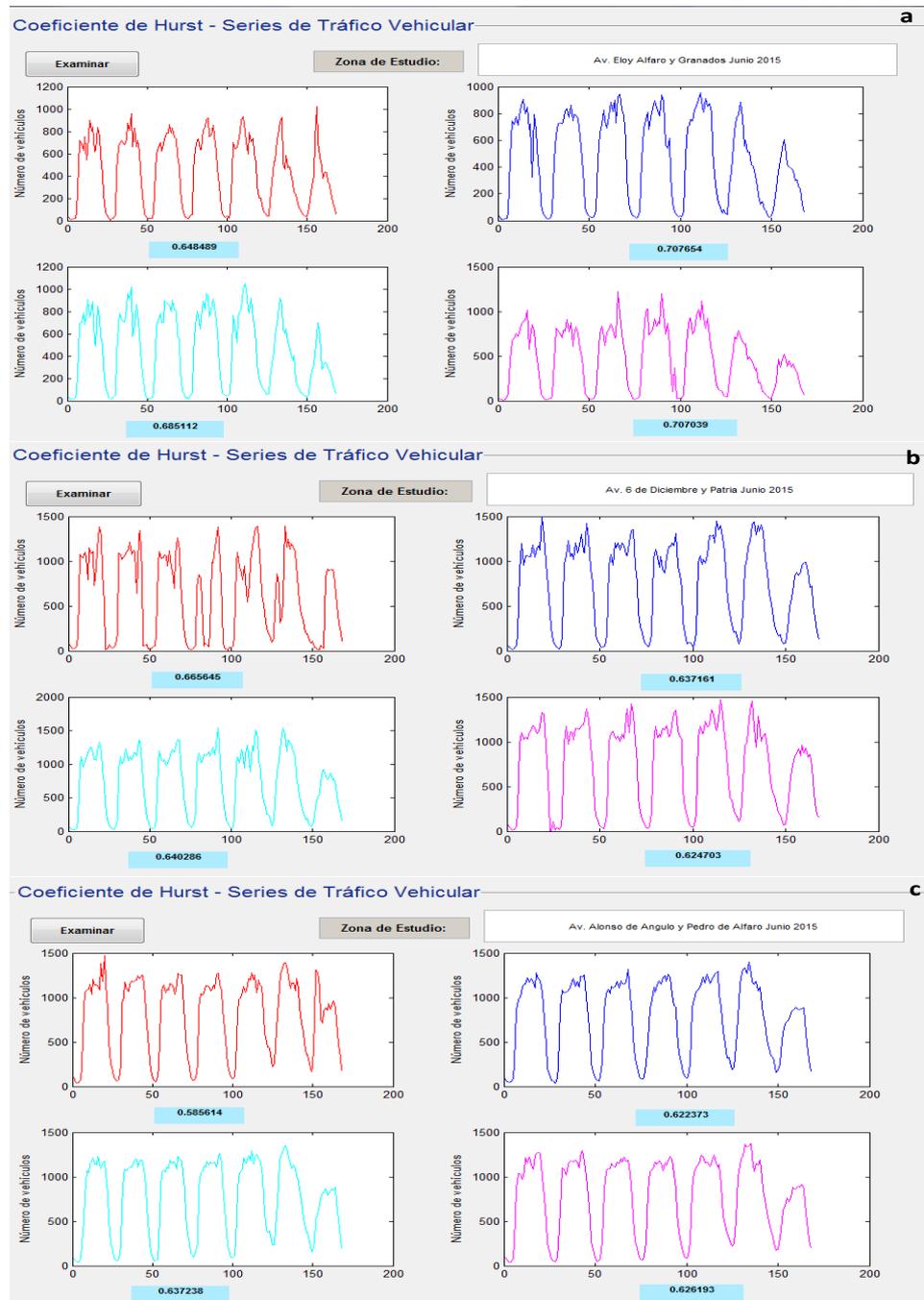


Figura 30 Interfaces de series de tiempo semanales mes junio 2015
a) Norte, b) Centro y c) Sur

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, siendo esto una de las características principales de los fractales.

4.1.4. Series de tiempo por horas pico

En esta etapa se analizaron los datos en el periodo de horas pico que van de 7:00 a 10:00 y de 16:00 a 20:00 horas, que se caracterizan por presentar 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 14 donde H 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.

Tabla 14
Coefficiente de Hurst por horas pico

Intersección	Sentido	H
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

4.1.5. Series de tiempo por horas

El análisis realizado hora a hora a lo largo del día, permitió evaluar el comportamiento del flujo vehicular, que se caracteriza por el crecimiento progresivo a partir de las 05:00 horas y la disminución desde las 20:00 horas. Los resultados obtenidos varían dependiendo la zona de estudio, aunque, como se aprecia en la figura 31 en todas las intersecciones en las primeras horas del día de 0:00 a 03:00 presentan los valores más bajos y los más altos de 06:00 a 11:00 que coincide con las horas de mayor afluencia vehicular.

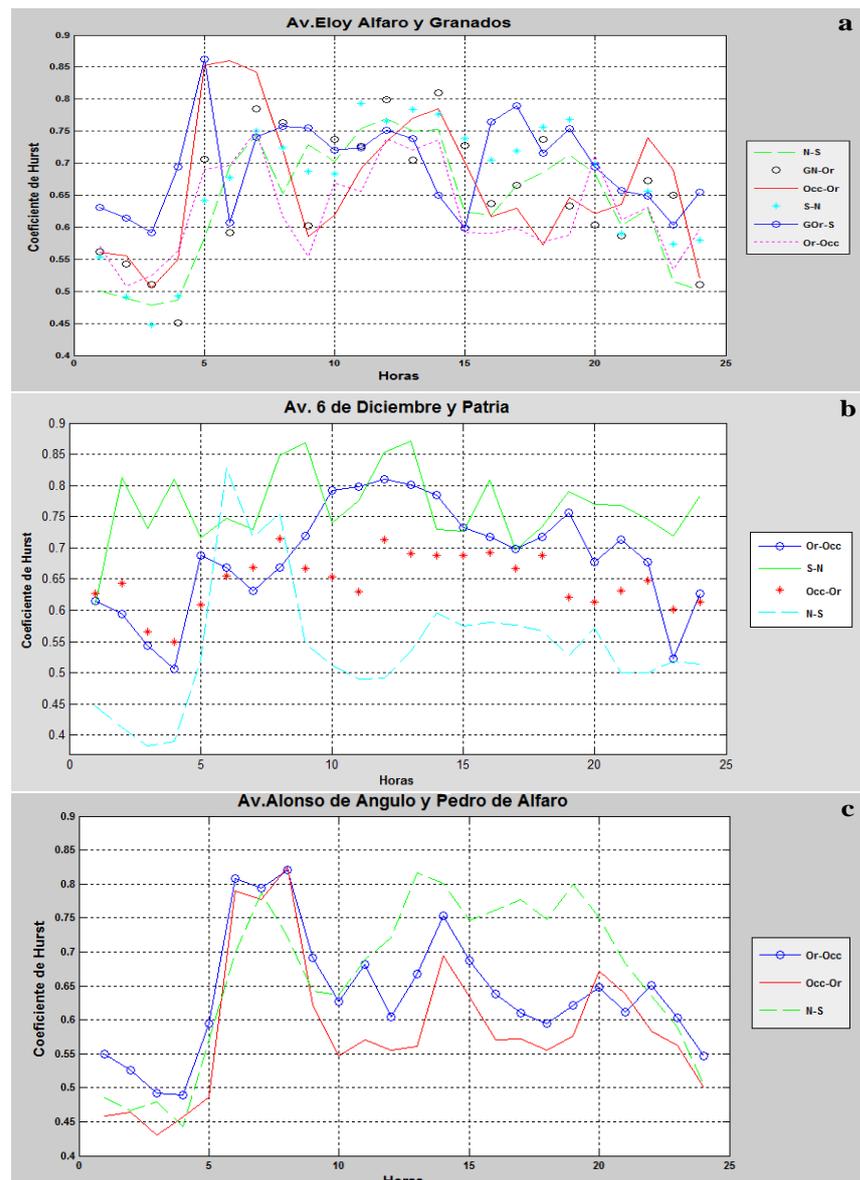


Figura 31 Variación por hora de H
a) Norte, b) Centro y c) Sur

En la tabla 15, 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 Av. Eloy Alfaro y Av. Granados (norte), en sus seis sentidos existió una variación en los resultados, en la que de 01:00 a 3:00 horas presentaron comportamiento antipersistente los sentidos N_S, GN_Or, Occ_Or y S_N, mientras que el sentido Or_Occ presentó solamente comportamiento aleatorio (01:00, 02:00, 14:00 y 22:00).

La intersección de la Av. 6 de Diciembre y Av. Patria (centro) presentó los resultados con los valores más altos de H , así, el sentido S_N solamente tuvo presencia de comportamiento persistente, mientras que el N_S presentó comportamiento antipersistente (00:00, 01:00, 02:00, 03:00, 04:00, 09:00, 10:00, 11:00, 18:00, 20:00, 21:00, 22:00 y 23:00) y aleatorio (08:00 y 14:00) en el mayor número de horas.

En la intersección de la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro (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.

Tabla 15
Coefficiente de Hurst en series de tiempo por horas

Hora	Norte						Centro			
	N_S	GN_Or	Occ_Or	S_N	Or_Occ	Gor_S	Or_Occ	S_N	Occ_Or	
0	0,501	0,562	0,560	0,553	0,631	0,570	0,614	0,609	0,627	
1	0,489	0,543	0,555	0,491	0,614	0,508	0,594	0,812	0,644	
2	0,478	0,510	0,506	0,447	0,592	0,524	0,544	0,732	0,566	
3	0,486	0,450	0,549	0,493	0,695	0,563	0,506	0,810	0,550	
4	0,583	0,706	0,853	0,641	0,862	0,691	0,687	0,716	0,610	
5	0,695	0,591	0,860	0,678	0,607	0,696	0,668	0,747	0,655	
6	0,744	0,784	0,842	0,751	0,741	0,751	0,632	0,730	0,669	
7	0,652	0,763	0,721	0,724	0,757	0,615	0,669	0,849	0,715	
8	0,729	0,602	0,586	0,686	0,754	0,555	0,719	0,867	0,667	
9	0,703	0,737	0,619	0,684	0,721	0,669	0,792	0,740	0,653	
10	0,754	0,726	0,691	0,793	0,724	0,656	0,798	0,776	0,630	
11	0,770	0,799	0,733	0,765	0,751	0,738	0,810	0,853	0,714	
12	0,750	0,705	0,770	0,784	0,738	0,721	0,801	0,871	0,691	
13	0,753	0,810	0,785	0,777	0,650	0,735	0,785	0,729	0,687	
14	0,624	0,727	0,701	0,738	0,599	0,591	0,733	0,727	0,688	
15	0,619	0,637	0,617	0,705	0,765	0,590	0,717	0,808	0,692	
16	0,666	0,665	0,629	0,720	0,790	0,599	0,699	0,697	0,667	
17	0,686	0,737	0,573	0,756	0,715	0,577	0,717	0,734	0,688	
18	0,713	0,633	0,647	0,768	0,754	0,588	0,756	0,790	0,621	
19	0,684	0,603	0,622	0,699	0,695	0,711	0,677	0,770	0,614	
20	0,602	0,586	0,635	0,591	0,657	0,612	0,713	0,769	0,632	
21	0,629	0,672	0,740	0,656	0,649	0,631	0,678	0,745	0,648	
22	0,516	0,650	0,690	0,573	0,603	0,534	0,522	0,720	0,602	
23	0,502	0,510	0,520	0,580	0,655	0,596	0,626	0,783	0,613	

Las horas que presentaron los valores de H 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.

4.1.6. Series de tiempo por días de la semana

En la figura 32, se observa que los resultados obtenidos de coeficiente de Hurst en las series de tiempo por días de la semana, fueron cercanos a 0,5 por lo que al aplicar las pruebas de significancia, en su mayoría presentaron comportamiento antipersistente y aleatorio.

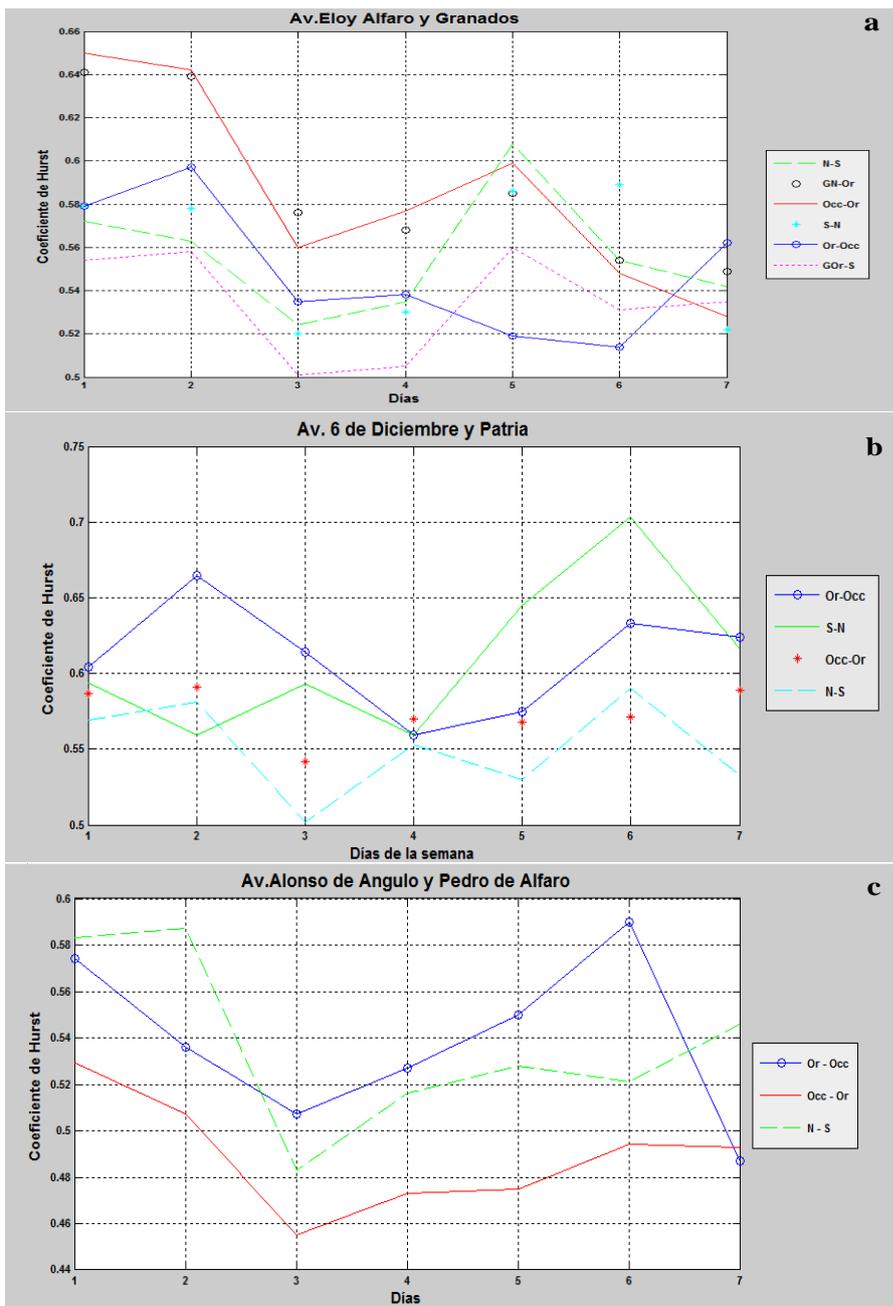


Figura 32 Variación de H acuerdo al día de la semana
a) Norte, b) Centro y c) Sur

En la tabla 16, 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 los días miércoles, jueves, sábado y domingo presenta 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 presenta comportamiento persistente, siendo el S_N el que presenta este tipo en la mayoría de los días, contrario al N_S. 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 16
Coefficiente 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

4.2. 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 las 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, lo que es 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, y otros, 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 las 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 del coeficiente de Hurst mayores a 0,7 pero con flujo vehicular superior a 654 vehículos por hora (Perati, Raghavendra, Koppula, Doodipala, & Dasari, 2012).

A partir de las 05:00 el coeficiente de Hurst (H) comienza a aumentar su valor, hora de incremento de flujo vehicular por inicio de actividades. Así los picos más altos de este análisis en las tres intersecciones fue a las 06:00, 07:00 horas de entrada de centros educativos y trabajos, 13:00 hora de almuerzo y salida de centros educativos, 16:00 hora de salida de trabajos y 19:00 hora de término de actividades, en el que el valor de H empieza a descender desde las 20:00.

Los días laborales de la ciudad de Quito lunes, martes, miércoles, jueves, viernes presentaron comportamiento aleatorio y antipersistente en varios sentidos de las tres intersecciones principalmente en la intersección sur. El sábado y domingo los diferentes sentidos de la intersección norte y sur presentaron comportamiento antipersistente, debido a la disminución del volumen vehicular por ser días de descanso.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. 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.

El análisis de series de tiempo mensual, los meses de noviembre, enero y febrero presentaron valores de H cercanos a 1, lo que significa el aumento de la problemática ya que se refuerza la tendencia por lo que hay que tomar precauciones para el mejoramiento de la congestión vehicular.

En el análisis realizado en series de tiempo mensual junio y septiembre presentaron comportamiento antipersistente, en todos los sentidos de la intersección de la Av. Eloy Alfaro y Av. Granados (norte) y la Av. Alonso de Angulo y Av. Pedro de Alfaro (sur), meses que coincide con inicio y terminó de año escolar en la ciudad de Quito.

El análisis realizado en periodos semanales los resultados de las tres intersecciones sobrepasaron el valor de 0,5 y con errores estándar bajos, por lo que no se tuvo que realizar las pruebas de significancia, además de servir como indicador de autosimilitud siendo el primer indicio de la presencia de fractales en series de tráfico vehicular.

En el análisis de horas pico los resultados de H fueron los más cercanos 1 lo que indica que a estas horas el problema de congestión vehicular continuará agravándose en las tres intersecciones, lo que fue corroborado en el análisis por hora ya que a estas horas los valores de H fueron altos.

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.

5.2. Recomendaciones

El Análisis de Rango Reescalado como metodología para la estimación del coeficiente de Hurst, en los diferentes análisis dio resultados cercanos a 0,5 que al compararlo con el error se debió corroborar al rango al que pertenecía, por lo que se tuvo que realizar pruebas de significancia. Por lo que es pertinente utilizar otros

métodos para estimar H como lo es por medio de la Transformada de Wavelet, lo que ayudará a verificar en que rango se encuentra en los valores que se tuvo que realizar estas pruebas.

El análisis realizado en este estudio arrojó resultados muy variados presentándose diferentes comportamientos, que deben ser complementados con indicadores que ayudan a la Gestión del Tráfico Vehicular como lo son la capacidad, volumen, tasa de tráfico, densidad o congestionamiento y nivel de servicio.

Es necesario realizar este tipo de estudio en las diferentes intersecciones de la ciudad, para identificar los sentidos que presentan mayores inconvenientes en la zona y los que necesitan intervención inmediata, para a partir de este realizar las modificaciones geométricas necesarias para el desfogue de la congestión vehicular.

La obtención del coeficiente de Hurst es conveniente obtenerlo de un sector completo, para así determinar cuál es la intersección en la que se está generando el mayor problema y cuales podrían ser las vías que se pueden utilizar como desfogue de la que ocasiona más problemas al sector.

El cálculo del coeficiente de Hurst para determinar el funcionamiento de una infraestructura para el descongestionamiento de un sector, debido a que si este resultara de manera óptima el coeficiente de Hurst en esta zona debería de disminuir en un lapso de tiempo.

Para la obtención adecuada del coeficiente de Hurst, se recomienda que la serie de tiempo sea con datos continuos para evitar errores en el cálculo, ya que debido a fallos del equipo estas presentaron huecos.

Al realizar el análisis existió variación de resultados existiendo presencia de autosimilitud característica principal de los fractales, por lo que es necesario realizar un estudio mediante multifractales.

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.
- Ayala, M. (2012). Teoría de la complejidad: Aplicación al Sistema interconectado nacional de Bolivia (tesis maestrado). Santiago de Chile, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile .
- Battle, A., & Grébol, S. (2009). Fractales en los mercados financieros (tesina masterado). Barcelona, España: Barcelona School of Management.
- Bravo, P. (2004). Modelado fractal de tráfico de la red de Ingeniería Telemática (tesis pregrado). Madrid , España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Brockwell, P. (2002). Introduction to Time Series and Forecasting. Series in Statistics. *Springer*(2).
- 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.
- Contreras, T. (2007). Análisis fractal de un sistema complejo: Epilepsia (tesis maestrado). México DF, México: Instituto Politécnico Nacional.

- Díaz, A. (2008). Algunas consideraciones sobre el uso de técnicas fractales en el análisis del mercado accionario bursátil mexicano. *Contaduría y administración*(224), 35-57.
- Djaparidze, L. (2006). Long-range Dependence en los Retornos a Nivel Precio en el Merval (tesis maestrado). Buenos Aires, Argentina: Universidad de CEMA.
- EPMMOP. (2009). *Plan Maestro de Movilidad para el Distrito Metropolitano de Quito 2009-2025*. Obtenido de Flacso Andes: www.flacsoandes.edu.ec
- EPMMOP. (13 de noviembre de 2014). *Sistema centralizado adaptativo de semaforización*. Obtenido de Empresa Pública Metropolitan de Movilización y Obras Públicas - EPMMOP: <http://www.epmmop.gob.ec>
- 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.
- Gálvez, E. (2005). Análisis fractal del mercado de valores de México (tesis doctorado). México DF, México: Instituto Politécnico Nacional.
- Gao, J., Cao, Y., Tung, W., & Hu, J. (2007). *Multiscale analysis of complex time series: integration of chaos and random fractal theory, and beyond*. New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- González, V., & Guerrero, C. (2001). Fractales: fundamentos y aplicaciones, parte I: concepción geométrica en la ciencia e ingeniería. *Ingenierías*, 4(10), 53-59.
- Gutiérrez, H. (2008). Estudio de geometría fractal en roca fracturada y series de tiempo (tesis pregrado). Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile .
- Guzman, J. (2014). Pronóstico de demanda de precios de energía en un mercado eléctrico (tesis maestría). Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Herrera, C. (2007). Simulación numérica de paisajes montañosos, cuencas hidrográficas y de procesos de lluvia, erosión y depositación (tesis pregrado). Sartenejas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- Hinojosa, M., Aldaco, J., & Castillo, M. (2016). Autofinidad de las trayectorias de propagación de grietas en dos tipos de papel. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales.*, 37(1)}, 35-44.
- Hurst, H. (1956). The problem of Long-Term Storage in Reservoirs. *Hydrological Sciences Journal*, 1(3), 13-27.

- INEC. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Censos*. Obtenido de <http://www.ecuadorencifres.gob.ec>
- Jácome, E. (27 de octubre de 2015). *Cinco sectores soportan la mayor carga vehicular*. Obtenido de El Comercio: <http://www.elcomercio.com>
- López, M. (2015). El sistema de planificación y el ordenamiento territorial para Buen Vivir en el Ecuador. *Geosp – Espaço e Tempo*, 19(2), 296-311.
- Luegas, D., Ardila, E., & Moreno, J. (2010). Metodología e interpretación del coeficiente de Hurst (tesis maestrado). Bogotá, Colombia: Universidad Externado de Colombia.
- Mandelbrot, B. (1997). *La Geometría Fractal de la Naturaleza. (Traducido al español de The Fractal Geometry of Nature)* (Vols. 8 - 08023). Barcelona, España: Tusquets Editores, S.A. Cesare Cantú.
- Mandelbrot, B., & Van Ness, J. (1968). Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM review*, 10(4), 422-437.
- Méndez, A. (2013). Series de tiempo: Una aplicación a registros hidrométricos en una cuenca del Estado de Oaxaca (tesis pregrado). Oaxaca, México: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Millán, G. (2013). Modelado de tráfico basado en procesos multifractales asociativos (tesis doctorado). Santiago de Chile, Chile: Universidad de Santiago de Chile.
- Miranda, M., Oleschko, K., Parrot, J., Castrejón, F., Taud, H., & Brambila, F. (2006). Porosidad de los yacimientos naturalmente fracturados: una clasificación fractal. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 23(2), 199-214.
- Muller, N. (2008). Evaluación de la tasa de interés en México mediante el uso de técnicas fractales y neuronales a fin de establecer un mecanismo eficiente de pronóstico (tesis pregrado). México DF, México: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Economía.
- Muñoz, J. (2005). Movimiento browniano y geometría fractal: El IBEX 35. XIII. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Murillo, J., Trejos, A., & Olaya, P. (2003). Estudio del pronóstico de la demanda de energía eléctrica, utilizando modelos de series de tiempo. *Scientia et Technica*, 3(23).
- Ojeda, R. (2004). Métodos de Predicción para Series Tiempo Fractales (tesis pregrado). Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.

- Oña, L., Rodríguez, G., & Venegas, T. (2012). Estudio traáfico 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 .
- Ortiz, A. (2008). Construcción y programación de algoritmo paralelo para determinar el exponente de Hurst (tesis maestrado). México DF, México: Instituto Politécnico Nacional.
- Pacheco, M. (27 de Diciembre de 2014). *50000 automotores nuevos circulan en las vías de Quito*. Obtenido de El Comercio: <http://www.elcomercio.com/>
- Palomas, M. (2002). Evidencia e implicaciones del fenómeno Hurst en el mercado de capitales. *Gaceta de economía*, 8(15), 117-153.
- PDOT DMQ. (2012). *Plan Metropolitano de Ordenamiento Territorial*. Obtenido de Municipio de Quito: <http://www.quito.gob.ec>
- Perati, M., Raghavendra, K., Koppula, H. R., 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.
- Perati, M., Raghavendra, K., Koppula, H. R., 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.
- Peters, E. (1994). *Fractal market analysis: applying chaos theory to investment and economics*. New York: John Wiley & Sons.
- Quezada, A. (2006). Fractales y opinión pública: Una aplicación del Exponente de Hurst al estudio de la dinámica de la identificación ideológica (tesis doctorado). Barcelona, España: Universidad de Barcelona .
- 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. CONAIIISI'13.*, 25-35.

- Restrepo, D., Mesa, O., & Arango, H. (2001). Conjuntos Fractales en el Tiempo y en el Espacio. *Universidad Nacional de Colombia*, 51-59.
- Ríos, G. (2008). Series de Tiempo (tesis pregrado). Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.
- Ríos, L. (2016). Construcción de un prototipo para configuración de parámetros de tiempo y monitoreo remoto de semáforos (tesis pregrado). Quito, Ecuador: Universidad de las Américas.
- Rivas, J. (2013). Análisis de autosimilaridad para fuentes sintéticas de video . Manizales, España: Universidad Católica de Manizales.
- Rodríguez, E. (2012). Hidrología de Hurst y Box Counting para el análisis de persistencia, volatilidad y riesgo en dos series de tiempo colombianas. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 8(14), 41-50.
- Rodríguez, R. (2012). El coeficiente de Hurst y el parámetro α -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.
- Secretaría de Movilidad. (2014). *Diagnóstico de la movilidad en el Distrito Metropolitano de Quito para el Plan Metropolitano de Desarrollo Territorial (PMOT)*. Obtenido de Municipio del Distrito Metropolitano de Quito: <http://gobiernoabierto.quito.gob.ec>
- 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.
- Solé, R., & Manrubia, S. (2001). *Orden y caos en sistemas complejos: Fundamentos*. Catalunya, España: Editorial Universidad Politécnica de Catalunya.
- Stephen, N., & Dean, V. (2011). Statistical Intervals, Part 1: The Confidence Interval. *ASTM Standardization*, 39(4).
- Torres, L. (2007). Determinación del exponente de Hurst mediante el análisis de Rango Re-escalado en registros de pozos de la cuenca oriental de Venezuela (tesis pregrado). Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.

- Unibazo, M., & Suazo, B. (2009). Metodología fractal como estrategia de crecimiento urbano. *5th International Conference Virtual City and Territory*, 201-214.
- Villavicencio, J. (2010). *Introducción a Series de Tiempo*. Obtenido de Instituto de Estadísticas de Puerto Rico: <http://www.estadisticas.gobierno.pr/iepr/LinkClick.aspx>.
- 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.
- Zevallos, P. (2014). Estudio de tráfico, modelación y rediseño del trazado vial de la (tesis pregrado). Quito, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito.
- Zhang, Y., & Guan, W. (2011). Empirical Study of Fractal Characteristics of Traffic Time Series. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 5(2), 110-114.