

Ciudades fractales y telarañas urbanas

ANTONIO AGUILERA ONTIVEROS

Descubridora

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano espontáneo es un fenómeno que acarrea una serie de conflictos que se traducen en problemas de tráfico, contaminación, segregación social, etcétera. Tradicionalmente, se ha explicado el crecimiento desordenado a través de dos principios básicos. Por un lado, el capital que orienta el rumbo hacia donde deben crecer las ciudades a través de la construcción y establecimiento de fraccionamientos, centros comerciales y demás construcciones que acusan la expansión de la mancha urbana; y por otro lado, la inmigración rural a la urbe, asentada en forma irregular y que vive en la marginalidad y la miseria. De esta manera, los dictados del capital y su consiguiente miseria se articulan como los artífices del crecimiento urbano desordenado y némesis del bienestar de las ciudades y de sus habitantes.¹

¹ Fernando Rivera Alvarez, *El Urbanita: Política y urbanismo*, México, Dirección General de Publicaciones y Medios, Secretaría de Educación Pública, 1987. 17-19. Colección Foro 2000.

Antonio Aguilera Ontiveros

El Colegio de San Luis A. C. Correo electrónico: aaguilera@colsan.edu.mx

Sin embargo, se deben considerar los argumentos anteriores más como una primera aproximación, que como una verdadera explicación. Fundamentalmente, hay que entender cómo las distintas actividades urbanas, espacialmente localizadas, se mezclan de manera caótica, ocasionando colisiones y cuellos de botella en los flujos de personas, mercancías, capital e información dentro de las áreas urbanas y sus alrededores. Para hacer esto, es necesario entender cómo se articulan las actividades de las personas que ocupan un conjunto urbano, y así establecer cual es la organización espacial de las actividades y necesidades de un área urbana específica. Para tal fin, se deben determinar las actividades que son fijas y las que son aleatorias, conocer los orígenes y los destinos de los recorridos, las actividades y localizaciones probables de las mismas, así como los horarios en que estas actividades se realizan.

Dentro de los esfuerzos que se han desarrollado para abordar la problemática anterior, las teorías de la morfología y la morfogénesis urbana han cobrado actualmente una gran fuerza, debido sobre todo al perfeccionamiento de dos teorías matemáticas que ha permitido encontrar patrones de comportamiento urbano que antes eran imposibles de visualizar. La finalidad de este artículo es exponer los principios de ambas teorías, así como el *estado del arte* en la morfología y la morfogénesis urbana.

2. MORFOLOGÍA Y MORFOGÉNESIS URBANAS

La morfología urbana es el estudio de la apariencia y la forma del ambiente físico urbano. La forma de la ciudad es interpretada como un indicador de influencias funcionales económicas, técnicas y sociales, que tienen lugar dentro de un espacio urbano específico. Esto es, se concibe la apariencia de una ciudad como resultado de un proceso gobernado por un gran número de variables, las cuales se han articulado en el tiempo para crear su apariencia presente. Además, se establece que la historia, la cultura y la religión, junto con la ubicación geográfica y las situaciones geofísicas imperantes de una ciudad, tienen grandes efectos sobre la forma y apariencia de la misma.²

Son tres las características morfológicas más relevantes de un entorno urbano. La primera es el entramado de las calles, el cual refleja el crecimiento gradual de cada barrio, la tecnología de transportación predominante en cada época, y las distintas concepciones urbanísticas que se han sucedido en el tiem-

² James. H. Johnson, *Geografía Urbana*, Barcelona, Oikos-Tau, S.A., 1987, pp. 41-44.

po. La segunda característica son las edificaciones, que reflejan el sentido particular que se le dio al espacio en cada época, así como conceptos más abstractos como el grado cultural de la sociedad. La tercera característica es la función que desempeñan las calles y los edificios como centros y arterias de sistemas de actividad humana. Estos tres factores intervienen en el trazo urbano. Las tres variables evolucionan a un ritmo diferente y, aunque se hallan relacionadas entre sí, a veces la naturaleza de uno de estos componentes sufre alteraciones al margen de los otros dos.³

Por su parte, la morfogénesis urbana es el estudio de la evolución de la forma y estructura de las ciudades y permite observar los patrones y tendencias del desarrollo de las mismas. Busca establecer y comprender los diferentes procesos que determinan el cambio en la forma que presenta una ciudad. Por otro lado, la evolución de las ciudades está marcada por cambios recurrentes en su estructura espacial. Estos cambios se producen por múltiples causas, como la descentralización de la industria local, los procesos de crecimiento diferenciado (suburbanización, relocalización espacial de actividades, etc.) Por lo tanto, el cambio estructural es la consecuencia de cambios en las fuerzas internas y externas que confluyen en la ciudad.⁴

Sin embargo, el estudio de la morfología y morfogénesis urbana no es sencillo. Actualmente, la morfología urbana puede ser delineada dentro de dos formas básicas, una orgánica y aparentemente caótica, y otra ordenada y geométrica. Londres es un ejemplo excelente de una ciudad orgánica (ver figura 1), mientras que la ciudad de Beijing sirve de ejemplo para la morfología de enrejado.⁵ En las ciudades orgánicas la característica predominante de sus manchas urbanas es su forma irregular y fragmentada, la cual no se puede estudiar a través de la geometría tradicional. Además, se ha observado el mismo patrón irregular tanto en ciudades antiguas como en ciudades nuevas. Esto ha hecho suponer a varios investigadores que existen procesos socioeconómicos repetitivos que favorecen esta evolución específica, independientemente de la situación

³ *Ibid.*, p. 42.

⁴ Ver Thomas Buchendorfer, *Bifurcation Properties of Dynamic Urban Models*. Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cranfield, marzo de 1997, pp. 1-8; Pierre Frankhauser, "Aspects fractals des structures urbaines", *l'Espace Géographique*, 1990/91. no. 1, pp. 45-69, y Pierre Frankhauser, *La fractalité des structures urbaines*, Paris, Anthropos, 1994.

⁵ Ver Roger White y Guy Engelen, "Cellular Automata and Fractal Urban Forms: a Cellular Modelling Approach to the Evolution of Land Use Patterns", *Environment and Planning A*, 1993, vol. 25, pp. 1175-1199, y Pierre Frankhauser, "Aspects fractals..." *op. cit.*

histórica particular.⁶ Esto último puede apreciarse al observar la forma de las ciudades de Washington, Houston, Boston y Nueva York, presentadas en la figura 2.

Por otro lado, es claro que el uso de las edificaciones y su sentido cultural, cambian y dependen en extremo de la situación económica, cultural e histórica de cada sociedad urbana particular. El uso del espacio urbano es además un proceso extremadamente subjetivo y complejo. Cambia de manera estacional y periódica a lo largo del día, de la semana y del año. Todo esto reconfigura la forma de la ciudad y del espacio mismo, si no en un sentido estrictamente físico, sí en un sentido funcional y psicológico.

Para estudiar todos estos fenómenos de agregación y desagregación espacial urbana es necesario disponer de métodos de análisis que permitan medir estas formas irregulares y cambiantes, establecer correlaciones útiles entre el perímetro de las ciudades, la superficie construida y los fenómenos socioeconómicos urbanos, generar mapas funcionales y cognitivos, etcétera.

Actualmente, un gran número de investigadores están realizando esfuerzos significativos que permiten comprender mejor todos los procesos urbanos, por subjetivos que estos parezcan. Así, Batty y Engelen⁷ junto con Frankhauser⁸ han identificado que existe una relación entre el perímetro urbano y el área urbana, la cual no obedece a la geometría euclidiana, sino más bien puede ser interpretada a través de otra geometría, llamada geometría fractal. Mientras tanto, Hillier y Hanson⁹ y después Salingaros¹⁰ han desarrollado los conceptos de una teoría matemática que permite investigar el lado subjetivo de la morfología urbana.

En el resto del artículo se profundizará en estas dos nuevas vertientes de la morfología y la morfogénesis urbanas.

⁶ Ver Roger White y Guy Engelen, *op. cit.*, y Pierre Frankhauser, "Aspects fractals...", *op. cit.*

⁷ Michael Batty y Paul Longley, *Fractal Cities, a Geometry of Form and Function*. Londres, Academic Press, 1994; Roger White y Guy Engelen, *op. cit.*

⁸ Pierre Frankhauser, "Aspects fractals..." *op. cit.*, y *La fractalité...*, *op. cit.*

⁹ W. R. G. Hillier y J. Hanson, *The Social Logic of Space*. Cambridge, Inglaterra. Cambridge University Press. 1984.

¹⁰ Nikos A. Salingaros, "The Laws of Architecture from a physicist's perspective", *Physics Essays*, 1995, vol. 8, pp. 638-643; Nikos A. Salingaros, "Life and Complexity in Architecture from a Thermodynamic Analogy", *Physics Essays*, 1997, vol. 10, pp. 165-173, y Nikos A. Salingaros, "Theory of the Urban Web", *Journal of Urban Design*, 1998, vol. 3, pp. 53-71.

3. LA GEOMETRÍA Y LAS CIUDADES FRACTALES

El concepto de fractal, junto con la teoría geométrica de los fractales, fue desarrollado en la década de 1970 por Benoit Mandelbrot, investigador de la IBM. Mandelbrot generó el concepto de fractal para estudiar objetos que resultaban imposibles de describir a través de la geometría euclidiana, tales como las nubes o las montañas. Mandelbrot encontró que estos objetos presentaban una característica notable, independientemente de la escala a la que se les observara: siempre tenían la misma forma. La estructura encontrada a gran escala se repetía de forma infinita en estructuras más pequeñas, las cuales conformaban a la estructura grande. A este comportamiento tan particular se le conoce como principio de autosimilaridad.¹¹

Por otro lado, hay que recordar que en objetos como el círculo o el cuadrado es fácil calcular su superficie y la longitud de su perímetro; sin embargo, en los objetos con formas fractales esta situación se vuelve en extremo complicada. Además, generalmente definimos las cosas en términos enteros. Así, las líneas son unidimensionales, los planos son bidimensionales y los sólidos son tridimensionales. Sin embargo, los fractales son objetos con dimensiones fraccionales. Esto parece carecer de sentido, pero aquí radica lo maravilloso de los fractales. Por ejemplo, un objeto con una dimensión fraccional de 1.5, sería más que una línea pero algo menos que un plano. Para comprender mejor esto veamos ahora un ejemplo sencillo de fractal, esto es el *Copo de Nieve de Koch*. La construcción del Copo de Nieve de Koch comienza dibujando un triángulo equilátero. Después, se le agrega otro triángulo equilátero, a escala un tercio, a cada lado del triángulo original. A cada lado de la figura resultante se le agrega, entonces, un triángulo, a escala un tercio, del último triángulo. Este proceso se continúa hasta el infinito, resultando la forma que se muestra en la figura 3.

Al analizar el perímetro de esta figura se encuentra que tiene varias características únicas. En primer lugar, aunque constituye una curva única y continua que no se corta a sí misma y que limita a un área finita, su largo es infinito. Segundo, Mandelbrot calculó que la dimensión del perímetro del Copo de Nieve de Koch es 1.26.¹² Esto significa que el perímetro está entre una línea

¹¹ Ver John L. Casti, *Alternate Realities, Mathematical Models of Nature and Man*, U.S.A., John Wiley & Sons, 1989, p. 97 y J. Gleick, *Chaos: Making a New Science*. New York, Penguin Books, 1987, p. 241.

¹² *Ibid.*

(unidimensional) y un plano (bidimensional). Tercero, la forma del perímetro del Copo de Nieve de Koch es autosimilar. Esto significa que el perímetro se ve igual a cualquier escala.

Actualmente, existen varios algoritmos numéricos que permiten calcular la dimensión fractal de estructuras empíricas. Estos algoritmos han sido utilizados para estudiar la repartición de la superficie construida en zonas metropolitanas. La aparición de un patrón fractal, muestra que la organización espacial de la aglomeración urbana bajo observación, más que un aspecto amorfo, tiene un principio de ordenamiento interno, el cual es caracterizado por su dimensión fractal.¹³

Por otro lado, el análisis de la evolución de la dimensión fractal de una ciudad, a partir de secuencias de tiempo, ha permitido obtener información sobre la dinámica urbana. Así, una dimensión fractal constante en el tiempo refleja un crecimiento que preserva la organización espacial con respecto al centro, mientras que un aumento en la dimensión fractal indica una evolución hacia una repartición más homogénea de la superficie edificada. Estos resultados han permitido desarrollar modelos para la simulación del crecimiento urbano.¹⁴

El análisis de los mecanismos socioeconómicos del crecimiento ha permitido distinguir tres factores responsables de la morfología fragmentada de las ciudades. El primero de estos factores son las vías de comunicación, el segundo es un crecimiento alrededor de centros urbanos periféricos al centro principal (crecimiento polinuclear), y el último es una tendencia a la conservación de ciertas zonas.¹⁵

4. LOS AXIOMAS DE HILLIER-HANSON Y LA TELA- RAÑA URBANA DE SALINGAROS

El espacio urbano sigue una *lógica social*, la cual repercute en su crecimiento. Esta *lógica* ha sido estudiada y analizada por Hillier y Hanson.¹⁶ Estos autores han encontrado que los caminos, los espacios y hasta el diseño mismo de los edificios, todo ello depende de algún tipo de *conectividad*. Esta conectividad está formada por una estructura de red basada en conexiones esenciales que

¹³ Pierre Frankhauser, *La fractalité... op. cit.*

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ *Ibid.*

¹⁶ W. R. G. Hillier y J. Hanson, *op. cit.*

surgen de la interpretación del espacio por parte de los seres humanos. Sin embargo, estas conexiones esenciales son muy difíciles de describir, ya que las propiedades emergentes de esta estructuración son no lineales, es decir, cambios pequeños en la percepción de un lugar hacen que toda una serie de actividades se redistribuya a lo largo del espacio urbano. Todo esto es debido a la complejidad de las interacciones humanas con el espacio, la cual es muy confusa. Sin embargo Hillier y Hanson han encontrado las siguientes regularidades:

1. El espacio urbano está limitado por superficies que presentan información precisa al individuo y a los grupos sociales.
2. El espacio urbano refuerza la conectividad de la red urbana de caminos y nodos.
3. El núcleo del espacio urbano es el espacio peatonal, el cual está protegido de los espacios no peatonales.

Estos tres *axiomas urbanos* influyen y determinan el patrón urbano. Ellos también proveen de reglas que gobiernan la forma de las fachadas de las edificaciones, los detalles estructurales, y hasta los materiales de construcción utilizados. Todos estos elementos llegan a ser interdependientes en el momento de definir el espacio urbano. Sin embargo, los axiomas operan en un nivel más básico. Los planos, los patrones, las simetrías, los ejes, otrora importantes para el diseñador urbano, se vuelven elementos secundarios al considerar los procesos fundamentales que generan el espacio urbano.

Con base en en los axiomas de Hillier-Hanson, un matemático de la Universidad de Texas, Nikos Salingaros, ha desarrollado el concepto de la telaraña urbana (*urban web*). Salingaros considera a la telaraña urbana como una estructura compleja autoorganizada, la cual existe principalmente en el espacio entre las edificaciones y los espacios libres. Cada edificación encierra y determina uno o más nodos de actividad humana. La red urbana consiste en todos los elementos exteriores y los elementos conectivos, tales como las áreas peatonales, las áreas verdes, las calles y carreteras, etcétera.

Los procesos que generan las redes urbanas pueden ser resumidos en términos de tres principios básicos.

1. La creación de nodos. La telaraña urbana está soportada en los nodos de actividad humana, cuyas interconexiones constituyen la red. Existen distintos tipos de nodos, la casa, el trabajo, el parque, la tienda, el restaurante, la iglesia, etcétera. Además, los elementos naturales y arquitectónicos sirven para reforzar o suprimir los nodos de actividad humana.

2. La existencia y utilización de las conexiones. Las conexiones se forman entre los nodos de actividad humana. Estas conexiones están formadas principalmente por las calles, avenidas, etcétera. Sin embargo, también incluyen todo espacio susceptible de ser utilizado como un camino. Los caminos peatonales son para Salingeros los más importantes, ya que permiten interacciones de corto alcance pero de gran fuerza y complejidad.

3. La existencia y determinación de una jerarquía. La telaraña urbana se autoorganiza y crea una jerarquía ordenada de conexiones, las cuales se pueden agrupar en relación con la escala a la que se observen. Esto se traduce en una estructura multiconectada pero no caótica. El proceso de autoorganización sigue un orden estricto, que comienza en las escalas más pequeñas (caminos peatonales) y progresa hasta las escalas más altas (caminos de alta capacidad vehicular o supercarreteras).

Además, Salingeros ha desarrollado una teoría matemática que se fundamenta en los principios anteriores. La teoría matemática de la telaraña urbana utiliza principios matemáticos de la teoría de la complejidad. En palabras simples, Salingeros calcula la fuerza de interacción total entre nodos con base en la consideración de todas las posibles conexiones entre los dos puntos, con pesos apropiados establecidos de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia.

Salingeros ha utilizado su teoría en el campo del estudio de la morfología urbana, particularmente en el campo de la interpretación del surgimiento y papel de las nuevas vecindades, así como su dinámica particular. A este respecto, Salingeros ha interpretando de nueva cuenta los trabajos, ya clásicos, de Alexander¹⁷ y ha llevado mucho más allá los de Gehl¹⁸ y Greenberg¹⁹.

C O N C L U S I O N E S


Este artículo ha revisado dos técnicas matemáticas emergentes, las cuales han repercutido considerablemente en el entendimiento de los procesos que generan el crecimiento y estructuración particular de las ciudades. Estas nuevas teorías

¹⁷ Christopher Alexander, *Notes on the Synthesis of Form*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1964, y C. Alexander, S. Ishikawa, M. Silverstein, M. Jacobson, I. Fiksdahl-King, y S. Angel, *A Pattern Language*, Nueva York, Oxford University Press, 1977.

¹⁸ Jan Gehl, *Life Between Buildings*, New York, Van Nostrand Reinhold, 1987.

¹⁹ Michael Greenberg, *The Poetics of Cities*, Ohio, Ohio State University Press, 1995.

matemáticas han hecho que las disciplinas urbanísticas de la morfología y la morfogénesis se consoliden y avancen como teorías susceptibles de explicar aspectos relevantes de la vida y dinámica de las ciudades. Así, la morfología de las zonas metropolitanas, aparentemente irregular y caótica, al ser ahora analizada a través de la geometría fractal, presenta nuevas características de orden interno y de autosimilaridad, por medio de las cuales se pueden comprender los factores que repercuten en su crecimiento y estructuración espacial.

Por otro lado, la teoría de las telarañas urbanas desarrollada por Nikos A. Salingaros ha permitido la sistematización de las leyes de creación del entorno urbano desarrolladas por Hillier y Hanson, permitiendo ir más allá del análisis clásico de flujos de transporte y localización de actividades, basados estos últimos en una perspectiva puramente económica. De esta manera, la teoría de las telarañas urbanas de Salingaros permite incorporar aspectos subjetivos en la interpretación del espacio apropiado por la actividad humana, pero utilizando una rigurosa base matemática, lo cual permite la ponderación y cuantificación de dichos aspectos subjetivos, dando todo esto como resultado modelos susceptibles de ser utilizados en la planificación de las ciudades. 

FECHA DE RECEPCIÓN: 7/II/99

FECHA DE ACEPTACIÓN: 3/III/99

Desarrollo de Londres

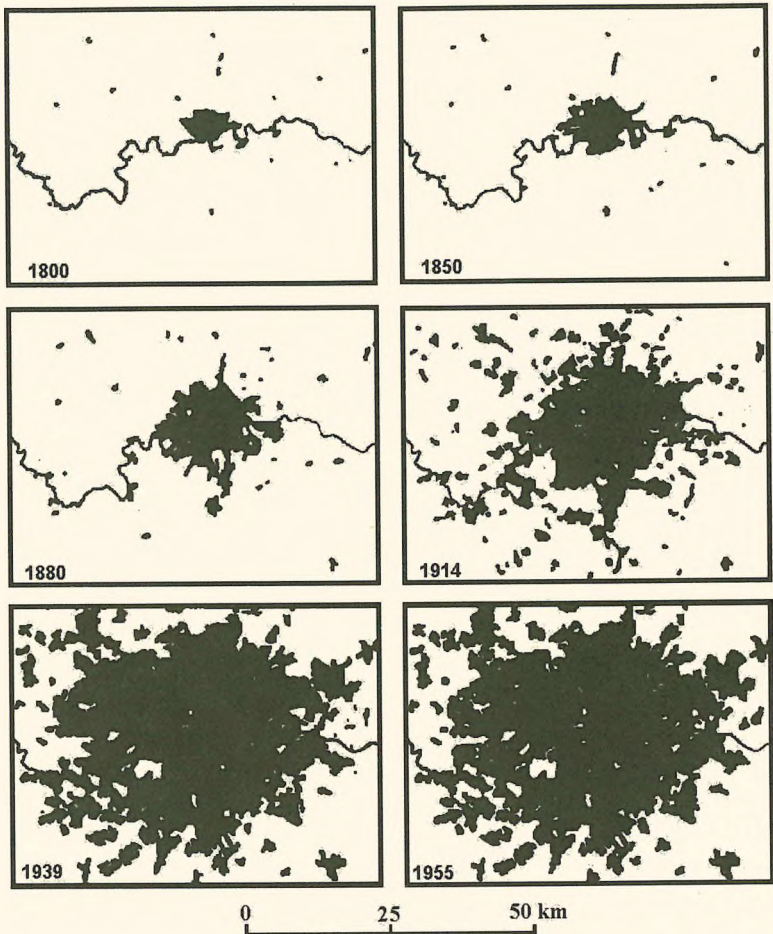


Figura 1. Londres, evolución y morfología orgánica. Tomado de Johnson, James H. *Geografía Urbana*, Barcelona, Oiko-Tau, S.A., 1987, p. 178.

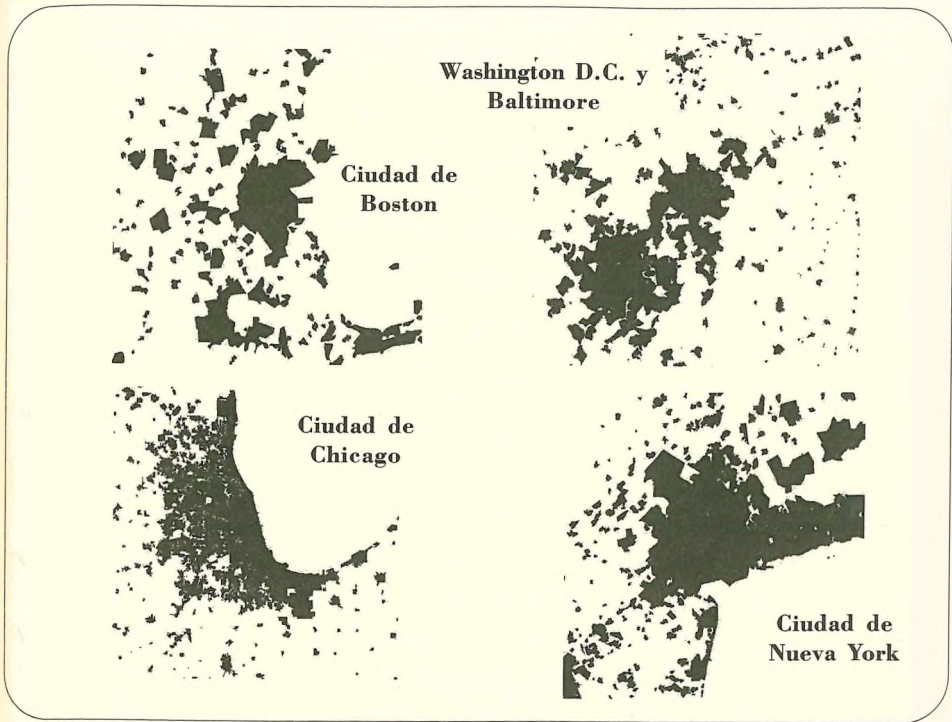


Figura 2. Ejemplos de Ciudades como Fractales. Según el Departamento de Planeación de la East Carolina University. <<http://www.sit.ecu.edu/up-dept/fractals.htm>>

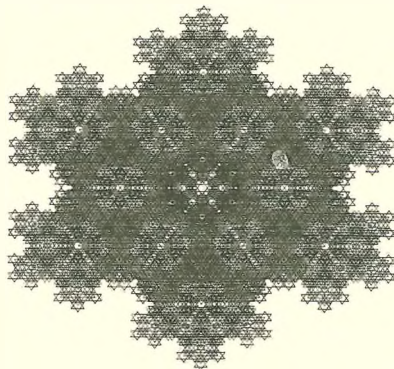


Figura 3. El Copo de Nieve de Koch. Imagen generada por el autor usando Visual Basic 5.0