

# MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

## Introducción

Los sistemas de información geográfica (SIG) manejan información territorial de diversos tipos, en función de los modelos de datos y de la naturaleza de las variables. Es una constante, sin embargo, que los textos sobre SIG mantienen siempre en un primer plano la información y el tratamiento de **variables nominales**, olvidando o mencionando sólo de forma anecdótica todo un conjunto de información territorial de naturaleza intrínsecamente cuantitativa.

El motivo de ello es, probablemente, que los SIG comenzaron traduciendo la información preexistente, reflejada en su mayor parte en forma de **mapas temáticos** de naturaleza intrínsecamente nominal. La traducción de este tipo de información se realizó en su momento de una forma bastante directa y, por tanto, poco traumática a pesar del cambio de métodos de trabajo. Sin embargo, este enfoque inicial se reveló pronto insuficiente, por lo que comenzaron las adaptaciones y la introducción de conceptos nuevos, inexistentes en la cartografía convencional como, por ejemplo, los relativos a vinculación con **bases de datos** o a la consideración de las **propiedades topológicas** de los elementos gráficos. Actualmente el cambio sigue y las tendencias van aparentemente a remolque de las tecnologías orientadas a objetos y de los sistemas distribuidos, conceptos ambos nacidos en ámbito de la informática, con lo que la separación entre el mapa convencional y el *mapa virtual* de los SIG se hace más profunda.

La captura de la información se ha hecho tradicionalmente de forma vectorial —categorías delimitadas mediante líneas con un trazado, en principio, exacto—. El manejo de información cuantitativa y con valores no limitados *a priori* a un cierto número de categorías sólo se ha hecho posible con la generalización de los medios informáticos. Éstos permiten manejar estructuras de datos bien adaptadas a la representación de este tipo de información, aunque pagando el precio de un mayor grado de abstracción.

## Concepto de modelo digital del terreno

Los modelos digitales del terreno son una parte importante de la información integrante de los sistemas de información geográfica. En la revisión de la literatura sobre ellos destaca, sin embargo, la escasa atención que se ha dedicado a los aspectos formales y conceptuales. Esta circunstancia ha conducido a que los libros clásicos sobre SIG traten muy superficialmente el tema de los MDT que, frecuentemente, se muestra llamativamente ausentes. Asimismo, pueden encontrarse ocasionalmente definiciones confusas, cuando no claramente erróneas. Este apartado tiene por objeto fijar la base conceptual de los MDT con el fin de abordar posteriormente los aspectos relativos a su construcción y manejo con mayor claridad.

## ¿Qué es un modelo?

Una definición bastante generalizada de modelo, originada en ámbitos geográficos, es "**una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades**" (Joly, 1988:111).

De la definición se deduce que la versión de la realidad que se realiza a través de un modelo pretende reproducir solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que queda representado por otro objeto o sistema de menor complejidad.

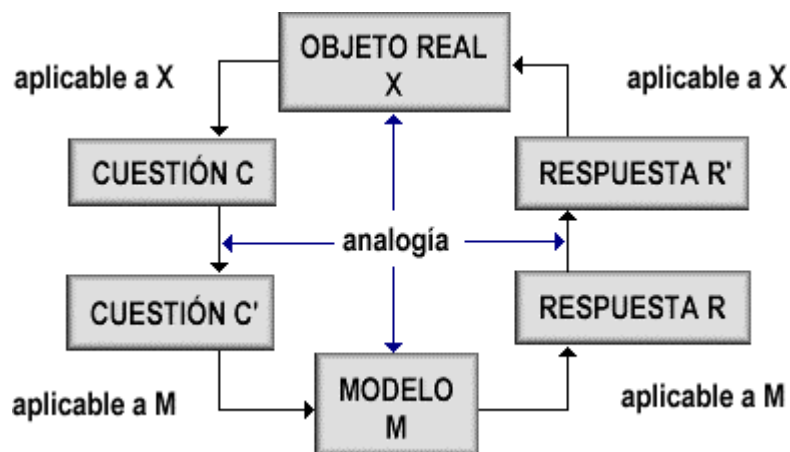
Los modelos se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real. Algunos autores llegan a incluir esta expresión de finalidad en la propia definición de modelo: un objeto es un modelo de X para un observador O, si O puede utilizar M para responder a cuestiones que le

interesan acerca de (Aracil, 1986:123); o bien, según Ríos (1995:23):

"un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica"

Para que los modelos puedan decirnos algo sobre el objeto que representan, es necesario que se construyan estableciendo una relación con la realidad que debe ser simétrica, es decir, la relación de correspondencia entre el objeto real y el modelo debe ser al menos parcialmente reversible y debe permitir la traducción de algunas propiedades del modelo a la realidad

La existencia de la relación simétrica permite que un resultado  $C'$  relativo al modelo pueda traducirse en otro  $C$  relativo al objeto real y, de esta forma, que las respuestas derivadas del modelo sean aplicables a la realidad sin perder sentido. Denominaremos a estas propiedades que se deducen del modelo de **propiedades emergentes**.



**Los modelos sirven para responder a cuestiones sobre la realidad que no serían accesibles mediante la experimentación directa.**

La utilidad de los modelos para conocer o predecir está condicionada principalmente por una buena selección de los factores relevantes para el problema y una adecuada descripción de sus relaciones funcionales.

Así, cuando se construye un modelo, estamos construyendo un sistema cuyos componentes, partes, e interrelaciones se han reducido a una cantidad manejable para simplificar el sistema real. Para que los resultados sean aceptables es necesaria una precisa selección de los componentes importantes, cada uno de los cuales debe, a su vez, ser un modelo adecuado del componente real.

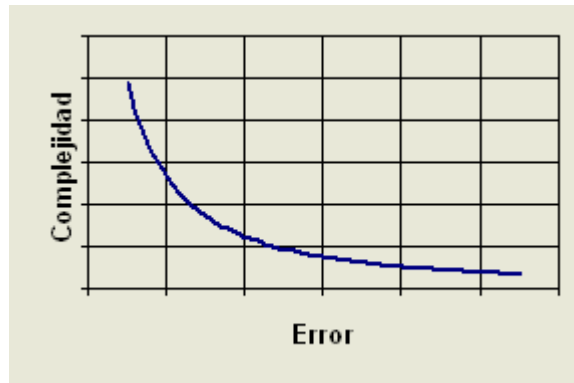
La calidad de las propiedades emergentes de un modelo puede valorarse sometiendo una parte de los resultados a una verificación experimental que, aunque sólo puede ser parcial, servirá de orientación sobre la magnitud de los errores derivados del modelo y puede permitir la introducción de correcciones.

El contraste experimental puede servir, por tanto, no sólo como método de control de calidad sino también como mecanismo de realimentación para realizar ajustes, tanto en los elementos que componen el modelo como en las relaciones que se establecen entre ellos.

Dado que el modelo representa la realidad con una cantidad menor de información, existe un error inherente al proceso de modelización que puede ser reducido, pero no eliminado. La reducción del error puede hacerse por dos caminos complementarios:

- mayor precisión en la medida y mejor selección de los componentes: no implica mayor complejidad del modelo.

- mayor cantidad de componentes —partes e interrelaciones funcionales—: implica una mayor complejidad del modelo.



**Relación genérica entre error y complejidad. La modelización pretende reducir el error manteniendo una complejidad reducida.**

La eliminación del error implicaría la identificación del modelo con el objeto real, por lo que no resultaría posible. En este sentido, debe buscarse un compromiso entre la complejidad del modelo y el error aceptable en los resultados.

### **Tipos de modelos**

Existen numerosas clasificaciones de los modelos, ninguna de las cuales permite establecer realmente unas categorías estrictamente excluyentes. A continuación se comentan dos clasificaciones relevantes para el tema de los MDT ya que contribuyen a aclarar el concepto básico.

Modelos icónicos, análogos y simbólicos

Existen varias clasificaciones de modelos basadas en diferentes criterios. En Turner (1970:364) se distinguen tres tipos básicos: **modelos icónicos, análogos y simbólicos**, en función de las reglas de construcción del modelo, es decir, de la forma de establecer la relación de correspondencia.

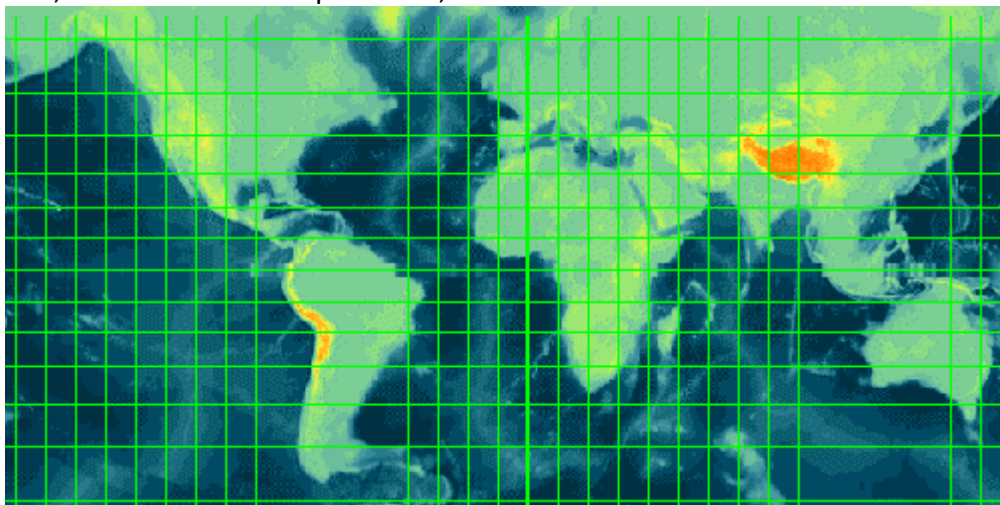
En los **modelos icónicos**, la relación de correspondencia se establece a través de las propiedades morfológicas, habitualmente un cambio de escala con conservación del resto de las propiedades topológicas. Un ejemplo de modelo icónico es una maqueta, donde se ha establecido una reducción de tamaño conservando las relaciones dimensionales básicas. Sin embargo, este proceso de modelización tiene implicaciones menos obvias que, según los casos, pueden tener importancia. Por ejemplo, en el caso de una maqueta del terreno, la rugosidad de la superficie es una propiedad que no se conservará ya que depende de la escala; por añadidura, su relación con la rugosidad real puede ser difícil de definir.



**En un modelo icónico se conservan las proporciones del objeto real mediante una reducción de escala y una selección de las propiedades representadas**

Los **modelos análogos** poseen algunas propiedades similares a los objetos representados pero sin ser una réplica morfológica de los mismos. Normalmente, para su construcción se utiliza un conjunto de convenciones que sintetizan y codifican propiedades del objeto real para facilitar la "lectura" o interpretación de estas.

Un ejemplo de modelo análogo es un mapa impreso, que se construye mediante un conjunto de convenciones cartográficas relativamente complejas, que conducen a un resultado final claramente distinto del objeto representado. Mediante esta transformación se persigue hacer legibles propiedades tales como las altitudes, distancias, localización física de objetos geográficos, sus relaciones e importancia, etc.



**En un modelo análogo la realidad se representa aplicando convenciones que, sin replicar morfológicamente los objetos, permiten interpretar algunas de sus propiedades. En la figura se muestra la representación de la Tierra en una proyección cilíndrica conforme de Mercator.**

Los **modelos simbólicos** se construyen mediante reglas notablemente más abstractas ya que esta denominación suele aplicarse a los casos en los que el objeto real se representa mediante una codificación matemática (geométrica, estadística, etc.).

Un ejemplo de modelo simbólico es la representación de un edificio mediante la identificación y codificación en una estructura geométrica de sus elementos básicos. El modelo así construido permite la aplicación de algoritmos para, por ejemplo, la estimación de esfuerzos a los que está sometido.



**Reconstrucción de un edificio prerrománico, un ejemplo de modelo simbólico** Parte del edificio ha sido representado a partir de un levantamiento simulado basado en restos de cimientos y muros.

### Modelos analógicos y modelos digitales

Otra clasificación de los modelos que nos interesa para nuestro tema los divide en modelos digitales y modelos analógicos. La diferencia básica entre los modelos digitales y los modelos analógicos reside en que los primeros están codificados en cifras —lo que, entre otras cosas, permite su tratamiento informático—. Los modelos digitales son, por tanto, modelos simbólicos y para construirlos es necesario un proceso de codificación de la información, que permite una representación virtual manejable por medios informáticos.

Los modelos analógicos son modelos físicos, como los ya mencionados de una maqueta como modelo icónico, o un mapa convencional como modelo análogo. Cabe hacer la salvedad de que no deben confundirse los conceptos de modelo análogo, mencionado unos párrafos atrás, y modelo analógico, que se opone al de modelo digital.

Los modelos digitales presentan unas propiedades inherentes a su naturaleza numérica que son especialmente interesantes:

- **no ambigüedad:** cada elemento del modelo tiene unas propiedades y valores específicos y explícitos
- **verificabilidad:** los resultados se construyen mediante pasos explícitos y concretos que pueden ser analizados uno a uno y comprobados en todas las fases del proceso
- **repetibilidad:** los resultados no están sometidos, a menos que de diseño expresamente, a factores aleatorios o incontrolados y pueden ser comprobados y replicados las veces que se desee.

Sin embargo, aunque la codificación en cifras permite una representación con una elevada precisión teórica, esto no garantiza la exactitud de los resultados. Es necesario no perder de vista que un modelo no es más que una descripción aproximada que, en último término, se construye mediante la aplicación de unos supuestos más o menos adaptados a la realidad pero que nunca pueden ser exactos.

### Modelos digitales del terreno

La definición formal es la siguiente: **un modelo digital del terreno es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua.**

Los modelos digitales del terreno o MDT son, por tanto, modelos simbólicos ya que las relaciones



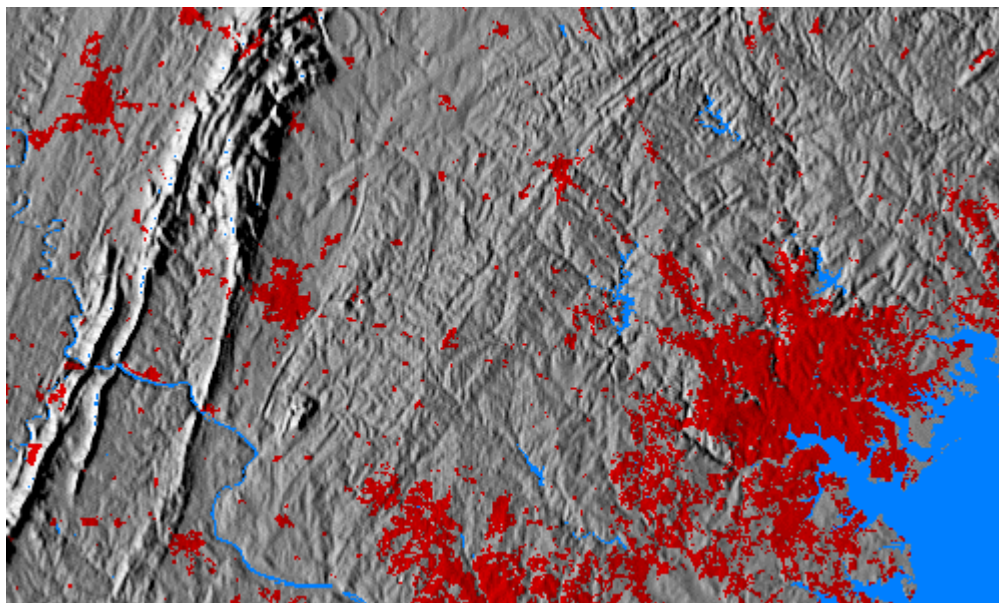
de correspondencia que se establecen con el objeto real tienen la forma de algoritmos o formalismos matemáticos.

A partir de la definición anterior se pueden comentar las propiedades básicas de los MDT:

- los MDT toman la forma de **estructuras de datos**, lo que significa que no son sólo una acumulación o listado de cifras, sino que su construcción debe realizarse de acuerdo con una estructura interna. Esta estructura se refleja en la forma lógica —en el sentido informático— de almacenar y vincular las unidades de información datos entre sí, que debe representar de alguna forma las relaciones espaciales entre los datos. Esta condición implica, por ejemplo, que un simple listado de coordenadas acompañadas por su altitud no puede considerarse propiamente un MDT, aunque contenga toda la información necesaria para construirlo ya que no existe una estructura interna y se hace necesario un proceso de los datos para hacerla utilizable en la modelización.
- en segundo lugar, los MDT representan la **distribución espacial de una variable**, lo que acota claramente su ámbito de actuación en la modelización de fenómenos geográficos.
- finalmente, la definición indica que la variable representada en el MDT debe ser **cuantitativa y de distribución continua**.

Este punto separa conceptualmente los mapas temáticos de los MDT, ya que se excluyen las variables nominales, representadas habitualmente mediante recintos con un identificador o código interno y, de forma general, las variables representadas por entidades lineales o puntuales —como, por ejemplo, una red hidrológica—.

La definición general de MDT no hace referencia explícita a la variable representada que, por tanto, puede ser cualquiera que cumpla con los requisitos de la misma. Este aspecto, aunque en principio pueda parecer evidente, debe ser destacado ya que es habitual identificar los MDT con los MDE o **modelos digitales de elevaciones** cuando, en realidad, pueden ser representadas muchas otras propiedades del terreno. Para diferenciar claramente qué variable se está representando en el modelo denominaremos los modelos digitales de forma explícita, de acuerdo con la propiedad representada —modelo digital de pendientes, por ejemplo— y reservaremos el término MDT para la denominación genérica.



**Los MDT pueden servir de base para la presentación de información temática pero ésta, por su carácter nominal, no constituye por sí un MDT. En la figura se muestra un modelo de reflectancia al cual se le ha superpuesto información sobre la edificación —en rojo—, y las superficies de agua —en azul—. Estas dos últimas categorías no pueden considerarse parte del modelo de reflectancia.**

Basado en el trabajo de Ángel Manuel Felicísimo, **Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura**

## Mapas y modelos digitales del terreno

Los modelos digitales del terreno tienen una versión analógica en mapas que pueden representar las mismas variables, pero codificándolas sobre un soporte físico mediante convenciones gráficas. Estos mapas constituyen, por extensión del concepto de MDT, un tipo de **modelos analógicos del terreno**, MAT. Actualmente, ambos tipos de modelos se complementan en muchos aspectos y la total sustitución de uno por los otros no parece previsible. Las ventajas que ofrece la codificación numérica son claras en algunos aspectos, pero los mapas impresos son imprescindibles actualmente para el manejo práctico de la información.

A efectos prácticos, la mayor ventaja de los MDT sobre los MAT es la posibilidad de **tratamiento numérico** de los datos, mediante las herramientas matemáticas que nos permiten los programas informáticos. Entre estas posibilidades, inaccesibles a través de los mapas convencionales, está la capacidad de obtener estadísticos descriptivos de una variable y la de crear nueva información mediante el análisis de un MDT o la combinación de dos o más mediante procedimientos estadísticos o lógicos (**álgebra de mapas**).

Un ejemplo de la primera posibilidad es la obtención de la altitud media de una superficie determinada, proceso sencillo que se deriva directamente de los datos del **modelo digital de elevaciones** o MDE. Un ejemplo del segundo grupo de procesos es la obtención de la distribución de pendientes en función de la altitud como tabla de doble entrada; en este caso se combinan dos MDT (el MDE y el MDP) para obtener un resultado estadístico. La obtención de ambos resultados a partir de un mapa convencional exige un laborioso tratamiento manual sujeto a un alto riesgo de error y con baja repetibilidad.

Otra posibilidad que nos crea la naturaleza digital de los MDT es la de realizar **procesos de simulación** del funcionamiento de un sistema dinámico real. Manipulando los datos del MDT o complementándolos con otras descripciones de fenómenos físicos se accede a un medio de investigación de gran potencialidad.

Finalmente, conviene destacar que los MDT tienen también aspectos negativos, especialmente a la hora de realizar una investigación real. Al ser los MDT una parte integrante de los **sistemas de información geográfica**, se ven afectados por idénticos problemas que éstos.

Los problemas más importantes se derivan de la **complejidad global** del sistema informático necesario para hacer un uso eficaz de los MDT y, en general, de los SIG.

El acceso a la información impresa en un mapa es sencillo ya que se realiza directamente mediante examen visual, aunque se precisan unos conocimientos cartográficos más o menos profundos. El acceso a los MDT es mucho más complejo pues se realiza a través de equipos informáticos cuyo manejo, mediante una serie de instrucciones específicas, obliga a un entrenamiento especializado. Por otra parte, la interpretación de la información es indirecta debido a la existencia del equipo informático que actúa de nexo, y la elaboración de modelos derivados requiere el dominio de lenguajes de programación o la intervención de especialistas.



Idealmente, los conocimientos cartográficos necesarios para la interpretación de los mapas convencionales deben complementarse con otros relativos a proceso de imágenes, bases de datos y programación de ordenadores, lo que implica un considerable esfuerzo de educación suplementario.

Asimismo, un uso eficaz de los MDT no se concibe fácilmente sin un equipo de trabajo relativamente amplio, un equipo informático sofisticado y un conjunto de circunstancias que permita unas condiciones de trabajo con una estabilidad razonable. En la práctica, las posibilidades de trabajo e investigación que los SIG/MDT permiten se ven limitadas por las también grandes exigencias económicas y estratégicas que plantean.

### **Simulación de procesos con los MDT**

Los MDT descritos de hasta el momento son esencialmente **modelos estáticos**, en los que las propiedades representadas permanecen con valores inmutables. Sin embargo, su naturaleza digital permite utilizar los MDT para realizar procesos de **simulación dinámica**, con lo que a través de la modelización de objetos, se crean modelos de procesos.

La **modelización de procesos** es posible mediante el diseño y empleo de algoritmos numéricos, es decir, construyendo secuencias explícitas de operaciones que conducen a la solución de problemas concretos. Generalmente, el empleo de algoritmos conduce a la creación de nuevos MDT, que denominaremos **modelos digitales derivados**.



**La simulación de procesos se realiza mediante algoritmos que utilizan la información de los MDT para generar otros modelos derivados.**

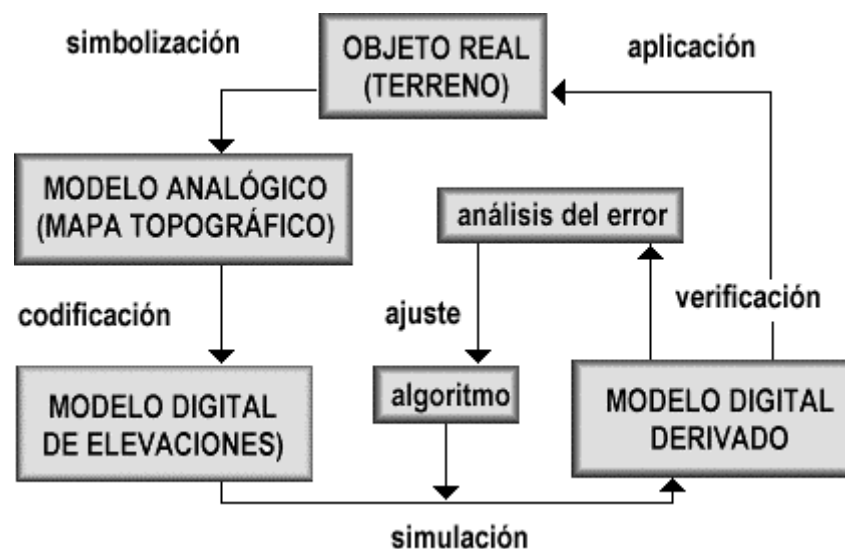
La figura anterior muestra el resultado de la simulación de una erupción volcánica, donde las zonas en color muestran la probabilidad de que el flujo de lava pase por

cada lugar. El trabajo original es de Wadgley McKendrick (1993) y fue realizado con una aplicación desarrollada específicamente para este tipo de simulaciones denominada FLOWFRONT.

El correcto funcionamiento de los algoritmos es susceptible de revisión mediante el **contraste o verificación** del modelo derivado con el objeto real. Este contraste se realiza mediante métodos de análisis del error que, habitualmente, se basan en la comparación de una muestra extraída del modelo derivado con medidas empíricas realizadas sobre el terreno. Los resultados del análisis del error permiten efectuar ajustes en el algoritmo, aumentando su fiabilidad y, por tanto, su capacidad de predicción. Esto significa que un algoritmo sólidamente construido, aplicado sobre un MDT fiable, permite estimar propiedades que pueden ser aplicadas al objeto real con márgenes moderados de error.

Como en el caso general ya mencionado, la modelización de procesos exige una selección de los parámetros y de las relaciones relevantes para el problema a solucionar. Frecuentemente es necesario representar procesos complejos mediante aproximaciones semiempíricas o, en el mejor de los casos, justificadas por una base teórica más o menos sólida. Este proceso de selección de variables y de procesos y de su representación se denomina **parametrización**.

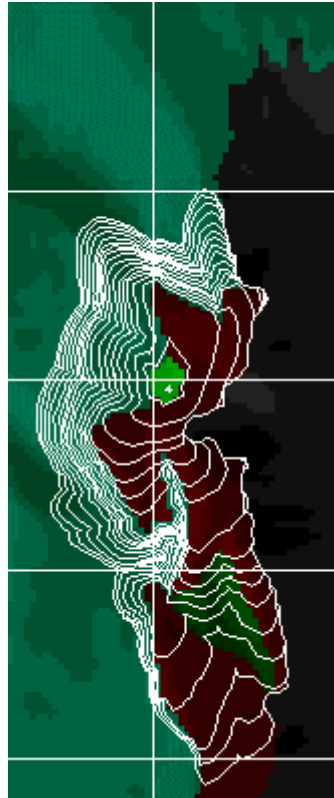
En la figura adjunta se muestra un ejemplo de proceso genérico realizado a partir del modelo digital básico hasta su aplicación sobre el objeto real —terreno— a través de un ciclo de corrección del algoritmo que genera el modelo derivado.



### **Etapas genéricas en el proceso de simulación en modelos digitales del terreno**

Partiendo de la superficie real del terreno, la construcción del mapa topográfico se realiza un proceso mediante el cual las propiedades del terreno se representan sobre un plano usando relaciones de analogía previamente establecidas. La codificación numérica del modelo analógico conduce al modelo digital, susceptible de tratamiento matemático. Ello permite construir modelos digitales derivados y realizar la modelización de procesos con simulaciones numéricas expresadas

mediante algoritmos. Los resultados obtenidos son contrastables con la realidad, induciendo correcciones o ajustes que permiten una mejor correspondencia con el fenómeno real.



**Simulación de un incendio realizada con el programa Farsite (Fire área Simulator). Este tipo de aplicaciones permite simular la evolución del incendio en función de variables como la pendiente, combustibilidad, vegetación, etc.**