

Tema 5

Sistemas y Análisis de Sistemas

5.1 Sistemas y Análisis de Sistemas

La modelización matemática tal como se concibe hoy día, muestra una considerable influencia del enfoque sistémico y el análisis de sistemas como herramienta de conceptualización de los conocimientos disponibles acerca del funcionamiento de un sistema en un lenguaje formal muy próximo al lenguaje matemático.

El **análisis de sistemas** es el estudio de la composición y el funcionamiento de un sistema (Hugget, 1980) permitiendo la exploración de la estructura y comportamiento del mismo. La modelización es una de las herramientas del análisis de sistemas ya que implica la simplificación del sistema real para conseguir una adecuada comprensión del mismo. El origen del análisis de sistemas está en la **Teoría General de Sistemas** debida a Ludwing von Bertalanffy

Una aproximación sistémica a un problema medioambiental supone la descomposición de un sistema altamente complejo en un número de componentes discretos, cada uno de los cuales experimenta una serie de entradas y salidas de materia y energía y mantiene flujos de información con los demás. De este modo se pretende que el sistema sea más fácil de estudiar.

Se asume por tanto que es posible subdividir el mundo real en sistemas funcionales y determinar cuales son sus entradas y salidas. Debido a esta filosofía de trabajo, se ha identificado el análisis de sistemas con el **positivismo** y el **reduccionismo**, sin embargo ha permitido verificar en algunos sistemas la aparición de propiedades emergentes de carácter **holista** no esperables *a priori* de la interacción de sus componentes.

La construcción de un modelo requiere el análisis del sistema que se va a modelar, que partes son relevantes y que relaciones se establecen entre ellos. La descripción más elemental que puede hacerse de un sistema es enumerar el conjunto de sus componentes y las relaciones que se establecen entre ellos. A esta descripción puede asociarse un **grafo** como el que aparece en la figura 5.1 que representa un sencillo sistema demográfico. En este caso el sistema tiene cuatro componentes y respecto a las relaciones entre los mismos sólo se dice si son positivas o negativas. Todo sistema tiene una serie de propiedades que dependen de la naturaleza de sus componentes y otras que están ligadas a la forma en la que estas se organizan.

En el ejemplo de la figura 5.1 aparecen dos bucles de realimentación, uno positivo y otro negativo. El positivo, si apareciese aislado, supondría el incremento indefinido de la población; el negativo supondría la disminución de la misma hasta alcanzar un valor estable de cero.

Las influencias entre recursos, población y muertes no forman un bucle ya que las direcciones de las influencias no generan un camino sin fin de unos componentes a otros.

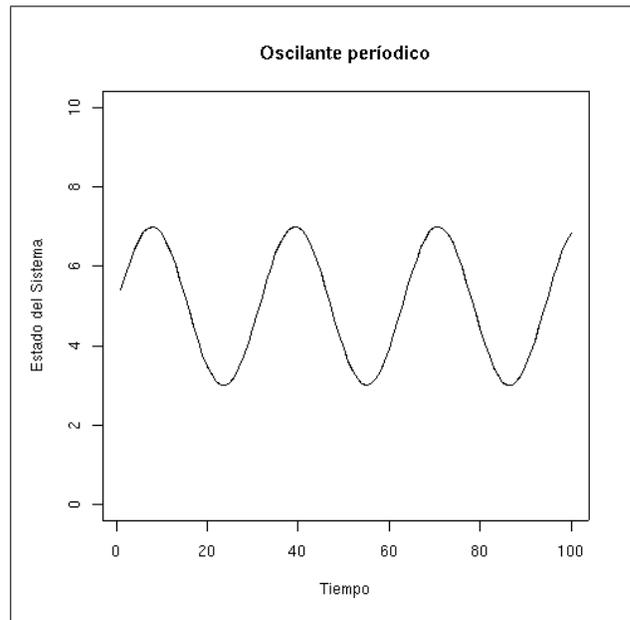


Figura 5.1: Representación de un sistema demográfico sencillo, reelaborado de Aracil y Gordillo (1997)

5.2 Clasificación de los sistemas

Se han propuesto diversas clasificaciones de los sistemas que pueden estudiarse mediante modelización. Una de las más utilizadas distingue entre:

Abiertos , se producen transferencias de materia, energía e información con el exterior. Están sujetos por tanto a la acción de fuerzas externas. Una cuenca fluvial es un ejemplo de sistema abierto.

Cerrados , no intercambian materia pero si energía o información. La Tierra en su conjunto sería un sistema cerrado.

Aislados , no se produce ningún tipo de intercambio, no existen en la naturaleza.

Otra clasificación, debida a Chorley y Kennedy (1971), distingue entre:

Sistemas morfológicos Se da especial relevancia a las relaciones entre las diversas variables que caracterizan al sistema que se establecen cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio; por tanto se considera irrelevante el paso del tiempo. Un buen ejemplo son las ecuaciones de la geometría hidráulica que muestran el ajuste que se produce entre diversas propiedades morfológicas de los sistemas fluviales y el caudal. Se considera que esta relación responde a un estado de equilibrio invariante con el tiempo, a no ser que se modifiquen las condiciones del flujo.

Las ecuaciones 5.1 a 5.3 muestran estas relaciones, w es la anchura del cauce, h la profundidad, v la velocidad del flujo y Q el caudal. la figura 5.2 muestra estas relaciones.

$$w = aQ^b \quad (5.1)$$

$$h = cQ^f \quad (5.2)$$

$$v = kQ^m \quad (5.3)$$

$$(5.4)$$

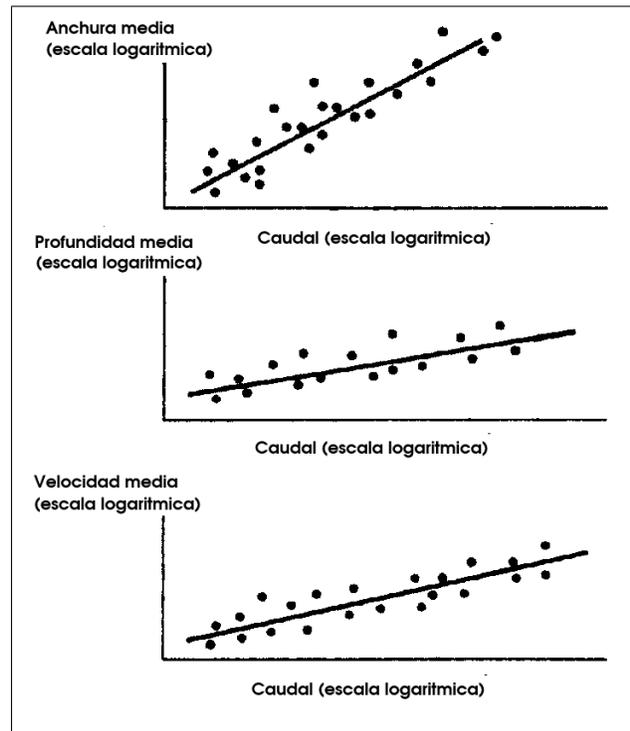


Figura 5.2: Ajuste de las ecuaciones de geometría hidráulica

Sistemas en cascada El sistema se divide en una serie de subsistemas que se enlazan por flujos de transferencia de materia o energía. Un buen ejemplo sería la consideración del ciclo hidrológico como un conjunto de componentes entre los que se producen transferencias de agua y de energía asociada a los movimientos y cambios de estado de esta. Se trata de un tipo de sistema en el que el tiempo sí tiene un papel fundamental, los flujos por otro lado no modifican a los componentes.

Sistemas proceso-respuesta Combinan características de los sistemas morfológicos y en cascada. Se da especial relevancia en las relaciones entre las **formas** del sistema y los **procesos** que actúan condicionados por dichas formas pero al mismo tiempo modificándolas. Si se considera el sistema hidrológico a una escala espacio-temporal más detallada, puede estudiarse el conjunto ajuste entre formas y procesos que se produce.

Sistemas de control Similares a los sistemas proceso-respuesta pero incluyendo control humano que depende de las variables de estado del sistema, tal como ocurriría en una cuenca fluvial regulada.

En realidad esta clasificación supone ya un cierto grado de modelización, dependiendo de la escala espacial o temporal que interese se toman en consideración unos u otros aspectos del sistema que se está estudiando.

Salvo los sistemas morfológicos, todos los demás son **sistemas dinámicos**, es decir el tiempo interviene de forma significativa afectando a las características relevantes de los mismos.

5.3 Sistemas dinámicos. Trayectorias y estabilidad

Cuando se considera un sistema dinámico resulta fundamental el concepto de **trayectoria**. Se denomina así al conjunto de valores que toma una variable a lo largo del tiempo. Es decir, evolución temporal y trayectoria son conceptos sinónimos. La trayectoria puede representarse mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales:

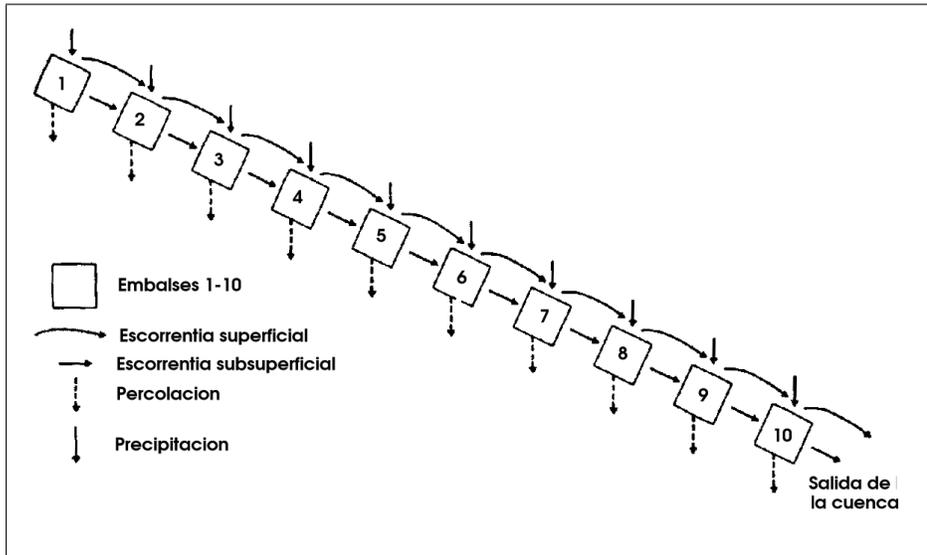


Figura 5.3: Esquema de un sistema en cascada aplicado al flujo de agua en una cuenca

$$\frac{dY_1}{dt} = f_1(X, Y, \theta) \quad (5.5)$$

$$\frac{dY_2}{dt} = f_2(X, Y, \theta) \quad (5.6)$$

$$\frac{dY_n}{dt} = f_n(X, Y, \theta) \quad (5.7)$$

donde Y representa el conjunto de variables dependientes, X las variables independientes y θ el conjunto de parámetros; si el número de variables dependientes es menor o igual a 3, también puede representarse mediante un gráfico en el que aparecen tantos ejes como variables. En la figura 5.4 se aprecia la trayectoria del modelo de Lorenz de la dinámica de la atmósfera, se trata de un modelo muy sencillo basado en tres variables con tres ecuaciones diferenciales acopladas que, sin embargo, muestra un comportamiento caótico.

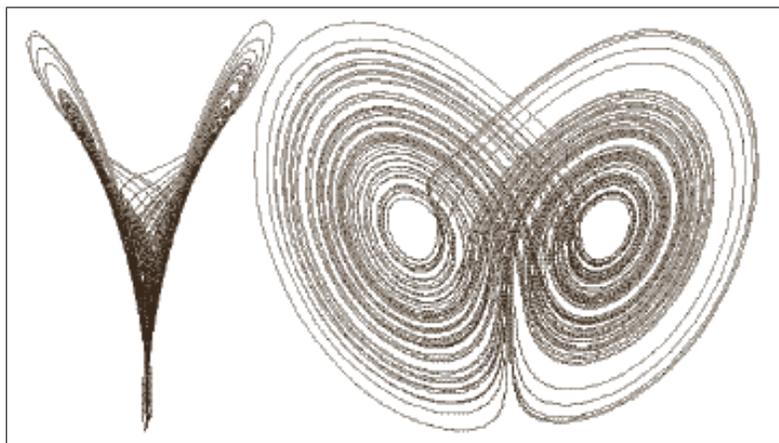


Figura 5.4: Trayectoria de un modelo simplificado del sistema atmosférico. El atractor de Lorenz

Las trayectorias pueden tener infinitas formas, los principales tipos son (figuras 5.5 y 5.6): *constante*, *creciente*, *decreciente*, *sigmoideal*, *oscilante periódico*, *oscilante amortiguado*, *oscilante expansivo*, *caótico-catastrófico*.

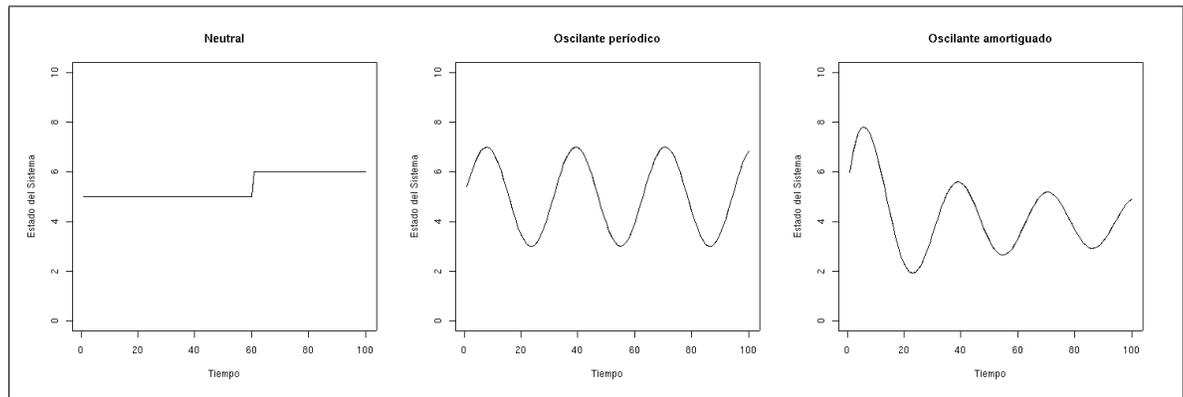


Figura 5.5: Posibles trayectoria de los sistemas

Muy relacionado con las características de las trayectorias está el concepto de estabilidad o equilibrio del sistema. La estabilidad de un sistema suele visualizarse con facilidad mediante la analogía de una bola en un terreno de diversas características (figura 5.3). En estos ejemplos, el eje de abscisas representa el conjunto de variables de estado del sistema y el eje de ordenadas la inestabilidad del sistema, de manera que la bola (el sistema) tiende a ir hacia el conjunto de valores de las variables de estado que supone mayor inestabilidad, siguiendo siempre las trayectorias permitidas por el sistema que se representan por la línea sobre la que reposa la bola.

Equilibrio Ausencia de cambio entre los diferentes componentes, las variables de estado no cambian con el tiempo. No se requieren flujos de materia o energía para mantener estos valores. Puede identificarse con trayectorias estables u oscilantes amortiguadas.

Desequilibrio Cambio constante a la búsqueda de una nueva situación de equilibrio. Trayectorias crecientes o decrecientes

Estado fijo en el que un flujo constante de materia y energía mantiene constantes los valores de las variables de estado. Es característico de los sistemas abiertos como los seres vivos.

Equilibrio dinámico El sistema aparenta estar en equilibrio pero en realidad sus variables de estado se modifican lentamente.

Equilibrio metaestable El sistema está en equilibrio dinámico salvo que su trayectoria abandone una determinada región del espacio de fases superando un valor umbral de algunas variables de estado. En esta situación el sistema pasa a estar en desequilibrio hasta que se alcanza una nueva situación de equilibrio en una región diferente del espacio de fases. Puede identificarse con trayectorias oscilantes expansivas y catastróficas.

5.3.1 Sistemas jerárquicos

La **Teoría de los Sistemas Jerárquicos** supone un paso más allá. Se fundamenta en la idea de que los componentes de un sistemas constituyen (cada uno de ellos) un sistema con su propia complejidad. Diferentes sistemas se anidan de este modo a diferentes escalas (figura 5.8). En biología resulta muy ilustrativo el ejemplo de los seres vivos, compuestos por órganos, compuestos por subelementos, compuestos por células, compuestas por orgánulos, compuestos por moléculas, compuestas por átomos, compuestas por partículas subatómicas, etc.

Lo realmente interesante de esta idea es que, al final toda la complejidad de un sistema puede reducirse, desde la perspectiva de la escala del sistema mayor en el que se inserta, a una serie de salidas en respuesta a unas

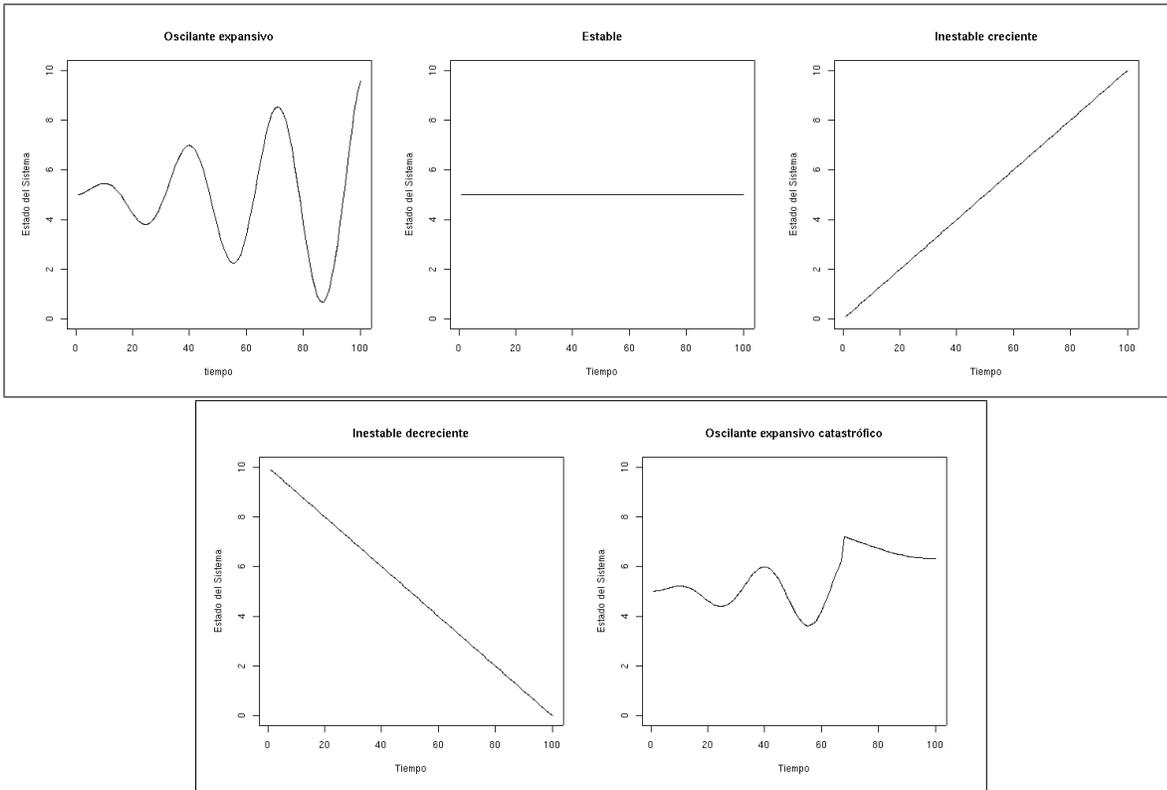


Figura 5.6: Posibles trayectoria de los sistemas. 2

entradas que pueden representarse mediante ecuaciones sencillas por lo que no sería necesario estudiarlo en detalle.

Cuando se pasa del individuo a la comunidad, ecosistema, etc. el problema es que no aparecen límites definidos entre componentes, salvo ejemplos como las cuencas hidrográficas, sin embargo los conceptos siguen siendo válidos. Se hace necesario identificar los componentes y sus relaciones modelizarlos mediante ecuaciones sencillas y observar su comportamiento conjunto que a su vez se podrá resumir en una serie de salidas en respuesta a unas entradas. La forma en que las salidas responderán a las entradas puede no ser en absoluto evidente a partir de la formulación del modelo y tratarse de propiedades emergentes.

La introducción de la Teoría de Sistemas en las ciencias ambientales, con toda su vocabulario de componentes, entradas o salidas, ha llevado a un planteamiento en el que se considera al objeto estudiado (la Tierra a cualquier escala espacial o temporal) como una caja con entradas y salidas. El objetivo de la investigación será aumentar el conocimiento acerca de como la estructura del sistema transforma las entradas en salidas y como los cambios en las entradas pueden modificar la estructura del sistema y por tanto sus salidas:

De este modo se consigue un marco conceptual que permite una nueva aproximación al estudio de sistemas complejos ya que permite el desarrollo de modelos matemáticos con los que experimentar con representaciones (modelos) numéricas de la realidad. Este marco conceptual es además común a todas las ciencias (desde la física a la economía) con lo que se permite la introducción de modelos y teorías procedentes de diferentes ciencias favoreciéndose los enfoques interdisciplinarios.

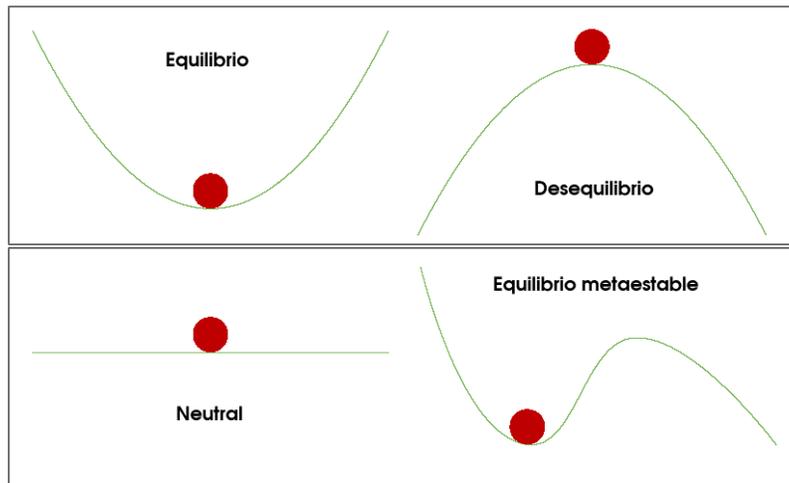


Figura 5.7: Situaciones de un sistema en cuanto a la estabilidad

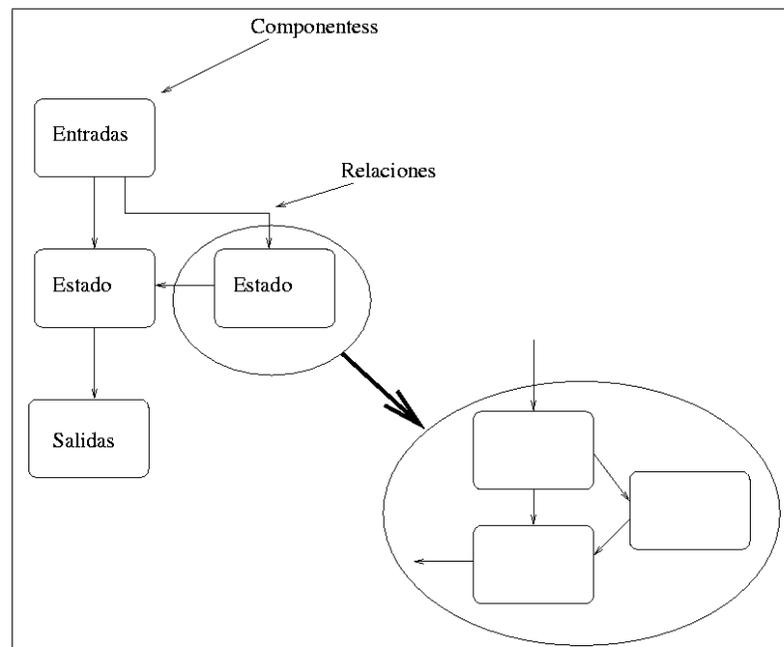


Figura 5.8: Componentes y relaciones en un sistema