





*Introducción a los Sistemas de  
Información Geográfica*

Introducción a los Sistemas de Información Geográfica  
Copyright ©2016 Víctor Olaya

Versión revisada el 24 de abril de 2016

Se concede permiso para copiar, distribuir o modificar esta obra bajo los términos expresados en la licencia Creative Common Atribución, la cual puede encontrarse en [www.creativecommons.org](http://www.creativecommons.org). La licencia se aplica a todo el texto, así como las imágenes creadas por el propio autor, que serán aquellas para las que no se especifique de modo explícito una distinta procedencia. Este libro puede descargarse y consultarse de forma libre en varios formatos, incluyendo formatos editables, en la dirección Web <http://victorolaya.com>.

Los nombre de productos o corporaciones que aparecen en el texto pueden constituir marcas registradas y se emplean sin otro afán que el meramente identificativo. Asimismo, la inclusión o no de uno de tales productos no expresa recomendación alguna por parte del autor.

---



VÍCTOR OLAYA

# Introducción a los Sistemas de Información Geográfica







## PRÓLOGO

Hace ahora más de cinco años años que se publicó la primera versión de *Sistemas de Información Geográfica*, un libro libre sobre fundamentos de SIG en español, y apenas unos meses desde que apareció la segunda. El libro ha tenido una acogida excelente, y mi intención es seguir manteniéndolo actualizado en la medida que sea posible, reflejando los avances que, a buen seguro, van a producirse en el campo de los SIG.

Existe, no obstante, un obstáculo importante para que el libro alcance a todos los públicos: su tamaño. Por su completitud, y por la complejidad propia de la disciplina, el libro es un volumen de más de 800 páginas cargadas de detalle. La segunda versión se presenta en un único tomo, frente a los dos en que consistía la primera, pero aún así sigue quedando como una obra de consulta demasiado extensa para leerse de principio a fin. Para el lector que comienza a introducirse en el ámbito de los SIG y no busca especializarse, resulta un volumen intimidante y es, no hay duda, difícil de abordar.

Este libro intenta ser una alternativa a la obra completa, de tal forma que resulte más accesible para quienes desean tener una perspectiva global de la disciplina de los SIG, sin entrar en detalles demasiado específicos. Es, básicamente, una versión resumida de aquel, pensada con la idea de usarse no como libro de consulta, sino como libro de lec-

tura. Además de ser más breve, se presenta en un formato más adecuado para esta clase de propósito, con algunas modificaciones en su enfoque y con menos contenido gráfico.

He respetado en líneas generales la estructura de los capítulos, de modo que es fácil para el lector que desee profundizar en uno de ellos encontrar este en el libro completo. Desde ese punto de vista, puede entenderse este libro como una especie de «índice» de su hermano mayor, un índice, no obstante, prolijo y con suficiente información como ofrecer al lector una visión detallada del mundo de los SIG.

Este es también, por supuesto, un libro libre, que espero que progrese de una forma dinámica gracias a la contribución de sus lectores. Si encuentras cualquier error o quieres colaborar en mejorar estas páginas, no dudes en escribirme a [volayaf@gmail.com](mailto:volayaf@gmail.com).

# INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA



## ¿QUÉ ES UN SIG?

La mayor parte de la de la información que manejamos en cualquier tipo de disciplina está georreferenciada. Es decir, se trata de información a la cual puede asignarse una posición geográfica, y es por tanto información que viene acompañada de otra información adicional relativa a su localización.

Un **Sistema de Información Geográfica (SIG)** es una herramienta para trabajar con información georreferenciada. En particular, un SIG es un sistema que permite la realización de las siguientes operaciones:

- **Lectura, edición, almacenamiento** y, en términos generales, **gestión** de datos espaciales.
- **Análisis** de dichos datos. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la **componente espacial** de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre **la componente temática** (el valor o el elemento en sí).
- Generación de **documentos** tales como mapas, informes, gráficos, etc.

Un SIG representa un paso más allá de los mapas clásicos. Mientras que un mapa es una representación de un conjunto de datos espaciales, y aunque esta representación resulta de enorme importancia, en el entorno de un SIG no es sino un

elemento más de un conjunto de ellos. El SIG no incluye solo los datos y la representación, sino también las operaciones que pueden hacerse sobre el mapa, que no son ajenas a este sino partes igualmente de todo ese sistema.

Un SIG es una herramienta versátil y de amplio alcance, y hoy día la gran mayoría de disciplinas se benefician del uso de SIG de uno u otro modo. Una de las principales razones por las que esto sucede es el **carácter integrador** de los SIG. Los siguientes son algunos de los contextos principales en los que un SIG ejerce tal función integradora.

- **SIG como integrador de información.** Un nexo común entre la mayoría de disciplinas es el hecho de que sus objetos de estudio están asociados a una localización en el espacio. Esto va a permitir combinarlas y obtener resultados a partir de un análisis común. El SIG es, en este contexto, el marco necesario en el que incorporar esa información georreferenciada y trabajar con ella.
- **SIG como integrador de tecnologías.** Una gran parte de las tecnologías que han surgido en los últimos años (y seguramente de las que surjan en los próximos) se centran en el aprovechamiento de la información espacial, y están conectadas en mayor o menor medida a un SIG para ampliar su alcance y sus capacidades. Por su posición central en el conjunto de todas las tecnologías, los SIG cumplen además un papel de unión entre ellas, conectándolas y permitiendo una relación fluida alrededor de las funcionalidades del propio SIG.
- **SIG como integrador de personas.** Las funciones básicas que un SIG ha de cumplir cubren en realidad un rango amplio de trabajo, y engloban las necesidades de usuarios que con anterioridad no tenían entre sí un marco de trabajo común tan definido. Esto tiene como consecuencia que existe una mejor coordinación entre ellos, pues es la propia herramienta quien establece las características de la relaciones existentes, y estas no dependen ya únicamente del propio ámbito de aplicación.
- **SIG como integrador de teorías y fundamentos.** En un principio, podemos entender un SIG como la unión

de dos ciencias: la geografía y la informática. Sin embargo, un análisis más detallado nos revela que un SIG incorpora elementos de muchas ciencias distintas, como pueden ser las disciplinas relacionadas con la tecnología y el manejo de información (informática, diseño de bases de datos, tratamiento digital de imágenes), las dedicadas al estudio de la Tierra desde un punto de vista físico (geología, la geología, la oceanografía, la ecología), las dedicadas al estudio de la Tierra desde un punto de vista social y humano (antropología, geografía, sociología), las dedicadas al estudio del entendimiento humano (ciencias del conocimiento, psicología) o las disciplinas que tradicionalmente han realizado una integración de conocimientos de otros ámbitos distintos, entre las que cabe destacar la geografía. El término **geomática**, formado a partir de los vocablos *geografía* e *informática*, se emplea con frecuencia para hacer mención a todo ese grupo de ciencias relacionadas con los SIG.

Con todo lo anterior, se tiene que SIG es un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica, y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados.

Desde otro punto de vista, un SIG puede considerarse compuesto de cinco bloques fundamentales.

- **Datos.** Los datos son necesarios para hacer que el resto de componentes de un SIG cobre sentido y puedan ejercer su papel en el sistema. La información geográfica, la verdadera razón de ser los SIG, reside en los datos, y es por ello que el conocimiento exhaustivo de los datos, su naturaleza, su procedencia, su calidad, así como su gestión y almacenamiento, resulta obligado para una buena comprensión los propios SIG.
- **Análisis.** El análisis es una de las funcionalidades básicas de los SIG, y una de las razones fundamentales que llevaron al desarrollo de estos. Un ordenador es una herramienta con enorme capacidad de cálculo, y esta puede aplicarse a los datos espaciales para obtener resultados de muy diversa índole.

En mayor o menor medida, un SIG siempre incorpora una serie de formulaciones que permiten la obtención de resultados y el análisis de los datos espaciales. Las ventajas de la incorporación de todos estos procesos en una única herramienta, el SIG, van desde la **automatización de tareas** a la aparición de nuevos procesos que producen resultados que no podrían ser obtenidos de otro modo.

- **Visualización.** Cualquier tipo de información puede ser representada de forma gráfica, lo cual facilita la interpretación de dicha información o parte de esta. En el caso particular de la información geográfica, la visualización no solo es una forma más de trabajar con esa información, sino que resulta la forma principal, por ser aquella a la que estamos más acostumbrados gracias al uso de mapas. Al contrario que un mapa, que de por sí es de naturaleza gráfica, en un SIG trabajamos con datos de tipo puramente numérico. Para poder presentar una utilidad similar a la de un mapa, un SIG debe incluir capacidades que generen representaciones visuales a partir de esos datos numéricos.

La visualización de la información geográfica se rige por los mismos conceptos y principios que se emplean para la confección de cartografía impresa, y estos deben ser conocidos por el usuario de SIG, ya que una de las tareas de este es el diseño cartográfico y las preparación de los elementos de visualización para poder realizar su trabajo sobre las representaciones creadas.

- **Tecnología.** Se incluyen en este elemento tanto el *hardware* sobre el que se ejecutan las aplicaciones SIG, como dichas aplicaciones, es decir el *software* SIG. Además de la propia plataforma, el *hardware* incluye una serie de periféricos habituales en el trabajo con SIG, como son los periféricos para entrada de datos geográficos y creación de cartografía.
- **Factor organizativo.** Engloba los elementos relativos a la coordinación entre personas, datos y tecnología, o la comunicación entre ellos, entre otros aspectos. Con la creciente complejidad de los SIG, la gestión de las relaciones entre sus elementos es cada vez más importante.



A lo largo de este libro, detallaremos cada uno de estos bloques en los capítulos correspondientes.



# HISTORIA DE LOS SIG

El desarrollo sufrido por los SIG desde sus orígenes hasta nuestros días es enorme. La popularización de las tecnologías y los esfuerzos de desarrollo llevados a cabo por un amplio abanico de ciencias beneficiarias de los SIG, todos han contribuido a redefinir la disciplina e incorporar elementos impensables entonces.

Podemos situar el origen de los SIG al inicio de la década de los **60**, como resultado de unos factores que convergen para dar lugar al desarrollo de estos. Estos factores son principalmente dos: la **necesidad creciente de información geográfica** y de una gestión y uso óptimo esta, y la **aparición de los primeros computadores**.

Las bases para la futura aparición de los SIG las encontramos algunos años antes de esa década de los 60, con el desarrollo de nuevos enfoques en cartografía, tales como la **geografía cuantitativa**, que parecen predecir las necesidades futuras que un manejo informatizado de esta traerá.

La primera experiencia relevante en la que se combinan geografía e informática la encontramos en 1959, cuando Waldo Tobler define los principios de un sistema denominado MIMO (map in-map out) con la finalidad de aplicar los ordenadores al campo de la cartografía. En él, establece los principios básicos para la creación de datos geográficos, su

codificación, análisis y representación dentro de un sistema informatizado.

El primer Sistema de Información Geográfica formalmente desarrollado aparece en Canadá. Este sistema, denominado CGIS (Canadian Geographical Information Systems), fue desarrollado a principios de los 60 por Roger Tomlinson, popularmente conocido como el «padre del SIG».

A mediados de los 60, las aplicaciones SYMAP y GRID sientan respectivamente las bases de los dos principales enfoques a la hora de manejar información geográfica: el enfoque **raster** y el enfoque **vectorial**. Ambas alternativas serán explicadas con detalle más adelante en este libro. Los conceptos básicos para el análisis dentro del SIG ráster los establece poco después Dana Tomlin, desarrollando lo que se conoce como **álgebra de mapas**.

Durante los años sesenta, se produce un gran desarrollo de los SIG a partir de esos elementos iniciales, y el SIG comienza a incorporarse a la comunidad cartográfica, dejando de ser una herramienta experimental.

La evolución de los SIG desde entonces recorre sucesivas etapas, avanzando muy rápidamente ante la influencia de numerosos factores externos. Esta evolución tiene lugar en el propio SIG como disciplina, en las tecnologías que lo sustentan, en los datos, así como en las técnicas y formulaciones.

## LA EVOLUCIÓN DE LOS SIG COMO DISCIPLINA

Los SIG eran en origen una mera combinación de elementos de cartografía cuantitativa, enlazados con los sistemas informáticos de la época. Se trataba de un territorio propio de cartógrafos y geógrafos que intentaban adaptar sus conocimientos y necesidades a las tecnologías que por aquel entonces comenzaban a surgir. No obstante, desde aquellos orígenes los cambios han sido muy grandes, y se han incorporado al ámbito de los SIG un gran número de otras disciplinas cuya aportación e influencia puede ser equivalente o incluso superior a la de la cartografía o la geografía.

Coincidiendo con la etapa inicial del desarrollo de los SIG, empieza a aparecer una preocupación por el entorno

que tiene consecuencias muy favorables para el desarrollo de todas las ciencias relacionadas, la gran mayoría de las cuales son o serán usuarias directas de SIG. El SIG comienza a integrarse paulatinamente en las tareas de **gestión del medio**, como un apoyo imprescindible a la hora de analizar este.

Al principio de la década de los 70, siendo ya claro que los SIG son herramientas con gran futuro, aparecen no solo los esfuerzos de desarrollo y estabilización de la disciplina, sino todos los restantes que dan entidad propia a la prometedora ciencia de la información geográfica con base informática. Comienzan a celebrarse conferencias y simposios sobre SIG, y estos pasan a formar parte de los *curricula* universitarios. En los años 80, se consolidan las revistas y foros especializados, que habrán de llevar la disciplina a un público más amplio.

En el aspecto comercial, la industria del SIG se consolida también en los años 70. **ESRI** (Environmental Systems Research Institute), empresa pionera y líder del sector hasta el día de hoy, se funda en 1969, y sus productos tienen gran importancia a la hora de convertir los SIG en un elemento de consumo. El primer SIG de código abierto, **GRASS** (Geographic Resources Analysis Support System), aparece en 1985.

El mayor avance en la incorporación de los SIG a entornos no profesionales tiene lugar en la primera década del siglo XXI, con la aparición de servicios de cartografía tales como *Google Maps*. La popularización de los **navegadores GPS**, que incorporan tanto elementos de representación como de análisis propios de los SIG, son otro buen ejemplo de la proliferación del SIG entre un público no especializado.

## LA EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Tres son los bloques principales del desarrollo informático con una influencia más marcada en el campo de los Sistemas de Información Geográfica:

- **Salidas gráficas.** La evolución de las capacidades gráficas, intensa desde sus inicios hasta nuestros días y aún

muy activa, ha sido seguida de cerca por los SIG, que progresivamente van incorporando mejoras tanto en la representación en pantalla como en la generación de mapas impresos.

- **Almacenamiento y acceso de datos.** El aumento en el tamaño de los datos manejados en el SIG ha debido acompañarse de mejoras en la capacidad de almacenamiento, así como en la de lectura, para poder garantizar un uso fluido.
- **Entrada de datos.** Los datos geográficos utilizados en los primeros años de los SIG eran datos en papel que se digitalizaban y almacenaban mecánicamente en tarjetas perforadas en un único proceso mecánico. Desde esos sistemas mecánicos de tarjetas hasta los modernos equipos, la aparición de *scanners* de gran precisión y técnicas de digitalización automáticas, entre otros, ha cambiado completamente el ámbito de la entrada de datos para su uso en un SIG.

Además del avance de estos factores, la evolución general de los ordenadores afecta a todos los elementos de *software* que se ejecutan sobre ellos. De las grandes computadoras se pasa a los ordenadores personales, y los programas tales como los SIG realizan también esa transición de una a otra plataforma.

La elaboración y análisis de cartografía se convierte a finales de los años 80 en una tarea que puede ya llevarse a cabo en equipos personales (PC) de bajo coste, lejos de las grandes máquinas y equipos dedicados de alto coste.

La evolución de las plataformas no se detiene ahí. Las tendencias actuales apuntan a llevar los SIG de forma genérica a plataformas móviles tales como teléfonos o tabletas, especialmente indicadas para la toma de datos en campo. La combinación de estos últimos con las tecnologías de posicionamiento global como el GPS se demuestra altamente práctica en este aspecto.

La aparición de Internet es un hecho que ha modificado todos los aspectos de la sociedad actual, estén relacionados o no con ámbito científico. El primer uso relacionado con el

SIG o la distribución de cartografía lo encontramos en 1993, con la aparición de *Xerox PARC*, el primer servidor de mapas. El primer atlas digital en línea, el Atlas Nacional de Canadá, se encuentra disponible desde 1994. Mas recientemente, ya en este siglo, los concepto de la Web 2.0 se adaptan al ámbito de los SIG y facilitan la aparición de lo que se conoce como **Web Mapping**.

## LA EVOLUCIÓN DE LOS DATOS

Las primeras bases de datos geográficas contenían mapas escaneados y elementos digitalizados en base a estos. A partir de este punto, van apareciendo nuevas fuentes de datos cuya estructura es más adecuada para su tratamiento informatizado, y al tiempo que los SIG se adaptan a estas, surge una relación bidireccional que resulta beneficiosa para ambos.

Un avance primordial en este sentido lo constituye el lanzamiento de los primeros **satélites de observación terrestre**. Las técnicas existentes para la toma de fotografías aéreas, desarrolladas principalmente con fines militares durante la Primera Guerra Mundial, pasan a ser aplicadas a escala global con la aparición de satélites destinados a estos efectos. En 1980 se funda SPOT, la primera compañía mundial en ofrecer con carácter comercial imágenes procedentes de satélite para toda la superficie terrestre.

Las tecnologías de posicionamiento y localización son otra fuente de datos de primer orden. En 1981, el sistema GPS pasa a ser plenamente operativo, y en 2000 se amplía la precisión de este para uso civil.

Al igual que las aplicaciones, los distintos tipos de datos geográficos digitales se van asentando y popularizando, recibiendo progresivamente más atención y medios. El Servicio Geográfico Estadounidense (USGS) publica en 1976 los primeros **Modelos Digitales de Elevaciones** (MDE), en respuesta a la gran importancia que este tipo de dato tiene dentro del nuevo contexto del análisis geográfico. En el año 2000 se publican los datos de la *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), con información altitudinal de un 80 %

de la superficie terrestre a una resolución de un segundo de arco (aproximadamente, 30 metros).

La aparición de nuevas técnicas tales como el LiDAR (ver ??) abre nuevos caminos en cuanto a la precisión que puede obtenerse en la caracterización del terreno, posibilitando nuevos usos y análisis antes no planteados.

La evolución de los datos no es solo una evolución técnica, sino también de carácter social y organizativo. Se empieza a entender que resulta necesario formular estrategias adecuadas para la gestión de los datos espaciales, y se desarrollan las denominadas **Infraestructuras de Datos Espaciales** (IDE). El ejemplo más destacado de estas es la IDE Nacional de los Estados Unidos (NSDI), de 1994. En Europa, la directiva INSPIRE, de 2007, pretende la creación de una infraestructura similar.

Muchos de estos desarrollos y actividades se adhieren a las especificaciones establecidas por el *Open GIS Consortium* (OGC), un consorcio internacional fundado en 1994 para **homogeneizar** el empleo y difusión de los datos geográficos.

## LA EVOLUCIÓN DE LAS TÉCNICAS Y FORMULACIONES

Una vez que se implementan los primeros SIG y se suplen las necesidades de análisis y gestión de datos espaciales que motivaron su aparición, comienza el proceso de desarrollar nuevas técnicas y planteamientos que permiten ir más allá en dicho análisis.

Los antecedentes del análisis espacial son relativamente recientes. En 1854 John Snow realizó la que puede considerarse como una de las primeras experiencias cartográficas analíticas, al utilizar mapas de puntos para efectuar sus deducciones y localizar en Inglaterra la fuente de un brote de cólera.

En su libro *Design with Nature* (1969), Ian McHarg define los elementos básicos de la **superposición y combinación de mapas**, que, como veremos más adelante, son los que se aplican tanto en el análisis como en la visualización de las distintas *capas* de datos geográficos en un SIG.



Un desarrollo especialmente relevante es el experimentado por el **análisis del relieve**, una disciplina que con la aparición de los SIG sufre un salto cualitativo muy importante. La orografía clásica, con un enfoque tradicionalmente sustentado en la geología y el análisis geomorfológico, va dando lugar a una ciencia cada vez más cuantitativa centrada en el análisis morfométrico del relieve.

Junto con la componente analítica, otros elementos de la práctica cartográfica evolucionan de forma similar. En 1819, Pierre Charles Dupin crea el primer **mapa de coropletas**. Con la llegada de los SIG, este tipo de mapas se convertirán en una forma de representación muy popular.

El avance en el desarrollo de las aplicaciones de diseño asistido por ordenador (CAD), y en general de las representaciones gráficas por ordenador, impulsó igualmente la aparición y evolución posterior de una nueva disciplina: la geometría computacional. Sobre esta se fundamenta el análisis vectorial dentro de un SIG, y también parte de los mecanismos que este usa para la representación gráfica de elementos.



# FUNDAMENTOS CARTOGRÁFICOS Y GEODÉSICOS

## CONCEPTOS GEODÉSICOS BÁSICOS

La característica principal de la información georreferenciada es que tiene una localización en el espacio, particularmente en el espacio terrestre. Esta localización se ha de dar por medio de unas coordenadas que la definan de forma adecuada, lo cual implica la necesidad de establecer un sistema en base al cual expresar dichas coordenadas.

La geodesia es la ciencia encargada de proveer el marco teórico en el que fundamentar lo anterior, y su objeto de estudio es la forma de la Tierra. La geodesia, en sus diversas ramas, proporciona métodos y conceptos que permiten la utilización rigurosa de coordenadas.

La necesidad del estudio geodésico surge por el hecho de que la Tierra no es plana, y cuando el territorio que pretendemos estudiar es lo suficientemente extenso, la curvatura de la Tierra no puede ser ignorada. Este es el caso que vamos a encontrar cuando trabajemos con un SIG, y es por ello que los SIG implementan los elementos necesarios para poder efectuar un manejo de la información geográfica riguroso y acorde con los conceptos de la geodesia.

Uno de los objetivos principales de la geodesia es establecer un sistema de referencia y definir un conjunto de puntos (conocidos como **vértices geodésicos**) cuyas coordenadas

en dicho sistema sean conocidas con una precisión elevada. Posteriormente, y en base a esos puntos, los cuales forman una **red geodésica**, se pueden calcular las coordenadas de cualquier punto en el sistema de referencia definido.

### *Superficies de referencia*

Dos conceptos básicos para esta tarea: el **elipsoide de referencia** y el **geoide**.

La Tierra tiene forma esférica, aunque no es una esfera perfecta, sino que está achatada, constituyendo lo que se conoce como elipsoide. Sobre un elipsoide, el radio de la Tierra ya no es constante, y depende del emplazamiento. Asimilar la Tierra a un elipsoide es más preciso que suponer la Tierra con una forma perfectamente esférica, y es necesario a la hora de elaborar cartografía de zonas no muy extensas.

Una vez que se dispone de una expresión teórica para la forma de la Tierra, el siguiente paso es la determinación de los parámetros que definen esta. En el caso de utilizar la esfera, hay que calcular su radio. En el caso de asumir el elipsoide como forma de referencia, deben determinarse las medidas de los semiejes menor y mayor.

Por razones históricas, existen numerosos elipsoides, derivados del trabajo de los geodestas en diferentes épocas y lugares. Los primeros elipsoides generales, que permiten ser usados en toda la superficie terrestre, aparecen hace aproximadamente un siglo, con objeto de disponer de una referencia internacional que facilite el uso de cartografía en las distintas zonas del planeta. El **elipsoide WGS-84** es uno de los más empleados en la actualidad, ya que es el utilizado por el sistema GPS (apartado ??).

El geoide es la otra superficie de referencia, definida como la superficie tridimensional en cuyos puntos la atracción gravitatoria es constante. Se trata de una superficie equipotencial que resulta de suponer los océanos en reposo y a un nivel medio y prolongar estos por debajo de la superficie terrestre.

Al igual que en el caso de los elipsoides, existen diversos geoides de referencia, y estos no son constantes en el tiempo

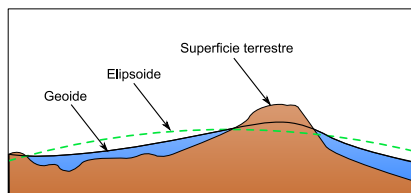


Figura 3.1: Tres superficies fundamentales: superficie real de la Tierra, geoide y elipsoide (Adaptado de Wikipedia).

sino que evolucionan para adaptarse a las modificaciones que tienen lugar sobre la superficie terrestre.

La figura 3.1 muestra una comparación esquemática entre las tres superficies: superficie real de la Tierra, geoide y elipsoide.

En un elipsoide general, tanto la posición de su centro de gravedad como de su plano ecuatorial coinciden con los terrestres. Por el contrario, cuando el elipsoide es local, estas propiedades no han de cumplirse necesariamente, y el elipsoide a solas resulta insuficiente ya que carecemos de información sobre su posicionamiento con respecto a la superficie terrestre.

Surge así el concepto de **datum**, que es el conjunto formado por una superficie de referencia (el elipsoide) y un punto en el que «enlazar» este al geoide. Este punto se denomina **punto fundamental**, y en él el elipsoide es tangente al geoide. La vertical al geoide y al elipsoide son idénticas en el punto fundamental.

Para un mismo elipsoide pueden utilizarse distintos puntos fundamentales, que darán lugar a distintos datum y a distintas coordenadas para un mismo punto.

### *Sistemas de coordenadas*

Una vez hemos definido un modelo para definir la forma de la Tierra, podemos establecer un sistema de codificar cada una de las posiciones sobre su superficie y asignar a estas las correspondientes coordenadas. Para ello, encontramos

dos opciones: utilizar los elementos de la **geometría esférica** y con estos definir el sistema de referencia, o utilizar la *geometría plana*, para lo cual será necesario un mecanismo de **proyección** de coordenadas que permita situar los elementos de la superficie del elipsoide sobre una superficie plana.

El sistema de *coordenadas geográficas* es un sistema de coordenadas esféricas mediante el cual un punto se localiza con dos valores angulares: **latitud** y **longitud**. Las líneas de igual latitud o longitud se denominan **paralelos** y **meridianos** respectivamente.

Las coordenadas geográficas resultan de gran utilidad, especialmente cuando se trabaja con grandes regiones. No obstante, no se trata de un sistema cartesiano, y tareas como la medición de áreas o distancias es mucho más complicada. Para poder crear cartografía y simplificar gran número de operaciones posteriores, necesitamos coordenadas cartesianas. El proceso de asignar una coordenada plana a cada punto de la superficie de la Tierra (que no es plana) se conoce como **proyección cartográfica**.

La superficie de la esfera no es **desarrollable**, es decir, no puede convertirse en un plano. Por ello, es necesario disponer de una metodología para pasar puntos desde la superficie curva al plano, tal y como el que se muestra en la figura 3.2.

En el caso de la figura, los puntos se proyectan directamente sobre un plano. Otra opción es proyectarlos sobre una superficie tridimensional que, al contrario que la esfera, sea desarrollable. Las más habituales son el cilindro y el cono, que dan lugar a las **proyecciones cónicas** y **cilíndricas**.

Puede apreciarse en la figura que se producen distorsiones al realizar la proyección. Por ejemplo, la distancia entre los puntos *A* y *B* no es igual a la existente entre los puntos *a* y *b*. Con independencia de las características propias de la proyección, siempre existen distorsiones, por ser la de la esfera una superficie no desarrollable. Estas distorsiones se conocen como **anamorfosis**.

Según las propiedades métricas que se conserven, las proyecciones pueden ser **equiárea** (mantienen una escala

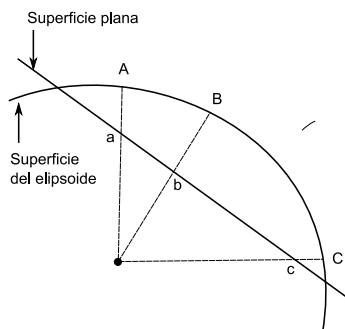


Figura 3.2: Esquema del concepto de proyección. A los puntos  $A, B$  y  $C$  sobre la superficie del elipsoide se les asocian equivalentes  $a, b$  y  $c$  sobre un plano.

constante), **conformes** (mantienen los ángulos y la forma de los objetos) o **equidistantes** (mantienen las distancias).

La elección de una u otra proyección es función de las necesidades concretas de cada caso de uso.

En la actualidad, una de las proyecciones más extendidas en todos los ámbitos es la **proyección universal transversa de Mercator**, la cual da lugar al **sistema de coordenadas UTM**. Este sistema no es simplemente una proyección, sino un sistema completo para cartografiar la practica totalidad de la Tierra. Para ello, esta se divide en una serie de zonas rectangulares mediante una cuadrícula y se aplica una proyección y unos parámetros geodésicos concretos a cada una de dichas zonas. En su forma actual, emplea un único elipsoide (WGS-84).

Con el sistema UTM, las coordenadas de un punto no se expresan como coordenadas terrestres absolutas, sino mediante la zona correspondiente y las coordenadas relativas a la zona UTM en la que nos encontremos.

La cuadrícula UTM tiene un total de 60 husos numerados entre 1 y 60, cada uno de los cuales abarca una amplitud de  $6^\circ$  de longitud. El huso 1 se sitúa entre los  $180^\circ$  y  $174^\circ$  O, y la numeración avanza hacia el Este.

En latitud, cada huso se divide en 20 zonas, que van

desde los 80°S hasta los 84°N. Estas se codifican con letras desde la C a la X, no utilizándose las letras I y O por su similitud con los dígitos 1 y 0. Cada zona abarca 8 grados de longitud, excepto la X que se prolonga unos 4 grados adicionales.

Una zona UTM se localiza, por tanto, **con un número y una letra**, y es en función de la zona como posteriormente se dan las coordenadas que localizan un punto. Estas coordenadas se expresan en metros y expresan la distancia entre el punto y el origen de la zona UTM en concreto. El origen de la zona se sitúa en el punto de corte entre el meridiano central de la zona y el ecuador.

Para evitar la aparición de números negativos, se considera que el origen no tiene una coordenada X de 0 metros, sino de 500000, y una coordenada Y de 10000000 metros, lo cual hace que todas las coordenadas referidas a él sean positivas.

### *Transformación y conversión de coordenadas*

Una situación muy habitual en el trabajo con un SIG es disponer de cartografía en **varios sistemas de coordenadas**, o bien en un mismo sistema pero con parámetros diferentes (por ejemplo, diferente datum). Para poder emplear toda esa cartografía de forma conjunta, resulta necesario trabajar en un sistema único y bien definido, lo cual hace necesario convertir al menos una parte de ella. Cuando el datum es distinto en los sistemas de origen y destino, la **conversión de coordenadas** se conoce como **transformación de coordenadas**.

Las operaciones de transformación y conversión aparecen en los SIG como funcionalidades que permiten modificar los datos geográficos, reemplazando sus coordenadas por coordenadas en otro sistema de coordenadas. Igualmente, aparecen como funcionalidades de representación, permitiendo la conversión «**al vuelo**», es decir, en tiempo real. En este caso, un dato en un sistema de coordenadas se puede representar en cualquier otro sin necesidad de una conversión



previa, con lo que puede usarse conjuntamente con datos en un sistema de coordenadas distinto.

Para facilitar el uso de sistemas de referencia, existen proyectos de codificación de estos, de forma que cada sistema existente puede identificarse de forma sencilla mediante un código. El más extendido de estos es el sistema de codificación **EPSG**.

## CONCEPTOS CARTOGRÁFICOS BÁSICOS

De entre los conceptos fundamentales de la cartografía que todo usuario de SIG ha de conocer, destaca el de **escala**. La escala es la **relación de tamaño** existente entre el mapa que se obtiene al desarrollar nuestra superficie de proyección (de tamaño acorde con el objeto proyectado, esto es la Tierra) y el que finalmente manejamos, de tamaño más reducido. Conociendo esta relación podemos conocer las verdaderas magnitudes de los elementos que vemos en el mapa, ya que podemos convertir las medidas hechas sobre el mapa en medidas reales. Es importante recordar que esas medidas no son tan «reales», puesto que la propia proyección las ha distorsionado —lo cual no debe olvidarse—, pero sí que son medidas en la escala original del objeto cartografiado.

La escala se expresa habitualmente como un denominador que relaciona una distancia medida en un mapa y la distancia que esta medida representa en la realidad. Por ejemplo, una escala 1:50000 quiere decir que 1 centímetro en un mapa equivale a 50000 centímetros en la realidad, es decir a 500 metros. Este valor se conoce como **escala numérica**.

Independientemente del tipo de proyección, la escala es completamente cierta únicamente en determinadas partes del mapa. En otros puntos de este, la escala varía. La relación entre la escala en esos puntos y la escala numérica se conoce como **factor de escala**.

Aunque tradicionalmente se entiende la escala como un concepto asociado a la representación, los datos geográficos tienen una escala inherente que no es función de dicha representación, sino del detalle con que han sido tomados. En

este sentido es más conveniente entender la escala como un elemento relacionado con la **resolución** de los datos, es decir, con el **tamaño mínimo cartografiado**. Esta concepción no es en absoluto propia de los SIG, ya que deriva de las representaciones clásicas y los mapas impresos. Se sabe que el tamaño mínimo que el ojo humano es capaz de diferenciar es del orden de 0,2 mm. Aplicando a este valor la escala a la que queremos crear un mapa, tendremos la mínima distancia sobre el terreno que debe medirse.

Es importante ser consciente de la limitación que la escala considerada a la hora de la toma de datos (conocida como **escala operacional**) impone, especialmente en el contexto de un SIG. En un SIG, podemos aumentar el tamaño en pantalla de una cierta información geográfica, variando la escala de representación (también conocida como **escala cartográfica**), pero ello no modifica la escala operacional. Por mucho que amplíemos no vamos a ver más detalles, ya que para ello sería necesario tomar más datos.

Un tipo de datos particulares con los que se trabaja en un SIG, los datos *ráster*, tienen a su vez un parámetro de resolución (el **tamaño de celda**) ligado a la escala. Veremos más al respecto en el capítulo ??.

Relacionado con el concepto de escala encontramos la denominada **generalización cartográfica**. Generalizar implicar expresar alguna idea o información de forma más resumida, de tal modo que esta sea comprensible y pueda aprovecharse de la mejor manera posible. La generalización es necesaria en un SIG para representar datos a una escala menor que su escala operacional, ya que a las limitaciones de la visión humana han de sumarse las limitaciones de resolución que los dispositivos presentan. Por ejemplo, no tiene sentido representar el callejero de una ciudad a una escala pequeña como la que se utilizaría para representar un mapa mundial, ya que cada pequeño punto de la pantalla contendría un gran número de calles. Además de obtener un resultado inservible, se consumirían recursos en efectuar todos los cálculos necesarios para producir esa representación.

En ocasiones, el proceso de generalización es necesario

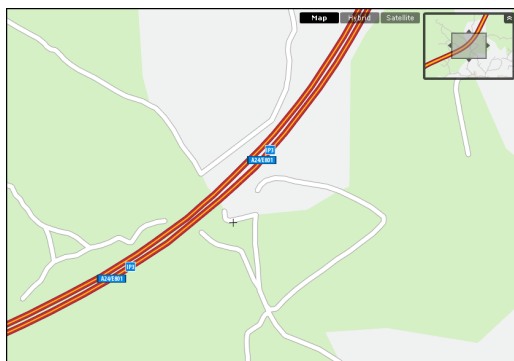


Figura 3.3: Un ejemplo de generalización por agregación. Dos carreteras prácticamente paralelas y unidas se representan como dos elementos en el mapa, pero en el localizador de la parte superior izquierda, a escala de menor detalle, se generalizan como una única (Tomado de Yahoo Maps).

por razones distintas a las anteriores, y requiere operaciones también distintas. Por ejemplo, podemos crear un mapa del mundo que contenga vías de comunicación, pero no todas, sino solo las principales autopistas de cada país. En este caso, no vamos a encontrar problemas con distintas carreteras que se solapan en la representación, ni tampoco un volumen excesivo de datos, pero debemos igualmente «adaptar» la representación a la escala, es decir, efectuar algún tipo de generalización. En este caso, se representarían las carreteras con un ancho mayor del real, ya que, de otro modo, no serían apenas visibles.

La generalización, por tanto, es un proceso que tiene como objetivo la producción de una imagen cartográfica **legible y expresiva**, reduciendo el contenido del mapa a aquello que sea posible y necesario representar. Para ello, se enfatiza lo que resulta de importancia y se suprime lo que carece de ella.

Existen diversas operaciones que se emplean en el proceso de generalización. Algunas de las más relevantes son las **simplificación** (representar un elemento menos complejo),

la **agregación** (representar varios elementos como uno solo —Figura 3.3—), la **exageración** (representar elementos con mayor tamaño del que les corresponde) y el **desplazamiento** (representar en una posición modificada, para garantizar la legibilidad).

En un SIG, la generalización puede incorporarse como parte de los propios mecanismos de representación, aplicándose las transformaciones correspondientes en tiempo real. A partir de un juego de datos, se elaboran las representaciones según la escala a la que se estén representando. Esta solución tiene el inconveniente de producir resultados que no resultan óptimos, por ser la generalización un proceso complejo y difícil de automatizar, y, sobre todo, el de consumir gran cantidad de recursos. La generalización en este caso tiene un objetivo cartográfico, pero en lugar de hacer más fluido el trabajo con datos de gran volumen, lo hace más lento.

Una solución alternativa y más adecuada de incorporar la generalización dentro de un SIG suele basarse en un enfoque multi-escalar (Figura 3.4), en el cual se maneja información de una misma zona de estudio a diferentes escalas, y se usa en cada momento aquella que resulte más conveniente. Si se trabajara con cartografía en papel, sería equivalente a tener varios mapas de una zona a diferentes escalas.

El concepto de *capa*, que veremos en el capítulo ?? y que es vital para la idea actual de un SIG, permite este manejo simultáneo de información a distintas escalas.

En el caso de imágenes, este enfoque multi-escalar implica la creación de las denominadas **pirámides** (Figura 3.5).

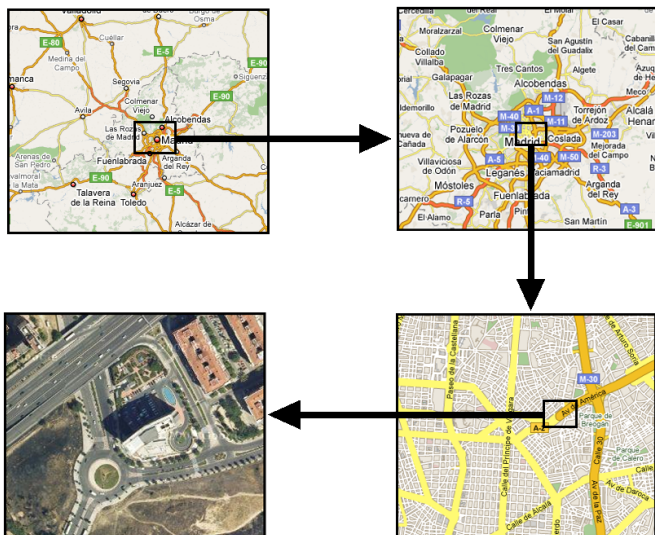


Figura 3.4: En un SIG es habitual manejar información a diferentes escalas. En función de la escala de representación, la información visualizada será una u otra.

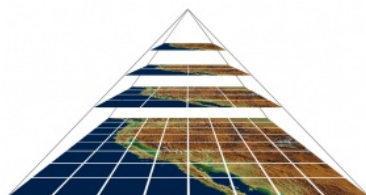


Figura 3.5: Pirámides de representación con imágenes preparadas a distintas escalas (Fuente: OSGeo).

