

Tema 1

Modelos y Medio Ambiente

1.1 Sistemas Ambientales

Uno de los conceptos más ampliamente utilizados en la investigación científica es el de **sistema**. La definición más habitual de **sistema** es la debida a Chorley y Kennedy (1971) que definieron sistema como *un conjunto estructurado de componentes y variables que muestran relaciones entre ellos y operan en conjunto como un todo complejo de acuerdo con unas pautas observadas*.

Un sistema se percibe como algo que posee una entidad que lo distingue de su entorno, aunque mantiene una interacción con él. Esta identidad permanece a lo largo del tiempo y bajo entornos cambiantes.

En Ciencias de la Tierra y Ambientales se trabaja con diversos conceptos derivados de este como son **ecosistema**, **geosistema**, **sistema fluvial**, etc.

1.2 Naturaleza de la experimentación científica

Tradicionalmente se ha considerado que la **investigación científica** se desarrolla a través de la acumulación de observaciones del comportamiento de los sistemas estudiados en circunstancias naturales o manipuladas a través de un experimento. Estas observaciones permiten generar y contrastar hipótesis acerca de la estructura y función del sistema objeto de estudio para incrementar los conocimientos acerca del mismo.

Un **experimento** puede definirse como la obtención de una serie de variables de uno o varios individuos, previamente seleccionados de una población, con el objeto de comprobar una hipótesis o desarrollar una teoría. Ello implica un control absoluto de todas las variables y factores vinculadas con el experimento.

En sentido estricto sólo puede hablarse de experimentos en aquellas ciencias como la física o bioquímica, en las que resulta fácil aislar los elementos que se quieren controlar. Los experimentos en física se dividen en una serie de pasos:

1. Observación de un efecto
2. Formulación de hipótesis acerca del efecto observado
3. Medición de las variables dependientes e independientes
4. Modificación controlada de los factores independientes para producir el efecto deseado
5. Replicación de (3) para permitir la falsificación ¹ de (2)

¹Falsificación en el sentido dado por K.Popper al término, es decir la posibilidad de demostrar que la hipótesis es falsa. Según este autor, toda teoría científica debe incluir esta posibilidad para poder considerarse como tal

6. Derivación de leyes que expliquen la relación entre las variables
7. Establecimiento del rango de aplicabilidad de estas leyes

1.3 Situación en las Ciencias Ambientales

En el conjunto de las ciencias de la Tierra y medioambientales la observación de efectos y el establecimiento de hipótesis resulta más difícil debido a todo un conjunto de factores:

- **Complejidad** del fenómeno estudiado. Los procesos que actúan sobre el territorio se caracterizan por su carácter tridimensional, su dependencia del tiempo y complejidad. Esta complejidad incluye comportamientos no lineales, componentes estocásticos, bucles de realimentación a diferentes escalas espaciales y temporales haciendo muy complejo, o incluso imposible, expresar los procesos mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas. Las causas de esta complejidad son variadas:
 - Las **relaciones no lineales** implican que pequeñas causas puedan tener como consecuencia grandes efectos.
 - **Discontinuidad y bimodalidad**, existencia de diversos estados de equilibrio.
 - **Histéresis**, los procesos no son exactamente reversibles.
 - **Divergencia**, existencia de varios efectos para una misma causa.
 - Imbricación de **múltiples causas y efectos**.
 - El flujo de materia o energía no se traslada de un componente a otro sino que puede hacerlo de uno a varios o viceversa.
 - Las relaciones de **retroalimentación** (los efectos son causas de sus causas) son importantes y hacen que un sistema sea más complejo y su comportamiento difícil de predecir. Puede existir retroalimentación positiva (**homeorhesis**) que una vez iniciado el cambio tienden a mantenerlo o incrementarlo, o negativa (**homeostasis**) que tienden a compensar el cambio eliminándolo.
- **Imposibilidad de control**. En otras ciencias (física, química, etc.) es posible mantener los sistemas estudiados en condiciones controladas de laboratorio, en las ciencias ambientales este enfoque resulta imposible. Cualquier intento de llevar una porción del sistema al laboratorio implica una mutilación del mismo y la modificación total de las condiciones de contorno. La opción de los campos y parcelas experimentales pero por un lado suponen también un cierto aislamiento de la porción estudiada respecto al resto del sistema y por otro no se consigue el grado de control que se tiene en un laboratorio.
- Muy relacionado con el anterior problema está la **irrepetibilidad de las mediciones**, por ejemplo no podemos volver a medir la lluvia caída un día concreto. Por otro lado los procedimientos de medición suelen suponer la alteración del objeto de estudio durante la medición y tras los experimentos.
- Problemas de **escala** tanto espacial como temporal. Por una parte el problema es que en muchos casos el investigador sólo tenga acceso a una pequeña parte del continuo espacio-temporal en el que ocurren los procesos a estudiar, y que la visión que se puede tener de estos cambia con la escala. Por otro lado un mismo sistema puede comportarse de formas diferentes a diferentes escalas.
- Los sistemas ambientales son **multicomponente**, requieren comprender diversos aspectos geológicos, climáticos, hidrológicos, ecológicos, etc. y su imbricación. Por tanto es imposible que un sólo especialista pueda abordar el estudio de estos sistemas que deben ser necesariamente objeto de una investigación **multidisciplinar**.

Estos problemas, si bien son de difícil solución, no son tan graves como los que aparecen en ciencias sociales en las que el comportamiento de uno solo de los individuos estudiados es posiblemente más complejo que cualquiera de los sistemas estudiados en ciencias ambientales.

La investigación en ciencias ambientales tiene por otra parte un propósito fundamentalmente práctico dentro del cual es fundamental hacer prospectivas de futuro (planes de conservación), entender los impactos de acontecimientos que aún no han sucedido (evaluación de riesgos naturales), los impactos que puede tener la actividad humana (análisis de impacto ambiental). Para abordar el estudio de todo este tipo de problemas en unos sistemas que se caracterizan por el grado de complejidad antes mencionado, es imprescindible ser capaces de hacer una simplificación racional de los mismos.

1.4 La modelización como solución

Debido a la dificultad de llevar a cabo experimentos auténticos que cumplan con los criterios antes mencionados y que respondan a las necesidades prácticas de la investigación sobre sistemas ambientales se ha propuesto una amplia gama de modos de trabajo que relajan las estrictas condiciones que debe cumplir un experimento.

Una de estas líneas es el estudio de los sistemas ambientales mediante modelos. Un **modelo** es una representación simplificada de una realidad compleja de forma que resulte adecuada para los propósitos de la modelización. Esta simplificación se basa en una serie de asunciones acerca de como funciona un sistema que no son totalmente válidas pero permiten representar el sistema de forma más sencilla. Puesto que la validez del modelo depende de la validez de estas asunciones, es importante que las asunciones sean entendidas y establecidas de forma explícita. La necesidad de decidir que aspectos de la realidad deben incluir en el modelo hace que este refleje no sólo la realidad del sistema sino también la percepción que el investigador tenga del mismo o lo que es lo mismo las teorías que considera más adecuadas para representarlo.

De este modo podremos estudiar como diversas políticas, acontecimientos imprevistos o nuevas actividades afectan a los elementos del sistema representados en el modelo bajo la hipótesis de que los resultados serán similares en la realidad. Se experimenta por tanto con el modelo no con el sistema de manera que se solventan muchos de los problemas prácticos mencionados más arriba.

Por ejemplo, un modelo a escala de un cauce (figura 1.4) consiste en una maqueta que representa dicho cauce en tamaño reducido, utilizando materiales que también aparecen a escala (los grandes bloques pueden simularse con cantos, los cantos con arena gruesa, la arena con limo, etc.). Si dejamos entrar al modelo diferentes caudales, podremos observar las consecuencias (áreas inundadas, erosión, etc.) en todo el modelo y asumir que el sistema fluvial real se comportará igual.

Para lograr todos estos objetivos, la construcción de un modelo debe venir precedida:

1. Una definición clara de los objetivos del modelo; entre los objetivos habituales en modelización destacan:
 - Incremento del conocimiento acerca del sistema
 - Determinación de cuales deben ser las características de un modelo para reproducir la realidad. Si sabemos que áreas se inundan con un determinado caudal, modificaremos el modelo hasta conseguir en el los mismos resultados.
 - Comprobar los efectos de diversas actuaciones dentro del sistema ¿Qué ocurriría si ponemos una presa?
 - Gestión diaria, mediante la simulación por adelantado de los caudales previstos en función de la lluvia. Los resultados deben obtenerse en un tiempo razonablemente breve y a bajo coste, aunque el modelo no sea el mejor posible.
2. Una identificación adecuada de los elementos y procesos involucrados en el sistema a modelizar y relevantes para alcanzar los objetivos planteados;



Figura 1.1: Modelo a escala de un cauce

3. Determinación de la escala espacial y temporal más adecuadas. Cuando se trabaja en modelización el concepto de escala incluye tanto la extensión del marco espacio-temporal del modelo como la resolución del mismo, es decir los intervalos espaciales y temporales en que se va a subdividir ese marco. La elección del marco espacial implica establecer una frontera entre el sistema a estudiar y su entorno que no será objeto de estudio;
4. Pero puesto que ningún sistema es cerrado, es necesario determinar que flujos de materia, energía o información se producen entre el sistema y su entorno y son relevantes para los objetivos del modelo.

Por otro lado, en la construcción de un modelo hay que tener siempre presente el principio de parsimonia, aunque el añadir nuevos parámetros y variables pueda hacer al modelo teóricamente más potente, esta adición está siempre sujeta a una *ley de rendimientos decrecientes* en cuanto que las mejoras en el modelo serán cada vez más pequeñas cuanto más elementos introduzcamos. Además un modelo con un gran número de parámetros resulta más difícil de entender, calibrar o validar.

La modelización se ha convertido en un procedimiento de trabajo frecuente en aquellas situaciones en las que:

- Ensayar sobre sistemas reales puede resultar muy costoso
- Ensayar sobre sistemas reales puede llevar a la destrucción de los mismos
- Puede ser interesante alterar las escalas de tiempo

La modelización resulta por otro lado una herramienta de gran importancia para el desarrollo de la investigación científica. Un modelo matemático del funcionamiento de un sistema ambiental, integra diversas ecuaciones que modelizan a su vez aspectos concretos del mismo, cada una de estas ecuaciones representa por su parte una teoría, una hipótesis acerca del funcionamiento de dicho aspecto. Los modelos se convierten de este modo en *juegos de construcción* en los que integrar diferentes teorías científicas, estudiar su correspondencia con la realidad, así como sus interacciones.

Sirven por otro lado para representar, transmitir y ayudar a comprender teorías científicas. Aunque el lenguaje matemático y computacional sea complejo y rígido permite gran flexibilidad para representar una teoría de forma objetiva con lo que se facilita su comprensión a los demás. Esta facilidad para la transmisión de ideas y conocimientos favorece además el trabajo interdisciplinar. Cada miembro de un equipo multidisciplinar puede expresar el conocimiento que desde su campo se tiene sobre el sistema objeto de estudio como un componente de un modelo y entender fácilmente el conocimiento aportado por otros especialistas sobre aquellos aspectos con los que su componente debe interaccionar.

Un buen modelo, suficientemente validado, puede servir finalmente como herramienta para la gestión diaria de los sistemas ambientales. Para ello se le debe añadir una interfaz adecuada para que usuarios no expertos puedan predecir las consecuencias de acciones concretas o cuales son las actuaciones más adecuadas para conseguir determinado objetivo.

En resumen, los objetivos de la construcción de un modelo son:

1. Simulación:
 - Explorar situaciones (escenarios) en las que no contamos con datos empíricos
 - Interpolación entre medidas para estimar el valor de la variable
 - Estimar el valor de una variable a partir de otras
2. Predicción: Extrapolar más allá del espacio-tiempo donde tenemos medidas
3. Incremento del conocimiento:
 - Acerca del funcionamiento de los sistemas:
 - Acerca de cuales son los parámetros, variables, relaciones, procesos, estructuras y escalas importantes
4. Apoyo a la investigación científica:
 - facilitando la integración multidisciplinar
 - proporcionando un *laboratorio virtual*
 - facilitando la comunicación de la investigación y sus resultados

1.5 Tipos de modelos

- **Verbal:** responde a una descripción del sistema y su funcionamiento utilizando el lenguaje humano. Suele ser la fase previa al desarrollo de cualquier modelo
- **Icónico:** se basa en la representación de los componentes del sistema mediante símbolos. Los mapas serían un buen ejemplo.
- **Físico:** basado en prototipos construidos para estudiar el sistema. Existen dos tipos:
 - **Analógico:** Se basa en la analogía existente entre dos sistemas físicos diferentes uno, el que nos interesa estudiar, y otro mucho más sencillo de estudiar que actúa como modelo. Por ejemplo se han utilizado sistemas electrónicos como analogías del comportamiento de los acuíferos en los que la transmisividad del acuífero se incorporaba en el modelo añadiendo resistencias. También se han utilizado modelos analógicos para estudiar los flujos de agua en el interior de una planta.

- **a escala:** Se trata de modelos reducidos del sistema que se estudia. Se han utilizado mucho en hidrología, plantean la dificultad del cambio de comportamiento de los materiales con el cambio de escala. Por ejemplo las arena podría sustituirse por arcilla pero esta presenta comportamientos cohesivos que no tiene aquella.
- **Matemático:** Son los más utilizados actualmente y se basan en la representación del estado de los componentes de un sistema y los flujos entre ellos mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas. Pueden ir desde un conjunto de ecuaciones simples a programas complejos que incluyen una gran cantidad de ecuaciones y reglas y que, por tanto, requieren un ordenador para su resolución. La clasificación de los modelos matemáticos resulta bastante compleja ya que hay que tener en cuenta diversas consideraciones.

1.6 Desarrollo tecnológico y modelización

Hasta los años 50 del siglo pasado, la falta de capacidad de cálculo imposibilitaba la aplicación de modelos, lo que no impidió el desarrollo de los mismos. De hecho gran parte de las leyes físicas que rigen los procesos ambientales se desarrollaron en los siglos XVIII y XIX. Debido a la dificultad en los cálculos se tabulaban los resultados de las ecuaciones más complejas, pero estas no se podían interrelacionar.

Durante la segunda mitad del siglo XX, el formidable desarrollo tecnológico experimentado ha permitido atacar problemas y planteamientos teóricos que antes resultaba imposible.

- Enormes incrementos en la capacidad de computación junto a una no menos enorme disminución de sus costes;
- Métodos de medición en continuo, data loggers;
- Desarrollo de métodos de muestreo;
- Desarrollo de técnicas basadas en indicadores (en modelos en definitiva) para medir variables ambientales;
- Desarrollo de técnicas computacionales de análisis de datos.

El resultado de estos avances ha sido por un lado la mejor calidad de los estudios llevados a cabo y en segundo lugar la necesidad de una mayor cualificación técnica para llevarlos a cabo.

Desde el punto de vista de la modelización, estos adelantos han permitido la **simulación por ordenador**, es decir la resolución mediante un ordenador de un conjunto de ecuaciones que corresponden a modelos básicos, integradas formando un modelo matemático y reorganizadas de forma algorítmica mediante un programa informático.

En 1982 J.N.F. Jeffers escribía *La modelización es un modo de resolución de los problemas científicos que ha crecido rápidamente en los últimos años (...) estimulado por las grandes posibilidades que dan los ordenadores (...) más baratos, más pequeños y cada vez más potentes*. En 2005 se ha llegado al punto en que cualquier ordenador doméstico es capaz de ejecutar modelos relativamente sofisticados varias veces, de manera que la modelización ha dejado de ser un oráculo costoso al que acudir en busca de "la respuesta" sino que nos permite consultar diversas respuestas, bien modificando el modelo o modificando ligeramente los valores de parámetros y variables para, de este modo, obtener en lugar de un valor un rango de valores más probables.