

LA TEORÍA DE SISTEMAS EN LAS CIENCIAS DE LA TIERRA

Systems theory in Earth Sciences

I. Meléndez Hevia (*)

RESUMEN

Se propone en este trabajo algunas orientaciones metodológicas y didácticas para la introducción de la perspectiva sistémica en las Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente del 2º curso del Bachillerato de la Reforma. Se justifica la necesidad de la formación del profesorado en Teoría de Sistemas y la necesidad de introducir transversalmente un tratamiento sistémico a los contenidos de esta asignatura interdisciplinar.

ABSTRACT

We propose how to introduce the Systems Theory to the students of the subject Earth and Environmental Sciences. We also discuss some examples in which the Systems Theory allows a more global vision of the processes from a classical point of view.

Palabras clave: *Teoría de Sistemas, Cibernética, Atractores, Modelos, Sistemas propositivos.*

Keywords: *Systems theory, Cybernetics, Models, Propositive Systems.*

INTRODUCCIÓN: TEORÍA DE SISTEMAS Y CIBERNÉTICA.

Las Ciencias de la Tierra y del Medio ambiente no son una aglomeración de asignaturas clásicas sino que tienen un marcado carácter interdisciplinar. Dentro de esta orientación interdisciplinar, la consideración del carácter sistémico de la realidad natural y social no puede permanecer al margen, sino que constituye un elemento insustituible.

En este sentido, la Teoría de Sistemas es una herramienta epistemológica necesaria que debe impregnar de forma transversal el tratamiento de esta nueva disciplina del Bachillerato. No se trata de incluir un capítulo de Teoría de Sistemas, sino trabajar los contenidos de las Ciencias de la Tierra y del Medio ambiente desde los supuestos metodológicos de la Cibernética.

El presente trabajo pretende justificar la necesidad de la inclusión transversal de la Teoría de Sistemas y dar pautas para la propia formación del profesorado en esta área metodológica e interpretativa del mundo físico y natural hoy emergente.

Para introducir el aparato matemático de la teoría de sistemas en segundo de Bachillerato, los alumnos deben tener cierta soltura tanto en el manejo de los conceptos y ecuaciones de la termodinámica como en las maniobras de derivación e integración. Como esto dista de ser una realidad, se propone introducir una aproximación más cualitativa, asequible e intuitiva.

El término **sistema** se utiliza a menudo de manera ambigua o se aplica a objetos muy diferentes: hablamos de sistemas políticos y económicos, de

sistema como sinónimo de método o protocolo que debe seguirse para realizar una tarea, etc. Si pretendemos aplicar los principios de la Cibernética para estudiar sistemas naturales, debemos empezar delimitando el término sistema a las exigencias de la termodinámica: entenderemos por sistema **el conjunto de elementos articulados de manera que pueden utilizar una fuente de energía para producir un trabajo.**

Aún así el término abarca objetos muy diferentes: una piedra que cae es, puesto que se ajusta a la definición, un sistema. La Tierra entera es un sistema, el sistema solar otro, una bacteria o cualquier otro ser vivo también lo es, etc.

Sin embargo no todos los sistemas presentan el mismo interés para su estudio en el contexto de la asignatura de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente; unos por ser demasiado simples, como la piedra que cae, y otros, como es el caso de un ser vivo, por ser demasiado complejos y quedar fuera de nuestro alcance un estudio no reduccionista. Nos centraremos en buscar ejemplos que sean ilustrativos para introducir los conceptos básicos que nos interesan.

La Teoría de Sistemas busca, en esencia, comprender de forma global los procesos que rigen el funcionamiento de los sistemas y en especial comprender la forma en que aparecen las propiedades que presenta el sistema cuando se encuentra en funcionamiento. Estas propiedades que sólo se presentan cuando el sistema funciona y que no residen en los componentes ni en la estructura del sistema, reciben el nombre de **propiedades emergentes**, y a menudo no puede predecirse su aparición observando el sistema antes de que empiece a funcionar.

(*) I.E.S. "Isidra de Guzmán". C/ Gardenia S/N, 28803 - Alcalá de Henares, Madrid.

El estudio de las propiedades emergentes y de los procesos de emergencia es muy interesante, pero resulta también demasiado complicado. En el contexto del segundo curso de Bachillerato es más asequible un estudio mecanicista de los sistemas. Para ello se acude a la Cibernética.

La Cibernética es, en principio, el **estudio del funcionamiento de las máquinas**. Centra su atención en los **mecanismos de control** que hacen que una máquina fabricada por el hombre (una lavadora, un coche...) tengan un comportamiento “inteligente”, **ajustando su funcionamiento al logro de un propósito**. Puede decirse, simplificando, que la Cibernética se interesa por estudiar los **sistemas propositivos**.

Estos sistemas propositivos se caracterizan, entre otras muchas cosas, por poseer una **información codificada** que compone el programa que deben seguir. Cuanto más ambiguo es el programa y más autonomía deja al sistema (más margen deja al sistema para explorar posibles soluciones a un problema), tanto más complejo resulta el comportamiento del sistema. La lógica borrosa intenta simular esas instrucciones ambiguas que parecen regir el comportamiento de los seres vivos más inteligentes.

Los programas que pueden guiar el funcionamiento de una máquina se estudian dentro de la teoría del procesamiento automático de la información, y componen las técnicas y lenguajes de programación, que también quedan fuera del ámbito de la asignatura que nos ocupa.

Otra característica de los sistemas propositivos es la existencia de **valores de referencia**, de origen externo o interno, a los que el sistema tiende a ajustarse. El ejemplo que suele citarse para ilustrar este punto es el de un horno que se programa para que se mantenga a una temperatura. Si ésta desciende, se activa una resistencia que calienta el horno. Si la temperatura sube, se apaga la resistencia. En este caso el valor de referencia procede del exterior del sistema (lo imponemos nosotros), y el sistema simplemente lo asume y ajusta su funcionamiento para ceñirse a él.

El valor de referencia será de origen interno si está especificado en el programa (información codificada) contenido en el sistema. Así ocurre, por ejemplo, con el sistema endocrino y su capacidad de regular la cantidad de glucosa en sangre. El valor óptimo de ese parámetro está escrito en nuestro “programa” y normalmente nos resulta imposible modificarlo.

El hecho de que el sistema pueda activar un mecanismo (la resistencia del horno) para ajustar un parámetro (la temperatura) hasta un valor determinado, implica que el sistema tiene que conocer el valor actual que tiene ese parámetro, es decir: el sistema tiene que tener un **mecanismo para recoger información sobre su propio estado**. El horno dispone de un termómetro; el sistema endocrino dispone del hipotálamo, que analiza constantemente la sangre. Naturalmente también debe disponer de un **mecanismo para activar o desactivar el dispositivo que modifica el parámetro considerado**. Este mecanismo es, en el caso del horno, un interruptor automático.

Por lo que hemos visto hasta ahora, el funciona-

miento del horno podría representarse por un esquema cíclico como el de la figura 1a. Aracil (1986) llama a estos ciclos estructuras causales circulares, bucles de ganancia o **bucles de realimentación**. Otros autores los llaman bucles de retroalimentación, feed-back, bucles de retroactivación, etc.

Es importante notar que en estos bucles, un incremento en el parámetro considerado dispara un mecanismo que hace disminuir su valor, por lo que el sistema tiende a no alejarse de ese valor de referencia. Por ello estos bucles se llaman **“bucles de realimentación negativa”**.

Los **bucles de realimentación positiva** son aquellos que, ante un aumento del valor real, activan un mecanismo que hace aumentar más aún ese valor; ese nuevo aumento activa más aún el mecanismo que hace aumentar el valor, etc. En el caso del horno la temperatura subiría sin control hasta que el aparato se estropeará. Lo dicho puede aplicarse a un ejemplo en el que el valor disminuyera: el parámetro considerado iría tomando valores cada vez menores hasta que el sistema dejara de funcionar. Se ilustra en la figura 1b la estructura de uno de estos bucles.

Los bucles de realimentación negativa, que parecen en principio más adecuados para guiar el comportamiento propositivo de un sistema que los de realimentación positiva, funcionan gracias a un mecanismo que contrarresta la tendencia del sistema a alejarse del valor de referencia. En el caso del horno era la resistencia la que aumentaba la temperatura cuando ésta empezaba a bajar. Dicho de otro modo, los bucles de realimentación negativa tienden a disminuir la discrepancia entre el valor real y el valor de referencia, mientras que los bucles de realimentación positiva tienden a incrementar esa discrepancia.

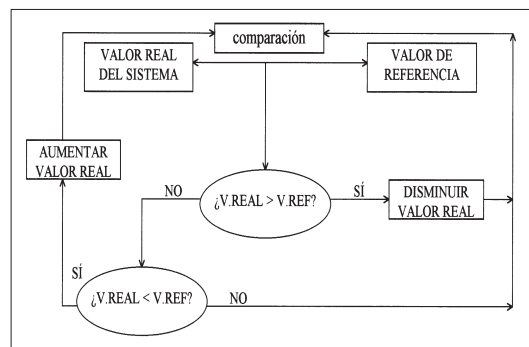


Figura 1a. Bucle de realimentación negativa.

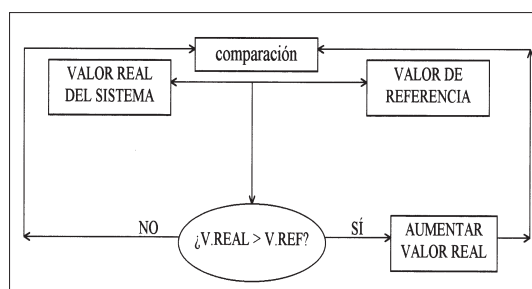


Figura 1b. Bucle de realimentación positiva.

Estos bucles se pueden perfeccionar si en vez de un mecanismo que contrarreste una de las posibilidades de alejamiento, ponemos dos mecanismos antagónicos, uno para aumentar el valor del parámetro considerado y otro para disminuirlo. En el caso del horno sería como disponer de una resistencia y de un mecanismo refrigerador: eso permitiría un ajuste mucho más fino y más rápido en la temperatura del horno. La resistencia se activaría si la temperatura descende, mientras que el refrigerador se encendería cuando la temperatura aumentara demasiado. Más aún, se podría poner un reostato (resistencia variable) acoplado a cada mecanismo para que si, por ejemplo, la temperatura subiera mucho, el refrigerador trabajara con más potencia que si la temperatura hubiera subido menos. De esta forma podríamos representar el funcionamiento del sistema con la gráfica de la figura 2.

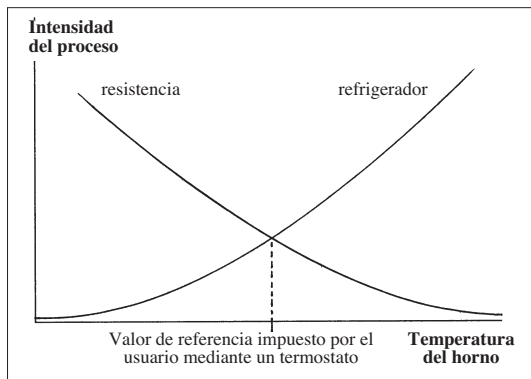


Figura 2. Mecanismos de acción antagónica para la regulación de la temperatura de un horno hipotético que tuviera un mecanismo refrigerador y un mecanismo calentador (resistencia) que funcionaran continuamente. El punto de corte de ambas líneas se corresponde con la temperatura en la que el sistema tiende a mantenerse, es decir: con el atractor del sistema. Obsérvese que ambos mecanismos aumentan su intensidad de funcionamiento al alejarse del punto de equilibrio, lo que garantiza un regreso rápido hacia el valor de referencia de la temperatura.

El cuerpo humano y en general el cuerpo de los animales homeotermos, dispone de mecanismos antagónicos de este tipo, con sus correspondientes reostatos acoplados: el temblor es el equivalente a la resistencia (hace subir la temperatura) y la sudoración, u otro mecanismo ligado a la evaporación de agua, sirve de refrigerador. (Fig. 3)

En las figuras 4a y 4b pueden verse otros dos ejemplos de sistemas que son mantenidos en un punto de equilibrio gracias a la actuación de mecanismos antagónicos de regulación.

No se agotan con esto las posibilidades de acoplamiento de bucles de realimentación. Es frecuente, en algunos sistemas que requieren un determinado valor de un parámetro para empezar a funcionar, la presencia de un bucle de realimentación positiva que sirve para que el sistema alcance rápidamente ese valor umbral, a partir del cual se activa un bucle de realimentación negativa que mantiene al sistema funcionando de manera continuada. (Ver la figura 5).

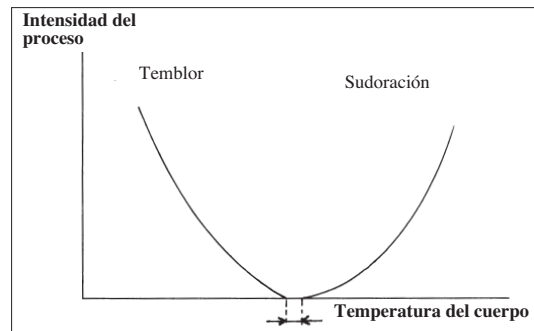


Figura 3. Mecanismos de acción antagónica para la regulación de la temperatura del cuerpo humano. En este caso la temperatura estable (el atractor) no se encuentra en el punto de corte de las curvas, sino en el estrecho intervalo en el que ninguno de ambos mecanismos está activado. Cuando se abandona la temperatura "óptima", se dispara uno de los dos mecanismos, lo que obliga al sistema a regresar al valor de referencia.

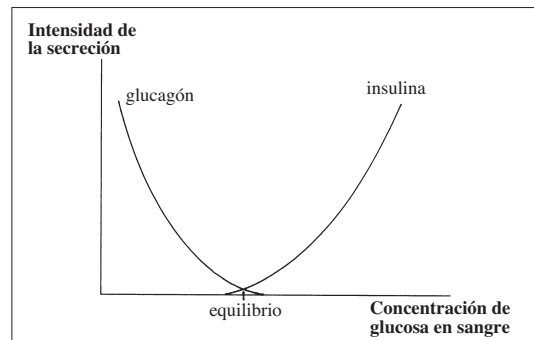


Figura 4a. Regulación de la concentración de glucosa en sangre (glucemia) mediante la secreción de hormonas de acción antagónica. La insulina disminuye la glucemia mientras que el glucagón la aumenta. El punto de corte de ambas curvas representa el estado al que tiende el sistema, es decir: el atractor. El valor de la glucemia que se corresponde con el equilibrio, representa el valor de referencia, escrito en el "programa" genético del organismo.

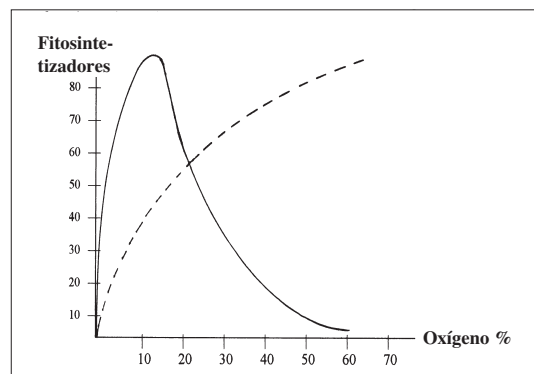
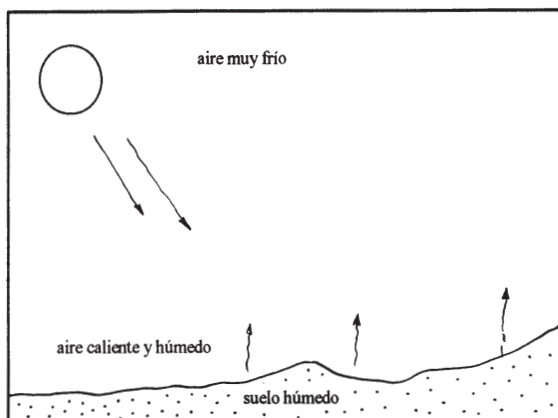
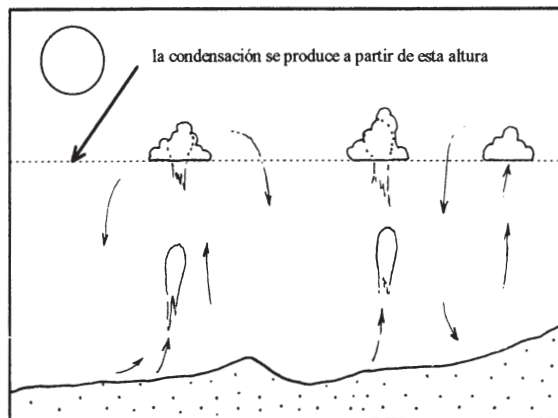


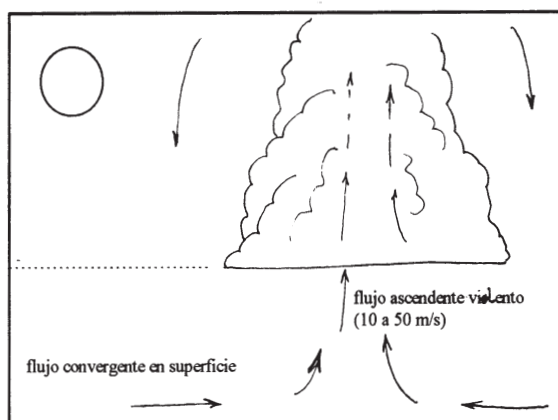
Figura 4b. El efecto del oxígeno en el crecimiento de los organismos (línea continua) y el efecto de la presencia de organismos en la abundancia de oxígeno (línea a trazos). El punto de intersección de estas curvas corresponde al nivel en que el sistema se encuentra regulado. (En Lovelock, 1993, p. 132).



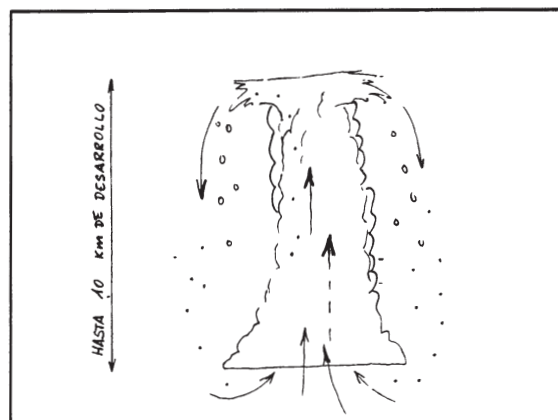
1.- Se presenta una situación propicia para la formación de nubes de tormenta (cumulonimbos), cuando hay una fuerte insolación, una fuente de humedad (el mar, el suelo húmedo, etc.) y aire frío en altura. La insolación produce una capa de aire húmedo y muy caliente cerca del suelo. Esto da lugar a un gradiente de temperatura que dará lugar a la convección.



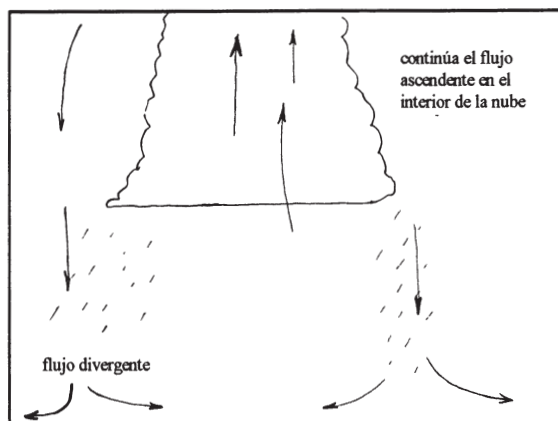
2.- Después de unas horas (sobre las doce del mediodía en verano) se dispara la convección. Las burbujas de aire húmedo, por condensación, dan lugar a nubes (cúmulos). La convección aún es difusa: cada "pompa" de aire sube independientemente.



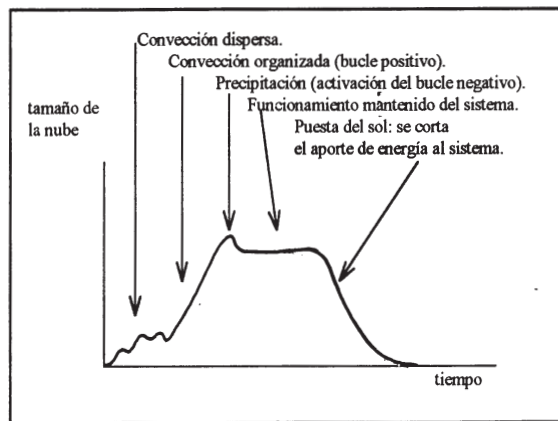
3.- La convección se vuelve violenta. Aparece un atractor que organiza el flujo convectivo en una corriente ascendente que absorbe a las demás. Comienza a formarse una nube de tormenta (cumulonimbo). La absorción del aire caliente de la superficie hacia la "chimenea" ascendente y la ascendencia de la masa de aire a favor del gradiente vertical de temperatura dentro de esa "chimenea", son dos procesos que se refuerzan mutuamente. El sistema ha entrado en un bucle de realimentación positiva que se mantiene gracias a que continúa la insolación.



4.- En el interior del cumulonimbo se forman gotas de agua grandes, que al ser llevadas a grandes alturas (donde hay temperaturas de hasta 50 grados bajo cero) se congelan. Su peso tiende a hacerlas caer, pero las fuertes corrientes ascendentes del interior de la nube vuelven a arrastrarlas hacia arriba. Se están formando así piedras de granizo. La nube continúa creciendo. Al sobrepasar un tamaño crítico, las piedras de granizo no pueden ser arrastradas de nuevo hacia arriba y caen. Comienza la precipitación.



5.- La precipitación tiene tres efectos: por un lado enfría el suelo y el aire cercano a él, amortiguando el gradiente que favorecía la convección; por otro lado crea cortinas de granizo o lluvia que frenan la insolación, cortando el aporte de energía al sistema, y en tercer lugar, la masa de agua, al caer bruscamente, crea una fuerte corriente de aire hacia abajo y hacia los lados (como al abrir bruscamente una ducha), que contrarresta el flujo convergente y ascendente que alimentaba la nube. El sistema ha disparado un bucle de realimentación negativa.



6.- El comienzo de la precipitación, como resultado de sobrepasar un umbral crítico, puede ser entendido como una catástrofe, un colapso del sistema resultante de un bucle de realimentación positiva. Podemos decir que una nube de tormenta es un sistema que presenta criticalidad, ya que evoluciona espontáneamente hacia un punto crítico en el que es susceptible de cambiar bruscamente (catastróficamente) de comportamiento.

Figura 5. Bucles de realimentación positiva y negativa en la formación de una nube de tormenta.

LOS SISTEMAS PROPOSITIVOS

Podemos aceptar en principio que un horno o una lavadora son sistemas que tienen programado un propósito bien definido, ya que han sido contruidos conscientemente para un fin concreto. Más difícil es aceptar que el sistema endocrino, que no ha sido fabricado por nadie en concreto, es también un sistema propositivo. Aún así es muy cierto que tiene un propósito, una propiedad emergente por decirlo con más corrección: la de mantener la concentración de glucosa en sangre, junto con otros muchos parámetros más, constantes dentro del organismo. Este mantenimiento activo de unos parámetros dentro de unos márgenes estrechos recibe el nombre de **homeostasis**.

Pero más difícil aún es aceptar que la atmósfera también es un sistema propositivo, y sin embargo eso parece desprenderse del gráfico de la figura 4.b: la interacción de la biosfera y la atmósfera dota a esta última, aparentemente, de un valor de referencia al que tiende a ajustarse. Podemos decir que de la interacción emerge la propiedad de la autorregulación, de la estabilización en una determinada concentración de oxígeno, de la homeostasis en definitiva¹. Podemos decir que la atmósfera presenta la *aparencia* de un sistema propositivo. Esto nos evitará una discusión filosófica un tanto estéril, sobre todo teniendo en cuenta que estos **sistemas aparentemente propositivos** los encontraremos con frecuencia.

La erosión fluvial, por ejemplo, se intensifica en los relieves jóvenes y abruptos, mientras que el levantamiento isostático se intensifica, por haber disminuido el peso de la litosfera, en las zonas que han sido erosionadas. Esta relación entre isostasia y erosión es la que subyace en el “ciclo de Davis” (ver la fig. 6).

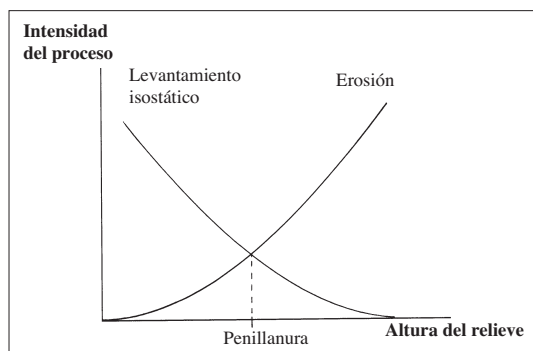


Figura 6. La erosión y el levantamiento del relieve por isostasia, son mecanismos de acción antagonista que se intensifican cuando la altura del relieve se aleja de un valor de referencia. Cuando el relieve es llevado se pone de manifiesto cuando se representa el porcentaje de la superficie de la tierra emergida que se encuentra a esta altura (ver fig. 9).

(1) Este mantenimiento activo de la atmósfera en un constante desequilibrio químico es, según Lovelock (1979), lo que permitiría detectar desde el espacio exterior la presencia de vida en un planeta. Consideraciones como la expuesta acerca de la capacidad de la biosfera para regular la composición de la atmósfera, son las que llevaron a este autor a realizar el estudio de los mecanismos cibernéticos de autorregulación en el planeta, que publicó con el nombre de “hipótesis Gaia”.

ATRACTORES

¿Qué observamos cuando representamos el funcionamiento de un sistema propositivo o aparentemente propositivo en función del tiempo? Parece claro que si se tratara de un sistema en el que los mecanismos antagonísticos de control funcionan con una perfección infinita, el sistema permanecería inmóvil en el punto de equilibrio y su trayectoria en el tiempo sería una recta. Podríamos decir que el sistema se encuentra en un **estado estacionario**.

Al tratar con sistemas no tan perfectamente ajustados cabe esperar que se presenten fluctuaciones que pueden ser más o menos regulares y más o menos periódicas. Si un sistema oscilara de forma continua entre dos estados extremos separados entre sí una amplitud A , repitiendo el mismo estado cada periodo de tiempo T , su trayectoria sería una sinusoide y podríamos decir que el sistema se encuentra en un **estado periódico**.

Estas fluctuaciones son frecuentes en los sistemas naturales, pero no son repeticiones perfectas y su gráfica a lo largo del tiempo no es, por lo tanto, una sinusoide, sino que es una gráfica irregular, que vista en conjunto parece representar la repetición de una serie de estados, pero que en vez de tener los contornos suaves de una sinusoide, presenta un aspecto picudo y desordenado. Podremos decir entonces que el sistema se encuentra en un **estado en el que fluctúa caóticamente**, aunque se mantiene dentro de unos márgenes que pueden ser bastante estrechos.

Estos tres estados son muy característicos de los sistemas en general; puede decirse que lo normal es que cuando un sistema empieza a funcionar, y máxime si contiene mecanismos complejos que guían su comportamiento, como los dispositivos antagonísticos ya comentados, encuentre tarde o temprano una función de las descritas a la cual ajusta su comportamiento, permaneciendo estable en ese comportamiento hasta que una alteración externa venga a sacarlo de ese estado. Esto puede entenderse como una reformulación del principio de inercia de Newton.

Estas trayectorias que el sistema sigue cuando representamos su estado en función del tiempo, reciben el nombre de **atractores**. En el primer caso tenemos un **atractor estacionario**, en el segundo, un **atractor periódico** y en el tercero, un **atractor extraño**.

Los **atractores estacionarios** son característicos - así lo indica el nombre - de los sistemas que al encontrar determinado estado, se detienen en él. Ese atractor estacionario representa un estado de equilibrio estable. A veces se puede decir que el sistema “se ha parado” al llegar a ese estado, pero normalmente un atractor estacionario es indicativo de un sistema que es capaz de mantener activamente un estado gracias a mecanismos de control complejos. En estos casos el estacionamiento del sistema en un estado determina

do no es indicativo de una congelación del sistema, sino de un funcionamiento muy bien ajustado.

Un ejemplo de esto es el de una persona que permanece quieta de pie: la inmovilidad que se aprecia “desde fuera” oculta que en realidad en su interior hay mecanismos muy sofisticados para mantenerse inmóvil y en equilibrio: el cerebro procesa información procedente de los ojos y de los músculos y da órdenes a otros muchos músculos para que compensen instantáneamente cualquier desviación de la posición que se ha tomado como referencia.

Los atractores periódicos, por su parte, son característicos de sistemas muy simples (un péndulo, por ejemplo). También son característicos de sistemas que están diseñados específicamente para repetir una serie de estados, adoptando un comportamiento cíclico. Los semáforos de una ciudad son un ejemplo de esto. Naturalmente este atractor periódico puede contagiarse a otro sistema que dependa de él: así, el flujo de coches por una avenida puede reflejar el carácter periódico del sistema de semáforos que impone su ritmo de funcionamiento al tráfico.

Los atractores extraños aparecen en los sistemas que (a) tienen una marcada tendencia a volver una y otra vez sobre un mismo estado; (b) esta tendencia se ve entorpecida por la presencia de mecanismos de control antagónicos que pueden ser complejos, diversos y con velocidades de respuesta diferentes y (c) pueden estar expuestos a influencias externas desequilibradoras. Esto hace que el sistema nunca termine de estar totalmente ajustado, no encontrando así una posición de equilibrio estable ni un atractor periódico. Los atractores extraños aparecen en los sistemas complejos.

Los atractores extraños ofrecen una particularidad matemática interesante cuando se representan en función del tiempo (fig. 7), y es que la gráfica resultante presenta irregularidades a cualquier escala que se observe, lo que la hace no derivable (Mandelbrot, 1984, p.15), mientras que la gráfica de un atractor estacionario o de un atractor periódico, sí son derivables. Esta no derivabilidad es una característica de los objetos fractales. Los atractores extraños presentan generalmente geometría fractal.

Los objetos fractales, además, presentan otras características que también aparecen en los atractores extraños: (a) contienen la tendencia a la dispersión junto con la tendencia a la compresión (igual que una masa de empanadillas que extendiéramos y replegáramos sobre sí misma muchas veces); (b) presentan autosemejanza en las irregularidades (ofrecen un aspecto más o menos parecido cuando se los contempla con diferentes grados de aumento) y (c) son estructuras muy complicadas, generadas mediante reglas muy sencillas.

Los atractores extraños, con frecuencia hacen aparecer dentro del sistema objetos cuya estructura también tiene geometría fractal: las diaclasas en un macizo granítico, los pliegues en un orógeno, las estructuras sedimentarias y las nubes, son ejemplos de objetos cuya geometría fractal es un reflejo de la geometría fractal de los atractores extraños que los han originado.

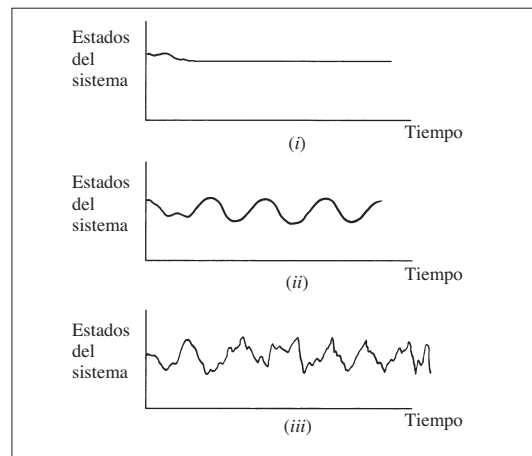


Figura 7a. Atractores estacionario (i), periódico (ii) y extraño (iii) en un sistema.

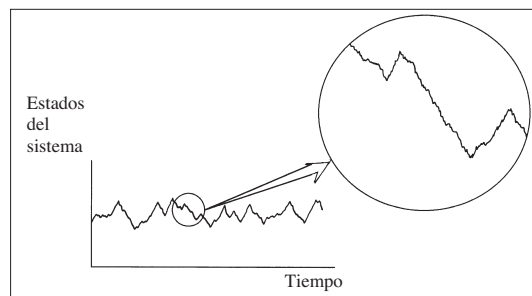


Figura 7 b. Un atractor extraño es irregular a cualquier escala que se observe. En teoría, aunque la escala de ampliación fuera muy grande, el aspecto de la curva seguiría siendo similar. Esta propiedad llamada autosemejanza, es una de las características de los objetos fractales.

COMPLEJIDAD Y SENSIBILIDAD A LAS CONDICIONES INICIALES

Aún está por encontrarse una buena definición del término “**complejidad**” aplicada al estudio de los sistemas. Entenderemos aquí como complejo un sistema que presenta un **comportamiento intrínsecamente impredecible** debido a uno o más de estos factores:

- Reglas de funcionamiento complicadas.
- Número muy elevado de componentes.
- Estructura muy compleja, es decir: relaciones complicadas entre sus componentes.
- Alta conectividad: el comportamiento de un componente influye en todos los demás.
- Inercia muy grande, bien sea por tener un tamaño grande o por presentar mecanismos que se oponen a los cambios.
- Presencia de mecanismos acumuladores de energías potenciales (gravitatoria, química, elástica, etc.) y presencia de mecanismos que pueden liberar bruscamente la energía acumulada, provocando comportamientos catastróficos en el interior del sistema. (Criticalidad).

g) Desajustes en los tiempos de respuesta de los mecanismos de control destinados a devolver el sistema al equilibrio: en el ejemplo citado antes, si el mecanismo que aumentaba la temperatura del horno y el que la disminuía se activaran con un margen de error amplio, el horno no podría mantener la temperatura constante; unas veces se alejaría por exceso del punto fijado, y otras por defecto, dependiendo del grado de error que en cada momento tuviera el termostato encargado de activar los mecanismos de regulación.

Hay descritos más factores pero, en definitiva, se trata de que los sistemas cuya composición, estructura o funcionamiento presentan cierto grado de complicación, no repiten dos veces seguidas la misma trayectoria. El primero que observó esto fue Edward Lorenz en 1963, que intentó realizar un modelo computerizado del funcionamiento de la atmósfera con la intención de realizar predicciones a largo plazo. Su sorpresa fue ver que en su modelo, aún partiendo de condiciones iniciales idénticas, el sistema no seguía dos veces el mismo camino. Él lo atribuyó al hecho de que su computadora sólo utilizaba seis decimales, y pensó que una computadora que tuviera mayor precisión en los cálculos sería capaz de reproducir una trayectoria por segunda vez.

Pero no ha sido así. Las simulaciones de sistemas complejos siguen proporcionando trayectorias no iguales (**trayectorias divergentes**) a pesar de partir de condiciones iniciales idénticas en varios miles de decimales. La impredecibilidad de la atmósfera ha resultado ser intrínseca, no debida a nuestra incapacidad para manejar decimales. Las predicciones sólo son fiables a corto plazo.

El estudio de los sistemas naturales como la atmósfera o la hidrosfera, que son sistemas complejos, no resulta accesible de forma directa ya que presentan, además de un gran tamaño (abarcen toda la superficie del planeta), una estructura muy complicada: la forma en que fluye la energía a través de ellos, los mecanismos mediante los que realizan el trabajo, etc., aún siendo relativamente simples de comprender, al afectar a un sistema tan grande, lo dotan de comportamientos impredecibles.

MODELIZACIÓN DE LOS SISTEMAS

Desde el momento en que asumimos que toda la atmósfera es un sistema complejo, y que lo que sucede en Terranova puede afectar al clima de la península Ibérica, la toma local de datos como única fuente de información, deja de tener sentido. Si queremos predecir el tiempo con cierta fiabilidad, necesitamos tener una visión global: necesitamos datos de todo el mundo y necesitamos un **modelo** (informático) que pueda utilizar esa avalancha de datos procedente de los barcos, aviones, satélites

meteorológicos, observatorios de superficie, etc., para elaborar una predicción.

Los modelos son precisamente simulaciones del funcionamiento de un sistema. Los sistemas que resultan inaccesibles por su tamaño, por funcionar en una escala de tiempo especialmente larga o corta, por utilizar unas energías demasiado altas, o por tener una estructura muy complicada, pueden simularse, para su estudio, mediante modelos.

El término “modelo” también contiene cierta ambigüedad, pero en este contexto se refiere a la simulación que se realiza de la composición, estructura o funcionamiento de un sistema. Se pueden hacer modelos de cartón, de madera o de otros materiales, se puede hacer un modelo de la convección en el manto poniendo a hervir agua en un vaso de precipitados (Fig. 8); hay modelos matemáticos que utilizan tan sólo las ecuaciones que controlan el funcionamiento del sistema² y hay modelos, llama-

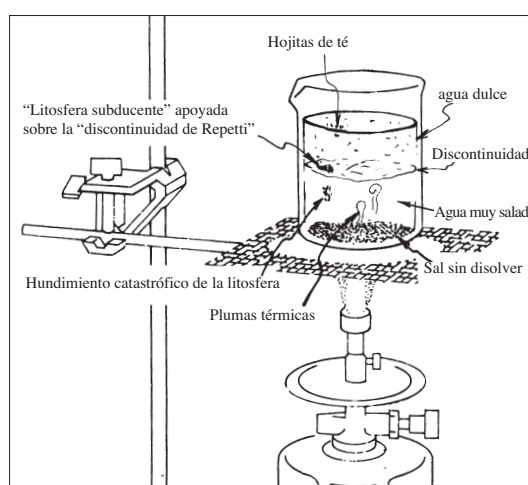


Figura 8. Se puede modelizar la convección en el manto terrestre poniendo a hervir a fuego vivo un vaso grande de precipitados en cuyo fondo se han depositado tres cucharadas grandes de sal, sin remover el agua.

A medida que el agua del fondo se calienta disuelve sal y, aunque tiende a subir porque el agua de más arriba está fría, la densidad debida a la gran cantidad de sal disuelta lo impide. Se forma así una discontinuidad claramente visible comparable a la discontinuidad de Repetti, que separa dos zonas con regímenes convectivos diferentes. Se forman además plumas térmicas claramente visibles, algunas de las cuales consiguen atravesar la discontinuidad.

Añadiendo al vaso hojitas de una bolsa de té que ya haya sido hervida con anterioridad, pueden visualizarse mejor aún las células convectivas y puede verse cómo la litosfera subducente (las hojitas), a veces se queda apoyada sobre la discontinuidad (debido a que la densidad del “manto inferior” impide su hundimiento) para, a continuación, hundirse catastróficamente hacia el “núcleo”.

(2) Los problemas de física suelen ser precisamente eso: modelos matemáticos de situaciones especialmente simplificadas para que sean accesibles desde el cálculo. Es ya viejo el chiste del físico al que le pidieron que hiciera un estudio de una vaca y comenzó diciendo: “supongamos que la vaca es una esfera hueca...” Los sistemas complejos no son accesibles al cálculo a no ser que introduzcamos simplificaciones que pueden ser bastante extremas, como en el caso de la vaca.

dos de simulación numérica, consistentes en programas informáticos muy sofisticados que necesitan ordenadores muy potentes, que utilizan las ecuaciones que rigen el comportamiento de un sistema tratando de simular la evolución del sistema a partir de unas condiciones iniciales impuestas por el usuario.

Estos modelos numéricos tienen la gran ventaja de que pueden funcionar “en tiempo real” o bien pueden dilatar o contraer la escala de espacio, tiempo y energía a conveniencia del usuario. Son estos modelos los que se utilizan para diseñar aeronaves, sustituyendo a los costosísimos túneles de viento y a las maquetas de cartón piedra, también son modelos numéricos los programas que se usan para comprobar la resistencia a la rotura de una presa, para predecir los efectos de las riadas en el cañón del Colorado y de los incendios en los bosques, para evaluar la evolución de la atmósfera ante el incremento de CO_2 , para simular la convección en el manto terrestre y, desde luego, los programas informáticos que permiten las predicciones del tiempo.

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS

La construcción de modelos numéricos supone fabricar un programa informático que simule el funcionamiento del sistema que deseamos estudiar. Esta no es una tarea fácilmente accesible, pero hay algunas cosas ya hechas. Es muy interesante por ejemplo el programa “simearth”, que simula la aparición y la evolución de la vida en un planeta. En realidad casi todos los videojuegos un poco avanzados son modelos que simulan situaciones reales o ficticias.

Es más sencillo plantearse la elaboración de modelos materiales, buscando la forma de simular algún proceso que nos interese estudiar: el ciclo del agua, la subducción, la convección en el manto citada antes, la sedimentación fluvial, etc., buscando los materiales más adecuados y la forma de destacar el proceso que queremos poner de relieve.

Hay una tercera posibilidad que es quizá la más didáctica y la que mejor encaja en la visión sistémica con que se quiere impregnar la asignatura de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Se trata de intentar la elaboración de modelos matemáticos simplificados.

Los modelos matemáticos, como se dijo antes, buscan estudiar la evolución de un sistema mediante el análisis de las ecuaciones que rigen su funcionamiento. Parecería que el estudio de un sistema complejo, como puede ser la atmósfera, debe resultar difícil y que las ecuaciones que se pueden aplicar serán complicadas, pero la realidad es que no es así: la complejidad de la atmósfera no se debe a que contenga reglas de funcionamiento complicadas, sino a su enorme tamaño (cada molécula de gas es un componente) y a su elevada conectividad.

De todas formas no se trata de intentar averiguar las ecuaciones que rigen un sistema, sino de algo más sencillo: hay que identificar en un sistema los mecanismos que lo hacen funcionar, tratando de

desentrañar su estructura, y tratar de hacer una representación gráfica de los mecanismos antagónicos si los hay, y del atractor o de los atractores que encuentra el sistema. Veamos el ejemplo mencionado antes, de la erosión fluvial y el levantamiento isostático.

1.- Partimos de un hecho: los ríos tienden a elaborar penillanuras a una cierta altura sobre el nivel del mar. Precisamente esa altura es la que más abunda sobre los continentes, y su frecuencia (moda) se toma como una prueba “geográfica” de la existencia de una litosfera continental (Fig.9).

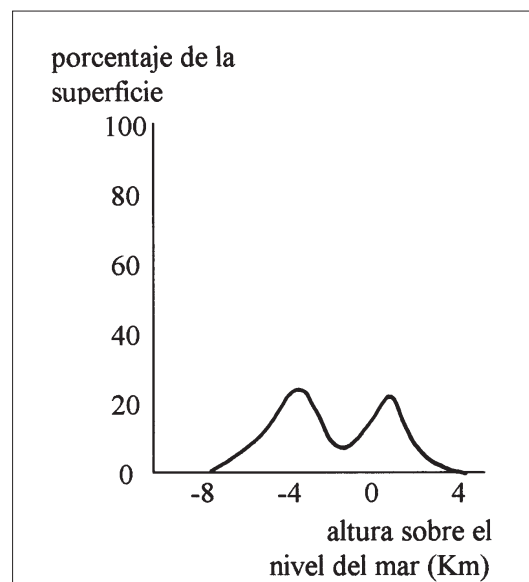


Figura 9. Un gran porcentaje de la superficie terrestre se encuentra a una altura de entre 500 y 800 m sobre el nivel del mar. Son las penillanuras. Otro gran porcentaje lo constituyen los fondos abisales, a unos 4.000 m de profundidad (simplificado de Anguita, 1988).

2.- Los ríos (digamos mejor los sistemas fluviales, por aquello de englobar en el término también a los arroyos, afluentes, etc.) tienden a elaborar penillanuras en su búsqueda del perfil de equilibrio. Un sistema fluvial no puede dejar de erosionar hasta que alcance su perfil de equilibrio, y cuando lo haya alcanzado habrá elaborado, probablemente, una penillanura.

3.- ¿Por qué tienen los sistemas fluviales capacidad erosiva? Porque la litosfera continental de vez en cuando se levanta. El levantamiento puede ser debido a varias causas: retroceso de los hielos tras una glaciación; erosión y pérdida de masa; plegamiento; colisiones entre continentes que aumenten el espesor de la litosfera... podemos englobar todas estas causas bajo el nombre del efecto común a todas ellas: el levantamiento se produce por **isostasia**. Los sistemas fluviales adquieren capacidad erosiva cuando se produce un levantamiento isostático. El descenso eustático del nivel del mar, visto desde el continente, sería indistinguible de un levantamiento

isostático de la tierra emergida, de manera que no viene al caso hacer esa distinción.

4.- El levantamiento isostático y la erosión fluvial son entonces mecanismos de acción antagónica. (ver fig. 6). La representación aproximada del funcionamiento de los mecanismos antagónicos que tienden a mantener el sistema en un punto de equilibrio (atractor), ya es un paso importante en el análisis sistémico, pero se puede ir un poco más allá:

5.- Tratándose de un sistema que produce trabajo, que utiliza una fuente de energía y que tiene elementos articulados entre sí con una estructura definida, deberíamos poder identificar los siguientes elementos que deben aparecer en toda máquina:

(a) **Fuente de energía:** el sistema dispone de una fuente de energía externa a la Tierra, el Sol, y de una fuente interna, el calor interno del planeta.

(b) **Mecanismos transformadores de energía:** el calor del Sol evapora el agua de la superficie y la lleva hasta la parte alta de la troposfera, donde se condensa y forma nubes; este proceso ha transformado la energía calorífica en energía potencial del agua, que ahora podrá caer pendiente abajo haciendo funcionar el sistema fluvial.

Por otro lado, el calor interno de la Tierra produce convección en el manto, que a su vez es quien va a mover las placas produciendo los choques entre éstas y los consiguientes plegamientos y levantamientos. El calor interno se transforma entonces en energía potencial del terreno.

(c) **Diferencia de potencial:** el sistema sólo podrá funcionar si presenta una distribución no uniforme de la energía, o dicho para que se entienda: los ríos no corren por las llanuras; para que el sistema fluvial funcione tiene que haber más energía potencial gravitatoria (más altura) en la cabecera que en la desembocadura.

(d) **Producción de trabajo:** el trabajo que realiza el sistema fluvial es el modelado del relieve y, en última instancia, la elaboración de una penillanura. Este trabajo se realiza movilizandolos materiales cuesta abajo y llevándolos hasta el nivel de energía potencial cero (erosión, transporte y sedimentación).

(e) **Adquisición de información sobre su propio estado:** los sistemas propositivos -y tratamos de averiguar si el sistema fluvial lo deben contener mecanismos para adquirir información sobre su propio estado y un valor de referencia con el que comparar su situación en un momento dado. ¿Existe tal mecanismo de autoobservación del sistema? Naturalmente. La erosión remontante es precisamente la que conduce aguas arriba la información acerca del incremento de energía potencial que la isostasia ha aportado al sistema (Fig. 10).

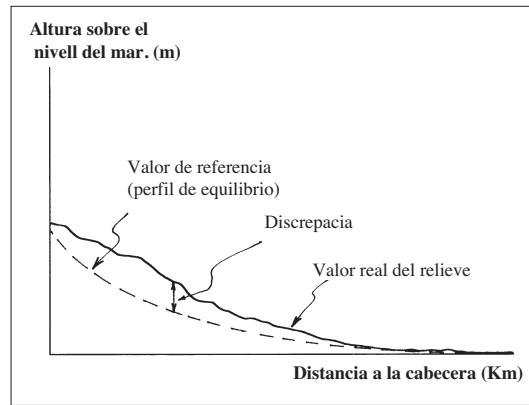


Figura 10. La erosión remontante transporta aguas arriba información sobre la discrepancia existente entre el valor real de la altura del relieve y el nivel de referencia (perfil de equilibrio). Es por lo tanto un mecanismo de autoobservación del sistema fluvial.

(f) El **valor de referencia** que posee el sistema es aquél en el cual el mecanismo (la erosión), capaz de disminuir el parámetro considerado (la altura del relieve), deja de actuar. Ese valor de referencia es, lógicamente, el perfil de equilibrio del sistema fluvial, al que se llega precisamente cuando se ha elaborado la penillanura. La erosión remontante informa al sistema fluvial sobre la discrepancia que hay entre el valor de referencia (el perfil de equilibrio) y el valor real.

6.- Como sistema complejo que es, el sistema fluvial que estamos estudiando debe presentar un atractor extraño en su comportamiento. Para ponerlo de manifiesto debemos representar la trayectoria del sistema en función del tiempo, indicando la actuación de los mecanismos antagónicos. Esto lo conseguiremos añadiendo a la representación de la figura 6 un tercer eje correspondiente al tiempo. Veremos que las dos líneas, la correspondiente a la erosión y la correspondiente al levantamiento isostático, se convierten en dos superficies, y que su intersección delimita una recta, que se correspondería con un atractor estacionario si el sistema estuviera perfectamente ajustado.

Sin embargo este ajuste no se produce, sino que el sistema oscila caóticamente alrededor del punto de equilibrio, encontrando no un atractor estacionario sino un atractor extraño. (fig. 11)

7.- Como se dijo antes, los atractores extraños de un sistema pueden hacer aparecer objetos físicos con una geometría fractal que sea reflejo de la geometría fractal del atractor que los originó. ¿Ocurre eso en este caso? En efecto; estas oscilaciones caóticas del sistema alrededor del punto de equilibrio quedan reflejadas en el modelado del paisaje: los levantamientos y encajamientos del sistema fluvial dan lugar a las terrazas. Las terrazas son la manifestación física y palpable del atractor extraño que

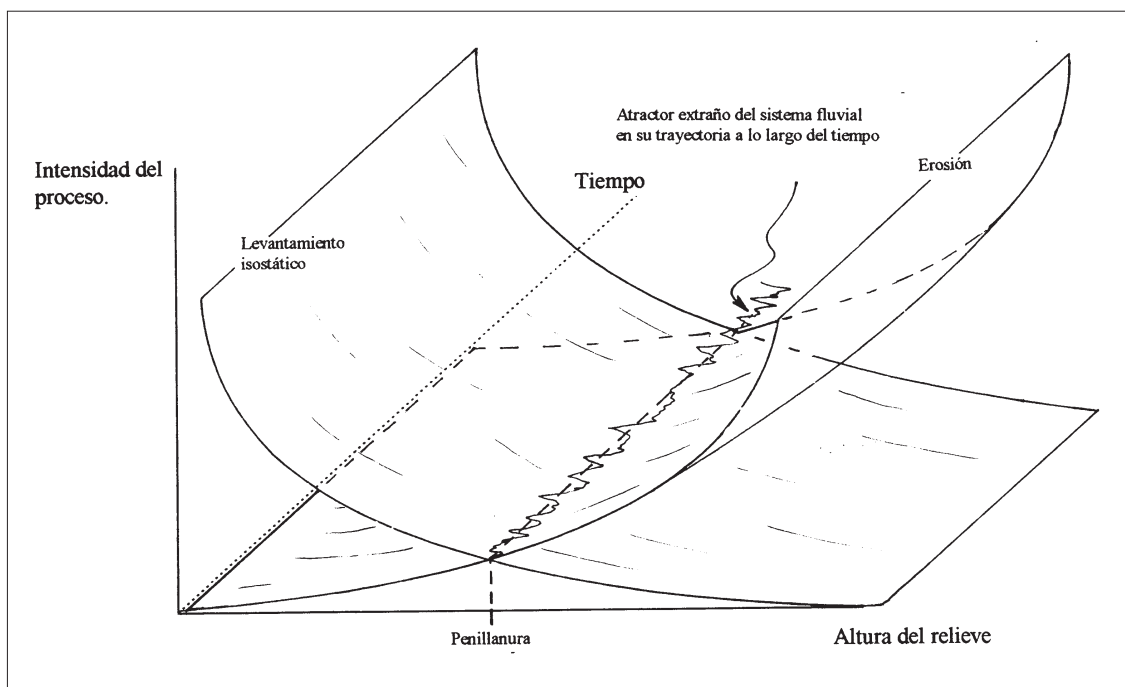


Figura 11. El atractor extraño del sistema fluvial aparece cuando representamos su trayectoria a lo largo del tiempo. La oscilación caótica del sistema alrededor del estado de equilibrio (penillanura), representa los sucesivos levantamientos y las sucesivas etapas de encajamiento fluvial. El atractor extraño queda reflejado en la forma de modelado que denominamos terrazas.

guía el funcionamiento de un sistema fluvial sometido a levantamientos isostáticos. Las terrazas deben tener geometría fractal.³

BIBLIOGRAFÍA

- Aracil, J. (1986). *Máquinas, sistemas y modelos, un ensayo sobre sistémica*. Ed. Tecnos. Tratado muy completo y claro sobre la teoría de sistemas y sus aplicaciones.
- Atkins, P.W. (1992). *La segunda ley*. Ed. Prensa Científica.-Scientific American. Además de ser un libro de divulgación sobre termodinámica es también una introducción a la teoría del caos y a la cibernética, que resultan de utilidad para una visión sistémica de los procesos naturales.
- Levin, R. (1992). *Complejidad*. Ed. Tusquets. Metatemas, 41. Introduce la teoría de la complejidad, aplicada a numerosos ejemplos y líneas de investigación actuales.
- Lovelock, J. (1979). *Gaia, una nueva visión de la vida sobre la Tierra*. Ed. Orbis-Muy Interesante, biblioteca de divulgación científica, nº 22, Barcelona 1985. Se plantea y se desarrolla la hipótesis "Gaia" (La Tierra vista como un sistema autorregulado). Es una aplicación de la teoría de sistemas a la biosfera.
- Lovelock, J. (1988) (trad. esp 1993). *Las edades de Gaia*. Tusquets editores. Metatemas, 29. Se plantean nuevas implicaciones de la teoría Gaia y nuevas predicciones. Se profundiza en la visión sistémica de la biosfera.
- Mandelbrot, B. (1984). *Los objetos fractales*. Tusquets, Metatemas, 13.
- Margalef, R (1996). *¿Pueden ser de origen endógeno las grandes catástrofes de la biosfera? La otra sombra de Gaia*. en *La lógica de las extinciones*, J. Agustí ed. Tusquets, Metatemas, 42. Varios autores analizan las grandes extinciones y los rasgos comunes a todas ellas.
- Ruelle, D. (1991). *Azar y caos*. Alianza editorial. Se desarrolla la teoría del caos, sus fundamentos y sus resultados y aplicaciones en las Ciencias de la Naturaleza.
- Stewart, I. (1990). *Representación matematizada de las especies, de sus aptitudes y del curso de la evolución*. Investigación y Ciencia, 168, Sept. 1990. Presenta de forma amena (en la sección de "juegos matemáticos"), lo que puede ser el espacio de las fases de la biosfera.
- Woodcock, A. y Davis, M.(1986). *Teoría de catástrofes*. Ed. Cátedra. Se define la teoría de catástrofes, que resulta ser de utilidad al estudiar el comportamiento de los sistemas. Se desarrollan muchos ejemplos de aplicaciones a sistemas concretos. ■

(3) Se suele decir que un objeto tiene geometría fractal si presenta una dimensión fraccionaria, pero esa no es una buena definición y, desde luego, no aporta nada útil para determinar si las terrazas tienen o no geometría fractal. Lo característico de los fractales es su carácter interrumpido (Mandelbrot, 1984) (fractus es la raíz de fractal). Esto ya nos da una pista clara de que efectivamente las terrazas, siendo estructuras no continuas sino aleatoriamente interrumpidas, presentan con toda probabilidad geometría fractal.