

Análisis fractal de la urbanización de Sogamoso en el periodo 1948-2004

Sogamoso's Urbanization Fractal's Analysis During the 1948-2004's Period

Germán Herrera Salamanca*

Resumen

Examina la morfología inherente al crecimiento urbano de Sogamoso, ciudad intermedia de Boyacá, Colombia, en cuatro momentos a lo largo del periodo comprendido entre 1948 y 2004. A partir de cartografía e imágenes de sensores remotos, y utilizando las herramientas de las tecnologías de la información geográfica, se reproduce de forma detallada el área construida en 1948, 1964, 1981 y 2004. La morfología se estudia usando una aproximación fractal, se estima la dimensión fractal "D" para cada una de las configuraciones, y se hace un análisis comparativo entre momentos. Los resultados muestran un aumento de "D" a través del tiempo, indicando un incremento en densidad en los bordes urbanos y el llenado progresivo de lotes disponibles entre asentamientos.

Palabras clave: Dimensión fractal, Estructura y morfología urbana, Transformación socioespacial, Geografía urbana, SIG y Teledetección, Sogamoso.

* Docente Auxiliar Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Uptc. Maestría en Geografía Convenio Uptc-IGAC, Escuela de Posgrados en Geografía. german.herrera@uptc.edu.co

Abstract

It examines the urban growth inherent morphology of the intermediate city of Sogamoso in Boyacá Colombia, taking four moments along the period between 1948 and 2004. With cartography and remote sensors' images and using the tools of the geographical information's technologies, it reproduces in detailed the area built in each studied moment, 1.948, 1.964, 1.981 and 2.004. The morphology is studied using a fractal approach, the "D" fractal dimension for each one of the configurations is determined and a comparative analysis is done. The results show a "D" increase through out the time, indicating a density increment in the urban borders and the progressive filling of available land plots among settlements

Key words: Fractal dimension, GIS, Remote sensing, Socio-spatial Transformation, Structures and urban Morphology, Urban geography, Sogamoso city.

1. Introducción

En Latinoamérica, la ciudad se ha desarrollado de una forma que no se ajusta del todo a las teorías y modelos urbanísticos creados para el mundo desarrollado; por esto es necesario avanzar en el conocimiento de sus particularidades, para configurar un cuerpo teórico especial que incluya las realidades propias del medio local (Santos, 1979).

En Colombia existen muchos centros urbanos subregionales, o ciudades intermedias, como Sogamoso, de importancia comercial y agropecuaria, definidos por su oferta de educación en los tres niveles, su infraestructura de salud y hospitalaria y su población, que supera los 100.000 habitantes (IGAC, 1989). Mertins (2001), investigador alemán, las ha caracterizado en relación con los parámetros que han determinado su desarrollo y su clasificación y si conforman uno o varios sistemas regionales nucleados por las cuatro principales metrópolis, pero no se ha profundizado en la morfología de estas aglomeraciones.

Disciplinas como la economía, la demografía, la sociología, la geografía y la planificación urbana han estudiado estas ciudades intermedias en diferentes contextos y escalas. Pero cualquiera que sea la escala de análisis, todos los resultados obtenidos muestran que la distribución espacial de las actividades humanas es esencialmente heterogénea

(Frankhauser, 1998). La intención de dilucidar estas formas urbanas ha incrementado el interés por el estudio de las ciudades, consideradas estructuras complejas y emergentes, proponiendo serias preguntas e iluminando ampliamente la comprensión de los fenómenos urbanos (Apóstolos, 2006).

De otra parte, la creciente aceptación del desarrollo sustentable como un concepto guía, ha hecho que los investigadores enfoquen una renovada atención en la forma urbana que se remonta atrás, al inicio de la moderna planificación y los estudios urbanos. Como resultado, se ha producido abundante literatura relacionada con la búsqueda de la mejor forma de la ciudad o de la forma urbana sustentable, para mejorar la vitalidad económica y la equidad social. La discusión sobre ciudad compacta y ciudad dispersa está vigente, y el debate sobre si esta última es mejor para la calidad de vida, no ha sido completamente establecido (Huang et ál., 2006).

En la geografía, el estudio de aspectos relacionados con la distribución espacial de la población se ha abordado bajo el paradigma de la geometría euclidiana y la uniformidad del espacio. La misma aproximación geométrica está presente en las teorías de localización de la economía urbana, que toma como referencia los asentamientos circulares o lineales. Sin embargo, esta geometría no puede

producir una visión capaz de acomodar las complejas formas encontradas en la distribución espacial de las actividades humanas, que son descritas por los planificadores urbanos como amorfas e irregulares. La única alternativa de aproximación para estudiar fenómenos de mayor y no lineal complejidad, como los que configuran la ciudad, es la geometría fractal. Su aplicación en la geografía urbana es útil porque, además, refleja la existencia de una organización jerárquica en los sistemas espaciales, la cual obedece a una lógica particular de distribución, la ley de Pareto¹. El hecho de ser capaz de estudiar un fenómeno a través de diferentes escalas también ofrece la posibilidad de identificar umbrales críticos en la organización espacial (Frankhauser, 1998). Esta investigación se inscribe en esta tradición e intenta aportar en este sentido.

Sogamoso, objeto de esta investigación, es ciudad de larga historia y tradición, existe desde épocas precolombinas y fue posteriormente refundada por los españoles (Camargo, 1934). Su crecimiento y conformación como polo de desarrollo e influencia regional, se ha consolidado a lo largo de los últimos años, pasando de una población de

5.216 habitantes, en 1938, a 94.267, en 2005 (DANE, 2005). En cuanto al crecimiento físico, Sogamoso tenía en 1948 un área construida neta aproximada de 409.826 m², que aumentó a 528.330 m² en 1964, a 1'401.070 m² en 1981 y a 2'057.922 m² en 2004 (Herrera, en prensa).

Entre 1997 y 2000, el sector de la construcción en Sogamoso experimentó una contracción, un poco menor que su vecina, la ciudad de Duitama, la cual concuerda con estudios previos realizados sobre el área urbana construida de las dos ciudades, usando imágenes de satélite y geometría fractal, y que ilustran una convergencia en forma y en principio en área edificada.

Un aspecto importante es la instalación de la Siderúrgica integrada de Paz de Río en cercanías de Sogamoso, como concreción de la política de industrialización auspiciada en toda Latinoamérica por la Comisión Económica para América Latina, CEPAL. Este hecho, vinculado directamente a las ventajas comparativas del entorno, como la presencia de minerales de hierro, carbón y calizas; a factores físicos, como localización y emplazamiento, en conjunto con elementos como la

¹ Ley de Pareto, también conocida como la regla del 80-20; recibe este nombre en honor a Vilfredo Pareto, quien la enunció por primera vez en relación con la distribución de rentas. Observada por Zipf (1941) en la distribución de ciudades según su tamaño. Este autor la expresó mediante la fórmula $P_r = P_i / r^q$, en la que P_r es la población de la ciudad de nivel o rango r ; P_i , la población de la ciudad mayor, y q , un parámetro cuyo valor generalmente se aproxima a la unidad (Murcia, 1978).

migración estimulada por la violencia política, y la apertura comercial, marcaron su impronta en el crecimiento urbano y la configuración espacial de la ciudad. En este sentido, la forma urbana es un "modelo", que representa las características espaciales del área urbana en un cierto momento, y esta forma también es un "proceso", indicando el cambio espacial con el tiempo; el modelo es el resultado del proceso, y los dos, el modelo y el proceso, están estrechamente vinculados a lo social, económico, cultural y otros factores (Huang et ál., 2006).

En el proceso de crecimiento y las demandas del desarrollo físico se instauran usos y actividades a lo largo del espacio, no siempre de manera armónica y equilibrada. La implantación de edificaciones de uso residencial, comercial e industrial sobre terrenos agrícolas suburbanos, a veces no suficientemente adecuados para ello, con patrones dispersos y un tanto desordenados, genera impactos ambientales en recursos tan valiosos y estratégicos como el suelo, el agua, el aire y la biota (Hasse y Lathrop, 2003).

En relación con lo anteriormente expuesto, cabe preguntarse:

¿Cuáles han sido los patrones y tendencias en la configuración física y la distribución espacial del crecimiento de Sogamoso a lo largo de este lapso?

¿A qué tipo de morfología corresponden estos patrones urbanos?

¿Cómo se ha dado el proceso de transformación a través del tiempo?

Sogamoso ha sido objeto de trabajos que han aportado al conocimiento de su estructura urbana física y socio-espacial en algunos momentos de su desarrollo histórico. En 1974, un equipo interdisciplinario internacional, liderado por el geógrafo estadounidense Lynden S. Williams, hace un estudio sobre la ciudad, abordando aspectos relacionados con el uso y ocupación del suelo, desarrollo físico, poblacional e industrial, y presenta variedad de mapas (ACOGÉ, 1974). Posteriormente, y con la misma óptica, se investigan algunos aspectos urbanos de la ciudad, como la localización de las actividades comerciales e industriales, y se profundiza en temas relacionados con la población, su localización y sus características, tocando además el fenómeno de la migración (IGAC, 1981). Más recientemente, un geógrafo (Angulo, 2006) estudio el crecimiento urbano de la ciudad y aportó elementos de análisis en relación con la expansión física de la ciudad durante el periodo comprendido entre 1981 y 2005.

Si bien en el ámbito nacional no se encuentran estudios sobre la morfología urbana que usen una aproximación fractal, en Europa, Estados Unidos y China se han

adelantado varias investigaciones en conglomerados urbanos. Es el caso de las comunas de La Valonia, en Bélgica, en donde se han estudiado las áreas construidas usando geometría fractal, con el fin de caracterizar la organización espacial de los modelos urbanos, ofreciendo la posibilidad de reducir el impacto sobre la calidad del medioambiente, causado por la urbanización difusa, característica del nuevo estilo de vida periférico (Thomas et ál., 2007).

Apóstolos, investigador griego, realiza un interesante análisis fractal de la urbanización en las afueras de la ciudad de Tesalónica, Grecia, entre 1945 y 1990. Se argumenta suficientemente sobre cómo la dimensión fractal puede ser usada como indicadora de la dispersión urbana, del grado de fragmentación del paisaje urbano y de la transición de una estructura monocéntrica a una policéntrica. El autor discute los cambios ocurridos durante el lapso estudiado, a la luz del análisis fractal. A falta de cartografía, utiliza para su análisis imágenes de sensores remotos, de las cuales aísla las áreas construidas, que luego procesa con el *software* Fractalyse (Apóstolos, 2006).

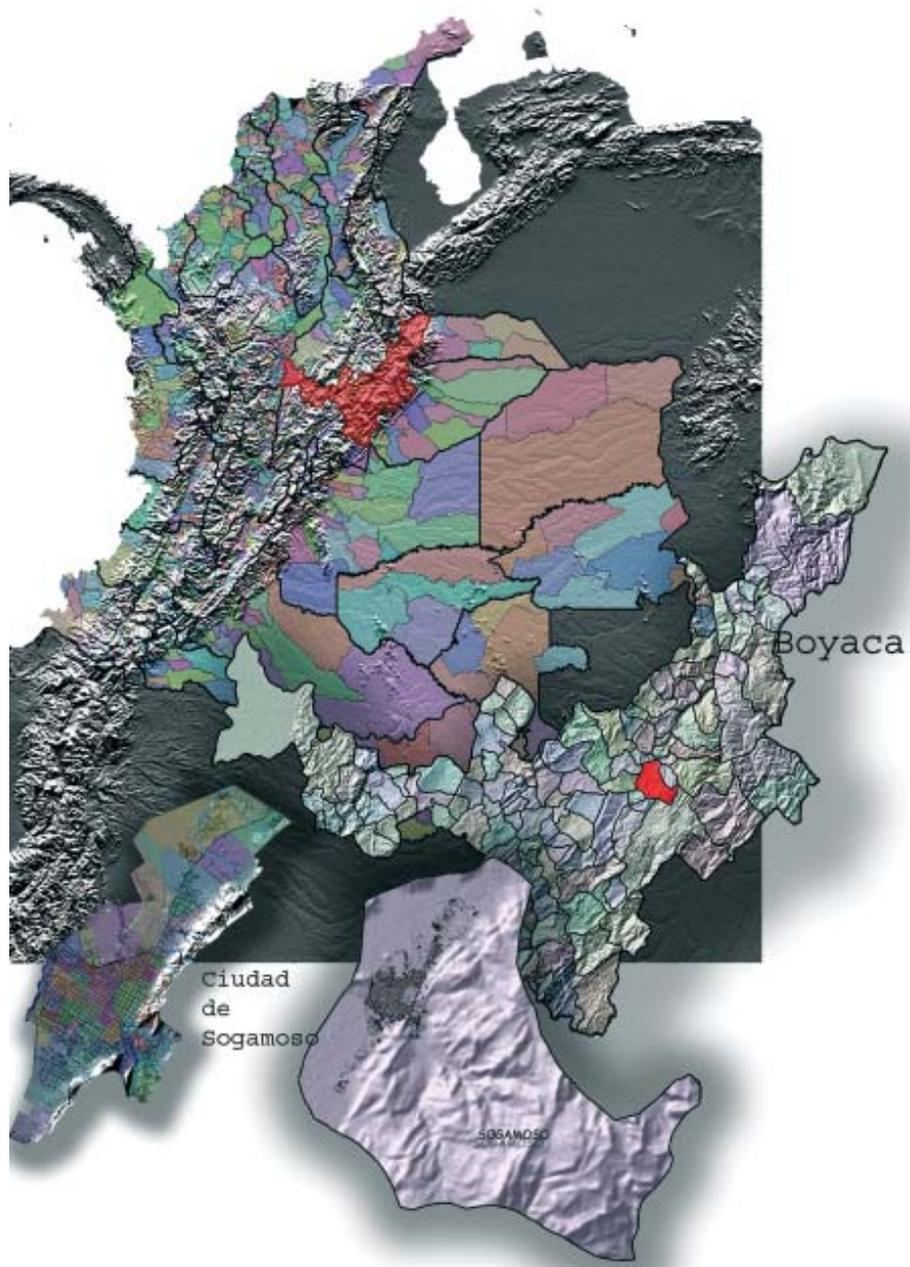
En China se estudia el rápido desarrollo urbano de la provincia de Sunan,

midiendo la dimensión fractal y la autocorrelación espacial en cuatro momentos de análisis (Ronghua et ál., 2.008).

Mediante el uso de métrica espacial y geometría fractal sobre imágenes de sensores remotos, se ha caracterizado la forma urbana de 77 aglomeraciones en Asia, EE.UU., Europa, América Latina y Australia, y se ha hecho un análisis comparativo entre estas, explorando los orígenes de las diferencias en la forma a través de la comparación con indicadores de desarrollo socioeconómico y trayectorias históricas en desarrollo urbano (Huang et ál., 2006).

Este artículo presenta el análisis de la evolución urbana a través del estudio de caso en la ciudad de Sogamoso, durante un periodo que inicia a finales de la década de los cuarenta, y recoge uno de los principales temas trabajados en la investigación "Dinámica física y socio-espacial de Sogamoso 1948-2004", que realicé como requisito parcial para optar al título de Magíster en Geografía. Su propósito es hacer un aporte metodológico para el abordaje del problema, que puede ser usado en estudios posteriores en otros conglomerados, con la idea de posibilitar una más eficiente planificación del uso y disposición de las actividades.

2. Localización geográfica de Sogamoso



Fuente: datos DANE, datos SRTM.

Figura 1. Localización geográfica de Sogamoso, Boyacá

Sogamoso se localiza en el centro del país, a 5°43'14" de latitud norte y 72°55'47" de longitud oeste; la figura 1 da una buena idea de su localización geográfica en el contexto nacional. En el nivel regional central, la ciudad forma parte de la red de ciudades andinas polarizadas por Bogotá (Dureau, 2007). Sogamoso es una ciudad de larga tradición, pues existía mucho antes de la llegada de los europeos (Camargo, 1934). Fue emplazada por los habitantes originales, los chibchas, sobre un amplio valle intramontano de fondo plano, rodeado por una serie de las lomas estructurales elongadas con pendientes variables, que se inician en los alrededores de Corrales y Belencito y se prolongan hacia el sur, pasando por Duitama, Paipa y Tunja, conformando la "Altiplanicie Central de Boyacá", más ampliamente conocida como el altiplano Cundiboyacense (IGAC, 2005).

3. Materiales y métodos

Para describir adecuadamente la morfología de una ciudad es necesario medir la superficie y la distribución espacial del área edificada. Para este estudio se ha recurrido a documentos cartográficos derivados de fotografías aéreas de alta resolución espacial y se ha seleccionado la unidad de construcción como unidad de análisis espacial. Para extraer

estas unidades se usaron los siguientes documentos:

Fotografías aéreas 04 y 05 vuelo C-505 IGAC, 1948.

Plano aerofotogramétrico de Sogamoso escala 1:2.000, de 1964

Plano aerofotogramétrico de Sogamoso escala 1:5.000, de 1981

Plano aerofotogramétrico digital de Sogamoso escala 1:2.000, de 2004

Para determinar las unidades de análisis espacial se procede de la siguiente manera: una primera aproximación se hace a partir de procesamiento digital de los planos aerofotogramétricos existentes en formato análogo para algunos de los momentos de análisis. Los planos urbanos de 1964 y 1981, en escalas 1:2.000 y 1:5.000, se escanean y se convierten en imágenes de alta resolución espacial (15 micrones), se procesan para mejorar su calidades pictóricas, se georreferencian a un sistema de referencia espacial común, en este caso Magna origen Sogamoso², y se extraen, mediante digitalización, las unidades de construcción. Estas unidades, en la forma de vectores tipo polígono, son introducidas a un SIG, editadas, depuradas, dispuestas como capas temáticas y estructuradas topológicamente para su análisis espacial

² Sistema de proyección de coordenadas: GRS_1980_Transversa_Mercator. Proyeccion: Transversa de Mercator. Falso este: 1'127807.512. Falso norte: 1'123647.033. Meridiano central: -72,92377722. Factor de escala: 1,00. Latitud de origen: 5,71317694. GCS_GRS_1.980. Datum: D_GRS_1980.

en lo relacionado con la morfología y determinación de áreas superficiales. En su conjunto conforman la mancha urbana que se intenta medir y caracterizar morfológicamente.

En una segunda aproximación, para 1948, momento para el cual no existían planos fotogramétricos, se recurrió a registros aerofotográficos existentes en el IGAC; estas imágenes en formato análogo fueron escaneadas y convertidas a formato digital, con una resolución espacial de 15 micrones. A continuación fueron procesadas para mejorar sus calidades pictóricas, y posteriormente georreferenciadas al sistema de referencia espacial común ya mencionado, Magna Sirgas con

origen Sogamoso. Para identificar con mayor certeza las unidades de construcción se usó la transformación de componentes principales sobre el par estéreo, propuesta por Lira (2009), un investigador mexicano. El segundo componente de esta transformación pone en relieve las áreas construidas (figura 2). A continuación, con esta imagen y usando un método interactivo en el cual la información del plano de 1964 sirve como referente, se extraen mediante digitalización las unidades de construcción para 1948. Estos vectores, como todos los demás correspondientes a los otros momentos, se introducen al sistema de información geográfica, SIG.

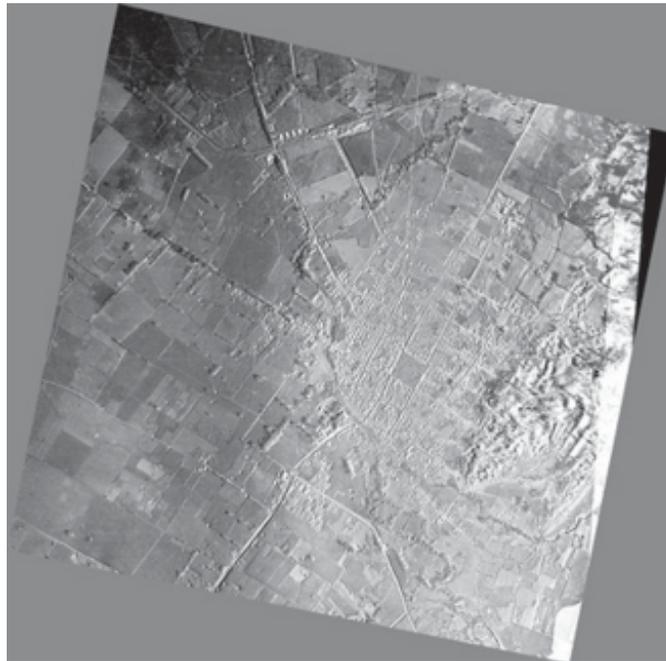
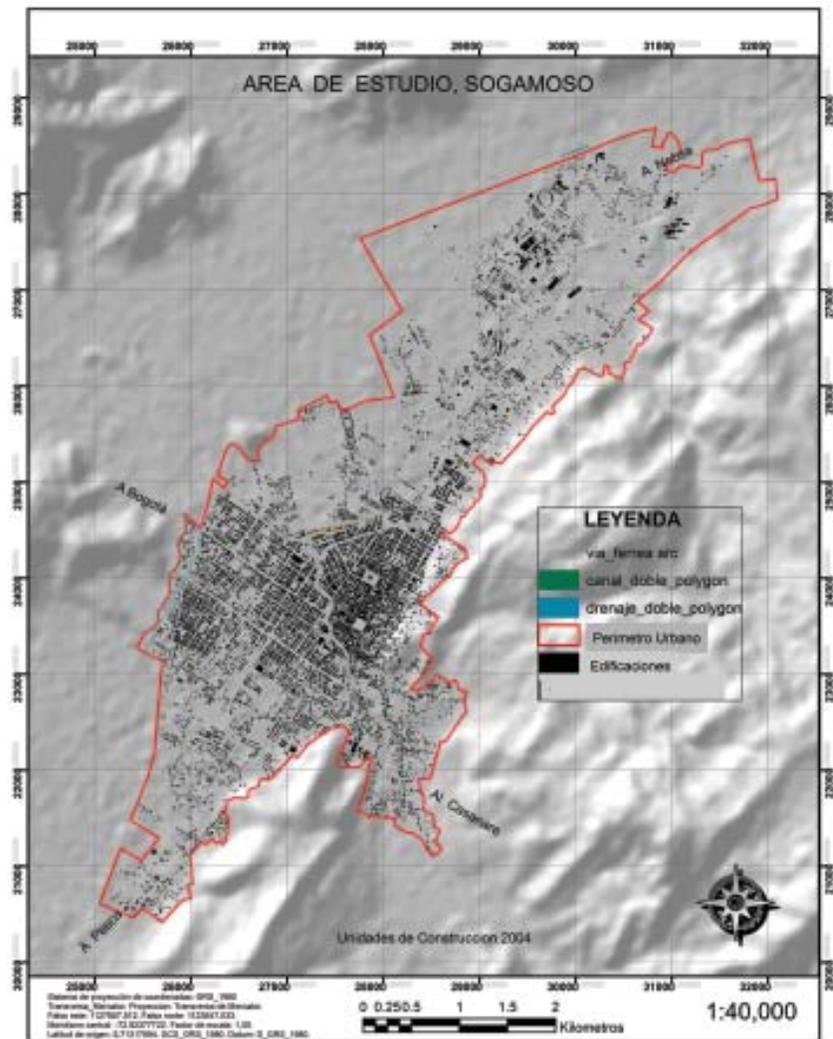


Figura 2. Segundo componente principal derivado del par estéreo de aerofotografía IGAC, Sogamoso 1948

Para la determinación y el examen de la morfología de la ciudad se procede así: en primera instancia se determina un marco espacial constante que defina un espacio común de análisis para los cuatro momentos y que permita minimizar la disparidad, teniendo en cuenta que la información consignada en los planos

aerofotogramétricos del IGAC abarca diferentes extensiones. Se decide usar el perímetro urbano más reciente, correspondiente al Plan de Ordenamiento Territorial vigente; esto significa que para el análisis sólo se consideran las unidades de construcción incluidas en él (figura 3).



Fuente: datos IGAC, datos SRTM. Elaboración del autor.

Figura 3. Mapa de área de estudio, Sogamoso, Boyacá, Unidades de construcción 2004



Fuente: datos IGAC.

Figura 4. Morfología urbana área de estudio, Sogamoso, Boyacá, Imágenes binarias, unidades de construcción momentos de análisis: 1948, 1964, 1981 y 2004.

La mancha urbana, ya determinada en el anterior objetivo y compuesta por el universo de las unidades de construcción de cada momento, se transforma a formato imagen tipo byte

binario (figura 4). Las cuatro imágenes obtenidas se procesan con el *software Fractalyse* para medir la geometría fractal "D" en cada uno de los momentos (Fractalyse, en prensa).

Medición de la dimensión fractal "D"
Fractalyse divide en dos partes la medición de "D": el método de conteo y el módulo de estimación.

Método de conteo

El método de conteo se hace paso a paso, siguiendo un principio de iteración. A cada iteración se cuenta el número de píxeles contenidos en una ventana de conteo. Al siguiente paso, el tamaño de la ventana es ampliado, con lo que el nivel de análisis sobre la imagen es artificialmente cambiado. Entonces se tienen dos elementos, variando de acuerdo con el paso de conteo (iteración) **i**; el número de elementos contados **N**, y el tamaño de la ventana de conteo **e**. Y se obtiene una serie de puntos que pueden ser representados sobre una cartesiana; el eje Y corresponde al número de elementos contados (**N**), y el eje X, al tamaño de la ventana de conteo o al tamaño del elemento de referencia **e**, con **e** incrementándose a cada paso.

Módulo de estimación

Matemáticamente las series de puntos son una curva (llamada la curva empírica). La próxima fase es ajustar esta curva empírica con otra, la curva estimada. Si la curva empírica sigue una ley fractal, la curva estimada tiene la forma de una ley de potencia (parabólica o hiperbólica), y "**D**" representa la dimensión fractal.

$$N = e^D$$

$$N = e^{-D}$$

Una de las opciones que ofrece *Fractalyse* para la estimación es el método de regresión logarítmica lineal, en el cual la curva sufre una transformación logarítmica. Así la ley de potencia se convierte en una ecuación lineal;

$$\text{Log}(N(e)) = \log(eD) \Rightarrow \log(N(e)) = D \cdot \log(e)$$

$$\text{En el software se usa: } \log(N(e)) = D \cdot \log(e) + c$$

Esta regresión fue usada en este trabajo.

La calidad de la estimación es cuantificada usando una razón de correlación. Si el ajuste entre las dos curvas (la empírica y la estimada) es malo, dos conclusiones son posibles: o el patrón urbano bajo estudio no es de naturaleza fractal o es de naturaleza multifractal, caso en el cual la curva empírica tiene que ser dividida en porciones, cada una de ellas correspondiendo a curvas de estimación diferentes (*Fractalyse.org*). La dimensión fractal "**D**" calculada de las unidades de construcción y su análisis estadístico y comparativo en todos los momentos informan acerca del nivel de compactación de la mancha urbana y el grado de dispersión de la edificación, del crecimiento físico en el espacio urbano a través del tiempo, de la comunidad de causas socioeconómicas de la construcción en función de la homogeneidad de "**D**" en algunos

sectores, y de la dinámica de la transformación de la ciudad y su posible tendencia hacia una morfología de ciudad difusa.

4. Resultados y discusión

Con los datos espaciales obtenidos, en este caso las unidades de construcción seleccionadas para el análisis, se realiza la aproximación al examen de la morfología urbana, usando la técnica del análisis fractal, mediante la cual se determina la dimensión fractal "D" de la superficie urbanizada. A diferencia de las dimensiones euclidianas, que son enteras, "D" no lo es y corresponde a un número real que expresa la geometría fractal areal o superficial de un elemento. El rango de valores que puede adoptar "D" está definido por la expresión $1 < D < 2$. Aplicada a la ciudad, "D" tenderá a estar cercana a 2, cuando el espacio urbano está homogéneamente

lleno de construcciones, o cercana a 1, cuando las construcciones llenan de manera dispersa y no compacta este espacio. Entonces "D" describe como está distribuida el área construida sobre la superficie, y cuán denso o fragmentado es el patronamiento espacial de la ciudad. En este estudio se han medido los cuatro modelos urbanos correspondientes a diferentes estados de urbanización de la misma ciudad: 1948, 1964, 1981 y 2004. Un análisis multitemporal indicará, mediante la divergencia de valores de "D" en el tiempo, si ha habido un patrón de desarrollo denso, con llenado de espacios entre áreas construidas, si "D" se incrementa, o, al contrario, si se ha dado un proceso de crecimiento urbano caracterizado por desarrollo fragmentado o a saltos, si el valor de "D" decrece. Las tablas 1 y 2 presentan las relaciones teóricas básicas entre "D" y el contexto urbano que ellas miden (Apóstolos, 2006).

Tabla 1. Divergencia de valores "D" en el espacio

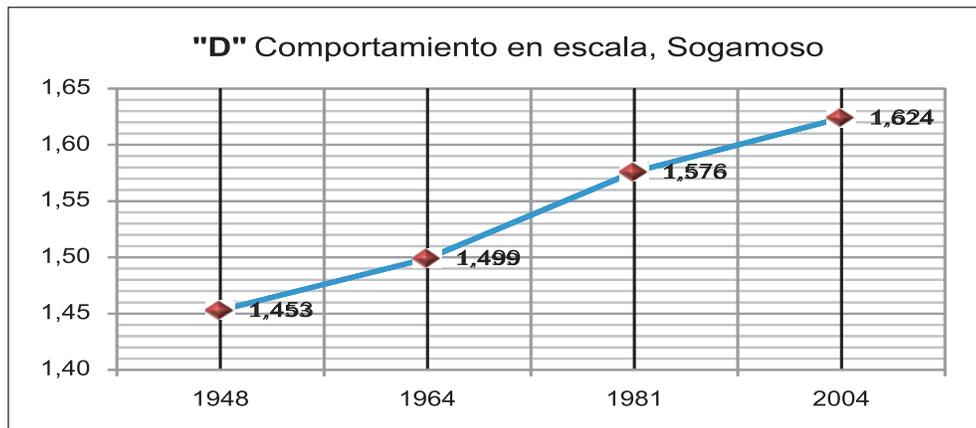
	Áreas centrales más densamente construidas dispersión reciente	Bordes urbanos irregulares caracterizados por homogéneas	Construcciones densas en los bordes, próximas fases de desarrollo
ΔD	Valores altos	Valores bajos	Valores altos

Tabla 2. Divergencia de valores "D" en el tiempo

	Incremento en densidad en los bordes urbanos - Llenado de lotes disponibles entre asentamientos	Desarrollo a saltos en los bordes urbanos -Extensión de los límites urbanos e incrementode la fragmentación y la complejidad
ΔD	Valores altos	Valores bajos

El análisis de los datos aportados en los cuatro momentos (figura 4) se llevó a cabo usando el método de conteo de cajas ya explicado; a continuación se realizó la regresión lineal y se determinó 'D' y la constante 'c', para

derivar la fórmula que expresa la ley de distribución del área urbana desarrollada a través de las escalas. Los resultados obtenidos para los distintos momentos pueden verse en la tabla 3 y en la figura 5.



Fuente: datos espaciales IGAC y este estudio.

Figura 5. Dimensión fractal "D" y comportamiento en escala para Sogamoso, periodo 1948-2004

Tabla 3. Variabilidad de la dimensión fractal y las leyes de distribución de área urbana 1948-2004.

	AÑOS			
	1948	1964	1981	2004
"D" dimensión fractal	1,453	1,499	1,576	1,624
"C" constante	-0,825	-0,14243	-0,093111	-0,051676
Coefficiente decorrelación	0,873902	0,916588	0,960357	0,986317
Ajuste del coeficiente correlación	0,63394	0,909637	0,957053	0,985177
Fórmula función	LogN=-0,1825-1,453logl	LogN=-0,14243-1,499logl	LogN=-0,093111-1,576logl	LogN=-0,051676-1,624logl

Fuente: datos espaciales IGAC, este estudio.

La *figura 6* ilustra sobre el grado de ajuste de la curva empírica con la curva estimada por la regresión lineal.

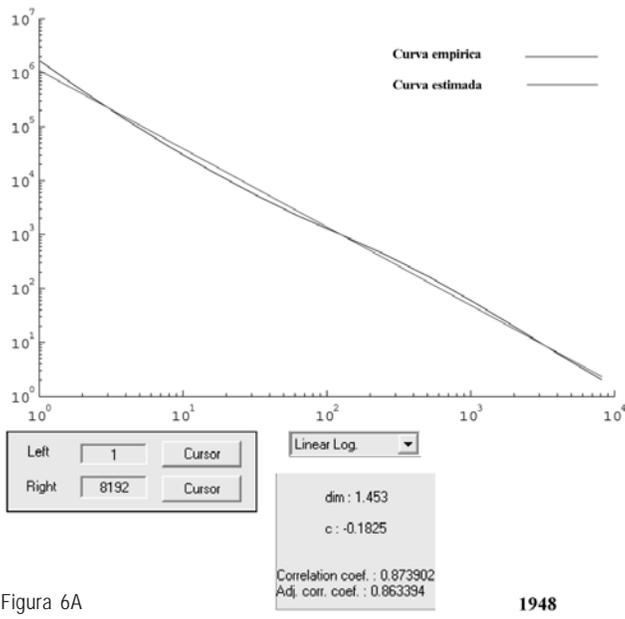


Figura 6A

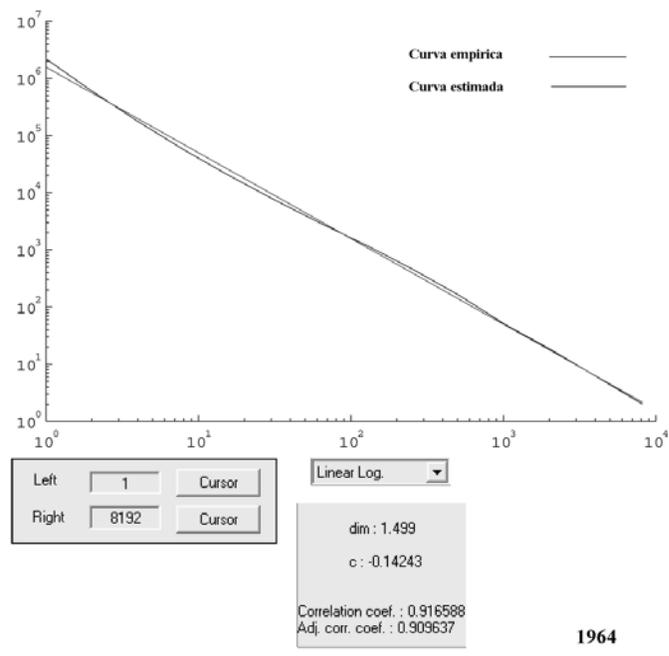


Figura 6B

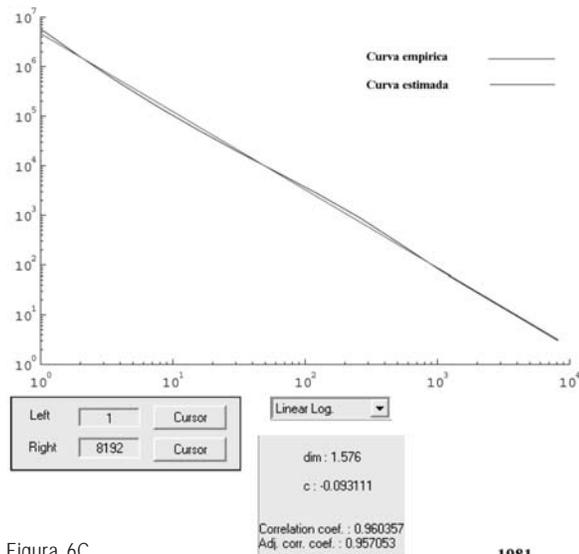


Figura 6C

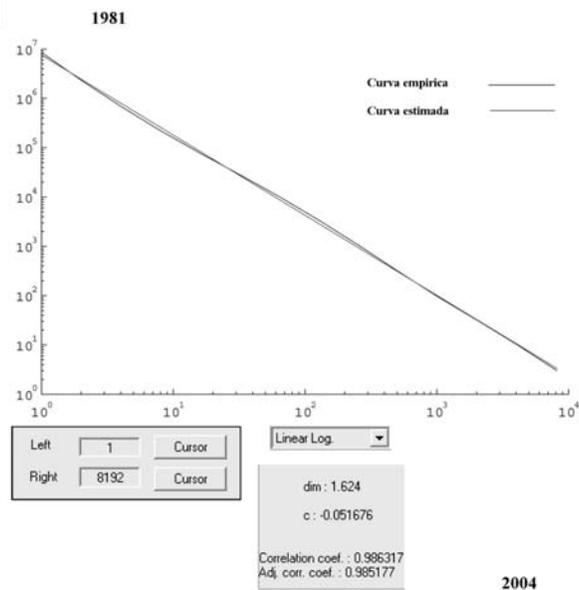
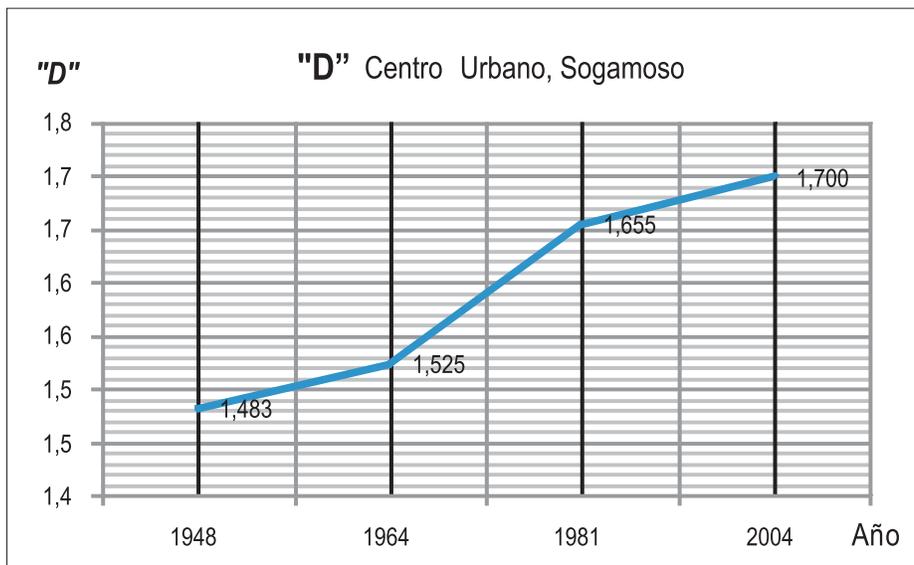


Figura 6D

Figura 6. Curvas de estimación de la dimensión fractal "D" para Sogamoso, momentos de análisis. Fuente: datos espaciales IGAC y este estudio

El análisis fractal se hizo también a la zona céntrica de la ciudad, que presenta un patrón de desarrollo más compacto, con el fin de contrastarlo con el de la totalidad del área de análisis delimitada por el perímetro urbano; se consideró

igual dimensión para el área urbana en los cuatro momentos, definida por idénticas coordenadas geográficas (figura 8). Los resultados para esta nueva área pueden observarse en la figura 7 y la tabla 4.



Fuente: datos espaciales IGAC y este estudio.

Figura 7. Dimensión fractal "D" para la zona céntrica de Sogamoso, periodo 1948-2004

Tabla 4. Variabilidad de la Dimensión fractal y las leyes de distribución de área urbana céntrica. 1948-2004.

	AÑOS			
	1948	1964	1981	2004
"D" dimensiónfractal	1,483	1,525	1,655	1,7
"C" constante	-0,15934	-0,11691	-0,042701	-0,003139
Coefficiente decorrelación	0,898041	0,940019	0,990162	0,998775
ajuste del coeficiente correlación	0,888772	0,934566	0,989267	0,998663
Fórmula función	LogN= -0,159340- 1,483logl	LogN=- 0,11691- 1,525logl	LogN= -0,042701- 1,655logl	LogN= -0,003139- 1,7logl

Fuente: datos espaciales IGAC; este estudio.

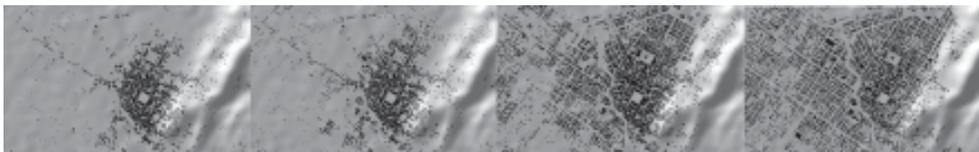
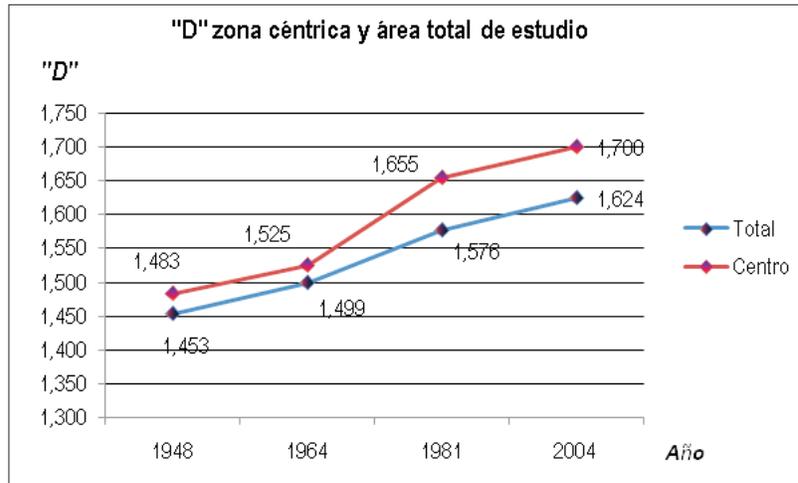


Figura 8. Áreas céntricas consideradas en el análisis fractal, Sogamoso 1948-2004. Fuente datos IGAC, datos SRTM (SRTM, 1994). Elaboración del autor

La magnitud de "D" determinada para el área céntrica, en los cuatro momentos de análisis, puede ser comparada con "D" determinada para la totalidad del área de estudio, observada en la figura 9.



Fuente: datos IGAC, elaboración del autor.

Figura 9. Comportamiento de "D" área total y área céntrica, Sogamoso 1948-2004



Fuente: datos IGAC. Trabajo de campo. Elaboración del autor.

Figura 10. Vista aérea del CBD, Sogamoso 2004.

5. Conclusiones

Para la totalidad del área de estudio, delimitada por el perímetro urbano, la variabilidad de "D" tiene una tendencia positiva de crecimiento a través del

tiempo, cuya diferencia entre los mismos periodos considerados es así: 0,046, entre 1948 y 1964; 0,077, entre 1964 y 1981, y 0,048, entre 1981 y 2004. Para el área céntrica estos valores son: 0,042, 0,13 y 0,045.

"D" es mayor para la zona céntrica, más compacta y desarrollada urbanísticamente que el área total, que presenta dispersión hacia los cuatro extremos articulada por los ejes viales. La diferencia tiende a ser mayor para los dos momentos más recientes, sin embargo, por su magnitud, es la zona céntrica la que se densifica con más rapidez, confirmando un proceso creciente de construcción en los lotes céntricos, la consolidación del distrito central de negocios, CBD, y, como se evidenció en el terreno, una mayor construcción en altura (figura 10).

Por extensión se concluye que se dan unos mayores valores del suelo y de la renta en el área central, pues la mayor parte de los nuevos edificios en propiedad horizontal tienen uso mixto: los pisos inferiores en comercio y oficinas y los superiores en vivienda³.

La magnitud en los incrementos de "D" manifiesta cambios significativos en la densidad de la urbanización para toda el área contemplada; el incremento más importante: 0,077, sucede entre 1964 y 1981, cuando se dio un gran crecimiento en el área urbanizada. En contraste, en ese mismo periodo el centro urbano cambio comparativamente menos.

La ciudad, aunque manifiesta un patrón de dispersión de la construcción, tiende a disminuirlo en la medida en que se llenan los espacios

vacios del tejido urbano, confinados por los nuevos y ortogonales trazados viales, especialmente hacia el oeste de la ciudad, y se hace más compacto el patrón de edificación. El rango de valores de "D" $1,453 < D < 1,624$, obtenido en este estudio, se comporta igual que en muchos otros estudios en todo el mundo (Apóstolos, 2006).

La tendencia hacia una ciudad más compacta, reflejada en el incremento de "D" a lo largo del tiempo, se ve disminuida, a su vez, por la dispersión de los nuevos desarrollos en la periferia, lejos del centro.

Analizando los coeficientes de correlación crecientes en el tiempo (tablas 3 y 4), así como el ajuste de las curvas, que también aumenta en el tiempo, evidente en las figuras resultantes del análisis fractal (figura 6), se puede concluir que los patrones de crecimiento urbano de Sogamoso tienen una estructura multifractal para los primeros momentos de análisis, que tienden a ser cada vez más semejantes a un fractal para los dos últimos momentos, especialmente para la zona céntrica en el 2004, confirmado por el ajuste de las dos curvas, que es bueno, con un coeficiente de correlación de 0,998663.

La tendencia creciente de "D" también puede atribuirse a la administración de la ciudad, la cual ha hecho esfuerzos

³ Entrevista con Jaime Vargas Izquierdo, Licenciado en Filología y Letras, 16-03-2009.

para planificar su desarrollo; un primer plan piloto en los años sesenta, un plan de ordenamiento hecho por la Universidad Nacional en los años ochenta y el plan de ordenamiento territorial, POT, en el 2000, han favorecido la ampliación del espacio público vial y la más adecuada planificación del uso del suelo, así como la proyección de obras de infraestructura que mejoran la intercomunicación interna y externa, el entorno urbano y la calidad de vida de sus habitantes.

Condiciones como una topografía plana; la construcción en los años cincuenta de un acueducto de gran capacidad y calidad del agua, catalogado como el mejor acueducto de Boyacá, cuya fuente es el lago de Tota; la extensión de redes de

servicios; los programas de vivienda obrera del Instituto de Crédito Territorial, y la creación de un fondo de vivienda por Acerías, favorecieron la dispersión de la urbanización en un amplio espacio, colonizado en una primera fase por los barrios obreros³.

El crecimiento físico de Sogamoso ha seguido tendencias comunes a otras ciudades latinoamericanas, con una fase inicial de construcción de asentamientos dispersos en la periferia, destinados a las capas bajas de la población; un progresivo llenado de los espacios vacíos del tejido urbano, revalorizados con obras de infraestructura, por la clase media; en tanto las clases altas abandonan el centro y se desplazan a nuevos y mejores barrios cercanos al centro (Caldeira, 2007).

Literatura citada

- ACOGGE –Asociación Colombiana de Geógrafos–. 1974. *Estudios geográficos sobre la zona urbana de Sogamoso*. Boyacá.
- Angulo Rodríguez, José Domingo. 2006. *Crecimiento urbano de Sogamoso 1981-2005*. Trabajo docente TD2488, Escuela de Ciencias Sociales, Uptc, Tunja.
- Apóstolos, Lagarias. 2006. *Fractal Analysis of the Urbanization at the Outskirts of the City: Models, Measurement and Explanation*. [En línea] Disponible en <http://cybergeo.revues.org/index8902.html>. Se tuvo acceso el 2 abril de 2009.
- Caldeira do Rio Pires, Teresa. 2007. *Ciudad de Muros*. Barcelona: Gedisa, 269.
- Camargo, Gabriel. 1934. *Geografía histórica de Sogamoso*. Sogamoso: Ed. Sugamuxi.
- DANE –Departamento Administrativo de Estadísticas–. 2005. Censos de población.
- Dureau, Françoise; Barbary, Olivier; Lulle, Thierry. 2007. "Dinámicas metropolitanas de poblamiento y segregación". En *Ciudades y sociedades en mutación, lecturas cruzadas sobre Colombia*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- Fractalyse.org <http://fractalyse.org>. Se tuvo acceso el 20 marzo 2009.
- Frankhauser, Pierre. 1998. "The fractal approach. A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations". *Population*, 10e année, n° 1, 1998, pp. 205-240. Disponible en <http://www.persee.fr>. Se tuvo acceso el 5 de junio 2009.
- Hasse, John E. and Richard G. Lathrop. 2003. "Land Resource Impact Indicators of Urban Sprawl". *Applied Geography*, Vol. 23/2-3, pp. 159-175. Disponible en: http://users.rowan.edu/~hasse/lri_indicators.pdf. Se tuvo acceso el 18 mayo 2009.
- Herrera Salamanca, Germán. En prensa. *Dinámica física y socioespacial de Sogamoso 1948-2004*. Trabajo de grado de Magister en Geografía, Escuela de Posgrados en Geografía, UPTC-IGAC.

- Huang, Jingnan; Lu, X. X; Sellers, Jeffrey M. 2006. *A Global Comparative Analysis of Urban Form: Applying Spatial Metrics and Remote Sensing*. *Landscape and Urban Planning* 82 (2007): 184-197.
- IGAC –Instituto Geográfico Agustín Codazzi–. 1981. *Algunos aspectos urbanos de Sogamoso*. Subdirección de Geografía.
- IGAC –Instituto Geográfico Agustín Codazzi–. 1989. *Atlas geográfico de Colombia*.
- IGAC –Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2005. *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Boyacá*. Tomo I, Bogotá: IGAC, Subdirección de Agrología.
- Lira, Enrique. 2009. "Componentes principales como método para extraer la textura en pares estéreo de imágenes". *Semana de la Geomática*, Bogotá: IGAC.
- Mertins, Gunter. 2001. "Las ciudades medianas en Colombia". *Cuadernos de Geografía*, Vol. X, Núm. 1. Bogotá: UN, Departamento de Geografía.
- Murcia N., Emilio. 1978. Análisis de sistemas en geografía urbana. [En línea] Disponible en <http://www.fgbueno.es/bas/pdf/bas10505.pdf>. Se tuvo acceso el junio 2 de 2009.
- Ronghua, Ma; Chaolin, Gu; Yingxia, Pu and Xiaodong Ma. 2008. *"Mining the Urban Sprawl Pattern: A Case Study on Sunan, China"*. [En línea] Disponible en <http://www.mdpi.com/1424-8220/8/10/6371>. Se tuvo acceso el 8 de junio 2009.
- Santos, Milton. 1979. *The Shared Space: the Two Circuits of the Urban Economy in Undeveloped Countries*. London: Methuen, 266p.
- SRTM –Shuttle Topographic Mission–. 1994. <http://srt.csi.cgiar.org>
- Thomas, Isabelle; Frankhauser, Pierre; Biernack, Christophe. 2007. "The Morphology of Built-up Landscapes in Wallonia (Belgium): A Classification Using Fractal Indices". *Landscape and Urban Planning*, Volume 84, Issue 2, 6 February 2008, Pages 99-115.
- Zipf, G. 1941. *National Unity and Desunity*. Blomington: Principia Press.

Fecha de recepción: 22 de septiembre de 2009
 Fecha de aprobación: 15 de octubre de 2009