

Los sistemas complejos, teoría de caos y los
estudios territoriales

Ryszard Rózga Luter

Resumen *Abstract*

Este artículo analiza los fundamentos teóricos y matemáticos de la teoría del caos, en relación a los sistemas complejos, y reflexiona acerca de las posibilidades explicativas y de aplicación de dicha teoría en los estudios territoriales.

An analysis of the theoretical and mathematical basis of chaos theory in relation to complex systems leads to reflections about the possibility of explaining and applying this theory to territorial studies.

Palabras clave *Key words*

Teoría del caos, sistemas complejos, estudios territoriales.

chaos theory, complex systems, territorial studies

Introducción

El fenómeno de casos no es nada nuevo ya que casi hace que dos siglos el botánico inglés Robert Brown observó que en una solución de agua, el polen de cierta hierba realizaba un movimiento continuo, muy accidentado, en zigzag y aunque no fue primero quien lo había notado fue el primero que hizo una investigación detallada del fenómeno así que en la ciencia éste recibió el nombre de los “movimientos brownianos”. Es también interesante que en este momento tanto Brown como los científicos de la época no sabían como explicar este fenómeno (Braun, 1997).

Los fenómenos de “caos determinista” o de “complejidad” se refieren a muchos sistemas que existen en la naturaleza cuyo comportamiento va cambiando con el transcurrir del tiempo (sistemas dinámicos). Dichos fenómenos aparecen cuando los sistemas se hacen extremadamente sensibles a sus condiciones iniciales de posición, velocidad, etcétera, de modo que alteraciones muy pequeñas en sus causas son capaces de provocar grandes diferencias en los efectos. Como consecuencia de ello no es posible predecir con exactitud cómo se comportarán dichos sistemas más allá de cierto tiempo, por lo que parecen no seguir ninguna ley, cual si estuviesen regidos por el azar (Sametband, 1999: 9).

Hace treinta años, cuando comenzó a desarrollarse, se hablaba de la “ciencia del caos”, que pronto pasó a denominarse “caos determinista”, para diferenciarlo del caos producto del puro azar. Actualmente tiende a afianzarse la palabra “complejidad”, que designa el estudio de los sistemas dinámicos que están en algún punto intermedio entre el orden en el que nada cambia, como puede ser el de las estructuras cristalinas, y el estado de total desorden o caos como puede ser el de un gas ideal en equilibrio termodinámico (Sametband, 1999: 9).

Aunque los científicos y filósofos normalmente suponen que los procesos caóticos no-lineales se llevan a cabo en los niveles más altos de estructura de materia y no tienen influencia en lo que ocurre con sus ingredientes elementales, se puede aprovechar el lenguaje y modelos de teoría de caos para enriquecer las posibilidades de describir el mundo, en el cual todo es fluido y no hay ningunos elementos fijos. Este tipo de imagen no puede ser popular en la ciencia contemporánea, dominada por el reduccionismo y atomismo... (Tomczyk, 1997: 293).

Sobre los sistemas complejos y la teoría de caos

Con el fin de adentrarnos algo más en la noción de complejidad vamos a considerar... los diferentes caminos que según Edgar Morin conducen al desafío que aquella supone. Dichos caminos o puntos de referencia se

concretan en ocho, que pasamos resumir seguidamente (Fernández Díaz, 1997: 104):

- a) El de la irreductibilidad del azar o del desorden; el azar es así definido como una incomprensibilidad algorítmica, es decir, como irreductibilidad e indeductibilidad a partir de un algoritmo, de una secuencia de números o sucesos.
- b) El de la complicación, surgida como consecuencia del número incalculado de interacciones fundamentalmente en los fenómenos biológicos y sociales.
- c) El de la relación complementaria, y sin embargo lógicamente antagonista, entre las nociones de orden, desorden, y organización. El principio *order from noise* se opone al principio clásico de *order from order*, y al principio estadístico *order from disorder*.
- d) El de la trasgresión en las ciencias naturales de los límites de lo que se podría llamar la abstracción universalista, que eliminaba la singularidad, lo local y la temporalidad. Se da así el predominio y la resurrección de las singularidades como fuente de otras singularidades, en el cosmos y en la vida misma.
- e) El de la organización como sistema a partir de elementos diferentes, como unicidad y multiplicidad simultáneamente. Un sistema que es al mismo tiempo más y menos que la suma de sus partes integrantes.
- f) El de la pérdida de la autosuficiencia conceptual del objeto, y del principio de demarcación popperiano.
- g) El de la incorporación del observador en su observación, con una vuelta a la aspiración auténtica a la verdad y la reintroducción del hombre en la cosmología a través del denominado principio “antrópico”.
- h) El del problema de la contradicción, que hay que entender no como un corno serial de alarma indicadora de error, sino como importante instrumento epistemológico de gran capacidad creadora.

Para que un sistema sea caótico debe tener un “gran” conjunto de condiciones iniciales que sean altamente inestables, de modo que sin importar con que precisión se midan, la predicción de su futuro se volverá radicalmente errónea luego de poco tiempo. Como consecuencia de la impredecibilidad a largo plazo, las series de tiempo de un sistema caótico pueden parecer irregulares y desordenadas, pero el caso definitivamente no es un desorden completo sino un desorden dentro de un sistema dinámico

determinista, el que siempre es predecible a corto plazo (Monroy Olivares, 1997: 22)

La teoría del caos ha sido desarrollada a partir del reconocimiento de que sistemas físicos aparentemente simples que obedecen leyes deterministas pueden sin embargo comportarse impredeciblemente, por ejemplo un péndulo sujeto a dos fuerzas diferentes más que a una sola fuerza. Tal desarrollo puede ser denominado *caos determinista* o unos *sistemas irregulares*.

Formalmente, la teoría del caos se define como *el estudio de los sistemas dinámicos y complejos*, pero para entenderla se tiene que explicar los siguientes conceptos (Monroy Olivares, 1997):

Un *sistema* es una combinación de varias entidades, físicas y/o lógicas, integradas entre sí para ejecutar una función concreta.

Un *sistema no lineal* es aquel que exhibe una desviación de toda correspondencia funcional de proporcionalidad directa; es decir, aquel en el que las respuestas no son directamente proporcionales a una variable dada o cuando las interrelaciones entre cantidades implicadas se expresan mediante ecuaciones, algunas de las cuales no son lineales.

Un *sistema complejo* es aquel que está compuesto por muchas partes y, de hecho el campo que se conoce como *teoría de la complejidad*, está integrado por una gran cantidad de temas complementarios traslapados entre sí.

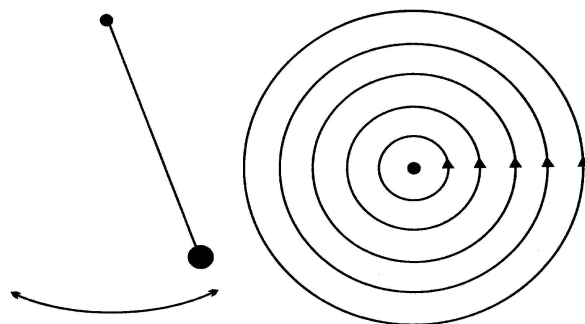
Se podría decir que es un sistema con muchos grados de libertad no equivalentes entre sí y, a diferencia del caos que es el estudio de cómo los sistemas simples pueden generar conductas complejas, la complejidad es el estudio de cómo los sistemas complejos pueden generar conductas sencillas.

Un *sistema dinámico* implica un cambio de estado en el sistema causado por la influencia de fuerzas, generalmente ajenas al mismo; esto es consiste de un *espacio de fases* abstracto o espacio de estados, cuyas coordenadas describen su estado dinámico en cualquier instante, junto con una regla dinámica que especifica las tendencias al futuro inmediato de todas las variables de estado considerando únicamente los valores actuales de las mismas y, matemáticamente se describe como un problema de valores iniciales. (Monroy Olivares, 1997: 24-24)

Otros conceptos necesarios para entender la teoría del caos, son:

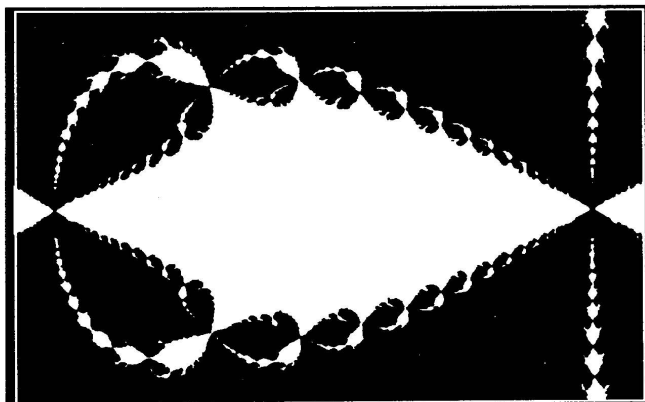
Espacio de fases

Si tenemos una ecuación concreta, entonces todas sus soluciones se ubican en un espacio abstracto llamado *espacio de fases* o en otras palabras espacio de fases de un tipo de ecuaciones conforma la descripción de sus soluciones explicada de manera única en el espacio de sus condiciones iniciales (Tomczyk, 1997: 33-35).



RYSUNEK 2
Przestrzeń fazowa wahadła

Como un ejemplo se da el espacio de fases de un péndulo:



RYSUNEK 4
Końcowe punkty ruchu wahadła przyciąganego przez trzy centra

Estabilidad

Para entender la teoría del caos se necesita entender en que consiste la estabilidad e inestabilidad de los sistemas dinámicos. El sistema es estable si los cambios pequeños de condiciones iniciales llevan a cambios pequeños de las trayectorias o en otras palabras hacia los pequeños cambios de la forma de resolución. “Esta característica importante de muchos de los sistemas es tan bien conocida, que normalmente no pensamos sobre esta, tratándola como característica obvia de la mayoría de los procesos. Gracias a esta estabilidad las balas disparadas una tras otra de la ametralladora vuelan uno cerca del otro; gracias a la estabilidad los pequeños movimientos del volante resultan en un suave cambio de la trayectoria del coche; también gracias a esta característica podemos prever y dirigir el movimiento de muchos de los sistemas importantes contruidos por la gente. Los éxitos de la mecánica clásica resultaron, entre otros, de esto que investigaba los movimientos de los sistemas estables, gracias a que la falta de precisión de observaciones no llevaba a las previsiones obviamente erróneas.” (Tomczyk, 1997: 47)

Los sistemas inestables son aquellos en los que los cambios pequeños de condiciones iniciales o pequeñas distorsiones del movimiento llevan a los grandes cambios de trayectorias, por lo que es muy difícil de observar, describir y prever su movimiento. En muchos casos la previsión razonable es imposible ya que al observador le parece que un sistema funciona de manera caótica, imprevisible y desordenada. Este tipo de sistemas son bien conocidos desde hace mucho tiempo y fueron objeto de investigaciones de muchas de las generaciones de estudiosos, sin embargo el progreso en entender sus reglas de funcionamiento fue muy pequeño y hasta hace poco se puede notar los avances más importantes. Como ejemplo podemos dar el movimiento de una bola en una columpio montañoso, cuando no sabemos con seguridad a que lado se cae la bola. (Tomczyk, 1997:48)

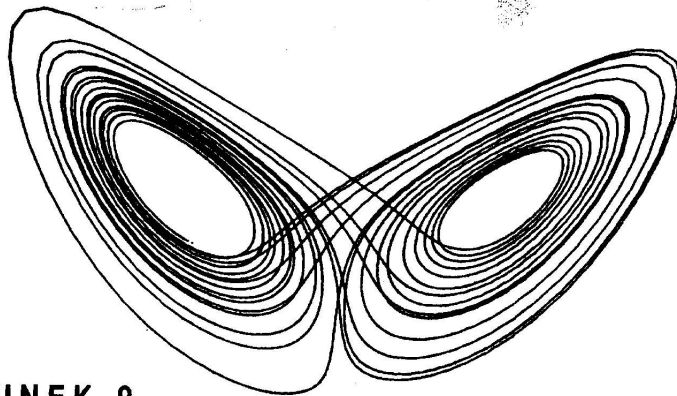
Atractores

Es el conjunto de patrones posibles, porque atraen hacia sí la evolución del sistema hacia determinados estados. “Al examinar el proceso de iteración de muchas ecuaciones no lineales se encontró que ocurren ciertos patrones y a menudo conducen hacia alguna clase de conducta limitada o restringida que representa los puntos de atracción de la ecuación. Algunos de tales atractores exhiben

formas extrañas al graficarse y por eso se conocen como *atractores extraños*". (Monroy Olivares, 1997: 32)

Atractores caóticos. El movimiento de un sistema dinámico puede ser representado en la forma de una órbita alrededor de un atractor, este último siendo definido como "un conjunto invariante cerrado que esencialmente captura todas las órbitas que comienzan en su dominio de atracción". (Robinson, 1998: 354)

En efecto, un atractor puede ser considerado como él que ejerce una atracción al sistema, un punto o subconjunto de puntos hacia el cual convergerá cualquier trayectoria dinámica. Esta convergencia representa el desarrollo de un equilibrio, por lo tanto, tal estado de equilibrio puede ser llamado un atractor. Por ejemplo, una empresa iniciándose en un ambiente nuevo de negocios es candidata a experimentar un periodo de "turbulencias" o comportamiento errático en tanto se adecua al nuevo ambiente. El comportamiento errático es transitorio moviéndose hacia un equilibrio o hacia un punto atractor. Este punto representa estabilidad debido a que todas las trayectorias del sistema (en este ejemplo, la empresa) que comienzan en la cercanía del atractor se aproximan a él con el paso del tiempo. Sin embargo, los atractores no siempre son equilibrio, y las órbitas pueden trazarse más hacia unas trayectorias cíclicas que hacia un punto fijo en el espacio.



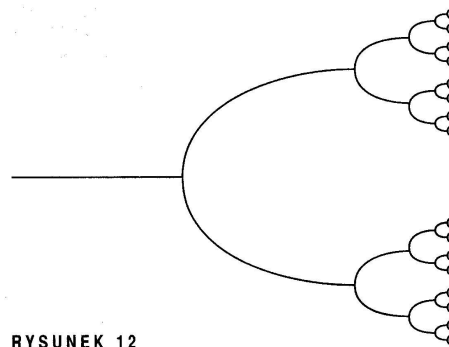
RYSUNEK 9

Atraktor Lorentza

Los atractores pueden también ser cuasi-periódicos o extraños como en la órbita con forma de avellana, un *torus*, que puede ser generado por los cósenos de un par de frecuencias inconmensurables. El análisis de Fourier de movimiento de un atractor extraño produce un espectro continuo de poder. “Un atractor caótico es caracterizado por su divergencia exponencial lejos de todo punto dentro del atractor”. (Brown, 1996: 55 en Robinson, 1998) Este movimiento divergente produce una trayectoria con patrón caótico y estructura fractal.

Bifurcaciones

En los sistemas no-lineales dinámicos sobrepasar algún valor del parámetro de control lleva a veces al cambio de la forma de funcionamiento del sistema. Esto se llama bifurcación y el punto en el cual se lleva a cabo este cambio se llama punto de bifurcación. (Tompczyk, 1997: 318).



RYSUNEK 12
Bifurkacja

Caos

El caos es una de las tres formas que pueden tomar los sistemas no lineales, siendo las otras dos la convergencia a un equilibrio o estado fijo, y comportamiento periódico u oscilación estable. La fórmula básica para investigar estos tres regímenes de comportamiento es conocida como el *mapa logístico* que corresponde a la fórmula básica:

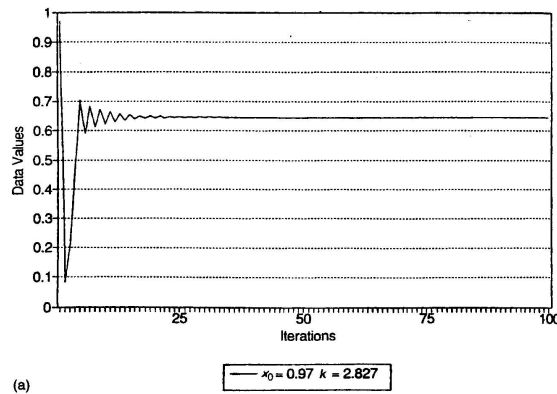
$$x_{t+1} = kx_t(1 - x_t)$$

Donde x = es la variable que está siendo examinada, k = es el parámetro o valor límite, los valores de k entre 0 y 3 producen un sistema que converge a un equilibrio, x_t = es el valor actual de x , y $t+1$ = es un periodo de tiempo de la variable x que sigue el valor anterior, x_t .

Al “mapear” esta formula se requiere un valor inicial, la *condición inicial*, misma que es representada por el primer valor de x_t , digamos x_0 . Una vez que son conocidos este valor y el *valor de los parámetros* (los parámetros dentro de los cuales el caos opera), se puede ordenar dentro de un programa computacional de hoja electrónica, para generar los valores corrientes de x_t . Las condiciones iniciales tienen que ser expresadas en valores fraccionales, así que $0 < x_0 < 1$; $0 < k < 4$. Para más detalles vea Kiel and Elliott (1996b).

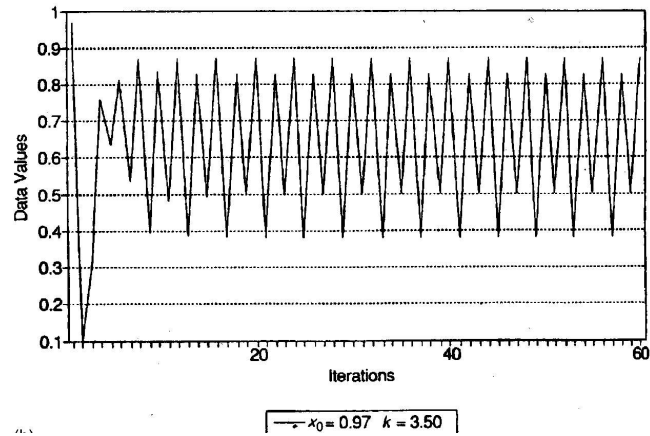
Las figuras 1-4 muestran cuatro ejemplos de los mapeos logísticos producidos por Kiel and Elliott (1996 b). La primera Figura 1, muestra un *equilibrio estable*, alcanzado después de unas pocas interacciones.

Figura 1:



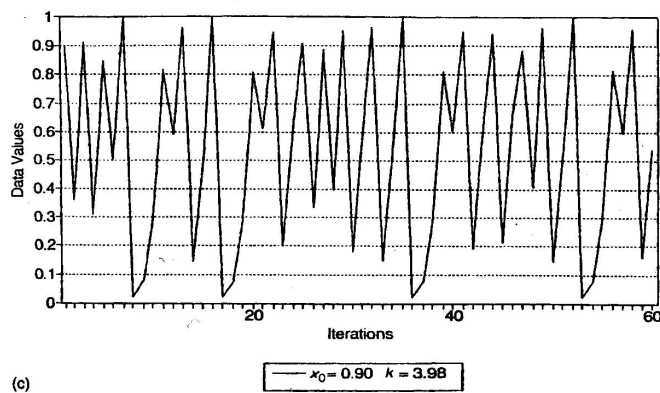
La segunda Figura 2, muestra un *comportamiento periódico*, que empieza a ocurrir cuando $k > 3$. Estos valores de k introducen inestabilidad dentro de la ecuación de tal manera que los datos comienzan a oscilar y hay bifurcación o ramificación dentro de un nuevo régimen de comportamiento.

Figura 2:



El *comportamiento caótico*, que presenta la Figura 3, ocurre cuando k tiene valores de alrededor de 3.8 a 4, revelando la falta de un patrón en el comportamiento longitudinal de la serie. Este está llamado *aperiódico*, aunque permanece dentro de parámetros definibles. El comportamiento caótico no es aleatorio y está generado por una ecuación determinista.

Figura 3:



El caos determinista es quizá más fácilmente representado en sistemas de ecuaciones no-lineales dependientes del tiempo, y que varía desde simples modelos unidimensionales, por ejemplo cuando x tiende a $ax(1-x)$, hasta más complejos e ecuaciones tri o cuatri dimensionales (Hale y Kocak, 1991). Estas ecuaciones producen series temporales que son aperiódicas y no presentan tendencias al equilibrio. Ecuaciones o sistemas de ecuaciones que representan movimiento caótico muestran una sensibilidad a las condiciones iniciales del movimiento en cuestión (Figura 4).

Figura 4:

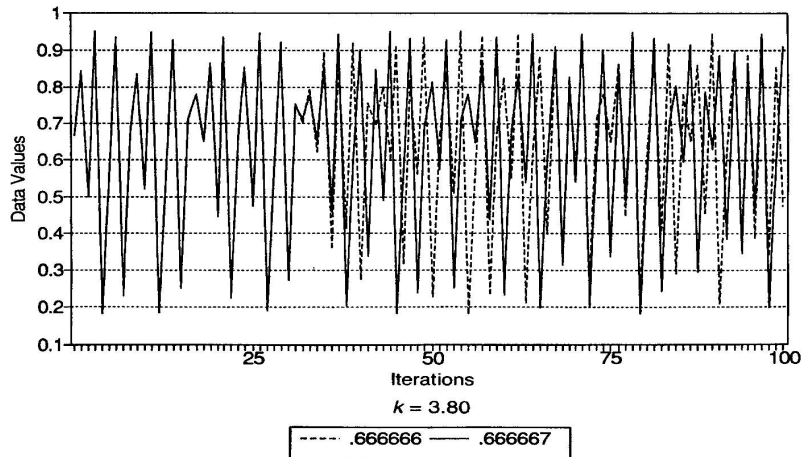


Fig. 1.4. Sensitivity to initial conditions

Para modelar estos sistemas caóticos, Mandelbrot (1982) reconoció que se requerían estructuras no-Euclidianas y, en su lugar, utilizó una nueva forma de geometría que llamo *geometría fractal*, del latín “fractus” que describe una piedra quebrada e irregular (vea Figura 5)).

Figura 5:

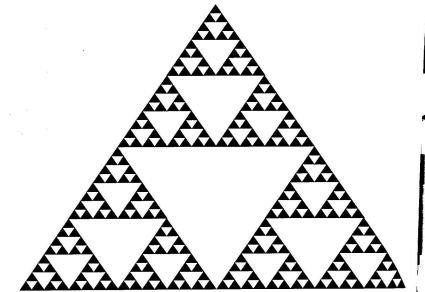
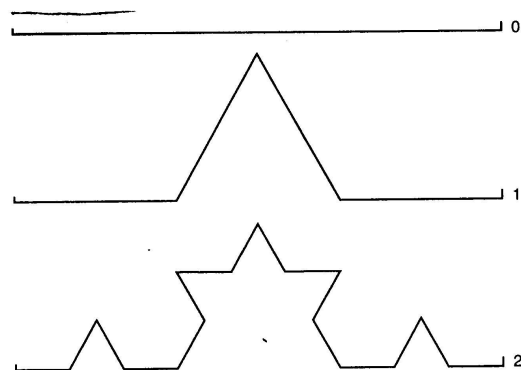


Figure 11.8 The Sierpinski Gasket

Otro ejemplo de fractales, tal vez mejor entendibles presenta curva de Koch (Figura 6) donde se presenta como la división del fragmento en tres partes y sustitución de la parte en medio por un pico, consecuentemente en los siguientes pasos lo que sale también se trata de la misma manera, por lo que obtenemos un figura muy compleja, los primeros indicios de la cual presenta el paso tres.

Figura 6:



RYSUNEK 14
Krzywa Kocha

Fractales

Los fractales son irregulares, pero con el mismo grado de irregularidad en todas las escalas como se muestra en la así llamada empaquetadura o *relleno de Sierpinski* mostrado en la Figura 5. Este es un fractal simple producido al romper un triángulo en otros más pequeños. Dividiendo el triángulo negro (a) en cuatro nuevos, estos tendrán todos ellos lados que son la mitad de largo que los de triángulo original. Si el triángulo central es luego borrado, y en este caso creando un triángulo blanco (b), y el ejercicio luego repetido ((c) y (d)), la misma estructura puede ser creada en una escala siempre decreciente con unos detalles dos veces más finos que los de la fase precedente. En tal caso se dice que el objeto es *linealmente similar a sí mismo*. Ejemplos naturales con una tendencia hacia esta forma son helechos, coliflores y brócolis. Sin embargo otras formas fractales pueden apartarse de linealidad similar a sí misma y ser capaces de describir diferentes tipos de sistemas, por ejemplo fractales aleatorios y fractales caóticos o no lineales.

- a) Fractales aleatorios. Estos han sido usados para modelar líneas costeras, montañas y formaciones nubosas empleando avanzadas graficas de computadoras. El modelado de la forma de una línea costera empleando fractales, usa nuevas maneras de expresar la forma y su complejidad, basándose sobre la noción de que la longitud de la línea costera aumenta conforme a la precisión de las medidas aumenta; es decir, conforme irregularidades siempre crecientes son tomadas en cuenta. Por tanto las nociones de dimensiones fijas deben ser cambiadas y variadas dentro de la familia de uno, dos y tres-dimensiones, de la misma manera hay que considerar la variación de la misma. Por ejemplo, una curva que es un fractal linealmente similar, puede variar desde ser una línea abstracta unidimensional lisa hasta dar vueltas y girar tanto que dé una apariencia casi bidimensional. Su dimensión fractal puede variar desde un poco sobre uno hasta un poco bajo dos. La cantidad de esta curva variará también de acuerdo a sus dimensiones fractales (Mandelbrot, 1990). Cuando se modela estos fractales aleatorios pueden producir formas de helecho que han sido usadas para modelos de relámpagos y otros fenómenos naturales.
- b) Fractales no lineales. Ecuaciones que representan tales cosas como turbulencias en líquidos y patrones climáticos son no lineales y despliegan el caos determinista. Si las ecuaciones son iteradas y los resultados presentados usando las gráficas de computación, muestran una complejidad increíble. Estos po-

drían ser solo de interés efímero o artístico, pero pueden tener aplicaciones que podrían ampliar el entendimiento de varios tipos de fenómenos, incluyendo algunos de interés para quienes se dedican a la geografía humana, como por ejemplo la morfología urbana (Arlinghans, 1993; Batty et al, 1993; Goodchild y Mark, 1987).

Mandelbrot (1990), da un ejemplo de los posibles usos de fractales en la investigación de la distribución de minerales. Por ejemplo, la distribución del petróleo puede ser considerada como una que es altamente irregular o muy irregular: generalmente no se da, excepto en unos pocos lugares, por lo general muy próximos, que tengan depósitos viables comercialmente. Por tanto, cualquier gráfica de la distribución del petróleo alrededor del mundo producirá una línea que sería en su mayoría plana pero también con unos pocos picos muy marcados. Este patrón, para una serie de regiones, puede ser representado como una combinación de un número de conjuntos de fractales conocidos como una *distribución multifractal* (Figura 7). Por tanto sus usos prácticos, dependen de la naturaleza de las relaciones establecidas entre las ecuaciones fractales usadas en la generación de multifractales y la realidad de la distribución del petróleo en el mundo. Tales graficas fueron desarrolladas por primera vez en la universidad de Bremen bajo la supervisión de Peitgen y Richter (Peitgen et al 1992).

Figura 7:

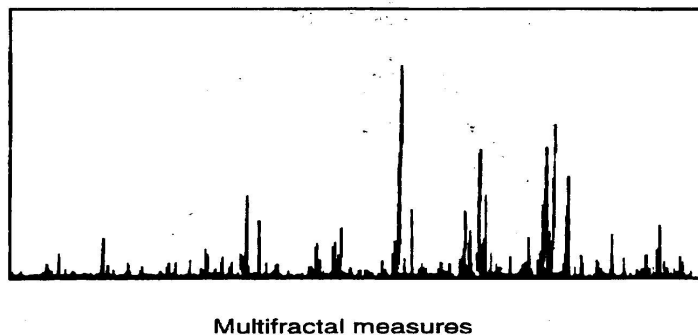


Figure 11.9 A Multifractal Distribution
This is a trace of multifractals modelling turbulence in a laboratory experiment. It is similar to multifractals describing the distribution of oil. (Source: Mandelbrot, 1990)

Resumiendo las consideraciones sobre la teoría del caos podemos mostrar un resumen de las Matemáticas del Caos, como lo denominó Andrés Fernández Díaz (1994: 85) y les presento en la siguiente tabla.

MATEMÁTICAS DEL CAOS	
DUALIDADES BÁSICAS	
Determinismo Certidumbre Certeza Predecibilidad	Indeterminismo Incertidumbre Probabilidad Impredicibilidad
Orden	Caos
Continuidad Regularidad Periodicidad	Discontinuidad (catástrofe) Irregularidad Aperiocidad
Linealidad	No-linealidad
Estabilidad Equilibrio Estática	Inestabilidad Desequilibrio Dinámica
Insensibilidad a condiciones iniciales	Sensibilidad a condiciones iniciales
Cuantitativo Atractor simple Geometría euclidiana Uniformidad Permanente Simplicidad Información Reversibilidad Abstracción-formalismo Lineal simple Dinámica tradicional	Cualitativo Atractor extraño Geometría fractal Turbulencia Disipativo Complejidad Entropía Irreversibilidad Intuición geométrica Bifurcación Sinérgica

Fuente: (Fernández Díaz, 1994: 85)

Algunas aplicaciones de la teoría del caos

La teoría del caos ha sido utilizada en meteorología, apoyándose en los trabajos de Lorentz (1963 en Robinson, 1998: 351), en los años sesenta, y ha sido también aplicada dentro la biología de poblaciones y fisiología, donde los investigadores han analizado las irregularidades caóticas en el ritmo del corazón.

El sistema de Lorentz constituye el ejemplo más conocido para analizar los fenómenos caóticos en las ecuaciones diferenciales, abordándose un problema importante para la meteorología, el de la convección atmosférica, consistente en la evolución de una capa de fluido calentada por debajo. Lorentz (...) buscaba un vínculo entre la aperiocidad del tiempo y su impredecibilidad siendo ese vínculo la dependencia sensitiva de las condiciones iniciales.

En su modelo del tiempo atmosférico tratado en el ordenador, vio algo más que la imagen de lo predecible cediendo al puro azar; vio una fina estructura geométrica, orden disfrazado de casualidad. (Fernández Díaz, 1994: 87)

Emulando la aplicación de la teoría del caos en las ciencias naturales, los científicos sociales han usado la teoría del caos como un medio para comprender y examinar incertidumbres, no linealidades y aspectos impredecibles del comportamiento dentro de los sistemas sociales (Kiel y Elliott, 1996a). Efectivamente, a pesar de las aplicaciones iniciales de la teoría en las ciencias naturales, la no-linealidad coherente y la incertidumbre existentes dentro de los sistemas socioeconómicos pueden ofrecer más oportunidades para el uso de esta teoría en las ciencias sociales, de las que aparentaban al principio. Por tanto haya habido un creciente número de usos de la teoría de los casos por los científicos sociales desde mediados de los 80's, notablemente en ciencias económicas (Baumol y Benhabib, 1989) y sociales (C. Brown, 1996).

El trabajo de Berry se refiere a las posibilidades de aplicación de la teoría del caos al análisis de los patrones del crecimiento económico, y hay posibilidades de su uso en los pronósticos (por ejemplo Tong, 1994 en Robinson, 1998: 354), pero los esquemas grandiosos del uso de la teoría del caos como parte del análisis de los complejos sistemas sociales (por ejemplo Harvey and Reed, 1997) actualmente son todavía demasiado esquemáticos para que sirvan a los objetivos prácticos.

En sus trabajos Berry examina la opinión de que los ritmos de ondas largas de los precios y crecimiento económico están acompañadas por oscilaciones de término corto, que juntas despliegan un caos determinista. El análisis inicial de estos ritmos económicos se ha concentrado en las oscilaciones en las tasas anuales de cambio de precios, GNP real per capita y crecimiento económico. Estas oscilaciones han sido interpretadas como las que presentan desplazamientos catastróficos en su patrón con una interacción caótica entre series económicas de corto y largo plazo. Sin embargo Berry y Kim (1997:216), reconocen que sus conjuntos de datos son de du-

ración insuficiente para determinar si estos datos son generados por un proceso caótico.

Aún más, puesto que el caos en un sistema es representado por irregularidades la previsión del desarrollo de un sistema caótico puede difícilmente apoyarse sobre la estimación de ambas cosas, las condiciones iniciales del sistema y sus parámetros. Sin embargo, dado que el sistema es tendiente a exhibir inestabilidad, los errores de estimación pueden ser grandes, así que sea posible la representación de un sistema caótico y la predicción de trayectorias individuales dentro de ese sistema.

La teoría de casos en estudios territoriales

A pesar de la aparición de la teoría del caos dentro del campo de computación, no hay indicaciones que la teoría entrara en la corriente principal de las consideraciones de la geografía humana. En comparación el uso de la teoría del caos por los que estudian geografía humana ha sido relativamente limitado, aunque recientemente uno de los pioneros de la Revolución Cuantitativa, Brian Berry, ha aplicado la teoría del caos a los ritmos de ondas largas del desarrollo económico y comportamiento político (por ejemplo Berry and Kim, 1997).

Un enfoque espacial más específico se puede encontrar en los trabajos de Dendrinós (Dendrinós, 1992,1996; Dendrinós y Sonis, 1990) quien ha liderado la aplicación de la teoría del caos sobre la base de suposición que la dinámica no lineal es una característica central de la dinámica social. Sin embargo, él subraya las limitaciones en el poder explicativo de los simples procesos iterativos usados para retratar nubes, plantas, animales, líneas costeras y paisajes exóticos (...) No obstante, Dendrinós, sostiene que haya avances que puedan ser hechos, sacrificando la eficiencia del modelo por sus mayores poderes explicatorios, mientras que se preserve la variedad investigada de comportamientos dinámicos. Él ve tal desarrollo como parte de una nueva agenda ambiciosa de investigación, usando las matemáticas del caos (Robinson, 1998: 352).

Aquí quisiera presentar dos ejemplos de aplicación de la teoría de casos a los estudios territoriales, ambos basados en los desarrollos de Dendrinós.

- I. El primero es el trabajo de geógrafos polacos, donde se llevo a cabo la simulación de las economías regionales de los departamentos de Polonia (Domanski, 1997), aplicando no-lineales

modelos dinámicos ya probados en las investigaciones económico-espaciales (Dendrinós y Mullally, 1982 en Domanski 1997). En este trabajo se aprovecho la siguiente formula de modelo (Dendrinós 1982 en Domanski 1997):

$$\frac{dx}{dt} = a(y - \bar{y})x - bx^2 \qquad \frac{dy}{dt} = c(\bar{x} - x)y$$

donde:

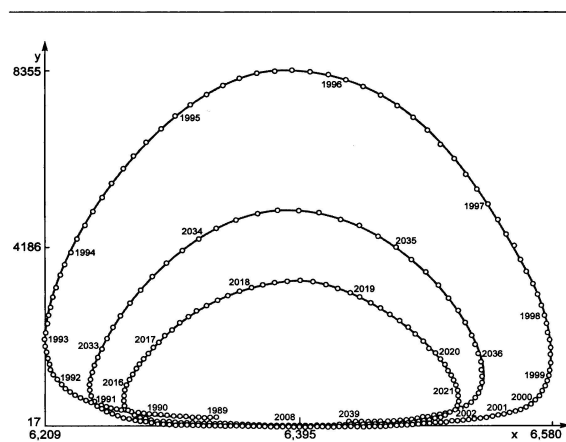
x, y—datos; a, b, c—parámetros; $\bar{x}$, $\bar{y}$ —estados estacionarios de los datos; bx^2 — factor de repulsión (por ejemplo los efectos negativos externos de aglomeración).

Estos datos después se interpreto para las regiones de Polonia, tomando como x participación porcentual de la provincia en la población de Polonia; y — ingresos per capita de la población en la provincia; $\bar{x}$, $\bar{y}$ estados estacionarios se interpreto de manera particular; $\bar{x}$ — se interpreto como la capacidad poblacional en el sentido, que se lo tomo como población en el último año en que crecen los ingresos; y — como nivel estacionario se tomo el nivel en que la relación de los ingresos de la población de provincia con los ingresos a nivel nacional se estabiliza o empieza disminuir.

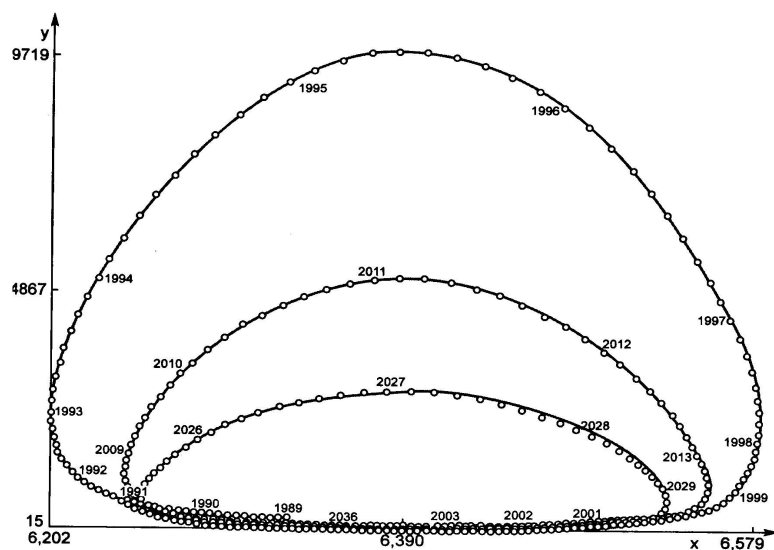
Los parámetros de modelo se tomo de la siguiente manera: a influencia del nivel de ventas sobre el cambio del tamaño de población; b los efectos negativos externos (demasiada población, degradación del medioambiente y falta de inversión infraestructural); cambio del nivel de ventas de mercancía bajo la influencia del cambio del tamaño de población.

Por último, se analizo tres escenarios: 1) del desarrollo moderado y los cambios estructurales graduales; 2) más profunda reestructuración y más alta dinámica del desarrollo después de la primera fase de reestructuración; 3) escenario vegetativo de baja dinámica de cambios estructurales y del desarrollo del sistema. El periodo de simulación abarcaba los años 1989-2030, así que fueron 40 años.

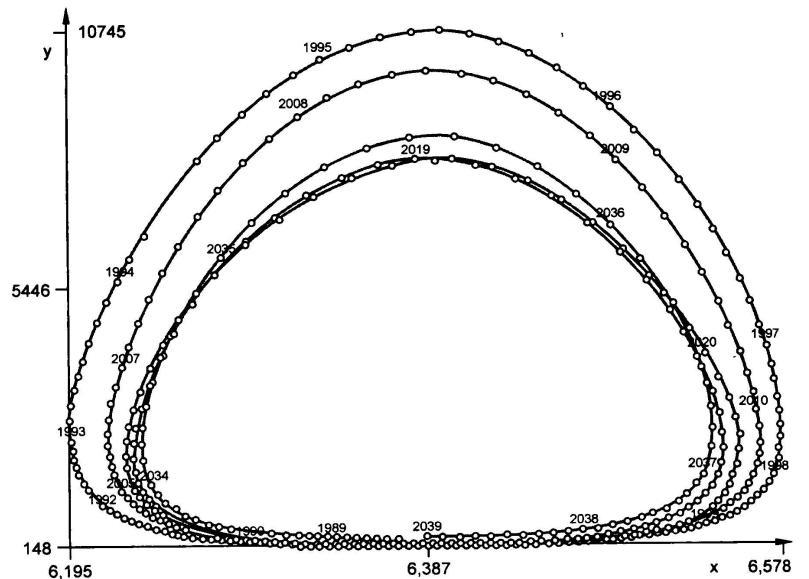
Escenario 1:



Escenario 2:



Escenario 3:



II. Otro uso de la teoría de caos presenta el propio trabajo de Dendrinos (1996). La proposición básica de lo que Dendrinos llama el “*mapa universal*” es que para cualquier periodo de tiempo, t (donde $t = 0, 1, 2, \dots, T$), el tamaño relativo de un stock (tal como un asentamiento o una producción industrial) en algún lugar dentro de un ambiente pre-especificado que consiste en un número de locaciones, puede ser descrito (o simulado) como estuviera directamente proporcional a un anterior nivel de ventajas comparativas locacionales que goza el stock en cuestión en un sitio escogido. La ventaja locacional comparativa es traducida en una probabilidad de que un evento particular ocurrirá en una localización particular. Se supone que detrás del procedimiento iterativo de la simulación hay una fuerza de replicación que produce efectos en intervalos regulares de tiempo. Esta fuerza puede ser atribuida a reacomodos temporales del stock entre las varias localizaciones dentro del ambiente pre-especificado (Dendrinos, 1996:243).

Para un grupo de configuración de localizaciones múltiple, el modelo es especificado como:

$$x_i(t+1) = F_i(t) / \hat{A}_j F_j(t)$$

$$F_i(t) = F_i[x_1(t), x_2(t), \dots, x(t)] > 0$$

Donde el “mapa iterativo discreto” describe la dinámica de la distribución relativa del stock homogéneo en una localización i ($0 < x_i(t) < 1$) dentro de un ambiente de I localizaciones, de tal manera que en todos los periodos de tiempo,

$$\hat{A}_i x_i(t) = 1$$

donde: $t = 0, 1, \dots, T$; T = horizonte de tiempo que consiste de periodos de tiempo o iteraciones, t , todos idénticos en longitud; x = la probabilidad de que un evento ocurrirá en una localización i de las I localizaciones; y F = la ventaja comparativa no lineal que cualquiera localización, i en I tiene en la atracción de un evento.

Las ecuaciones identifican interdependencias entre tamaños de stock en varias localizaciones mejor que la interacción, o flujo del stock (o stocks) entre ellos. Para una localización referencia dada, I , las ecuaciones anteriores pueden ser reescritos como:

$$x_i(t+1) = F_i(t) / \frac{\hat{A}_i}{\hat{A}_j} + \hat{A}_j F_j(t) \quad x_i(t+1) = 1 / \frac{\hat{A}_i}{\hat{A}_j} + \hat{A}_j F_j(t)$$

$$F_j(t) = F_j(t) / F_i(t)$$

Donde: $j = 1, 2, 3, \dots, I-1$ y $F_i(t)$ es una cantidad positiva.

Las aplicaciones teóricas de esta formula son dadas por Den-drinos (1996) en términos de posibilidades para generar las diferentes formas de asentamientos humanos en el espacio. Sin embargo, para que este trabajo desarrolle más amplios significados de la aproximación teórica, necesita ser acompañado por el desarrollo de pruebas estadísticas y verificaciones de formas de modelo frente a las formaciones de asentamientos humanos existentes en diferentes escalas espaciales.

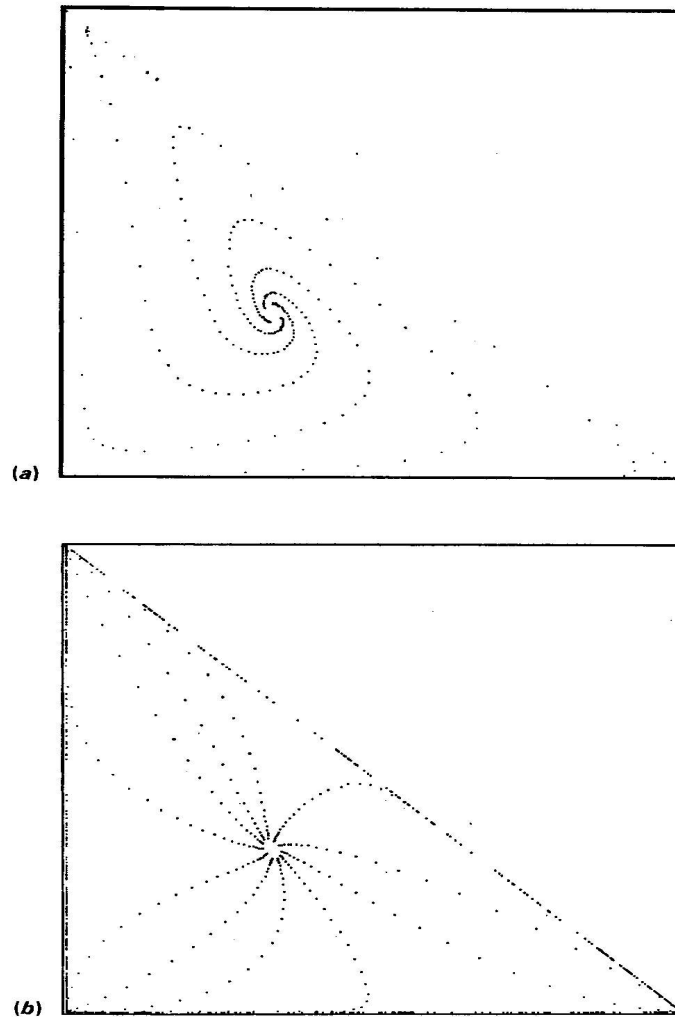


Fig. 11.3. Two examples demonstrating formation of spatial human settlements (see text for parameter specification): (a) one-parameter case: 4-period cycle; (b) two-parameter case: quasi periodicity.

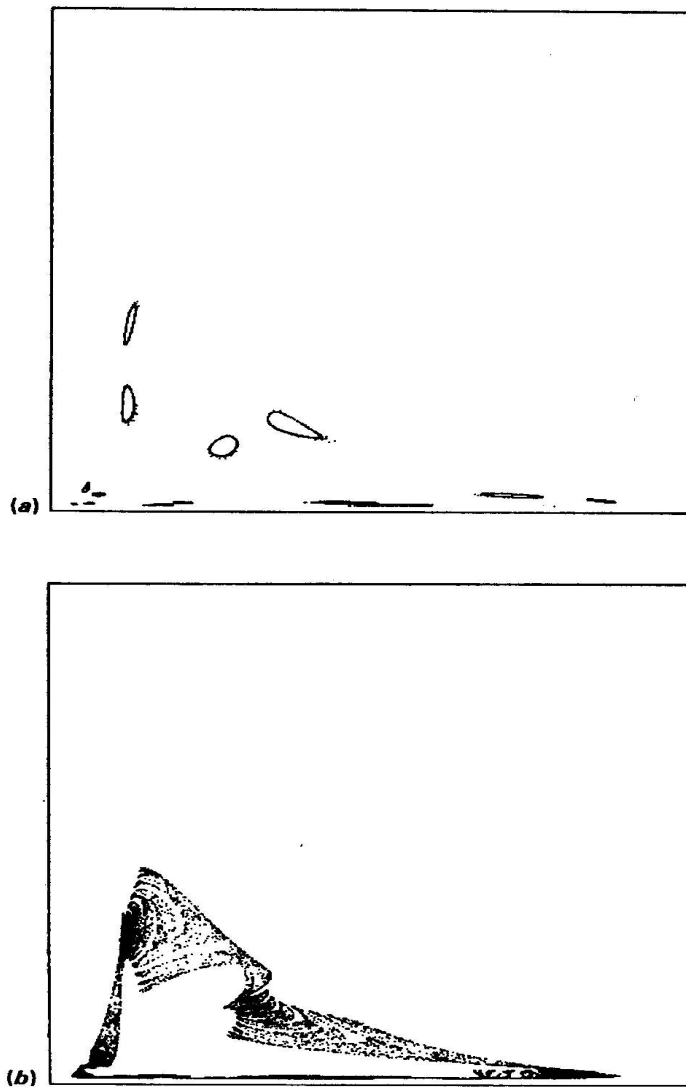


Fig. 11.4. Two examples of spatial human settlement formation (see text for parameter specification): (a) multiple ring structure ($a_{33} = 1.188 \dots$); (b) chaos ($a_{33} = 1.177 \dots$).

Dificultades en aplicación de la teoría del caos

Hay sin embargo, cuatro dificultades claves a vencer antes de que se pueda aplicar los desarrollos teóricos de la teoría de caos al análisis social o en nuestro caso a los estudios territoriales. Los mismos son citados en el mencionado trabajo de Dendrinis, quien escribe que tal agenda encuentra las siguientes dificultades (1996: 240):

1. Las trayectorias caóticas requieren una enorme cantidad de datos para trazar, calibrar y probarlas. Hay muy pocas variables en las ciencias sociales que sean accesibles con intervalos de tiempo suficientemente cortos para permitir su uso como se requiere y con un alto grado de exactitud (por ejemplo, contraste los datos del desempleo y de observaciones meteorológicas). Los datos que las ciencias sociales han usado “mejor” en su intento de encontrar caos y probarlo estadísticamente han sido las series temporales extensas de los mercados bursátiles o tablas de tipo de cambio de monedas (Rosser and Rosser, 1994).
2. La mayoría de las variables en las ciencias sociales no producen medidas repetitivas bajo condiciones controladas experimentalmente. Aún más, la mayoría de los sistemas socioeconómicos no comprenden componentes idénticos con comportamientos altamente homogéneos. Sus variantes presentan perturbaciones frecuentes, irregulares e inesperadas que pueden tornar inapropiadas los supuestos fundamentales de la teoría de probabilidades. Una dificultad específica conforma la separación del “ruido” del fondo de las dinámicas internas de las variables socio espaciales.
3. Inexactitudes en los datos en las ciencias sociales son problemáticas en tanto el carácter básico de los datos es de un tipo muy diferente a la de la mayoría de los datos de las ciencias naturales donde la exactitud y la medición regular es lo común. Esto puede ser contrastado con los datos “borrosos” o preceptuales que son usados generalmente en el desarrollo de la política social y planeación. El concepto de datos de “*alta resolución*” es ajeno a muchas áreas de las ciencias sociales.
4. Hay un puñado de temas adicionales no resueltos, incluyendo los niveles apropiados de desagregación para conjuntos de datos espaciales y la dificultad de desagregar a los sistemas socioeconómicos en una infinidad de auto réplicas a pequeña escala. Por ejemplo las limitaciones en el tamaño de edificios y ciudades proporcionan los límites superiores e inferiores respectivamente a la

escala de los asentamientos humanos. Esto plantea problemas en la producción de modelos socio espaciales que den resultados caóticos con dimensiones fractales.

Por último, podemos añadir que la dificultad de entender los fundamentos matemáticos de la teoría del caos y su lenguaje poco familiar ha alejado a muchos científicos sociales de trabajar en esta área. Sin embargo, recientes avances usando programas computacionales ya elaborados han comenzado hacer la teoría del caos más accesible a los no conocedores de matemática (Kiel and Elliott, 1996a). Por ejemplo, es posible usar los programas de hoja electrónica como medio a través del cual se visualizan las exploraciones de la dinámica caótica. Esto sustituye el análisis visual para la frecuentemente intratable matemática no-lineal del caos (por ejemplo Kiel and Elliott, 1996b).

Bibliografía:

- Barun, Eliezer, 1997: *Un Movimiento en Zigzag*, México FCE.
- Berry, Brian J.L. and Heja Kim, 1997: "Long Waves 1790-1990: Intermittency, Chaos, and Control" en *Chaos Theory in the Social Sciences. Foundations and Applications*.
- Dendrinos, Dimitrios S., 1997: "City as spatial chaotic attractors" en *Chaos Theory in the Social Sciences. Foundations and Applications*.
- Domanski, Ryszard, 1997: *Przestrzenna transformacja gospodarki (Transformación espacial de economía)*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Fernández Díaz, Andrés, 1994: *La Economía de la Complejidad. Economía Dinámica Caótica*, Madrid: Mc Graw-Hill.
- Kiel, L. Douglas and Euel Elliott, 1997a: *Chaos Theory in the Social Sciences. Foundations and Applications*, Michigan, USA: The University of Michigan Press.
- Kiel, L. Douglas and Euel Elliott, 1997b: "Exploring nonlinear dynamics with a spreadsheet: A graphical view of chaos for beginners" en *Chaos Theory in the Social Sciences. Foundations and Applications*.
- Monroy Olivares, César, 1997: *Teoría del Caos*, México: Alfaomega Grupo Editor.
- Robinson, G. M., 1998, *Methods & Techniques in Human Geography*, Chichester, John Wiley & Sons.
- Sametband, Moisés José, 1999: *Entre el Orden y el Caos: La complejidad*, México: FCE.
- Tempczyk, Michal, 1997: *Teoria chaosu a filozofia (Teoría del caos frente a la filosofía)*, Warszawa: Wydawnictwo CiS.