

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ARQUITECTURA**

**ANÁLISIS FRACTAL DEL CRECIMIENTO FÍSICO DE LA  
CIUDAD DE MÉXICO**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
URBANISTA

**P R E S E N T A:**  
**MIGUEL ÁNGEL MATÍAS PÉREZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**  
**SERGIO FLORES PEÑA**



2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS:

---

A MIS PADRES POR HABERME APOYADO EN TODO PARA DARME LA EDUCACIÓN QUE TENGO, A MI HERMANO VÍCTOR POR APOYARME EN TODO MOMENTO.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS QUE HAN ESTADO CONMIGO DESDE EL PRINCIPIO.

“LOS SUEÑOS SON LA PRIMER IDEA DE UN FUTURO QUE PUEDE  
SER CIERTO”

MIGUEL ÁNGEL MATÍAS PÉREZ, AGOSTO DE 2007.

## INDICE

Introducción.....	2
<b>CAPITULO 1</b>	
Conceptos Básicos.....	4
Teoría y Modelo.....	4
El modelo de los anillos de Burgess/Hoyt.....	6
Modelos Económicos.....	8
El concepto del desorden, fractales y Entropía Urbana. Reseñas Básicas.....	8
<b>CAPITULO 2</b>	
La Geometría Fractal.....	13
<b>CAPITULO 3</b>	
Análisis de expansión y crecimiento Físico de la Ciudad de México mediante Geometría Fractal.....	29
Los sensores remotos.....	29
Temas que afectan la selección de imágenes.....	31
La estructura urbana desde el punto de vista fractal.....	32
Metodología de análisis de las imágenes satelitales y fractalización.....	33
1. Selección de imágenes.....	33
2. Proceso de la Evolución.....	34
3. Edición para nuestro objetivo en un programa editor de imágenes.....	34
4. Uso de un Software especializado para imágenes (software para el análisis y procesamiento de imágenes).....	35
5. Análisis geométrico espacial de imágenes (fractalización).....	36
<b>CAPITULO 4</b>	
Modelo de Agregación Limitada para las Ciudades.....	49
La autosimilitud de la forma.....	51
Aplicación del Modelo de Agregación.....	52
<b>CAPITULO 5</b>	
Alcances y resultados.....	59
La aglomeración económica espacial.....	60
Análisis de aglomeración de comercios y servicios.....	61
CONCLUSIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN.....	70
ANEXOS.	

## **INTRODUCCION**

### **Expansión Urbana, algunas observaciones generales**

La expansión urbana y el incremento en la diversidad de los usos del suelo, debido a las demandas de una población cada vez mayor, y por tanto, el crecimiento de la economía en las ciudades, es un fenómeno que se observa en todas las ciudades del mundo y mayormente en países en desarrollo como México.

La medición y el monitoreo de la demanda de suelo para nuevas actividades y expansión del territorio urbano, son de suma importancia para entender la dinámica de transformación de los diferentes espacios de una ciudad y los tiempos de transformación del territorio urbano para mejorar el manejo del suelo urbano.

La expansión urbana puede ser definida como el asentamiento de nuevos desarrollos en zonas aisladas sin servicios urbanos, separados por tierra vacante (Ottensmann, 1977), son también definidos como “Desarrollos de salto de rana” (Gordon & Richardson, 1977) los cuáles se observan crecientemente al rededor del mundo en todas las ciudades medias y grandes, tal como sucede en las ciudades de México.

La consecuencia directa de esta expansión es la dispersión y fragmentación urbana, la cual es criticada en desarrollos que se generan en la periferia de la ciudad por un uso del suelo ineficiente, de recursos y energía, que desplaza tierra agrícola y ocasiona problemas de gestión por el paso de suelo agrícola a suelo urbano.

Las ciudades se expanden en todas direcciones, la dispersión y fragmentación urbana es de gran escala, los cambios en los usos del suelo y los patrones espaciales y territoriales de tales cambios se observan tanto en las periferias de las ciudades como en los centros y subcentros de las mismas.

En México, la expansión física de varias ciudades sobre el territorio de dos o más Estados o Municipios lleva a la formación de Zonas Metropolitanas, esta formación, la cuál se debe entender como la expansión que sobrepasa los límites político – administrativos, es consecuencia de un desarrollo económico, social y

tecnológico que conforma una estructura compleja del territorio que comprende características demográficas y de especialización económico – funcionales, ya que generalmente fungen como centros de actividad económica y de prestación de servicios a nivel regional.

La falta de aplicación de los instrumentos de gestión tales como políticas y medidas orientadas al desarrollo de las ciudades en expansión, son obstáculos para la adecuada articulación de las ciudades.

Existe entonces una demanda no atendida que tiene como objetivo primordial medir y monitorear lo que está ocurriendo en las periferias y dentro de las ciudades, tal como la expansión física y los cambios que ocurren a lo largo de un tiempo de estudio determinado, por tanto, es necesario entender los procesos urbanos que se van gestando en el tiempo para poder formular dichos instrumentos hacia una planeación y un desarrollo saludable de nuestras ciudades.

El presente estudio representa una aplicación de las nuevas técnicas que se han desarrollado a partir de la incorporación y analogías con las ciencias exactas hacia diversos campos de investigación, como es el urbanismo. Para este propósito, es de vital importancia que se sustente en base a las analogías con la física, la observación de un fenómeno urbano en constante crecimiento físico, y en particular con la teoría fractal. El descubrimiento de la medición de fenómenos mediante la teoría fractal nos lleva a plantear la forma física de la ciudad como una mancha en constante crecimiento, la cuál se vuelve compleja en la medida en que la ciudad tiene la capacidad de estructurarse y funcionar por medio de políticas encaminadas al desarrollo propicio de la ciudad. Así pues, los capítulos siguientes muestran una metodología y un análisis en base a la teoría fractal, del comportamiento con el que ha crecido la Mancha Urbana de la Ciudad de México desde 1910 al 2000, siendo este estudio una interpretación que no es única en su género ni tampoco intenta ser una alternativa a las actuales teorías urbanas, simplemente se busca aportar datos importantes para poder diseñar políticas y decisiones puntuales para el desarrollo urbano.

## **CAPITULO 1**

### **CONCEPTOS BÁSICOS**

#### **TEORÍA Y MODELO**

Existen diversos intentos para establecer una ciencia urbana como un campo relativamente autónomo, cabe mencionar que desde fines del Siglo XIX, el urbanismo se ha desarrollado a partir de otras ciencias y algunas otras disciplinas que tratan de describir y documentar la evolución que han tenido las ciudades a partir de la revolución industrial. Entre dichas ciencias y disciplinas se encuentra la economía, la sociología, la geografía y biología.

La concepción de la ciudad es un hecho meramente social que obedece a las condiciones que impone el medio físico y técnicas de construcción, así como patrones transmitidos por la cultura.

Es por ello que en el modo de pensar la ciudad se han mezclado aspectos del conocimiento en los que se relacionan teorías o esquemas sistemáticos de las ciencias formales, tales como la física, en cuestiones de la atracción y repulsión que causa la estructura urbana y la ciudad en su conjunto, a diversas actividades humanas.

Bajo este contexto, una teoría se plantea como un conjunto de observaciones y explicaciones de lo que sucede en una condición hipotética o ideal con el objeto general de entender o conocer el problema que se ha planteado. En estos casos resulta difícil abordar el entendimiento de la ciudad en su totalidad y en cuestiones de teorías urbanas existen diferentes modelos, todos ellos con diferentes enfoques y destinados a casos específicos, los cuáles son más abordables y comprobables bajo teorías mezcladas con las ciencias formales.

Un modelo en cambio es una representación de la teoría o de la realidad que se está estudiando. Dicha representación se puede manifestar de diversas formas, las más comunes son las analogías con los procesos, fenómenos o características de la realidad observada; para el caso de las ciudades, son todas aquellas observaciones que involucran elementos y formas de la estructura urbana.



Desde un punto de vista más formal, un modelo sirve para comprobar la consistencia de una teoría, debido a que el modelo es únicamente la representación de la realidad o analogía.

Existen diferentes tipos de modelos, lo que implica diferentes condiciones para cada uno de ellos, desde su selección hasta la importancia significativa en el urbanismo, para generar así modelos más específicos y particulares.

En un sentido estricto, es posible diferenciar tres tipos de modelos que pueden ser aplicados al urbanismo: los modelos análogos, modelos conceptuales y aquellas que vienen de teorías formales.

Los modelos análogos, son aquellos que se basan en una suposición o suposiciones de que ciertas cosas u objetos pueden o tienen ciertas características y atributos similares y por lo tanto también lo pueden tener otros. Es decir, algunos modelos se usan para explicar teorías de los fenómenos que suceden en el mundo real la cuál se emplea para explicar otro fenómeno en el que se han observado atributos y características similares, los cuáles pueden ser aplicados en materia urbana basados en relaciones de similitud o por diferencias.

Un modelo conceptual es aquel que no se deriva de ninguna teoría causal y el modelo para predecir las propiedades de dicha teoría es totalmente imaginario<sup>1</sup>.

Los modelos que provienen de teorías formales, se explican directamente, es decir, se plantea una hipótesis matemática adaptada a datos observados donde todas las relaciones son conocidas. Este tipo de modelos también se le llama modelo matemático, el cuál es aplicado cada vez más en ciencias sociales y planificación urbana.

En resumen, los modelos teóricos se prestan a procesos del conocimiento, los modelos análogos son descriptivos y explicativos y pueden ser fuertemente predictivos. Los modelos conceptuales siempre serán predictivos.

La función principal de los modelos tiene como objetivo generar conocimiento del fenómeno observado a través de ellos y por otra parte entender como opera el fenómeno observado.

---

<sup>1</sup> Echenique Marcial. *Modelos, una discusión*. Separata de Revista de Planificación. Santiago, Noviembre 1970 p. 90.

## **EL MODELO DE LOS ANILLOS DE BURGUESS/HOYT**

Ernest Burgess investigó el proceso de crecimiento y de desarrollo urbano como un fenómeno dinámico a través de dos medios, el primero fue la observación de la estructura física de localización de la población y de las actividades, y en segundo, las diferenciaciones de estratificación que era posible observar entre todos estos elementos. En general hizo grandes observaciones en cuanto al uso de suelo, la calidad de la vivienda, la morfología y los grados de estratificación socio económicos de la población concluyendo en un modelo de anillos concéntricos, pudiendo entonces distinguir y relacionar una estratificación social y económica de la población con los usos de suelo.

Este modelo supone la existencia de cinco anillos concéntricos contiguos, en ellos se distinguen características en cuanto a la calidad de ocupación y de ingreso de los habitantes del territorio urbano.

Este tipo de modelo, el cual se complementa con el de los sectores de círculo de Homer Hoyt, nos permite un estudio interesante para la interpretación de nuestras ciudades latinoamericanas actuales.

En el modelo de Burgess el primer núcleo (I) es el centro de la ciudad y donde se encuentra el sector institucional tradicional, de alta densidad de uso y valor del suelo, hacia esta zona confluyen las líneas de transporte y vialidad más importantes, en ella se concentra un alto número de personas durante el día, ya que ubica el centro de servicios, comercio y negocios, también conocido como CBD por sus siglas en inglés Central Bussiness District.

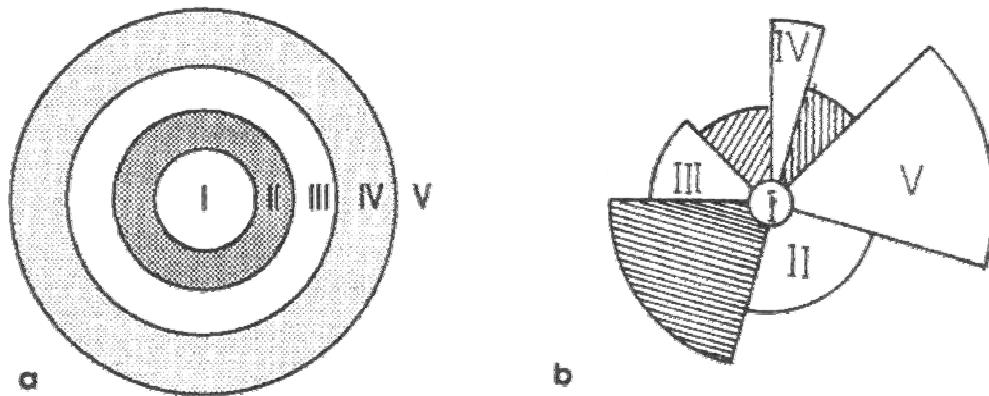
Siguiendo una zona con usos mixtos de transición y edificación en deterioro (II) o en futura expansión lo que constituye la periferia del centro, se caracteriza por edificación en decadencia, alta densidad de vivienda en mal estado y hacinamiento, zonas industriales y comercio detallista.

La tercera zona (III) se caracteriza por ser vivienda para sectores de obreros y trabajadores en relación a las industrias ligeras, comercios y otros usos mixtos.

La cuarta zona (IV) es de uso residencial, para grupos de ingresos medios, profesionales, con buena calidad de construcción y equipamiento local.

La quinta zona (V) es un área dinámica, mucho más extensa, en cambio de uso y expansión de uso residencial, para sectores de altos ingresos, con vivienda unifamiliar, buen equipamiento vecinal, baja densidad de edificación con parques y áreas verdes (suburbios).

Éste modelo de ciudad se complementa con el de los sectores de Hoyt ya que esquematiza una estratificación basada en sectores de círculo el cuál coloca funciones similares al área (I) de Burgess, pero parte zonas industriales y residenciales en forma de abanico de diferente radio y longitud de círculo en diferentes direcciones. Existe una interesante aplicación para las ciudades de América Latina (Ardiό, 1972) donde se desarrolla un modelo descriptivo con esquemas que recuerdan los anillos de Burgess y Hoyt<sup>2</sup>.



**Fig. 1.1** Aquí se presenta el modelo de Burgess (a), el cuál se complementa con el modelo de Hoyt (b), como se puede observar, ambos describen una distribución de las actividades de forma concéntrica partiendo del CBD.

Hasta ahora se han descrito los modelos de ciudad que suponen que las ciudades se estructuran a través de un centro, es de suponer entonces que tienen que desarrollarse actividades económicas a partir de dicho centro generando así atracción y repulsión de las actividades de la población, por lo que se describirá a continuación los modelos económicos de estructura espacial.

<sup>2</sup> Ardiό, J.E. *Ciudades en América Latina*, Paidós, Buenos Aires, 1972 p.p. 121 a 160.

## **MODELOS ECONÓMICOS**

Las raíces de dichos modelos se encuentran en los trabajos realizados por Von Thünen, que en esencia se refiere a los procesos de desarrollo urbano como un fenómeno económico bajo el concepto de organización como un mecanismo del mercado, y los procesos de distribución que traen como consecuencia directa la adaptación del espacio y el territorio a las actividades urbanas.

De esta manera, la economía urbana considera la extensión territorial a desarrollar. “Por ejemplo, una economía en expansión con las posibilidades de atraer nuevos negocios, industrias y crecimiento de la población, implica que tiene que haber una mayor utilización y ocupación del territorio y por lo tanto de mejora en las comunicaciones. De forma similar, las fuerzas económicas responsables de las tendencias hacia el estancamiento o declive en la actividad económica, también ejerce su fuerza sobre la forma de utilización y ocupación del suelo urbano”<sup>3</sup>.

## **EL CONCEPTO DEL DESORDEN, FRACTALES Y ENTROPÍA URBANA RESEÑAS BÁSICAS**

El estudio de cómo los modelos físicos y matemáticos evolucionan en el tiempo, es un tema que se ha venido desarrollando a través de esfuerzos colectivos de matemáticos y físicos en diferentes campos para su aplicación en diversas ramas de la ciencia y disciplinas, no obstante cabe mencionar que muchos de los modelos han surgido a través de observaciones empíricas pero su desarrollo en la aplicación puede llevar a criterios mucho más amplios y precisos del fenómeno estudiado.

Los conceptos de sistemas dinámicos y caóticos nos remiten a tiempos prehistóricos en los estudios de los movimientos del sol, la luna y los planetas los cuáles tenían aplicaciones precisas para la navegación e incluso para cuestiones religiosas y astrológicas.

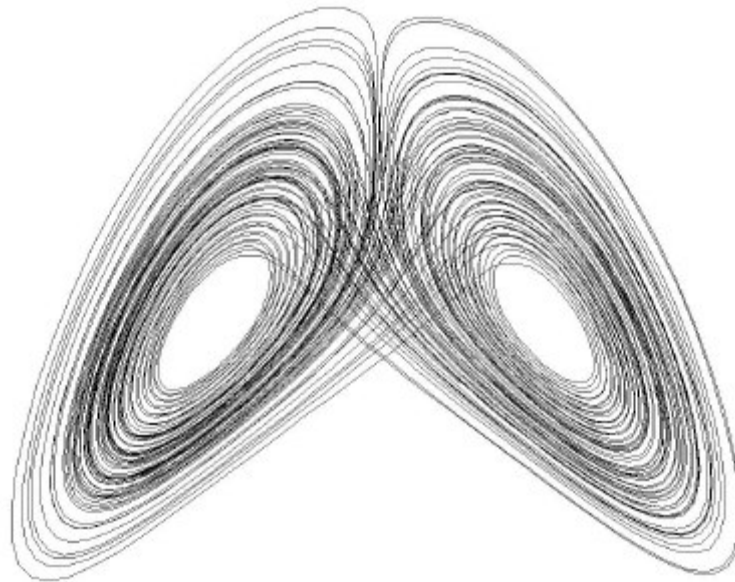
---

<sup>3</sup> Chapin J. R. *Planificación del uso de suelo urbano*, 1977, p.p. 101.

La teoría y modelos modernos empiezan en 1590 con la publicación de Galileo “Estudios del Movimiento”, seguido por los estudios de Johann Kepler en 1609, observando el movimiento de péndulos y cuerpos en caída libre. Newton, por su parte, pudo observar órbitas en los cuerpos celestiales y los movimientos de la tierra y de diferentes objetos estableciendo la ley de gravitación universal, la cuál ha sido aplicada para los sistemas de transporte urbano y la relación de éste con diferentes usos económicos del suelo (A. G. Wilson, 1970).

Estos tres grandes científicos de la historia pudieron hacer observaciones de movimiento, desarrollando modelos matemáticos estrictamente predictivos en el tiempo y espacio.

A principios de 1960, los nuevos científicos dedicados a la observación de los movimientos de partículas generalmente en corrientes eléctricas, flujos de cualquier tipo y comportamientos meteorológicos, algunos de ellos reproducidos en laboratorio, pudieron observar un comportamiento inestable de éstos, (Ueda, Lorenz y Hénon, 1960). Los mapeos de dichos comportamientos sugerían movimientos y oscilaciones con dinámica caótica, es decir, difícilmente predictivos.



**Fig. 1.2** Comportamiento meteorológico Caótico descrito por la órbita de Lorenz, 1960.

Es entonces cuando un nuevo concepto surge a partir de las observaciones de estos científicos, el “caos ó desorden” que se encuentra al estudiar un fenómeno

difícilmente predictivo, también llamado por otros autores como “Comportamiento Desordenado”.

Para poder describir un fenómeno como caótico, o desordenado, debe cumplir ciertas características. La primera de ellas, es que debe tener un “atractor común” el cual está provocando tal desorden (Anosov, Arnold, 1967). La segunda se deriva al momento de tratar de mapear el fenómeno, la forma que surge de tal, es geoméricamente inestable.

La tercera y última característica se refiere principalmente al análisis de la forma que surge de la observación y descripción del fenómeno, ésta puede ser estudiada únicamente a través de un análisis de cómo se está distribuyendo el comportamiento del fenómeno, es decir tratar de describir la distribución físico-espacial a través de un estudio estadístico y/o comparativo.

La distribución estadística tiene muchas y diferentes aplicaciones fundamentales en física y otras disciplinas. Un ejemplo es la mecánica estadística, cantidades macroscópicas tales como la temperatura y la entropía son aseveraciones estadísticas de distribución aleatoria a un nivel microscópico. En mecánica cuántica, la localización en un momento de partículas atómicas tiene igualmente una distribución aleatoria.

Existe una evidencia creciente en la aplicación directa de técnicas estadísticas las cuales pueden requerirse en cierto orden o por intervalos de tiempo para comprender el fenómeno macroscópico. El descubrimiento de ecuaciones diferenciales que presumen de una solución caótica indica la necesidad de un acercamiento estadístico. Tales soluciones se plantean y actúan como atractores extraños que a menudo exhiben un comportamiento en el que se repiten patrones geoméricos que contienen información del sistema entero o técnicamente descrito como comportamiento fractal. Para tales casos existe un método de reagrupación y normalización el cual se aplica a problemas que tienen una continuidad caracterizada por un "cambio desordenado". Algunos fenómenos también pueden ser explicados como cambios de fase, tal como lo que ocurre cuando el hierro se funde y cambia de estado sólido a líquido que incluyen un comportamiento

magnético. Tales soluciones frecuentan distribuciones estadísticas con un comportamiento desordenado.

En la cuestión urbana, de acuerdo a este trabajo de investigación de licenciatura se propone que en concordancia con el modelo de Burgess/Hoyt y con los modelos económicos, el atractor común que está generando tal desorden se encuentra en el CBD y subcentros de la ciudad, debido a que son las zonas dentro del territorio urbano donde se concentra la mayor cantidad de actividades urbanas. En este contexto entonces, para una ciudad, el desorden en términos de su funcionalidad, se observa a partir de una disfunción en las actividades de los individuos dentro de la ciudad, que al mismo tiempo no resulta conveniente para el bienestar social en términos generales, es decir, si una ciudad es funcional en su estructura urbana (observándose una mejor distribución en los usos económicos del suelo), se ve reflejado en que las actividades desarrolladas en el territorio pueden describirse con cierto orden, esto es, una ocupación y utilización del suelo adecuada, con mínima dispersión urbana facilitando así los tiempos de desplazamiento residencia – lugar de trabajo, residencia – lugares de esparcimiento, residencia – centros educativos y escolares, etc. Entonces y sólo entonces, existe un “orden”. Por otra parte, el desorden se debe entender como aquella estructura urbana que no es adecuada en su funcionamiento ni en la distribución de los usos del suelo, la cual lleva a una estructura urbana ineficiente ya que el atractor común, tomando en cuenta que éste debe tener un crecimiento económico tal como lo señalan las teorías económicas del suelo urbano, generan desplazamientos mayores, desarrollos dispersos en las periferias de la ciudad, y por lo tanto mayor ocupación de tierra siendo ésta también ineficiente en cuanto al suministro de servicios urbanos y su estructura física.

Por ejemplo: una ciudad tendería a mayor desorden cuando la forma y manera de conectar los lugares de trabajo y de residencia con todas las demás actividades urbanas y de los individuos en particular, no es la más apropiada debido a que hay pérdida de horas hombre; la cantidad de energía y recursos utilizados en dicha conexión y movilidad dentro del territorio urbano influyen en el deterioro ambiental y por lo tanto no es lo más deseable para el funcionamiento de la misma.

Se puede observar entonces en la expansión de las ciudades, que existen nuevos y diferentes desarrollos en la periferia de las mismas los cuales provocan desplazamientos diversos a diferentes zonas de la ciudad, ya sea de trabajo, esparcimiento, cultura, deporte, etc., por medio de conexiones que han sido superadas en su capacidad y es aquí cuando comportamientos desordenados aparecen, entendiendo éstos como la suma de las relaciones y movimientos surgidos a través de las actividades que se generan dentro del territorio urbano. Éstas actividades pueden ser tanto individuales como económicas traducidas en los diferentes usos del suelo y que nuestra capacidad humana no alcanza a percibir, pero que sin embargo se pueden simplificar en modelos sencillos de interacción espacial o de crecimiento y expansión urbana. En este contexto, la entropía, como una medida macroscópica (en la ciudad entera) que únicamente puede ser identificable mediante un estudio estadístico de distribución de actividades urbanas presuntamente aleatorias, a un nivel microscópico (en los vecindarios y barrios), se vuelve una medida de la cantidad de información que poseemos y que podemos observar en un ámbito macroespacial para entender lo que sucede en un sistema urbano.

El presente estudio propone el uso y manejo de Imágenes Satelitales y creadas a partir de Sistemas de Información Geográfica los cuales arrojan resultados en imágenes que pasarán a ser evaluadas y analizadas para los fines de esta investigación, como la medición y relación que existe entre el crecimiento físico de la ciudad como mancha urbana, así como sus características geométricas en cuanto a su distribución espacial y de las diferentes actividades que impactan en el crecimiento y “comportamiento desordenado de las ciudades”.

En este contexto de medición, la teoría fractal nos ayuda a comprender la complejidad de las formas surgidas por el proceso de expansión y crecimiento físico de la ciudad. Los capítulos siguientes toman como base esta teoría para comprender el comportamiento que la ciudad tiene al crecer, una mega ciudad como lo es la Ciudad de México se vuelve compleja en su forma por lo que el siguiente capítulo muestra cómo la teoría fractal puede ser aplicada.



## CAPITULO 2

### LA GEOMETRÍA FRACTAL

La geometría fractal, fue inicialmente concebida por el matemático Benoit B. Mandelbrot a principios de los años ochenta, en Estados Unidos, con ayuda de las computadoras. El término fractal, acuñado por el propio Mandelbrot, deriva de la palabra latina "fractus", o fracción entendida como parte o porción y de "rangere", romper. En definitiva, el concepto es el de fragmento geométrico de orientación y desarrollo variable pero de aspecto similar (Gleick, 1987).

Mandelbrot decía que en todos los niveles que ocurren en la naturaleza, desde las estructuras galácticas hasta las moléculas, existen incontables ejemplos de como una forma básica se repite en cada una de estas escalas por lo cual se puede demostrar, que la parte contiene al todo.

"La utilidad de la teoría fractal, puede ser comprendida mas fácilmente cuando se trata de analizar o representar numéricamente cualquier objeto natural o artificial. Si se trata de determinar las características específicas de todas las instancias de una figura, se podría utilizar una especie de geometría estadística, sin embargo este acercamiento proporcionaría muy poca información sobre cada objeto particular. Por ello, es necesario invertir el proceso y pasar de lo particular a lo general, lo que introduce al fenómeno bajo estudio a la región de los problemas, aunque su análisis y resolución podría ser factible mediante el uso de una geometría determinista"<sup>4</sup>.

Comúnmente en la Planeación Urbana se plantean metas y objetivos particulares y generales, los cuales resultan de un previo análisis y procesamiento de información que tratan de dar "solución" a los problemas que se reflejan en la

---

<sup>4</sup> Monroy Olivares, César. *Curvas Fractales*. Ed. Alfaomega. Cd. México, Pp. 27, 2002.

cuestión urbana. Esto implica que se está conduciendo: "transformar lo que se tiene en lo que se quiere"<sup>5</sup>.

En el caso específico de una ciudad, se conoce aproximadamente lo que se tiene, y podría parecer algo imposible de resolver, "debido a que el universo de entradas no está bien delimitado y, por lo tanto, la relación de entradas - salidas no es unívoca"<sup>6</sup>, se carece de la información necesaria para descubrir como cambiar una entrada determinada en la salida correspondiente.

Bajo el supuesto fundamental de que todo trabajo implica un desgaste en la cantidad de "energía potencial disponible"<sup>7</sup>, se plantea entonces una política de economía en la que se premia a los procesos mas eficientes y se penaliza a los que no los son tanto, dicho modelo fue tomado directamente de la termodinámica. ¿Cómo medir con precisión y premiar a los procesos urbanos de transformación más eficientes? En este caso estudiaremos la medición a través de la geometría fractal como una herramienta precisa de medición y distribución geométrica para comprender cómo crece el fenómeno de expansión y crecimiento urbano, así pues, se puede llegar a una medida que describe el fenómeno urbano de transformación.

La geometría fractal, supone que las dimensiones de un cuerpo pueden ser expresadas con mayor exactitud mediante los números reales no negativos en un rango del 1 al 2, lo que elimina el impedimento de que tal propiedad tenga que ser referida mediante un número entero como tendría que ser en la geometría euclidiana<sup>8</sup>.

---

<sup>5</sup> Monroy Olivares, César. *Curvas Fractales*. Ed. Alfaomega. Cd. De Méx. 2002. Pp. 28

<sup>6</sup> Idem.

<sup>7</sup> Se debe entender como energía potencial a la capacidad que tiene un determinado punto espacial para desarrollar un fenómeno determinado; por ejemplo, la capacidad que tiene cierta zona de la ciudad o AGEB para que sea comercial, de servicios, de vivienda, etc.

<sup>8</sup> Gilbert, W. J. *Fractal Geometry Derived From Complex Bases*. *Mathematical Intelligencer* 4: pp. 78 – 86.

En el caso particular del urbanismo, la geometría fractal supera a la euclidiana ya que parte de la investigación y conocimiento visual de las formas, profundiza y entiende su estructura y su dinámica de transformación y construcción. La geometría fractal, se apoya en el dibujo y las imágenes generadas desde un satélite como herramienta, que nos permite anticipar y revelar las formas, y dar respuesta a la variedad de dimensiones y escalas, en la que hoy, con ayuda del desarrollo y tecnología, se puede apreciar de la tierra. Nos aporta datos cuantitativos matemáticos para describir la cualidad de las cosas y para hacer predicciones, posteriormente convertibles en realidades físicas.

La mayoría de las curvas fractales poseen o describen formas irregulares que parecen ser aleatorias o sus puntos se encuentran distribuidos azarosamente por el espacio que las contiene, la mayoría de quienes apenas se inician en el estudio de este fértil campo, comienzan con iniciar sus pesquisas en el terreno de la probabilidad y la estadística. Sin embargo puede existir una percepción falsa ya que las curvas fractales son el resultado de procesos deterministas y aún cuando es posible interpretarlas desde una perspectiva probabilística con resultados aceptables, se puede llegar a la paradoja de aleatoriedad<sup>9</sup>.

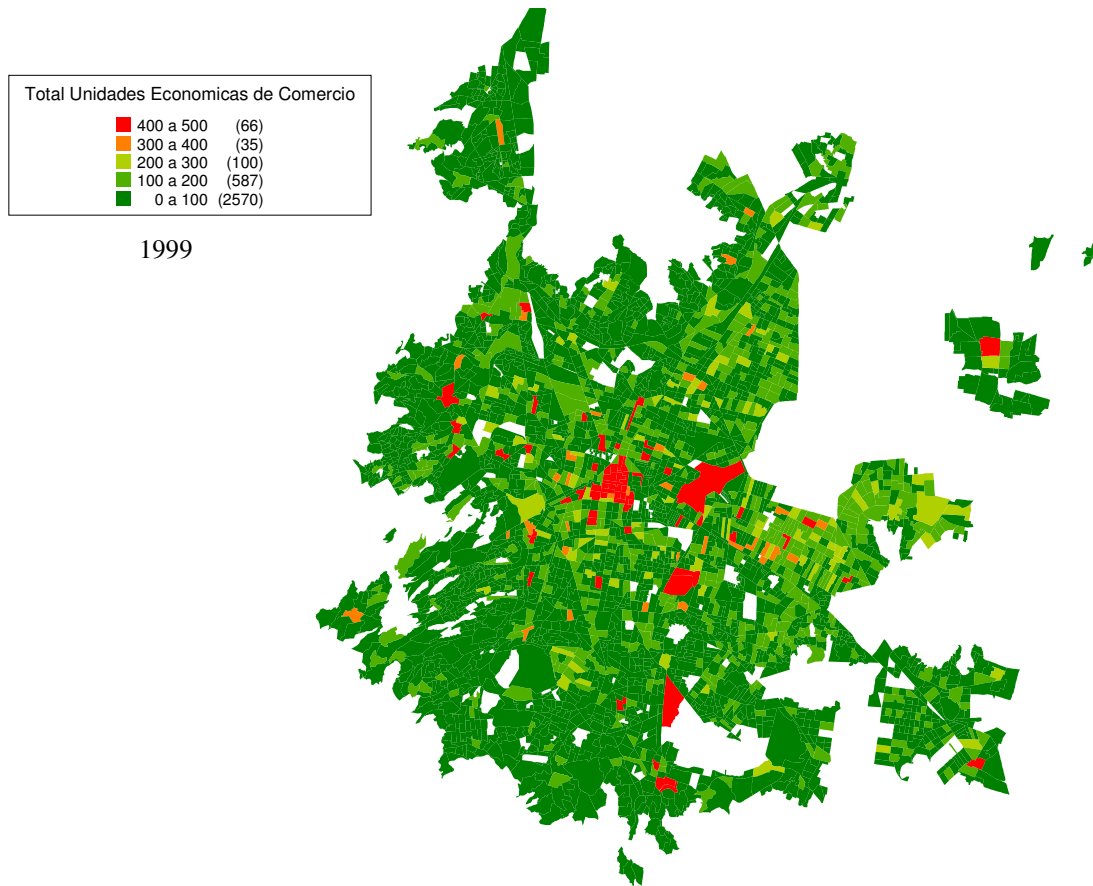
En este contexto por ejemplo, cuando se analizan las imágenes de crecimiento y distribución de las actividades económicas por Área Geo Estadística Básica (AGEB) en la Ciudad de México, mediante un análisis visual (figura 2.1), se percibe que está sucediendo algo extraño: la distribución no es igual en todo el espacio que ocupa la ciudad por lo que la probabilidad de que aparezcan más zonas con las mismas características podría ser igual.

Debe quedar en claro que el comportamiento de un sistema es aleatorio mientras no se demuestre lo contrario y, de hecho, este es otro de los supuestos que adopta la probabilidad y estadística como ciencia<sup>10</sup>. Para este caso en particular esta distribución y crecimiento se analizará bajo el concepto de geometría y dimensión fractal el cual se explicará a detalle más adelante.

---

<sup>9</sup> Chaitin, G.: *Randomness and Mathematical Proof*: Scientific American. Mayo: pp. 47-52, 1975.

<sup>10</sup> Mandelbrot, B.: *Fractals: Form, Chance and Dimension*. W. H. Freeman & Co. 1978.



**Fig. 2.1** Se puede apreciar en esta imagen que la distribución del total de unidades económicas para el año 1999 no es uniforme y por lo tanto podrían aparecer más en cualquier otra zona.

Con la finalidad de aclarar el concepto de "Dimensión Fractal" se debe considerar la curva de Von Koch (figura 2.2) en donde el "iniciador" es un triángulo equilátero en el que cada uno de sus lados se transforma mediante un "generador", esto es una línea con la misma longitud de cada segmento del iniciador, dividida en tres para reemplazar la parte intermedia con los lados de un triángulo equilátero proporcionalmente más pequeño, el generador reemplaza cada segmento del iniciador y el proceso se repite tantas veces como se quiera.

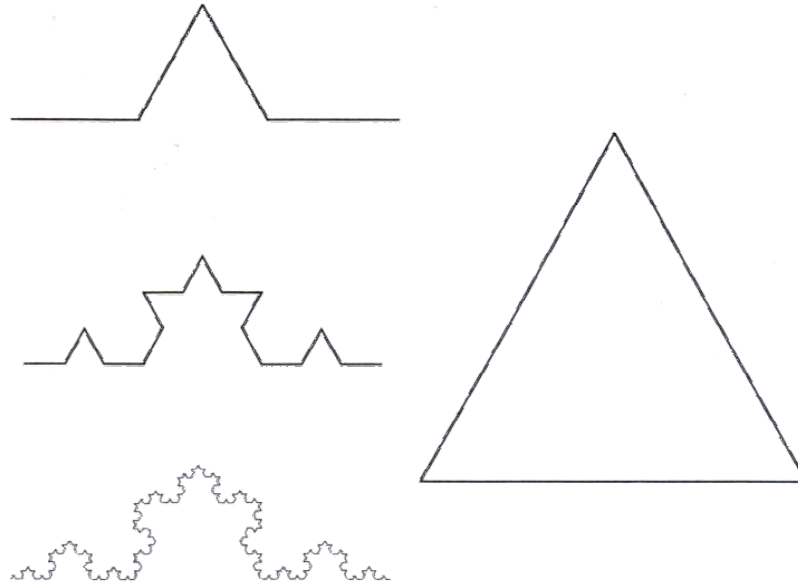


Fig. 2.2

Un iniciador puede ser cualquier figura geométrica, consistiendo en un determinado número de líneas conectadas. Por su parte, el generador también es un conjunto de líneas conectadas entre sí que habrá de reemplazar cada segmento del iniciador. Así, el generador consiste en  $N$  líneas, cada una de ellas con una longitud  $r$  que representa una fracción del segmento a reemplazar. Todo esto significa que la dimensión de la línea segmentada debe hallarse entre uno y dos, siendo un número real positivo el que determina su dimensión fractal<sup>11</sup>.

El proceso para calcular tal dimensión es bastante trivial y es el siguiente:

$$N = \frac{\log N}{\log \frac{1}{r}}$$

En el caso de la curva de Von Koch,  $N$  es igual a 4 segmentos y  $r$  es igual a un tercio de cada segmento, por lo tanto la dimensión fractal de este segmento es

<sup>11</sup> Monroy Olivares, César. *Curvas Fractales*. Ed. Alfaomega. Pp. 122.

igual a 1.261859507. Entre más cerca se encuentre el resultado de 1, más se parecerá la curva a una línea recta, y entre más se aproxime a 2, llenará mas espacio del plano<sup>12</sup>.

Para visualizar la diferencia entre el concepto de dimensión euclidiana y dimensión fractal basta con examinar la línea que se ilustra en la figura 2.3:



**Fig. 2.3** Una secuencia infinita de puntos que se conoce como línea. Desde los tiempos de Euclides se había venido aceptando que el objeto se extendía en ambos extremos indefinidamente sin que cambiaran sus propiedades fundamentales.

En este caso en particular si se asume que  $N$  es igual a dos segmentos y que  $r$  es igual a la mitad de la longitud de cada segmento, la dimensión fractal de la línea es 1. Esto significa que la figura analizada tiene una auto similitud perfecta a todas las escalas, es decir, exactamente igual y, por ejemplo, la aplicación de la función de transformación utilizada por Von Koch solamente producirá una línea más larga.

Para entender por completo cómo se puede aplicar la geometría fractal se debe considerar un cuadrado inscrito sobre un mapa como la figura 2.4. Ahora bien ¿cuántos cuadrados contienen algún segmento de la línea que demarcan al objeto en cuestión? claramente se puede responder que 1.

Se debe tomar en cuenta que este ejercicio teórico para describir mejor el concepto de geometría fractal, puede alcanzar un sinnúmero de aplicaciones prácticas, incluso algo tan trivial como querer medir la longitud de las fronteras que delimitan la República Mexicana, lleva a la ciencia hasta los mismos límites de lo que se conoce y de lo que se puede conocer, ya que la mayoría de todas las divisiones político-administrativas y de fronteras no son el producto de acuerdos

---

<sup>12</sup> Ackerman, M.: *Hilbert Curves Made Simple*. Byte Bagazine. Junio: pp. 137-138. 1986.

geopolíticos si no más bien obedecen a la acción continuada del medio ambiente que resulta ser totalmente determinista<sup>13</sup>.

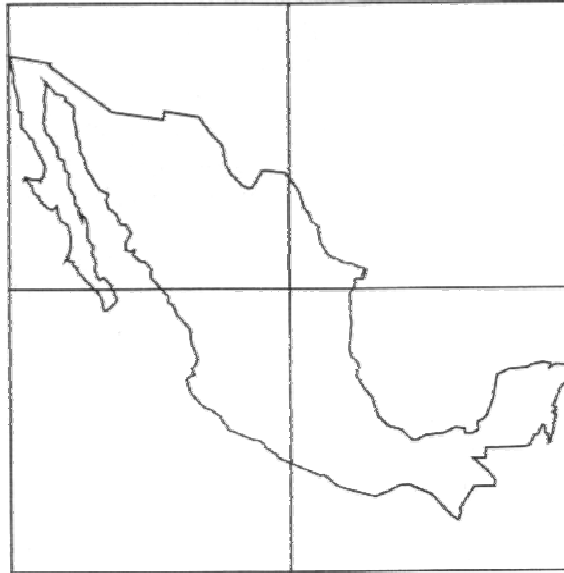


**Fig. 2.4**

El siguiente paso para determinar la dimensión fractal del ejemplo seguido, consiste en reducir un 50% la escala de medición, el cuadrado de 10 cm. en este caso, y organizar los cuadrados resultantes de manera que ocupen la misma superficie que el anterior como se ilustra en la figura 2.5

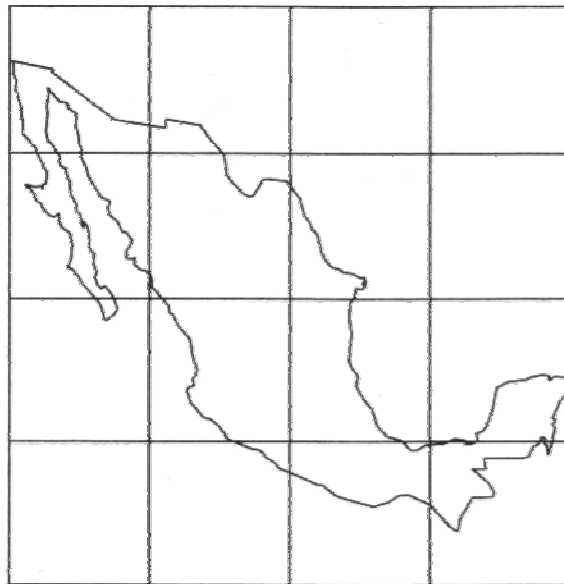
---

<sup>13</sup> Gruber, P. & Wills, J. M.: *Convexity and its Applications*. Cambridge University Press. 1983.



**Fig. 2.5**

Al contar el número de cuadrados que ocupa algún segmento del mapa, se descubre que son cuatro los cuadrados de 5 cm. de lado, y se repite el mismo proceso nuevamente para obtener la figura 2.6.



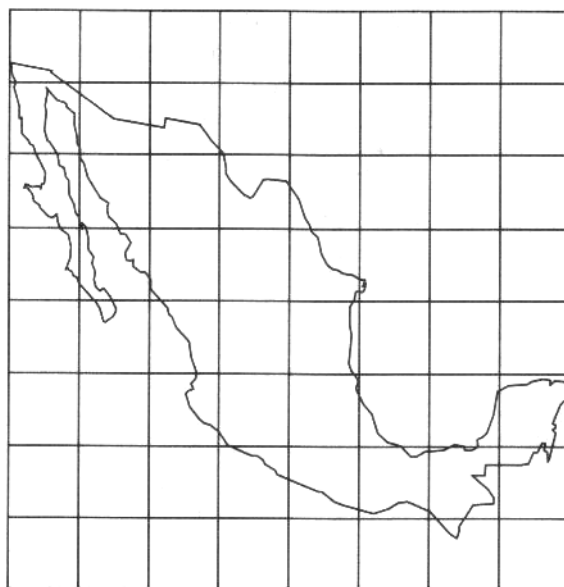
**Fig. 2.6**



Un conteo cuidadoso de los cuadrados que ocupan algún segmento del contorno en el mapa de la Republica Mexicana, da como resultado 12.

Es de importancia resaltar que a esta escala de detalle, comienzan a descubrirse cuadrados que no pertenecen al conjunto del contorno, es decir, son ajenos a la figura geométrica.

Nuevamente se repite el mismo procedimiento una vez más para obtener una retícula de 1.25 cm. y generar una imagen como la que se ilustra en la figura 2.7.



**Fig. 2.7**

La retícula de esta figura, incluye 64 cuadrados y solamente 25 de ellos están ocupados por los segmentos del contorno que delimitan al territorio mexicano. Una nueva aplicación del mismo procedimiento, producirá una rejilla de 256 cuadrados, en la que cada uno tendría 0.625 cm. de lado como ilustra la figura 2.8.

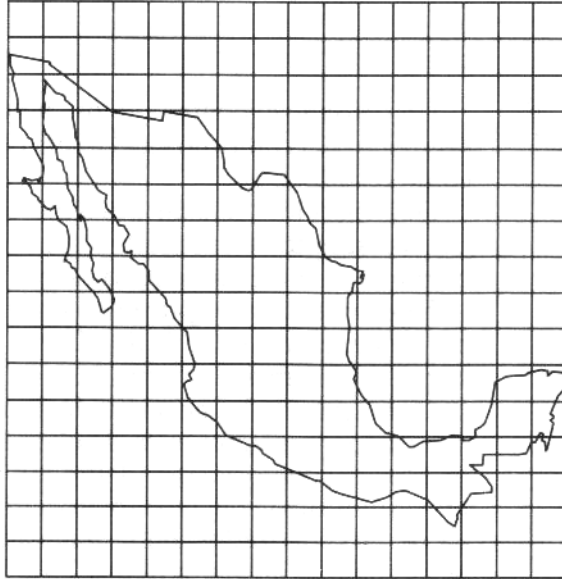
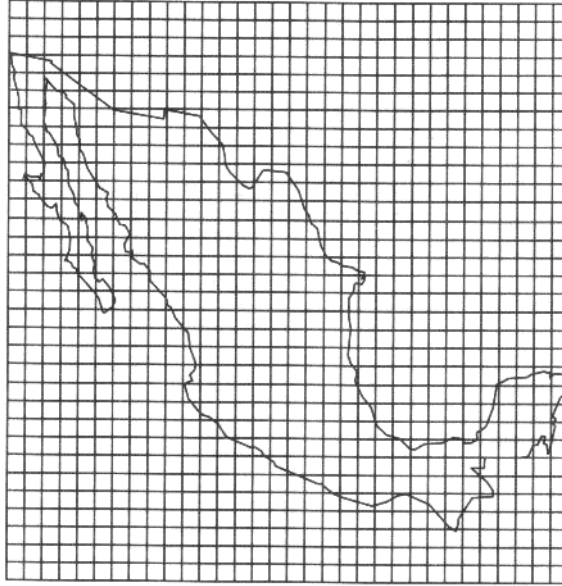


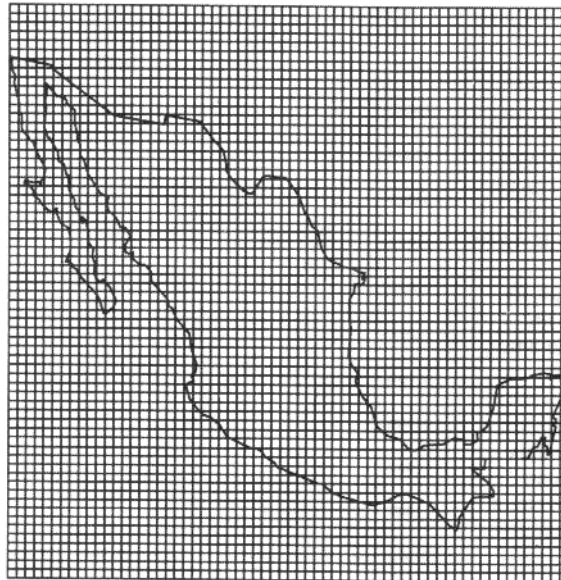
Fig. 2.8

En el caso anterior, el conteo de cuadrados ocupados produce un resultado de 65. Como lo que se está tratando de calcular es la longitud de la frontera, solamente se consideran en el conteo aquellos cuadrados que contengan algún segmento de la línea que delimita al territorio y no aquellos que, estando vacíos, pertenecen al continente. Realizando una nueva aplicación del método de escalamiento se obtiene una imagen como la que se muestra en la figura 2.9.



**Fig. 2.9**

Finalmente, se aplica el método de escalamiento para obtener una retícula de 0.156,25 cm., como lo que se ilustra en la figura 2.10, y se trata de distinguir cuántos cuadrados ocupa algún segmento del mapa.



**Fig. 2.10**

Si se tabulan los datos obtenidos, como se muestra en la tabla 2.1, se puede observar que mientras el factor de escalamiento para la longitud del lado muestra una relación lineal, el comportamiento para la razón entre cuadrados ocupados y vacíos se comporta de manera diferente, como lo muestra la gráfica de la fig. 2.11

Cuadrado	Lado	Ocupados	Total	Razón
0	12	1	1	1
1	5	4	4	1
2	2.5	12	16	0.625
3	1.25	25	64	0.39063
4	0.625	65	256	0.25391
5	0.3125	153	1024	0.14941
6	0.15625	304	4096	0.07422

**Tabla 2.1**

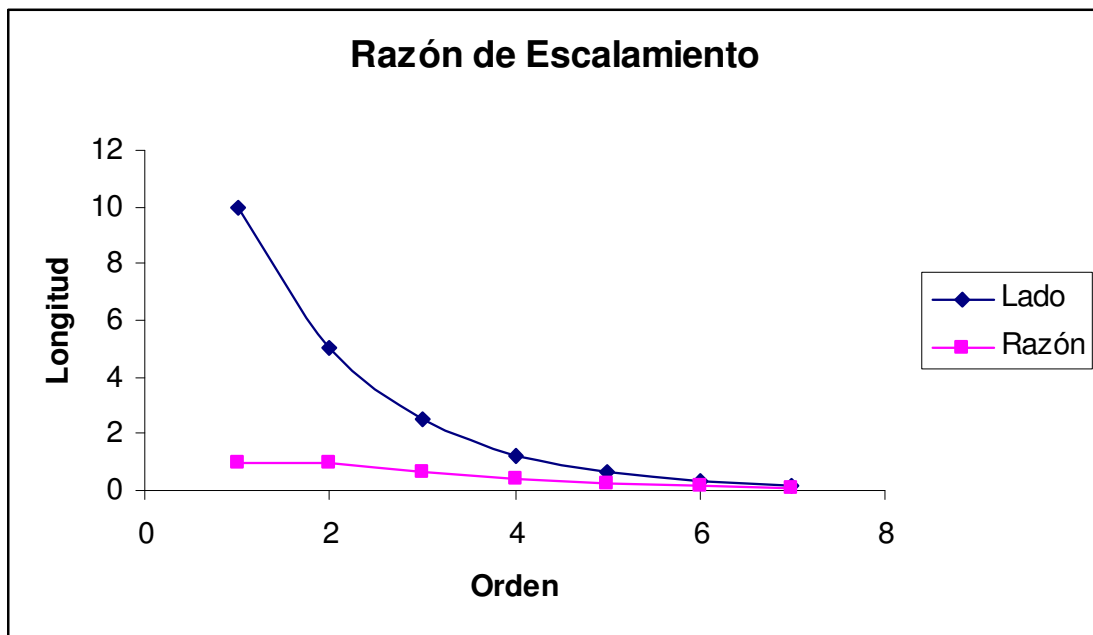


Fig. 2.11

Como existe una importante disparidad entre las diversas escalas utilizadas para graficar los datos, es conveniente trabajar con valores logarítmicos de las medidas, en lugar de sus valores normales. También es importante recordar que **los logaritmos son un truco para poder comparar cantidades cuyas magnitudes difieren por potencias**<sup>14</sup>. Un ejemplo, es que los valores correspondientes a los logaritmos decimales 1, 2 y 3 son 10, 100 y 1000, respectivamente.

La tabla 2.2 lista los resultados de calcular los logaritmos naturales para los datos de longitud del lado y número de cuadrados ocupados que aparecen en la tabla anterior 2.1.

Ln(1/lado)	Ln(Ocupado)
-2.30259	0.00000
-1.60944	1.38629
-0.91629	2.30259
-0.22314	3.21888
0.47000	4.17439
1.16315	5.03044
1.85630	5.71703

**Tabla 2.2**

---

<sup>14</sup> En Matemática, el **logaritmo** es la función inversa de la función potencia  $x = b^n$ , que permite obtener  $n$ . Esta función se escribe como  $n = \log_b x$ .

Por ejemplo:

$$3^4 = 81 \longmapsto \log_3 81 = 4$$

El logaritmo es una de tres funciones relacionadas entre sí: en  $b^n = x$ ,  $b$  puede ser encontrado con radicales,  $n$  con **logaritmos** y  $x$  con exponenciación. Se denomina **logaritmo neperiano** o **logaritmo natural (ln)** al logaritmo en base e de un número.

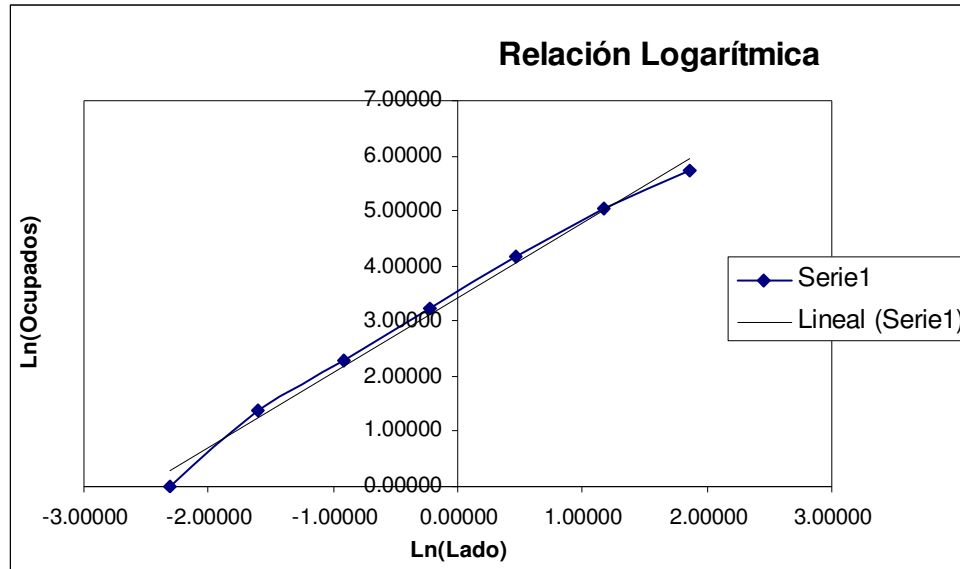


Fig. 2.12

La figura 2.12 muestra una gráfica que relaciona el logaritmo natural del lado de cada cuadrado contra el número de cuadrados ocupados en la retícula de cada escala. Esta gráfica demuestra que al emplear el logaritmo natural, la razón de escalamiento mostrada en la fig. 2.11 se linealiza para poder simplificar el proceso de medición.

Para terminar el cálculo de la dimensión fractal, es necesario realizar una última operación. Una línea recta que pasara por todos los puntos obtenidos sería la representación gráfica del número escalar que se está buscando pero si se observa nuevamente la gráfica anterior, se nota que dicha línea recta no existe. Para poder resolver este problema, hay que trazar una recta que se aproxime lo más posible a todos los puntos. El cómo calcular una recta que más se aproxime se puede obtener a través del método de los mínimos cuadrados y la pendiente se puede calcular con la siguiente fórmula.

$$P = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}$$

Si considera que los datos de la columna etiquetada como  $\ln(\text{Ocupados})$  representan la  $Y$  de la ecuación y los datos en la columna etiquetada como  $\ln(1/\text{Lado})$  representan a la  $x$ , entonces  $Y_2$  será igual a 5.71703, y  $Y_1$  será igual a 1.38629,  $X_2$  será igual a 1.85630 y  $X_1$  será igual a -1.60944. Reemplazando todos estos valores en la fórmula anterior y al realizar la operación correspondiente, se obtiene como resultado para la pendiente un valor de 1.24958, esto es, una línea de  $51.3^\circ$ , si calculamos el inverso de la tangente. A éste valor, se le conoce como "Dimensión Fractal" y tal dimensión para las fronteras de México es de 1.24958.

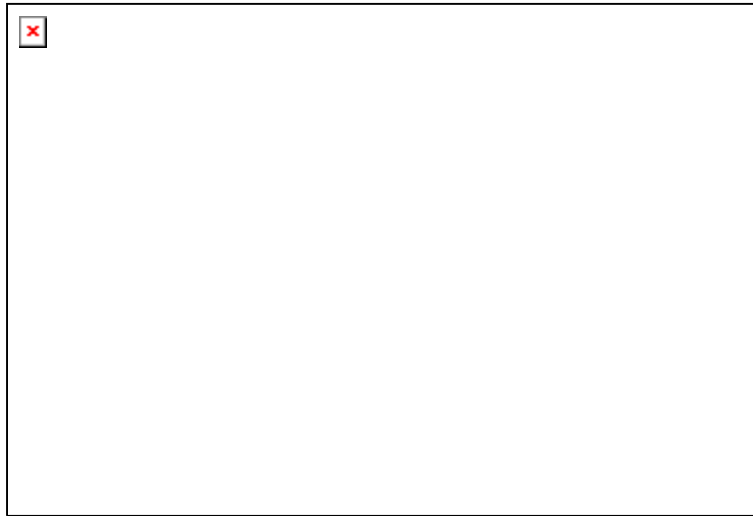
Para tratar de hacer más eficiente este proceso se debe diseñar o contar con un programa para la detección de bordes que aplique diferentes tamaños de rejillas y que al mismo tiempo muestre los resultados obtenidos de tal imagen. En realidad el problema consiste en "hacer discreta" una forma continua, algo que en computación se conoce como *rasterizado*. Para entender este problema, es suficiente con diferenciar el continente del contenido, algo que cualquiera puede hacer con bastante eficiencia, pero que no resulta tan fácil de mecanizar. Considere como ejemplo la figura 2.13.



**Fig. 2.13**

Es evidente que la operación requiere de una detección de bordes, por lo que se podría eliminar una gran cantidad de información redundante en la imagen si se desechan los colores y tonalidades para trabajar con una simple representación lineal.

La figura 2.14 ilustra cuál sería el resultado de aplicar una función al conjunto de píxeles de la imagen original.



**Fig. 2.14**

Solo faltaría entonces determinar qué puntos pertenecen al conjunto del contenido y por una simple operación de exclusión lógica se obtendrá el conjunto del continente, aplicar el mismo proceso de rejillas y entonces medir la dimensión fractal de la imagen.

Hasta el momento nos hemos enfrentado con imágenes sencillas para la comprensión de cómo se puede aplicar la geometría fractal. En el siguiente capítulo se analizará el crecimiento de la mancha urbana de la Ciudad de México mediante este mismo proceso, cabe mencionar que con la ayuda de potentes programas de evaluación se puede simplificar el proceso a fin de obtener la dimensión de cada cuerpo geométrico que se está analizando.

El siguiente capítulo propone una metodología para la realización de un análisis fractal, así como diferentes implicaciones que tiene, desde la adquisición y manejo de imágenes hasta la relación que existe con el objeto en observación y su posible interpretación.



### **CAPITULO 3**

## **ANALISIS DE EXPANSIÓN Y CRECIMIENTO FÍSICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE GEOMETRÍA FRACTAL**

Para este estudio de análisis de la expansión y crecimiento urbano como primera instancia, se toma en consideración la limitante en la adquisición de imágenes satelitales y su interpretación, por lo que estas imágenes son adquiridas en la distribución libre para el conocimiento y observación de los procesos en nuestro planeta por parte de la NASA a través del programa LAND SAT 7 y el Centro Nacional para la Observación de los Recursos de la Tierra y Ciencia, USA.

Debido a que el costo de la interpretación de los datos en software especializados representan una limitante importante, el presente estudio también se limita a una interpretación sencilla de los datos obtenidos mediante el uso de software de distribución libre, tan potente como los software comerciales especializados en evaluación e interpretación de imágenes, para poder inferir sobre el crecimiento y expansión urbana.

### **LOS SENSORES REMOTOS**

La percepción remota (remote sensing), es la disciplina de observar la superficie de la tierra sin estar directamente en contacto con ella. Esto nos permite obtener información acerca de nuestro planeta y las actividades humanas desde cierta distancia, la cuál revela importantes rasgos que no podrían ser registrados o convenientes a nivel de la tierra. Esto nos ofrece una perspectiva global sobre los cambios y las interacciones de los componentes complejos de la biosfera.

Las herramientas de la percepción remota, son sensores instalados en aviones o satélites. Los sensores aéreos generalmente son cámaras fotográficas y usadas tradicionalmente para crear cartografía urbana, pero su adquisición representa costos de manejo y de procesado. Si bien son un importante recurso de información sobre nuestra superficie, medio ambiente, etc, las imágenes aéreas son pobremente documentadas para áreas muy pequeñas lo que se vuelve una restricción para algunas áreas de estudio.

Los sensores satelitales adquieren imágenes de la tierra y transmiten los datos a la tierra donde estaciones receptoras de todo el mundo interpretan las imágenes. Una vez que las imágenes son analizadas, procesadas e interpretadas, se pueden documentar los cambios en las condiciones ambientales tal como la contaminación, el cambio climático global, el manejo de los recursos naturales, crecimiento y expansión urbana, desarrollo sustentable y mucho más.

¿Qué pueden hacer las imágenes satelitales en esta investigación?

La percepción remota juega un papel importante en la evaluación urbana. Las imágenes obtenidas a través de un satélite nunca podrán reemplazar el trabajo de campo, pero si nos puede ofrecer un gran soporte en lo siguiente:

- Representar y monitorear la expansión urbana en mapas.
- Monitorear el crecimiento.
- Representar los límites de crecimiento con mapas.
- Situar nuevos desarrollos, industrias, parques naturales, etc.
- Trazar rutas y situar nuevas rutas de transporte.
- Examinar e interpretar la morfología urbana.
- Analizar un horizonte temporal con imágenes, etc.



**Fig 3.1** Imágenes satelitales en espectro rojo que indican el cambio en el crecimiento de zonas agrícolas en suelo no agrícola.

## TEMAS QUE AFECTAN LA SELECCIÓN DE IMÁGENES.

Los satélites y sus sensores pueden diferir en muchas formas. Existen imágenes satelitales de la tierra con muchas bandas, donde una banda es sensible a un específico rango de longitud de onda dentro de un espectro electromagnético, tales sensores e imágenes, son sensibles a longitudes de onda visible e infrarroja. Más allá de estas longitudes de onda, la interpretación de los datos puede convertirse en algo muy especializado, sin embargo para otras aplicaciones de observación las imágenes satelitales y sus sensores pueden ser muy importantes. Para definir las características de un sensor, tiene que ver directamente con el tamaño de la imagen que puede ser registrada, la región de la tierra que se puede ver, el rasgo más pequeño que se puede distinguir, las bandas de color usadas, qué tan frecuente son colectadas las imágenes y cuándo estuvo en operación el sensor. Quizá lo más importante en temas no técnicos, es la adquisición y el costo que puede representar, sin embargo a últimas fechas y con los últimos avances de la tecnología tales costos por adquisición de imágenes satelitales han sido más accesibles, lo que nos permite sostener estudios y observaciones en el campo urbano mucho más frecuentes y con una mayor escala en comparación con las imágenes aéreas.

Sin embargo la falta de resolución espacial, es decir, que las imágenes no alcanzan a identificar a detalle las formas y estructuras físicas que se pueden encontrar dentro del territorio urbano, dificulta la clasificación de tales estructuras. Los métodos clásicos de clasificación se basan en el píxel<sup>15</sup>, sin tomar en cuenta la relación de este píxel con sus vecinos, la cuál es de considerable importancia para entender la estructura urbana.

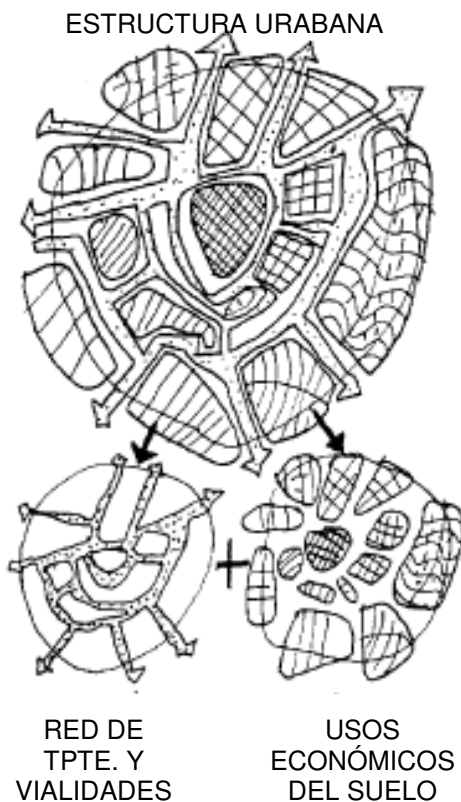
---

<sup>15</sup> El **píxel** (del inglés *picture element*, o sea, "elemento de la imagen") es la menor unidad en la que se descompone una imagen digital, ya sea una fotografía, un fotograma de vídeo o un gráfico. Los píxeles aparecen como pequeños cuadrados en color, en blanco y negro, o en matices de gris. Las imágenes se forman como una matriz rectangular de píxeles, donde cada píxel forma un punto diminuto en la imagen total.

## LA ESTRUCTURA URBANA DESDE EL PUNTO DE VISTA FRACTAL

Como urbanistas intervenimos en la ciudad por medio del conocimiento de la forma. La forma urbana es la particular disposición y orden que adoptan los diferentes elementos en el territorio urbano. Seleccionar y clasificar los elementos y el entender sus relaciones es su estructura. Podemos introducir una primera simplificación definiendo dos espacios básicos: espacios para el movimiento y espacios para las actividades. Los primeros se formalizan como líneas y se organizan como redes, los segundos como piezas y mosaicos. Ambos espacios están siempre interrelacionados formando un sistema integrado.

La figura 3.2 muestra que los espacios del movimiento son las calles, la red de transporte y vialidad, las piezas son los lotes y edificios con un uso del suelo particular o uso económico del suelo, como tipologías formando los distintos tejidos urbanos o morfologías históricas. La forma de la ciudad es la composición agregada de todos estos elementos en cada periodo histórico.



Este entendimiento analítico formal y estructural básico nos sirve para intervenir en la ciudad necesariamente de una manera sintética. Un proyecto urbano y por extensión un plan, es un proceso sintético para diseñar una acción física concreta en la ciudad que cause un efecto benéfico. La intervención en la ciudad físicamente muy compleja tiene que hacerse desde los fragmentos que relacionen las partes con el todo. Ello implica entender el lugar de cada proyecto, su escala y su relación con el resto de elementos urbanos.

Fig. 3.2

La forma de la ciudad es cada vez más compleja y no puede ser reducida a una única dimensión, como ha sido habitual en las pasadas aproximaciones euclidianas como el modelo de Burgess/Hoyt. La forma de las ciudades es el resultado de un largo proceso de construcción, interactuando con el emplazamiento físico, en el que han intervenido muchas personas y decisiones con el resultado de crear un complicado artefacto social que ya no puede ser entendido desde la geometría euclidiana, sino más bien desde la perspectiva de la geometría fractal donde su comprensión tiene que hacerse desde una aproximación multiescalar o multidimensional, es decir desde la observación del objeto desde distintas distancias, relacionando y seleccionando las partes que surgen de cada visión.

Debido a que esta aproximación debe ser en distintas dimensiones, la metodología a seguir en la medición del proceso de expansión urbana se sustenta en un número fractal para los diferentes años que se van a analizar, implícitamente este número, relaciona diferentes medidas, es decir diferentes escalas de una forma como lo puede ser un cuadrado de diferentes tamaños, tal como se explica en el capítulo 2 y que nuevamente se vuelve a emplear en el siguiente apartado.

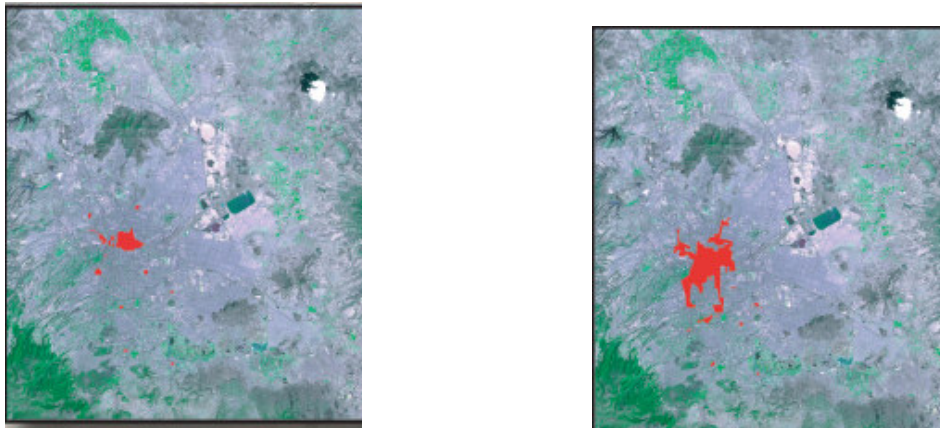
## **Metodología de análisis de las imágenes satelitales y fractalización**

### *1.- Selección de Imágenes*

Las imágenes han sido seleccionadas de acuerdo al satélite, en este caso el satélite ha tomado una fotografía en color de 16 bits de toda el área metropolitana de la Ciudad de México, con el satélite USGS del National Center for Earth Resources Observation and Science y comparadas con imágenes obtenidas por LAND SAT 7, cabe resaltar que lo que estamos observando es la evolución del crecimiento y expansión urbana de la Ciudad por lo que es necesario tener muy claro que el objetivo de la imagen es señalar con precisión esta evolución.

## 2. Proceso de la Evolución

En la imagen satelital hay que señalar dicha evolución con un color diferente sobre una imagen reciente, es decir tener siempre el comparativo de lo actual y el año que se va a analizar como imagen.



**Fig. 3.2** Imágenes satelitales correspondiente al año 2000 donde se representa en color rojo el crecimiento que había alcanzado la ciudad de México para los años de 1910 y 1929 respectivamente.

## 3.- Edición para nuestro objetivo en un programa editor de imágenes.

Una vez identificada la evolución a través del tiempo, se procede a editarlo convenientemente para encaminarnos hacia nuestro objetivo; en este caso necesitamos señalar en color negro únicamente el área donde se registra el crecimiento y resaltarlo aún más para eliminar lo que se considera innecesario, es decir, “*discretizar*”<sup>16</sup> la imagen como en la figura 3.3, teniendo siempre claro que el área que se relaciona con la expansión física del territorio se debe digitalizar en

---

<sup>16</sup> El término Discretizar proviene del inglés “to discretize”; se aplica en tecnologías emergentes y de cómputo para eliminar información redundante e innecesaria y principalmente resaltar lo que es importante.

CAD para su manejo vectorial e interpretación a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG).



**Fig. 3.3** Se puede apreciar claramente la discretización de la mancha urbana para los años que se señala.

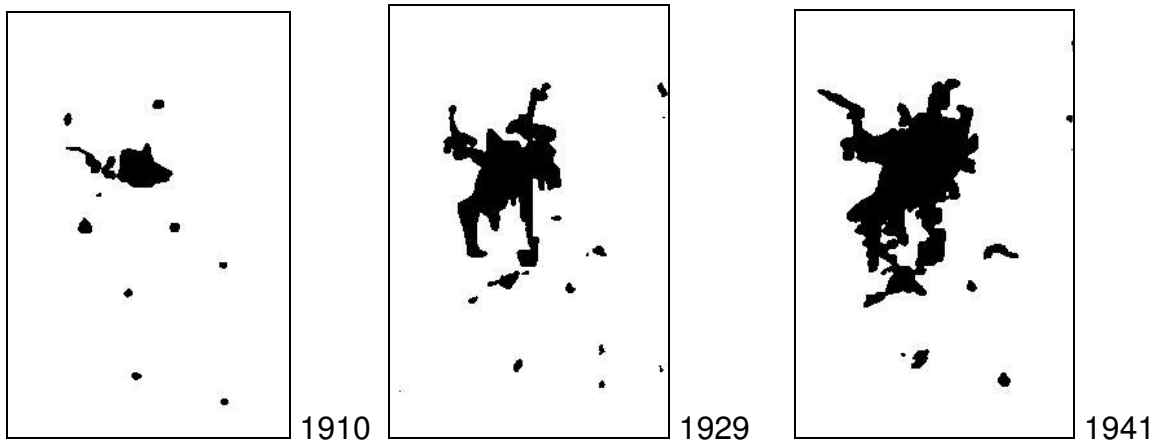
4.- *Uso de un software especializado para imágenes (software para el análisis y procesamiento de imágenes).*

En este caso se usa el software “ImageJ”, un software de distribución libre creado por el National Institutes of Health, USA, el cuál está programado para analizar imágenes de la evolución de tumores y medir su desarrollo en el tiempo, para medición y evaluación de las imágenes satelitales (área, perímetro, etc.) y sobre todo editar los resultados que arrojan éstos análisis.

Este software es tan potente y flexible como los que se utilizan para la interpretación de imágenes satelitales. Con este programa lo que se busca es dejar claramente la evolución del crecimiento y expansión urbana por lo que se ajusta la imagen hacia los colores blanco y negro para resaltar nuestro objetivo, es decir, se debe tener discretizada la imagen a fractalizar en una imagen binaria de 8 bits<sup>17</sup>, esto es, una imagen con una profundidad de color muy baja, la cuál se observa como una imagen en donde solo predomina el negro y el blanco y sus diferentes variantes y combinaciones creando grises de diferentes tonalidades.

---

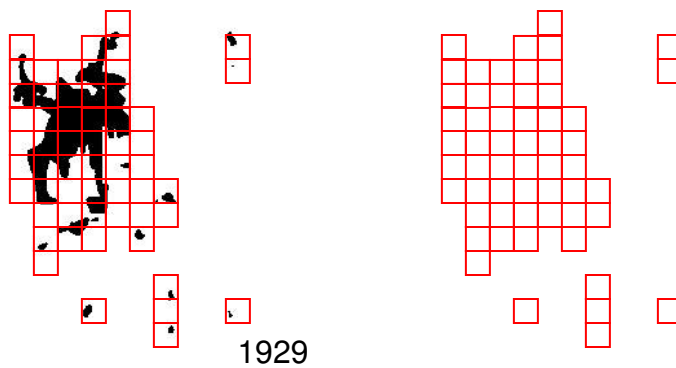
<sup>17</sup> En las imágenes de mapa de bits o en los dispositivos gráficos, cada píxel se codifica mediante un conjunto de bits de longitud determinada (la llamada profundidad de color), por ejemplo, puede codificarse un píxel con un byte, u 8 bits, de manera que cada píxel admite 256 variantes (2 dígitos por bit, elevados a la octava potencia, es decir,  $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$ ).



**Fig. 3.4** Evolución del crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de México en imagen binaria de 8 bits.

##### 5.- Análisis geométrico espacial de imágenes (fractalización).

Una vez obtenidas las imágenes con la mancha urbana a través del software se procede al análisis geométrico, esto es, el programa asigna cajas, o una rejilla, de un tamaño igual a modo de cubrir toda la imagen con diferentes tamaños de cajas, esto implica que se simplifica o se “normaliza” la mancha urbana a través de la evaluación geométrica.



**Fig. 3.5** Ejemplo de normalización geométrica de la mancha urbana, ciudad de México para el año 1929

Lo que el software hace es aplicar diferentes tamaños de rejillas o cajas que cubran toda la imagen, esto es, se hace un análisis multiescalar de la mancha urbana, así pues se tiene mayor proximidad a nuestro objetivo el cuál es



simplificar el fenómeno que se expande y al mismo tiempo se analiza la imagen a través de la relación Log. Tamaño de la Caja ( $\log tc$ ) Vs. Log Número de cajas ( $\log nc$ ) que se emplean para cubrir la imagen. El resultado es un número que se conoce como Dimensión Fractal ( $D$ ) es decir, esta fórmula contiene las mismas características con las que fueron analizadas las fronteras de la República Mexicana en el capítulo anterior, al mismo tiempo el programa muestra el valor de la pendiente la cuál se refiere a su Dimensión Fractal.

$$\frac{\log tc}{\log nc} = D$$

Para el presente estudio se evaluaron imágenes satelitales, las cuales se han convertido en imágenes vectoriales para su manejo en CAD y SIG de la Mancha Urbana de la Ciudad de México y de la superposición de imágenes a una escala de 1:250,000 y una resolución espacial de 2552 x 3302 píxeles para los siguientes años: 1910, 1929, 1940, 1950, 1986, 1996 y 2000, la cuál nos permite una observación general del crecimiento y expansión física de la ciudad de México.

Se propone que estas imágenes sean analizadas de dos formas, la primera de ellas observando la ciudad como una mancha y la segunda simplemente como contorno y estos son los resultados a los que se han llegado.

<b>año</b>	<b>dim. frac. (contorno)</b>	<b>dim. frac. (área)</b>	<b>Plano</b>
1910	1.0255	1.481	C1
1929	1.0821	1.7429	C2
1940	0.9568	1.6399	C3
1950	1.1021	1.784	C4
1986	1.0708	1.8736	C5
1996	1.1024	1.8952	C6
2000	1.1355	1.8754	C7

**TABLA 3.1**

Se toma en cuenta las dos dimensiones tanto la del área como la del contorno, como un comparativo entre su área y su contorno. La figura 3.6 muestra la grafica

en la que se observa que la dimensión fractal del contorno se ha mantenido constante, esto es, que la periferia de la ciudad se expande con la misma velocidad a la que se expandía en el año de 1910. En comparación con la gráfica que representa la dimensión fractal del área, indica que el área de la ciudad incrementa su densidad en la medida que pasa el tiempo. Se puede concluir con estos resultados que la periferia de la ciudad se expande de manera constante pero las propiedades de densidad dentro de la ciudad se incrementan en el tiempo, por ejemplo, para el año de 1910 la ciudad se expandía en la periferia con una densidad menor a la que se expande en el año 2000, es decir, para el año 2000 los nuevos crecimientos en la periferia y dentro de la ciudad presentan mayor densidad que los años anteriores.

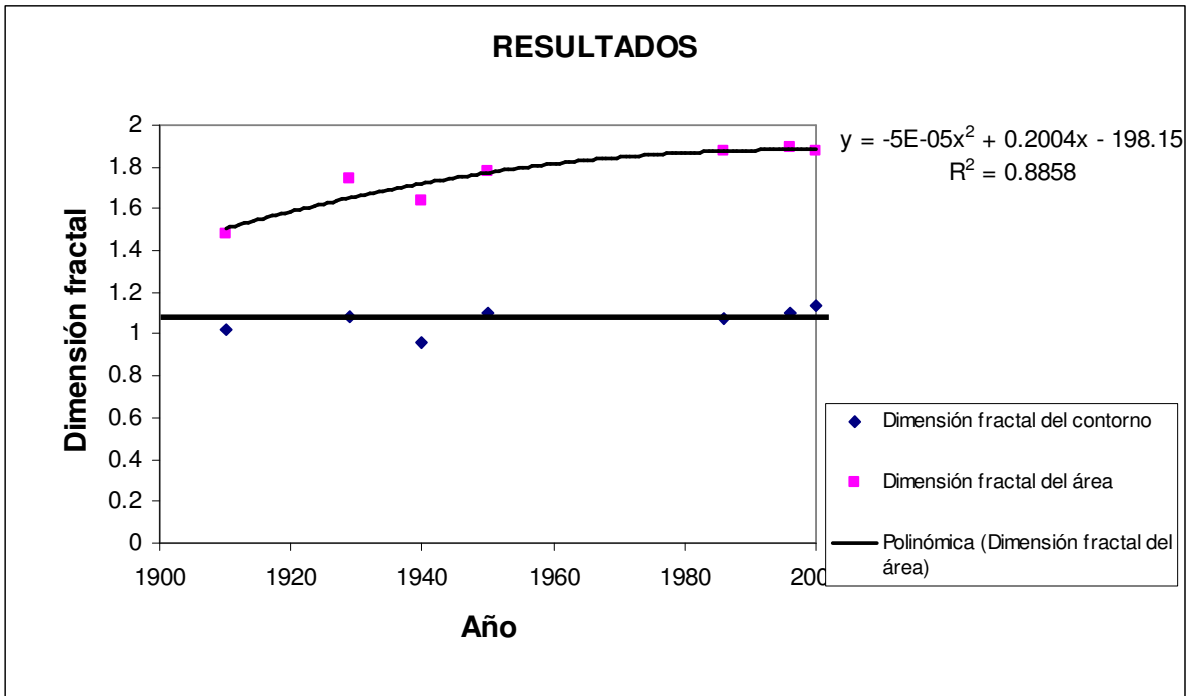
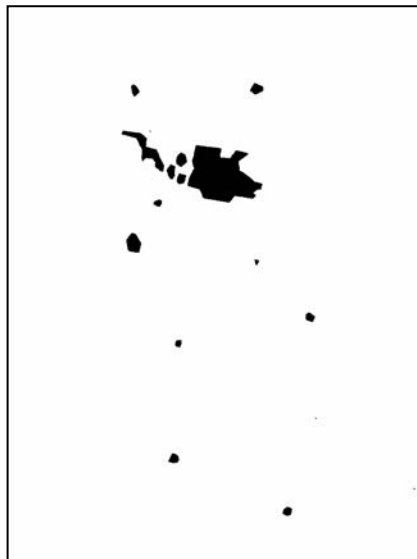


Fig. 3.6

La tabla 3.1 muestra las dimensiones fractales para cada año que se está analizando con el plano correspondiente. Para el año de 1910 la dimensión fractal alcanza el 1.481, esto es, siguiendo la lógica descrita con anterioridad en el

capítulo 2, mientras la dimensión fractal se acerca al 1 indica que sus propiedades geométricas mantienen características con mayor dispersión en el área del objeto, y si se acerca más al 2, el resultado es que el objeto analizado cubre mayor superficie del plano y por lo tanto con mayor complejidad en su forma; para este año en particular, la mancha urbana parece desprender algunos “dedos” del centro hacia la periferia como se puede observar en el plano C1 con algunos asentamientos muy alejados del centro urbano.



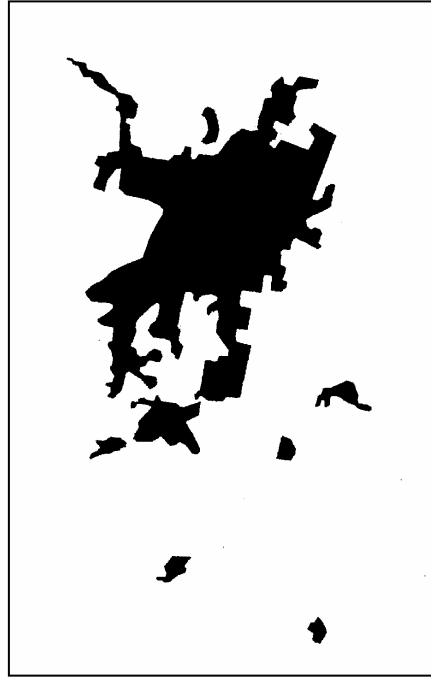
**Fig. 3.6** Mancha Urbana Ciudad de México 1910

Hacia 1929 la expansión de la ciudad muestra dedos muy bien definidos que siguen las principales rutas de transporte y de acceso a la ciudad central, para este año su dimensión crece al 1.7439, lo que indica que tuvo un crecimiento acelerado de su población de 906 033 habitantes en 1921 al 1 029 068 en 1930 de acuerdo al Atlas General del Distrito Federal de 1930. Esta población sin duda fue parte de una población afectada por la Revolución Mexicana que llegaba en busca de oportunidades y un acomodo en la ciudad, por lo que las autoridades locales crearon la Comisión Mixta de Planificación la cuál tenía como prioridad organizar el territorio de acuerdo a los lineamientos de la Comisión Nacional de Planificación.



**Fig. 3.7** Mancha Urbana Ciudad de México 1929

El año de 1940 muestra un comportamiento dendrítico de la mancha urbana, pero sin embargo su dimensión fractal decae al 1.6399 sin duda como resultado de los esfuerzos locales para organizar el territorio, dar más movilidad y accesibilidad vial al Centro Histórico con grandes obras como la ampliación y apertura de la Avenida 20 de Noviembre en 1933, así como la ampliación de la calle San Juan de Letrán en el mismo año y algunas otras aperturas de calles importantes que intentan integrar el funcionamiento de la ciudad, como también expansiones del territorio en la periferia destinadas a vivienda para obreros construidas en Balbuena, La Vaquita y San Jacinto (DDF, 1934). Así pues, de estas intervenciones (que afectan la Planeación del Desarrollo Urbano), surgió el Reglamento de Zonificación de las Arterias Principales de la Ciudad de México en 1938 poniendo en claro una postura integradora con relación al crecimiento de actividades y expansión urbana sobre las principales arterias de la ciudad.



**Fig. 3.7** Mancha Urbana Ciudad de México 1940

El año de 1950 representa una explosión en el crecimiento y expansión de la Ciudad de México como se puede observar en el plano C4, con dispersiones en toda la periferia de la ciudad siguiendo las principales líneas de transporte y una dimensión fractal de 1.784, lejos de representar un comportamiento ordenado de la mancha urbana es consecuencia directa de todas las políticas de industrialización en la década de 1940 a 1950 aunado al constante crecimiento acelerado de la población, la cual tenía la necesidad de encontrar un acomodo en la periferia de la ciudad o cerca de la ciudad central, mayormente como se puede observar encontraron su acomodo en la periferia provocando dispersiones y un desequilibrio económico, fue entonces cuando Miguel Alemán Valdés emitió una serie de acuerdos con el fin de impulsar las denominadas Cuencas Hidrológicas, buscando desarrollar regiones distintas a la Ciudad de México. Estas cuencas, además buscaban un desarrollo territorial más homogéneo para disminuir la presión sobre las áreas urbanas y principalmente la de México que ya parecía incontrolable.



**Fig. 3.8** Mancha Urbana Ciudad de México 1950

Los intentos por bajar la presión sobre la zona urbana de la Ciudad de México no dieron resultado, ya que para 1986 la dimensión fractal de la mancha urbana siguió aumentando al 1.8736, lo que en términos del territorio urbano significa que la mancha urbana continúa en expansión pero con mayor densidad dentro de la mancha.

Con las modificaciones en la dinámica social y las transformaciones observadas en el ámbito económico, la Ciudad alcanzó para estos años, de 1950 a 1986 un carácter metropolitano. Los candados impuestos a la apertura de fraccionamientos dentro del territorio del Distrito federal en los cuarenta, aunada a los permisos brindados por el gobiernos del Estado de México para permitirlos en su territorio (en partes cercanas al DF) motivó, de 1950 a principios de la década de 1980, un desdoblamiento de la población en los Municipios de Cimalhuacán, Ecatepec, Nezahualcóyotl, Naucalpan, Tlalnepantla, Atizapan, Cuautitlán R. R., La Paz, Huixquilucan y Tultitlán. Con este nuevo proceso y por demás agresivo de

expansión, el número de habitantes de la ciudad se incrementó de 3 137 599 a 5 251 755 y a 8 799 937 de los años de 1950 a 1960 y 1970 respectivamente.



**Fig. 3.9** Mancha Urbana Ciudad de México 1986.

A principios de los años ochenta, con una seria crisis económica que se reflejaba en una disfuncionalidad de la ciudad ya que dentro de ella se concentraba gran parte de las actividades administrativas, financieras y de servicios de todo el país, las nuevas políticas urbanas surgidas a través de la actualización legislativa, administrativa y del Plan Director para el Desarrollo urbano del Distrito Federal, los intentos de refuncionalizar la ciudad tomaron fuerza significativa con el Proyecto de los Ejes Viales, mismo que desde 1978 venía abriendo diversas partes de la urbe; este proyecto fue la respuesta más lógica a los problemas enfrentados por el carácter comercial y de servicios que venía asumiendo la ciudad. Y es que a pesar de los esfuerzos por agilizar los traslados hacia las periferias y al interior de la ciudad, como resultado de la construcción de gran parte del Periférico y del Circuito Interior en años anteriores, la ciudad seguía siendo lenta en su funcionamiento de la estructura vial.

El proyecto, en esencia, generó una traza ortogonal que dividió a la ciudad en una gran cuadrícula, la cual pretendía evitar el paso de grandes cantidades de autos por el centro histórico.

Sin embargo, la aplicación del proyecto no se realizó tal como se había planteado desde un principio. La población afectada por el desarrollo de los ejes viales tuvo que buscar un nuevo acomodo ya que se vieron afectadas 7 678 familias, 1 834 predios y 7 166 viviendas (González, 1983:98). Al mismo tiempo se estaban conformando nuevos asentamientos irregulares, particularmente en la zona oriente de la ciudad, donde los asentamientos del tipo de las colonias Santiago, Xalpa, Diez de Mayo, José López Portillo, Xico, Santa Catarina, y el desdoblamiento de la población de lugares como Ecatepec y Nezahualcóyotl, personificados por colonias en Chimalhuacán, Ixtapaluca y Valle de Chalco, daban lugar a una expansión y crecimiento físico de la ciudad inimaginable mostrando desarrollos desiguales.

Un hecho sin precedente que cambió la forma de construir la ciudad fue el terremoto registrado en 1985, lo que permitió reestructurar grandes zonas de la ciudad que fueron devastadas, nuevas leyes y normas de construcción para todo tipo de viviendas, equipamiento, comercio y servicios, surgen como respuesta a una ciudad que había sufrido la peor de sus catástrofes.

Hacia 1996 la mancha urbana de la ciudad alcanza una dimensión fractal de 1.8952 quiere decir entonces, que a pesar de toda la reestructuración y empleo de nuevas políticas hacia el desarrollo urbano de la ciudad y la descentralización de actividades propuestas por el Plan Nacional de Desarrollo 1983 – 1988, éstas no habían tenido el alcance para lo que habían sido planeadas tal como la transformación del patrón de ocupación del territorio, y el impulso al crecimiento y ordenación de las ciudades medias y pequeñas que pudieran restar la presión de crecimiento que la Ciudad de México presentaba.

Por su parte, el Gobierno Federal de 1988 a 1989, continuó con las mismas políticas pero con una tendencia más agresiva hacia el beneficio del sector privado, con una dinámica modernizadora del campo y mecanismos flexibles en cuanto a la tenencia de la tierra con reformas al Artículo 27 Constitucional y las modificaciones a la Ley General de Asentamientos Humanos, con el fin de impulsar transformaciones en el campo tratando de alentar inversiones en él. Sin embargo, lo único que provocó fue que las tierras agrícolas cercanas a la presión



del crecimiento urbano de todas las ciudades fueran vendidas a precios muy bajos para ser vendidas a precios altos con alta especulación del suelo trayendo como consecuencia una nueva dinámica de mercado en zonas cercanas al crecimiento de la ciudad (PROCAMPO, 1996).



**Fig. 3.10** Mancha Urbana Ciudad de México 1996.

En noviembre de 1997 se anuncia la conclusión del Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México el cual se perfiló con un gran avance en materia de ordenación territorial entre dos entidades que afecta el crecimiento urbano; para ese año el programa planteó los siguientes objetivos:

-Mejorar la calidad de vida de la población metropolitana. –Evitar la ocupación urbana de las áreas naturales que reúnan las condiciones que impliquen su preservación, -Evitar el poblamiento en

zonas de riesgo, -Orientar el asentamiento de la población hacia zonas que puedan contar con condiciones adecuadas de infraestructura y equipamiento, -Propiciar la generación de una oferta de suelo y vivienda al alcance de la capacidad económica de los pobladores, -Mejorar la accesibilidad y movilidad espacial de la población, así como el abasto de mercancías, -Estrechar los vínculos de colaboración entre las entidades que comparten el fenómeno metropolitano, entre otras (Gobierno DF, 1998).

Conjuntamente con la participación ciudadana se ha podido lograr un mayor control en base a los objetivos anteriores, así, el gobierno del Distrito Federal, de 1997 al 2003 ha integrado políticas de transporte y de crecimiento que prohíben el crecimiento en zonas inapropiadas y promueven el crecimiento en otras con infraestructura y equipamiento adecuado para la población demandante de un acomodo dentro de la ciudad (Gaceta DF, Noviembre 2003).

La implementación y eficacia de estas nuevas políticas se ven reflejadas al momento de medir la mancha urbana del año 2000 (figura 3.11), ya que en comparación con la de 1996 baja al 1.8754, esto es que los esfuerzos por tener un mayor control con políticas y decisiones tomadas por los gobiernos locales han tenido su efecto sobre el territorio urbano, quizá no ha sido de la forma deseada pero al menos en este análisis por medio de fractales se puede medir el efecto que han tenido en la expansión de la ciudad.

Al igual que la ciudad, las vías de transporte principal crecen y se expanden, y una buena forma de medirlo es mediante fractales, se analizaron los años de 1950, 1986, 1996 y 2000 los cuales se muestran en la figura 3.12.



Fig. 3.11 Mancha Urbana Ciudad de México 2000.

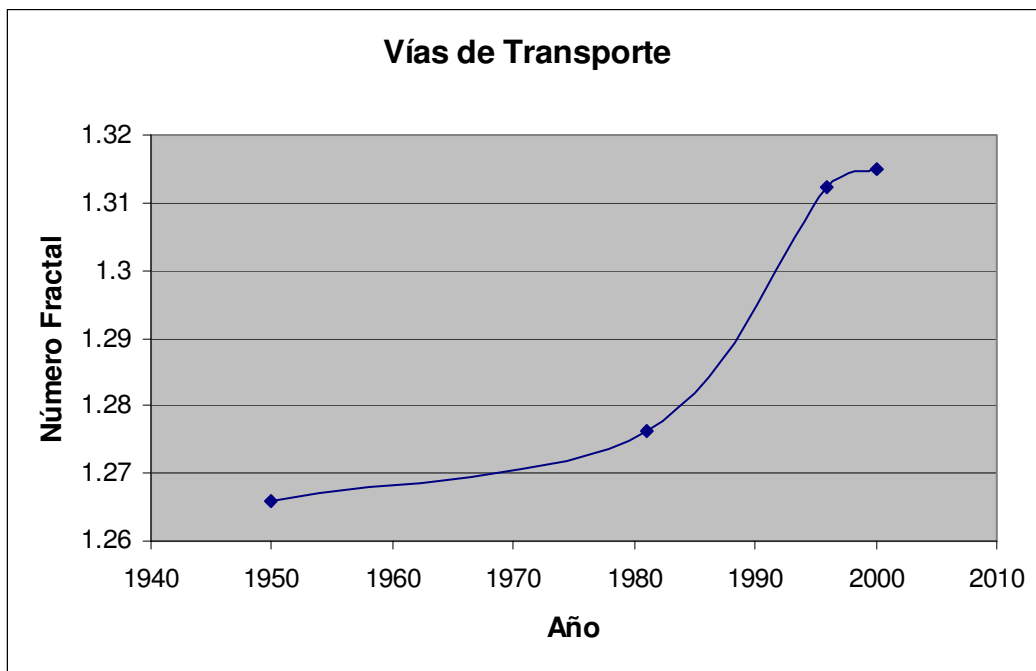


Fig. 3.12 Resultados del análisis sobre las principales vías de transporte y vialidad, en donde se mide el conjunto de las vialidades como líneas sobre un espacio bidimensional

Como se ha visto con anterioridad, a partir de principios de la década de 1980 a 1990, la ciudad tuvo un incremento considerable en sus vialidades con la apertura de los ejes viales, este tipo de análisis refleja la realidad y como se muestra en la gráfica anterior, pareciera muy simple de observar, sin embargo aquí se está proponiendo una forma sencilla de medir el cambio en el crecimiento y expansión de la estructura vial.

El número fractal nos dice que la ciudad se expande, crece y se vuelve más compleja en su forma, gracias a la existencia de potentes simuladores por computadora, se han logrado crear modelos funcionales de ciertas clases de crecimiento aleatorio que se parecen mucho a procesos empleados por la expansión y crecimiento urbano. La *agregación por difusión limitada*, por ejemplo, se utiliza rutinariamente para simular este tipo de crecimientos.

Esto significa que una figura determinada puede tener una dimensión fractal que *varía* para diferentes rangos de escalas. La importancia de este concepto es de vital importancia para el desarrollo de este trabajo, ya que nos permite aprovechar prácticamente las construcciones matemáticas para entender la realidad cotidiana. El siguiente capítulo explica cómo un modelo que surge de observaciones a través de diferentes sistemas físicos en crecimiento puede ser aplicado para explicar cómo es que crece la ciudad y bajo qué condiciones, son las bases teóricas y prácticas para desarrollar modelos que simulan el crecimiento físico de cualquier figura que presenta características determinadas. Este trabajo no llegará a la simulación de procesos físicos en crecimiento ya que se requiere el dominio de lenguajes de programación especializados y no es el alcance que pretende este trabajo de licenciatura, sin embargo aquí se sientan las bases teóricas para lograrlo y con algunos alcances de carácter práctico.

## **CAPITULO 4**

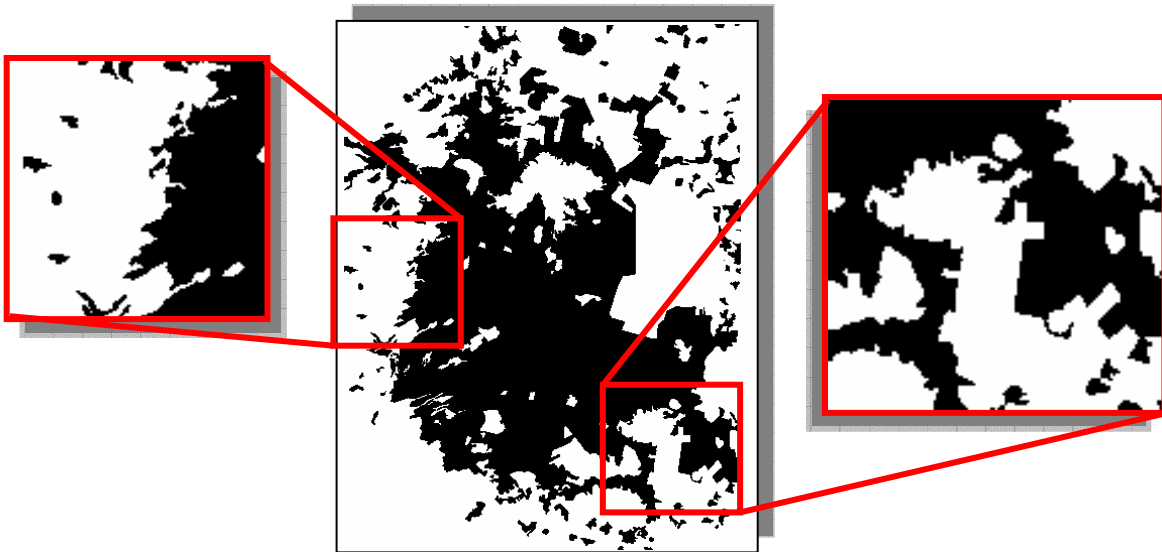
### **MODELO DE AGREGACIÓN LIMITADA PARA LAS CIUDADES**

Existe un mercado creciente de desarrolladores urbanos y gobiernos para desarrollar mejores métodos y modelos que predicen, simulan y miden las propiedades de la forma urbana.

Las ciudades siempre han sido concebidas en términos de la simple geometría euclidiana, como se ha visto por ejemplo en las formas lineares y concéntricas de la ciudad ideal propuesta por Le Corbusier y algunos otros eminentes practicantes de la arquitectura. El sistema de planeación ha crecido basándose en guiar y manipular el cambio físico en términos del espacio y el territorio, incluso con instrumentos de política geométrica aplicados a los nuevos desarrollos para contener el crecimiento urbano. Los planes de desarrollo se basan en los crecimientos y concentraciones dentro de la ciudad o dispersiones de suburbios en la periferia. Por lo tanto para este trabajo es de importancia la contribución que puede hacer el análisis fractal.

Hay muchas razones por las que la geometría fractal puede interesar a investigadores urbanos y planeadores urbanos. Un arsenal de técnicas sofisticadas para analizar y predecir la estructura urbana han sido desarrolladas durante las dos últimas décadas y su relación con la forma urbana es por demás tentativa. Modelos de actividades económicas y demográficas están extensamente basados en representar formas espaciales a niveles abstractos en el que la geometría de la ciudad no puede ser construida fácilmente. Los modelos se construyen sobre datos a niveles que sólo los censos pueden ofrecer, mientras que otros ni siquiera intentan representar las dimensiones o formas del territorio o la definen mediante concepciones inapropiadas de la geometría euclidiana. Así pues la geometría fractal puede sugerir modelos de estructura urbana que no es una alternativa a la práctica contemporánea pero puede resultar complementaria a los acercamientos existentes.

Lo que se intenta explicar de una forma sencilla es cómo el proceso de crecimiento fractal puede generar clusters<sup>18</sup> de partículas altamente ordenadas en un espacio bidimensional, y se sugiere que los métodos y procesos recientemente desarrollados por sistemas físicos pueden constituir analogías con el crecimiento de la ciudad<sup>19</sup>. Este proceso en cuestión puede generar clusters que se encuentran lejos del equilibrio en el que su proceso de crecimiento es irreversible y por lo tanto con índices de entropía. El tipo de clusters producidos son estructuras que se parecen a las ramificaciones, que tienen una evidente auto similitud y que se puede aplicar al rango de los sistemas físicos que presenten cualquier forma por la dispersión de partículas provenientes de alguna fuente. Por ejemplo, el crecimiento físico de los dedos de aceite que se forman al desplazar agua, la cristalización de algún material, y diversas formas de filtración se han estudiado usando el crecimiento fractal. En este trabajo, por ejemplo en la Figura 4.1, se puede observar que el crecimiento de la ciudad sigue patrones en la forma de desplazamiento parecidos a los dedos que se forman por la filtración de agua en medios porosos.



**Fig. 4.1** Se puede apreciar que los patrones de formación dendrítica son parecidos a algunos fenómenos observados en la física.

<sup>18</sup>Un cluster es una expresión usada dentro del lenguaje fractal para referirse a concentraciones en forma de racimos altamente o medianamente densos.

<sup>19</sup> Sander, L. M., *Fractal growth*, Scientific American, Vol. 256, pp. 82-88, 1987.

## LA AUTOSIMILITUD DE LA FORMA

Al observar la ciudad espacialmente a través de las diferentes escalas, descubrimos que las formas que se deducen de una determinada escala, son similares a las formas vistas en detalles en otras escalas distintas. Esta autosemejanza o auto similaridad, que también se ha llamado simetría interna, significa que entre las partes hay otras "partes de partes" y en estas "partes de partes de partes"... Es decir, que cuando nos concentramos visualmente en un determinado patrón formal, como la relación estructural espacial básica de redes de comunicación y piezas mosaico del sistema urbano, y observamos esta relación formal a través de la serie de escalas del territorio, ciudad, barrio, manzana o bloque y casa, descubrimos un tipo espacial de simetría. No es una simetría de derecha e izquierda, o de arriba abajo, sino que une escalas grandes y pequeñas, que denominamos auto similitud. Ello es lo que hace que cada parte sea igual al todo, excepto por el tamaño, que es menor en cierta proporción escalar.

El modelo de agregación limitada se basa en la agregación de partículas, una a la vez, donde la dispersión es limitada o detenida por un campo de influencia alrededor del clúster en crecimiento y por el hecho de que cuando una partícula alcanza un cluster, ésta se queda ahí permanentemente<sup>20</sup>.

La forma de las ciudades puede ser visualizada de diferente manera dependiendo del nivel de abstracción con el que se está trabajando. En este trabajo en particular, se esta visualizando cómo una mancha está creciendo y presentando mayor dispersión y concentración en relación al tiempo como se ha analizado en el capítulo tres.

Al examinar éstas imágenes es claramente posible detectar "tentáculos" de desarrollo que emanan del casco central de la ciudad. Estos tentáculos tienen una forma de dendrita que generalmente siguen las principales líneas de transporte o algunas otras formas de comunicación desde el centro ó CBD a los suburbios o

---

<sup>20</sup> Witten, T. A., and Sander, L. M., *Diffusion-Limited aggregation: A kinetic critical phenomenon*, Physical Review Letters, Vol. 47, pp. 5686-5697, 1983.

desarrollos en la periferia de la ciudad. Es a través de la provisión de la infraestructura de transporte que los nuevos desarrollos pueden ser concebidos y en nuestras ciudades que tienen un fuerte crecimiento del transporte individual estos nuevos desarrollos se expanden hacia las periferias. En cierto sentido, es el sistema de transporte y sus dendritas las que presentan un comportamiento fractal y al mismo tiempo éste tiene una auto similitud<sup>21</sup>.

La auto similitud de la forma generalmente existe sobre un número restringido de escalas. Esto debe quedar claro en términos de la forma urbana. A escalas físicas tan finas como las vecindades, la geometría de la forma se convierte euclidiana, en donde las calles y residencias y otras estructuras físicas, muestran una geometría lineal. A una escala local, se encuentra fuera del rango donde la geometría fractal puede ser aplicada incluso cuando pueden existir generadores fractales que pueden producir capas altamente ordenadas. Sin embargo para nuestro estudio, el rango donde se puede esperar que la geometría de los asentamientos se vuelva irregular y auto similar, probablemente comience a un nivel distrital y continúe a un nivel regional, posiblemente al nacional e incluso a la escala continental con respecto al tipo de forma que se quiere medir.

Necesitamos también tener claro que el crecimiento de la ciudad está fuertemente ligado a la teoría urbana contemporánea. Usualmente se asume que las ciudades pueden ser examinadas con respecto a las fuerzas que "aprietan o restringen" desde el medio exterior y aquellas que "empujan o promueven" actividades que se desarrollan desde el centro a la periferia. Sin embargo, estas fuerzas que centralizan y descentralizan pueden ser presentadas a diversas escalas. Existen modelos que postulan el crecimiento de la ciudad como algún tipo de balance entre las fuerzas que atraen migrantes del campo o de alguna otra ciudad y aquéllas que hacen que se desdoble la población de los centros de la ciudad hacia la periferia. Aquí se presenta un simple pero relevante modelo que sugiere que el crecimiento debe siempre ocurrir en los ejes de la ciudad, debido a que las estructuras físicas tardan mas tiempo en desarrollarse que el tiempo que le toma a

---

<sup>21</sup> Batty, M. Generating urban forms from diffusive growth, submitted to *Environment and Planning A*, Vol 23, Forthcoming 1991.



la población moverse a la ciudad o cambiar de lugar dentro de la ciudad y buscar un acomodo permanente. De este modo, la ciudad crece en la periferia.

Así pues, cualquier ciudad, en cualquier punto, representa un balance entre la demanda de territorio para actividades en crecimiento donde pueden ser fácilmente acomodados sobre los ejes o a cierta distancia de la ciudad central o CBD, y la necesidad de estar cerca de la ciudad central donde las economías de escala son maximizadas. El costo del suelo y de la infraestructura es mayor en el centro, donde existe una competencia agresiva por el espacio; pero el costo de transporte a la periferia también disuade el crecimiento en la periferia. Este es el tipo de balance que la teoría económica de las ciudades intenta simular para predecir el tamaño, tipo y localización de las actividades económicas en la ciudad. El balance entonces se encuentra entre la accesibilidad y la economía, que es maximizada en el centro de la ciudad, y la necesidad de espacio y costos bajos del suelo que solo pueden ser alcanzados a distancias cada vez mas alejadas de la ciudad. Este balance también depende de factores independientes y contextuales tales como la tecnología de transporte, el sistema de gobierno practicado, la salud económica de la ciudad y de la nación entera y aquellos factores que afectan el balance entre restringir y promover las actividades de la ciudad<sup>22</sup>. Se puede observar gráficamente que en el crecimiento y expansión de la Ciudad de México ganan las fuerzas que hacen más dispersa la ciudad y con asentamientos cada vez más alejados de la ciudad central carentes de infraestructura, equipamiento y servicios únicamente alcanzables en la ciudad central y algunos subcentros dentro de la misma ciudad.

---

<sup>22</sup> Batty, M., Longley, P.A., and Fotheringham, A.S., Urban growth and form: Scaling, fractal geometry, and diffusion-limited aggregation, *Environment and Planning A*, Vol. 21, pp. 1447-1472, 1989.

## APLICACIÓN DEL MODELO DE AGREGACIÓN LIMITADA

El modelo sugiere un comportamiento estocástico básico, que produce una complejidad nunca ordenada en donde se acomodan clusters con forma de dendrita usando los principios básicos de agregación y dispersión. Un sistema típico de este modelo está basado en un cuadrado bidimensional con un enrejado, tal como la figura 4.2, donde una semilla es plantada en el centro. A una distancia alejada de donde se encuentra esta semilla central, una partícula es lanzada y comienza una caminata aleatoria a lugares adyacentes al enrejado, una a la vez, entrando en el campo de influencia alrededor del cluster en crecimiento, cuando una partícula alcanza al cluster en uno de sus ejes o en alguno de sus lados, ésta se queda ahí pegada, si sale del campo de influencia, la partícula ya no se toma en cuenta.



**Fig. 4.2** Un ejemplo básico de cómo un cluster puede crecer desde una semilla central

Es así como el cluster crece, el resultado es una forma dendrítica, auto similar y también una forma fractal. Cuando una semilla es plantada por primera vez, cualquiera de sus lados tiene la misma probabilidad de que una partícula se quede pegada. Cuando un lado es alcanzado por una partícula, éste tiene mayor probabilidad de ser alcanzado por más partículas. La figura 4.3 muestra una forma generada por dispersión y agregación lo que bien podría parecer el sistema de transporte y vialidad de una ciudad.

Ahora bien, siguiendo esta teoría del proceso de crecimiento fractal, se puede observar que la ciudad parece crecer en los mismos términos y formas siguiendo las características de un crecimiento en el que, por un lado, se tiene una demanda

del territorio para el crecimiento a distancias mas alejadas del CBD y, por otro lado, la necesidad de estar cerca del centro donde se pueden encontrar todos los servicios, comercio especializado, lugar de trabajo, equipamiento, etc.

Suponiendo que la semilla de la ciudad se encuentra en el asentamiento que observamos en 1910 y a partir de él se desarrolla un crecimiento físico cada vez más grande y disperso, se observan a lo largo del tiempo hasta el año 2000 que se generan tentáculos a partir de la semilla, esto es, las características de crecimiento físico sugieren un comportamiento fractal expandiéndose sobre las principales rutas de transporte y vialidad aumentando la densidad de la mancha urbana.



**Fig. 4.3** Forma generada por el modelo de agregación y dispersión limitada

De acuerdo a Sander (1987), una estructura fractal, tiene una densidad de área bien característica. Si un observador se coloca en el centro de la semilla y pudiese medir el área de tal estructura y compararla con el área total, esta tendría un comportamiento de una función potencial de exponente negativo por ejemplo,  $r^{-m}$  donde  $r$  significa la posición en coordenadas radiales y  $m$  tiene que ver con

el número fractal, ( $m=2-n$  y  $n=$  número fractal), esto significa que mientras la medida con la que se compara el área total es más grande, su densidad decae. A continuación se presenta la siguiente figura 4.4 donde el eje de las X tenemos el radio y en el eje de las Y densidad, se puede observar entonces que a medida que pasa el tiempo, a partir de 1910, la densidad dentro de la mancha urbana muestra un aumento considerable, sin embargo las curvas que representan a los años 1986, 1996 y 2000 casi se encuentran pegadas, demostrando así que a partir de 1986, de acuerdo a este estudio, los nuevos asentamientos en la periferia y dentro de la ciudad mantienen una densidad elevada con respecto a los años anteriores.

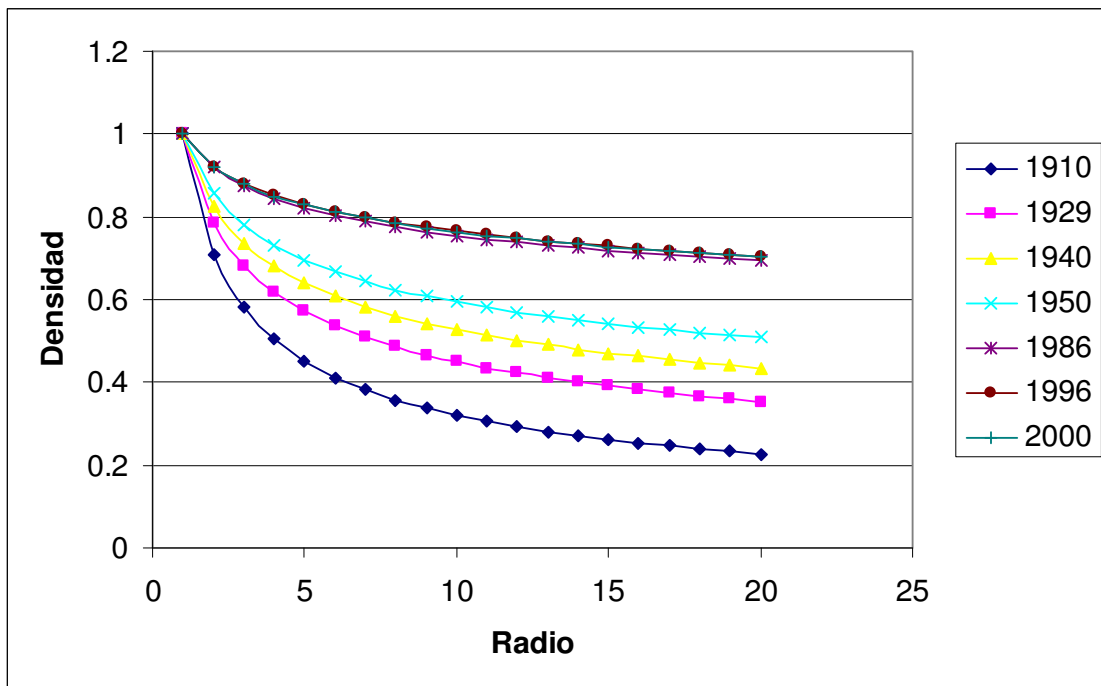


Fig. 4.4

RADIO	1910	1929	1940	1950	1986	1996	2000
1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.709962579	0.786289406	0.824656527	0.854891983	0.918752499	0.922448686	0.922133798
3	0.581050368	0.683127955	0.736709048	0.779977143	0.874321293	0.879902857	0.879426838
4	0.504046864	0.618251029	0.680058387	0.730840303	0.844106154	0.850911578	0.850330741
5	0.451418581	0.572202692	0.639134351	0.69486879	0.821390434	0.829083644	0.828426647
6	0.412524018	0.537136274	0.607531925	0.666796206	0.803284873	0.811665234	0.81094921
7	0.382265525	0.509169996	0.582034699	0.643947849	0.788288556	0.79722399	0.796460228
8	0.357854412	0.486124235	0.560814587	0.624789516	0.775524639	0.784922267	0.784118716
9	0.33761953	0.466663803	0.542740222	0.608364343	0.764437724	0.774229038	0.773391563
10	0.3204903	0.449916915	0.527066314	0.594037758	0.754654514	0.764787118	0.76392021
11	0.305744914	0.435285837	0.513277842	0.581368646	0.745912427	0.756345096	0.755452291
12	0.292876616	0.422344561	0.501005167	0.570038731	0.738019985	0.748719528	0.747803675
13	0.281517749	0.410779777	0.4899747	0.559811305	0.730833407	0.741772597	0.740836032
14	0.271394218	0.400354974	0.479978713	0.550505854	0.72424208	0.735398222	0.734442895
15	0.262296933	0.390887655	0.470856059	0.541981773	0.718159147	0.729513067	0.728540627
16	0.254063241	0.382234335	0.462479409	0.534127548	0.7125152	0.724050514	0.723062369
17	0.246564453	0.37428036	0.454746546	0.526853345	0.707253935	0.718956497	0.717953865
18	0.239697232	0.366932804	0.447574266	0.5200858	0.702329069	0.714186558	0.713170499
19	0.233377515	0.36011541	0.440894011	0.513764275	0.697702111	0.709703712	0.708675157
20	0.22753612	0.353764904	0.434648675	0.507838117	0.69334072	0.705476872	0.704436645

**Tabla 4.1**

La tabla 4.1 muestra los valores que se le dieron al radio empleado en el análisis de la mancha urbana, estos valores son arbitrarios, es decir representan cualquier medida ya sea en metros, kilómetros o píxeles. Se emplearon estas medidas solo para observar que la mancha urbana tiene un comportamiento fractal, y en efecto lo tiene, su desarrollo en el tiempo supone que seguirá la misma tendencia de acuerdo a la teoría de agregación y dispersión, por tanto se pueden hacer predicciones y simulaciones de cómo podría ser la forma de la mancha urbana en un escenario futuro.

De acuerdo a la teoría fractal, el crecimiento físico de la Ciudad de México tiene un comportamiento lejos del equilibrio, donde las fuerzas que promueven el crecimiento desde el interior hacia el exterior tienen mayor influencia generando así una ciudad más dispersa sobre las principales vías de transporte y mucho más concentrada al interior, esto es, a medida que pasa el tiempo se esta consumiendo y ocupando más territorio, ya que los nuevos desarrollos son más densos.

Es de suponer entonces que al interior de la ciudad existen concentraciones que podrían ser las que generan una atracción hacia el centro de la ciudad, para desarrollar las actividades que promueven y generan la economía de la ciudad y al mismo tiempo su desarrollo físico espacial.

El capítulo siguiente tratará de dar explicación a tales concentraciones siguiendo la teoría fractal, y el mismo desarrollo analítico de los capítulos anteriores.

## **CAPITULO 5**

### **ALCANCES Y RESULTADOS**

En los capítulos anteriores se determinó cómo el análisis fractal puede generar datos importantes y de manera sencilla siguiendo un procedimiento matemático y de observación sobre imágenes que describen el crecimiento físico de la mancha urbana de la Ciudad de México, sin lugar a dudas se pueden hacer éste tipo de análisis gracias a las analogías con los sistemas físicos en crecimiento.

La concepción pura de la ciudad nos lleva a pensar la ciudad como una concentración de actividades que se han desarrollado a lo largo del tiempo, las cuales generan movimientos de población tanto físicos como económicos para satisfacer las necesidades básicas de los individuos. Estas concentraciones que se ven reflejadas como mosaicos desde la perspectiva de la estructura urbana, también crecen físicamente al interior de la mancha urbana, en conjunto generan una expansión física de la ciudad y mayores movimientos tanto de población como de capital económico. Se genera entonces un crecimiento interno por ejemplo de unidades económicas o de servicios, de viviendas, de equipamiento urbano, etc. A este tipo de crecimiento también se le conoce como crecimiento endógeno, es decir aquel que se genera al interior del sistema que lo está produciendo.

El modelo de agregación limitada, es una referencia clara para medir éste tipo de crecimiento, es de suponer entonces que si el proceso de crecimiento que propone dicho modelo nos dice que de alguna fuente surgen o son lanzadas partículas que alcanzan una semilla y cuándo es alcanzada, tiene mayores posibilidades de crecimiento, puede describir también la aglomeración económica y de servicios que sólo puede ser concebida dentro del territorio urbano.

## LA AGLOMERACIÓN ECONÓMICO ESPACIAL

La economía urbana comparte rasgos comunes con las teorías del crecimiento Físico. Por un lado, la existencia de rendimientos crecientes, efectos externos o la estructura monopolística de los mercados son la base a la vez de procesos de aglomeración espacial de las actividades económicas y de las dinámicas de acumulación en el tiempo<sup>23</sup>.

Por otro lado, un número importante de análisis empíricos ponen de manifiesto la vinculación de los fenómenos de urbanización y de crecimiento<sup>24</sup>, o la tendencia al agrupamiento espacial de las actividades generadoras de crecimiento tales como las unidades económicas o de servicios, infraestructuras de comunicación, etc.

Puede considerarse, en primer lugar, que las teorías del crecimiento endógeno constituyen el marco explicativo general, y que la concentración territorial de las actividades es un factor más de crecimiento. Así, la implicación de los factores espaciales en los mecanismos de crecimiento endógeno se realiza de la siguiente forma: la concentración de las actividades económicas favorece el crecimiento económico, por lo que todos los elementos que conducen a la formación de las aglomeraciones explican y condicionan este crecimiento. Puede entonces construirse, como para el resto de factores de crecimiento tradicionalmente integrados en estas teorías, un proceso de acumulación espacial de las actividades económicas.

En otras palabras, existe, a imagen del capital físico, un “capital espacial” cuya mayor o menor eficacia condiciona el crecimiento<sup>25</sup>. Este capital espacial comprende, a la vez, una serie de actividades generadoras de crecimiento (comercio especializado, innovaciones, servicios a empresas, sector terciario

---

<sup>23</sup> Glaeser, E.L., *Economic Growth and Urban Density: a Review Essay*, Working Paper n° E-94-7, Hoover Institution, Stanford University, 1994.

<sup>24</sup> Baumont, C. y Huriot, J.M., *Economic Geography and Growth: Recent Advances and New Results*, 37th European Congress of the Regional Science Association, Rome, 26-29 august, Working Paper, LATEC, Dijon, 1997.

<sup>25</sup> Kubo, Y., *Scale economies, regional externalities and the possibility of uneven regional development*, Journal of Regional Science, 35, 1, 1995, pp. 29-42.



superior, infraestructuras de transporte y comunicación...) y una organización espacial particular de estas actividades: la aglomeración.

Por lo tanto, la aglomeración de estas actividades es un factor de crecimiento que permite estimular a otros factores de producción de manera directa (mejora de los procesos de producción gracias a la innovación, mejoras de los intercambios de información gracias a las infraestructuras de transporte y comunicaciones...) e indirecta, a través de las economías de aglomeración.

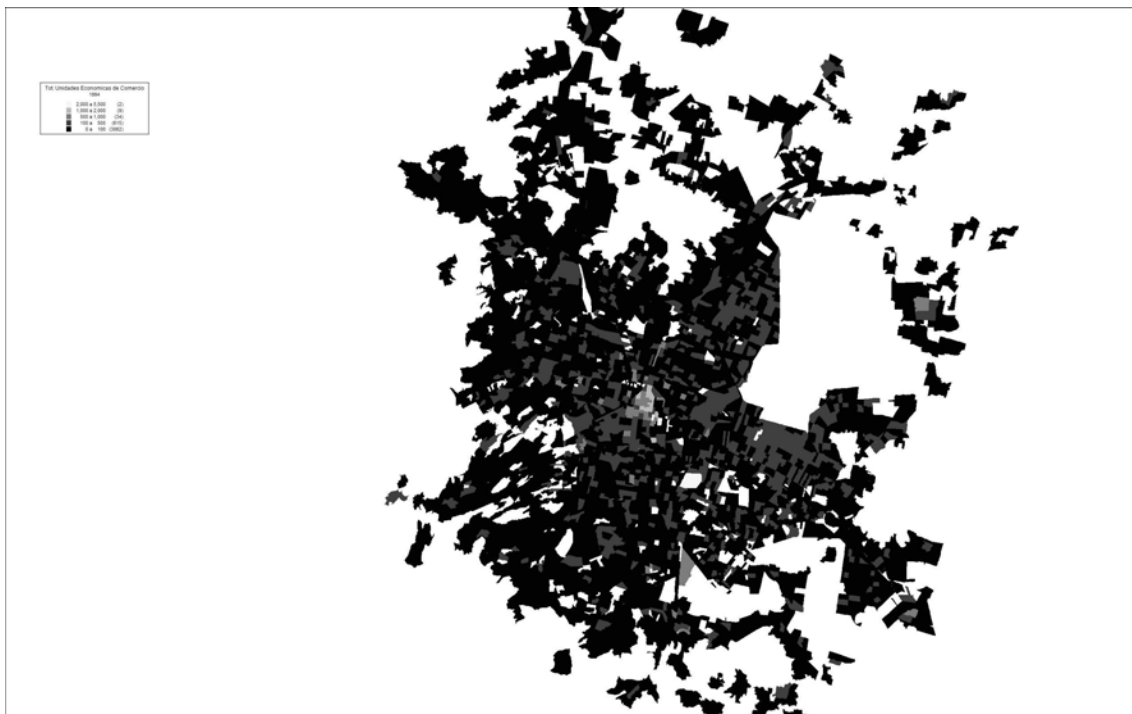
Este tipo de integración de la concentración territorial de las actividades en el seno de las teorías de crecimiento endógeno, centra su interés en los elementos explicativos del crecimiento, sin preocuparse por las elecciones de localización espacial entre las diferentes zonas del territorio urbano. Para poder diferenciar las diferentes zonas en función de su energía potencial de crecimiento, se identifican diferentes procesos de acumulación territorial (Krugman, P. 1964).

- 1.- Por debajo de un determinado nivel de concentración, no hay suficientes actividades como para mantener el proceso de acumulación y para que se dé la existencia de externalidades de aglomeración positivas.
- 2.- Una vez alcanzado ese nivel mínimo de concentración, la acumulación espacial de las actividades puede ponerse en marcha y las economías de aglomeración positivas refuerzan el crecimiento.
- 3.- Más allá de otro nivel límite, el proceso de acumulación se torna menos eficaz dada la congestión y las externalidades negativas de aglomeración, que vienen a ralentizar el proceso de crecimiento.

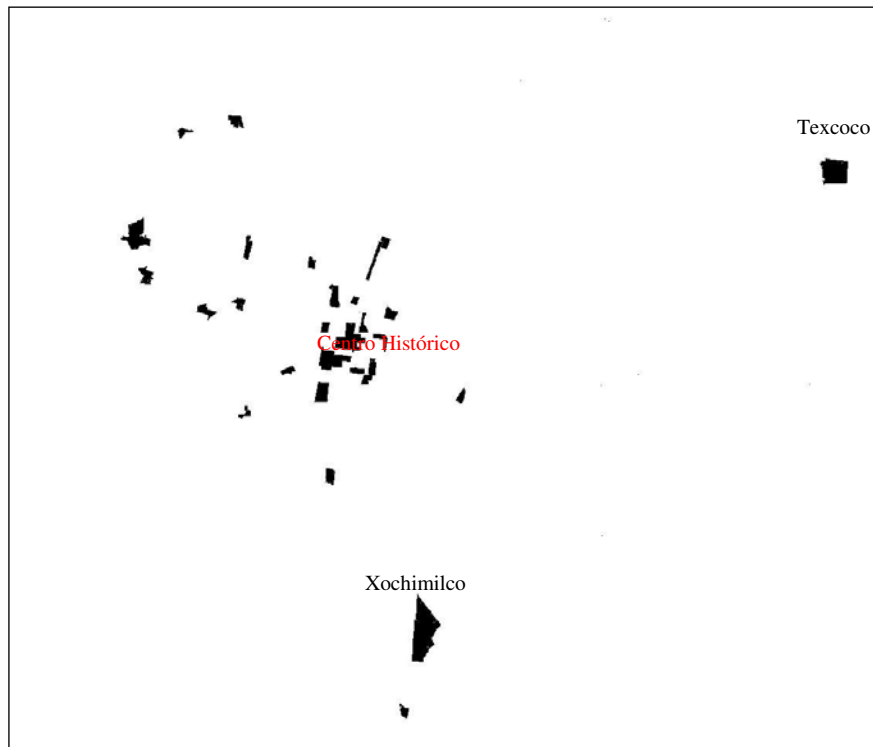
### **ANÁLISIS DE AGLOMERACIÓN DE COMERCIOS Y SERVICIOS**

En este contexto entonces, para medir las concentraciones y añadir datos importantes a la teoría económica urbana, si consideramos a las AGEBS de la Ciudad de México como semillas y siguiendo las bases teóricas del análisis fractal, es de suponer que se pueden hacer inferencias sobre qué cantidad de AGEBS tienen mayores posibilidades de crecimiento, cuál es ese determinado nivel de concentración requerido y cuál es el nivel mínimo de concentración.

Para tales efectos se han considerado los censos económicos 1994 y 1999 de la ciudad de México, cabe resaltar que solo se tomaron los datos de los municipios más representativos para generar una mancha urbana con diferentes escalas de grises como se muestra en la fig. 5.1. Los Mapeos tanto de servicios como de comercio muestran la concentración espacial de éstos generados a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se separaron en escala de grises para poder evaluarlos en el mismo software aplicado en el capítulo 3, el cual mide la dimensión fractal de cada concentración tanto de comercios como de servicios. La figura 5.2 es un ejemplo de cómo se han separado las diferentes concentraciones todas ellas con la misma escala en píxeles, 2552 X 1601 en una imagen de 8 bits.



**Fig. 5.1** Total de Unidades Económicas de Comercio 1994.



**Fig. 5.2** concentración de 500 a 1000 Unidades Económicas de Comercio por cada AGEB 1999

Las AGEBS de comercio, de acuerdo al censo económico de 1994 y de 1999, se han separado en diferentes rangos de concentración de unidades económicas: de 0 a 100, de 100 a 500, de 500 a 1000, de 1000 a 2000 y de 2000 a 5500; las AGEBS de servicios para los mismos años se han separado en rangos de 0 a 100, de 100 a 200, de 200 a 300, de 300 a 400 y de 400 a más. Todo esto con la finalidad principal de representar gráficamente el comportamiento de concentración territorial.

La figura 5.3 muestra los resultados a los que se ha llegado a través del análisis fractal de cada una de las concentraciones del total de unidades económicas, analizadas por separado para los años de 1994 y 1999.

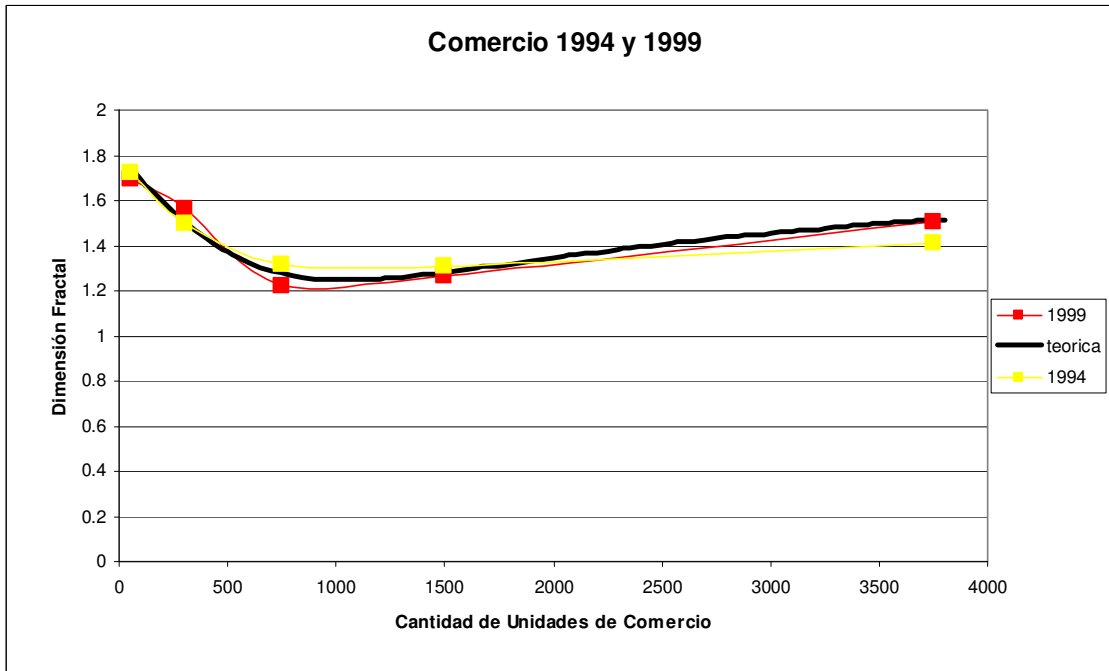


Fig. 5.3

Lo que representa la gráfica anterior, significa que las AGEBS que contienen muy pocas unidades económicas de comercio se encuentran por todos lados y con mayor cantidad en la periferia llegando casi al 1.8, lo que significa también que es la que tiene mayores posibilidades de crecimiento de su dimensión fractal. De acuerdo a las teorías económicas de aglomeración, existe un mínimo de concentración para poner en marcha la acumulación positiva la cuál se puede observar en el valle que genera la curva encontrándose éste entre las 500 y las 1000 unidades económicas de comercio, a partir de ahí, la curva se empieza a levantar poco a poco, esto es, las AGEBS que comienzan a tener mayor cantidad de unidades de comercio crecen más lentamente y el territorio que ocupan es menor. De acuerdo a este análisis, el nivel máximo de aglomeración, donde más allá de ese límite, las externalidades se vuelven negativas por la congestión que es causada por las mismas, se encuentran entre las 3500 y las 4000 unidades, llegando casi al 1.6 de su dimensión fractal.

Resulta bastante interesante que cuando se analizan el total de las unidades económicas de servicios, presentan el mismo comportamiento con una curva

similar, sin embargo, la localización de las AGEBS es bastante diferente de las de comercio; la figura 5.4 muestra la gráfica correspondiente a los servicios.

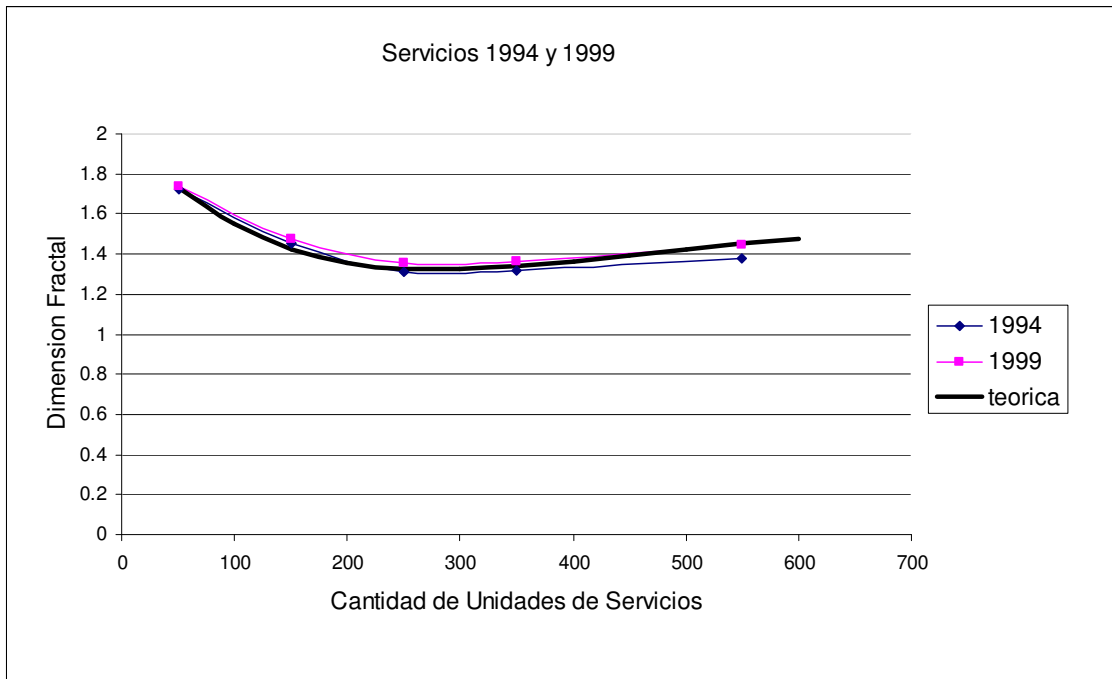
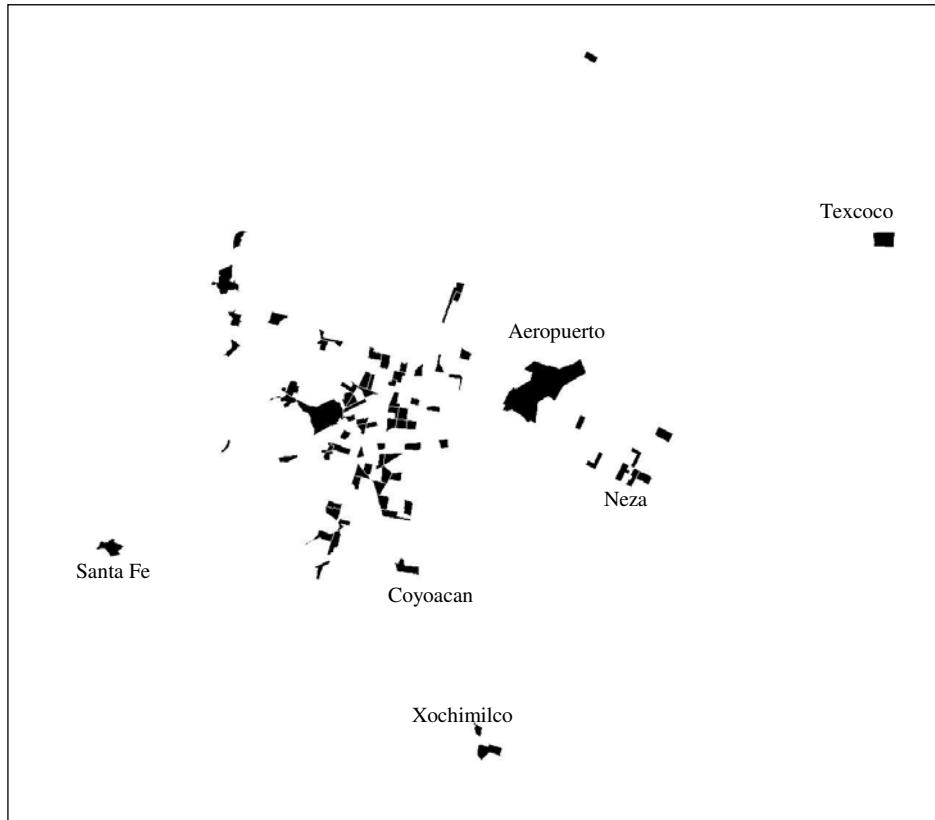


Fig. 5.4

Al igual que la curva que presentan las unidades de comercio, el mínimo para que la economía de aglomeración de los servicios sea positiva y a partir de esa cantidad crezca, se encuentra entre las 200 y 300 unidades, a partir de esta cantidad, el crecimiento es más lento como lo muestra la grafica, las AGEBS con un nivel más bajo de unidades, se encuentran repartidas por toda la ciudad las cuales hay muchas, siendo su dimensión fractal casi del 1.8, significa también que estas AGEBS crecen con rapidez , más allá de las 500 y 600 unidades de servicios, la aglomeración se vuelve negativa.

La figura 5.5 muestra la imagen de las unidades económicas de servicios que representa territorialmente la concentración mínima para que la acumulación sea positiva.



**Fig. 5.5** AGEBS que contienen de 200 a 300 unidades de servicios para el año 1999.

Desde el punto de vista meramente fractal lo que la curva representa es que, las AGEBS que se encuentran antes del punto de acumulación mínima, se encuentran por todos lados, con mayoría en las periferias, ocupando mucho territorio, las AGEBS que empiezan a tener el mínimo de acumulación positiva se encuentran dispersas, en una fracción pequeña del territorio comparada con el total del área y aquellas acumulaciones con una cantidad muy elevada de unidades económicas tanto de comercio como de servicios, ocupa un espacio menor del territorio, esto es son muy densas, es por ello que la teoría nos dice que es aquí donde las externalidades negativas de aglomeración se presentan por la congestión que ellas mismas generan.

Así pues, la puesta en relación de las teorías de crecimiento fractal y las de la Economía Urbana pone de manifiesto la existencia de un proceso de causación acumulativa (Myrdal, G. 1962) en los siguientes términos: la aglomeración espacial se revela como un factor de crecimiento, y el crecimiento, a su vez, favorece la aglomeración.

Si bien es cierto que este tipo de observaciones parecen ser obvias, lo que la dimensión fractal nos propone es un número que nos permite cuantificar el comportamiento de crecimiento específico y añadir mayor certidumbre a la medición de los procesos urbanos que se están analizando.

## CONCLUSIONES

El pensamiento territorial y urbanístico sobre los procesos de crecimiento y las formas espaciales de las ciudades han experimentado muy recientemente un renovado impulso y cambio radical. Los recurrentes y anticuados modelos gravitatorios aplicados al crecimiento y forma de las ciudades con pretensiones científicas y totalizadoras, han sido progresivamente sustituidos por teorías que enfatizan la manera cómo conjuntos de acciones físicas puntuales o decisiones aparentemente descoordinadas o caóticas dan lugar a patrones formales globales autoorganizados y desde un punto de vista determinista resultan ordenados.

La nueva comprensión de los sistemas complejos, de la teoría del caos y de los fractales iniciada por B. Mandelbrot a principios de los ochenta, obliga a replantearse desde nuevas bases los fundamentos del planeamiento a medida que aparecen nuevos métodos de manejar la complejidad.

La forma de las ciudades es compleja, porque es el resultado de un proceso dinámico de agregación y transformación, producto de multitud de decisiones aleatorias, erráticas y casuales, a lo largo de períodos muy dilatados de tiempo. Las ciudades, como uno de los artefactos humanos más sofisticados, tienen ya más de cuatro mil años, y sus formas están hechas de infinitas combinaciones de elementos básicos, formalmente muy simples en el origen, que por iteración variable, acaban convirtiéndose en muy complicadas y complejas.

Lo que este trabajo viene planteando, es tomar en cuenta los nuevos trabajos e investigaciones que son descritos por los sistemas físicos y llevarlos a la disciplina del urbanismo al momento de medir los procesos que representan un crecimiento aparentemente caótico al observarlo.

A lo largo de los análisis que se realizaron, la expansión y el crecimiento físico de la Ciudad de México mantiene una relación de comportamiento fractal. Este análisis propone de forma básica y sencilla, los primeros pasos hacia la modelación de los sistemas urbanos en crecimiento con fundamentos en la teoría fractal a fin de predecir su crecimiento y forma. Como se ha dicho en el capítulo 4,



la modelación no es el alcance de este trabajo ya que requiere de conocimientos avanzados de lenguajes de programación.

El aporte fundamental que se propone es una nueva forma de análisis, aunque se reconoce que no es una alternativa a la teoría urbana actual ni tampoco resuelve los problemas urbanos, pero lo que si puede hacer el análisis fractal es darnos una medida precisa del fenómeno bajo estudio y al mismo tiempo añadir datos importantes tales como la densidad de la mancha urbana analizada o la complejidad cuantificable de la estructura vial.

Al igual que el crecimiento físico de la ciudad, los comercios y los servicios presentan un comportamiento fractal y es a través de este análisis que se pudo determinar qué nivel de acumulación es el necesario para que pueda crecer favorablemente la aglomeración de estas actividades.

La ciudad crece y al mismo tiempo se vuelve más compleja, los datos que arroja este tipo de análisis y las construcciones matemáticas nos permiten simplificar parte del fenómeno urbano y hacer inferencias sobre su comportamiento con la ayuda de la teoría urbana actual.

Sin duda alguna este trabajo es un análisis sencillo de licenciatura teniendo siempre en cuenta desarrollar una metodología básica para seguir una línea de investigación con las características de los sistemas físicos en crecimiento.

## BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

Ackerman, M.: *Hilbert Curves Made Simple*. Byte Bagazine. Junio: pp. 137-138. 1986.

Ardiό, J.E.: *Ciudades en América Latina*, Paidós, Buenos Aires, 1972

Bacon, E.N.: *Design of cities*, Penguin, 1967.

Batty, M., Longley, P.A., and Fotheringham, A.S., *Urban growth and form: Scaling, fractal geometry, and diffusion-limited aggregation*, Environment and Planning A, Vol. 21, pp. 1447-1472, 1989.

Batty, M.: *Cities as fractals*, Springer, 1991.

Batty, M.: *Generating urban forms from diffusive growth*, submitted to Environment and Planning A, Vol 23, forthcoming 1991.

Baumont, C. y Huriot, J.M.: *Economic Geography and Growth: Recent Advances and New Results*, 37th European Congress of the Regional Science Association, Rome, 26-29 august, Working Paper, LATEC, Dijon, 1997.

Bosque J.: *Sistemas de información geográfica*, Rialp, 1994.

Chaitin, G.: *Randomness and Mathematical Proof.*: Scientific American. Mayo: pp. 47-52, 1975.

Chapin J. R.: *Planificación del uso de suelo urbano*, 1977.

DDF. *Programa de Reordenación Urbana y Protección Ecológica del Distrito Federal*, México, 1984.

DDF. *Transporte y Vialidad de la Ciudad de México 1994-1997*, México, DDF-Limusa, 1997.

Echenique Marcial.: *Modelos, una discusión*. Separata de revista de planificación. Santiago, Noviembre 1970.

Gilbert, W. J. *Fractal Geometry Derived From Complex Bases*. Mathematical Intelligencer 4: pp. 78 – 86. 1989.

Glaeser, E.L.: *Economic Growth and Urban Density: a Review Essay*, Working Paper nº E-94-7, Hoover Institution, Stanford University, 1994.

Gruber, P. & Wills, J. M.: *Convexity and its Applications*. Cambridge University Press. 1983.

Hall Peter, *Cities of tomorrow*, Blackwell, 1988.

Iracheta C., Alfonso X. (Coord.). *El Suelo Recurso Estratégico para el Desarrollo Urbano*. Toluca, Gob. Edo. de Méx.-UAEM, 1984.

Kubo, Y.: *Scale economies, regional externalities and the possibility of uneven regional development*, Journal of Regional Science, 35, 1, 1995, pp. 29-42.

Mandelbrot, B.: *The fractal geometry of nature*, W. H. Freeman & Co. 1977.

Mandelbrot, B.: *Fractals: Form, Chance and Dimension*. W. H. Freeman & Co. 1978.

Monroy Olivares, César. *Curvas Fractales*. Ed. Alfaomega. Cd. De México, 2002

Orear Jay, Ed. Limusa, *FISICA*, 1989.

Perló Cohen, Manuel. *Estado, Vivienda y Estructura Urbana en el Cardenismo. México*, UNAM, 1981.

Poder Ejecutivo. *Programa Nacional de Desarrollo Urbano 1995-2000*. 1996.

Sander, L. M.: *Fractal growth*, Scientific American, Vol. 256, pp. 82-88, 1987.

Weber Max, *THE CITY*, Free Press, New York, 1966.

Wilson A.G.: *Entropy in Urban and Regional Modeling* Pion, London. 1970.

Witten, T. A., and Sander, L. M.: *Diffusion-Limited aggregation: A kinetic critical phenomenon*, Physical Review Letters, Vol. 47, pp. 5686-5697, 1983.

El programa que se utilizó para el análisis de las imágenes se puede descargar de la siguiente página:

[www.imagejdocu.tudor.lu](http://www.imagejdocu.tudor.lu)

Es un programa de distribución libre multiplataforma Windows, Mac, IUNIX/Linux. También se pueden encontrar ahí los manuales y toda la documentación para aprovechar al máximo el programa.

Las imágenes satelitales han sido descargadas de las siguientes páginas:

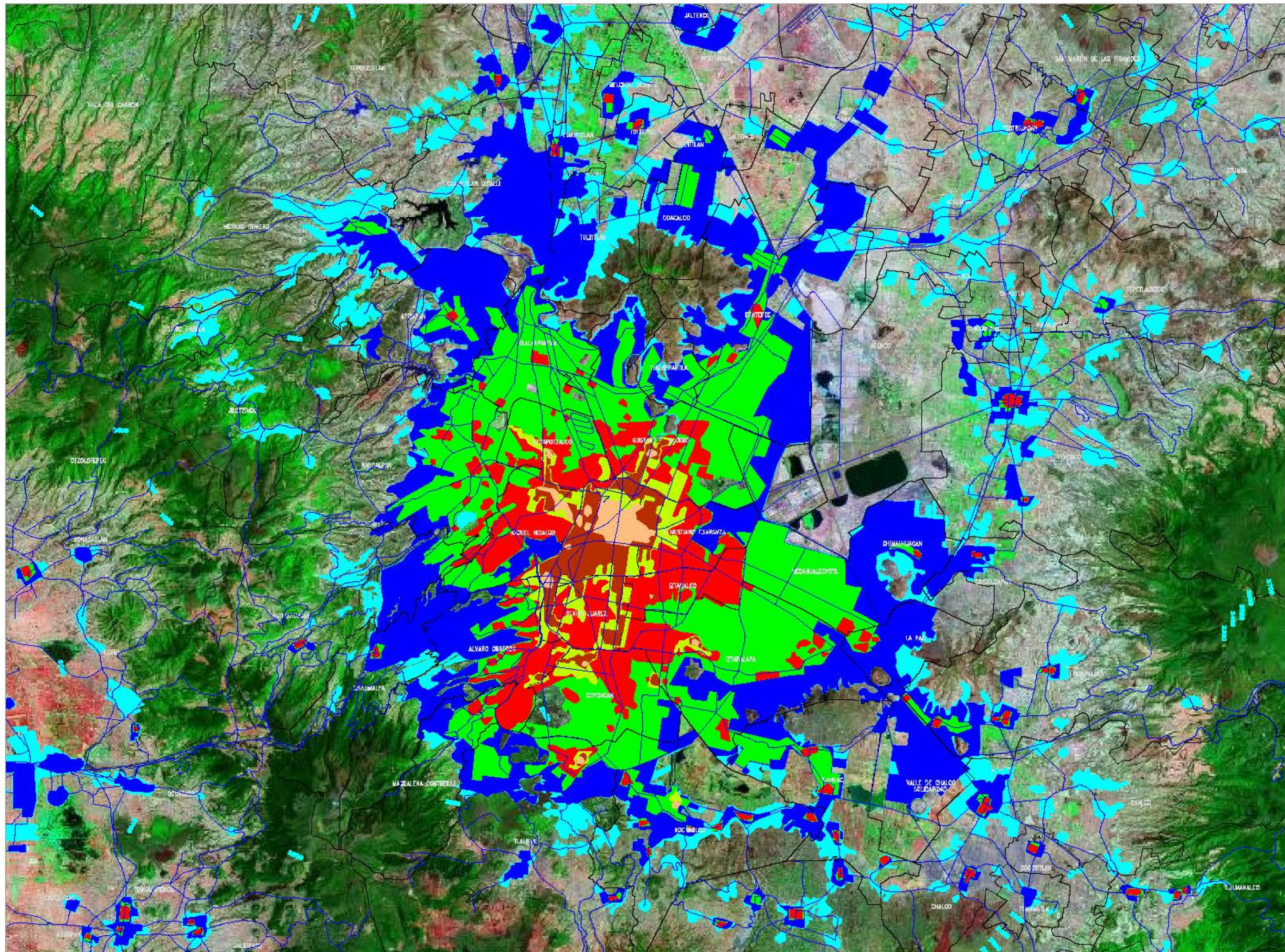
<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>

<http://www.nasa.gov/>

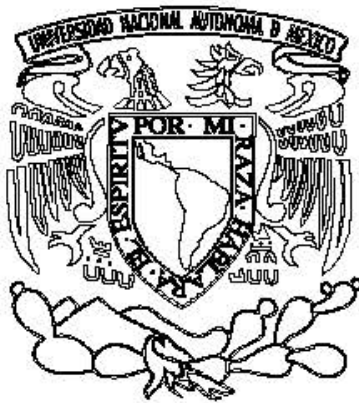
Se pueden descargar imágenes de todo el territorio mexicano con una resolución máxima de 1600 píxeles del año 1990 y 2000.

Las técnicas de procesamiento de imágenes satelitales en idioma español por bandas de color se pueden bajar de la siguiente página:

[www.gabrielortiz.com](http://www.gabrielortiz.com)



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE ARQUITECTURA  
LICENCIATURA EN URBANISMO

**SIMBOLOGIA**

**POBLACIONES  
NEZAHUALCOYOTL**

- LÍMITES**
- LÍMITE MUNICIPAL
  - LÍMITE DELEGACIONAL
  - LÍMITE ESTATAL
  - VALIDAD AÑO 2000

**RELIEVE**

CURVAS DE NIVEL @20m

**CRECIMIENTOS HISTÓRICOS**

- MANCHA URBANA 1910
- MANCHA URBANA 1929
- MANCHA URBANA 1941
- MANCHA URBANA 1950
- MANCHA URBANA 1981
- MANCHA URBANA 1986
- MANCHA URBANA 2000

**TEMA**

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO PERIFÉRICO  
DE LA CIUDAD DE MÉXICO  
MEDIANTE TÉCNICA FRACAL

DOMINIO DE PLAZA:

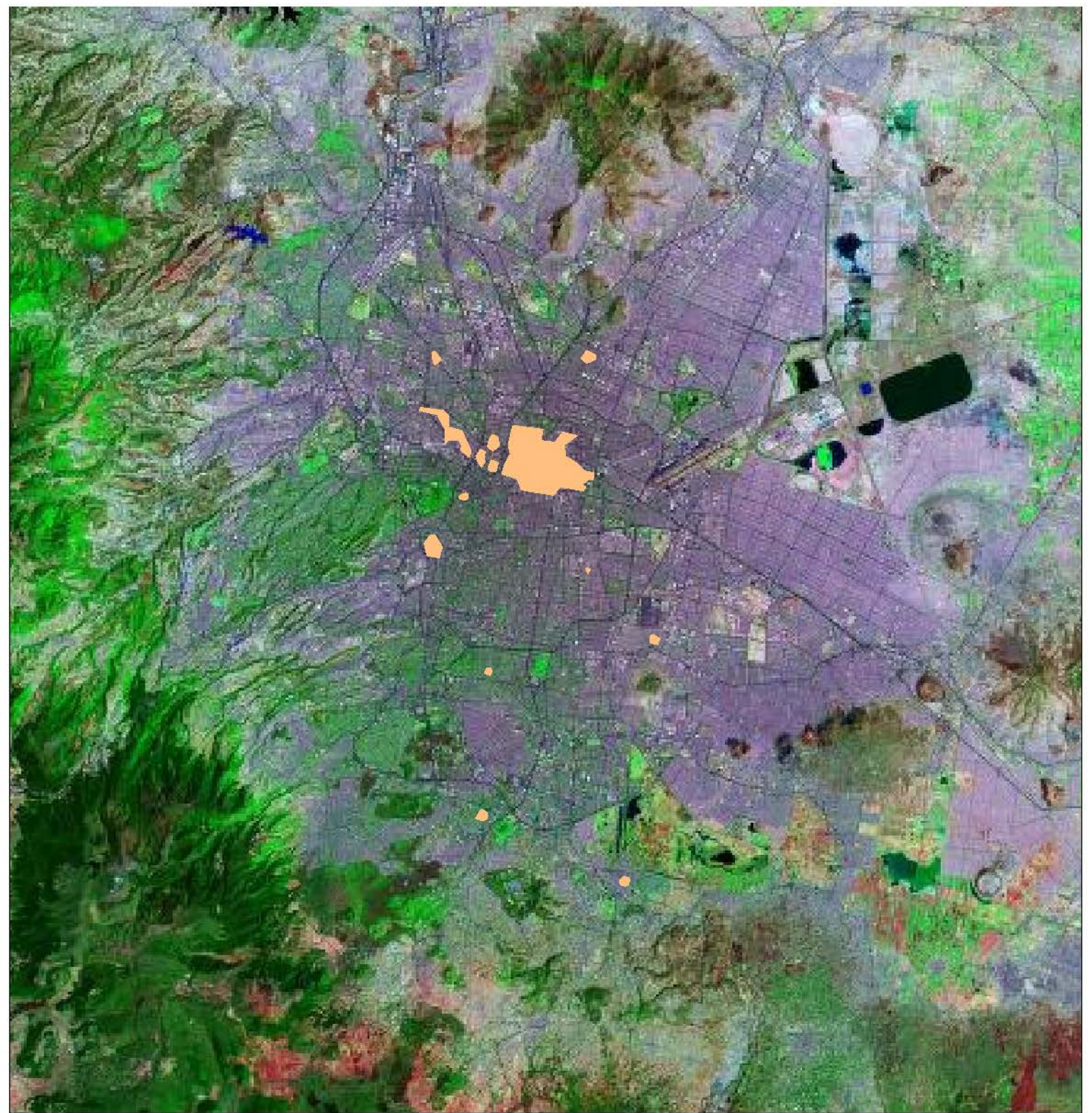


**CRECIMIENTO HISTÓRICO  
CIUDAD DE MÉXICO**

REALIZÓ:  
MIGUEL ÁNGEL MATTIAS PÉREZ

ESCALA GRÁFICA 1:250,000

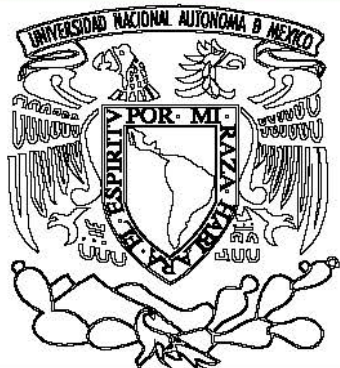
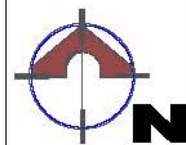
FECHA: MARZO 2008 PLANO No: T1



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**LICENCIATURA EN URBANISMO**

**Plano de crecimiento de la Ciudad de México  
1910.**



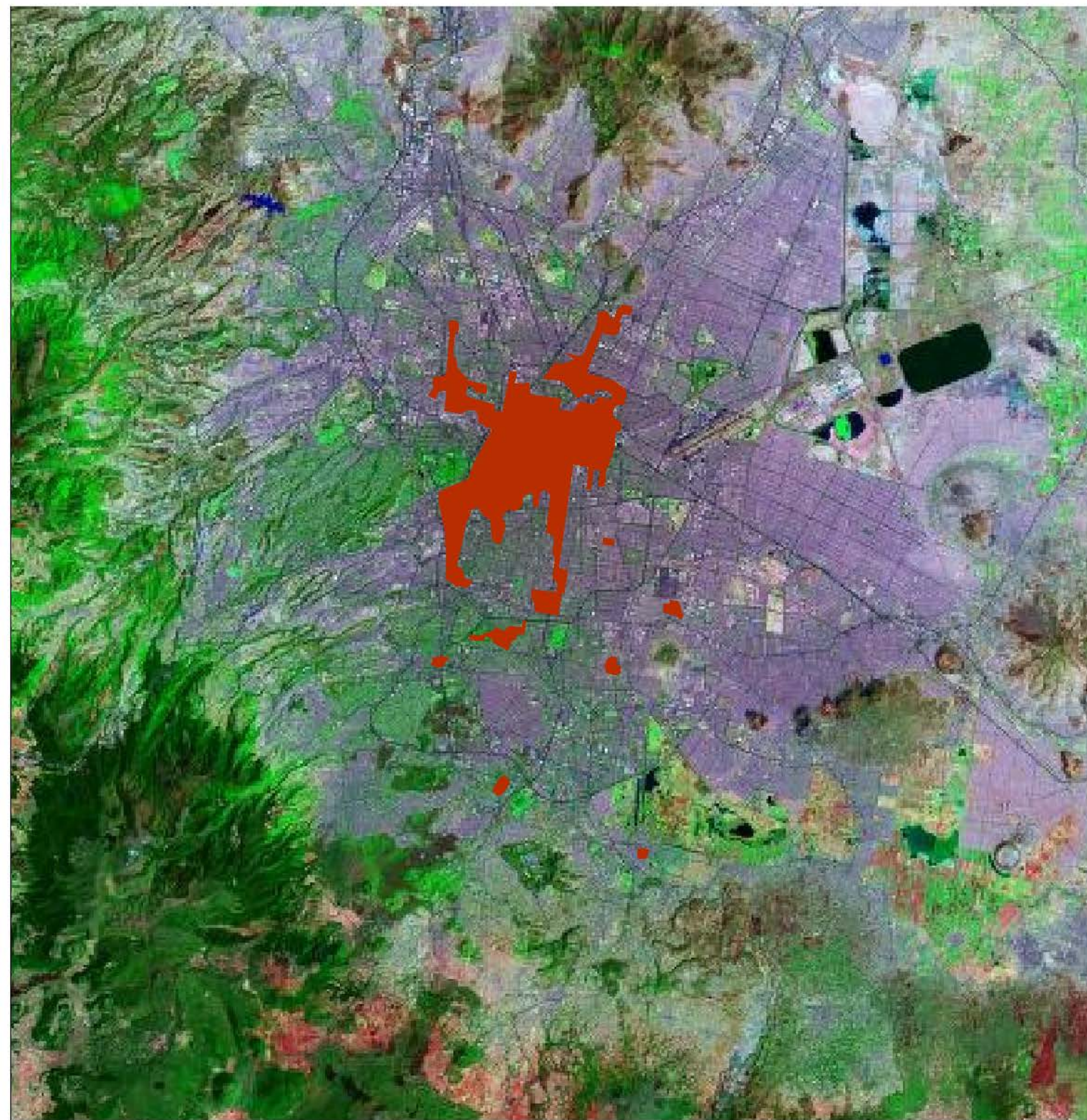
# TESIS

**ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO FÍSICO  
DE LA CIUDAD DE MÉXICO  
MEDIANTE TEORÍA FRACTAL**

REALIZO:  
MIGUEL ÁNGEL MATÍAS PÉREZ

ESCALA GRÁFICA 1:250,000

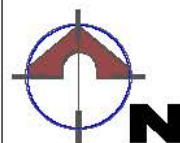
FECHA: AGOSTO 2008 PLANO No: C1



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**LICENCIATURA EN URBANISMO**

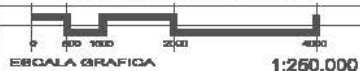
**Plano de crecimiento de la Ciudad de México  
1929.**



# TESIS

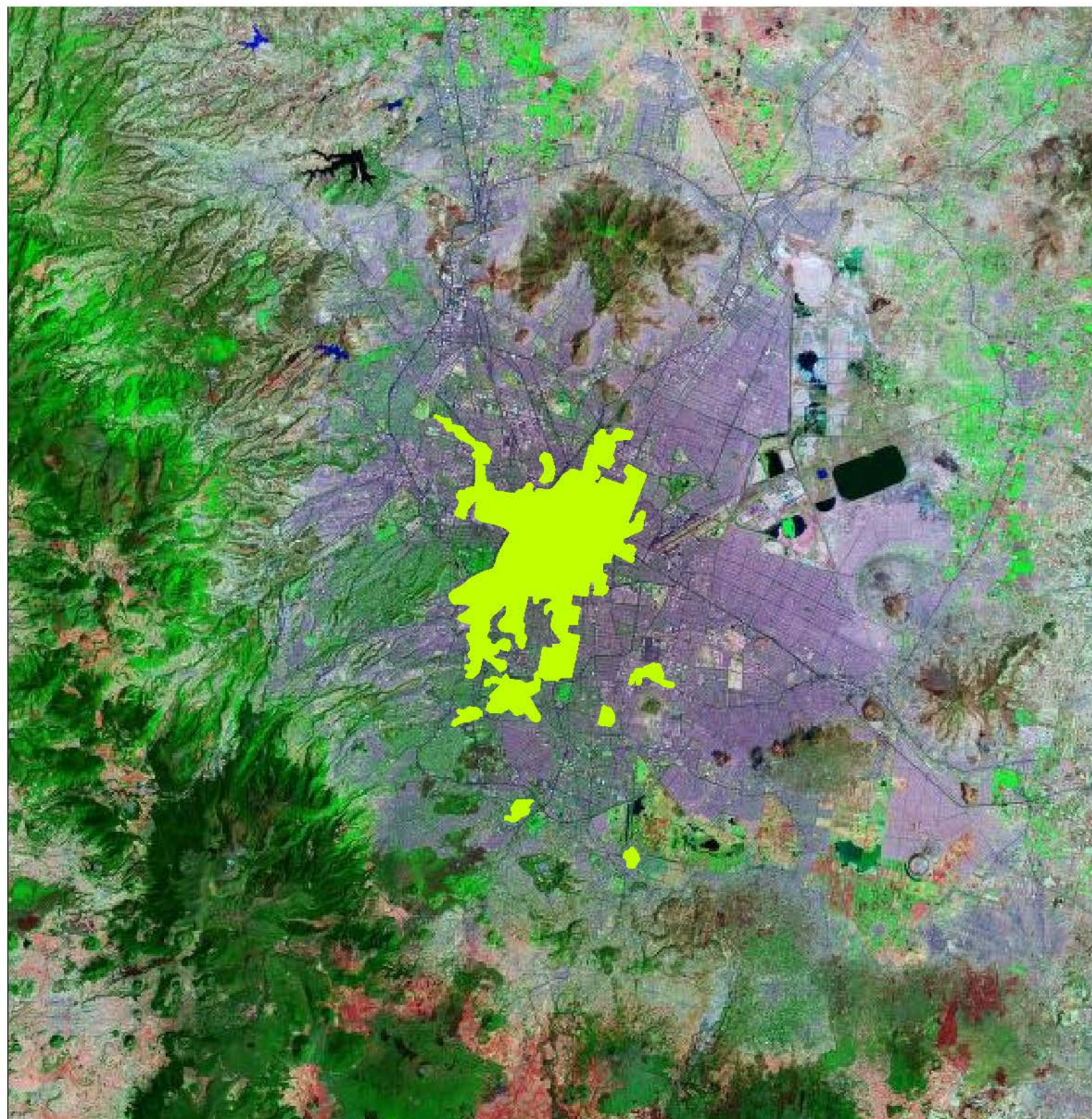
**ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO FÍSICO  
DE LA CIUDAD DE MÉXICO  
MEDIANTE TEORÍA FRACTAL**

REALIZO:  
MIGUEL ÁNGEL MATÍAS PÉREZ



FECHA: AGOSTO 2008 PLANO No: C2

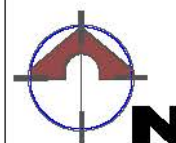




**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**LICENCIATURA EN URBANISMO**

**Plano de crecimiento de la Ciudad de México  
1941.**



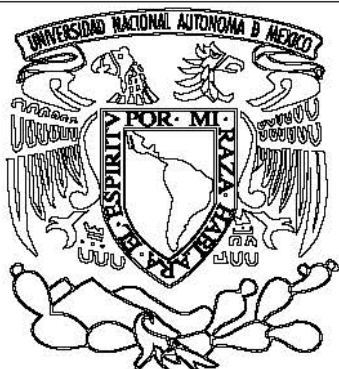
# TESIS

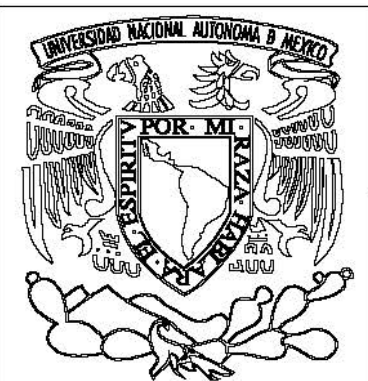
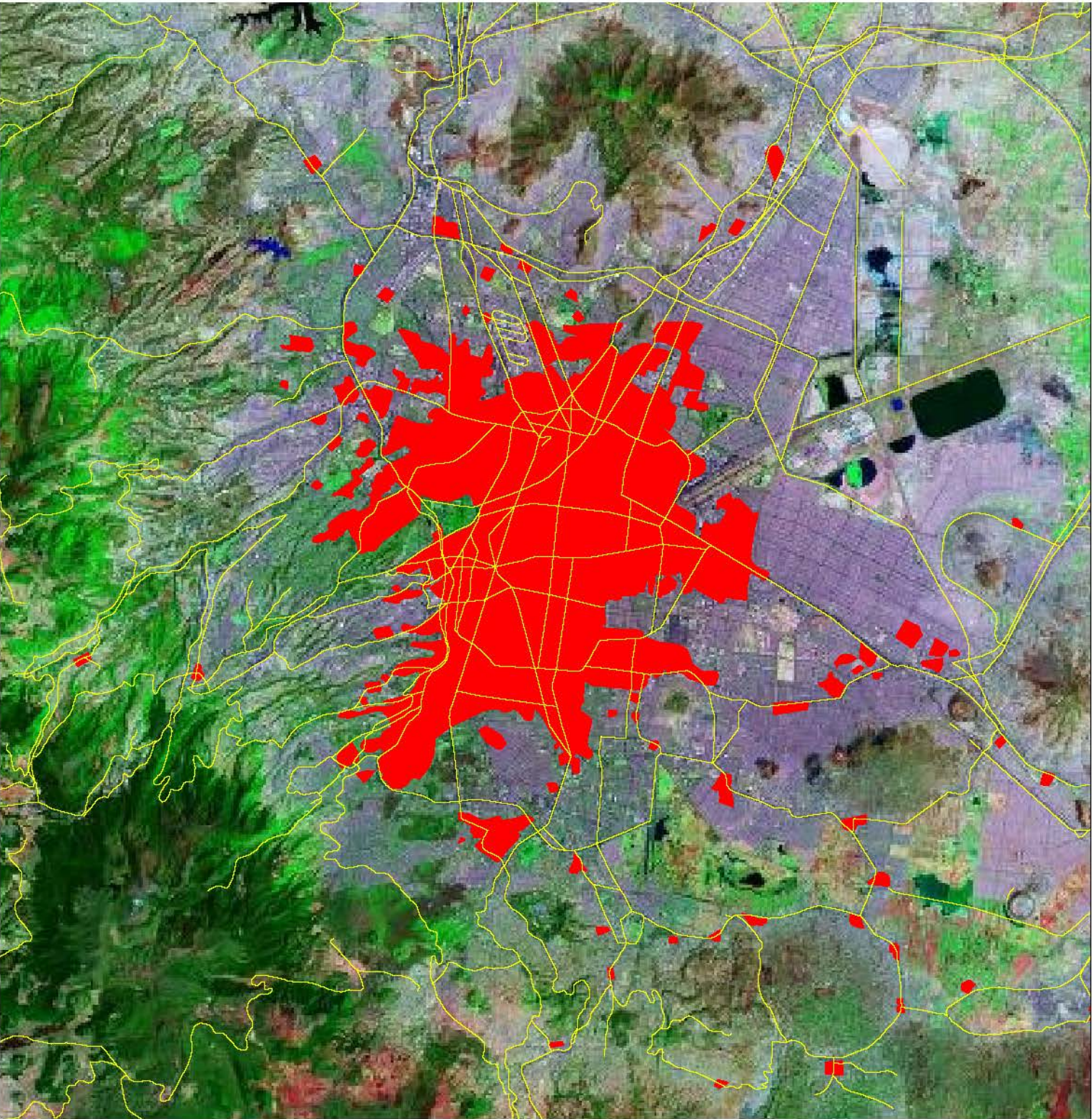
**ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO FÍSICO  
DE LA CIUDAD DE MÉXICO  
MEDIANTE TEORÍA FRACTAL**

REALIZO:  
MIGUEL ÁNGEL MATÍAS PÉREZ

0 400 1000 2000 4000  
ESCALA GRÁFICA 1:250,000

FECHA: AGOSTO 2008 PLANO No: C3





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**LICENCIATURA EN URBANISMO**

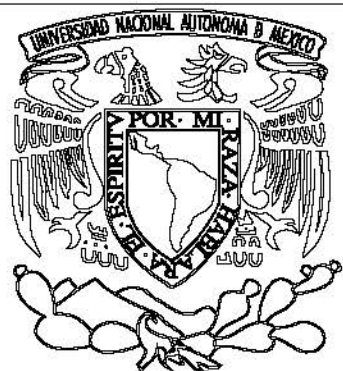
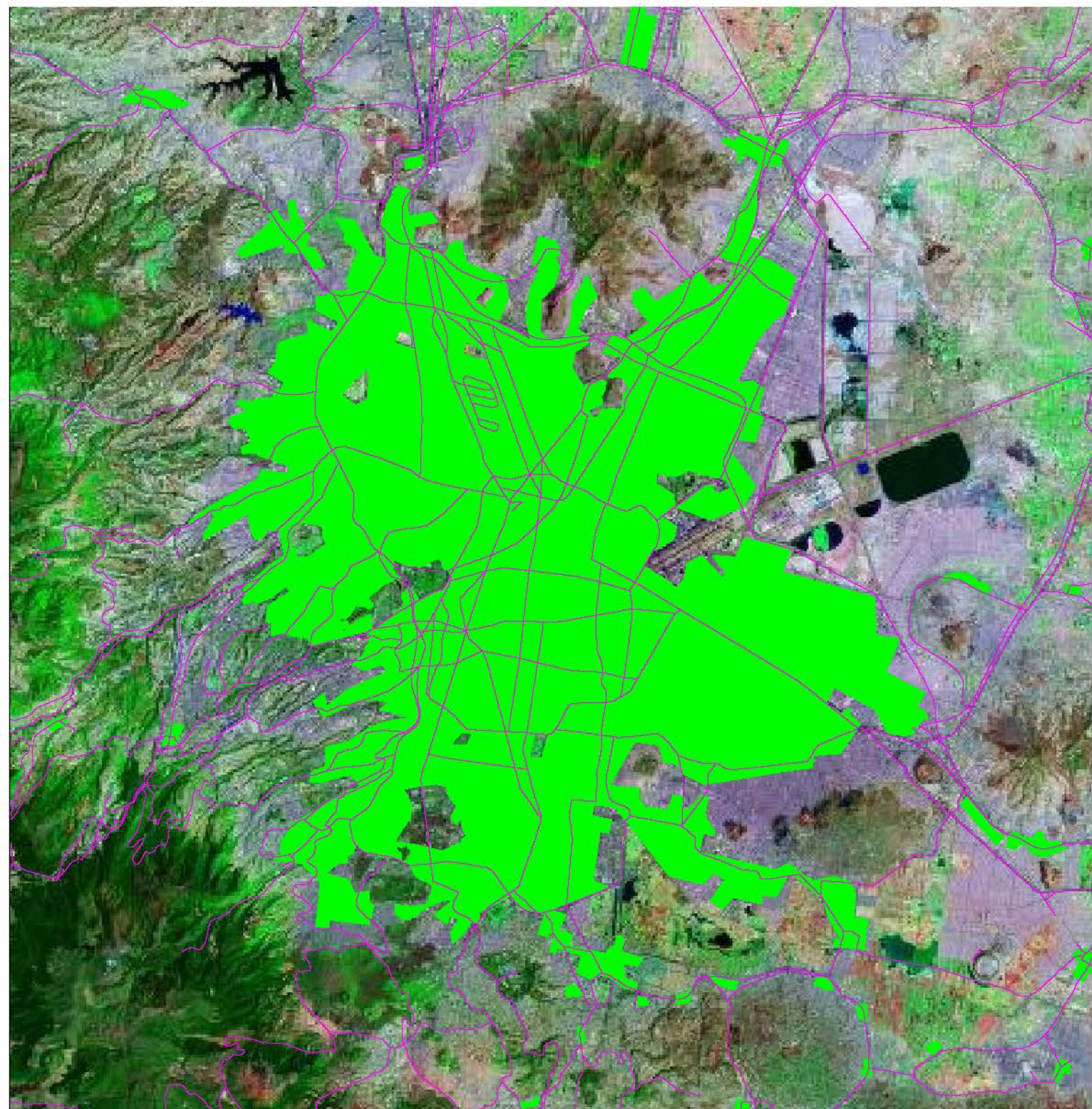
**Plano de crecimiento de la Ciudad de México 1950.**

**TESIS**

**ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO FÍSICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE TEORÍA FRACTAL**

	<p><b>MANCHA URBANA 1950</b></p> <p><b>Vía de Transporte 1950</b></p>
<p>REALIZO: MIGUEL ÁNGEL MATÍAS PÉREZ</p>	
<p>ESCALA GRÁFICA 1:250,000</p>	
<p>FECHA: AGOSTO 2008 PLANO No: <b>C4</b></p>	





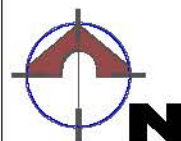
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**LICENCIATURA EN URBANISMO**

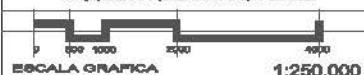
**Plano de crecimiento de la Ciudad de México 1986.**

# TESIS

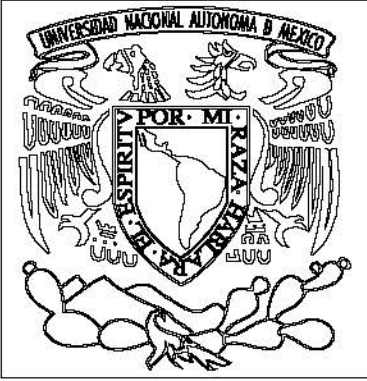
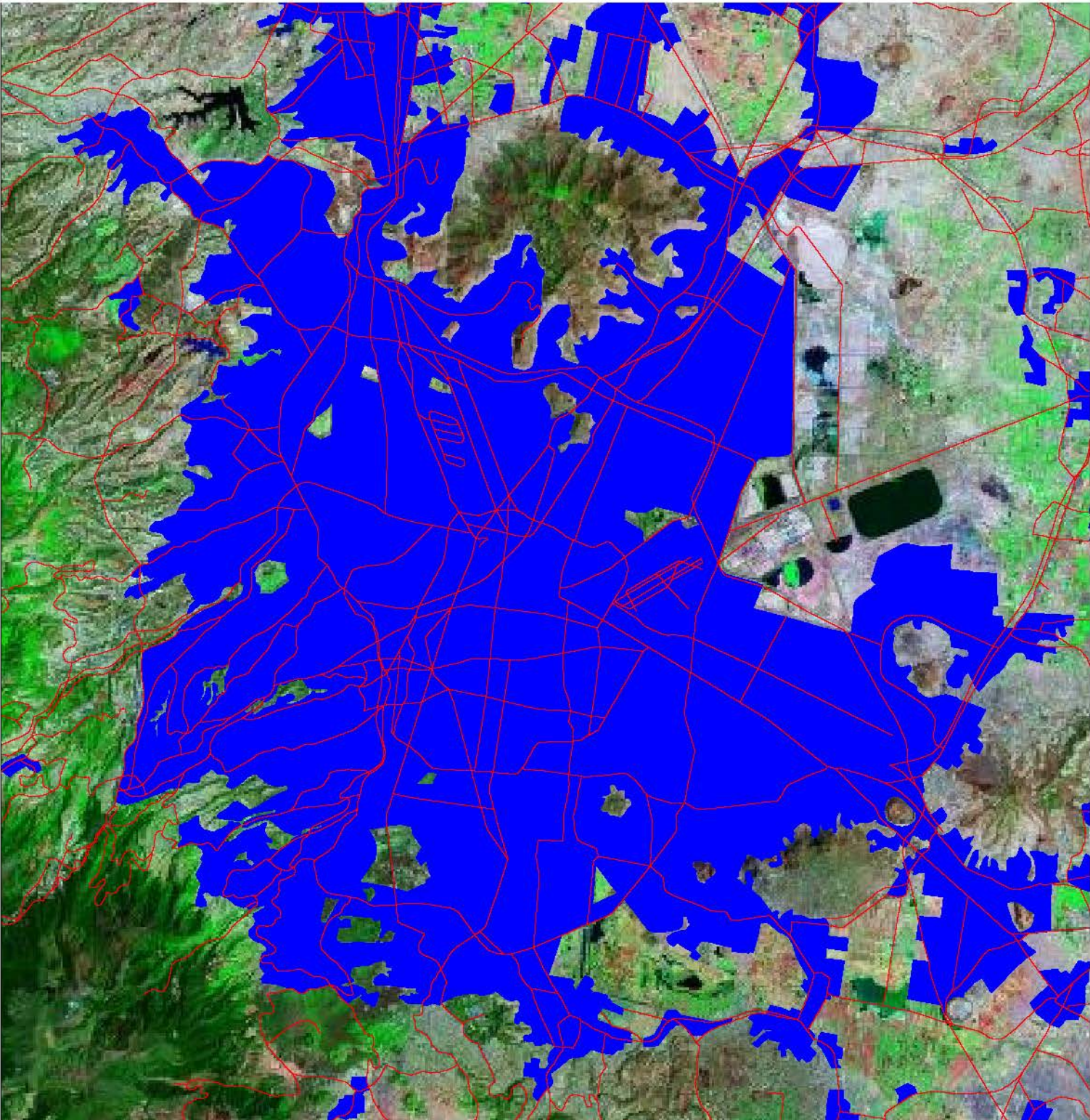
**ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO FÍSICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE TEORÍA FRACTAL**



REALIZO:  
MIQUEL ÀNGEL MATÍAS PÉREZ



FECHA: AGOSTO 2008 PLANO No: C5

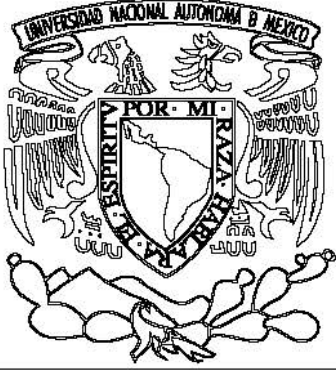


**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**LICENCIATURA EN URBANISMO**  
 Plano de crecimiento de la Ciudad de México 1996.

**TESIS**  
**ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO FÍSICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE TEORÍA FRACTAL**



REALIZÓ:  
 MIGUEL ÁNGEL MATÍAS PÉREZ  
 ESCALA GRÁFICA: 1:250,000  
 FECHA: AGOSTO 2006 PLANO No: C6

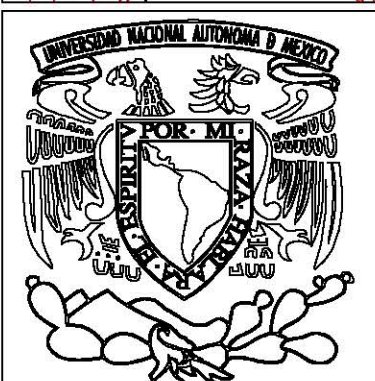
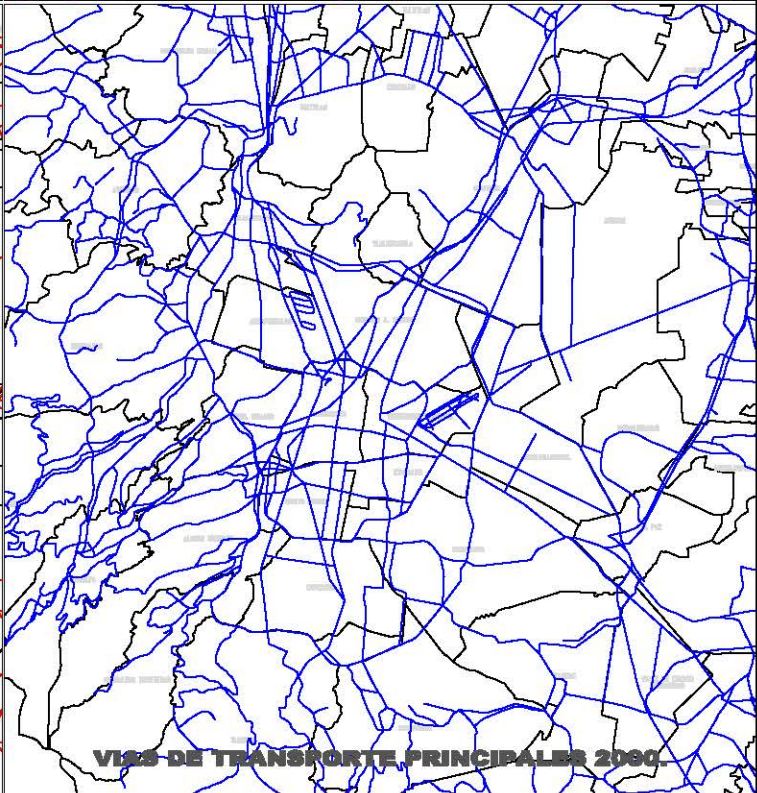
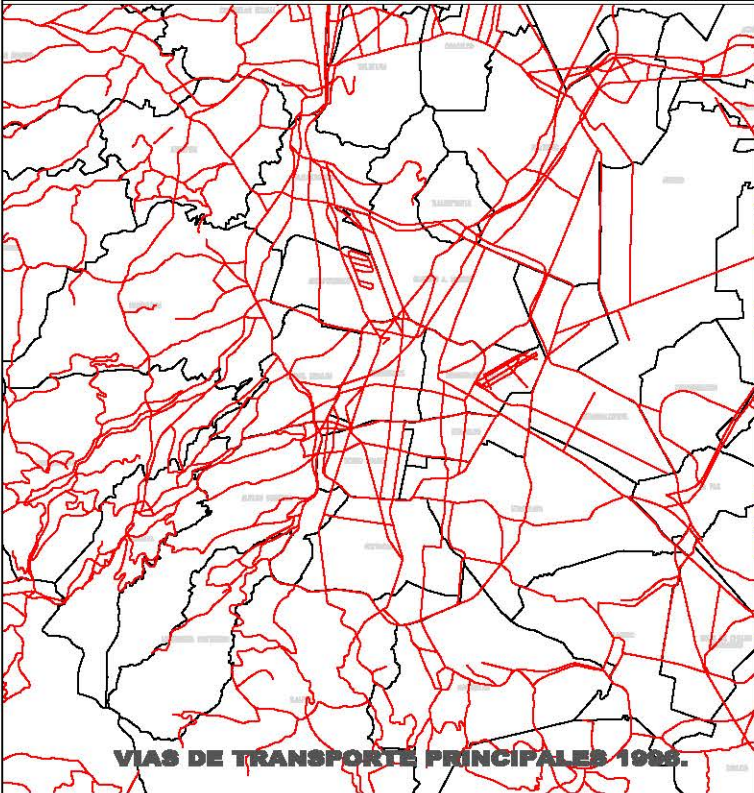
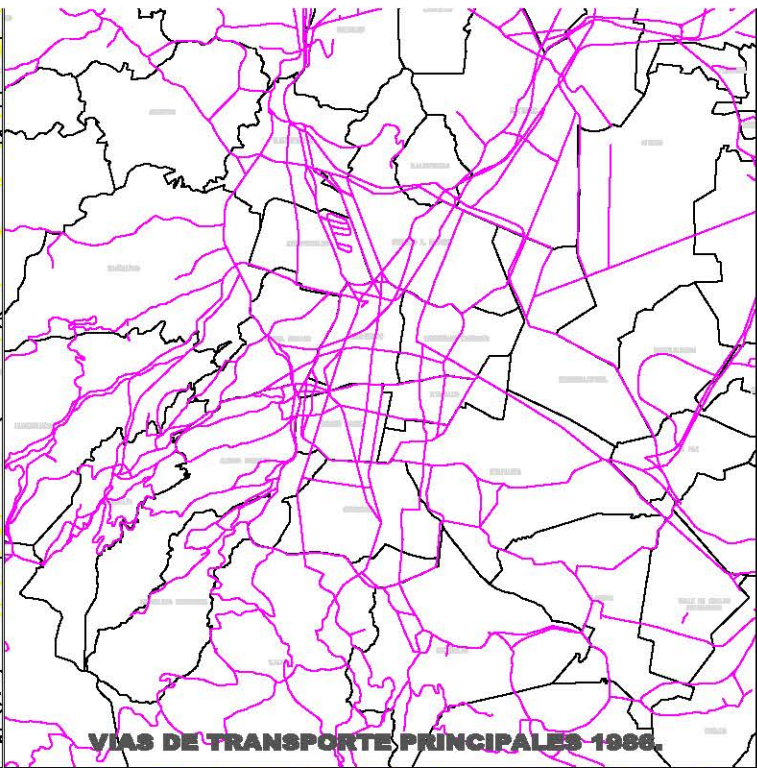
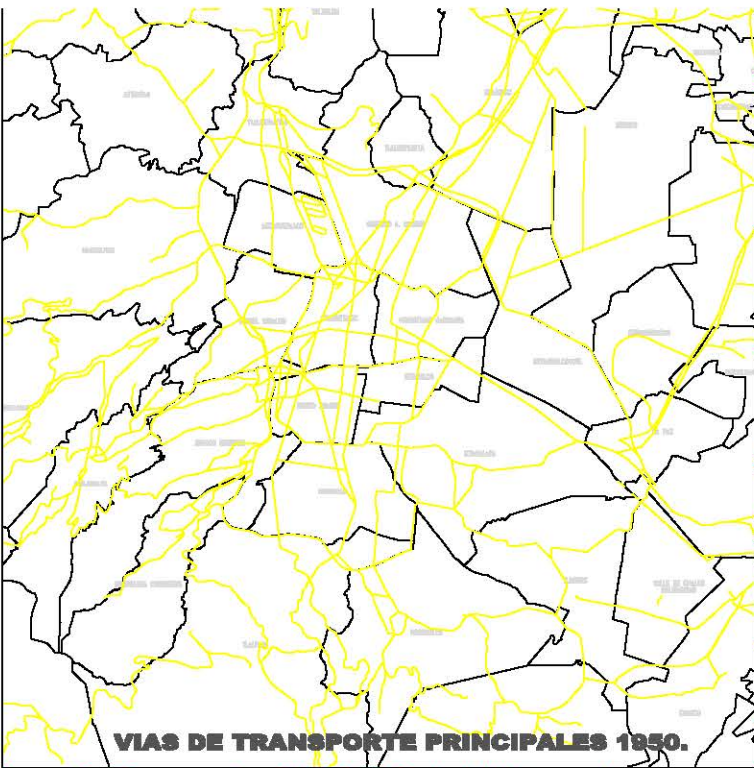


**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**LICENCIATURA EN URBANISMO**  
 Plano de crecimiento de la Ciudad de México 2000.



**TESIS**  
**ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO FÍSICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE TEORÍA FRACTAL**

REALIZÓ:  
 MIGUEL ÁNGEL MATÍAS PÉREZ  
 ESCALA GRÁFICA: 1:250,000  
 FECHA: AGOSTO 2006 PLANO No: C7



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**LICENCIATURA EN URBANISMO**

**Plano de vías de transporte para los años 1950, 1966, 1986 y 2000**

**TESIS**

**ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO FÍSICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE TEORÍA FRACTAL**

**SIMBOLOGIA**

**POBLACIONES**

**NEZAHUALCOYOTL**

LIMITE MUNICIPAL ———

LIMITE ESTATAL ———

**VALIDAD**

1950 ———

1966 ———

1986 ———

2000 ———

REALIZO:

MIQUEL ÁNGEL MATÍAS PÉREZ

ESCALA GRAFICA 1:500,000

FECHA: Septiembre 2008 PLANO No: VT1