



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES
ACATLÁN**

**“LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA Y SU APLICACIÓN EN LA
INGENIERÍA CIVIL”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

**HÉCTOR DANIEL RESÉNDIZ
LÓPEZ**



ASESORA: M. en I. NELLY KARINA JIMÉNEZ GENCHI

NAUCALPAN, EDO. DE MÉX.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de mejorar nuestra sociedad mediante una profesión tan noble: la ingeniería civil.

A la Facultad de Estudios Superiores Acatlán, por recoger mis sueños y darme las herramientas para defenderme en la vida. Por encontrarme con personas que son muy importantes en mi vida.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por permitirme definir mi orientación profesional y mejora de aptitudes.

A mi directora de tesis, la M. en I. Nelly Karina Jiménez Genchi.
Por sus conocimientos brindados, su tiempo, paciencia y dedicación. Le agradezco en especial su amistad, que en conjunto hizo que el desarrollo del trabajo fuera una experiencia formativa tanto profesional como personal.

A mis profesores, personas sabias que dejaron huella imborrable en mi formación profesional. Ellos representan el sentimiento de gran respeto y cariño que tengo hacia nuestra universidad.

Al programa de ingeniería civil por su esfuerzo y dedicación para que todos los alumnos de la carrera tengan una formación integral y de calidad.

A todos ellos, mil gracias...

DEDICATORIAS

Mamá:

Gracias por impulsarme para lograr todas mis metas, por tu amor y confianza.

Papá

Eres mi modelo a seguir. Gracias por haberme enseñado tanto. Doy gracias a Dios por el tiempo que estuviste con nosotros.

Hermano:

Gracias por tu apoyo en las buenas y en las malas.

mi padrino

Juan Luis, gracias por tu confianza y apoyo incondicional en los momentos más importantes de mi vida. Mucho de lo que he logrado no hubiese sido posible tí.

A toda mi familia, por siempre creer en mí, y en su oportunidad darme valiosos consejos.

Nayeli, gracias por tantas horas de paciencia y trabajo, por tu amistad, confianza y apoyo incondicionales.

A mis compañeros y amigos de la FES Acatlán, gracias por aquellos días de trabajo y risas. Están siempre conmigo: Chucho, Abel, Miguel, Rogelio, Carlos, Rubén, Rodrigo, Joaquín y José Luis.

Con quienes he pasado tantas cosas, amigos, gracias. Thalía, Luis y Ángeles

A quienes siguieron rumbos distintos después de la huelga, gracias por su amistad y sabios consejos.

Sofía, Edgar, Artemio, Grethel y Blanca.

Para mis amigos de toda la vida sobran las palabras

Manuel, Adrián, Rodrigo, Arturo, Horacio, Cristian, Garza y Dionisio.

Contenido

1	LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	1
1.1	HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	1
1.2	ENFOQUES EN LA CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	5
1.3	DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	8
1.4	UTILIDAD DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA INGENIERÍA CIVIL	11
2	ELEMENTOS CARTOGRÁFICOS	14
2.1	CONCEPTOS BÁSICOS	15
2.1.1	<i>Geoide</i>	17
2.1.2	<i>Elipsoides de referencia</i>	18
2.1.3	<i>Sistemas de coordenadas</i>	19
	a) <i>Sistema de Coordenadas Latitud-Longitud</i>	19
	b) <i>Sistema de Coordenadas Planas UTM</i>	20
	c) <i>Red de Coordenadas</i>	21
2.2	PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS	21
2.2.1	<i>Distorsiones de las proyecciones</i>	22
2.2.2	<i>Tipos de proyecciones</i>	24
	a) <i>Proyecciones Cilíndricas</i>	25
	b) <i>Proyecciones Azimutales</i>	33
	c) <i>Proyecciones Cónicas</i>	37
2.3	ESCALAS	40
2.3.1	<i>Niveles de escala</i>	40
	a) <i>Escalas pequeñas</i>	41
	b) <i>Escalas medianas</i>	42
	c) <i>Escalas grandes</i>	43

2.4 TIPOS DE MAPAS TOPOGRÁFICOS	44
2.4.1 <i>Curvas de nivel</i>	45
2.4.2 <i>Modelos de pendientes</i>	45
2.4.3 <i>Modelos de contornos de altimetría</i>	45
2.4.4 <i>Modelos digitales del terreno</i>	46
2.4.5 <i>Fotografías aéreas</i>	47
2.4.6 <i>Imagen de satélite</i>	48
2.5 USO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL. (GPS)	49
2.5.1 <i>Tipos de receptores</i>	51
2.5.2 <i>Exactitud y precisión</i>	51
2.5.3 <i>Limitaciones</i>	52
2.5.4 <i>Funciones básicas</i>	52
3 METODOLOGÍA	53
3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES FUNDAMENTALES	54
3.1.1 <i>Variables Binarias</i>	54
3.1.2 <i>Variables Cualitativas o Nominales</i>	54
3.1.3 <i>Variables Ordinales</i>	54
3.1.4 <i>Variables Cuantitativas o Espaciales</i>	54
a) <i>Variables espaciales continuas</i>	54
b) <i>Variables espaciales de objetos discretos</i>	54
c) <i>Categorías de información de los objetos discretos</i>	57
3.2 ELECCIÓN DEL MODELO Y DE LA ESTRUCTURA DE DATOS	58
3.2.1 <i>Nivel de modelación conceptual</i>	59
a) <i>Modelos de estructuras teselares</i>	59
b) <i>Modelos de estructuras topológicas</i>	61
3.2.2 <i>Nivel de modelación lógica</i>	63
a) <i>Modelos de variables</i>	63
b) <i>Modelos de objetos</i>	68
c) <i>Ventajas y desventajas del modelado en raster respecto al vectorial</i>	72
d) <i>Escala y modelos lógicos de datos</i>	74
3.2.3 <i>Nivel de modelación digital</i>	76
a) <i>Modelación de variables espaciales compuestas</i>	77
3.3 RECOLECCIÓN, PRETRATAMIENTO E INGRESO DE LA INF.	79
3.3.1 <i>Procesos para la obtención de los datos</i>	80
3.3.2 <i>Creación de la Base de datos</i>	81
a) <i>Bases de datos temáticas</i>	82
b) <i>Bases de datos espaciales</i>	82
c) <i>Bases de datos relacionales</i>	82
d) <i>Ventajas en el uso de bases de datos</i>	85

3.4 ANÁLISIS Y CONSULTA DE LA INFORMACIÓN	85
3.4.1 <i>Extracción mediante especificación geométrica</i>	86
3.4.2 <i>Extracción mediante condición geométrica</i>	86
a) <i>Contigüidad</i>	86
b) <i>Conectividad.</i>	86
3.4.3 <i>Extracción mediante especificación descriptiva</i>	89
3.4.4 <i>Extracción mediante condición descriptiva o lógica</i>	90
3.5 SALIDA Y REPRESENTACIÓN	92
3.5.1 <i>Símbolos únicos</i>	93
3.5.2 <i>Valores únicos</i>	93
3.5.3 <i>Colores graduados</i>	93
3.5.4 <i>Símbolos graduados</i>	96
3.5.5 <i>Densidad de puntos</i>	96
3.5.6 <i>Símbolos de gráficos</i>	96
4 MÉTODOS Y ALGORITMOS DEL ANÁLISIS ESPACIAL	99
4.1 ANÁLISIS ESPACIAL DE PUNTOS.	101
4.1.1 <i>Análisis de coincidencia de puntos</i>	101
4.1.2 <i>Análisis de punto en línea</i>	101
4.1.3 <i>Análisis de punto en polígono</i>	103
4.1.4 <i>Conversión de una línea en punto</i>	104
4.1.5 <i>Conversión de polígonos a puntos</i>	105
4.2 ANÁLISIS ESPACIAL DE LÍNEAS	105
4.2.1 <i>Análisis de intersección de líneas</i>	105
4.2.2 <i>Análisis de línea en polígono</i>	107
4.2.3 <i>Líneas en polígonos e intersección de líneas</i>	109
4.3 ANÁLISIS ESPACIAL DE OBJETOS POLIGONALES	103
4.3.1 <i>Forma de los objetos poligonales</i>	110
4.3.2 <i>Conversión de polígonos a líneas</i>	110
4.3.3 <i>Conversión de líneas a polígonos</i>	110
4.3.4 <i>Análisis de contigüidad e interconexión del conjunto de los polígonos</i>	111
4.3.5 <i>Análisis de sobreposición de polígonos</i>	112
a) <i>Funciones de sobreposición:</i>	113
b) <i>Operadores</i>	117
c) <i>Extracción espacial de polígonos</i>	118
d) <i>Interpolación areal</i>	120
e) <i>Análisis de proximidad</i>	121
f) <i>Problemas con la sobreposición de polígonos</i>	124

5 IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN UN PROYECTO DE INGENIERÍA CIVIL	127
5.1 DISEÑO Y ORGANIZACIÓN DE UN SIG	129
5.1.1 <i>Cliente</i>	129
5.1.2 <i>Objetivo del proyecto</i>	129
5.1.3 <i>Fuentes de datos</i>	130
a) <i>Documentación histórica.</i>	130
b) <i>Toponimia</i>	130
c) <i>Cartografía oficial</i>	130
d) <i>Bases de datos procedentes de otros programas</i>	131
e) <i>Datos de campo</i>	131
5.1.4 <i>Base teórica</i>	131
5.1.5 <i>Programas y equipo</i>	132
5.1.6 <i>Desarrollo de herramientas</i>	134
5.1.7 <i>Tiempo/personal/potencia informática</i>	134
5.1.8 <i>Escala de trabajo</i>	136
5.1.9 <i>Presentación de los resultados del análisis</i>	136
5.1.10 <i>Actualización</i>	136
5.1.11 <i>Presupuesto disponible</i>	137
5.1.12 <i>Estructura organizacional</i>	137
5.2 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS.	137
5.2.1 <i>Delimitar el área de estudio</i>	137
5.2.2 <i>Definición de las capas de información</i>	137
5.2.3 <i>Codificación de atributos y construcción del diccionario de datos</i>	138
5.3 APLICACIÓN	139
5.3.1 <i>Sistema de Información geográfica de sondeos geotécnicos</i>	140
a) <i>Antecedentes</i>	140
b) <i>Cliente</i>	140
c) <i>Objetivo del proyecto</i>	140
d) <i>Fuentes de datos</i>	141
e) <i>Base teórica.</i>	141
CONCLUSIONES	153-156
APÉNDICES	157-175
GLOSARIO	177-190
BIBLIOGRAFÍA	191-194

Introducción

Durante al menos tres mil años la humanidad ha utilizado los mapas en distintas formas y por gran variedad de razones, siempre acorde a los avances tecnológicos y las necesidades de la época. Los primeros registros se remontan a los egipcios, que elaboraban en papiro rutas con instrucciones específicas para guiar a las caravanas durante sus viajes al medio oriente. Otros usos relevantes han sido los militares, con el propósito de conquistar territorios mediante estrategias y los de navegación, empleados por los marineros para ubicarse durante sus travesías por los océanos. Hasta hace relativamente poco tiempo, la preparación de la cartografía era tediosa y su uso estaba limitado a servicios especializados.

Desde sus inicios, la ingeniería civil ha empleado los mapas, pues todas sus áreas de aplicación están ligadas al espacio y su interacción con el hombre. Se han utilizado para saber donde construir ciudades, carreteras, puentes o cualquier otra obra civil en forma acertada. Las exigencias actuales originadas por el proceso de globalización y el deterioro ambiental, requieren la planeación integral de los proyectos mediante la consideración de factores como: relieve, geología, clima, vegetación, ecosistemas, recursos naturales, población, economía y uso de suelo.

La corriente tecnológica originada por los sistemas de cómputo ha cambiado la manera de hacer las cosas. Los profesionistas cuentan con nuevos métodos y herramientas para estudiar problemas complejos manteniendo un enfoque integral. Debido a los grandes volúmenes de información y la necesidad de su análisis, hoy en día, la elaboración de mapas tiene especial importancia. Inexplicablemente este nicho no ha cobrado la atención merecida por parte de muchos profesionistas.

La introducción de lo que ahora es llamado Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha revolucionado la forma de hacer mapas y proliferado su uso por lo que resultará inevitable la implementación a las demás tecnologías en los años venideros. Por consiguiente, la necesidad de integrar los SIG a las aplicaciones de ingeniería civil existentes tiene particular importancia pues el ciclo de vida de los proyectos es largo.

La principal característica de la tecnología SIG, es su capacidad de asociar información cartográfica con información numérica, lo que introduce una multitud de nuevas aplicaciones. Por diversas razones, los ingenieros civiles han

permanecido distantes de los usuarios de SIG y han tomado un camino distinto, el CAD (diseño asistido por computadora), que no asocia información numérica a los planos. Ambos sistemas más que ser contrapuestos, son complementarios.

Diariamente aumenta la cantidad de gobiernos y empresas privadas que utilizan los SIG con diferentes propósitos. Actualmente en el área gubernamental se usan para combatir el crimen, para la planificación óptima de los usos de suelo, como apoyo en los análisis de tránsito para la reducción del congestionamiento urbano, en la ubicación adecuada de la señalización vial y en general para la planificación de los recursos municipales y estatales; también son una importante herramienta para la comprensión y preservación del medio ambiente, pues existen aplicaciones en SIG para controlar la contaminación, proteger especies en peligro e identificar y comprender los hábitat de animales.

Las instituciones sanitarias a través de los SIG pueden determinar los focos infecciosos y prevenir epidemias. En el área de protección civil, jefaturas de bomberos y policía utilizan los SIG para despachar vehículos de emergencia a lugares de incidentes.

En la iniciativa privada también se usan para aprovechar los recursos naturales con mayor prudencia y habilidad; las empresas de servicios lo utilizan para administrar sus redes (agua, telefonía, gas, etcétera). El potencial de uso de esta tecnología en la industria es crear y comparar modelos, ubicar clientes y puestos de venta, definir territorios, ubicar nuevos negocios, planear rutas de entrega y manejar centros de servicios entre muchas aplicaciones.

Con base en lo anteriormente expuesto, el objetivo de la presente tesis es presentar una metodología para la estructuración de un proyecto de ingeniería civil que utilice la funcionalidad de la tecnología SIG. Se proporciona además bibliografía que permitirá al lector profundizar en aquellos temas que sean de su interés.

Para lograr el objetivo, la investigación se sistematizó de la siguiente manera:

1. Recopilación y selección de información básica mediante la consulta de libros especializados en la biblioteca del Instituto de Geografía¹, la participación en el proyecto SIG-SG del Instituto de Ingeniería², la finalización del curso SIG-T³ y consulta de la base de datos del I.N.E.G.I.
2. Análisis de la información mediante el estudio del estado del arte, temas sobre cartografía y algoritmos que integran el análisis espacial.
3. Elaboración y definición de la propuesta con base en la información analizada y la experiencia obtenida.

¹ U.N.A.M.

² Estancia de servicio social.

³ D.E.P.F.I., laboratorio de transporte, U.N.A.M.

4. Resultados y conclusiones obtenidos por las experiencias durante la investigación.

A continuación se hace un breve resumen sobre el contenido y estructuración de los capítulos.

El capítulo 1 “*Los sistemas de información geográfica*”, hace una introducción al tema para que las personas ajenas al contenido rápidamente se involucren. Comienza con una reseña histórica sobre su evolución, se integran diversas definiciones señalando su utilidad en la ingeniería civil y posteriormente se hace una descripción de los componentes generales explicando sus objetivos particulares. Al finalizar el capítulo se enumeran algunas aplicaciones de estos sistemas en los diferentes campos de estudio de la ingeniería civil.

El tema de la cartografía, elemento principal de los análisis espaciales corresponde al capítulo 2 nombrado “*Elementos cartográficos*”. Aquí se explican conceptos básicos ajenos a los ingenieros civiles (sistemas de coordenadas, elipsoides de referencia, proyecciones cartográficas y uso de los sistemas de posicionamiento global). Los capítulos 1 y 2 conforman el marco teórico indispensable para comprender la metodología propuesta.

El propósito del capítulo 3 “*Metodología*”, es proveer el orden lógico de los pasos necesarios para el diseño y elaboración de un Sistema de Información Geográfica genérico. Define las características y objetivos de cada etapa, desde la identificación de las variables del modelo hasta la salida y representación de los resultados.

El capítulo 4, llamado “*Métodos y algoritmos que componen el análisis espacial*”, explica el fundamento matemático de los sistemas de información geográfica para comprender su amplio potencial. Se centra la atención en las tres unidades vectoriales: el punto, la línea y los polígonos. Comienza con la definición de conceptos básicos como el cálculo de distancias y áreas, llegando a análisis complejos (contigüidad e interconexión de polígonos). Para esto, en todo momento se exponen ejemplos relacionados con el campo de estudio de la ingeniería civil.

Finalmente, el capítulo 5 “*Implementación de un sistema de información geográfica en un proyecto de ingeniería civil*” es una síntesis del conocimiento reunido. Su finalidad es implementar la metodología propuesta al proceso general de planeación de proyectos de ingeniería civil, comenzando desde las características del cliente hasta la construcción de la base de datos.

1

LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

“Cuando los ingenieros civiles traten con familiaridad los principios y técnicas usadas en los análisis geográficos, formularán nuevos planteamientos que de otra manera no hubieran concebido y cuando esto suceda, habrán llevado su manera de planear y hacer negocios a otro nivel”

Objetivo

Definir los Sistemas de Información Geográfica señalando su utilidad en la Ingeniería Civil.

1.1 HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Previo a la disponibilidad de la tecnología de Sistemas de Información Geográfica, SIG (GIS, Geographic Information Systems, por sus siglas en inglés), la forma en que se tomaban decisiones relacionadas con los espacios físicos (como elegir el lugar más apto para ubicar una presa o un aeropuerto), no

siempre era la más adecuada. Se confiaba en mapas tradicionales y tablas estadísticas impresas que se mantenían generalmente en departamentos o sectores aislados dentro de una cierta organización, perdiendo tiempo al realizar búsquedas y consultas, duplicando esfuerzos al no concentrar el trabajo e inevitablemente produciendo resultados erróneos. Los mapas, tablas y cartografía eran difíciles de mantener actualizados y era difícil imaginar el contexto real de los espacios geográficos, así como evaluar la mejor opción para una localización o simplemente definir el criterio que se debía tomar. Antes del uso de esta tecnología, se afirma categóricamente que las decisiones sobre cuestiones espaciales estaban basadas en datos incompletos y solucionaban sólo parte del problema, realizando en consecuencia una mala planificación. Era imposible la visualización en conjunto de la gama de alternativas.

Los primeros análisis prototipo de los sistemas de información geográfica (SIG) utilizaron técnicas manuales, tanto para la entrada de datos, el almacenamiento y el posterior análisis de los mismos.

El primer SIG registrado como tal, fue el *Sistema de Información Geográfica Canadiense* (Canadian Geographical Information System, CGIS por sus siglas en inglés), creado de 1964 a 1967. La finalidad era realizar el inventario y planeación del uso de suelo en el territorio canadiense. Este sistema fue desarrollado por Roger Tomlinson, siendo IBM la empresa que aportó el *hardware* necesario. A partir de este desarrollo, han surgido otros sistemas que se han ido depurando con base en las experiencias anteriores, algunos sistemas de primera generación son:

- 1967, Nueva York. Sistema de uso de suelo y recursos naturales (Land Use and Natural Resources Information Systems, LUNR).
- 1969, Minnesota. Sistema de información de manejo de suelo en Minnesota (Minnesota Land Management Information System, MLMIS).
- 1971, USA. Sistema de información de recubrimiento de polígonos (Polygon Information Overlay System, PIOS).
- 1972, USA. Sistema de información modelador de Oak Ridge (The Oak Ridge Modelling Information System, ORMIS).
- 1975, USA. Sistema de almacenamiento y recuperación de datos para el control de calidad del agua (Storage and Retrieval of Data for Water Quality Control System (STORET)).

El esquema histórico que a continuación se presenta, refiere cómo se plantearon las cuestiones fundamentales relacionadas al modelado de datos en un SIG.

Una de las Instituciones que más ha aportado al modelado de datos¹ es el laboratorio de Harvard para gráficas por computadora y análisis espacial², fundado en 1966 con la finalidad de utilizar computadoras para la elaboración de gráficos y

¹ Maguire (1989) pp. 111-130.

² HLCGSA: Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis.

el manejo de información espacial para la planeación territorial. Ahí se realizó la creación del programa de cartografía asistida por computadora SYMAP que hasta el momento se encuentra presente en el mercado. Las actividades fundamentales del Laboratorio por etapas fueron:

- 1^a. Etapa (1967-1970). Elaboración del programa SYMAP (1968). Este programa utilizaba una de las formas más sencillas para conservar digitalmente la información espacial. También se elaboran por estos años los programas GRID e IMGRID basados en la denominada representación *raster*³.
- 2^a. Etapa (1970-1980). Consiste en el desarrollo del programa POLYVRT, en el cual se plantea una importante novedad en cuanto a la estructura de información espacial, integrando en ella de modo explícito la *topología*⁴ de los *objetos cartográficos*.
- 3^a. Etapa (1980-2003). Con posterioridad se crea el primer y verdadero SIG de tipo vectorial⁵, el programa ODISSEY que incluye la digitalización semiautomática de los datos espaciales, el manejo de la base de datos y la elaboración interactiva de mapas. La tendencia es ahora mejorar las técnicas de reproducción, incluyendo el color y forma más expresiva de los mapas. Este sistema utiliza una *estructura de datos topológica Arco/Nodo*.

En el mismo laboratorio se trabajó en una línea de programas cartográficos muy diferentes, basados en una representación *raster* de los datos, tales como el GRID e IMGRID, de ellos surge el programa MAP que ha servido como modelo para el desarrollo de sistemas como ERDAS e IDRISI.

La tendencia en los años 70's fue la construcción de SIG muy específicos ligados a necesidades concretas de instituciones públicas. Como el Departamento de Agricultura, Ayuntamientos, etc. Se trataba de sistemas tales como CGIS, LUNR, PIOS, MLMIS, ORMIS, entre otros, instalados en grandes computadoras y cuya finalidad principal era el inventario de recursos en especial de uso de suelo, aunque con pocas capacidades analíticas.

³ RASTER: Modelo de datos en el que la realidad se representa mediante teselas elementales que forman un mosaico regular, cada tesela del mosaico es una unidad de superficie que recoge el valor medio de la variable representada (altitud, reflectancia...); las teselas pueden ser cuadradas (celdas) o no (triangulares, hexagonales...) un modelo de datos *raster* está basado en localizaciones.

⁴ TOPOLOGÍA. Referencia a las propiedades no métricas de un mapa y que permanecen invariables ante cambios morfológicos, de escala o de proyección (vecindad o adyacencia, inclusión, conectividad y orden).

⁵ VECTORIAL modelo de datos en el que la realidad se representa mediante estructuras conformadas por vectores.

Tras las aportaciones del Laboratorio de la Universidad de Harvard, surge una empresa privada con importantes desarrollos: ESRI⁶, que partiendo de los trabajos de J. Dangermond y S. Morehouse ha creado varios programas propios como Arc/INFO y ArcView inspirados en ODISSEY con avances y mejoras muy significativas.

El incremento de las posibilidades del análisis geográfico esta unido inicialmente a la creación de sistemas *raster* dada la mayor facilidad de este tipo de representación del espacio. Sin embargo, la realización de inventarios no cuadra bien con una descripción raster. Es por ello que han existido dos líneas de desarrollo, *raster* y *vector*. A veces se elaboran sistemas mixtos, que mantienen la base de datos *vectorial* para inventario y la recuperación selectiva de los datos, y la transforman a *raster* cuando necesitan realizar algunos análisis, en especial la superposición de mapas.

A finales de los años 70, con el desarrollo de una estructura topológica para los datos espaciales se crearon sistemas de información geográfica vectoriales con mayores capacidades analíticas y éstos han empezado a ser de uso más general como es el caso de Arc/INFO. La mayoría de estos programas han sido elaborados por empresas como ESRI, INTERGRAPH (con el programa TIGRIS) y SIEMENS (programa SICAD).

Posteriormente, a finales de los ochenta e inicios de los noventa, los SIG se han convertido en un tema de rápida expansión. Buena muestra de ello es por ejemplo, la creación del Centro Nacional para la Investigación Geográfica y Análisis⁷ por la Fundación Nacional de Ciencias⁸ de los Estados Unidos de América en 1988, con la finalidad de desarrollar investigación básica sobre el análisis geográfico utilizando los SIG. Este nuevo centro ha elaborado un plan de investigación con varias líneas como es el análisis espacial y estadístico espacial, relaciones espaciales y estructuras de la base de datos e inteligencia artificial en los sistemas expertos, visualización de datos espaciales y cuestiones institucionales, sociales y económicas de los SIG.

En otros países también se pueden encontrar iniciativas semejantes, por ejemplo, los Laboratorios de Investigación Regional de Gran Bretaña, financiados por el Consejo de investigación económica y social Británico (British Economic and Social Research Council), pretenden desarrollar centros avanzados en el estudio de los Sistemas Manejadores de Base de Datos, Análisis Espacial y desarrollo de *software*, así como las aplicaciones de estas técnicas en la investigación regional. También en Holanda se ha establecido el NexpRi (Centro Nacional Holandés para SIG) con finalidades semejantes a las citadas anteriormente.

Por otra parte, la Comunidad Económica Europea tiene en marcha varios proyectos muy relacionados con los SIG. En España existen varias iniciativas

⁶ Environmental Systems Research Institute (<http://www.esri.com>).

⁷ NCGIA: National Center for Geographical Investigación Analysis.

⁸ NSF : National Science Foundation.

públicas para el desarrollo de bases de datos geográficas en formato digital y para la creación de Sistemas de Información Geográfica.

En México, el primer sistema de información geográfica, el "*Sistema Geomunicipal de Información*" fue un sistema de punta tecnológica, lo realizó el *Centro de Procesamiento Arturo Rosenblueth* perteneciente a la Secretaría de Educación Pública a principio de los años 70. Este sistema se ha depurado hasta llegar al *Sistema de Información para la Planeación Educativa*. Este sistema cuenta con la cartografía de todo el país a nivel municipal con las variables censales de educación de la SEP.

Otras instituciones como INEGI, PEMEX, IFE, SEMARNAP, GDF, CFE, CNA, SCT, los gobiernos estatales y las universidades han tenido la necesidad de auxiliarse de estos sistemas para sus investigaciones, sin embargo en muchos casos no se han logrado resultados satisfactorios por diversas razones entre otras como las económicas, políticas, de personal capacitado y tiempo. Desafortunadamente, aunque las instituciones obtienen resultados interesantes, con los cambios de administración y de política, los proyectos en SIG pierden continuidad. En México, es en el ámbito de la iniciativa privada donde los SIG tienen mayor reditúo, pues sus aplicaciones repercuten en la optimización de los recursos financieros de las empresas.

1.2 ENFOQUES EN LA CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS SIG.

En la bibliografía existen diversos enfoques para definir a los Sistemas de Información Geográfica. En cada campo donde los SIG son útiles, se les conceptualiza de forma distinta, las siguientes definiciones ejemplifican algunas de las formas habituales de concebirlos.

Enfoque general:

1. *"Un conjunto de herramientas para reunir, introducir, almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto particular de objetivos".*⁹
2. *"Un sistema de Información Geográfica se puede considerar esencialmente como una tecnología aplicada a la resolución de problemas territoriales".*¹⁰

Enfoque administrativo:

3. *"Una entidad institucional con estructura garantizada que integra la tecnología con una base de datos, personal experto y soporte financiero continuo a través del tiempo".*¹¹

⁹ Burrough (1988) cap. 1.

¹⁰ Bosque Sendra (1992) cap. 2.

¹¹ Harder (1997) pp. 21-27.

Enfoque informático:

4. Los SIG forman parte del ámbito más extenso de los denominados “*Sistemas de Información*” (SI)¹², que se pueden definir como un “*Sistema que está creado para dar respuesta a preguntas no predefinidas de antemano*”. Por lo tanto un SI incluye una base de datos, una base de conocimiento (conjunto de procedimientos de análisis y manipulación de los datos) y un sistema de interacción con el usuario. Los mismos elementos se pueden encontrar en la organización general de un SIG.
5. Un Sistema de Información Geográfica se puede definir como “*Una base de datos computarizada que contiene información espacial o también como una tecnología informática que se utiliza para gestionar y analizar información espacial*”.¹³
6. Un Sistema de Información Geográfica es “*un sistema informático diseñado para el manejo, análisis y cartografía de información espacial*”.¹⁴
7. La primera referencia al término SIG, fue al Sistema de Información Geográfica de Canadá (CGIS)¹⁵, descrita como: “*una aplicación informática cuyo objetivo es desarrollar un conjunto de tareas con información geográfica digitalizada*”.
8. Otra de las definiciones importantes que deja ver en claro lo que es un SIG: “*Un Sistema de Información Geográfica es un sistema computacional, que consiste en una base de datos que almacena información espacial y descriptiva de un entorno geográfico como parte del Mundo real; además de permitir la entrada, mantenimiento, análisis, transformación, manipulación y presentación de datos espaciales, de algún punto geográfico en particular*”.¹⁶

Enfoque de sistemas y planeación:

9. “*Sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión*”¹⁷
10. “*Sistema compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, modelizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación*”.¹⁸

Enfoque geográfico:

11. “*Un Sistema de Información Geográfica es un tipo especializado de base de datos, que se caracteriza por su capacidad de manejar datos*

¹² Bernhardsen (1999) pp. 1-12.

¹³ Aronoff (1989) cap. 1.

¹⁴ Berry (1968) cap. 1.

¹⁵ Demers(1999) pp. 7-14.

¹⁶ Longley, Goodchild y Maguire (1999) pp. 589-600.

¹⁷ National Center for Geographic Information and Analysis, NCGIA (1990)

¹⁸ Birkin, Clarke y Wilson (1996) cap 1.

geográficos, es decir, espacialmente referenciados, los cuales se pueden representar gráficamente como imágenes".¹⁹

12. *"Un conjunto de mapas de la misma porción del territorio, donde un lugar en particular tiene las mismas coordenadas en todos los mapas incluidos en el sistema de información, de este modo, resulta posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas para obtener un mejor conocimiento de la zona"*

Enfoque de ingeniería:

13. *"Un sistema de información geográfica es un modelo, pues trata de representar un fenómeno real para producir la información necesaria para que los tomadores de decisiones puedan tener influencia en el mundo real."*

La presentación de las definiciones anteriores pretende aclarar qué es un SIG, desde la perspectiva de las diferentes áreas donde es utilizado; aún cuando no se evidencia el fin práctico de esta tecnología se puede considerar esencialmente a los SIG como una tecnología aplicada a la resolución de problemas espaciales.

Respecto al campo de aplicación de los SIG, una definición con *enfoque ambiental* dice: *"Las aplicaciones de los SIG son útiles desde el inventario de los recursos naturales y humanos hasta el control y la gestión de los datos catastrales, de propiedad urbana y rústica (catastro multipropósito), la planificación y la gestión urbana y de los equipamientos".²⁰* En conclusión un Sistema de Información Geográfica es útil en cualquier área que sea necesario el manejo de información espacial.

Un elemento muy relacionado con los SIG son los *sistemas de ayuda a la toma de decisiones*, también llamados SIG de modelación dinámica y constituyen la siguiente generación de estos sistemas puesto que forman una herramienta especializada, aunque de utilidad más parcial, pero más potente. En ellos los datos y la base de conocimientos se estructuran para servir de ayuda a la toma de decisiones, facilitando posibles contestaciones y simulaciones de lo que podría ocurrir en caso de adoptar esta o aquella alternativa. Los SIG de última generación son, en algunos casos simultáneamente, Sistemas de Información y Sistemas de Apoyo a la Decisión.²¹

A partir de lo anterior, se puede aseverar que los SIG son herramientas básicas para cualquier ingeniero civil, ya que ciertamente todos los proyectos relacionados con la ingeniería civil involucran el manejo de información espacial y la toma de decisiones.

Aunque la tecnología SIG no es reciente, tiene aproximadamente 40 años de existencia, en los últimos años se ha planteado una discusión sobre el verdadero significado y la esencia principal de un Sistema de Información Geográfica, en especial para diferenciarlo de un programa de cartografía asistido por computadora o de un manejador de base de datos. *"Lo más característico de un*

¹⁹ Dangermond (1983) cap. 1.

²⁰ Demers (1999) pp. 17-23.

²¹ NCGIA (1990) www.ncgia.ucsb.edu

SIG es la capacidad de análisis, de generar nueva información de un conjunto previo de la misma, mediante su manipulación y reelaboración".²²

Un SIG es mucho más que un sistema de diseño asistido por computadora por su capacidad de relacionar los *elementos geográficos* o *datos espaciales* (puntos, líneas y polígonos) con los elementos de una base de datos temáticos, aspectos que faltan en los programas CAD (*Computer Aided Design*).

Por otra parte, las diferencias con los programas de cartografía asistida por computadora estriban en su posibilidad de manejar más de un conjunto de elementos geográficos al mismo tiempo y sobre todo, la capacidad de construir nuevos datos a partir de los ya existentes en la base de datos. Por todo ello se puede decir que "para el manejo de datos espaciales, los SIG, son el mayor avance que se ha realizado desde la invención del mapa".²³

Se puede definir a los SIG como instrumentos para crear y actualizar *modelos cartográficos* (para mayor información sobre los modelos, consulte el *Apéndice A*), constituidos por tecnología y procedimientos para combinarlos, analizarlos e interpretarlos, además de ser una revolución informática en su estructura, representación y uso. En forma equivocada se confunde a los sistemas de información geográfica con aplicaciones informáticas (como IDRISI, ArcInfo, Arcview y GRASS), realmente son programas de cómputo que constituyen solo un componente del sistema (Figura 1.3-1).

1.3 DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS GENERALES DE LOS SIG.

Para describir a los SIG, es necesario integrar en un mismo concepto:

- Datos.
- Modelos.
- Equipo de cómputo (Hardware) y programas (software).
- Diversos intereses (científicos, de gestión y comerciales).
- Diversas disciplinas científicas (matemáticas, ingeniería, cartografía, geografía, biología, informática, etc.) que previamente aparecían aisladas.
- Personal (Ingenieros, programadores, administradores, etc.)

En general, un *Sistema de Información* consiste en la unión de información que incluye la posición en el espacio con la ayuda de herramientas informáticas para su análisis al contar con objetivos concretos.

Cualquier Sistema de Información Geográfica se sustenta en una serie de capas de información espacial en formato digital que representan diversas *variables* (llamados SIG en formato raster), o bien capas que representan *objetos* (SIG en formato vectorial) a los que corresponden varias entradas en una *base de datos enlazada*.

²² Openshaw (1991) pp. 114-123

²³ Maguire (1989) pp.19-25



Figura 1.3-1 Componentes de un SIG

Esta estructura permite combinar, en un mismo sistema, información con orígenes y formatos muy diversos incrementando la complejidad del sistema.

Por otro lado, los programas de cómputo para el manejo de la información son diferentes entre si y en ocasiones pueden llegar a ser contradictorios, pues cada uno refleja diferentes teorías sobre los cálculos espaciales procedentes de disciplinas científicas diversas²⁴. Utilizar una determinada herramienta SIG para resolver un problema implica la aplicación de una teoría o hipótesis acerca de los datos que se manejan. Esto hace pensar si los SIG deben considerarse como una herramienta neutra o como una disciplina científica.

Los Sistemas de Información Geográfica se han desarrollado a partir de la unión de diversos tipos de aplicaciones informáticas: la *cartografía automática*

²⁴ Cowen (1998) pp. 189-192.

tradicional, los sistemas de gestión de bases de datos, las herramientas de análisis digital de imágenes, los sistemas de ayuda a la toma de decisiones y las técnicas de modelización física. Por ello tienden a veces a ser considerados un subproducto de las facultades de informática para ser usados únicamente por informáticos. Sin embargo la fuerte carga teórica que sustenta a los SIG, los convierte en sistemas expertos que sólo pueden ser manejados por personas que comprendan los conceptos modelados (como por ejemplo las ciencias de la tierra, el área de transporte y logística y los estudios ambientales) y que cuenten con una preparación informática y geográfica sólida (programación de algoritmos, manejo de bases de datos, análisis digital de imágenes y comprensión de razonamientos espaciales).

Una de las primeras percepciones que se tienen de un SIG son las salidas gráficas a todo color, ya sea en forma impresa o en la pantalla de una computadora. Conviene recordar que hay una diferencia fundamental entre los programas de manejo de gráficos y los SIG. En los primeros, lo fundamental es la imagen observada, siendo irrelevante como se codifique, mientras que en los SIG la imagen es sólo una salida gráfica sin mayor importancia, lo relevante son los datos que se están representando.

En resumen, los SIG están constituidos por:

- I. *Bases de datos espaciales* que codifican la realidad mediante el uso de *modelos de datos*²⁵ específicos.
- II. *Bases de datos temáticas* cuya vinculación con la *base de datos cartográfica* permite asignar a cada punto, línea o área del territorio *valores temáticos*.
- III. Conjunto de herramientas que permiten manejar estas bases de datos de forma útil para diversos propósitos de investigación, docencia o gestión.
- IV. Conjunto de computadoras y periféricos de entrada y salida que constituyen el soporte físico del SIG. Estas incluyen tanto el *programa de gestión* de SIG como otros *programas de apoyo*.
- V. Comunidad de usuarios que pueda demandar *información espacial*.
- VI. *Ingenieros administradores del sistema* encargados de resolver los requerimientos de los usuarios bien utilizando las herramientas disponibles o bien produciendo nuevas herramientas.

Los objetivos generales de cualquier SIG son contar con:

- Ubicación espacial del problema de estudio.
- Un sistema normal de recolección de datos.
- Información organizada.
- Información actualizada.
- Información instantánea.

²⁵ MODELO DE DATOS. esquema conceptual que busca cómo representar la realidad de forma adecuada y eficiente; un mismo modelo de datos puede expresarse en diferentes estructuras de datos que difieren en la forma de codificar y almacenar la información aún dentro del mismo esquema conceptual.

- Representación gráfica del problema y,
- Dado el caso, permitir la modelación compleja.

En la actualidad se tienen dos tendencias en el procesamiento de la información en los SIG, *procesamiento de tipo descriptivo*, esto es inventario de la información, y *procesamiento de tipo prescriptivo*, análisis y modelamiento de la información, siendo éste último el que interesa al ingeniero civil por sus características de apoyo en cuanto a la toma de decisiones. Se puede definir a los componentes de un SIG como: "un conjunto de operadores que manipulan una base de datos espaciales". El SIG constituye un puente de soporte para la toma de decisiones entre el mundo real y el usuario (Figura 1.3-2).



Figura 1.3-2 Esquema general de un SIG

Ampliando la definición anterior, "un SIG es un conjunto de programas de computadora que integran diferentes funciones; la captura y almacenamiento de datos con información coherente, en mapas referenciados geográficamente, para su análisis y modelado (manipulación, sobreposición, medición, cálculo y recuperación) hasta obtener resultados, como sería el despliegue de nuevos mapas o resultados en forma tabular".²⁶

El conjunto de *operadores* constituye un sistema de administración o gestión de bases de datos, cuyo propósito es administrar los grandes archivos que contienen datos tabulares relacionados con los diferentes recursos que se analizan.

Se estima que para poder introducir esta tecnología en el campo de las aplicaciones hay que desarrollar información clara y concisa. El desarrollo de la base de datos: *espacial y tabular* resulta ser la piedra angular sobre la que se fundamenta el desarrollo de cualquier SIG.

1.4 UTILIDAD DE LOS SIG EN LA INGENIERÍA CIVIL.

La organización de los datos en un Sistema de Información Geográfica es mediante una estructura de capas de información temáticas (Figura 1.4-1), donde el usuario puede seleccionar lo que requiera libremente para su uso.

²⁶ Coleen (1994) pp. 74-76.

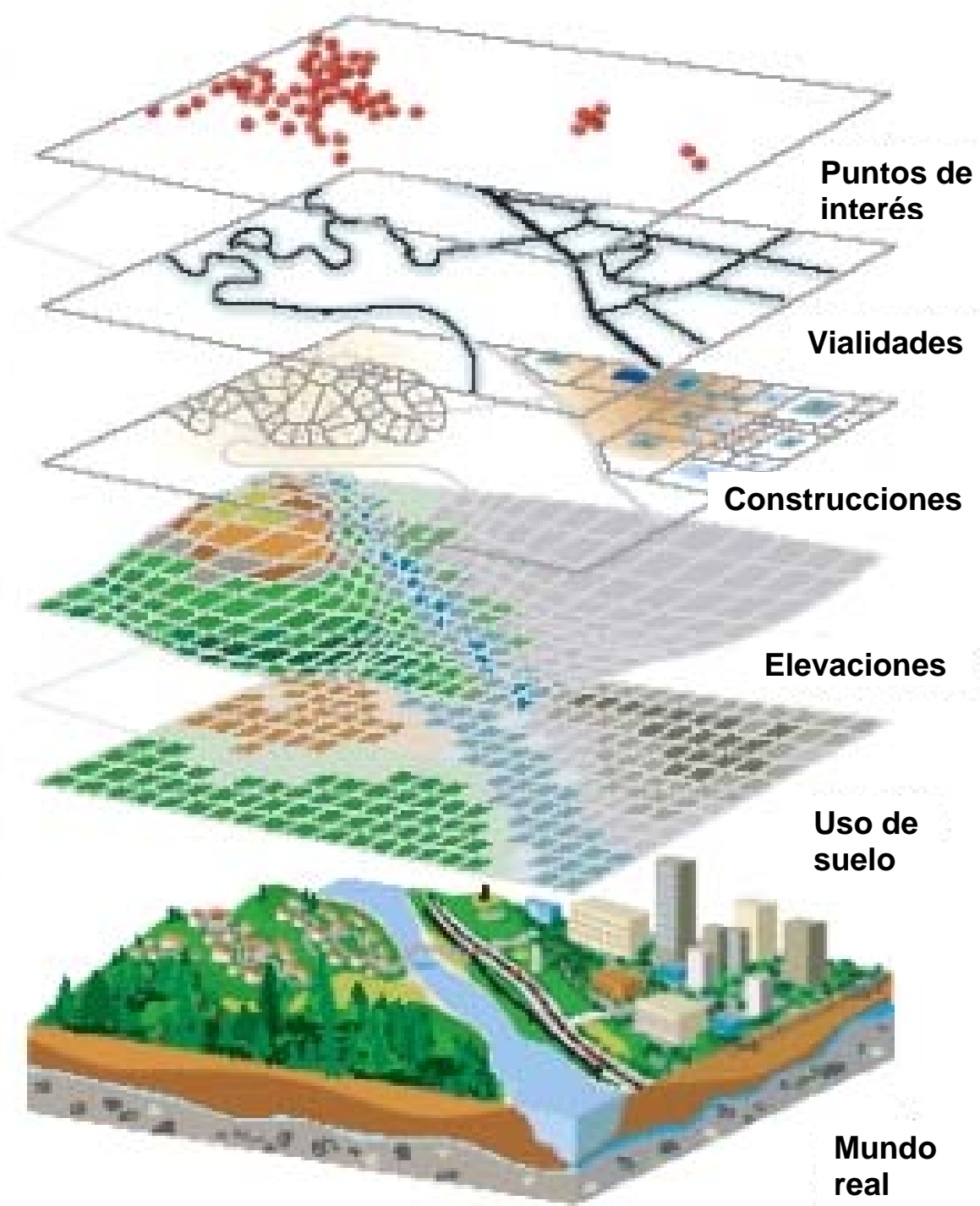


Figura 1.4-1 Combinación de información con orígenes y formatos diversos en un mismo SIG

La información requerida para realizar un proyecto de ingeniería civil en SIG puede ser de prácticamente cualquier área, como:

- Ciencia: Matemáticas, informática, cartografía, geografía, biología, política, población.
- Recursos existentes: Suelo, hidrología, vegetación, clima, geología, petróleo, minería, zonas ecológicas, zonas arqueológicas, inventarios, etc.
- Otros proyectos de ingeniería: levantamientos topográficos, vías de comunicación, sondeos geotécnicos, zonas de riesgo, redes de transporte, infraestructura, tuberías, maquinaria, etc.
- Intereses diversos²⁷: Gestión (usos de suelo), y comercial (consumidores potenciales, áreas de servicio, localización de tiendas, etc.).
- Forma gráfica: mapas, tablas, histogramas, fotos, presentaciones y videos; debe permitir seleccionar el tipo de información de interés, pero también el tipo de usuario.

Las necesidades de información para el proyecto se delimitan por²⁸:

- Tema: Transporte, suelos, medio ambiente, industria, comercio, etc.
- Usos potenciales: Turismo, agricultura, ganadería, forestal, pesca, minería, conservación, catastro, división de zonas federales, concesiones, comunicaciones, zonificaciones, protección civil, redes de transporte, servicios, seguridad pública, educación, etc.
- Interés: Político, administrativo, legal, ecológico.
- Nivel de decisión: Estratégico, táctico, técnico.

En función de los campos de estudio de la ingeniería civil, se mencionan a continuación algunos proyectos en los cuales la tecnología SIG ha funcionado con éxito.²⁹

Hidráulica e Hidrología³⁰

- Planeación y operación de tuberías de agua potable y drenaje.
- Localización y análisis de vasos de almacenamiento.
- Evaluación de agua subterránea.
- Creación de modelos hidrológicos.
- Análisis de variación espacial de la precipitación.
- Localización y análisis de pozos.

Geotecnia³¹

- Estudios del subsuelo (zonificación geotecnia, análisis estratigráfico).
- Análisis y localización de datos geológicos (fallas, discontinuidades, pliegues, etc.)
- Estudios de riesgos geotécnicos y su área de influencia.
- Simulación de daños producidos por terremotos.

²⁷ Ochoa (1996) cap. 1-3.

²⁸ Jones, Kidner, Luo, Bundy (1996). Cap. 5.

²⁹ American Society of Civil Engineers (2003).

³⁰ Gray y Maizel (1995) cap. 5.

³¹ Walter, Black, Linn, Thomas, Wiseman, D'Attilio (1996) cap. 3 y 4.

Estructuras³²

- Monitoreo, operación y mantenimiento de estructuras con sensores inteligentes como: puentes, edificios, carreteras, tanques y canales.

Planeación y sistemas³³

- Planeación urbana, del transporte y mantenimiento de caminos.
- Estimaciones del tiempo de traslado.
- Cálculo de la demanda potencial de usuarios de transporte público.
- Estudios de: accesibilidad a los servicios, impacto por obras viales.
- Análisis de accidentes.
- Diseño de: rutas mínimas y rutas de emergencia
- Modelos de: flujo de redes, localización y asignación, interacción espacial y de gravedad, atracción y generación de viajes, distribución de viajes e intercambio modal.
- Mapeo de señalización, alumbrado público y condiciones de caminos.
- Localización óptima de infraestructura.
- Prevención de desastres y programas de protección civil.

Construcción³⁴

- Administración de recursos (maquinaria, vehículos, organización de frentes de trabajo).
- Control y organización en frentes de trabajo para obras grandes.

Ambiental³⁵

- Control y dispersión de contaminantes en agua y aire.
- Evaluación de impactos ambientales.
- Planeación y análisis de la descarga de aguas residuales.
- Valoración de la contaminación en aguas subterráneas.
- Mapeo de inundaciones y de zonas de riesgos.

Es importante mencionar que los ejemplos anteriormente citados son sólo *algunos*, continuamente se descubren nuevas aplicaciones de esta tecnología en los proyectos de ingeniería civil.

³² Huxhold (1991) cap. 7.

³³ Harder (1997) cap. 1-4.

³⁴ Huxhold (1991) pp. 72-95.

³⁵ Coleen, Cowardin y Strong (1994) pp. 43-67.

2

ELEMENTOS CARTOGRÁFICOS

En el capítulo anterior se definieron los sistemas de información geográfica enfatizando su utilidad en la ingeniería civil, en virtud de ello a continuación se relacionarán con el tema de la cartografía, que es el elemento principal de los análisis espaciales.

Objetivo

Explicar los componentes cartográficos empleados en los SIG.

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Diversas culturas, han usado símbolos gráficos para representar *fenómenos distribuidos espacialmente*. En México, de la cultura azteca se conservan numerosos mapas que representan con mayor interés los hechos históricos que los detalles topográficos. Los mapas tienen por objeto representar diversos puntos y accidentes, ubicados en el espacio terrestre y la relación que entre ellos establece el hombre. Estas relaciones principalmente se determinan por la distancia y la dirección. Anteriormente la distancia se expresaba no sólo en medidas lineales sino también en unidades de tiempo (horas o días).

Las gráficas en forma de mapas constituyen un medio conveniente para mantener registros, concebir ideas, analizar conceptos, predecir el futuro, tomar decisiones con respecto a la geografía y comunicar los conceptos espaciales a otros.

Una definición más formal de mapa es: “colección de datos analizados y almacenados”. La información derivada del análisis de ésta colección es usada en la toma de decisiones. Un mapa debe ser capaz de transmitir información en forma clara sin ambigüedades. Los mapas representan un retrato de las relaciones espaciales y fenómenos sobre la Tierra.

Un *Sistema de Información Geográfica* es una serie de operaciones que van desde la planeación, la observación, la recopilación hasta el almacenamiento y análisis de datos para obtener información que ayude en algún proceso de toma de decisiones. Por lo anterior se considera a los mapas como un tipo de *sistemas de información*.

NOCIONES DE GEODESIA

En la ingeniería civil, la *topografía* es utilizada cotidianamente debido a que brinda información básica a sus proyectos. Su área de estudio son las superficies de extensión reducida pues considera despreciable la esfericidad terrestre. Las aplicaciones de la topografía se apoyan en la *geodesia*.

La *geodesia* estudia la forma, dimensiones y campo gravitatorio de la Tierra en territorios extensos. Puesto que el campo abarcado por la geodesia es muy amplio, es conveniente dividirla en varias ramas¹:

- *Geodesia Esferoidal*: Estudia la forma y dimensiones de la Tierra y el empleo del elipsoide² como superficie de referencia.
- *Geodesia Física*: Estudia el campo gravitatorio de la Tierra partiendo de mediciones hechas por las *estaciones gravimétricas*³.
- *Astronomía Geodésica*: Estudia los métodos astronómicos que permiten determinar las coordenadas geográficas de una serie de puntos sobre la superficie terrestre conocidos con el nombre de “*Datum*” o “*Puntos astronómicos fundamentales*”, a partir de los cuales se basará el cálculo de las *redes geodésicas*.
- *Geodesia espacial*: utiliza satélites artificiales para sus determinaciones.

En México, el conocimiento de la geodesia se remonta a la era prehispánica. El calendario azteca y las pirámides son testimonio histórico de su comprensión de la astronomía.

¹ Bernhardsen (1999) pp.101-106.

² Elipsoide: Descripción simplificada de la forma y dimensiones de la Tierra. Los elipsoides se definen en función de un radio ecuatorial y de un radio polar.

³ Monitorean la variación de la gravedad en los puntos donde se localizan.

La *cartografía* se fundamenta en estos conceptos básicos de la geodesia, por lo que es importante comprenderlos para profundizar en el entendimiento de los SIG.

Para representar cartográficamente territorios muy extensos, la geodesia:

1. Establece una red de puntos de control (también llamados *vértices geodésicos*) distribuidos por toda la superficie terrestre a cartografiar. Determina sus coordenadas y elevación sobre el nivel del mar.
2. Sobre esta estructura podrán apoyarse levantamientos posteriores, que densifican la red inicial y paulatinamente dan cobertura a todo el territorio.

2.1.1 Geoide

Es un modelo matemático que describe la forma irregular de la Tierra utilizando el nivel medio de los océanos y suponiendo que los continentes no existen, donde las ondulaciones locales son dadas por las perturbaciones de la fuerza de gravedad (Figura 2.1-1). Esto se logra mediante la suma de varios términos, llamados armónicos, que contribuyen en proporciones diversas a conformar la figura del geoide.

Existe gran variedad de geoides, pues están en función de las características particulares de la zona a representar. México utiliza los siguientes: EGM96, OSU91A y MEX97. Actualmente el INEGI⁴ está trabajando en la determinación de un modelo Geoidal regional propio de México.

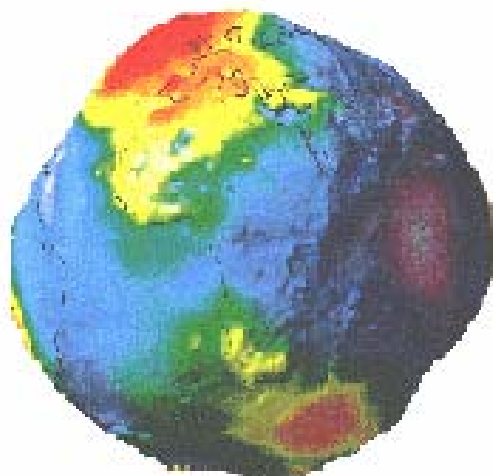


Figura 2.1-1 Geoide

⁴ Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <http://www.inegi.gob.mx>

2.1.2 Elipsoides de referencia

Para referenciar los vértices geodésicos es necesaria la utilización de un *sistema de referencia*. Esto se hace mediante un *elipsoide de revolución*, que constituye una aproximación de la forma real de la Tierra, ya que tratar de proyectar la cartografía sobre el geode sería sumamente difícil. La Figura 2.1-2 muestra una esfera achatada por los polos, resultado de la revolución de una elipse.

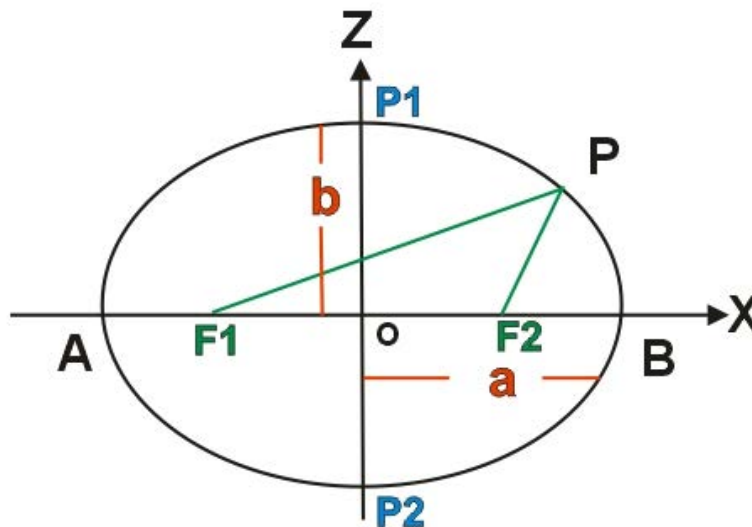


Figura 2.1-2 Elipsoide

El achatamiento del elipsoide se define mediante un coeficiente:

$$f = \frac{(a-b)}{a} \quad \text{Ecuación 2.1-1}$$

Donde a y b son las longitudes del eje mayor y menor respectivamente. El achatamiento real es aproximadamente de $1/300$. Alterando los valores de estos coeficientes se obtienen diferentes elipsoides.

El sistema de referencia en México utilizado por el INEGI está basado en: el *elipsoide GRS80*⁵ ($a=6378137$ m, $f=1/298.257$) y el elipsoide de *CLARKE 1866* ($a = 6378206.4$ m, $f = 1/294.978$).

La razón de tener diferentes elipsoides es que cada uno se ajusta especialmente a la forma del geode en diferentes partes de la Tierra y le introduce una serie de correcciones, llamadas "*datum*".

Establecer cual es el datum de un sistema de coordenadas es tarea de los servicios nacionales de geodesia. En México, los datum utilizados

⁵ GRS80: Geodetic Reference System 1980

tradicionalmente en cartografía, fueron el *NAD 27*⁶ y el *WGS84*⁷. Actualmente se usa el *ITRF92*⁸.

La Figura 2.1-3 muestra los tres tipos de superficies: la geoidal es el nivel medio de los océanos suponiendo que no existen los continentes, la elipsoidal es una simplificación de la geoidal y la topográfica, que hace descripciones detalladas.

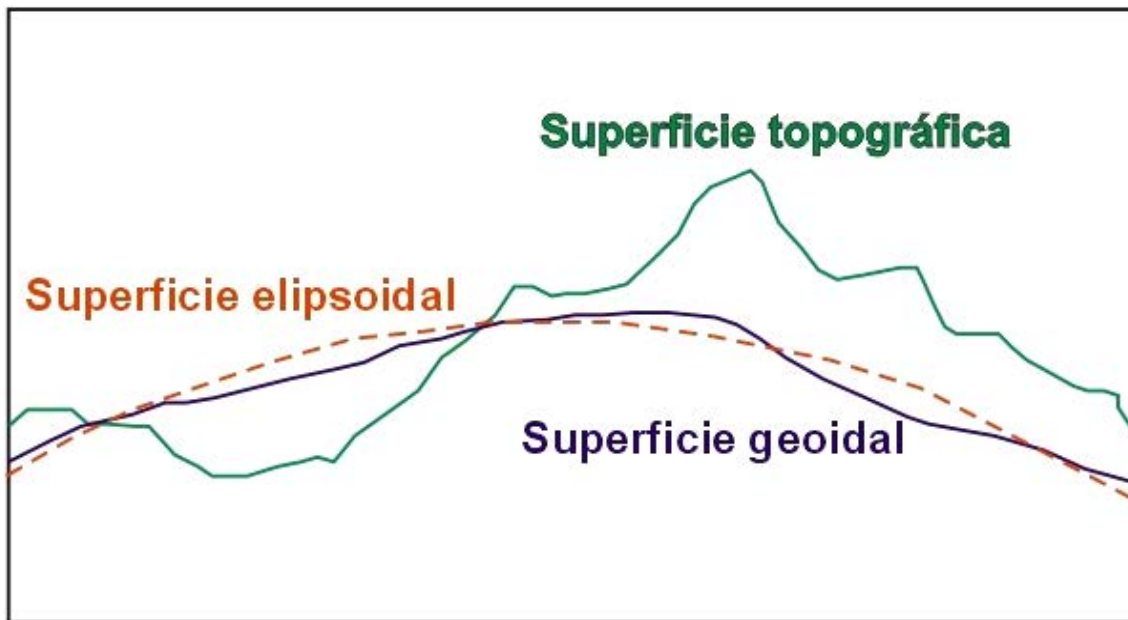


Figura 2.1-3 Representaciones de la superficie terrestre.

2.1.3 Sistemas de coordenadas

Es necesario disponer de sistemas de coordenadas consistentes para determinar entre los objetos: distancias, calcular áreas ocupadas, establecer direcciones y escalas.

a) Sistema de Coordenadas Latitud–Longitud (Coordenadas Geográficas)

Maneja como sistema de referencia una esfera. Útil para la localización de puntos en cualquier zona de la superficie terrestre. La latitud-longitud son ángulos medidos del centro de la Tierra a un punto “x”. La latitud es medida de Norte a Sur y la longitud de Este a Oeste (Figura 2.1-4). Las líneas de longitudes son llamadas meridianos, que comienzan en el polo norte y terminan en el polo sur. Las líneas de latitudes son llamadas paralelos y rodean al globo por medio de anillos paralelos. La latitud y la longitud se miden en grados, minutos y segundos⁹.

⁶ NAD27: North America Datum 1927

⁷ WGS84: World Geodetic System 1984

⁸ ITRF92: International Terrestrial Reference Frame 1992

⁹ Degrees, Minutes & Seconds, DMS System.

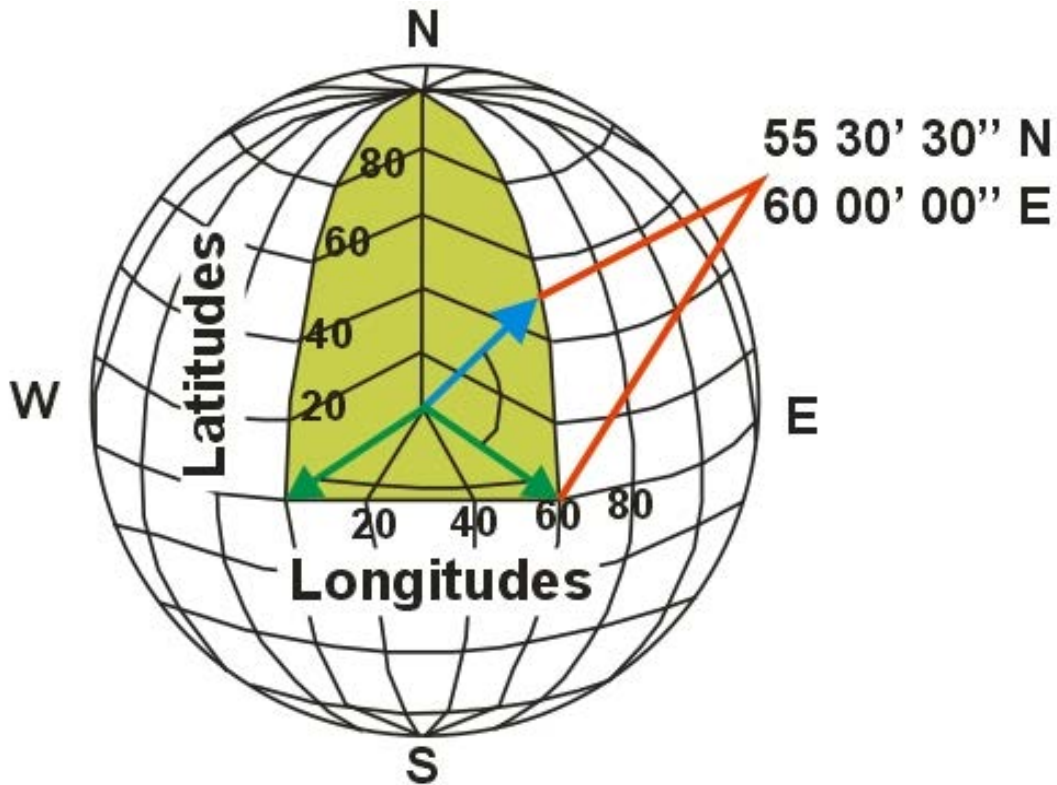


Figura 2.1-4 Representación de la Latitud y la Longitud.

b) Sistema de Coordenadas Planas UTM (Coordenadas en metros)

También llamado *sistema de coordenadas cartesianas* (Figura 2.1-5). Utilizan dos dimensiones: "x" que mide en dirección horizontal, con valores que oscilan los cientos de miles; e "y" que mide distancias en dirección vertical con valores que oscilan en millones.

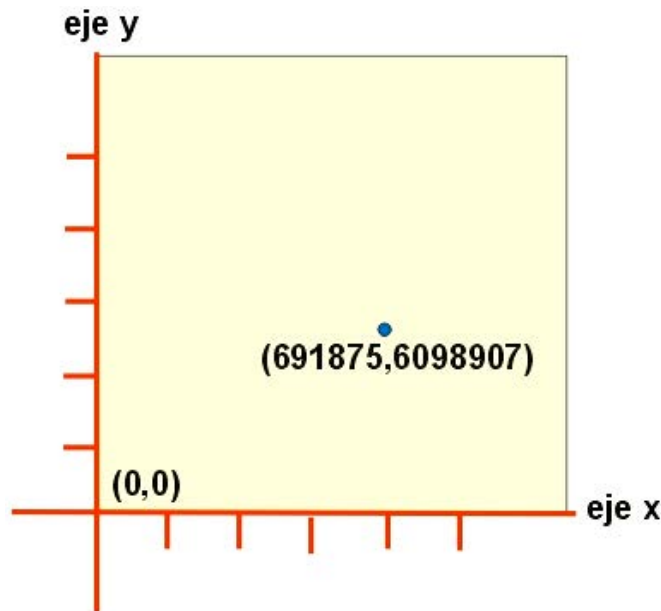


Figura 2.1-5 Representación del Sistema de Coordenadas Planas.

c) Red de Coordenadas

Sirve para la representación de los meridianos y paralelos. Entre las redes de mayor uso está la *rejilla cartográfica*, empleada en mapas de escala pequeña.

La Figura 2.1-6 muestra una representación de la Red de Coordenadas que maneja el INEGI.

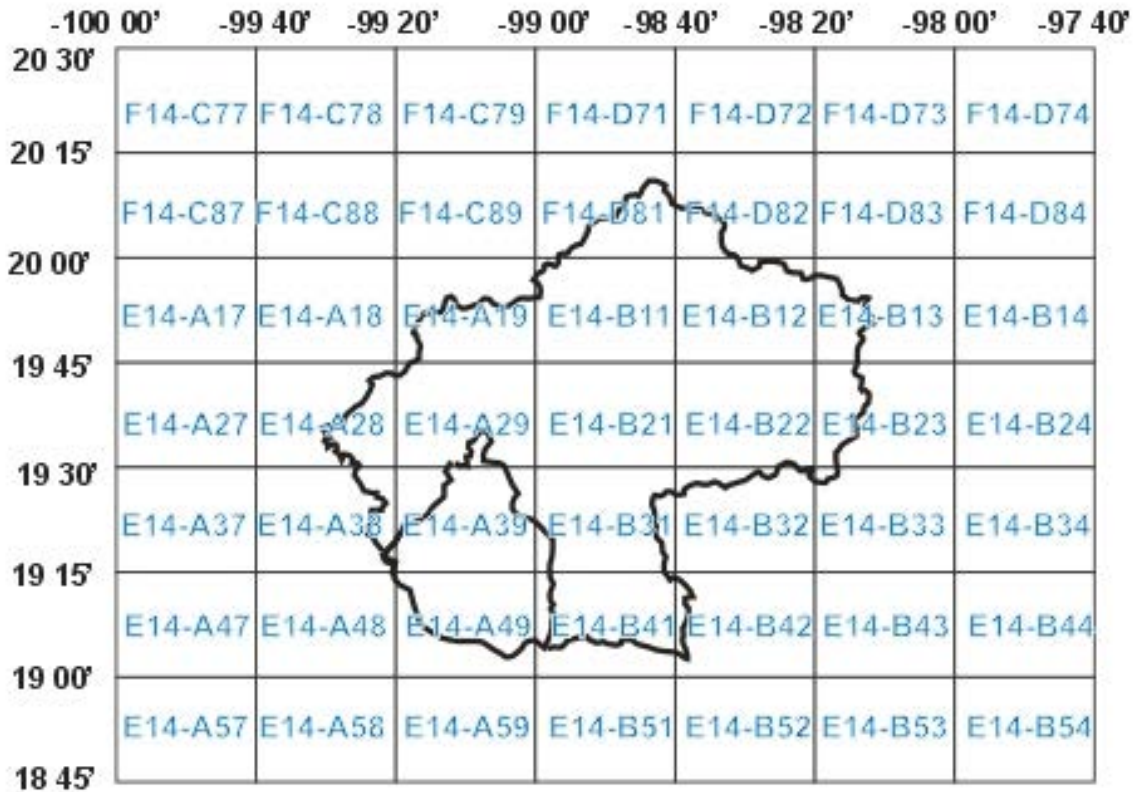


Figura 2.1-6 Representación de la Red de Coordenadas.

2.2 PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS¹⁰

Las *proyecciones cartográficas* son fórmulas matemáticas (Ec. 2.2-1) que permiten representar la curvatura de la tierra en un plano. Expresan la dependencia analítica entre las coordenadas geográficas de puntos sobre la superficie del elipsoide terrestre y su representación plana. La posibilidad de los Sistemas de Información Geográfica de combinar información de mapas con diferentes proyecciones incrementa la relevancia de la *cartografía*.

Básicamente, una *proyección* consiste en establecer una ecuación que asigne a cada par de coordenadas geográficas un par de coordenadas planas.

$$x = f(\text{latitud}, \text{longitud}); \quad y = f(\text{latitud}, \text{longitud}) \quad \text{Ecuación 2.2-1}$$

¹⁰ Demers (1999) pp. 57-61; Bernhardsen (1999) pp.101-108.

También se pueden representar como:

$$x = f_1(\varphi, \lambda); \quad y = f_2(\varphi, \lambda) \qquad \text{Ecuación 2.2-2}$$

Donde:

φ, λ = puntos del elipsoide o coordenadas geográficas.

x, y = puntos en el plano o coordenadas rectangulares.

El número de dependencias funcionales que puede existir no está limitado, por consiguiente tampoco el número de proyecciones.

2.2.1 Distorsiones de las proyecciones.

Las distorsiones son resultado de trasladar la superficie de la tierra (o de una porción de ella) a una superficie plana. Para comprender la naturaleza de las distorsiones hay que definir las propiedades de las proyecciones: *forma, área, equidistancia, dirección y escala*.

- *Conformidad (forma)*. Cuando la escala en cualquier punto del mapa es la misma no importando su dirección, la proyección es conforme. Los meridianos (líneas de longitud) y los paralelos (líneas de latitud) se intersectan en ángulos rectos. En los mapas conformes, la forma se preserva localmente pues son apropiados para mostrar áreas pequeñas y los ángulos formados por el cambio de dirección en cada punto.
- *Equivalencia (área)*, es cuando se tiene la misma superficie en el plano de proyección y en la esfera. Una proyección de “igual área” crea un mapa con áreas proporcionales a las reales de la superficie, sin importar en donde se esté posicionado. Los mapas equivalentes son apropiados para mostrar densidades y distribuciones.
- *Equidistancia*, cuando el mapa describe las distancias del centro de la proyección a cualquier otro lugar.
- *Dirección*, cuando los azimut (ángulos desde el punto de una línea a otro punto) son descritos correctamente en todas las direcciones.
- *Escala*, en cualquier proyección existe una relación entre la distancia descrita en el mapa y la misma distancia en la tierra. Una escala que abarque gran área no tiene suficiente exactitud.

Existen proyecciones que minimizan la distorsión en algunas de estas propiedades, a expensas de maximizar los errores en otras (por ejemplo, las que mantienen la equivalencia en las áreas, deforman considerablemente los ángulos originales, por lo tanto ninguna proyección puede ser equivalente y conforme a la vez). Otras proyecciones, en cambio, distorsionan todas las propiedades en forma moderada. El objetivo de la cartografía es utilizar la proyección idónea a cada caso.

La Figura 2.2-1 muestra las distorsiones producidas por dos proyecciones. Es apreciable la diferencia de conformidad, equivalencia y escala.



Figura 2.2-1 Distorsión producida por 2 tipos de proyecciones.

Para cuantificar las distorsiones existen diversos coeficientes. Algunos son:

- *Anamorfosis lineal*: sea L una longitud medida en el terreno y L' su homóloga en la proyección. El coeficiente de deformación lineal o anamorfosis lineal será:

$$m = \frac{L}{L'} \quad \text{Ecuación 2.2-3}$$

- *Anamorfosis superficial*: de igual modo, S una superficie medida en el terreno y S' su homóloga en la proyección. Se designa por *anamorfosis superficial* la expresión:

$$m = \frac{S}{S'} \quad \text{Ecuación 2.2-4}$$

- *Anamorfosis angular*: un ángulo del terreno (a) tendrá su homólogo en la proyección (a'), de forma que el *módulo de deformación angular*, o *anamorfosis angular* será la diferencia de ambos ángulos ($a-a'$).

2.2.2 Tipos de proyecciones.

Una forma de clasificar las proyecciones es con referencia a la figura geométrica que genera el plano bidimensional. Se habla entonces de proyecciones *cilíndricas*, *cónicas* y *azimutales* o *planas*. En todos los casos, las distorsiones son nulas en la línea donde la figura corta al elipsoide y aumentan proporcionalmente con la distancia. Con el objeto de minimizar el error, se utilizan planos secantes en lugar de planos tangentes (Figura 2.2-2). Simplifica el análisis considerar una esfera en lugar de un elipsoide.

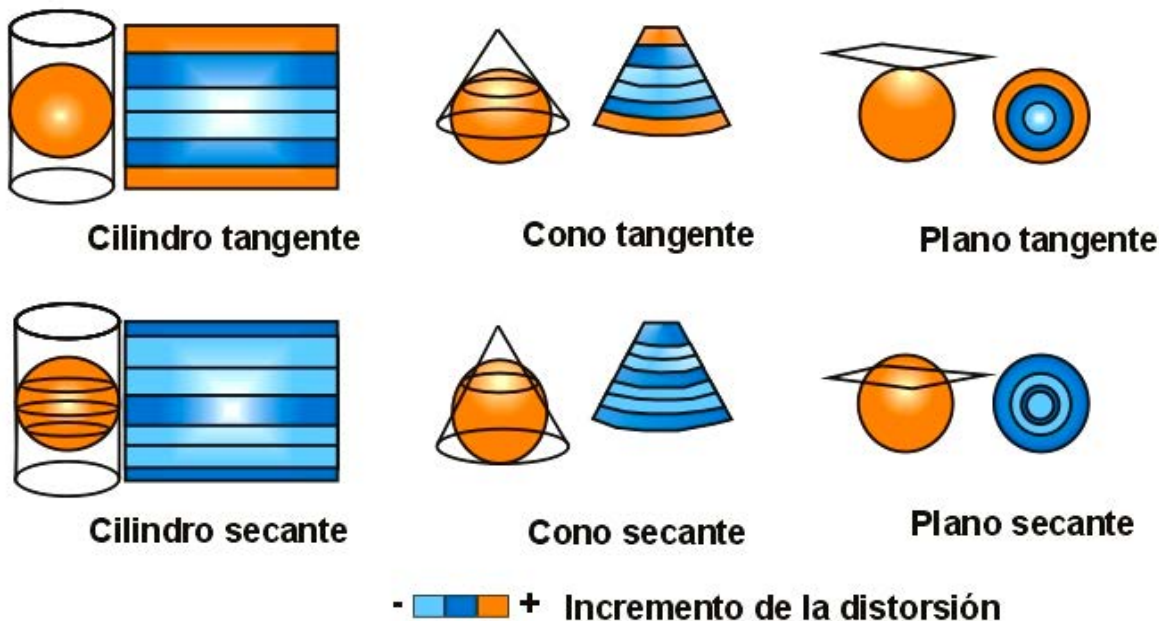


Figura 2.2-2 Incremento en la distorsión de las proyecciones.

La Tabla 2.2-1 muestra una comparación con base en las propiedades de estas proyecciones.

	Igual área	Equidistantes	Azimutales	Conformes
Igual área	-	No	Si	No
Equidistantes (Escala)	No	-	Si	No
Azimutales (Dirección)	Si	Si	-	Si
Conformes (igual forma)	No	No	Si	-

Tabla 2.2-1 Comparación entre las propiedades de los diferentes tipos de proyecciones.

Los factores a considerar al seleccionar un tipo de proyección son:

- Tipo de mapa (temático o modelo cartográfico).
- Propiedades especiales que deben preservarse de acuerdo a la aplicación.

- Tipos de datos a ser mapeados.
- Exactitud requerida del mapa.
- Escala manejada del proyecto.

Si se mapea un área relativamente pequeña (regiones, estados o municipios), virtualmente cualquier proyección servirá ya que la cantidad de distorsión particular es despreciable. Si en cambio, se mapean grandes áreas (países enteros, continentes, o el mundo), la decisión de la proyección se hace crítica puesto que existe distorsión mínima al centro del mapa que se incrementa gradualmente hacia los bordes.

a) Proyecciones Cilíndricas.

Es la superficie lateral de un cilindro que corta (o es tangente) al elipsoide. Existen varios tipos:

a.1) Proyecciones cilíndricas regulares.

El cilindro es tangente o secante en el Ecuador (Figura 2.2-3). Los paralelos y meridianos son líneas perpendiculares entre sí. La escala en el Ecuador es real. Son de sencilla construcción y pueden adaptarse para ser equidistantes (se conservan las distancias), equiáreas (se conservan las superficies) o conformes (se mantienen los ángulos tras la transformación).

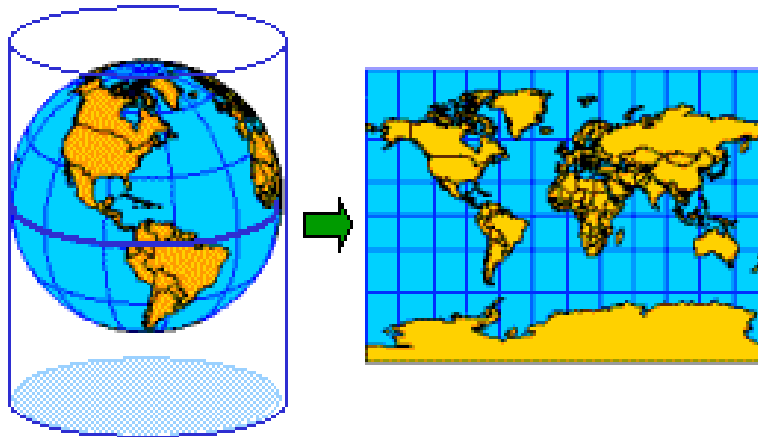


Figura 2.2-3 Proyección Cilíndrica Regular.

Las proyecciones cilíndricas regulares más importantes son:

i) Proyección de Mercator¹¹

Es una proyección conforme, ya que el trazado de líneas de igual rumbo en el plano son líneas rectas. Introduce deformaciones crecientes con la latitud, por la

¹¹ Mercator, Gerard: (1512-1594). Matemático y geógrafo flamenco, cuyo verdadero nombre era Gerhard Kremer. De sus trabajos sobresale un globo terráqueo y otro celeste por encargo de Carlos V y el primer mapamundi para uso de navegantes.

cual se considera inutilizable a partir de los 70° de latitud Norte o Sur. Debido a la forma del espaciamiento de los paralelos, cada parte del mapa se ve natural (Figura 2.2-4).

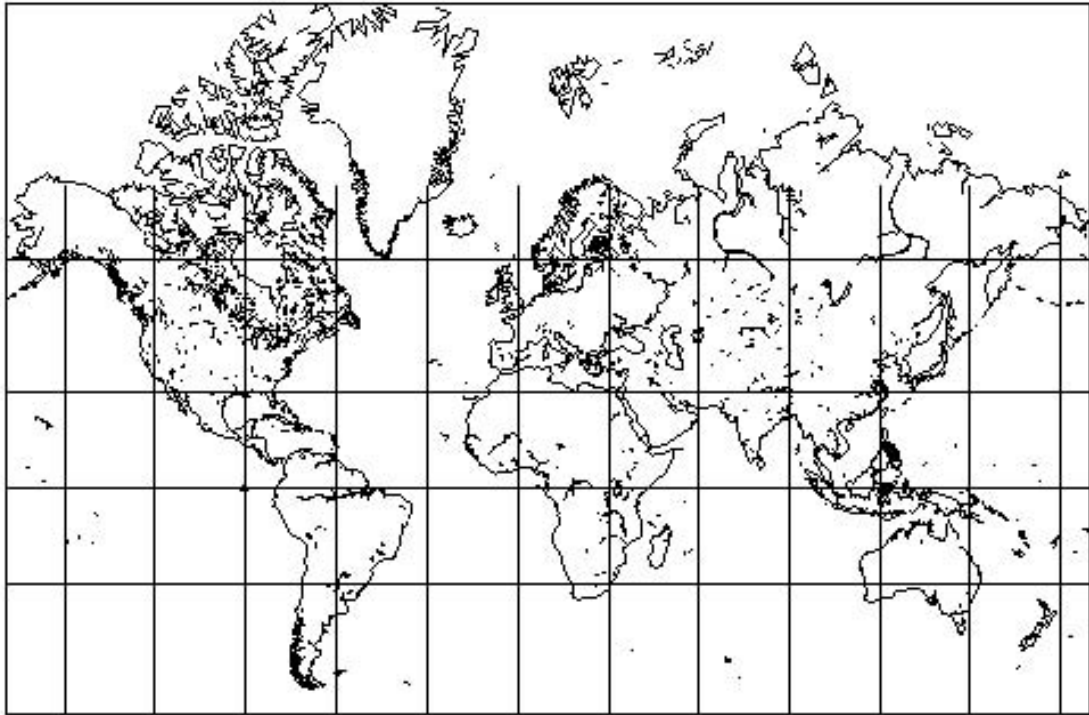


Figura 2.2-4 Proyección de Mercator.

ii) Proyección de Gall

Intenta hacer una mejora a la proyección de Mercator disminuyendo la distorsión en los polos. Utiliza el método estereográfico (Fig. 2.2-5). El mapa en su conjunto es deformado verticalmente. En los paralelos que están a 45 grados norte y sur la deformación es balanceada, permitiendo a los países templados mostrarse bien (Figura 2.2-6).

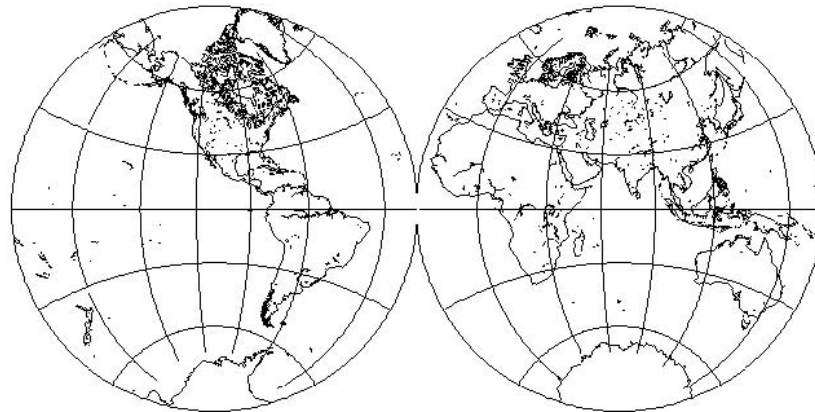


Figura 2.2-5 Proyección de Gall, método estereográfico.

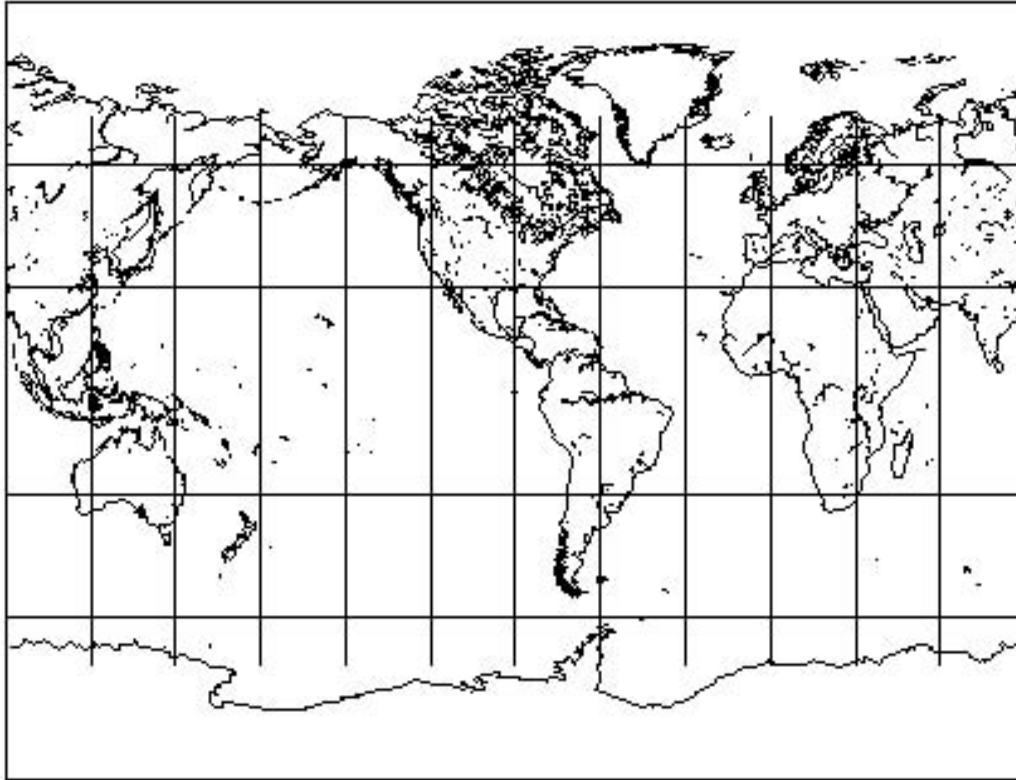


Figura 2.2-6 Proyección de Gall en mapa deformado.

iii) Proyección cilíndrica equiárea.

No es atractiva en apariencia pues el mapa es deformado verticalmente superficies considerables. Tiene la propiedad de conservar las áreas del terreno (Figura 2.2-7). Los meridianos están regularmente espaciados, mientras que los paralelos se van juntando a medida que aumenta la latitud.

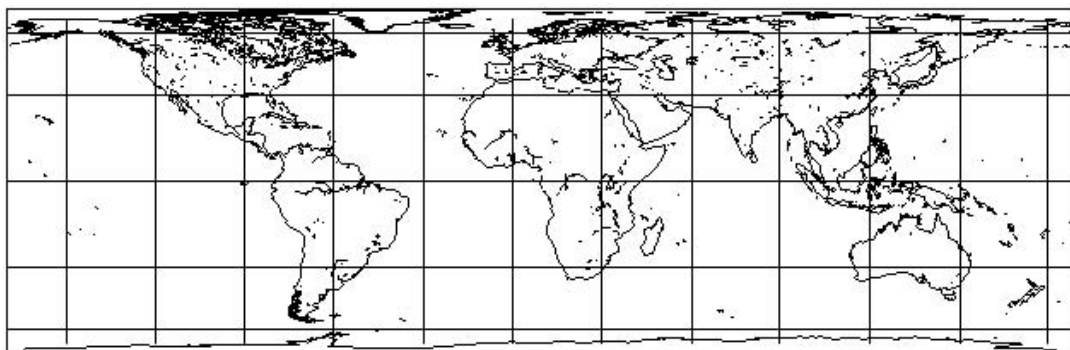


Figura 2.2-7 Proyección cilíndrica equiárea.

a.2) Proyecciones cilíndricas transversas

El cilindro tangente a la Tierra ha sido girado 90°, de manera que en lugar de colocarse tangente al Ecuador, lo hace respecto al meridiano central. El meridiano central se ubica en la zona que se va a trabajar, lo que permite minimizar las

distorsiones en esa región. Como los meridianos se ubican en sentido norte-sur, este tipo de proyecciones se utilizan donde las dimensiones norte-sur son mayores a las este-oeste (Figura 2.2-8).

Las más utilizadas son las siguientes:

i) *Proyección transversa de Mercator (UTM)*

También llamada Gauss conforme. Es popular en mapas con escalas grandes debido a su mínimo error. Constituye la base para el sistema UTM (Universal Transverse Mercator).

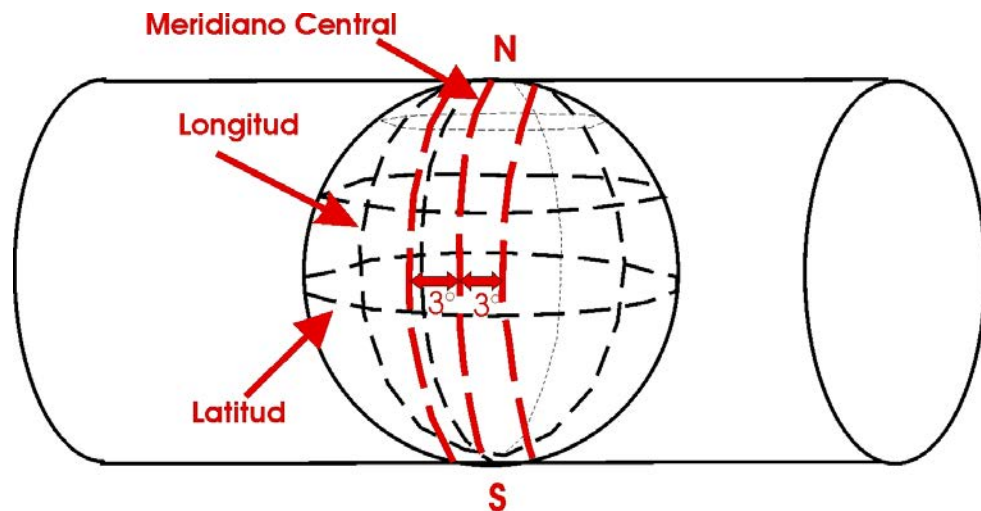


Figura 2.2-8 Cilindro generador de la proyección UTM

El sistema de proyección UTM se basa en las siguientes premisas¹²:

1. Elección de un elipsoide de referencia.
2. Elección de un punto astronómico fundamental o "datum".
3. Elección de un sistema de representación plano conforme que conserva los ángulos (Gauss). Subdivide el Globo en 60 husos iguales con origen en el Ecuador de 6° de longitud, 3° hacia el este y 3° hacia el oeste, paralelos a los meridianos. Los husos se dividen en "zonas" (identificadas por letras mayúsculas desde la C hasta la X, excluidas la I, LL, Ñ y O) de 8° de amplitud en latitud, desde los 80° 30' de latitud Norte hasta los 80° 30' de latitud Sur (amplitud total en longitudes para la que se consideran tolerables las deformaciones en la proyección UTM). Con este sistema México queda incluido dentro de los husos 11, 12, 13, 14, 15 y 16, zonas R, Q y P (Figura 2-2.9).

¹² López (1998) pp. 162-168.; Mac Eachren (1994) pp. 225-235.

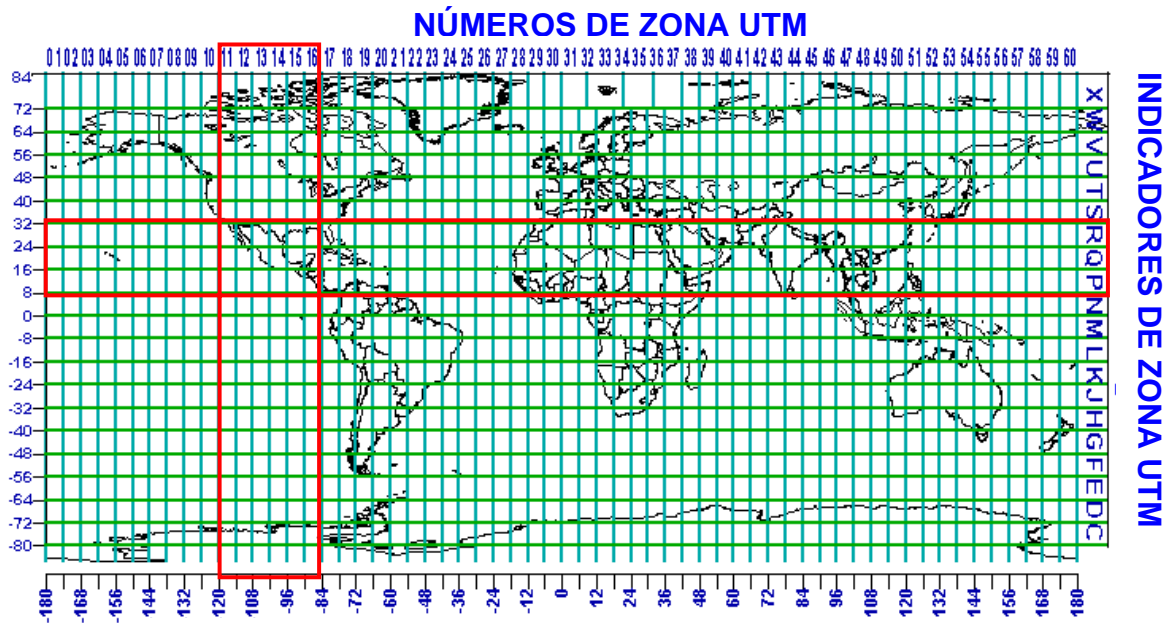


Figura 2.2-9 Cuadrícula UTM, usos y zonas.

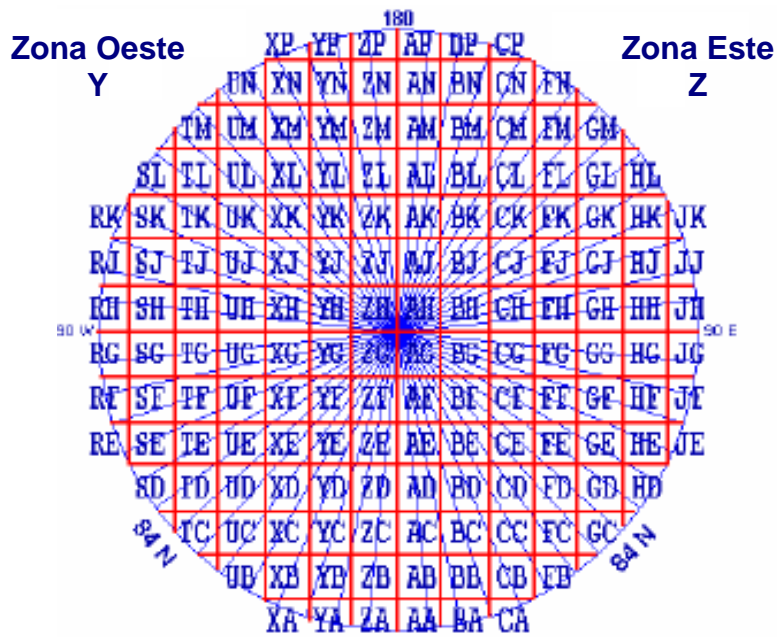
El sistema UTM tiene un inconveniente: las deformaciones introducidas por la proyección dificultan su uso a escalas pequeñas, ya que los errores que acumularía en las mediciones serían mayores que la precisión estándar requerida a esa escala.¹³

Las ventajas de la utilización del sistema UTM son:

- Permite la conexión de tramos comunes pertenecientes a proyectos diferentes por utilizar coordenadas universales.
- Sirve de base para cualquier trabajo topográfico por la densidad de los vértices geodésicos que poseen coordenadas geográficas y sus correspondientes UTM.
- Existe una gran cantidad de cartografía en este sistema a nivel nacional.

La proyección UTM no es aplicable a latitudes altas por la distorsión que produce, limitándose su uso a 80°30' de latitud Norte y Sur. Para la proyección de las regiones polares existe el *sistema UPS (Universal Polar Stereographic)*, que utiliza proyecciones azimutales polares (Figura 2.2-10).

¹³ Monmonier (1982) cap. 2; <http://mercator.org>



Área NorPolar Rejilla UPS

Figura 2.2-10 Sistema UPS.

a.3) Proyecciones cilíndricas oblicuas.

El cilindro es rotado de acuerdo a una línea circular localizada en algún lugar entre el ecuador y los meridianos. Cualquier proyección puede ser oblicua (Figura 2.2-11). Por ejemplo, la Proyección oblicua de Mercator, introducida por Peirce en 1894, muy utilizada en Asia y América Central (Figura 2.2-12).

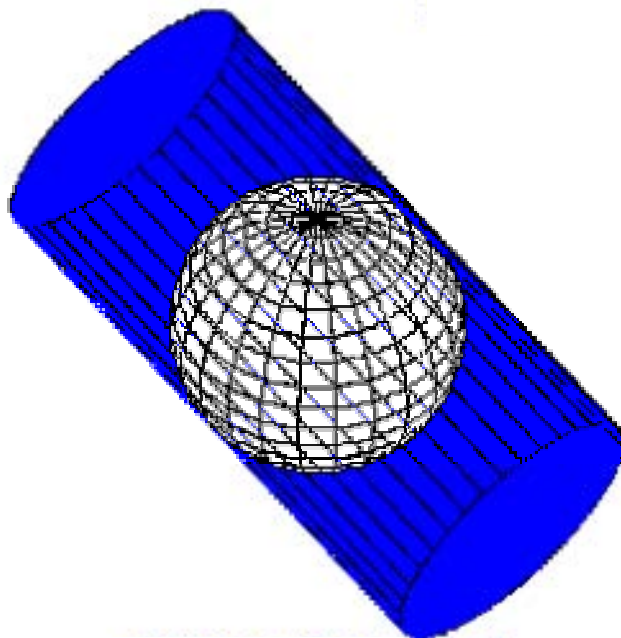


Figura 2.2-11 Esquema general de las proyecciones cilíndricas

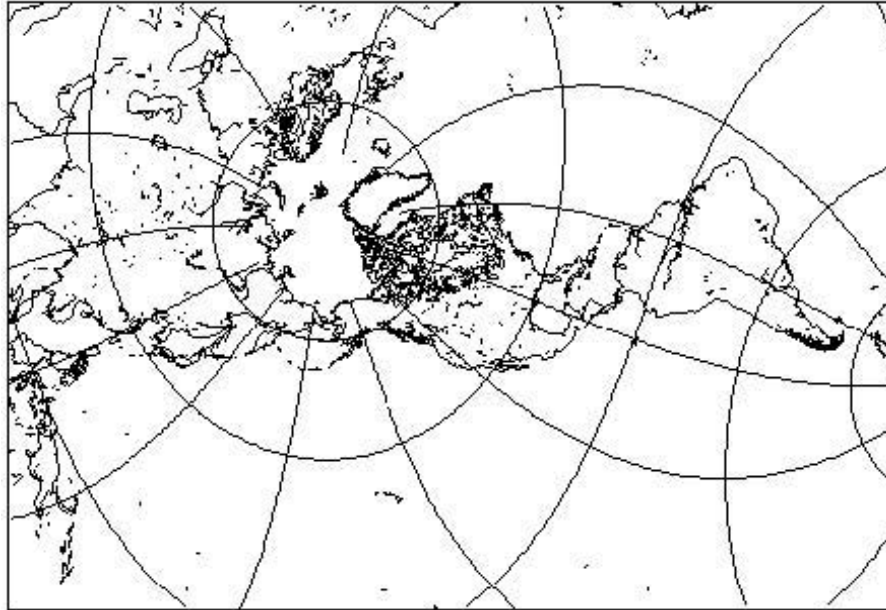


Figura 2.2-12 Proyección cilíndrica oblicua de Mercator.

a.4) *Proyecciones pseudocilíndricas*

Cada paralelo cuenta con su propia escala constante y tenderá a favorecer a su meridiano central. Generalmente representan áreas iguales. Algunas son:

i) *Proyección sinusoidal.*

También llamada proyección *Sanson-Flamsteed*. Es una de las proyecciones más sencillas de este tipo (junto con la de Mercator de áreas iguales). Como se observa (Figura 2.2-13), los continentes alejados del meridiano principal han sido cortados, dándoles un aspecto distorsionado. Debido a que la escala en el Ecuador es uniforme y los meridianos se cruzan en ángulos rectos, es posible reducir considerablemente la distorsión utilizando una versión interrumpida de esta proyección (Figura 2.2-14).

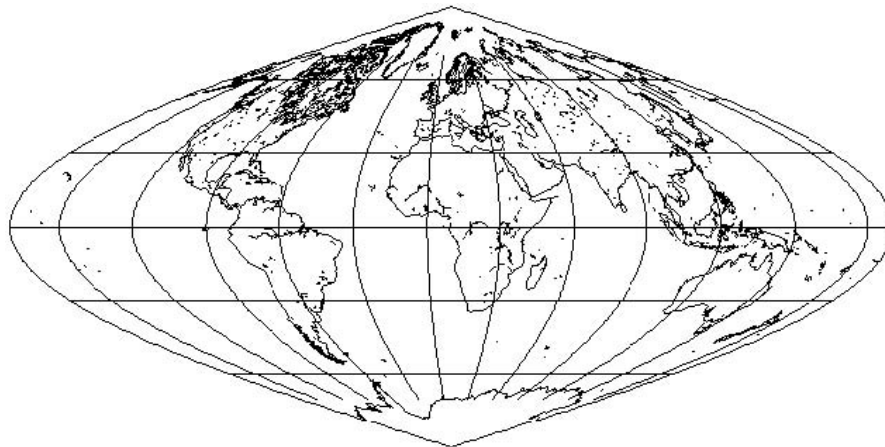


Figura 2.2-13 Proyección pseudocilíndrica sinusoidal.

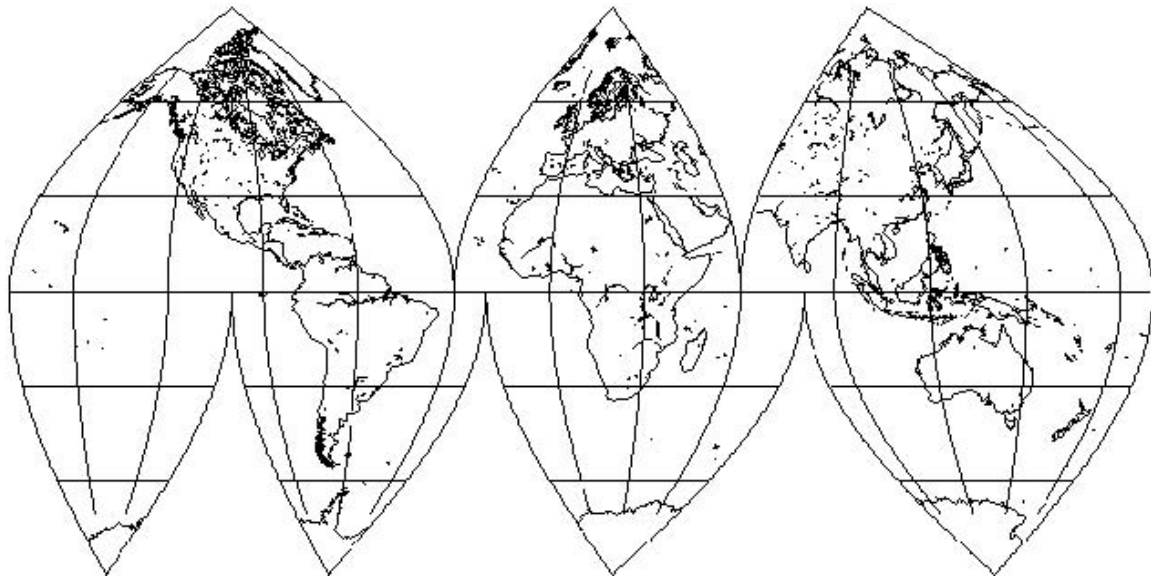


Figura 2.2-14 Versión interrumpida de la proyección.

ii) Proyección de Mollweide¹⁴

Es un intento de moderar el comportamiento de la proyección sinusoidal pues representa al mundo como una elipse (Figura 2.2-15) y por ser pseudocilíndrica también puede interrumpirse (Figura 2.2-16).

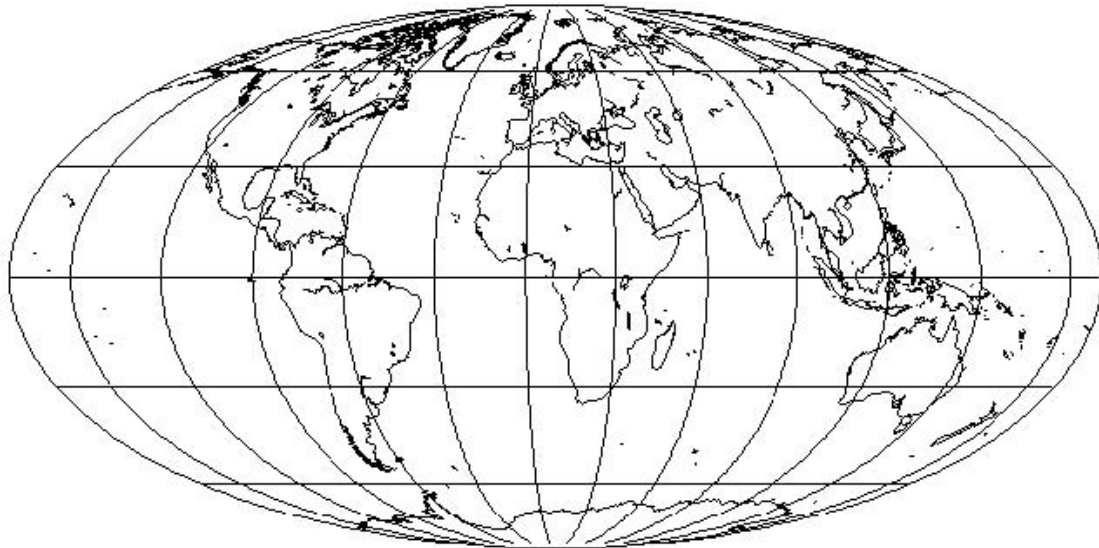


Figura 2.2-15 Proyección pseudocilíndrica de Mollweide.

¹⁴ <http://www.uco.es/bb1rofra/documentos/proyecciones/proyecciones.html>
Maguire, Goodchild, Rhind y Maling (1991).

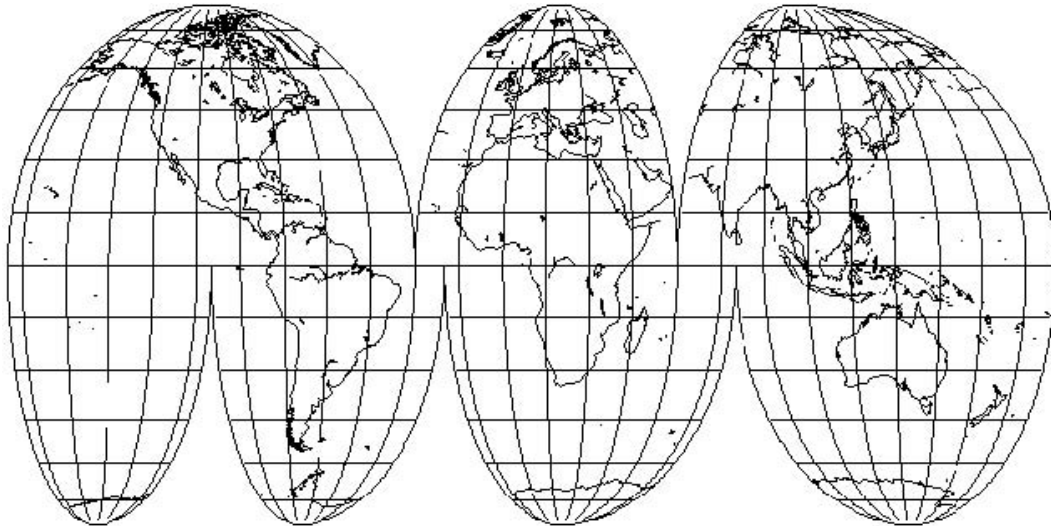


Figura 2.2-16 Proyección interrumpida de Mollweide.

b) Proyecciones Azimutales.

Son radialmente simétricas en todas las direcciones a partir del punto central del mapa (punto tangente o secante al globo). Figura 2.2-17.

El punto central (o de contacto) es especificado por una longitud y una latitud centrales¹⁵; puede ser el polo norte o el polo sur, estar situado sobre el ecuador o cualquier otro lugar.

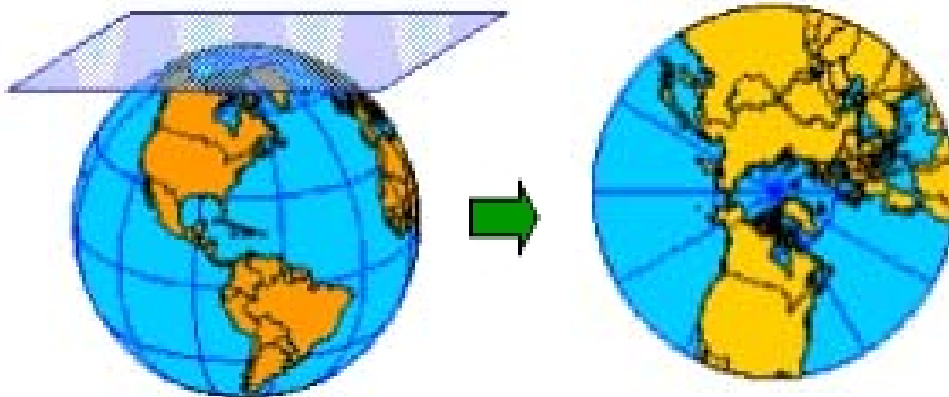


Figura 2.2-17 Proyección Azimutal.

Algunas proyecciones azimutales (gnómica, estereográfica y ortográfica) son en realidad *proyecciones en perspectiva* que pueden construirse al seguir líneas rectas desde un origen común en un plano horizontal tangente. Otras proyecciones no entran en esta categoría (equidistante y Lambert de áreas iguales).

¹⁵ John P. Snyder and Philip M. Voxland. An Album of Map Projections U.S. Geological Survey Professional Paper 1453. U.S. Government Printing Office: 1989.

b.1) *Proyección gnomónica*

Se aleja de su origen ampliamente. Tiene una apariencia considerablemente distorsionada (Figura 2.2-18 b). Es construida por un haz luminoso imaginario situado en el interior del Globo (a). Los círculos de gran extensión son representados mediante líneas rectas, esto es de gran utilidad al dibujar rutas aéreas. También se emplea para proyectar el mundo sobre superficies geométricas de poliedros (c).

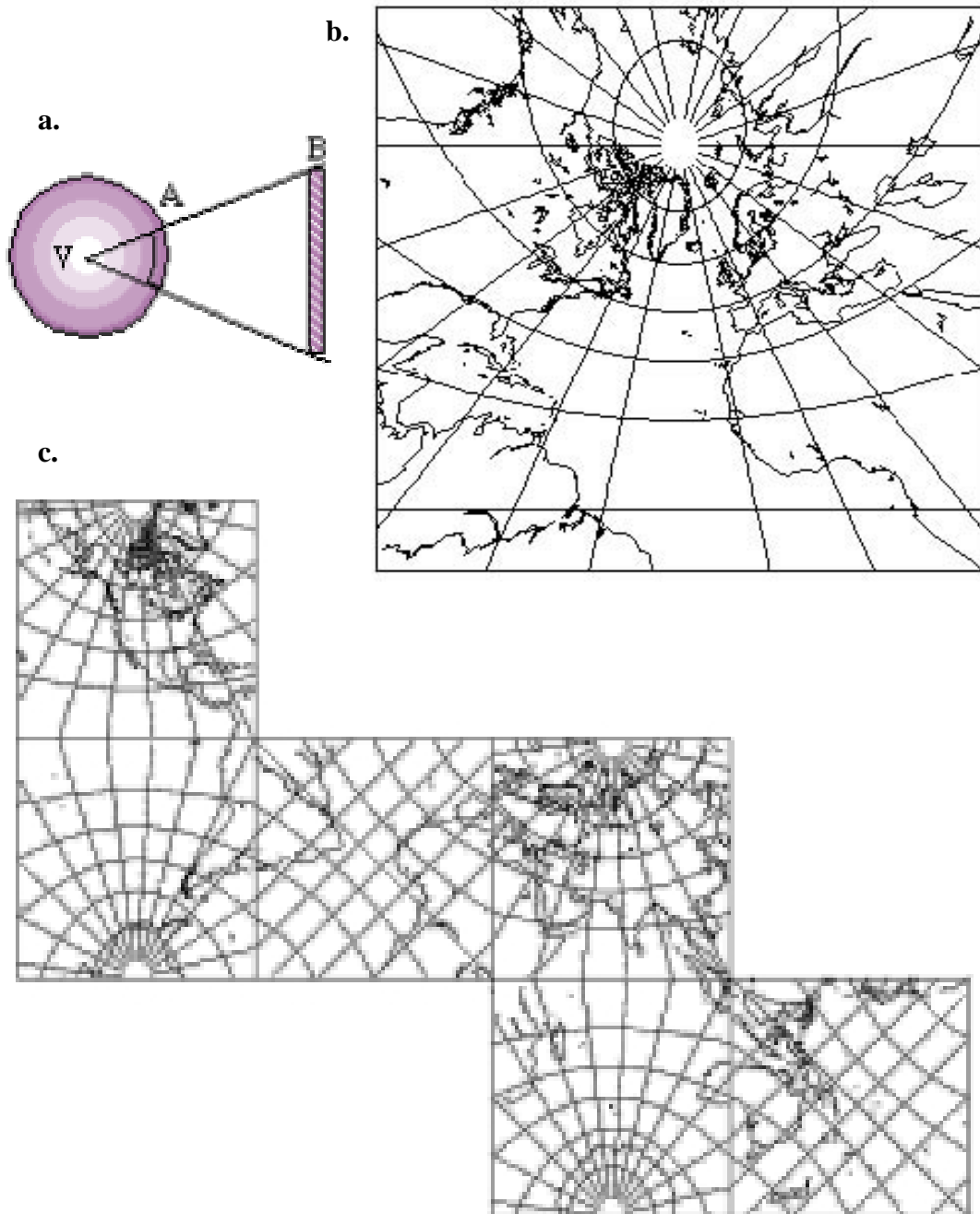


Figura 2.2-18 a) Proyección azimutal gnomónica distorsionada, b) Proyección sobre poliedros y c) Haz luminoso imaginario.

b.2) Proyección estereográfica

Es conforme. Tiene la propiedad de que todos los círculos en el globo (grandes o pequeños) aparecen como círculos en la proyección (Figura 2.2-19 a). Es construida al proyectar el globo sobre un plano tangente desde un haz luminoso situado en el lugar diametralmente opuesto del punto considerado (b).

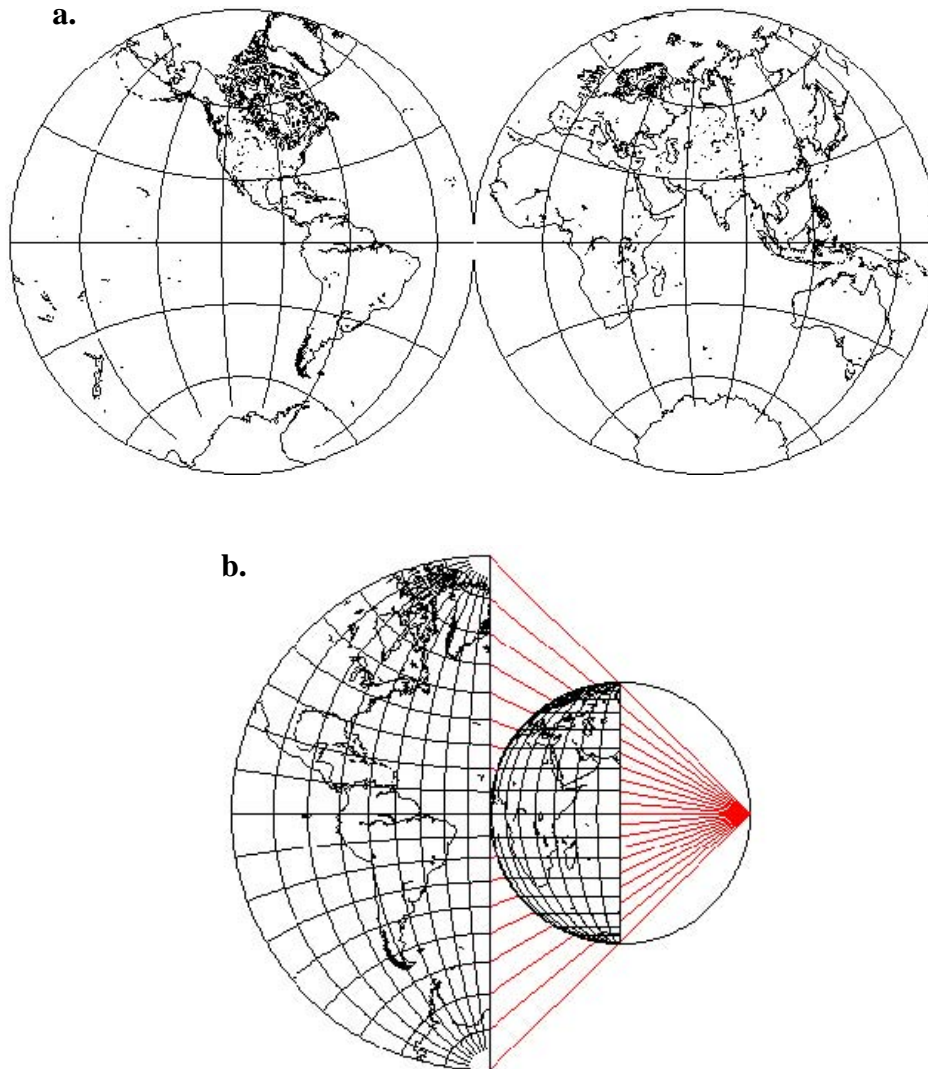


Figura 2.2-19 a) Esquema de la proyección estereográfica, b) Construcción por un haz luminoso.

b.3) Proyección azimutal de Lambert de áreas iguales.

Es adecuada para mapear regiones que no tengan gran diferencia en cuanto a su extensión norte-sur y este-oeste (Figura 2.2-20 a). Es apropiada para mostrar densidades y distribuciones, por lo que es muy útil en estadística. En la Figura b, el centro de la proyección fue escogido para que un hemisferio contenga una buena representación de Norteamérica y el continente euroasiático.

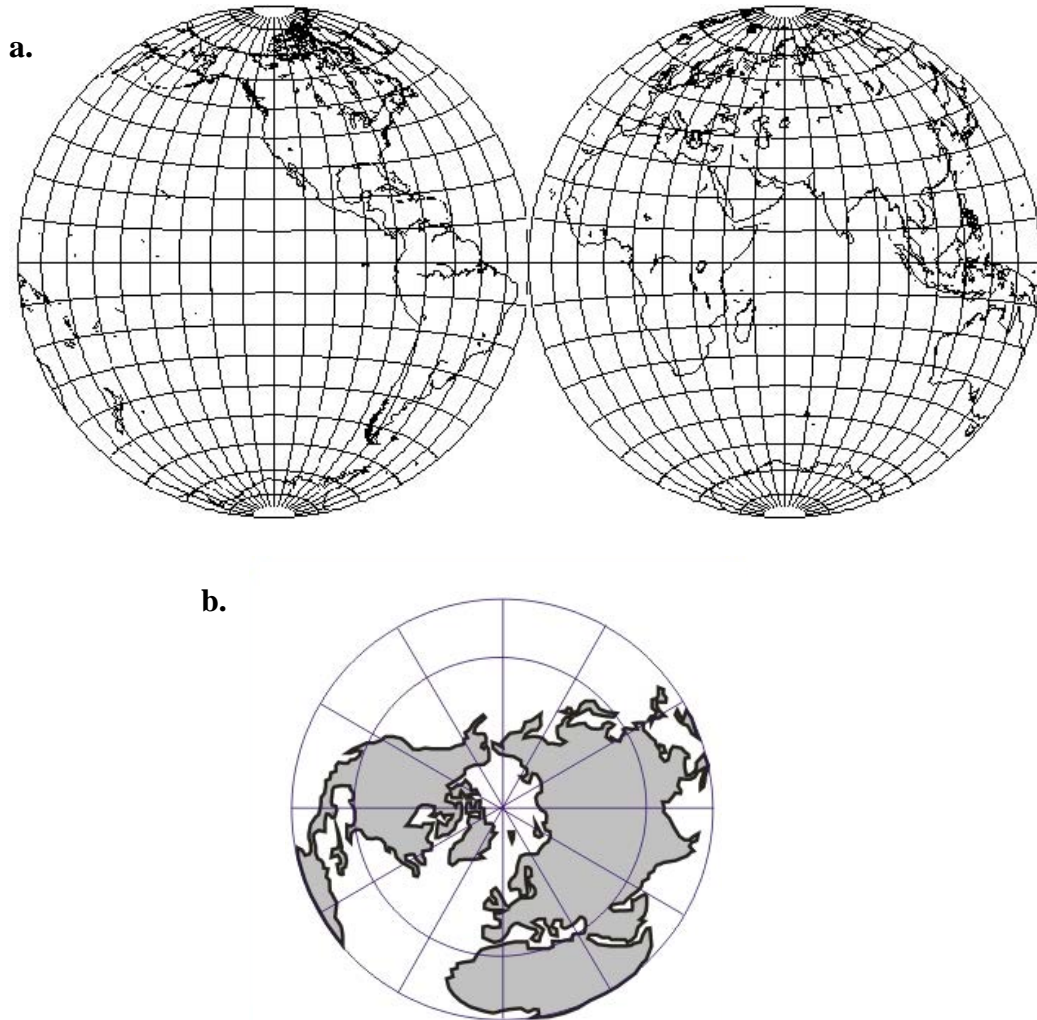


Figura 2.2-20 Proyección azimutal de Lambert de áreas iguales.

b.4) *Proyección ortográfica.*

Es construida cuando la fuente luminosa está situada en el infinito y los haces de luz son paralelos entre sí (Figura 2.2-21; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). A pesar de que la distorsión en la forma es mayor y no muestra áreas iguales, es fácil hacer ajustes sobre sus distorsiones (Figura 2.2-22).

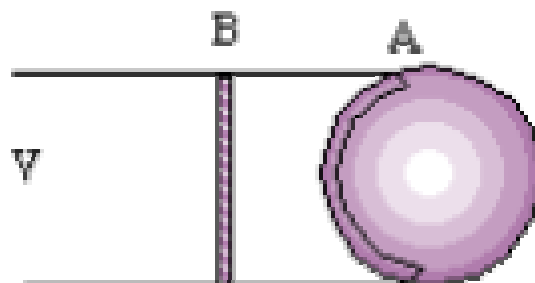


Figura 2.2-21
Esquema de la
proyección
ortográfica.

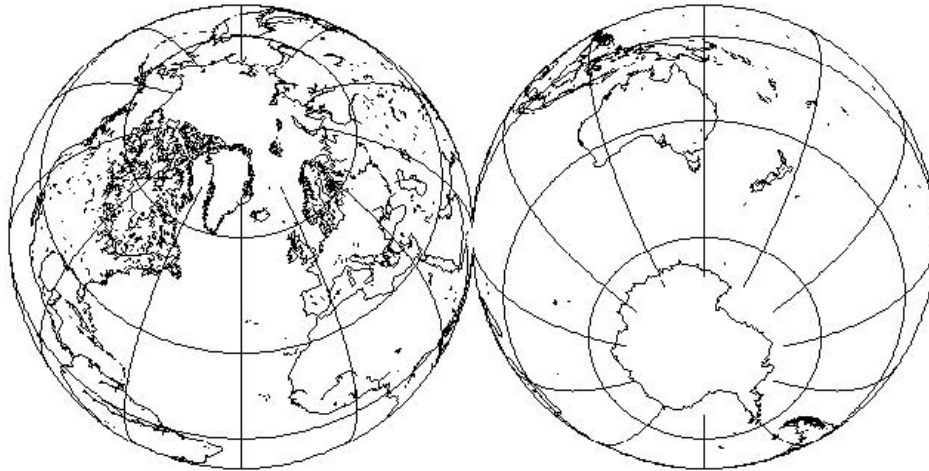


Figura 2.2-22 Proyección ortográfica.

c) **Proyecciones Cónicas.**¹⁶

La superficie auxiliar es un cono tangente o secante. Las líneas paralelas de latitud son proyectadas en el cono como anillos. La forma resultante de la proyección cónica es tal que los meridianos se presentan como líneas rectas que convergen hacia uno de los polos. La proyección más simple consiste en una tangente al globo a lo largo de una línea de latitud llamada *paralelo estándar de la proyección*. La distorsión se incrementa al norte y sur del paralelo de estándar, por este motivo, para producir mayor precisión en la cobertura es cortada la parte superior del cono (Figura 2.2-23).

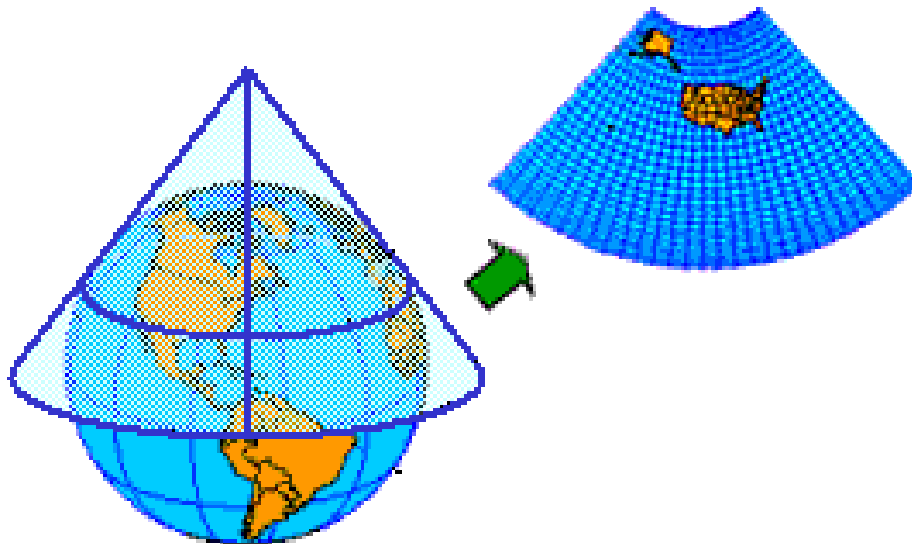


Figura 2.2-23 Proyección Cónica.

¹⁶ <http://nivel.euitto.upm.es/mab/tematica/htmls/proyecciones.html>

Las proyecciones cónicas más usadas son:

c.1) *Proyección cónica equiárea de Albers.*

Es muy popular para mapas de la zona continental de Estados Unidos. Se utiliza especialmente para países que son más anchos de este a oeste que de norte a sur. Los paralelos son arcos de círculos concéntricos no espaciados uniformemente. Los meridianos son radios del mismo círculo espaciados uniformemente y trazados a 90 grados. Normalmente se organiza con dos paralelos estándar (Figura 2.2-24).

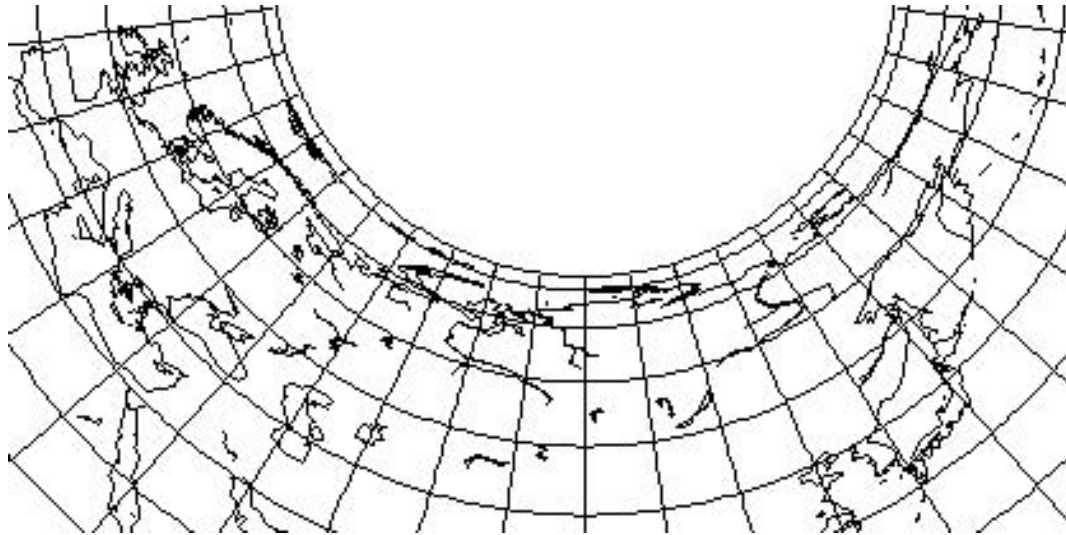


Figura 2.2-24 Proyección cónica equiárea de Albers.

c.2) *Proyección Cónica conforme de Lambert.*

También recibe el nombre de proyección Cónica ortomórfica. Se obtiene a partir de la proyección estereográfica. Ofrece la flexibilidad de que su paralelo estándar puede ser variado para ajustar diferentes formas (Figura 2.2-25). Al igual que la proyección cónica de áreas iguales de Albers, esta proyección es adecuada para mapas que representen zonas o países en los que predomine la dimensión horizontal Este-Oeste sobre la dimensión vertical Norte-Sur (como el caso de Estados Unidos). El área y la forma se distorsionan al alejarse de los paralelos estándar. La direcciones son ciertas en áreas limitadas. El 90% de los mapas básicos en el mundo utilizan la proyección cónica conforme de Lambert o la transversal de Mercator.

c.3) *Proyección policónica.*

Denominada también policónica americana. Fue durante mucho tiempo la proyección estándar para mapas a gran escala de los Estados Unidos. Es una unión entre una proyección de áreas iguales y una proyección conforme. Tiene baja distorsión a lo largo del meridiano central, que se proyecta como una línea recta, mientras que el resto de meridianos son curvas (Figura 2.2-26). Los paralelos no son concéntricos, sino arcos de círculos, únicamente el Ecuador es una línea recta.

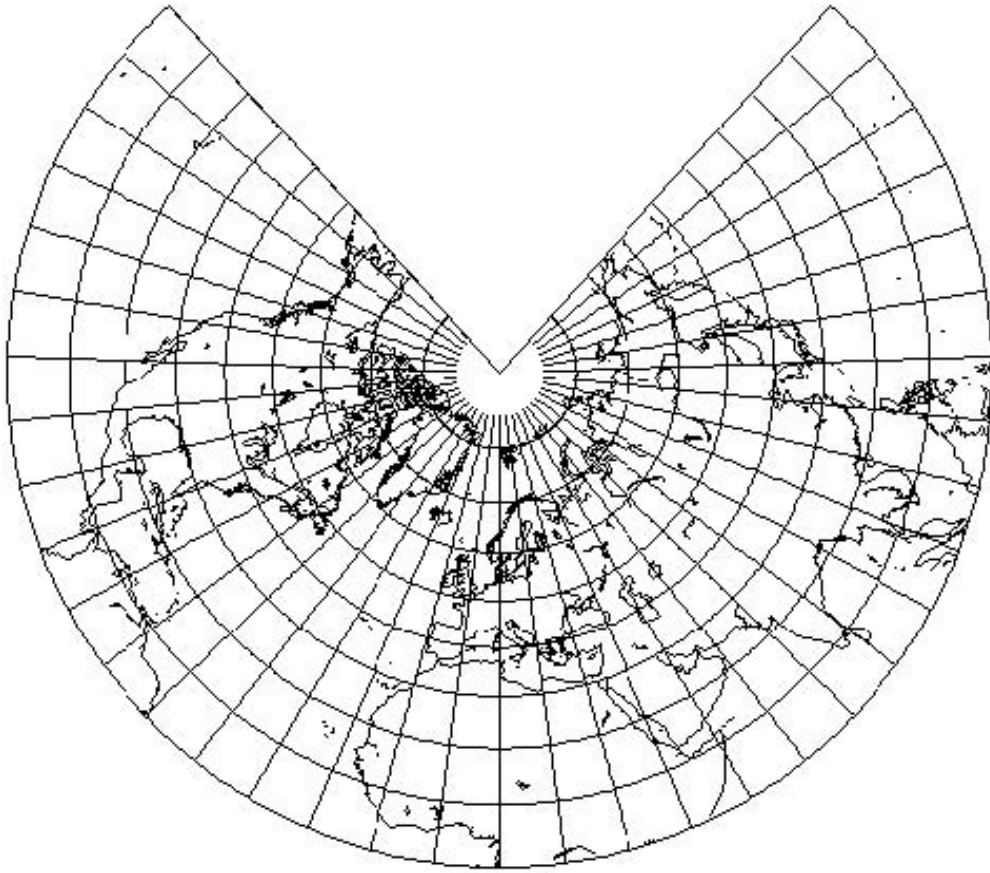


Figura 2.2-25 Proyección cónica conforme de Lambert.

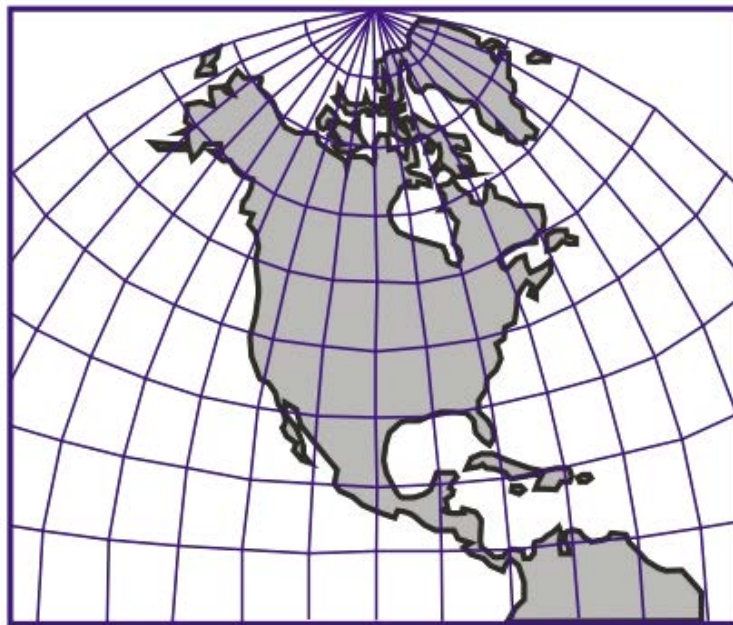


Figura 2.2-26 Proyección policónica (Adaptada de Snyder 1987).

2.3 ESCALAS.¹⁷

Es la característica más importante del mapa pues de ella depende la precisión cartográfica. Determina el *grado de disminución* en las longitudes de un objeto al pasar de su forma natural a su representación. En cartografía, existen dos tipos de escalas:

1. *Principal* o *general*. Equivale a la escala del modelo del elipsoide terrestre representado en un plano.
2. *Parciales*. Escalas locales del mapa que han sufrido deformación por el uso de la proyección cartográfica.

La Tabla 2.3-1 muestra las escalas cartográficas más comunes empleadas en los SIG y su equivalencia en el SMI.¹⁸

Escala del mapa	1 cm. equivale a:	1 km. es representado por	Escala del mapa	1 cm. equivale a:	1 km. es representado por
1:1,000	10 m	100 cm.	1:50,000	500 m	2 cm.
1:2,000	20 m	50 cm.	1:100,000	1 Km	1 cm.
1:5,000	50 m	20 cm.	1:250,000	2.5 Km	4 mm.
1:10,000	100 m	10 cm.	1:500,000	5.0 Km	2 mm.
1:25,000	250 m	4 cm.	1:1.000,000	10.0 Km	1 mm.

Tabla 2.3-1 Escalas cartográficas más frecuentes y sus equivalentes

2.3.1 Niveles de escala.

La escala con que un objeto es representado revela distintos detalles. En la Tabla 2.3-2 se muestra una clasificación de las escalas según su nivel de detalle.

E S C A L A S		
PEQUEÑAS	MEDIANAS	GRANDES
1: 1,000,000	1: 100,000	1: 10,000
1: 500,000	1: 50,000	1: 5,000
1: 250,000	1: 25,000	1: 2,000
		1: 1,000

Tabla 2.3-2 Clasificación de las escalas comunes utilizadas en cartografía

A cierta escala, un objeto puede tener una relación topológica poligonal; al disminuir el nivel de escala, dicho objeto puede convertirse en un elemento puntual o lineal (Figura 2.3-1).

¹⁷ Moolenaar (1998) pp. 89-101.

¹⁸ SMI: Sistema Métrico Internacional.

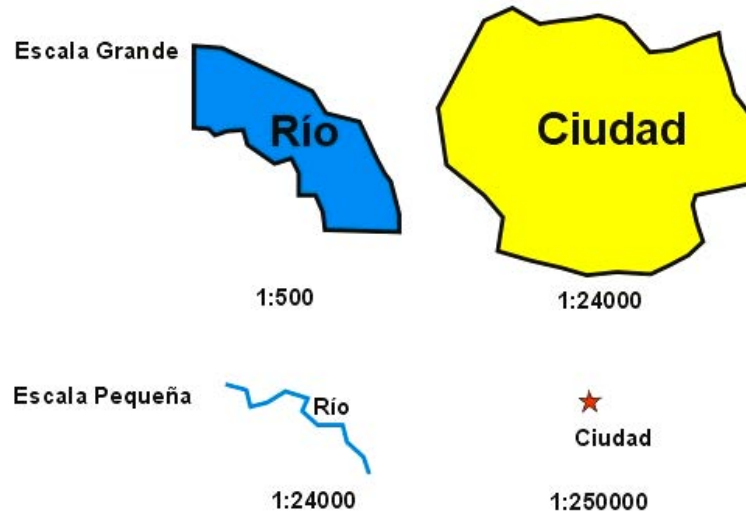


Figura 2.3-1 Representación de distintos niveles de detalle.

a) Escalas pequeñas.

Comprenden el rango 1:1,000,000 a 1:250,000. Sirven para hacer representaciones a nivel nacional. Sus contenidos son varios, los más comunes son: curvas de nivel, límites políticos, poblaciones, puntos topográficos, usos de suelo y vías de comunicación (Figura 2.3-2). La cartografía con escalas pequeñas es usada para muchos fines, como: monitoreo de cuencas, manejo de recursos naturales, prevención de riesgos, atlas nacionales, planes de desarrollo e inventarios generales y temáticos (Figura 2.3-3).

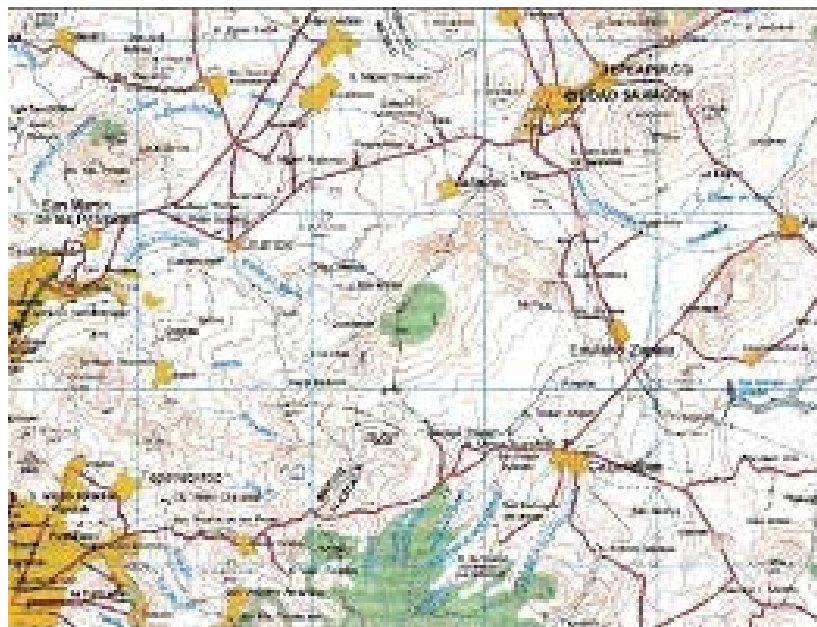


Figura 2.3-2 Mapa escala 1: 400 000 de curvas de nivel cada 50 m, vías de comunicación y poblaciones.

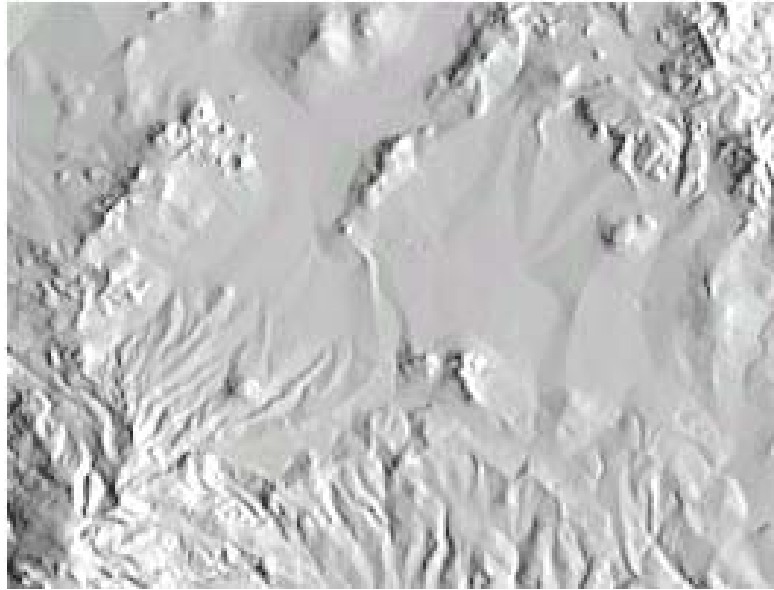


Figura 2.3-3 Modelo de elevación digital (MED) escala 1: 200,000.

b) Escalas medianas.

Situadas en el rango de 1:100,000 a 1:25,000. Se emplean para hacer representaciones a nivel regional (estatal o municipal). Habitualmente, los mapas en este rango, tienen contenidos de: hidrología, infraestructura, límites políticos, límites poblaciones, curvas de nivel, vías de comunicación y puntos topográficos.

Algunos de los usos de la cartografía con escala mediana son: ordenamiento ecológico, planeación regional, inventarios de infraestructura e instalaciones, telecomunicaciones, catastro rural, usos potenciales de suelo, evaluación y prevención de riesgos, geología y agricultura de precisión (Figuras 2.3-4 y 5).

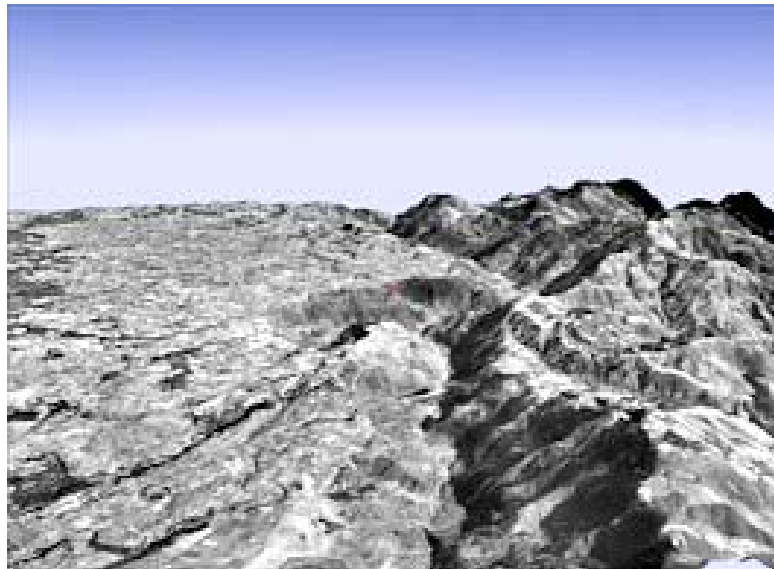


Figura 2.3-4 Modelo digital de elevaciones en 3D escala 1: 40 000



Figura 2.3-5 Mapa escala 1: 20 000 de una población: infraestructura, hidrología y vías de comunicación.

c) Escalas grandes.

Incluyen el rango de 1:10,000 a 1:1,000. Hacen representaciones a un nivel local. Los contenidos más comunes de los mapas que contienen estas escalas son: límites políticos, manzanas, calles, colonias, códigos postales, usos de suelo, y curvas de nivel (Figuras 2.3-6, 7 y 8). Los usos de los mapas con estas escalas son varios: catastro urbano, localización de redes (agua, drenaje, gas, fibra), evaluación de riesgos potenciales y planificación entre muchos otros.

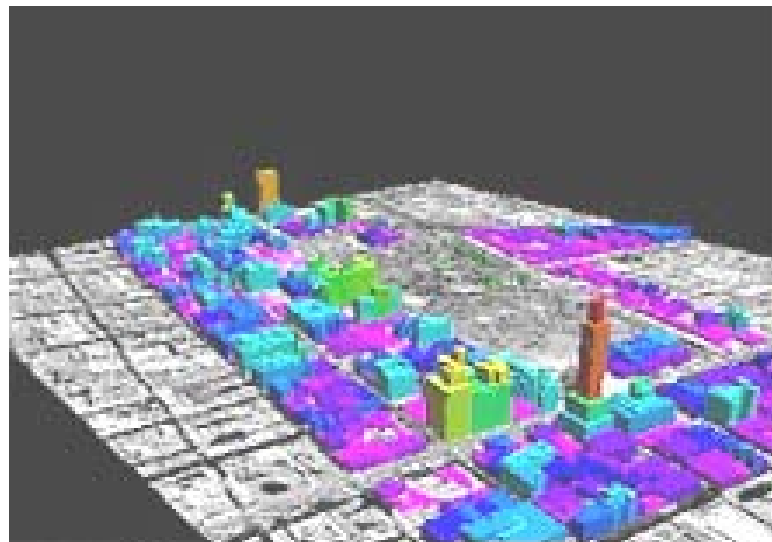


Figura 2.3-6 Mapa escala 1: 5,000 de un Modelo de Elevación Urbano.



Figura 2.3-7 Mapa escala 1: 5,000 de manzanas y colonias.



Figura 2.3-8 Mapa escala 1: 1,000 de colonias, manzanas y usos de suelo.

2.4 Tipos de mapas topográficos

La información topográfica es básica para el estudio y análisis de la mayoría de los proyectos relacionados con la ingeniería civil. Proporciona numerosos datos sobre la superficie física del terreno a través de la localización y extensión de elementos naturales, apoyándose en la orografía, hidrografía y planimetría.

La información topográfica tiene diversas formas de representación, las más comunes son:

2.4.1 Curvas de nivel.¹⁹

Son líneas continuas trazadas a cota constante (Figura 2.4-1). Representan las trazas que surgen de cortar el terreno con planos horizontales espaciados verticalmente una distancia uniforme llamada equidistancia de la carta. En general las equidistancias son de 50 o de 25 m, con líneas más gruesas respectivamente cada 250 o 100 m.

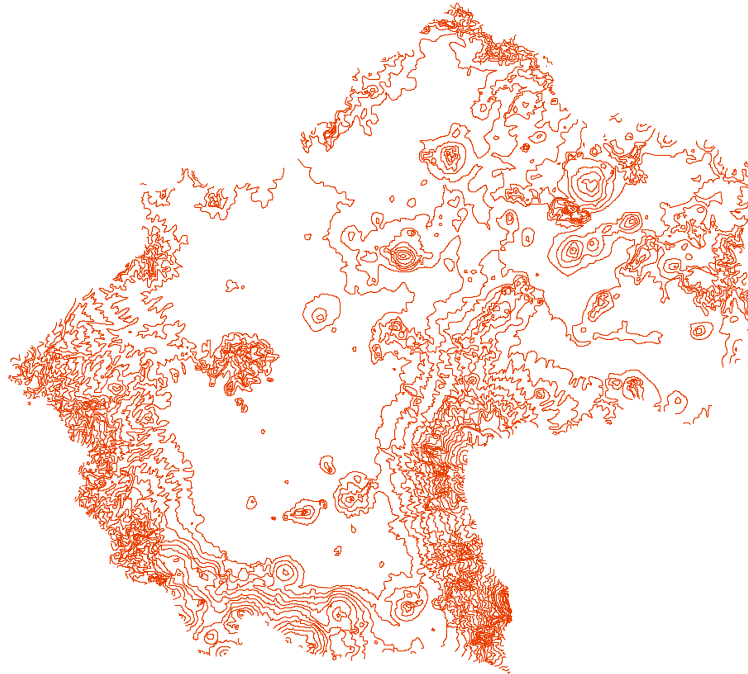


Figura 2.4-1 Curvas de Nivel.

2.4.2 Modelos de pendientes.

Son representaciones de cambios espaciales (Figura 2.4-2). Es necesario hacer una definición inicial del concepto de pendiente: “variación de la altura entre dos puntos del territorio en relación a la distancia que los separa”. Su obtención es útil en cualquier variable que esté representada como un modelo digital de «elevaciones», por ejemplo, precipitaciones, población, etc.

2.4.3 Modelos de contornos de altimetría.

Tienen una estructura vectorial, compuesta por un conjunto de pares de coordenadas (x, y) que describen la trayectoria de *líneas isométricas* (Figura 2.4-3). El número de elementos de cada vector es variable. Una línea isométrica es un vector ordenado de puntos que se sitúan sobre ella a intervalos adecuados (no

¹⁹ American Society of Civil Engineers (2003) www.asce.org/publications/

necesariamente iguales). La localización espacial de cada elemento es explícita, conservando los valores individuales de coordenadas.

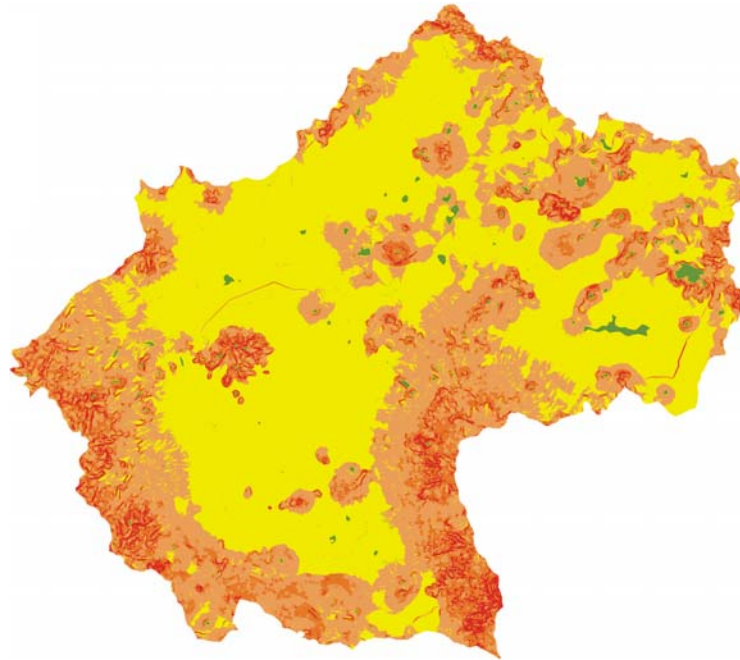


Figura 2.4-2 Modelo digital de pendientes.

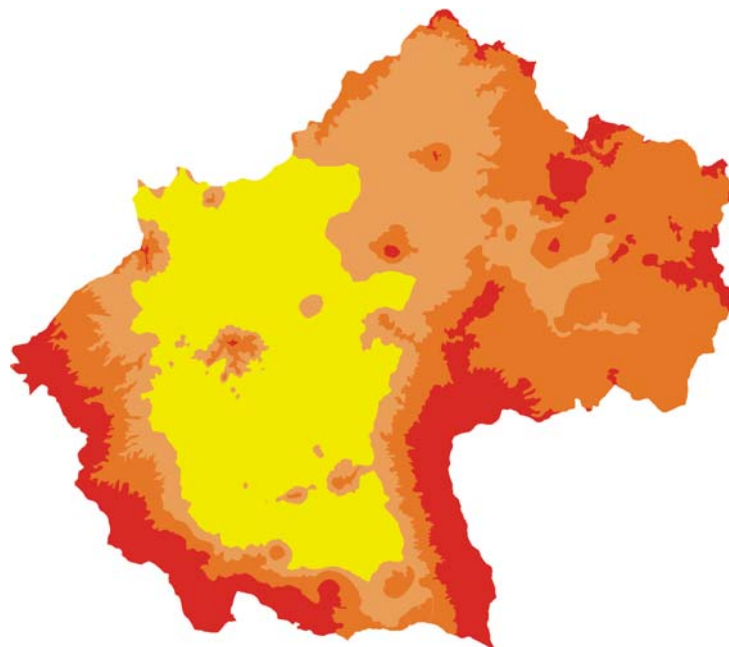


Figura 2.4-3 Modelo digital de contornos de altimetría.

2.4.4 Modelos digitales del terreno.²⁰

Describen la distribución espacial de una característica del territorio (Figura 2.4-4). Utilizan grandes volúmenes de puntos con coordenadas X, Y y Z conocidas, con un sistema de coordenadas arbitrario. En Estados Unidos, su uso aceleró el diseño de carreteras mediante el tratamiento digital de datos del terreno adquiridos por fotogrametría; planteándose un conjunto de algoritmos para la obtención de pendientes, áreas, altimetría y relieve sombreado.

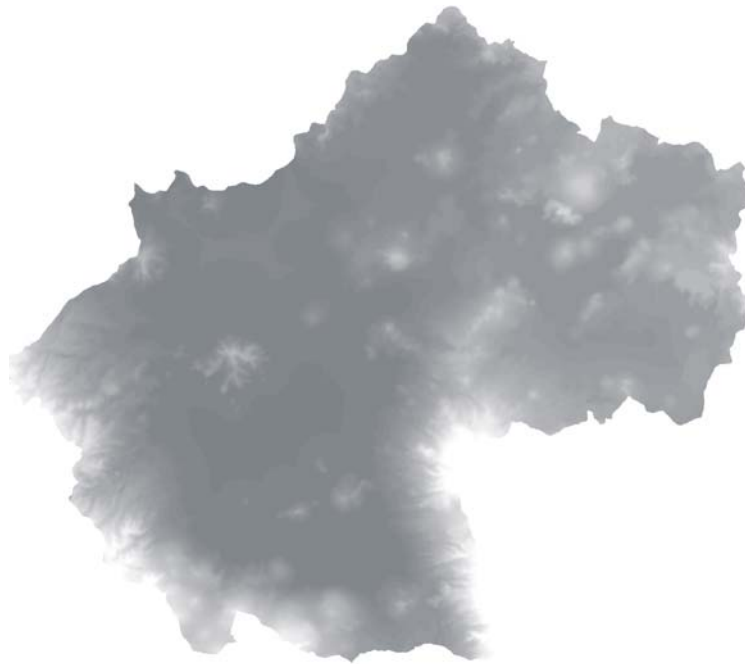


Figura 2.4-4 Modelo digital del terreno en 2-D.

2.4.5 Fotografías aéreas.

Permiten la identificación y ubicación de los rasgos conocidos del terreno y hacen posible relacionar los rasgos identificados con información no explícita (Figura 2.4-5). Son tomadas automáticamente a intervalos regulares con cámara especial por aviones que vuelan por encima de los tramos escogidos del terreno. La fotografía de cada tramo se superpone a la siguiente, de modo que no se pierdan detalles. Son particularmente útiles para actualizar mapas existentes y para calcular curvas de nivel. Mediante la fotointerpretación ha sido posible elaborar cartas geológicas, de suelos, de uso de suelo y vegetación, así como de usos potenciales e hidrológicos. Además su utilidad está probada para localización y delimitación de zonas afectadas en caso de desastres.

Anteriormente, las distorsiones de las fotografías se corregían utilizando un aparato denominado *restituidor fotogramétrico*. Este proyector creaba una imagen tridimensional al combinar fotografías superpuestas del mismo terreno tomadas

²⁰ Felicísimo (1994) cap. 1

desde ángulos diferentes. Los límites, las carreteras y otros elementos se trazaban a partir de esta imagen para obtener una base sobre la cual se realizaría el mapa.

Actualmente los procesos fotogramétricos son digitales, las cámaras cuentan con microprocesadores para el control automático de sus funciones, incluyendo la compensación de movimiento de la imagen. También se han instalado navegadores GPS para la conducción precisa de las aeronaves, lo que permite ubicar geográficamente el centro de cada fotografía al momento de la toma.

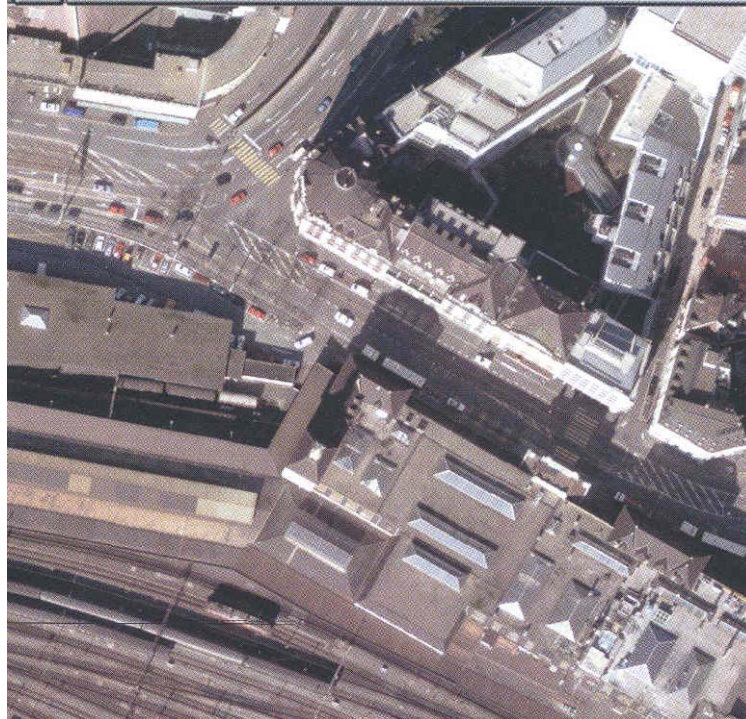


Figura 2.4-5 Fotografías aéreas.

2.4.6 Imagen de satélite.²¹

Es un conjunto de imágenes (una por banda) capturadas por el sensor de un satélite, similares a las que se obtienen haciendo una fotografía digital. Los píxeles están organizados en un sistema de filas y columnas pero sin referencia a coordenadas reales (Figura 2.4-6).

Las diferentes bandas pueden caracterizarse en función de:

- Amplitud espectral (región del espectro luminoso para la cual capta datos).
- Resolución radiométrica (número de intervalos de intensidad que puede captar).
- Tamaño del área captada.
- Resolución espacial (tamaño de píxel).
- Resolución temporal (tiempo que tarda el satélite en tomar dos imágenes del mismo sitio).

²¹ Ochoa (1996) mapping No. 28 pp. 16-25.

La altura a la que se sitúa el satélite y sus movimientos van a condicionar las características geométricas y la resolución temporal de las imágenes que producen.

Es posible obtener variables a partir de las reflectividades de las imágenes de satélite. Para ello existen diversos procedimientos desarrollados; el más habitual es por medio de índices (como: índice de vegetación, de humedad del suelo, de litología o de usos de suelo).

Las fotografías aéreas y las imágenes de satélite no están a una escala uniforme debido a la perspectiva y óptica del sensor con que fueron tomadas, por lo que es necesaria una corrección si se van a utilizar para la ubicación de elementos geográficos, actualización cartográfica o para la medición de longitudes y superficies.



Figura 2.4-6 Imagen de satélite.

2.5 Uso del Sistema de Posicionamiento Global. (GPS)²²

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) consiste en la localización geográfica (latitud, longitud y altitud geodésicas) con buena exactitud y precisión por medio de la captación de señales satelitales, fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos²³. Se basa en un diseño que al

²² Global Positioning System.

²³ Leick (2001) pp. 13-19

principio sirvió para apoyar los requerimientos de navegación y ubicación geográfica con fines militares. En la actualidad, es una importante herramienta en las aplicaciones civiles para la navegación y para determinar la posición geográfica de personas, vehículos y sitios en tierra, mar y aire, estáticos o en movimiento. Es un *recurso de apoyo* para el sistema básico de captación de datos en un SIG.

El GPS tiene tres componentes principales (Figura 2.5-1):

1. Constelación de satélites: En órbita a unos 20,200 kilómetros de altitud y período de 12 horas. Permiten una cobertura global uniforme. Recientemente se han incorporado satélites geoestacionarios a 33,400 kilómetros de altitud, que permiten mejorar la exactitud para determinados usuarios.
2. Segmento de control: Envía y recibe información sobre la posición exacta en las órbitas y corrige errores.
3. Segmento de usuarios: Los usuarios particulares poseen un receptor comercial, de diferente tipo según su finalidad. Estos sólo reciben información desde los satélites para calcular la posición propia.

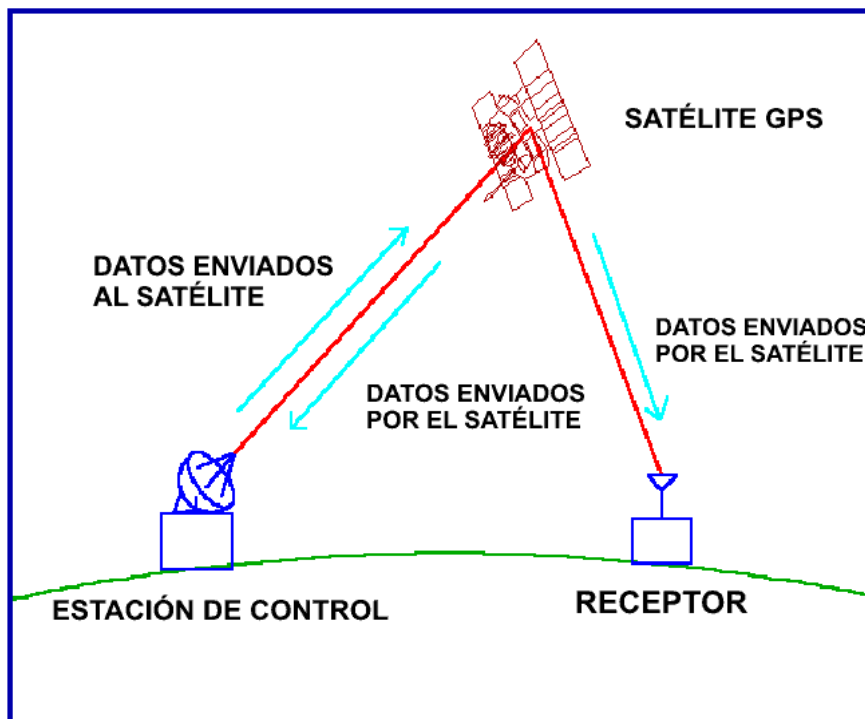


Figura 2.5-1 Componentes principales del GPS.

El funcionamiento es el siguiente (Figura 2.5-2): cada satélite que forma parte del sistema de posicionamiento global envía un mensaje característico con información sobre su posición y otros datos de utilidad, en dos frecuencias de radio. Cuando un receptor capta estos mensajes, genera una copia interna del

mensaje recibido. El desfase de tiempo entre ambos mensajes permite al receptor calcular la distancia a cada satélite. Son necesarios cuatro satélites para despejar las cuatro incógnitas del receptor: 1) las coordenadas cartesianas NAVSTAR, que son las distancias perpendiculares al plano del Ecuador, 2) un plano del meridiano de Greenwich, 3) un tercer plano perpendicular a los anteriores, y 4) el error del reloj interno del receptor. Posteriormente, un programa permite al receptor convertir las coordenadas cartesianas NAVSTAR a coordenadas geodésicas o planas en el sistema de referencia solicitado.

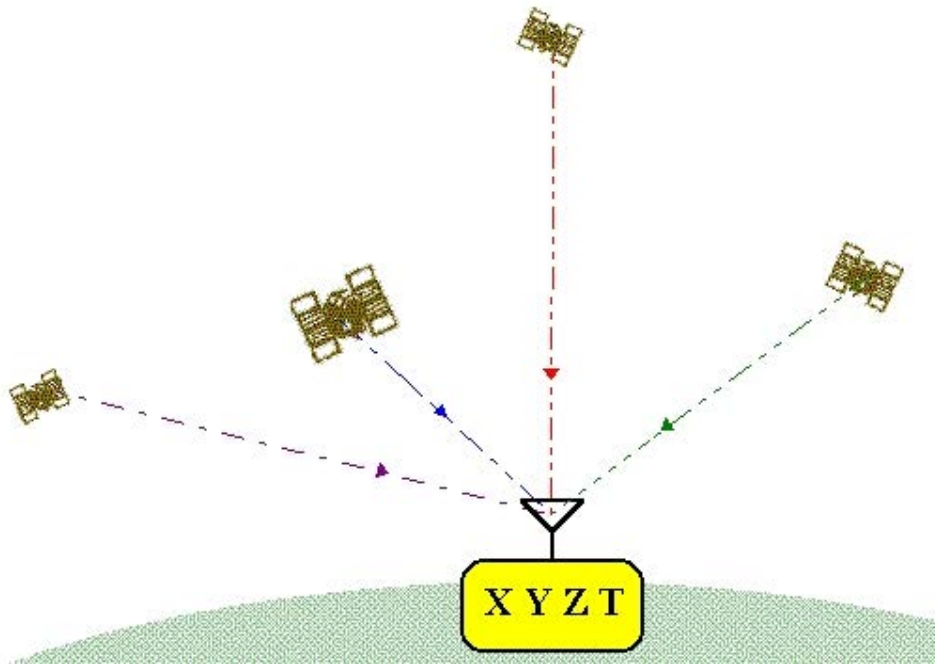


Figura 2.5-2 Funcionamiento del Sistema de posicionamiento global.

2.5.1 Tipos de receptores.²⁴

Los navegadores comunes permiten exactitud de una a dos decenas de metros. Algunos aparatos permiten recibir por radio información que proviene de otro receptor cercano (GPS diferencial o DGPS), lo cual mejora la exactitud al orden del metro. Existen estaciones receptoras fijas (se denominan estaciones GPS permanentes) que transmiten estos mensajes de corrección en forma pública o a suscriptores privados, o bien la archivan para que el usuario la compre y corrija posteriormente sus observaciones de campo. Finalmente, existen aparatos (que cuestan de 50 a 100 veces más que los navegadores) llamados receptores GPS geodésicos, que operan en doble frecuencia, miden fases y reciben el código P (código preciso), pudiendo alcanzar en forma absoluta exactitudes de unos cuantos centímetros, y en forma diferencial corregirlas a 1 o 2 mm.

²⁴ Forssell (1991) cap. 3.

2.5.2 Exactitud y precisión.

Es diferente el significado de *exactitud* (grado de acercamiento a la verdadera posición) y *precisión* (grado de reproducibilidad o invariabilidad de los resultados).

El GPS posee influencias de tres tipos de error:

1. Los que *afectan la medición de la distancia a los satélites*,
2. Los que *afectan al cálculo de las coordenadas*, en función de la geometría instantánea de la red visible de satélites; y
3. El *error estadístico de muestreo*, sujeto al número de satélites visibles y la cantidad de mediciones que se promedian. Los errores son mayores si los satélites no están bien distribuidos.

Algunas acciones para disminuir el error en el manejo del GPS son:

- Usar receptores de doble frecuencia.
- Tomar mediciones de noche.
- Promediar lecturas realizadas a lo largo del tiempo.

Por las características de precisión que ofrece esta tecnología ha sido adoptada en México por diversos organismos, tanto del sector oficial como del académico y privado, entre ellos están: el INEGI; las secretarías de la Defensa Nacional, de Marina, del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca; PEMEX, el Instituto Nacional de Antropología e Historia, la Comisión Federal de Electricidad, la Universidad Nacional Autónoma de México y los gobiernos estatales y municipales entre otras instituciones.

2.5.3 Limitaciones.

A pesar de su precisión este método tiene dos limitantes principales:

- La necesidad de acceder físicamente al lugar de medida y el tiempo relativamente elevado que se requiere para realizar una toma de datos confiables.
- La necesidad de condiciones favorables para las medidas (acceso directo y simultáneo a un mínimo de cuatro satélites, poca cobertura vegetal sobre la antena receptora, necesidad de una segunda estación de apoyo en funcionamiento simultáneo, etc.).

2.5.4 Funciones básicas.²⁵

El GPS puede calcular localizaciones, rumbos, distancias, velocidades y tiempos de arribo comparando mediciones sucesivas de la posición. Estas direcciones se suministran como azimut verdadero, dirección cartográfica o rumbo magnético. Es posible calcular empíricamente una altitud ortométrica (sobre el nivel del mar) con un modelo de geoide que contenga el receptor. La parte que vincula el manejo de GPS con los SIG es la calibración (georreferenciación) de las imágenes para que se sitúen sobre ellas los elementos relevados en el terreno.

²⁵ Kaplan (1996) pp. 36-56.

3

METODOLOGÍA

En el capítulo anterior se explicaron los componentes cartográficos que integran a los Sistemas de Información Geográfica. Estos son parte indispensable del marco teórico que ayuda comprender la metodología de elaboración de estos sistemas puesto que los objetivos que persiguen los usuarios de los SIG son diferentes y existen múltiples formas de representación de la información espacial.

Objetivo

Aplicar una metodología general para la elaboración de un SIG con base en sus estructuras y funciones.

GENERALIDADES¹

Un SIG es un modelo, almacena y transforma información como una colección de *capas temáticas*. Esto es simple pero extremadamente poderoso y versátil, proporciona una herramienta para crear soluciones a problemas del mundo real, que van desde el seguir la ruta de un vehículo en aplicaciones de ingeniería del transporte, hasta problemas más complejos y detallados como estudios de

¹ Longley, Goodchild, Maguire, Rhind (1999) pp 589-600

planeación urbana o de modelación ambiental de la atmósfera para la determinación de la circulación de aire contaminado.

La metodología general identificada para la elaboración de un sistema de información geográfica incluye realizar de manera óptima las siguientes tareas:

- Identificación de las variables fundamentales en el proyecto.
- Elección modelo y estructura de datos.
- Recolección, pretratamiento e ingreso de la información.
- Análisis y consulta de la información.
- Salida y representación.

3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES FUNDAMENTALES

En la ingeniería civil, como en las demás áreas de la ciencia, se maneja un gran número de datos con origen y naturaleza diferentes. Antes de elegir la estructura de cualquier modelo, es necesario identificar las variables que afectan a los fenómenos. Se distinguen cuatro tipos de variables esenciales: Binarias, *Cualitativas* o *Nominales*, *Semicuantitativas* u *Ordinales* y *Cuantitativas* o *Espaciales*.

3.1.1 Variables Binarias.

Sólo tienen dos valores: presencia/ausencia o pertenencia/no pertenencia.

Ejemplos.

La presencia o ausencia de un contaminante disperso en una región de suelo, el flujo o ausencia de flujo de agua en una red hidráulica, etc.

3.1.2 Variables Cualitativas o Nominales.

Indican una cualidad no mensurable. Resultan de mediciones simples o de descripciones. Pueden ser constantes o variables en el tiempo (como la información relativa a la demografía de un municipio).

Ejemplos.

La litología y los tipos de suelo de una región.

3.1.3 Variables Ordinales.

Son variables que se ordenan atendiendo a algún criterio: orden alfabético, numérico, topología, características cualitativas, etc. Al acomodar datos en intervalos es posible hacer operaciones aritméticas y combinaciones lógicas.

Ejemplos.

El número de orden de los cauces de un río, el tipo de carretera a la que pertenezca un tramo de la red (pavimentado de 2, 3 o 4 carriles, terracería), tipos de roca ordenados por su erosionabilidad.

3.1.4 Variables Cuantitativas o Espaciales:

Indican algún aspecto de la extensión espacial de los objetos no representables debido a:

- La escala de trabajo,
- Por ser una magnitud en tres dimensiones o
- Por la dificultad de representar el tipo de abstracción (por ejemplo la profundidad de un cauce).

Las variables cuantitativas pueden ser: *continuas* (altitud o temperatura) o de *objetos discretos* (número de cauces de un río de determinado orden).

a) Variables espaciales continuas

Son objetos tridimensionales: los ejes espaciales x , y (que forman una superficie) y una variable cuantitativa z asociada a cada punto del espacio. Varían progresivamente en el espacio manteniendo una correlación espacial (a mayor cercanía, mayor similitud). En algunos manuales de SIG se les denomina *campos* (por analogía con las propiedades similares del campo electromagnético), el término *superficie* también es referido. Lo más apropiado es utilizar un término procedente de la geoestadística²: *variable regionalizada*. Figura 3.1-1 y 2, Pág. 55.

Ejemplo 1.

Variables regionalizadas que se pueden representar y analizar como superficies, entre otras, son:

1. Las que denotan diversos *aspectos físicos naturales* (como la topografía, la altitud, la precipitación, la densidad de vegetación, datos meteorológicos, emisiones de contaminantes, la composición litológica o mineral y la acidez o basicidad de los suelos) y
2. Las *variables sociales* (como el número de habitantes, la renta per cápita, la accesibilidad y la densidad de población).

b) Variables espaciales de objetos discretos³

Se utilizan tres unidades de observación espacial para representar los fenómenos geográficos en el espacio: puntos, líneas y polígonos. Todos están en función de las propiedades geométricas-topológicas de las entidades geográficas, en concreto, de las dimensiones espaciales de cada unidad de observación. Específicamente se tienen *sistemas de objetos de puntos*, *sistemas de objetos de red o lineales* y *sistemas de objetos de áreas o polígonos*.

b.1) Objetos puntuales

Con cero dimensiones topológicas. Son elementos definidos espacialmente por una coordenada cartesiana (x, y) . Pueden localizar distintos elementos con distribución en el espacio no uniforme (población, pozos de extracción o sondeos geotécnicos). La Figura 3.1-3a (Pág. 56) muestra la distribución espacial de las cabeceras municipales del estado de Morelos.

² Rama de la estadística que estudia las variaciones en el espacio.

³ Herring (1991) pp. 29-34.

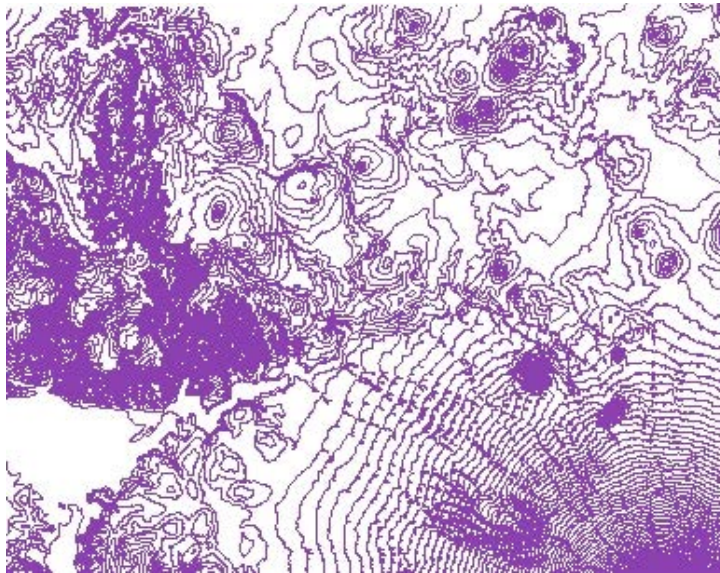


Figura 3.1-1 Curvas de nivel a cada 20 m de la región del estado de Tlaxcala

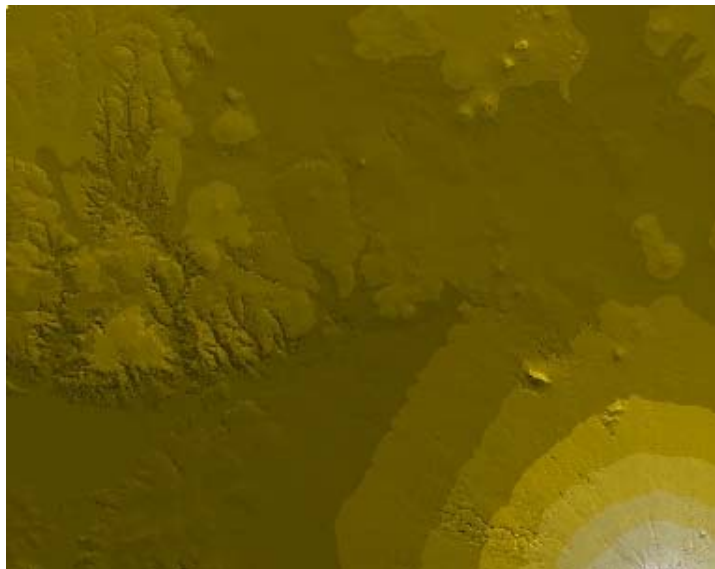


Figura 3.1-2 Modelo Digital de Elevaciones sobre la topografía del estado de Tlaxcala, las zonas claras indican mayor elevación.

b.2) Objetos Líneas o Arcos.

Con una dimensión. Son una sucesión de pares de coordenadas cartesianas (x, y) llamados vértices, con excepción del primero y el último que se denominan nodos. Representan un elemento lineal o parte del cuerpo de un polígono (fronteras, caminos, límites, líneas de división, cambios en la propagación superficial de los fenómenos). La Figura 3.1-3b (Pág. 56), muestra el sistema carretero del estado de Morelos con objetos líneas.

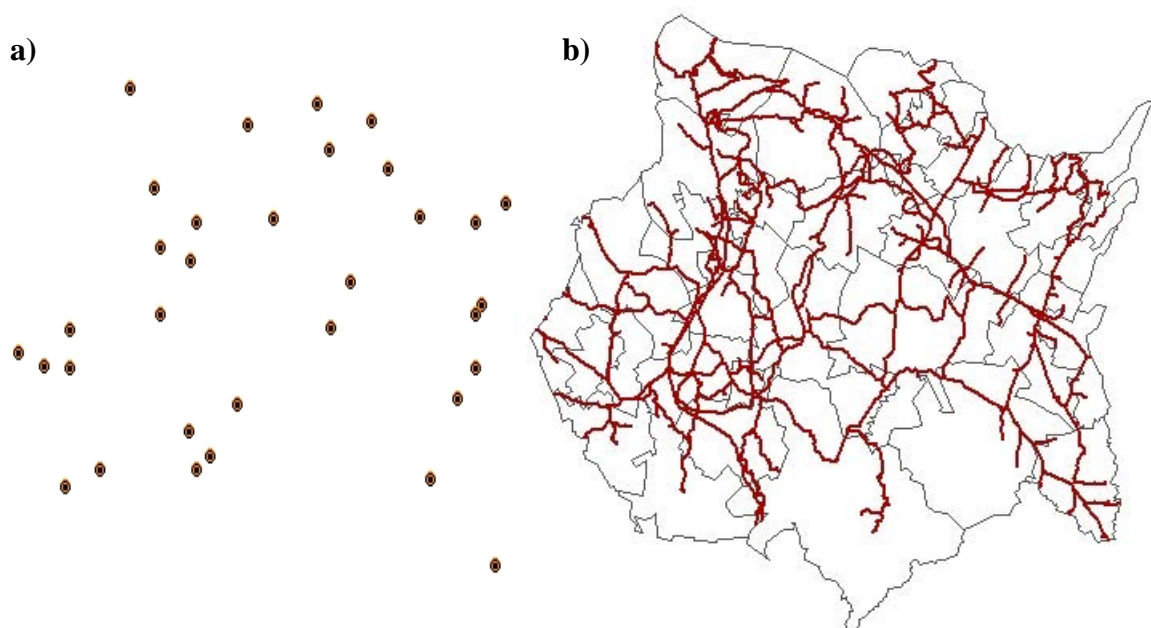


Figura 3.1-3 Representación de puntos y líneas⁴

b.3) Objetos poligonales.

Con dos dimensiones. Son áreas definidas por los arcos que conforman el cuerpo de un polígono (pantanos, bosques, regiones de cultivo, municipios y la mancha urbana). Pueden incluir en sí mismos otros elementos como puntos u arcos (Figura 3.1-4).



Figura 3.1-4 Representación del elemento polígono. Municipios del estado de Morelos

⁴ Datos: INEGI; Cartografía: laboratorio de transporte de la D.E.P.F.I, UNAM.

b.4) Objetos compuestos.

Son originadas por la combinación de objetos discretos. Un *mapa de polígonos* puede considerarse un objeto compuesto por varios polígonos complementarios vinculados unos con otros por relaciones de contigüidad. Uno de los ejemplos más característicos de las variables compuestas son las *redes*, que se definen como “*un sistema interconectado de elementos lineales que forman una estructura espacial por la que pueden pasar flujos de algún tipo*”. El análisis de redes espaciales que representan relaciones permite plantear y resolver un amplio conjunto de problemas prácticos. Dentro del ámbito de las matemáticas existe una rama muy desarrollada denominada teoría de grafos.

c) Categorías de información de los objetos discretos⁵

Existen cuatro categorías de información para clasificar las variables cuantitativas asociadas a los objetos discretos:

- *Identificador.* Variable cuantitativa de valor único que nombra a los objetos de un mismo tipo dentro de un conjunto. Las propiedades de los objetos se almacenan en una base de datos.
- *Posición.* Indica la ubicación, dimensión y forma del objeto en el espacio (generalmente bidimensional). Cada tipo de objeto tiene, en función de su número de dimensiones, propiedades espaciales de tamaño y forma directamente extraíbles de su codificación espacial. Los objetos lineales tienen longitud, sinuosidad y orientación, los objetos poligonales tienen área, perímetro, elongación máxima y diversos índices de forma.
- *Relaciones con el entorno.* Todos los objetos tienen relaciones con otros (de igual o distinto tipo) a su alrededor. Las relaciones pueden ser topológicas o físicas y están presentes explícitamente en la base de datos asociada al objeto o implícitamente durante la codificación de su localización espacial.
- *Metainformación.* Es información relativa a la información del sistema: método de obtención de los datos, fecha en que se obtuvieron, definiciones de los objetos y atributos, calidad de los datos, explicación acerca de valores que falten, precisión de medición, etc. Existen diversos estándares de metadatos. Los SIG incorporan la metainformación en los archivos de documentación y en las cabeceras de los archivos de datos.

Existen transformaciones entre las variables esenciales, por ejemplo a partir de información sobre las propiedades del suelo (variable cuantitativa continua), puede construirse por reclasificación un mapa de tipos de suelo (variable cualitativa). A la inversa, a partir de una variable cualitativa (capa temática de los tipos de suelo) puede agregarse información sobre la porosidad asignando algún procedimiento que tome en consideración la variabilidad espacial.

⁵ Longley, Godchild, Maguire, Rhind (1999) pp. 677-692.

3.2 ELECCIÓN DEL MODELO Y DE LA ESTRUCTURA DE DATOS

Para interpretar los fenómenos espaciales debe comprenderse la naturaleza de los datos geográficos.

En los datos geográficos se distinguen tres componentes:

- *Componente espacial*, describe la posición de los objetos geográficos respecto a un sistema de coordenadas conocido y las relaciones locales entre los objetos (relaciones topológicas).
- *Componente temático*, hace referencia al tipo de atributos que definen un objeto geográfico (tipo de material, población, vegetación, elevación, etc.)
- *Componente temporal*, confina la variabilidad del fenómeno en el tiempo, asignando un determinado espacio posicional y temático para un objeto en un determinado instante.

El uso de los modelos se considera un recurso adecuado para la implementación del método científico, imprescindible para el estudio de los elementos, procesos y circunstancias que configuran la realidad geográfica.

Los Sistemas de Información Geográfica se construyen en esencia sobre un modelo de la realidad espacial. Dicho modelo se basa en una abstracción del espacio geográfico que se materializa en un agregado de unidades de información lógico-formales que pueden almacenarse y tratarse en una computadora.

El modelado del espacio geográfico se fundamenta en el proceso de discretización de la variación de la realidad espacial⁶ (Maguire, 1989). Pasar de la realidad a un modelo en los SIG se entiende mejor si se considera la existencia de tres niveles de modelación: **conceptual, lógico y digital**.

La interpretación de la información utilizada en un proyecto de SIG es compleja, implica solidez sobre los conceptos teóricos introducidos al sistema. Para lograr un modelo representativo se requiere diálogo constante entre los diferentes profesionistas que intervienen en el desarrollo del SIG (ingenieros, geólogos, geógrafos, informáticos, administradores, etc.). El objetivo general de esta tesis es que los ingenieros civiles obtengan conocimiento sobre las etapas de modelación para que intervengan activamente en la realización de un proyecto que utilice sistemas de información geográfica. Al comprender la estructura y funcionamiento de estos sistemas, podrán diseñar SIG adecuados a sus necesidades.

⁶ La información geográfica puede ser expresada mediante $T(x,y,z_1,z_2,\dots,z_n)$, donde x e y representan las coordenadas de localización en un determinado sistema de proyección geodésica, y la serie $z_1\dots z_n$ son valores asignados empíricamente que representan los atributos. Considerando que x e y son continuos en el espacio, el número de dimensiones se puede considerar infinito. Una estrategia para la modelización consiste en la reducción del número de dimensiones y variables z requeridos para representar la realidad espacial.

3.2.1 Nivel de modelación conceptual.⁷

Utiliza variables y objetos. Se desarrollan, verifican y aplican teorías e hipótesis sobre las variables y procesos que tienen lugar en el espacio. Es el área de movilidad de los profesionistas implicados en el proyecto: científicos, ingenieros, geógrafos, geólogos, ecólogos, etc.

Existen dos estructuras de datos para los modelos conceptuales que proponen la realidad en principios diferentes: las estructuras topológicas y las teselares. La diferencia fundamental entre estos dos tipos de estructura, radica en el modelo de espacio que cada una supone.

a) Modelos de estructuras teselares

Las variables continuas son modeladas en un espacio dividido en una colección de cuadrículas contiguas y mutuamente exclusivas cuyos bordes son normalmente independientes del fenómeno que se representa. La *cuadrícula* sirve para dar un *marco de referencia* regular pero arbitrario a los datos geográficos. Las unidades de la cuadrícula son indivisibles y normalmente cada cuadro sólo adopta un único valor para cada atributo determinado. Consecuentemente, cada región es un conjunto conexo de unidades superficiales elementales. Las fronteras entre las diferentes regiones están definidas implícitamente, siendo necesario determinarlas cuando se requiera en alguna aplicación (Figura 3.2-1).

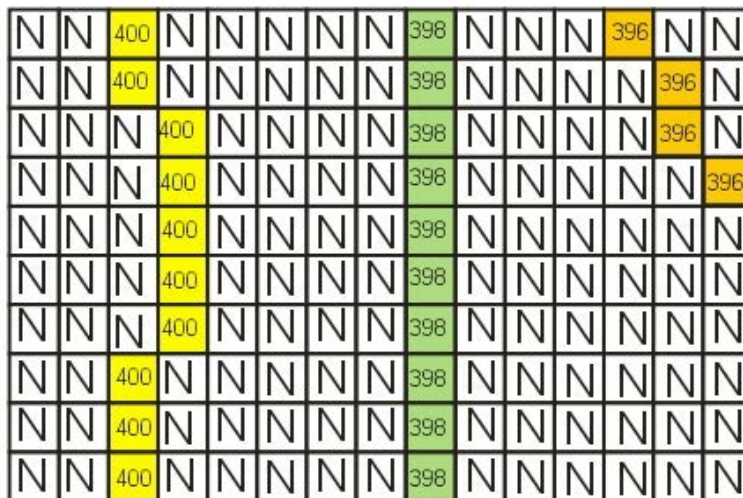


Figura 3.2-1 Curvas de nivel rasterizadas con equidistancia demasiado pequeña

La técnica de la cuadrícula se basa en la relación con el sistema de coordenadas utilizado. La cuadrícula utiliza una matriz (i, j) con el fin de representar las variaciones para efectos de la computadora. La Figura 3.2-2 (Pág. 60) ilustra la transformación de un mapa lineal original al sobreponerle una cuadrícula con valores de fila-columna para expresar las variaciones.

⁷ Maguire (1989) pp. 111-130

MAPA ORIGINAL

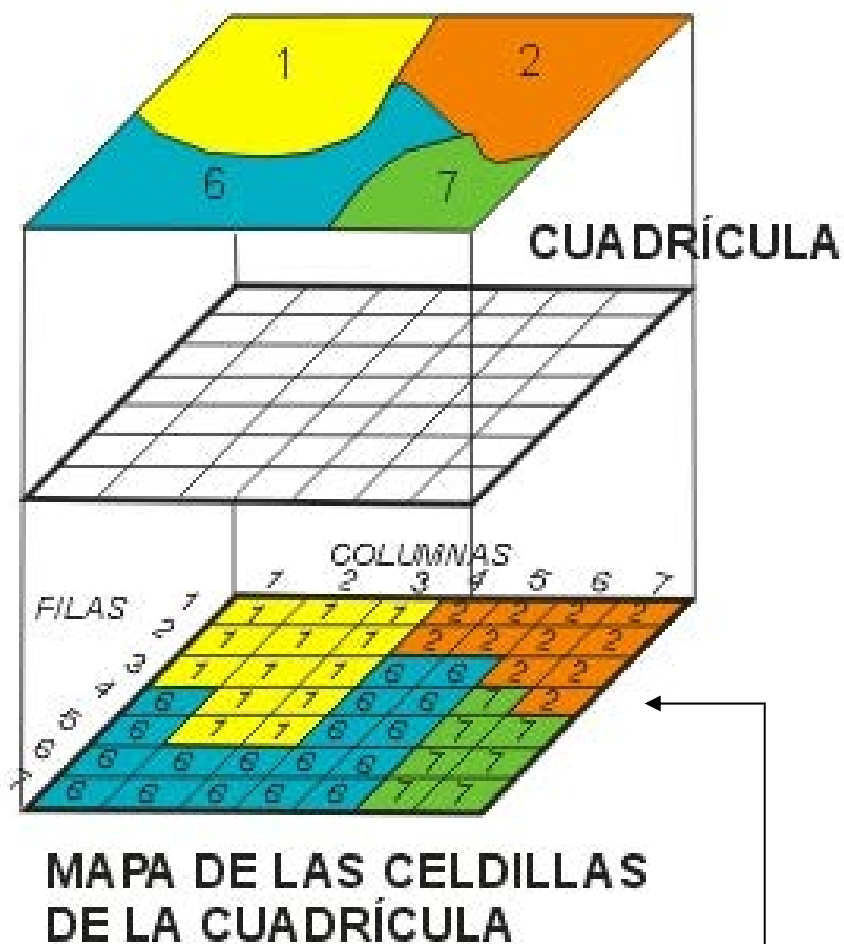


TABLA DE VALORES

FILA	COLUMNA	VALOR
1	1	1
1	2	1
1	3	1
1	4	2
1	5	2
1	6	2
.	.	.
7	7	7

Figura 3.2-2 Archivo de cuadrículas

b) Modelos de estructuras topológicas⁸

Consideran la realidad como una reunión de *objetos discretos* (puntos, las líneas y los polígonos) que asumen un espacio geográfico continuo cumpliendo los postulados de la geometría euclidiana; cualquier entidad que aparezca en el espacio (casas, carreteras, cordilleras, lagos, etc.) puede modelarse a la escala adecuada mediante un objeto geométrico. Existen dos formas de representación para las estructuras topológicas: como línea cerrada (modelo orientado a objetos) o como una sucesión de líneas denominadas arcos (modelo Arco-Nodo).

La Figura 3.2-3 muestra un mapa típico con elementos de puntos, líneas y polígonos en coordenadas cartesianas que es transferido a un archivo de coordenadas (x, y).

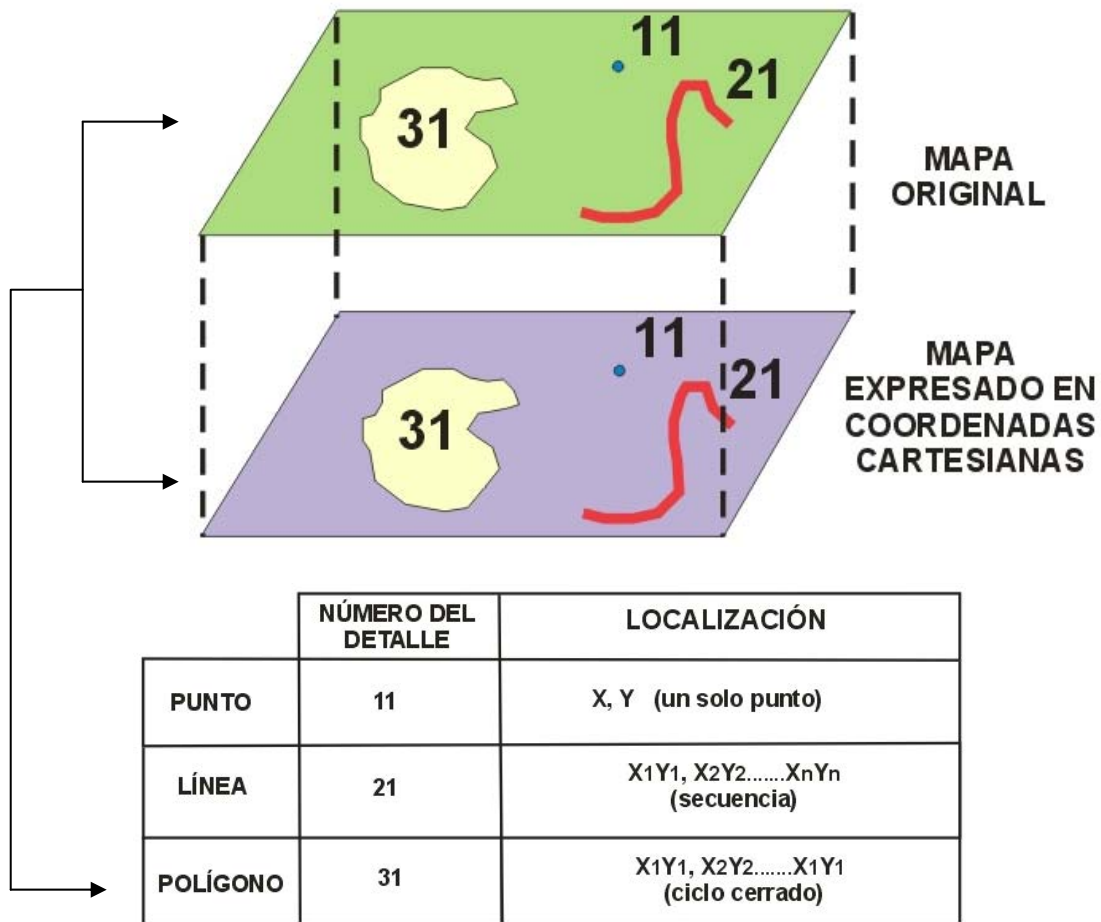


Figura 3.2-3 Mapa típico (x, y) transferido a coordenadas cartesianas

Además de expresar los fenómenos geográficos, también se aplican los principios de la *teoría de grafos* referentes a las relaciones topológicas de la posición de diversos elementos del mapa.

⁸ Bernhardsen (1999) pp. 60-66.

La Figura 3.2-4 muestra un mapa típico de redes/polígonos. Numerando los enlaces (del 1 al 11) y asociándolos a los 7 nodos y 5 polígonos, se expone el desarrollo de un sistema básico para la notación.

Si a cada uno de los nodos se le agrega la codificación de sus coordenadas (x, y), se obtiene un sistema doble para identificar espacialmente todos los elementos de un mapa. Esto facilita el uso de las matemáticas relacionadas con la teoría de grafos: representación de redes, de conjuntos espaciales y supresión de líneas.

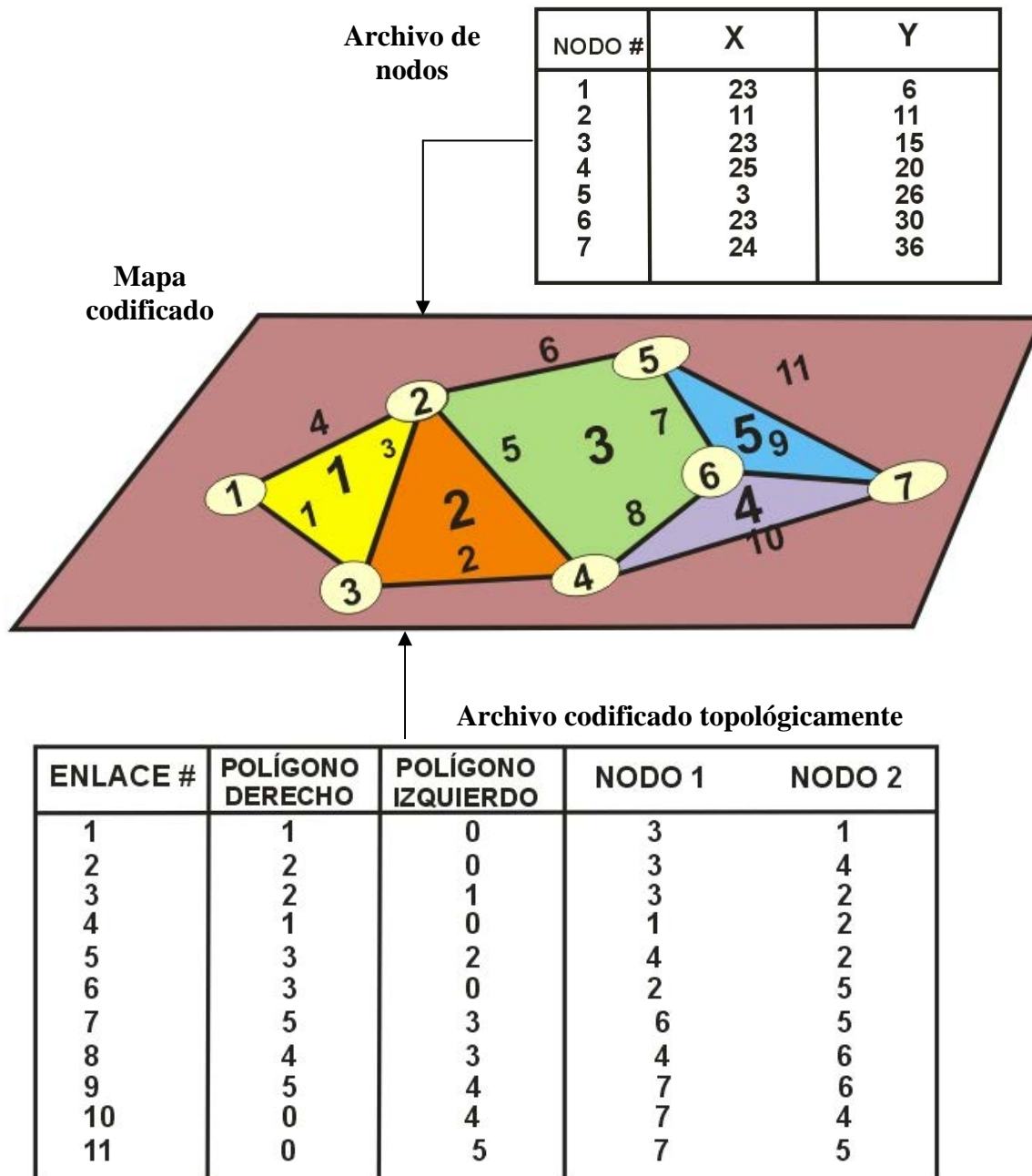


Figura 3.2-4 Sistema de codificación de coordenadas utilizando la teoría de los gráficos.

3.2.2 Nivel de modelación lógica.

Se refiere a como se muestran y organizan las variables y objetos para lograr una modelación adecuada. En este nivel desempeñan su trabajo los técnicos en SIG que utilizan las herramientas del sistema para llevar a cabo las tareas requeridas por los gestores o científicos.

Existen seis representaciones para la modelación lógica:

- Raster.
- Arco Nodo, también llamado vectorial.
- Malla de puntos.
- Red Irregular de Triángulos (TIN)⁹.
- Isolíneas.
- Orientado a objetos.

La Figura 3.2-5 (Pág. 64) muestra en forma de diagrama los niveles de modelación planteados para las variables y objetos en un SIG.

Tanto las mallas de puntos, las cuadrículas y los TIN, por utilizar objetos compuestos para representar variables regionalizadas se consideran como híbridos entre el modelo raster y el vectorial. Los *mapas de isolíneas* son *representaciones* de una variable regionalizada.

La estructura raster codifica de forma explícita el interior de los objetos e implícita el exterior; el formato vectorial lo hace al contrario, codifica explícitamente la frontera de los polígonos e implícitamente el interior. Lo anterior implica que los algoritmos utilizados para las operaciones de álgebra de mapas entre modelos raster y vectoriales sean completamente diferentes.

a) Modelos de variables¹⁰

En este tipo de modelos, las superficies son representadas eficientemente y se permiten análisis posteriores. Los modelos elaborados con variables espaciales continuas se denominan "*modelos de dos dimensiones topológicas y media*" o "*gráficos 2.5-D*" debido a que la tercera dimensión (z) no se analiza totalmente. Los gráficos y análisis hechos verdaderamente en 3 dimensiones emplean modelos de datos diferentes y más complejos (utilizados en aplicaciones ambientales y geológicas). Utiliza celdas que reciben valor único considerado representativo de toda la superficie abarcada, por lo que se considera que el modelo raster cubre la totalidad del espacio. Este hecho supone una ventaja fundamental respecto a las otras alternativas ya que pueden obtenerse valores de forma inmediata para cualquier lugar.

⁹ Triangular Irregular Net.

¹⁰ Bernhardsen (1999) pp. 85-89

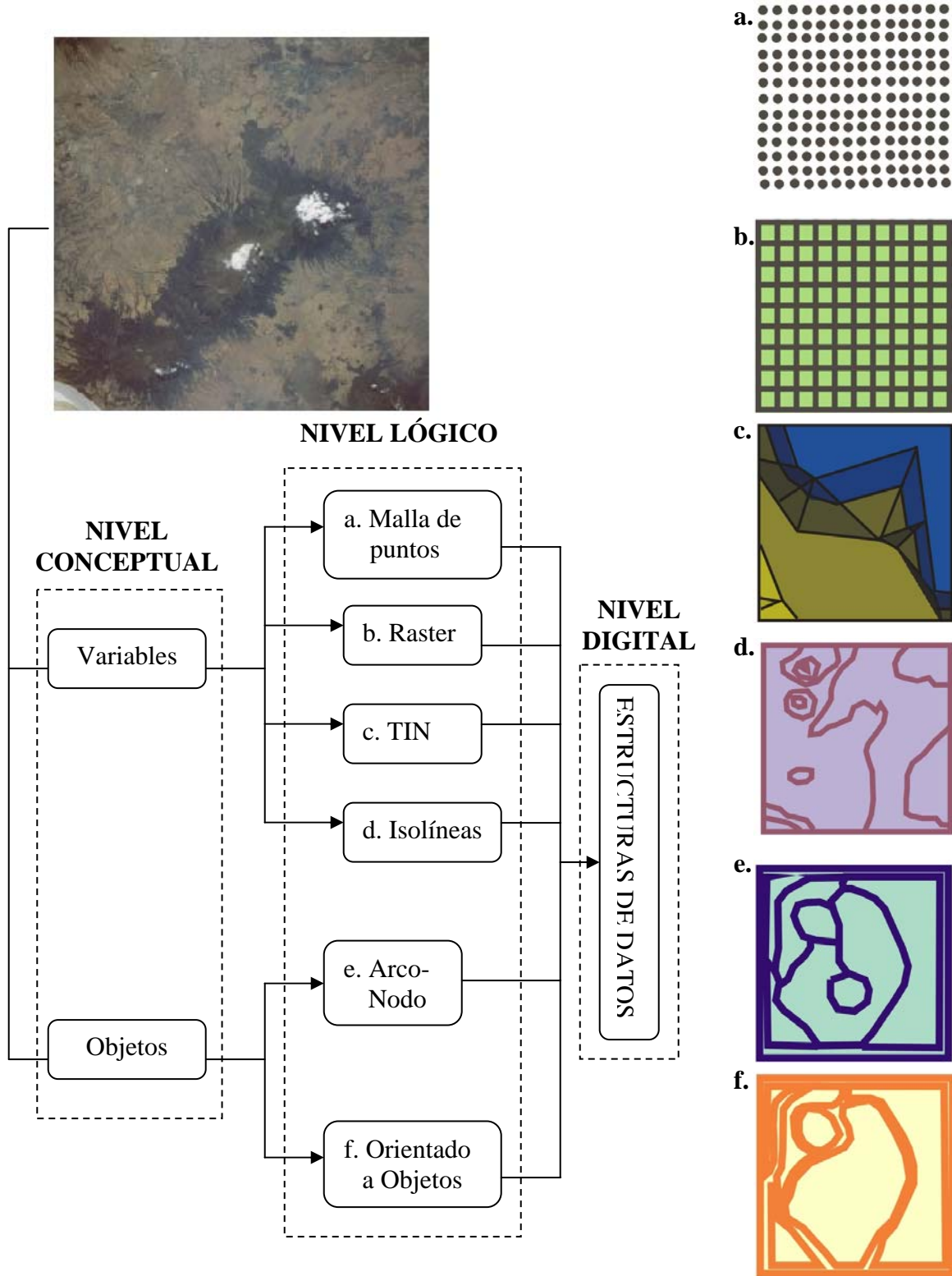


Figura 3.2-5 Modelos planteados para la representación de variables y objetos.

El modelo raster se fundamenta en el uso de una malla regular para definir un sistema de polígonos uniformes, pero que es arbitrario en la captura de los datos geográficos (Figura 3.2-6). La morfología de la malla es poligonal-homogénea, generalmente cuadrada (mayor facilidad en la representación de los píxeles de las pantallas). Sin embargo, se pueden utilizar también triángulos y hexágonos regulares o irregulares (Peuquet, 1984). Se denomina *capa raster* a un conjunto de celdas con sus valores.

400	400	399	399	399	398	398	398	397	397	396	396	396
400	400	399	399	399	398	398	398	397	397	396	396	396
400	400	400	399	399	398	398	398	397	397	396	396	396
400	400	400	399	399	398	398	398	397	397	397	396	396
400	400	400	399	399	398	398	398	397	397	397	396	396
400	400	400	399	399	398	398	398	397	397	397	397	397
400	400	400	399	399	398	398	398	397	397	397	397	397
400	400	399	399	399	398	398	398	397	397	397	397	397
400	400	399	399	399	398	398	398	398	397	397	397	397
400	400	399	399	399	398	398	398	398	397	397	397	397

Figura 3.2-6 MDE resultante

Una capa raster codificada en una computadora es una lista de números sin georreferenciación explícita (Para mayor información sobre la georreferenciación, consulte el Apéndice B). Es por tanto, necesaria información sobre esta matriz que permita al programa y al usuario ubicarla en el espacio, leer sus valores y entender su significado. Esta información incluye:

- Número de columnas (nc)
- Número de filas (nf)
- Coordenadas de las esquinas de la capa (e, w, s, n)
- Resolución, forma y tamaño de píxel en latitud (nsres) o en longitud (ewres)

Existe una serie de convenciones sobre la información en formato raster, por ejemplo, la primera columna en una capa raster es la de la izquierda y la primera fila es la superior aumentando progresivamente hacia abajo, en sentido contrario al que siguen las coordenadas geográficas. Todo ello da lugar a una serie de relaciones entre las variables que definen la situación espacial de las celdas:

Normalmente nsres y ewres son *constantes* y tienen el mismo valor. En algunos casos, como en las imágenes de satélite de baja resolución no es así, ya que se ven afectadas por la curvatura de la Tierra.

Con respecto a la *visualización* de capas de información raster en la pantalla de una computadora, se requiere solventar dos cuestiones básicas:

- La correspondencia entre los píxeles del mapa y los de la pantalla, y como se afecta por las herramientas de zoom.
- La relación establecida entre valores, colores y la creación de una convención para su utilización.

Cuando se realiza un modelo de superficies en variables con continuidad espacial es necesario realizar estimaciones mediante técnicas de interpolación, debido a que no se dispone de un valor para cada punto. La interpolación consiste en un proceso de predicción de valores desconocidos de una variable en localizaciones concretas a partir de los valores conocidos en localizaciones vecinas. Los métodos de interpolación varían en función del tipo de algoritmo aplicado a los datos para la derivación del nuevo valor, así como la definición del área de búsqueda de puntos con valor conocido. El tipo de datos base (puntos, líneas o áreas) y su distribución (mallas regulares, nubes aleatorias, curvas de nivel, etc.) también condicionarán este proceso.

Teóricamente se trata de encontrar un procedimiento que permita alcanzar un grado adecuado de predicción del fenómeno o variable en estudio¹¹.

a.1) TIN (Triangulated Interpolation Network).

Un sistema de triangulación consiste en la división del espacio en función de la posición de los puntos de referencia con altura conocida trazando líneas perpendiculares desde los puntos a los lados de los polígonos, posteriormente cada triángulo generado estará formado por tres puntos con alturas conocidas, de manera que la altura variará linealmente en su interior según una ecuación.

a.2) Isolíneas.

Son líneas que unen puntos con el mismo valor para una variable determinada. Pueden utilizarse como representaciones lineales de los resultados obtenidos mediante los métodos de interpolación aplicados.

a.3) Modelos Digitales de Elevaciones (MDE)

Son representaciones digitales de cotas de los puntos de un territorio. El requerimiento base para elaborarlos es que no deben existir saltos bruscos en el valor de las variables.

El proceso de interpolación se desarrolla mediante triangulación y da lugar a los denominados TIN (Triangulated Interpolation Network).

En sistemas raster el resultado de la interpolación será una nueva capa que contiene un valor de altura para cada una de sus retículas.

Los métodos de interpolación desarrollados varían en función del tipo de información a usar y el tipo de algoritmos aplicados:

¹¹Despotakis (1993) pp. 68-76.

- A partir de puntos (polígonos de Thiessen, inversa de la distancia, medias móviles, variograma, kriging, etc.).
- A partir de curvas de nivel. (lineal, no lineal).

Ejemplo.

La Figura 3.2-7 muestra a la izquierda un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la densidad de población del estado de Morelos, a la derecha están las isolíneas respectivas que delimitan los intervalos de densidad. Las zonas más claras son las más pobladas.

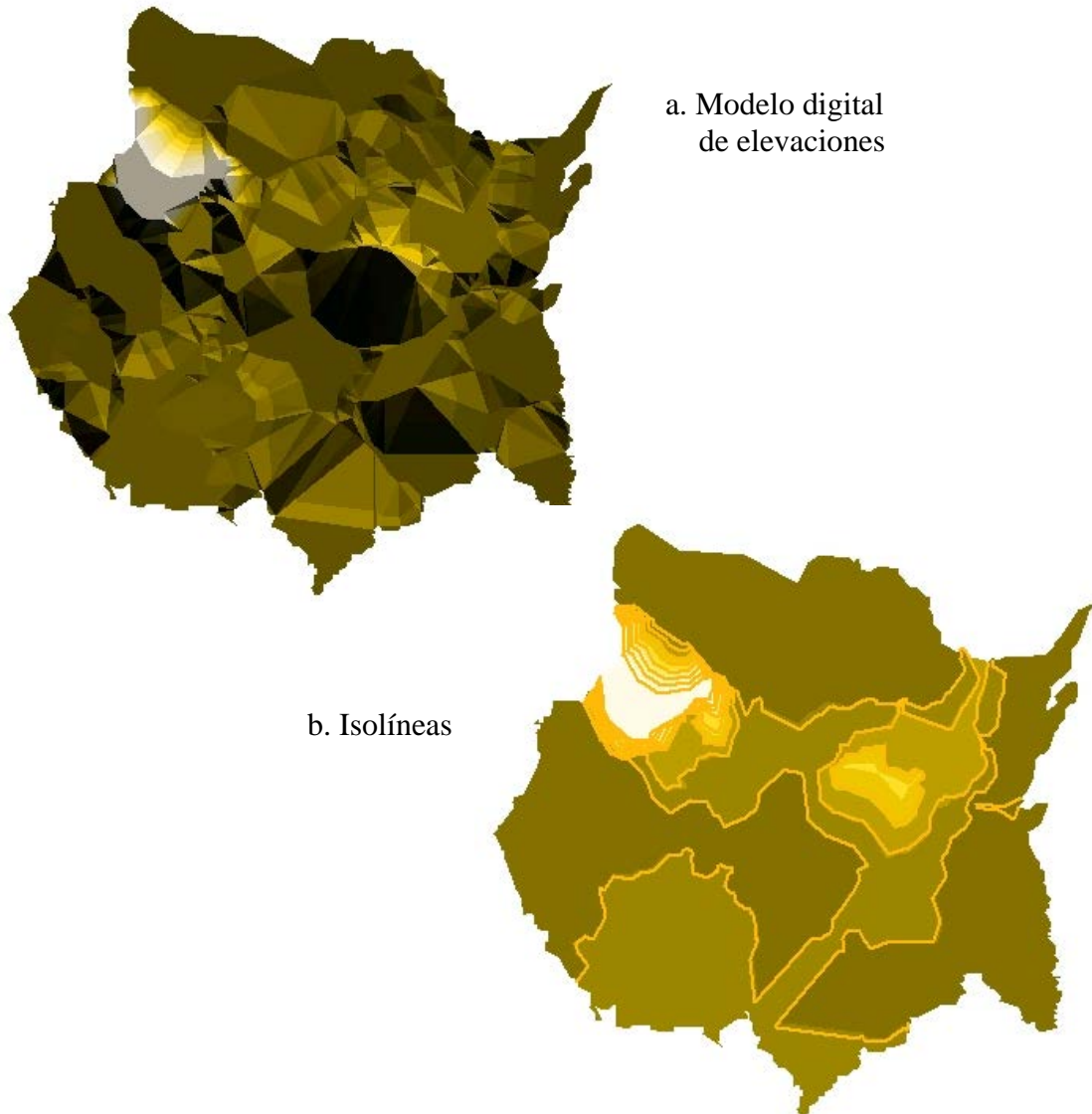


Figura 3.2-7 MDE e isolíneas de la densidad de población del estado de Morelos¹²

b) Modelos de objetos

¹² Datos: INEGI; Cartografía: laboratorio de transporte de la D.E.P.F.I, UNAM.

También llamados vectoriales, definen objetos geométricos (puntos, líneas y polígonos) mediante la codificación explícita de sus coordenadas. Este formato resulta especialmente adecuado para la representación de objetos geométricos reales (carreteras, ríos, polígonos de usos del suelo, figura 3.2-8). Existen dos tipos de modelos vectoriales: Los modelos no estructurales denominados "spaghetti" o "arco nodo" que son los más simples, donde los objetos se describen independientemente unos de otros sin referencia entre elementos adyacentes; y los modelos "topológico"¹³ u "orientados a objetos", que describen las relaciones topológicas entre los objetos en el espacio (conectividad, inclusión, vecindad, contigüidad, etc.).



Figura 3.2-8 Modelo vectorial

b.1) Modelo arco-nodo

Es adecuado cuando los recursos informáticos son escasos para las tareas que se quiere ejecutar, sin embargo ralentiza o imposibilita algunas operaciones de análisis espacial. Cada línea se codifica una sola vez y los polígonos se construyen mediante la yuxtaposición de líneas

b.2) Modelo orientado a objetos (MDOO)

Una entidad geográfica de cualquier complejidad y estructura puede representarse como objeto. Cada polígono se codifica como una línea cerrada, aunque se repitan tramos de las líneas. Los datos son representados por el conjunto de líneas de frontera y las regiones por sí mismas están descritas implícitamente. Cada objeto está definido por su *estado* y *comportamiento* con los demás objetos. El estado se refiere a sus propiedades estructurales (atributos del objeto). El comportamiento se especifica por una serie de métodos que operan sobre el estado del objeto (operadores y relaciones) (Herring, 1989).

¹³ Topología: concepto matemático para definir las relaciones espaciales entre los elementos geométricos del plano. La referencia topológica define un lugar de los fenómenos geográficos con relación a otros fenómenos, pero no involucra el concepto de distancia en la definición de estas relaciones.

En la Figura 3.2-9 se muestran los tipos de variables de objetos discretos en formato vectorial, a) Punto, b) Línea, c) Polígono en formato orientado a objetos (OO) y d) Polígono en formato Arco-Nodo.

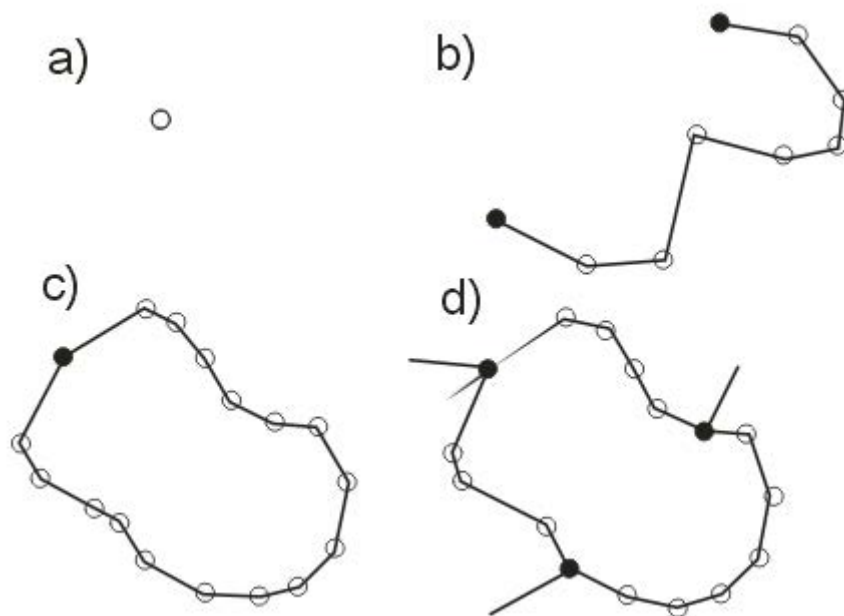


Figura 3.2-9 Tipos de objetos en formato vectorial

Los tipos de objetos espaciales en los modelos orientados a objetos coinciden con los elementos estructurales del modelo vectorial:

- *0 Dimensiones: PUNTO*
La elección de las entidades que serán representadas como puntos depende de la escala de trabajo, Así, para una escala determinada, una ciudad podrá ser entendida como una entidad puntual, mientras que en otros casos comprenderá una serie de polígonos.
- *1 Dimensión: LÍNEA*
En su conjunto forman redes. Por ejemplo, algunas entidades son las redes de: infraestructura (transporte, gas, electricidad, agua, teléfono, aéreas) y las neuronales (fluviales, torrenciales).
- *2 Dimensiones: ÁREA*
Implica extensión territorial y se clasifican por clases, por ejemplo: zonas ambientales, características geológicas, ocupaciones de suelo, factores socioeconómicos, catastrales, etc.
- *3 Dimensiones: VOLUMEN*
Da lugar a relaciones espaciales entre los objetos:

Punto-Punto (Proximidad, Identidad), Punto-Línea (Intersección, Proximidad), Línea-Línea (Intersección, Proximidad), Línea-Área (Intersección), Área-Área (Intersección, Proximidad, Fusión)

También existen relaciones espaciales entre pares de objetos, por ejemplo: distancia, conectividad, número de viajes.

El MDOO corresponde al estado conceptual más avanzado en la modelización del espacio geográfico y el que supone mayor acercamiento a la realidad geográfica. Su implementación estructural se encuentra aún en fase de desarrollo y no se ha utilizado con demasiada frecuencia en los SIG (Mitter, 1989), si bien resulta evidente una migración de los demás modelos hacia él.

b.3) Relaciones topológicas en los modelos vectoriales

El término *topología* hace referencia en el lenguaje de los SIG vectoriales a una serie de propiedades que permiten que se establezcan relaciones entre diferentes objetos para originar entidades de orden superior. Los requisitos topológicos básicamente son:

- Los nodos de dos líneas en contacto deben tener las mismas coordenadas.
- Un polígono se define como un circuito perfecto de líneas que puede recorrerse entero empezando y terminando en el mismo punto sin pasar dos veces por la misma línea.
- Existe un sólo identificador para cada objeto y éste no se repite.
- Se dispone de algún modo de codificar los polígonos isla. Se trata de los polígonos completamente rodeados por otro polígono

Las relaciones *topológicas* construyen áreas a partir de una lista individual de líneas que definen los bordes. El sistema almacena coordenadas lineales solo una vez porque dos áreas que son adyacentes pueden compartir una línea común entre ellos. En contraste, los modelos de datos *no topológicos* almacenan cada una de las áreas cerradas como una simple entidad, es decir, la línea compartida por la adyacencia de dos áreas debe ser introducida y almacenada dos veces. Este dato duplicado hace que el análisis espacial se dificulte. Los modelos no topológicos son modelos de datos comunes, soportados por muchos CAD's, sistemas gráficos y geográficos. La Figura 3.2-10 (Pág. 71) muestra polígonos con modelo de datos topológico (izquierda) y no topológico (derecha).

Se utiliza una base de datos temática asociada para incorporar la información espacial (y no espacial), en esta, una de las columnas corresponde al identificador de los objetos representados. En algunos casos se incluye información derivada de la localización (área, perímetro) en esta tabla para utilizarla en operaciones matemáticas junto con el resto de las variables. A este modo de trabajo se le llama modelo de datos *geo-relacional*.

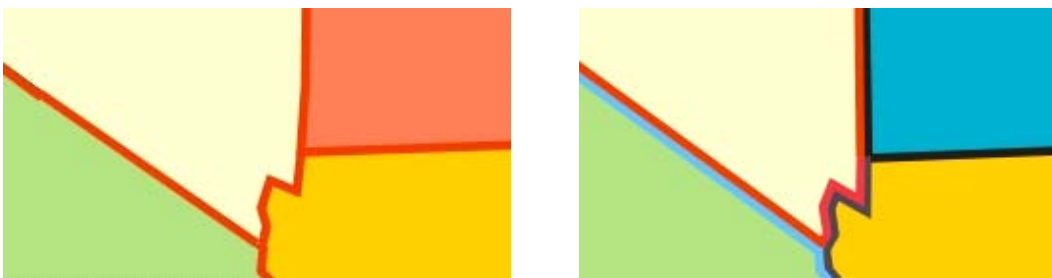


Figura 3.2-10 Relaciones topológicas en los SIG

Uno de los problemas del formato vectorial es que el paso del modelo lógico al digital implica problemas en la importación y exportación de la información. Cuanto más *completa* sea la capa temática (incluyendo topología y base de datos enlazadas) más difícil será el cambio de formato.

b.4) Relaciones Espaciales¹⁴

Son generadas mediante la topología e indican donde se encuentran localizados ciertos objetos con base en las características comunes que puedan existir entre ellos (Figura 3.2-11, Pág. 72). Algunas de las más usuales son:

- *Posición relativa.* Posición comparativa entre elementos (Un aeropuerto está al noroeste de la ciudad).
- *Adyacencia.* Elementos que se encuentran en la cercanía de otros (un desarrollo habitacional que es seguido por un parque).
- *Proximidad.* Elementos que son contiguos a otros (área de influencia de un vaso de almacenamiento).
- *Intersección.* Elementos que se empalman con otros elementos (una vía del tren que intersecta a una calle).
- *Conectividad.* Enlace entre diferentes elementos (la distribución de una red de agua potable).
- *Contenido en.* Elementos localizados dentro de un área, generan los llamados polígonos isla (Una estación de bomberos está localizada dentro de una delegación).

¹⁴ Demers (1999) pp. 21-25

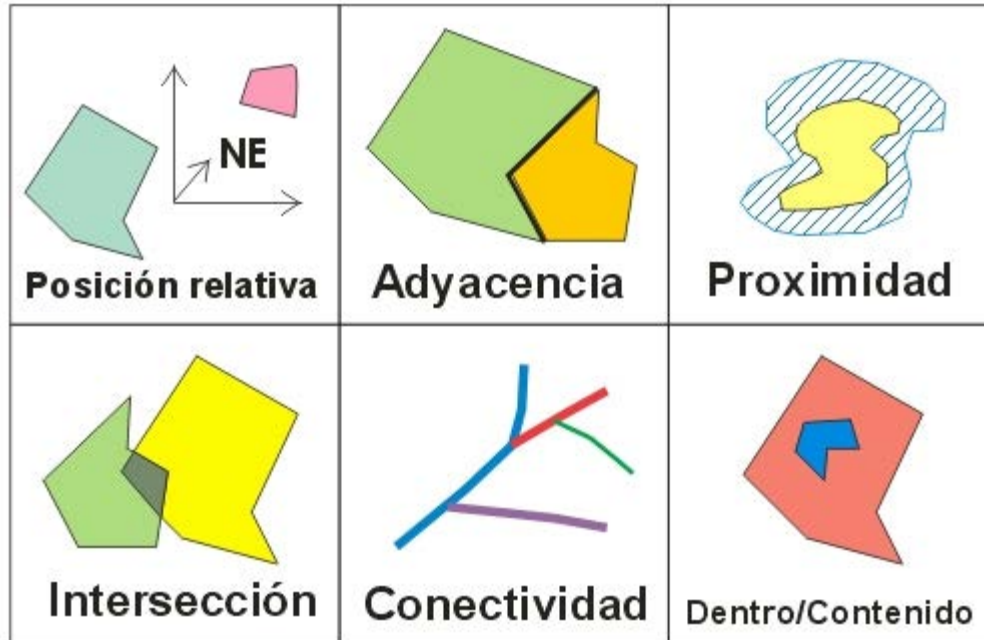


Figura 3.2-11 Algunas relaciones espaciales.

c) Ventajas y desventajas del modelado en raster respecto al vectorial

Una vez conocidos los modelos del espacio geográfico y el tipo de estructuras de datos a que pueden dar lugar, se plantea cual de los dos sistemas sería más ventajoso al proyecto en específico. Lo cierto es que cada modelo ofrece ventajas para diferentes aplicaciones. Muchas son las posibilidades aportadas por ambos modelos, así como sus limitaciones. Deberán evaluarse conjuntamente una serie de parámetros como: el presupuesto del proyecto, hardware y periféricos disponibles, el volumen de la base de datos y el tipo de procesamiento requerido para fundamentar la elección de determinado software de SIG.¹⁵ La elección de un modelo u otro vendrá condicionada por el tipo de información con que se va a trabajar, los tratamientos que se desean realizar y los resultados que se pretenden obtener. La elección de un modelo inadecuado disminuirá la eficacia del proyecto e imposibilitará la consecución de determinados objetivos.

Dadas las ventajas operativas aportadas por cada uno de los modelos de datos y en pro de la utilización extensiva de la información georreferenciada en cualquier formato, han aparecido los denominados Sistemas Híbridos. Dichos sistemas aprovechan las ventajas de los modelos vectoriales y raster, permitiendo la conversión y desarrollo de aplicaciones alternativas con ambos formatos.

En la Tabla 3.2-1 (Pág. 73) se muestran las ventajas y desventajas de ambos modelos. En líneas generales se pueden codificar las formas en un modelo vectorial y los procesos con un modelo raster. Resulta sencilla la visualización simultánea de datos en los dos formatos gracias a la capacidad gráfica actual. La Figura 3.2-12 (Pág. 74) muestra una comparación entre ambos modelos.

¹⁵ Burrough 1986, Aronoff 1989.

	SIG Vectoriales	SIG Raster
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Buena representación de los fenómenos espaciales. Favorecen el modelado complejo. • Espacio continuo cumpliendo los postulados de la Geometría Euclidiana (punto, línea y área). • La tecnología utilizada gradualmente tiene mayor difusión. • Estructuras compactas de datos. • Descripción topológica. • Representaciones gráficas de gran precisión. • Posibilidad de análisis de redes. • Cambios de proyección cartográfica casi de manera instantánea. • Existe gran cantidad de información en formato vectorial en México por el INEGI 	<ul style="list-style-type: none"> • Estructuras de datos sencillas. • Ocupan espacio discreto. • Posibilidad de implementación de diversos métodos de análisis espacial. • La simulación espacial es sencilla porque cada unidad espacial tiene el mismo tamaño y forma. • La tecnología utilizada es barata. • Mayor facilidad en la captación y procesamiento de los datos (imágenes de satélite y los modelos digitales de elevaciones). • Preferencia en aplicaciones ambientales. • Funciones apropiadas: Análisis de proximidad, modelado y simulación, intervisibilidad, operaciones booleanas de superposición, etc.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren equipos de gran precisión y elevado coste económico. • Estructuras complejas de datos. • Los procesos de generación de entidades espaciales son problemáticos requiriendo siempre la construcción topológica del mapa. • Los sistemas de representación de los datos son costosos, particularmente los que poseen mucha calidad (Plotter electrostático). • Dificultad en la captación de los datos. • Dificultad de procesamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Poca calidad y resolución de las salidas gráficas. • Pérdida de información por el uso de celdillas de tamaños grandes. • Los sistemas de redes son difíciles de implementar • Los cambios de proyección son muy costosos y lentos. • Existe relativamente poca información sobre su uso. • No hacen descripciones topológicas. • Se encuentran encasilladas sus aplicaciones al área ambiental.

Tabla 3.2-1 Ventajas y desventajas de los modelos raster vs. vectorial.

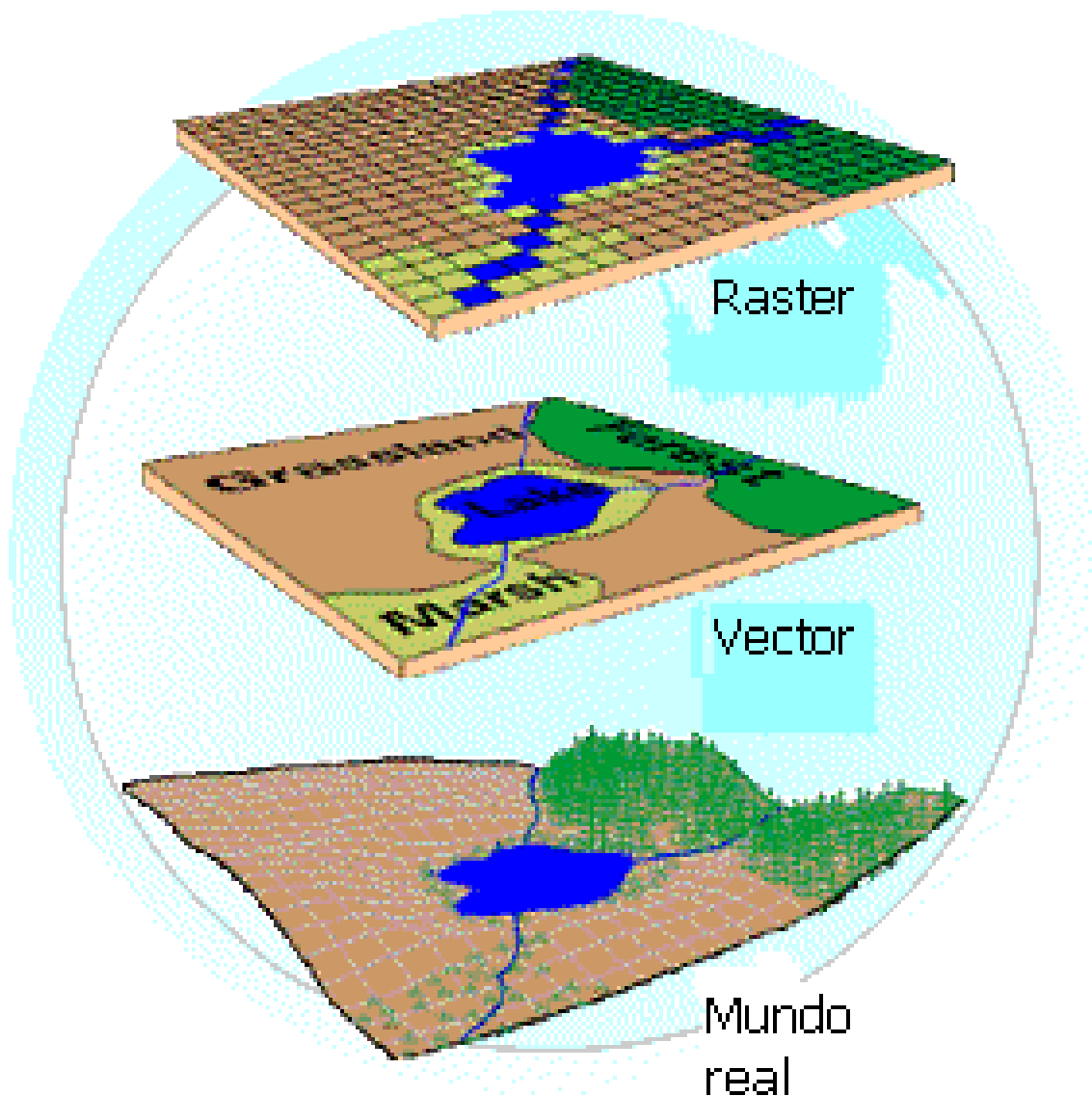


Figura 3.2-12 Comparación entre los modelos raster y vector en un SIG.

d) Escala y modelos lógicos de datos

El concepto tradicional de escala referente a la relación entre dos longitudes no tiene sentido en un SIG. Las herramientas de zoom de cualquier SIG permiten un cambio en la escala de representación en la pantalla o en una salida impresa, sin embargo esto no implica un cambio en la escala de los datos. En general se asume que se encuentra la escala de un SIG con la del mapa de escala inferior (si es que se han utilizado varios). No toda la información de entrada procede de mapas (puede provenir de conjuntos de puntos de muestreo o imágenes de satélite).

En los SIG se sustituye el concepto de *escala* por el de *precisión espacial de los datos*. En el caso del formato raster la precisión se relaciona claramente con el

tamaño de las celdillas. Si se hace un zoom excesivo aparecerán los bordes de las celdillas, lo que es advertencia de que la profundidad del zoom es inadecuada (Figura 3.2-13 y Figura 3.2-14). En el formato vectorial llega a suceder que el zoom es forzado para obtener una precisión ilusoria. En el caso de las mallas de puntos, la resolución se relaciona con la distancia media entre los puntos.



Figura 3.2-13 Curvas de nivel rasterizadas con tamaño de píxel demasiado grande

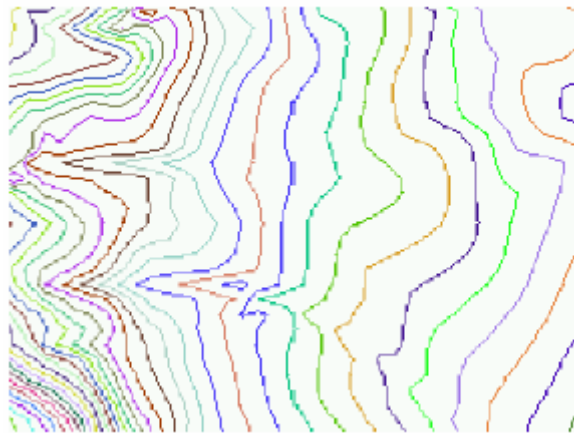


Figura 3.2-14 Curvas de nivel rasterizadas con tamaño de píxel adecuado

Todos los objetos espaciales dependen de la escala del mapa y del *tipo de abstracción* que se pretenda hacer; un mismo objeto varía sus dimensiones topológicas si se representa en mapas de distinta escala. Por ejemplo:

1. Una ciudad puede ser puntual o poligonal: sólo tendrá sentido considerarla poligonal en estudios de planificación urbana.
2. Un cauce fluvial puede ser lineal o poligonal: para casi todas las aplicaciones hidrológicas tiene más sentido representar los cauces como objetos lineales y codificar su anchura-profundidad como propiedades espaciales.

La Figura 3.2-15 muestra el polígono que conforma al estado de Morelos convertirse en un punto cambiando su escala, de igual manera, un tramo carretero poligonal, puede percibirse como lineal o poligonal.

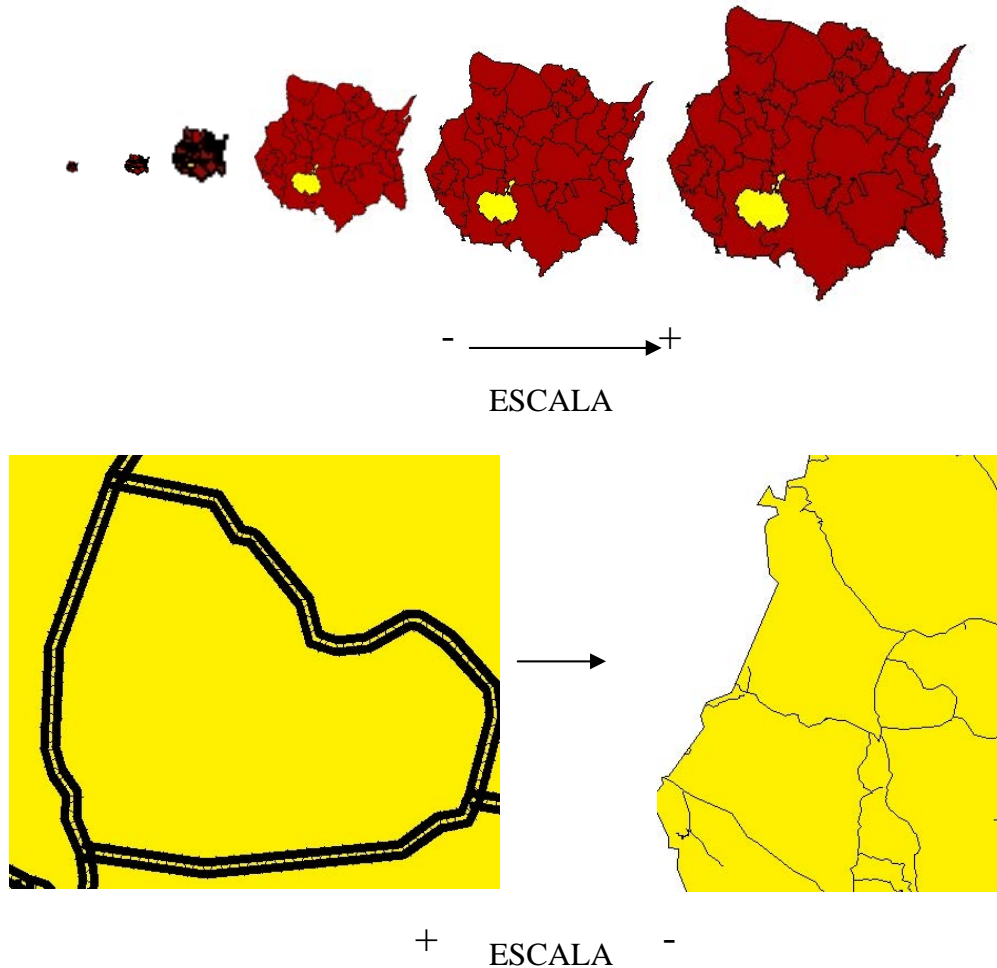


Figura 3.2-15 Relación de la escala con los objetos espaciales

3.2.3 Nivel de modelación digital.

Se basa en estructuras de datos y algoritmos. Requiere conocimiento profundo sobre las herramientas y lenguaje de programación. Aquí se desarrollan los *modelos dinámicos* de tecnología SIG y es donde los informáticos, y desarrolladores expertos de SIG amplían el repertorio de herramientas para cumplir al máximo con las necesidades.

Cada uno de los modelos lógicos puede implementarse dando lugar a estructuras de datos diversas y por tanto incompatibles para los diferentes programas manejadores de SIG. Los formatos de archivos pueden ser públicos (resultando más sencillo desarrollar herramientas de importación-exportación) o privados (para implementar dichas herramientas hay que pagar derechos).

a) Modelación de variables espaciales compuestas¹⁶

Existen redes de diverso tipo. Por ejemplo, las *redes de drenaje* pertenecen al tipo de los árboles orientados (grafo sin circuitos donde los flujos sólo se desplazan en un sentido). Las redes de drenaje están formadas por un conjunto de cauces (líneas) con características propias que explican el modo del transporte de los flujos (Figura 3.2-16).

Otro tipo son las *redes de comunicaciones*, que se definen como redes de carreteras (líneas) de diverso tipo y un conjunto de ciudades (nodos) que conectan (Figura 3.2-17, Pág. 78).

Otro tipo de modelación más compleja, es la agrupación de objetos simples y compuestos que tienen algún tipo de relación: transmisión de flujos de materia, energía y/o información. Una *cuenca hidrográfica* (Figura 3.2-18, Pág. 78) puede considerarse como un área sobre la que se sitúan superficies, mapas de polígonos y una red de drenaje, estableciéndose relaciones de transferencia de materia y energía entre el área (escorrentía superficial) y la red de drenaje.

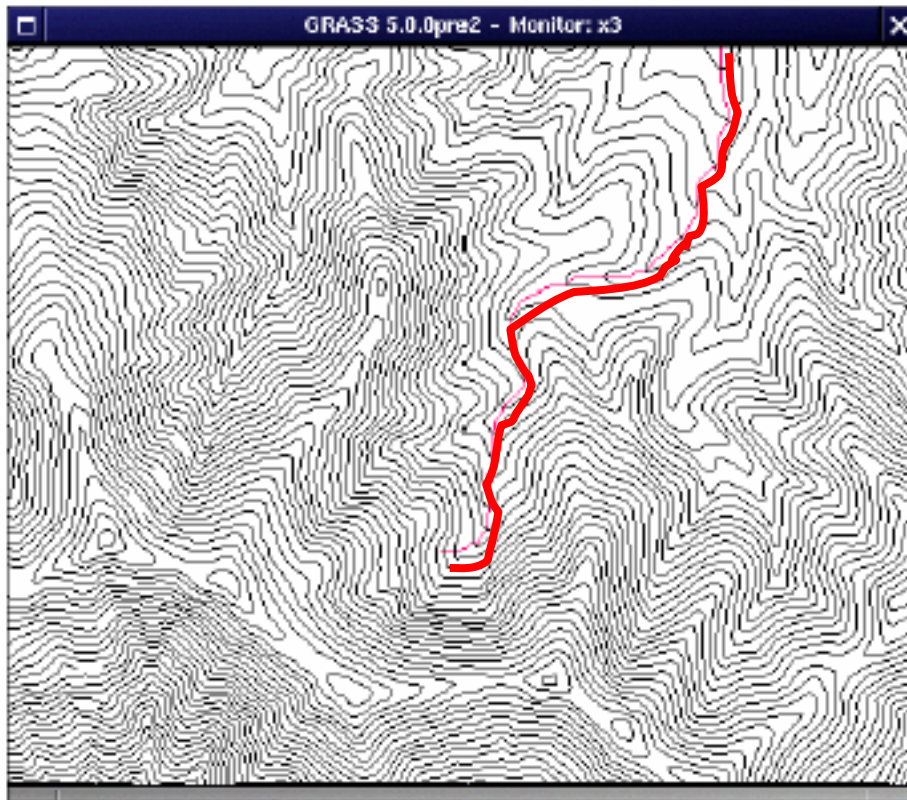


Figura 3.2-16 Trayectoria del agua a partir de un punto

¹⁶ Despotakis (1993) pp. 168-193.

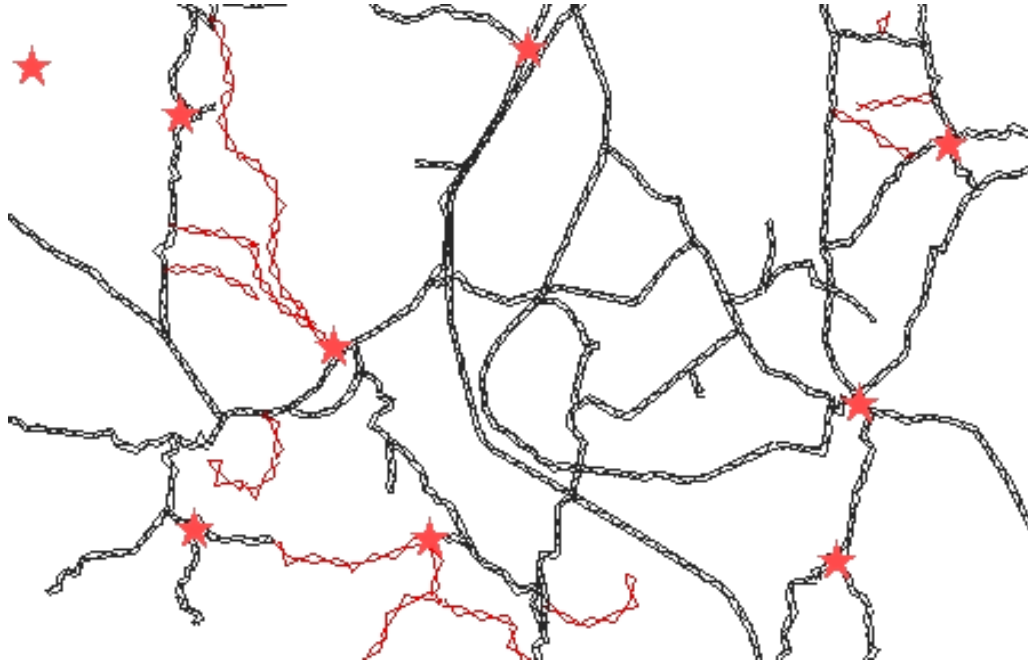


Figura 3.2-17 Red de comunicaciones



Figura 3.2-18 Obtención de cuencas y redes de drenaje

Las operaciones topográficas en los SIG se basan en el procesamiento de la información digital correspondiente a las características topográficas de la superficie terrestre (Modelos Digitales de Elevación) para la derivación de

nuevas variables: pendiente, orientación, iluminación, visibilidad, cuencas de drenaje y cálculo de volúmenes.

3.3 RECOLECCIÓN, PRETRATAMIENTO E INGRESO DE LA INFORMACIÓN¹⁷

Previo a la entrada de datos en un SIG la información se ha definido, reunido y ordenado. Los datos deben convertirse del *formato analógico* (el formato obtenido directamente del mundo real: mapas, datos obtenidos de sensores remotos y otras fuentes) al *formato digital* (en lenguaje binario a base de 1 y 0). Esta conversión debe mantener en lo posible todas las características iniciales de los datos espaciales.

Entre los diferentes dispositivos comúnmente utilizados para esta operación están los digitalizadores (Figura 3.3-1). Dado su costo relativamente bajo, eficiencia y facilidad de operación, son la mejor opción para el pretratamiento de datos. La nueva tecnología de escáneres, puede automatizar el proceso utilizando el reconocimiento de patrones, además de existir procedimientos que permiten eliminar errores o redundancias en la información incorporada al SIG. Sin embargo, algunos trabajos siempre requerirán la digitalización manual o *vectorización* de archivos (Figura 3.3-2, Pág. 80).

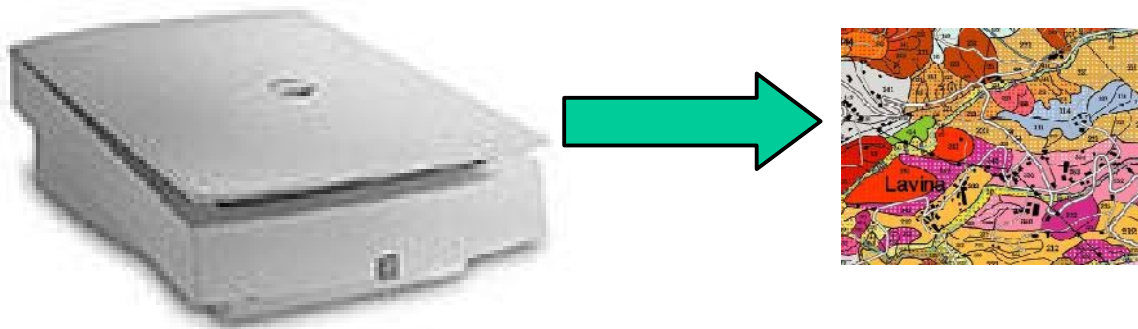


Figura 3.3-1 Digitalización de cartografía a través del escáner

Existen dos tipos de datos que se pueden ingresar en los SIG: las *referencias geográficas* y los *atributos*.

Los datos de referencias geográficas son las coordenadas (en términos de latitud y longitud o columnas y líneas) que fijan la ubicación de la información.

Los datos de atributos asignan un código numérico a cada casilla o conjunto de coordenadas y a cada variable, para representar los valores actuales (200 mm de precipitación, 1.250 metros de elevación) o connotar tipos de datos categóricos (usos del terreno, tipo de vegetación, etc.).

La rutina de recolección, pretratamiento e ingreso de datos requiere una cantidad considerable de tiempo y recursos.

¹⁷ Herring (1991) pp. 126-139; Jones (1996) pp. 54-68.



Figura 3.3-2 Vectorización mediante tableta digitalizadora.

3.3.1 Procesos para la obtención de los datos

En la actualidad existe gran cantidad de datos geográficos en distintos formatos que son compatibles con los SIG pues se obtienen de fuentes externas y es posible cargarlos directamente al sistema sin mayor complicación. En general, se encuentran seis procesos para la captura:

1. *Procesos Topográficos*: se capturan mediante el GPS ¹⁸ para generar coordenadas geográficas.
2. *Digitalización*: Conversión de datos análogos a digitales bajo un mismo sistema de coordenadas.
3. *Vectorización*: Conversión de datos espaciales a una estructura vectorial.
4. *Procesos Informáticos*: Generación de mapas en papel o formato digital a partir de los datos obtenidos de los procesos anteriores, como los *procesos Fotogramétricos* ¹⁹ y los de *Teledetección*²⁰ o de *sensores remotos* (imágenes de satélite).
5. *Importación*: desde otros sistemas de información.
6. *Transformación*: Los datos requeridos para un proyecto SIG dependen de las necesidades, en muchos casos es necesaria una transformación para lograr compatibilidad con el sistema. La información geográfica que se encuentra disponible en diferentes *escalas* debe integrarse y transformarse a una sola para poder manipularla. Este tipo de transformaciones puede ser temporal (si únicamente se utiliza para un despliegue) o definitiva (si se hace algún análisis específico). La tecnología SIG ofrece muchas herramientas para la transformación de datos espaciales.

¹⁸ Global Positioning System (GPS), Sistema de Posicionamiento Global.

¹⁹ Procesos Fotogramétricos: La captura de datos se realiza a partir de fotografías aéreas.

²⁰ Procesos de Teledetección: La captura de datos se realiza a partir de imágenes de satélite.

3.3.2 Creación de la Base de datos.

El conjunto de datos espaciales y descriptivos constituye la *base de datos*, esta es la componente principal sobre la que se basan los análisis y resultados producidos con el Sistema de Información Geográfica.

Los datos espaciales, se refieren a la forma y localización de un elemento geográfico, los datos descriptivos son las características de cada elemento.

La creación de la *base de datos (BD)* se refiere a como los datos espaciales y temáticos son estructurados y organizados dentro del SIG de acuerdo a la ubicación, interrelación y diseño de atributos. El objetivo de una BD es almacenar grandes cantidades de datos organizados siguiendo un determinado esquema o "*modelo de datos*" que facilite su almacenamiento, recuperación y modificación

Las computadoras permiten gran cantidad de almacenamiento, en disco duro o en discos portátiles. Para pequeños proyectos SIG, puede ser suficiente almacenar información geográfica como simples archivos. Pero cuando los volúmenes de datos llegan a ser grandes con menor cantidad de usuarios, lo mejor es utilizar un *sistema manejador de base datos* como auxiliar en el almacenaje y organización de los datos (Figura 3.3-3).

Las bases de datos temáticas almacenan el conjunto de datos descriptivos, y asignan a cada objeto (representado en formato vectorial o raster) diversos atributos temáticos cualitativos o cuantitativos. (Consulte el Apéndice C).

La representación que la BD hace de la realidad condiciona la estructura y el modo de trabajo posterior. Actualmente se tiende a compaginar los modelos raster y vectoriales para conseguir mayor versatilidad.

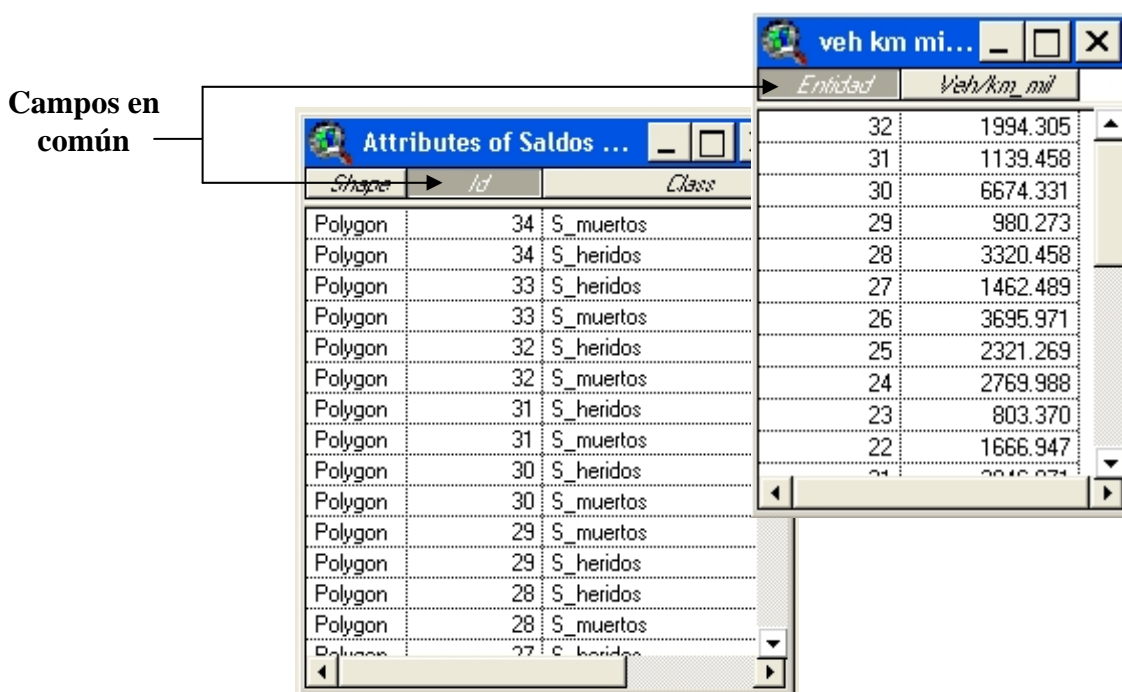


Figura 3.3-3 Manipulación de la información espacial y descriptiva en un SIG

Un *dato espacial* se puede descomponer conceptualmente en tres elementos:

1. El *fenómeno* o la *característica en sí*, como: la variable, su clasificación, valor, nombre, etc.
2. Su *ubicación espacial*, la posición que ocupa en el *espacio geográfico*.
3. El *tiempo*, los datos de localización y los atributos muchas veces cambian independientemente con respecto al tiempo.

Para manejar efectivamente los datos espaciales se requiere que los *datos de localización* y los *atributos* sean *variables e independientes entre sí*. Es decir, los atributos pueden cambiar de naturaleza pero conservan su posición espacial o viceversa.

Las bases de datos²¹ en los SIG pueden manejar de 2 formas distintas los datos espaciales:

- 1) Los *datos de localización* se consideran como un atributo adicional relacionado con las características geográficas.
- 2) La *posición geográfica* de una característica se mantiene separada de los *atributos* de dicha característica. Este último método ofrece mayor flexibilidad en cuanto al manejo de los cambios relacionados con el tiempo en los datos específicamente.

Las bases de datos en los Sistemas de información Geográfica, pueden ser de tres tipos: *temáticas, espaciales y relacionales*.

a) Bases de datos temáticas.

Asignan a los objetos en formato vectorial o raster, diversos atributos temáticos cualitativos o cuantitativos. Son ficheros formados por varias tablas similares a una hoja de cálculo, relacionadas por algún campo común. El acceso es complejo y suele hacerse mediante lenguajes de consulta, el más utilizado es el SQL²².

Las bases de datos temáticas se introducen mediante teclado, escáner o importación desde otros ficheros (Access, Postgres, Dbase, Excel, etc.).

b) Bases de datos espaciales.

Normalmente a cada objeto definido en la base de datos espacial se le asigna un identificador único, no un valor. Éste servirá para enlazar el objeto con una fila de una tabla almacenada en una base de datos, generalmente relacional, en la que cada fila representa los objetos en un mapa (líneas, puntos o polígonos) y cada variable. La Figura 3.3-4 (Pág. 83) muestra una representación de las bases de datos espaciales y temáticas en los SIG.

c) Bases de datos relacionales.

El trabajo en un SIG vectorial se basa en el enlace de dos bases de datos, una espacial (de uno o más mapas vectoriales) y otra temática (formada por una o

²¹ Jones, Kidner, Luo, Bundy, Ware (1996) cap 1, 2, 3.

²² Structured Query Language, Lenguaje Estructurado de Consultas.

varias tablas). El enlace se realiza mediante una columna en la base de datos que contiene los identificadores de los polígonos.

Una *base de datos relacional* es básicamente un conjunto de tablas, similares a las de una hoja de cálculo, formadas por filas (registros) y columnas (campos). Los registros representan cada uno de los objetos descritos en la tabla y los campos los atributos (variables de cualquier tipo) de los objetos. En este modelo, las tablas comparten algún campo entre ellas, esto sirve para establecer relaciones que permitan consultas complejas (Figura 3.3-5, Pág. 84).

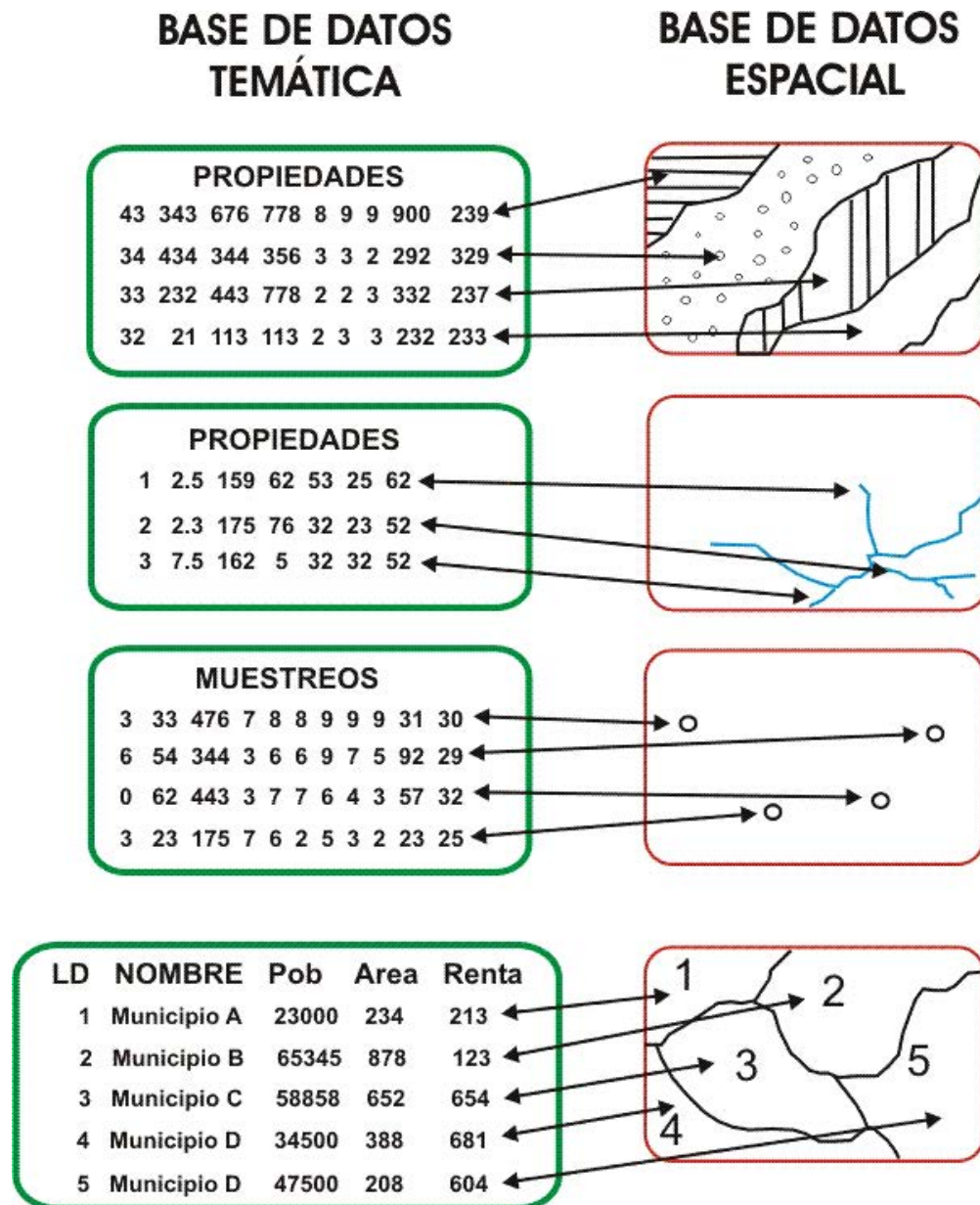


Figura 3.3-4 Esquema de la base de datos en un SIG.

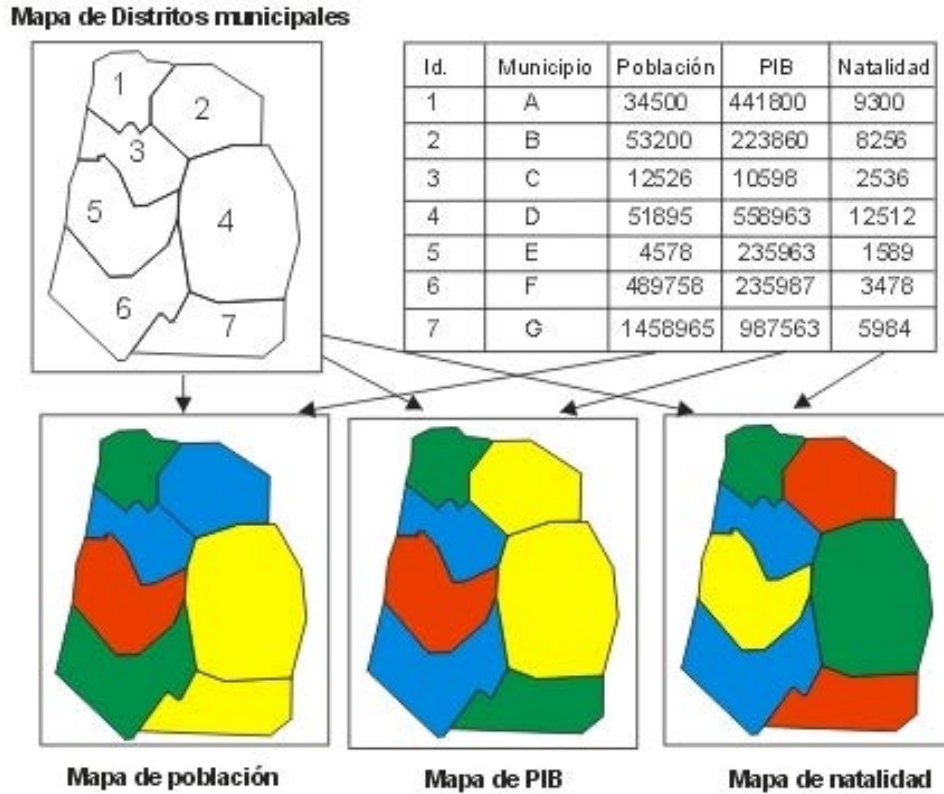


Figura 3.3-5 Enlace de las bases de datos que integran a un SIG vectorial.

Un ejemplo de base de datos relacionada en un SIG, es que una tabla almacene los datos espaciales con un identificador (ID) y otra contenga los datos descriptivos importantes para el análisis (Figura 3.3-6).

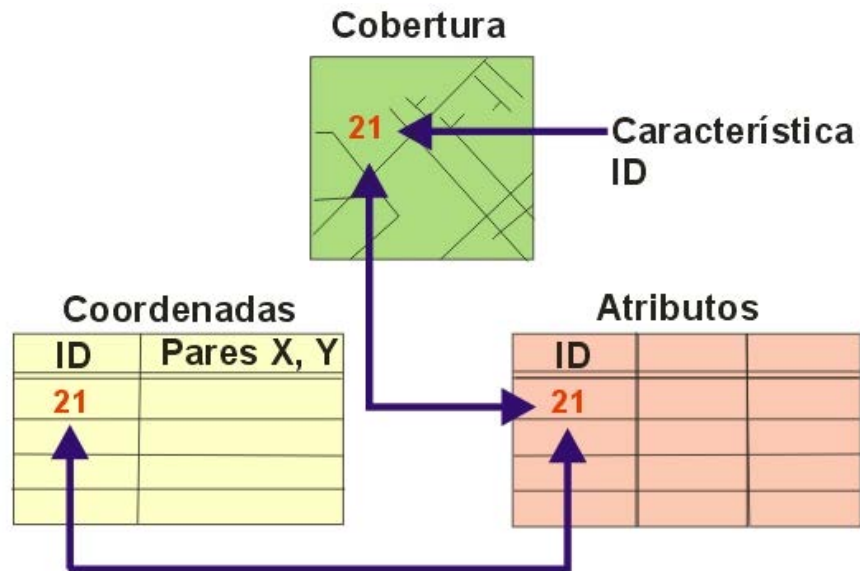


Figura 3.3-6 Relación entre datos espaciales y atributos

La información espacial generada por el SIG a partir de la localización puede almacenarse como nuevas tablas en la base de datos para futuras consultas.

d) Ventajas en el uso de bases de datos.

La utilización de bases de datos como plataforma para el desarrollo de los SIG en las organizaciones se ha incrementado notablemente en los últimos años debido a las ventajas que ofrecen, algunas son:

- *Globalización de la información:* permite a los diferentes usuarios considerar la información como un recurso corporativo que carece de dueños específicos.
- *Eliminación de información inconsistente:* si existen dos o más archivos con la misma información, los cambios que se hagan a éstos se actualizan en todas las copias del archivo.
- *Mantiene la integridad en la información:* lo que es una cualidad altamente deseable y tiene por objetivo que sólo se almacena la información correcta.
- *Independencia de datos:* este concepto es quizá el que más ha ayudado a la rápida proliferación del desarrollo de los Sistemas de Bases de Datos. La independencia de datos implica autonomía entre programas y datos.

3.4 ANÁLISIS Y CONSULTA DE LA INFORMACIÓN²³

Incluye la manipulación y procesamiento de los datos. La manipulación abarca dos tipos de operaciones:

1. *Operaciones de edición* para eliminar errores y actualizar conjuntos de datos.
2. *Operaciones de análisis y consulta* para dar respuesta a preguntas específicas formuladas por el usuario.

El proceso de manipulación puede ser desde una simple sobreposición de dos o más mapas, hasta una extracción compleja de elementos de información dispares provenientes de una gran variedad de fuentes.

Las funciones de manipulación son particulares de cada programa SIG y deben permitir en general la edición y actualización de la información. Algunas son:

- Mecanismos para la edición de entidades gráficas (cambio de color, posición, escala, dibujo de nuevas entidades gráficas, etc.).
- Mecanismos para la edición de datos descriptivos (modificación de atributos, cambios en la estructura de archivos, actualización de datos, generación de nuevos datos, etc.).
- Operaciones geométricas para el manejo de coordenadas terrestres por medio de operadores lógicos y aritméticos. Algunas de esas

²³ Koeln, Cowardin, Strong (1994) pp. 226-245; López (1998) pp. 91-106.

operaciones son: proyecciones terrestres de los mapas, transformaciones geométricas (rotación, traslación, cambios de escala), precisión de coordenadas, corrección de errores.

El análisis y consulta permite realizar las operaciones analíticas necesarias para producir nueva información con base en la existente, para dar solución a un problema específico. Un SIG enlaza datos espaciales y descriptivos, con los mapas como soporte se pueden desplegar objetos geográficos y sus descripciones, consultas a la base de datos, reportes y además se pueden realizar análisis espaciales

Ejemplos que ilustran las relaciones entre información espacial y descriptiva:

- La localización de un río y su nombre.
- La localización de un puente y su ancho.
- La localización de un espacio de área abierta y su tipo de vegetación.

El análisis espacial incluye las funciones que realicen cálculos sobre las entidades gráficas. Va desde operaciones sencillas como longitud de una línea, perímetros, áreas y volúmenes, hasta análisis de redes de conducción, intersección de polígonos y análisis de modelos digitales del terreno.

Las formas de extraer o recuperar información de los SIG son muy variadas y pueden llegar a ser muy complejas. Las formas básicas para extraer la información son²⁴:

3.4.1 Extracción mediante especificación geométrica.

Extrae datos descriptivos y atributivos que conforman una capa de información del SIG mediante la especificación de un dominio espacial definido por un punto, una línea o un área deseada. La Figura 3.4-1 (Pág. 87) muestra una operación de *Identificación* sobre un objeto. Recupera mediante una tabla datos atributivos y descriptivos.

3.4.2 Extracción mediante condición geométrica

Consiste en extraer mediante un dominio espacial y una condición geográfica entidades gráficas. Por ejemplo: las poblaciones que se encuentren en un radio de 5 Km al rededor de una toma de agua. Otras extracciones mediante condición geométrica son:

a) *Contigüidad*

Encuentra áreas vecinas a una región determinada (polígonos de Thiessen).

b) *Conectividad*.

²⁴ Maguire, Goodchild, Rhind (2001) cap. 4.

Análisis sobre entidades gráficas que representen redes de conducción, tales como:

1. *Enrutamiento*: Comportamiento de un elemento a lo largo de la red.
2. *Radio de acción*: Alcance del movimiento del elemento dentro de la red.
3. *Apareamiento de direcciones*: Acople de información de direcciones a las entidades gráficas.
4. *Análisis de redes*²⁵: Localización de rutas óptimas, solo es aplicable a elementos con forma espacial y topológica de líneas y arcos, además que todo el sistema debe estar interconectado por elementos lineales que formen una estructura espacial por la que pueden pasar flujos de algún tipo en donde el atributo principal sea la longitud.

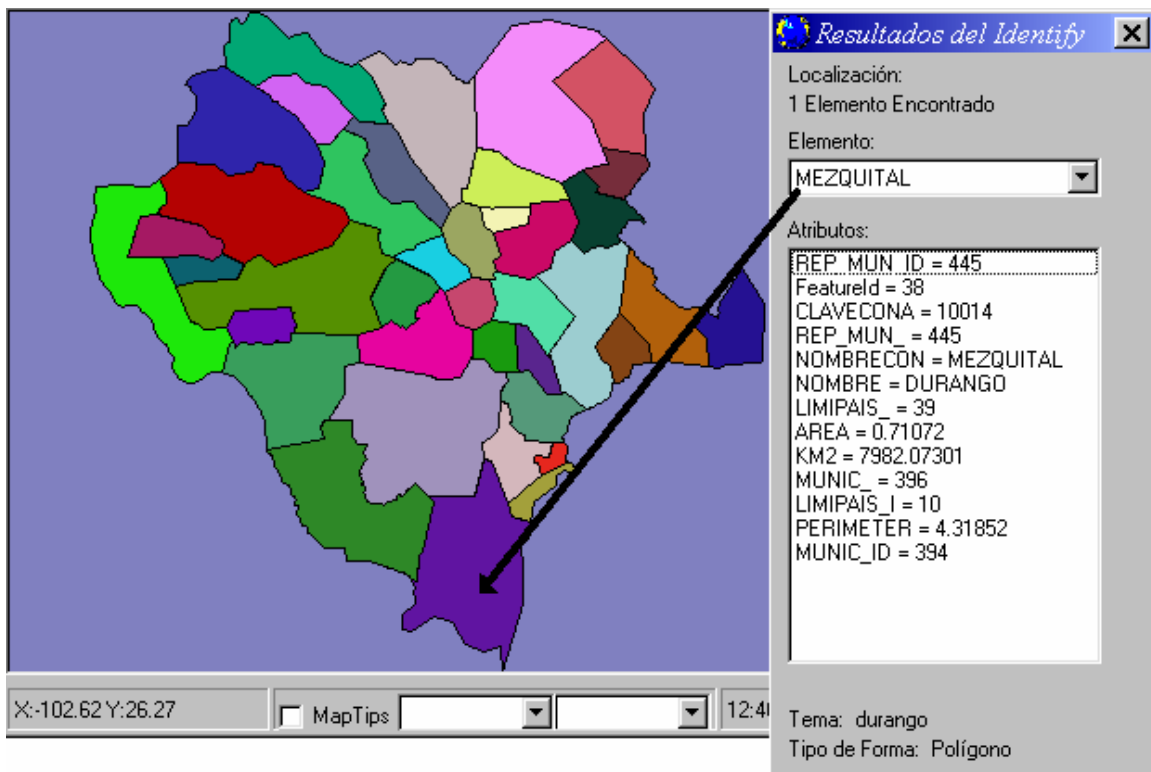


Figura 3.4-1 Identificación de un objeto espacial.

La Figura 3.4-2 (Pág. 88) muestra un análisis de redes sobre la ruta óptima para viajar de un punto especificado a otro, toma en cuenta factores como el tiempo, distancia y tránsito.²⁶

²⁵ Mitchell (1997) cap. 2, 3 y 6.

²⁶ <http://www.esri.com>

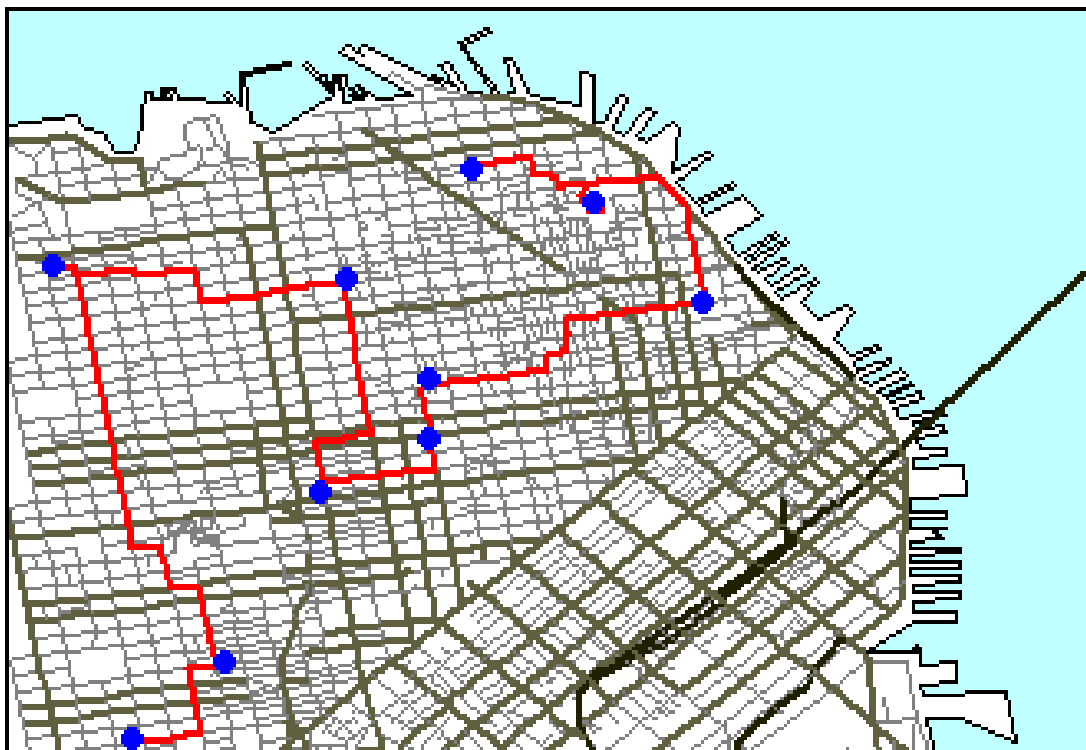


Figura 3.4-2. Análisis de redes.

Análisis de proximidad: Realiza peticiones como: determinar el número total de clientes que se encuentran ubicados a más de 10 Km. de una compañía. Los SIG utilizan un proceso llamado “*buffering*”, que determina las relaciones de proximidad entre los elementos.²⁷ Figura 3.4-3: banda búfer de 60 m. que determina los predios se encuentran a 60 m. de la carretera. Figura 3.4-3.



Figura 3.4-3 Análisis de proximidad y sobreposición en los SIG

²⁷ Moolenaar (1998) pp. 159-180.

Los diversos tipos de análisis de proximidad serán vistos en el siguiente capítulo con detalle.

5. *Análisis de sobreposición*: Integra diferentes capas de información (suelos, vegetación, poblados, etc.) a través de operaciones analíticas obteniéndose una capa nueva en función de las originales. Figura 3.4-4: Análisis de intersección para ubicar ciudades pertenecientes a una región de estudio.

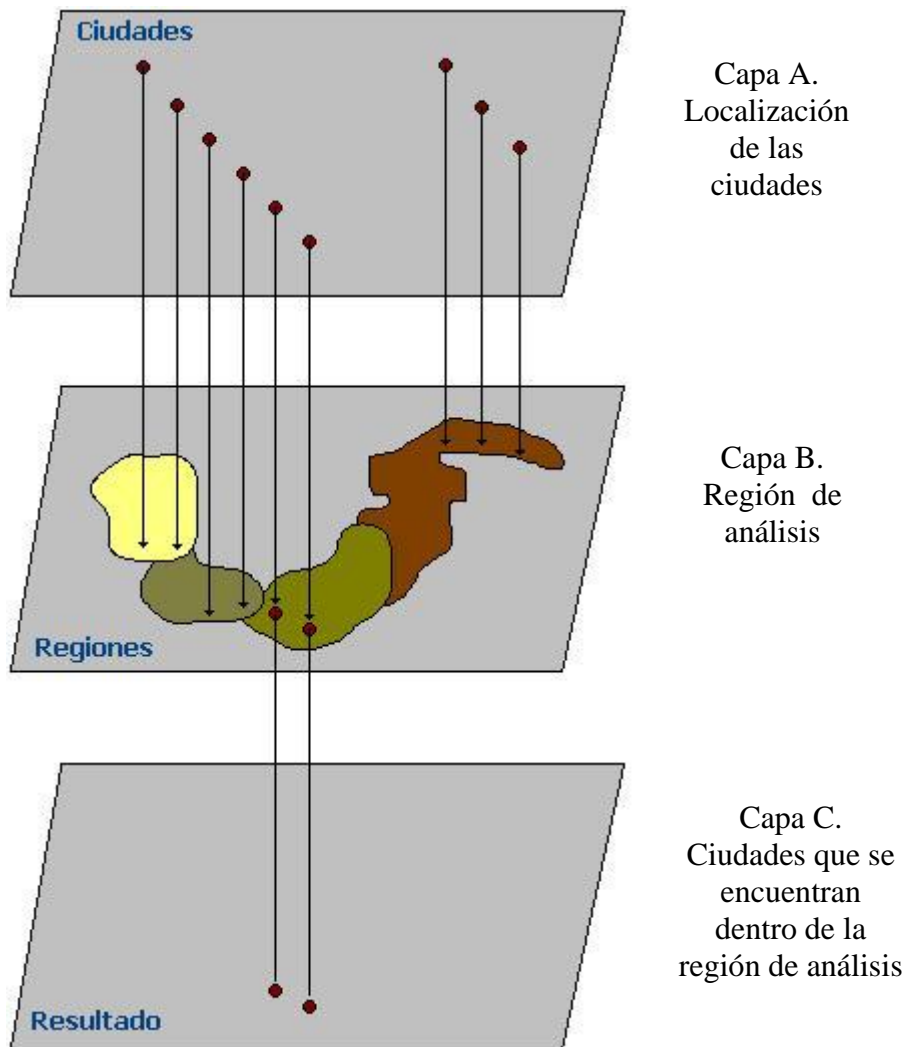


Figura 3.4-4 Localización espacial a través de intersección.

3.4.3 Extracción mediante especificación descriptiva.

Es la extracción de las entidades espaciales que satisfagan una condición descriptiva determinada. Por ejemplo, la identificación de una manzana consultando su dirección en la BD (Figura 3.4-5, Pág. 90).²⁸

²⁸ Antenucci (1991) pp. 41-56.

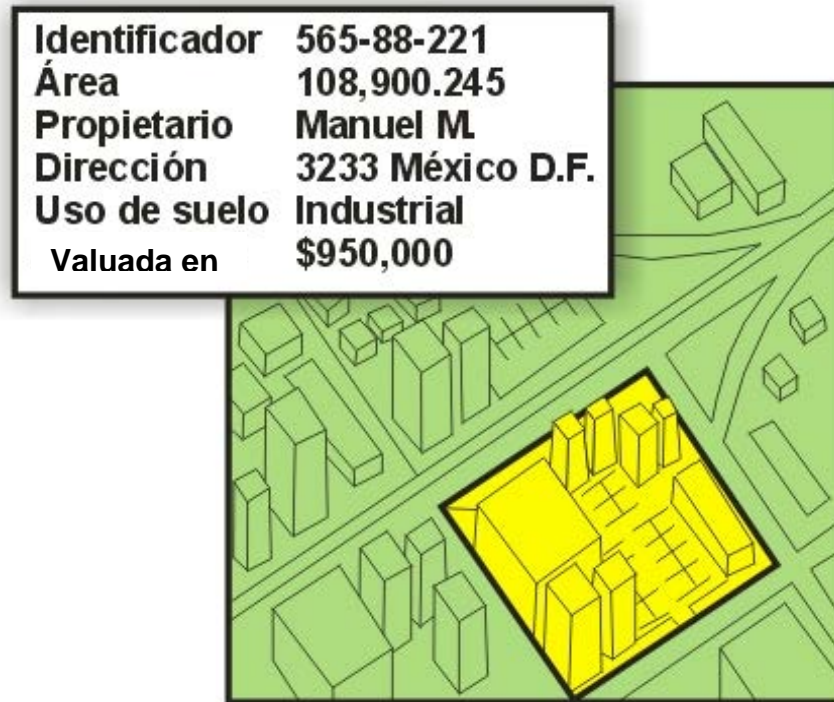


Figura 3.4-5 Recuperación de datos espaciales a través de una consulta espacial

3.4.4 Extracción mediante condición descriptiva o lógica.

Es posible hacer extracciones de entidades espaciales que cumplan una condición descriptiva o una expresión lógica cualquiera relacionada con uno o varios de sus atributos espaciales asociados. Por ejemplo, todos los predios que pertenezcan al mismo dueño, con áreas superiores a 500 hectáreas y perímetro superior a 10.000 metros. SQL (Figura 3.4-6, Pág. 91) es un lenguaje estándar para la consulta a bases de datos relacionales, es sistemático y sencillo e incluye diversas capacidades:

- Comandos para inserción, borrado o modificación de datos.
- Capacidades aritméticas: Incluir operaciones aritméticas y restricciones, por ejemplo $A > B + 3$.
- Asignación y comandos de impresión: Imprime o almacena tablas construidas por consultas.
- Funciones agregadas: Operaciones tales como promedio (average), suma (sum), máximo (max), etc. se pueden aplicar a las columnas de una tabla para obtener una cantidad única y, a su vez, incluirla en consultas más complejas.
- Consultas complejas que involucran diversas tablas relacionadas por un campo común.
- Pueden combinarse varias tablas mediante operaciones de SQL más complejas. Cuando se combinan tablas suele introducirse un *alias* simplificado para las tablas (la primera letra por ejemplo).

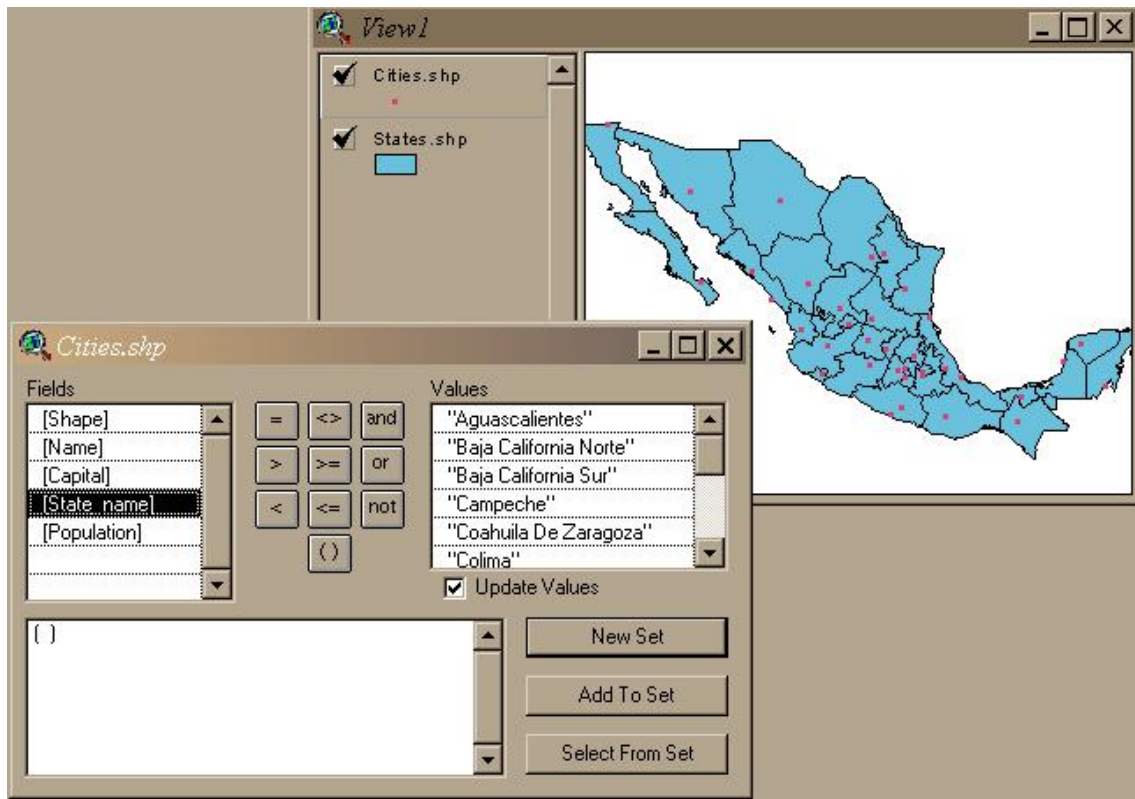


Figura 3.4-6 Manejo del SQL en un SIG.

Este tipo de consulta, se logra después de especificar la localización de algún elemento, así es posible utilizar información atributiva para localizar otros elementos. El SIG determina que localizaciones satisfacen las condiciones y las despliega ya sea de manera gráfica o a través de una lista, o en algunas ocasiones ambos casos de acuerdo al tipo de petición que se haya realizado.

Es posible especificar un conjunto de condiciones a través de:

- Hacer una selección desde un conjunto predefinido de opciones.
- Escribir expresiones lógicas
- Completar formas interactivamente o sobre una terminal.

En el siguiente ejemplo (Figura 3.4-7, Pág. 92) se muestran cuatro condiciones que han sido especificadas por localizar y el SIG despliega todas las manzanas que contiene en su base de datos a través de este criterio. La propiedad debe ser:

1. Zona residencial
2. Valorada en menos de \$200,000
3. Encontrarse dentro de la zona postal 02040

Una típica consulta condicional realizada en lenguaje SQL sería:

Uso de suelo = Residencial and Costo < 200,000 and Zona Postal = 02040

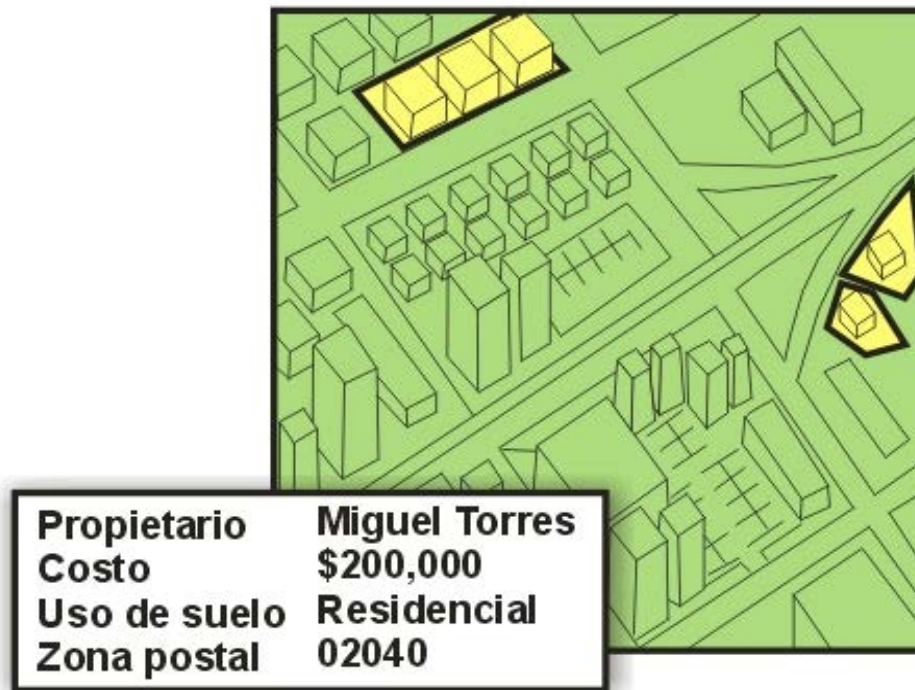


Figura 3.4-7 Identificación de objetos espaciales a través de atributos o condiciones

3.5 SALIDA Y REPRESENTACIÓN²⁹

El resultado final de las operaciones geográficas son dos tipos de representaciones:

1. *Gráficas* (mapas, gráficos y diagramas), y
2. *Textuales* (tablas con información almacenada en la BD y resultados de algún análisis efectuado sobre esta).

Existen diferentes soportes para las representaciones: *formato analógico* (impreso) o *formato digital* (electrónico). Mediante su combinación apropiada se pueden construir los denominados *Modelos Cartográficos*, que permiten resolver cuestiones de carácter espacial.

El sistema debe proveer: 1) La capacidad de complementar la información gráfica, por medio del uso de simbología adecuada y; 2) La posibilidad de adicionar elementos geométricos (escala, norte, coordenadas, etc.) que permitan visualizaciones comprensibles por el usuario.

²⁹ Hearnshaw (1994) cap. 5.

La forma de representación más utilizada en un SIG es la *cartográfica*, con dos funciones: 1) Interpretar fenómenos naturales - sociales y; 2) Ofrecer conocimientos sobre la distribución, curso, vínculos y desarrollo. Ambas conforman el *contenido del mapa*.

Ejemplo 1.

Son *elementos del contenido* de los mapas topográficos: las aguas y el relieve de la superficie terrestre, la cobertura vegetal, las ciudades, las vías de comunicación, aspectos de la industria, de la agricultura, de la cultura y de la división política y administrativa.

Ejemplo 2.

La Figura 3.5-1 (Pág. 94) muestra una representación del estado de Morelos confeccionado mediante operaciones espaciales en un SIG. Se observa la distribución por clases del área de cada municipio, los más oscuros son los de mayor extensión.

Existen varias formas de representación cartográfica³⁰ en los SIG: Símbolos únicos, valores únicos, colores graduados, densidad de puntos y símbolos de gráficos.

3.5.1 Símbolos únicos³¹

Despliega todos los elementos del contenido usando el mismo símbolo o color. Es útil cuando sólo se requiere mostrar la localización en lugar de cualquiera de los atributos. En la Figura 3.5-2 (Pág. 94) se muestran todos los municipios y cabeceras municipales del estado de Morelos utilizando la forma de representación de símbolos únicos.

3.5.2 Valores únicos

Despliega datos categóricos que coinciden en un valor (país, estado, territorio de venta, etc.). En la Figura 3.5-3 (Pág. 95) a los municipios se le asignó un color en función del estado al que pertenece.

3.5.3 Colores graduados³²

Despliega los elementos usando gamas de colores. Son necesarios datos numéricos con una progresión (como la temperatura, altura, población o ventas anuales). La Figura 3.5-4 (Pág. 95) muestra una progresión en función del porcentaje de población de los municipios del estado de Morelos.

³⁰ Los mapas que a continuación se muestran fueron realizados en Arcview® gracias a información proporcionada por el laboratorio de transporte de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

³¹ Mac Eachren (1994) cap. 2.

³² Monmonier (1982) pp. 254-280.

Municipios, Nombre y Área

ÁREA TOTAL DEL ESTADO
487,203.98KM2

- Cabeceras
- Municipios
- 0% - 0.8%
- 0.8% - 1.8%
- 1.8% - 3.2%
- 3.2% - 6%
- 6% - 11.1%

PORCENTAJE CON
RESPECTO AL
ÁREA TOTAL

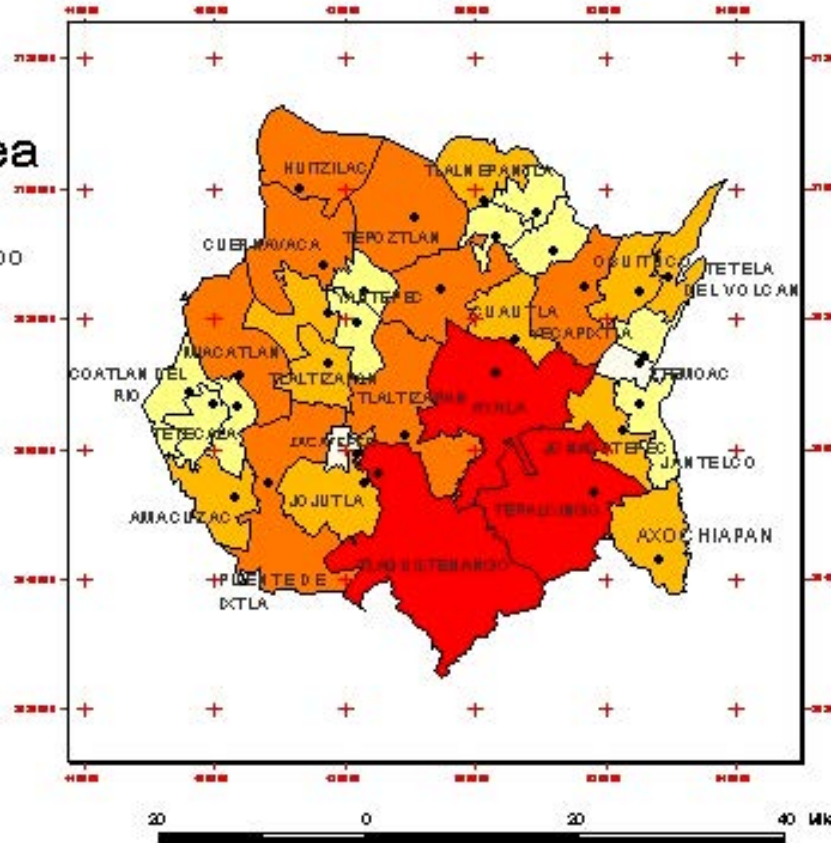
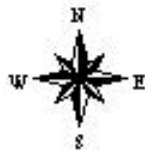


Figura 3.5-1 Representación de un mapa temático hecho mediante técnicas de SIG.

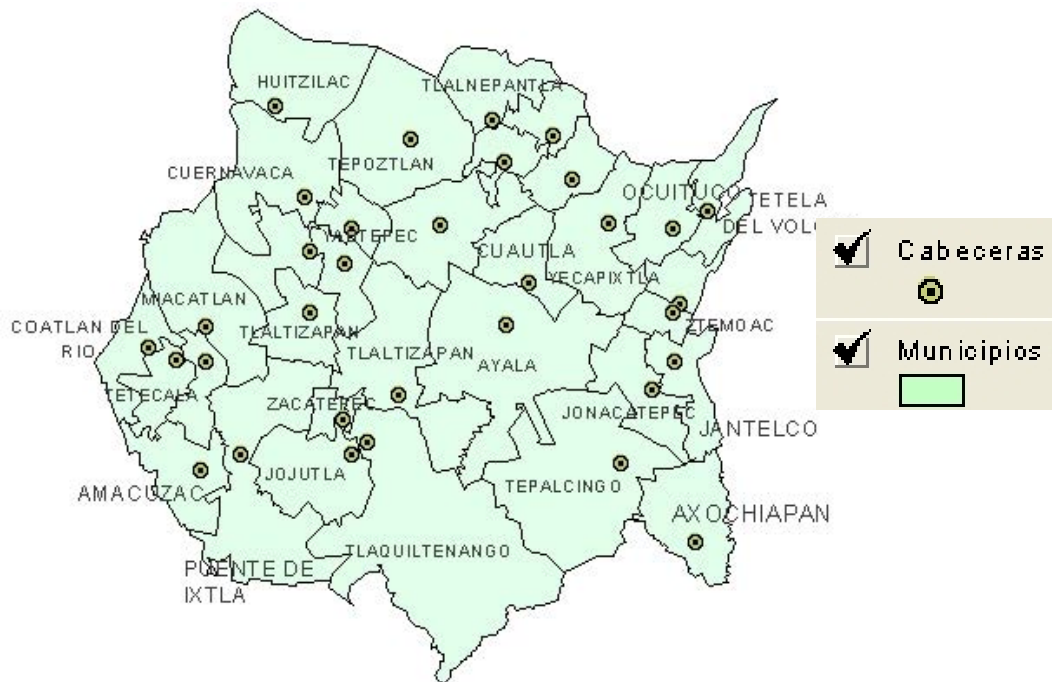


Figura 3.5-2 Representación cartográfica de símbolos únicos, Edo. de Morelos.

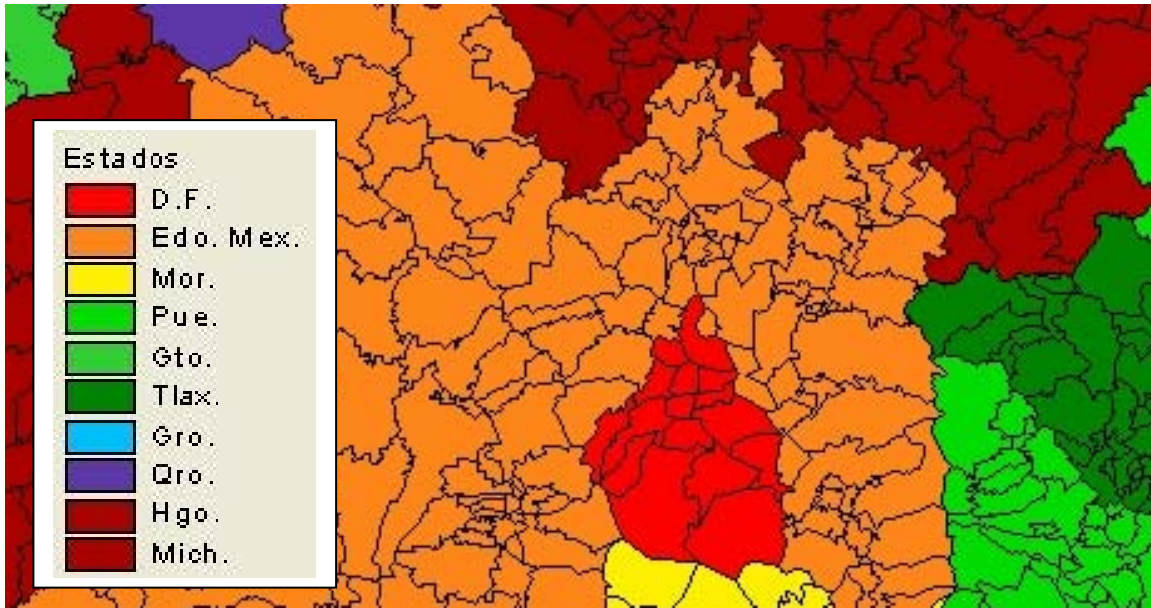


Figura 3.5-3 Representación de valores únicos de los municipios de los estados colindantes del D.F.

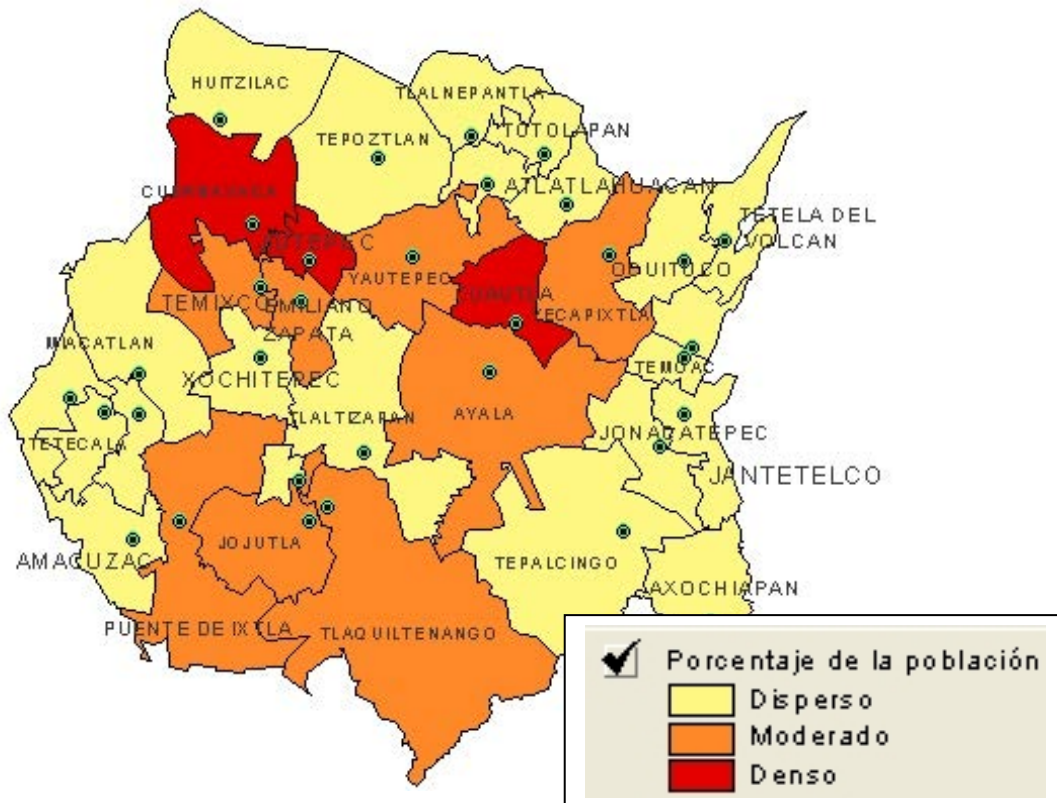


Figura 3.5-4 Colores graduados

3.5.4 Símbolos graduados

Despliega elementos usando símbolos únicos ofreciendo una gama de tamaños que representan una progresión de valores. Es útil para datos que muestran tamaño o magnitud. Sólo está disponible para datos puntuales y lineales. La Figura 3.5-5 muestra dos representaciones de símbolos graduados en una porción de un mapa del estado de Morelos, la primera clasifica el tamaño de las localidades en función de su número de habitantes; la segunda hace una clasificación de sus carreteras por su tránsito diario promedio anual (TDPA).

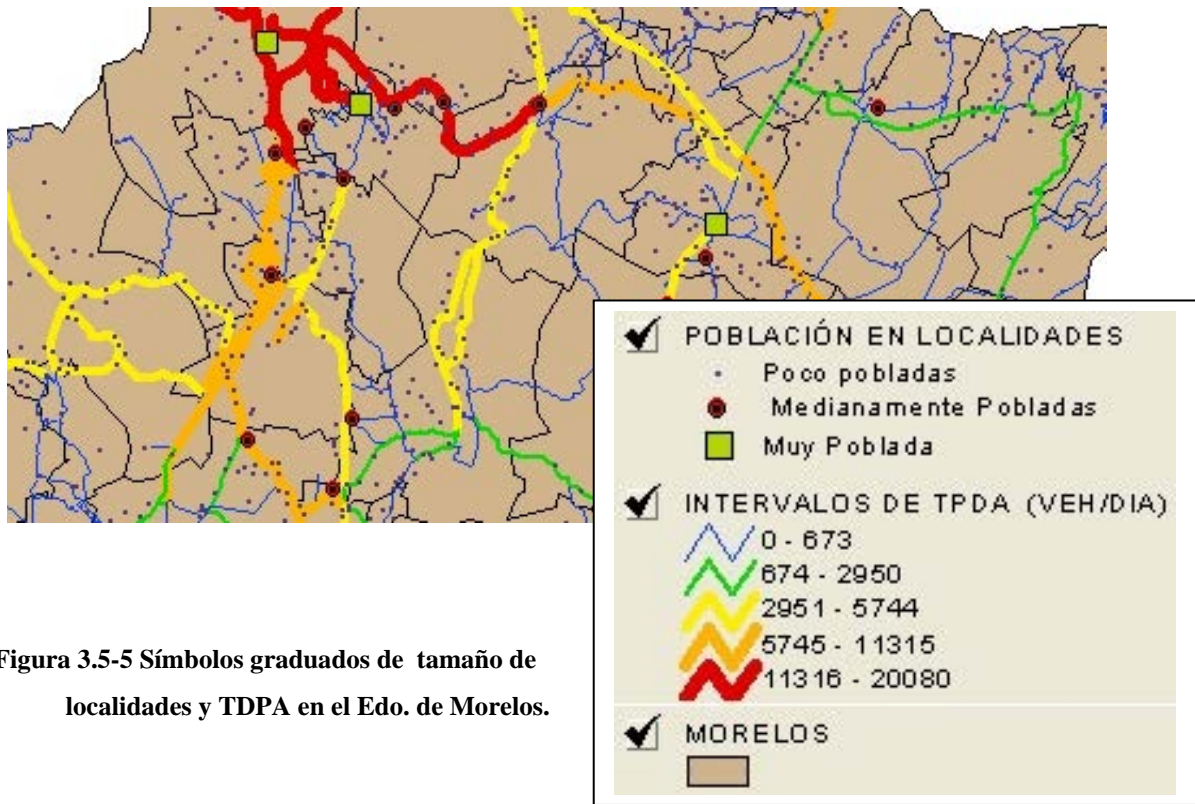


Figura 3.5-5 Símbolos graduados de tamaño de localidades y TDPA en el Edo. de Morelos.

3.5.5 Densidad de puntos

Usa puntos para representar las distribuciones de un campo de atributos en una zona poligonal. La Figura 3.5-6 muestra un mapa de Morelos con la concentración de población.

3.5.6 Símbolos de gráficos

Despliega atributos y sus respectivos valores numéricos en los elementos usando gráficos de sectores (pastel) o gráficos de columnas (barras). La Figura 3.5-7 (Pág. 97) muestra una representación del inventario de la Red Geodésica Nacional Mexicana en los estados centrales. Primeramente se realizó una clasificación de valores únicos de los estados para diferenciarlos, posteriormente se integró la representación de símbolos de gráficos. Los diagramas de sectores muestran la cantidad de vértices GPS, bancos de nivel y estaciones gravimétricas existentes en cada estado, y su tamaño indica la proporción con respecto al total. El histograma muestra la misma información.

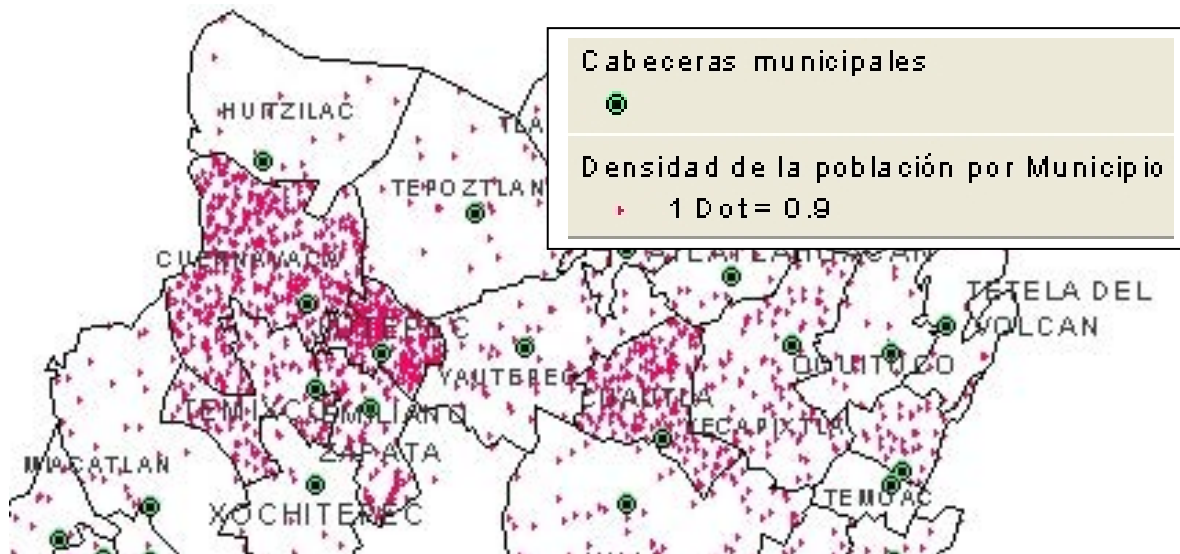


Figura 3.5-6 Densidad de puntos de concentración de población en el estado de Morelos.

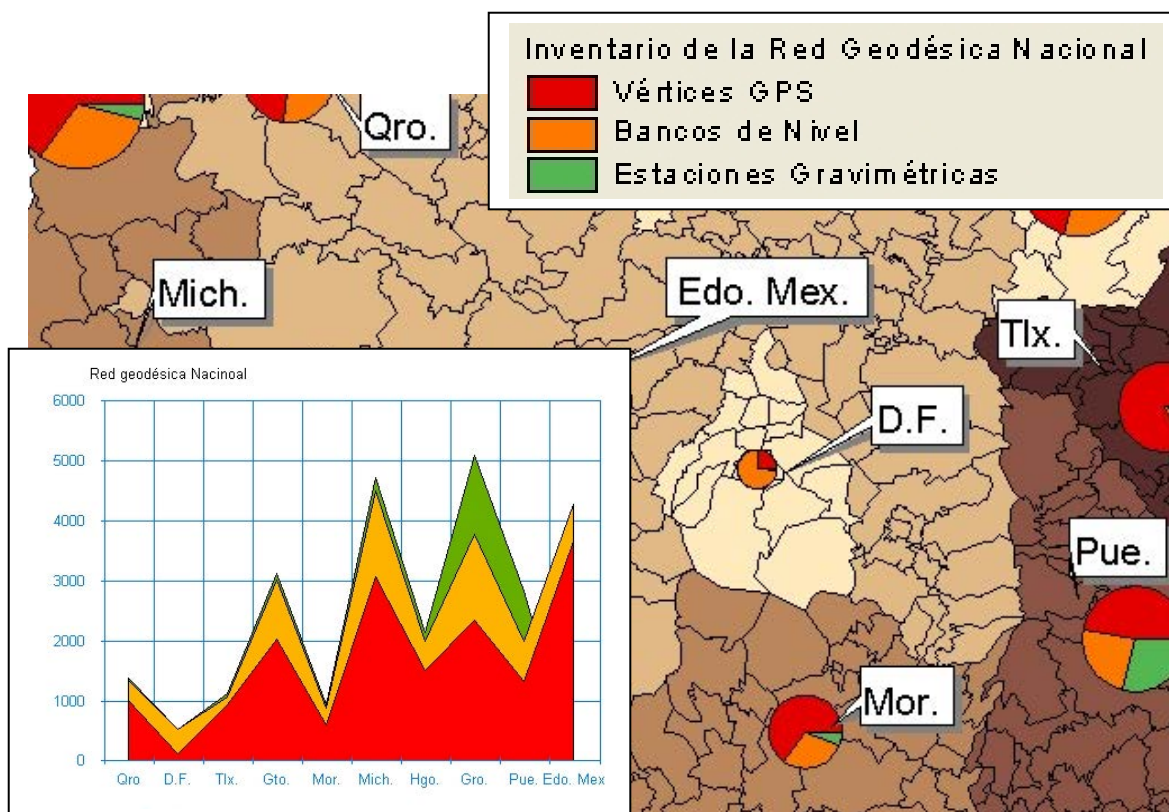


Figura 3.5-7 Representación mediante símbolos de gráficos del inventario de la Red Geodésica Nacional en los estado aledaños al Distrito Federal.

4

MÉTODOS Y ALGORITMOS QUE COMPONEN EL ANÁLISIS ESPACIAL

El capítulo anterior propone una metodología con los principios generales para el diseño y elaboración de un Sistema de Información Geográfica. Para lograr esto, es necesario tener conocimiento sobre la habilidad esencial de estos sistemas: los métodos y algoritmos que componen al *análisis espacial*. Esta técnica se ha desarrollado por la importación y adaptación de la metodología estadística al incluir procedimientos que manejan las características geométricas de los hechos en el espacio. Dado que todos los proyectos de ingeniería civil interactúan y transforman el medio físico, este conjunto de herramientas son útiles para la creación de modelos en SIG que representen los fenómenos.

Objetivo

Analizar los métodos y algoritmos que componen al análisis espacial en los SIG.

CONCEPTOS BÁSICOS

Definición y tipos de distancia

Distancia es el número de unidades de longitud que separan dos lugares en el espacio (para el caso de los SIG, entre dos puntos de un mapa). La distancia en el espacio continuo (ya sea plano o esférico), se expresa como una función matemática que a partir de los valores de las coordenadas obtiene la separación existente entre los puntos o lugares (Apéndice A.1). Evidentemente, las distancias planas calculadas no son verdaderas (toda la geometría terrestre debería ser esférica), únicamente son aproximaciones de la distancia real para el caso de porciones pequeñas del espacio, donde la curvatura terrestre no se aprecia.

Longitud de línea y perímetro de polígono

Una línea vectorial está definida por las coordenadas de una serie de vértices sucesivos, por lo que el cálculo de su longitud se realiza obteniendo la distancia euclidiana entre cada dos vértices contiguos.

Área de un polígono

Los polígonos habitualmente no tienen formas geométricas regulares, por ello no es posible utilizar las fórmulas estudiadas en la geometría elemental para el cálculo de su área. Es necesario utilizar procedimientos indirectos; el más usado es encontrar el área elemental existente debajo de cada segmento (Apéndice A.2).

Estadística espacial¹

Caracteriza el espacio geográfico a través del análisis del modelo de distribución de los datos espaciales. Sus fundamentos son semejantes a los de la estadística tradicional pero los resultados generados tienen una proyección directa sobre el espacio.

Existen dos clases de análisis estadístico de datos espaciales:

1. Análisis de distribuciones espaciales: utiliza únicamente el componente espacial de la información.
2. Variación espacial en función de los valores de los atributos: emplea integralmente el componente locacional y el temático.

Modelado cartográfico

Todas las técnicas de modelado cartográfico se basan en los datos tomados de dos o más capas de información iniciales para generar nuevos elementos geométricos y topológicos. Además están en función del tipo topológico de los objetos geográficos o espaciales (puntos, líneas y polígonos) de cada capa de información inicial (también llamada *capa A*). En la Tabla 4.1-1 (Pág. 101) se muestran las seis posibles combinaciones.

¹ Berry (1968) pp. 12-19.

CAPA B	CAPA A		
	Puntos	Líneas	Polígonos
Puntos	Coincidencia de puntos	Punto en línea	Punto en polígono
Líneas	<i>Conversión de línea a punto</i>	Intersección de líneas	Línea en polígono
Polígonos	<i>Conversión de polígonos a puntos</i>	<i>Conversión de líneas a polígonos</i>	Contigüidad Sobreposición de polígonos

Tabla 4.1-1 Combinaciones existentes entre los elementos.

A continuación se explica cada una de ellas incluyendo su aplicación en la ingeniería civil.

4.1 Análisis espacial de puntos.²

Plantea la definición y medida cuantitativa de una serie de conceptos: *coincidencia de puntos, puntos en línea, puntos en polígonos, conversión de línea en punto y conversión de polígono a punto.*

4.1.1 Análisis de coincidencia de puntos

Determina las localizaciones donde coinciden diferentes objetos puntuales situados en las capas de información originales.

Ejemplo.

Destinando este análisis al área de planeación de infraestructura de intercambio modal, se pueden obtener los lugares donde coinciden (o se encuentran a una distancia prefijada) las estaciones de ferrocarril y las paradas de autobús en una región geográfica. Se genera una nueva capa de información que contiene los puntos donde existen simultáneamente (o a una distancia preestablecida) paradas de autobús y de tren, lo que posibilita el intercambio de viajeros (Figura 4.1-1, Pág. 102). Cabe aclarar que para realizar análisis más completos es necesario introducir mayor cantidad de variables (y/o capas temáticas). Podría ser que para el ejemplo anterior sea necesario introducir la información proveniente de una *encuesta origen-destino* para determinar que estaciones óptimas para habilitar el intercambio modal.

4.1.2 Análisis de punto en línea

Determina la coincidencia espacial de objetos puntuales con objetos lineales.

Ejemplo.

En operación del transporte, se necesita determinar las paradas de autobús que coinciden con el trazo de líneas del ferrocarril, pues son zonas críticas para el análisis de tiempos muertos de los autobuses, ya que implican una espera adicional producida por la posibilidad del paso del ferrocarril (Figura 4.1-2, Pág. 102).

² Batty, Longley (1996) pp. 214-228.

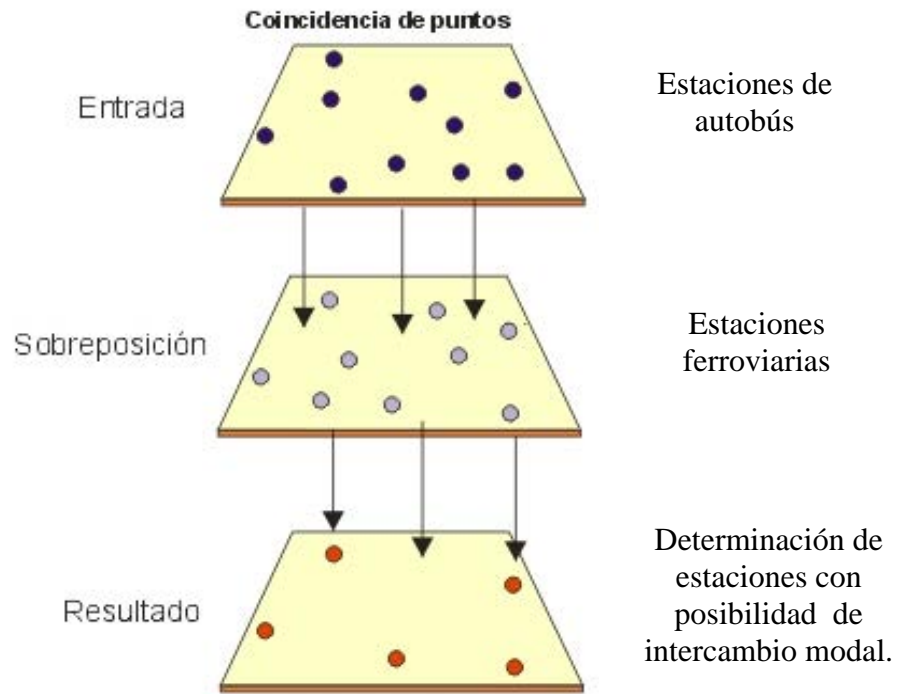


Figura 4.1-1 Análisis de coincidencia de puntos para la localización de estaciones de intercambio modal.

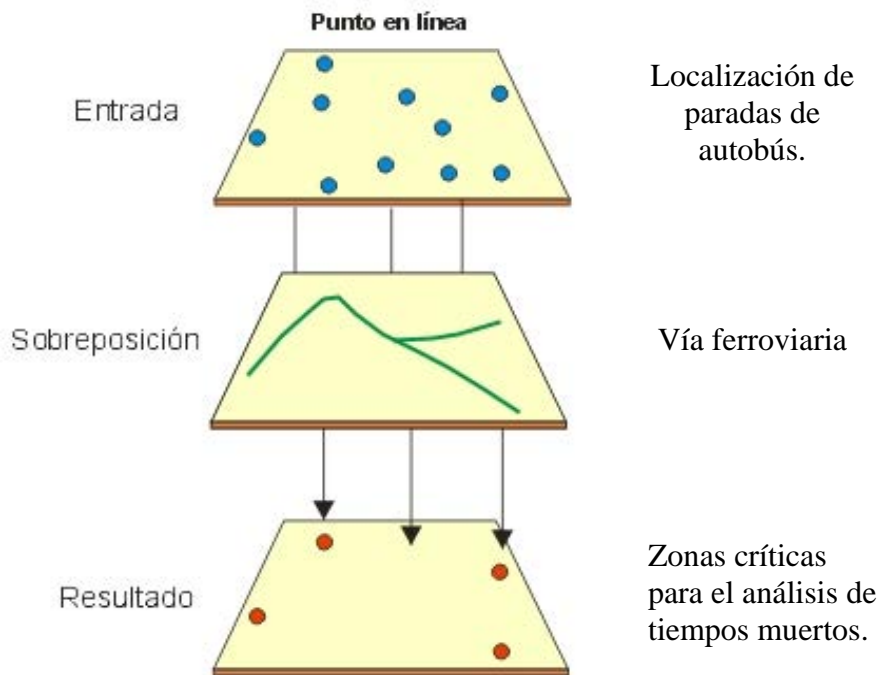


Figura 4.1-2 Análisis de punto en línea.

4.1.3 Análisis de punto en polígono³

Determina la existencia (o inexistencia) de puntos de una de las capas dentro de los polígonos trazados en la otra.

Ejemplo 1.

Se requiere asignar su población a las paradas de autobús pertenecientes a una colonia "x" para medir la demanda potencial de viajeros. Este análisis empleando herramientas SIG, corresponde a una operación de intersección entre dos mapas temáticos: 1) las paradas de autobús de la zona en estudio en forma de objetos punto con 2) la división política de las colonias con información de su población. Al conocer que puntos cumplen la condición, es posible transferir la información temática (atributiva y descriptiva) de puntos a polígonos o viceversa (Figura 4.1-3).

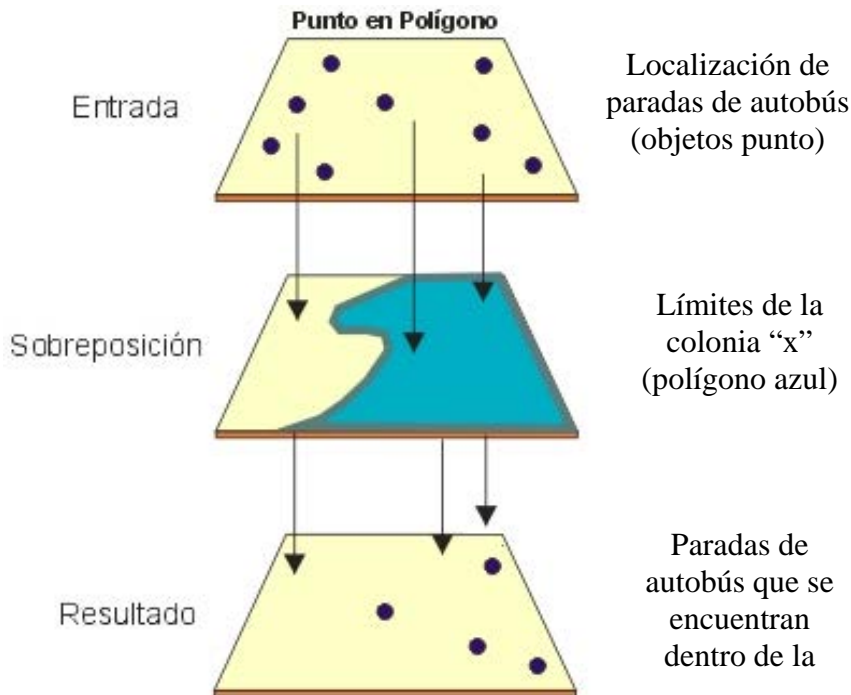


Figura 4.1-3 Análisis de punto en polígono.

Ejemplo 2.

Vea la figura 4.1-4, Pág. 104. Para el área de protección civil, se requiere determinar si algún centro escolar u hospital de una ciudad (objetos puntuales en el mapa II) está situado dentro de las áreas de influencia (zonas de riesgo localizadas en el mapa I) de los almacenes y fábricas de productos tóxicos. El análisis de punto en polígono genera para este caso una nueva capa de información con objetos puntuales situados dentro de las áreas de influencia o de peligro y tienen asociada una variable temática que indica aquellos con riesgo de ser afectados por un accidente

³ Demers (1999) pp. 185-186; 333-335; Bernhardsen (1999) pp. 243-250.

con productos tóxicos (mapa III). En la figura solo la escuela “d” se encuentra situada en el interior de la zona de riesgo.

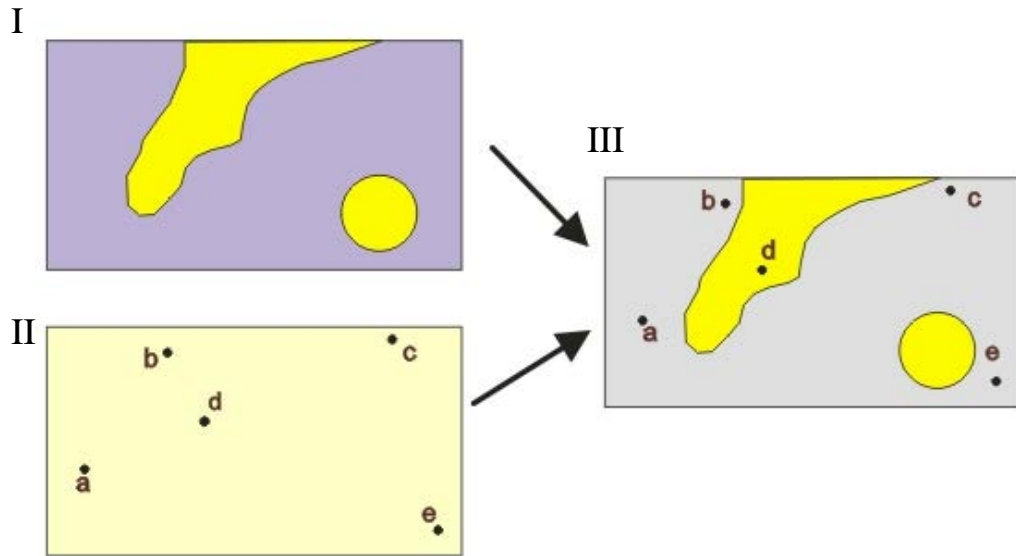


Figura 4.1-4 Ejemplo del análisis de punto en polígono.

4.1.4 Conversión de una línea en punto⁴

Se hace seleccionando lo que se considera el punto más representativo de esa línea (Figura 4.1-5). Esta forma de razonamiento vectorial es fundamento de algoritmos elaborados para el estudio de redes (como la elección ruta más corta). Apéndice A.4.

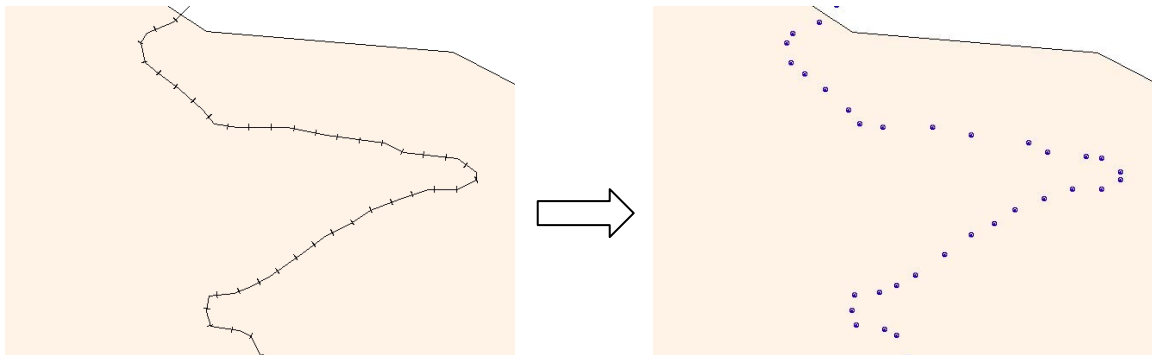


Figura 4.1-5 Transformación de una línea en puntos.

⁴ Bernhardsen (1999) cap. 14; Fortheringham y Rogerson (1994) pp. 214-256.

4.1.5 Conversión de polígonos a puntos

La operación sustituye un polígono por su punto más representativo, que generalmente es el centroide (Figura 4.1-6). Consulte el Apéndice A.7.

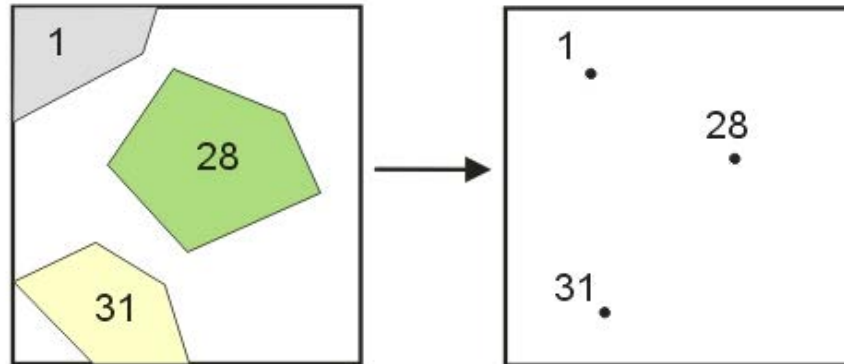


Figura 4.1-6 Cambio de polígonos a puntos utilizando su centroide como sitio más representativo.

4.2 Análisis espacial de líneas

El análisis de una capa de información que contenga líneas plantea la definición y medida cuantitativa de una serie de conceptos como son: *intersección de líneas*, *líneas en polígono* y *la determinación de ambas en forma simultánea*.

4.2.1 Análisis de intersección de líneas⁵

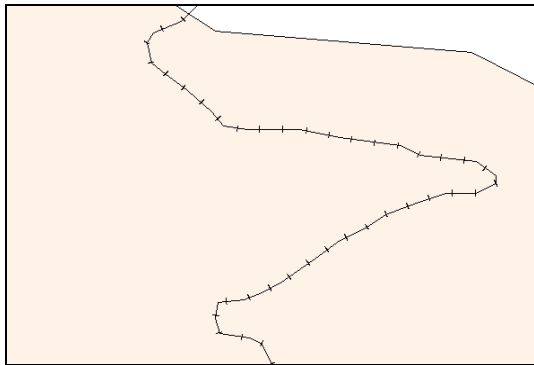
Encuentra los lugares donde dos redes o sistemas de objetos lineales se cruzan y al mismo tiempo genera el conjunto de nuevas aristas y nodos creados por dicha intersección.

Ejemplo.

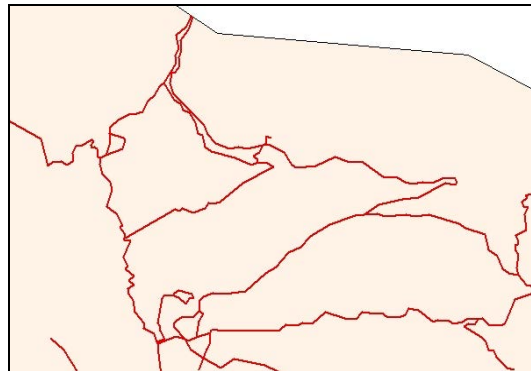
En ingeniería de transporte es útil encontrar las intersecciones de la red carretera con el trazo del ferrocarril cercanas a las poblaciones de un estado, con el fin de planear la localización de estaciones ferroviarias que cuenten con servicio de intercambio de pasajeros (Figura 4.2-1, Pág. 106).

Los cuadros 1, 2 y 6 son información de entrada, los cuadros 3 y 4 muestran la intersección entre las dos redes. Gracias a esta nueva capa de información es posible realizar análisis de accesibilidad mediante de técnicas búfer. Para determinar el área de servicio cubierta por los puntos interceptados y la accesibilidad de las poblaciones cercanas (Cuadros 7 y 8). Al realizar nuevamente una intersección entre las áreas búfer (Cuadro 9) se obtiene la relación de pasajeros atendidos por cada una de las estaciones multimodales posibles (las zonas claras son las que tienen mayor demanda del servicio).

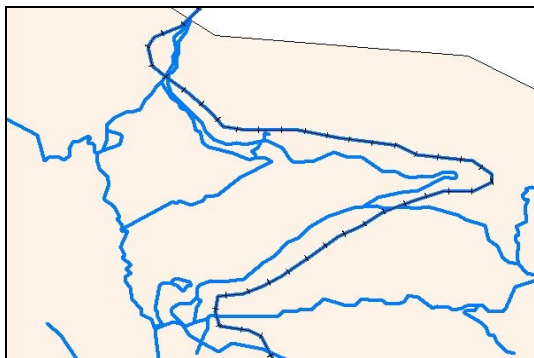
⁵ Herring (1991) pp. 145-158.



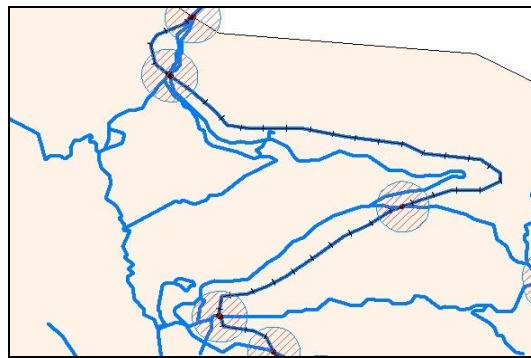
1. Línea ferroviaria



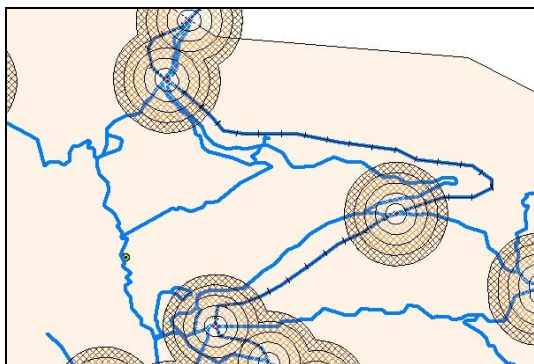
2. Red carretera



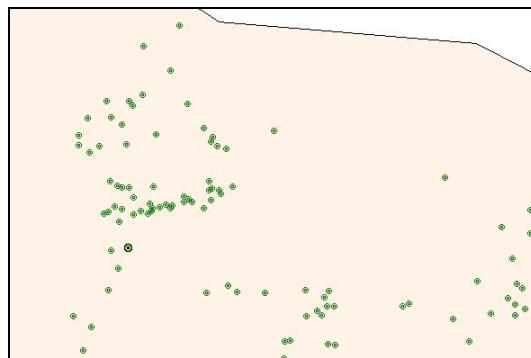
3. Sobreposición



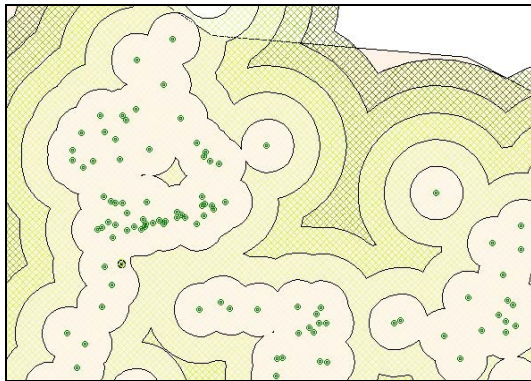
4. Determinación de los puntos de intersección



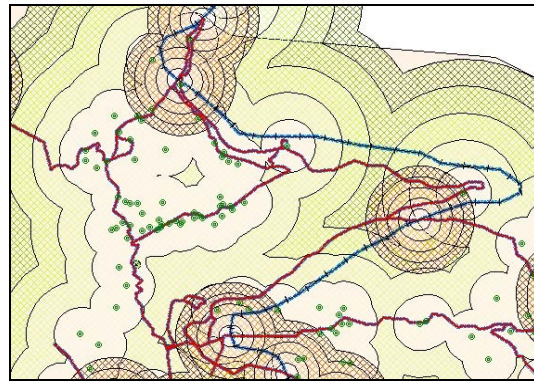
5. Radio de accesibilidad de los puntos de intersección (o posibles estaciones de intercambio modal).



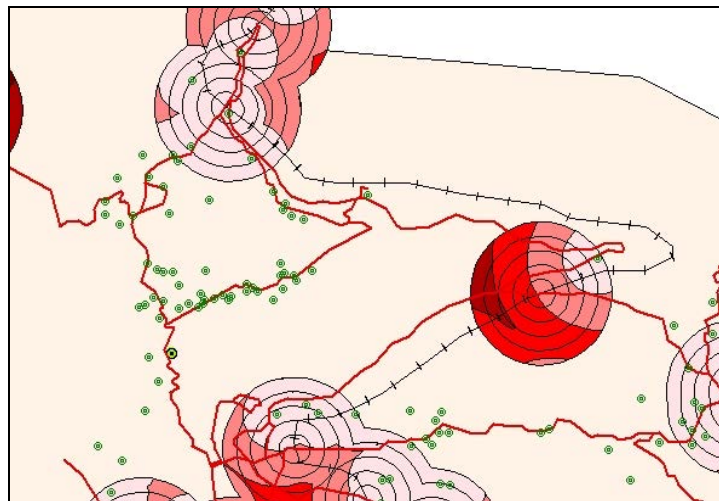
6. Localización de las poblaciones cercanas a la zona.



7. Radio de accesibilidad de las localidades.



8. Intersección de los polígonos de accesibilidad.



9. Relación de pasajeros atendidos por las estaciones multimodales posibles.

Figura 4.2-1 Localización óptima de estaciones de intercambio de pasajeros

4.2.2 Análisis de línea en polígono

Determina la existencia de objetos lineales cuyo recorrido se produzca por el interior de un polígono, delimitado en la otra capa.

Ejemplo 1.

Para el diseño de rutas de transporte, es necesario determinar que líneas de autobús urbano atraviesan determinadas colonias de una ciudad (Figura 4.2-2, Pág. 108), donde la línea de autobús urbano L1 atraviesa la colonia A sin hacer en ella ninguna parada (no existe vértice situado dentro) por ello es preciso estudiar si el recorrido de la línea de autobús corta el

perímetro de la colonia. Por el contrario en el caso de la línea de autobús L2 es más sencillo, ya que alguno de sus vértices se encuentra dentro de la colonia A. Al mismo tiempo es posible atribuir a una línea los valores de las variables temáticas asignadas a un polígono o viceversa.

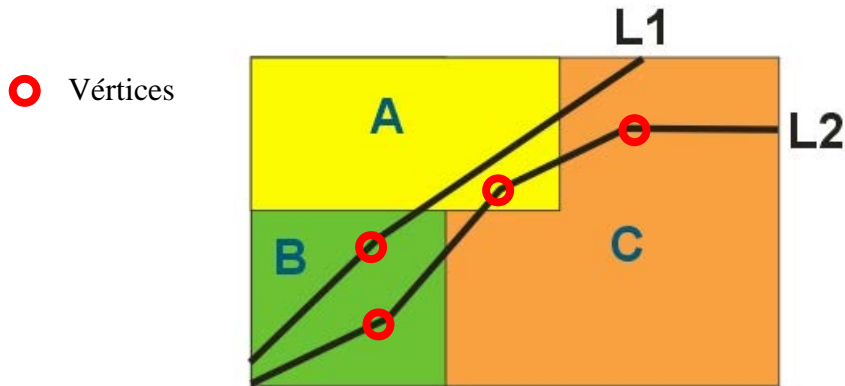


Figura 4.2-2 Análisis de línea en polígono.

Ejemplo 2.

Para el diseño de un programa de mantenimiento, se desea conocer los kilómetros de carreteras (objetos lineales) que existen dentro de la extensión de cada municipio de un Estado (objetos poligonales). (Figura 4.2-3).

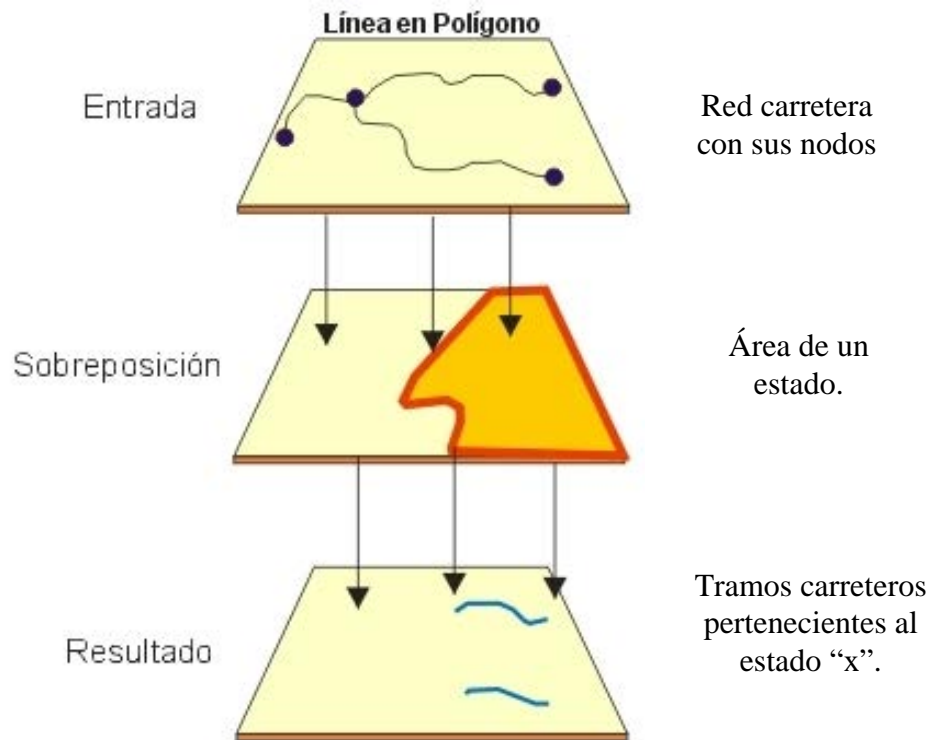


Figura 4.2-3 Análisis espacial de línea en polígono

4.2.3 Líneas en polígonos e intersección de líneas.

Para estas operaciones se deben determinar las intersecciones de cada línea con los límites de cada polígono y línea. Aparentemente es un problema simple de geometría, pero se torna complicado cuando existe un elevado número de intersecciones a obtener. Para agilizar el tiempo de operación se usan diversos algoritmos que establecen nuevos objetos puntuales y lineales con sus intersecciones. Uno de los más usados determina el *mínimo rectángulo encuadrante*, (Apéndice A.7).

Ejemplo.

Una aplicación práctica en el área de protección civil es la obtención de los puntos de intersección de las rutas de los camiones que transportan productos tóxicos por una ciudad con las rutas de los autobuses escolares, para establecer los puntos de peligro de accidente que deben ser vigilados por las autoridades. La Figura 4.2-4 en el cuadro superior contiene una ruta de los productos tóxicos y en el inferior, la de un autobús escolar; mediante el procedimiento de intersección de líneas resulta una capa de información que contiene un nuevo objeto puntual que es el cruce de ambas líneas y tiene asignada una variable temática indicando la situación de especial peligro.

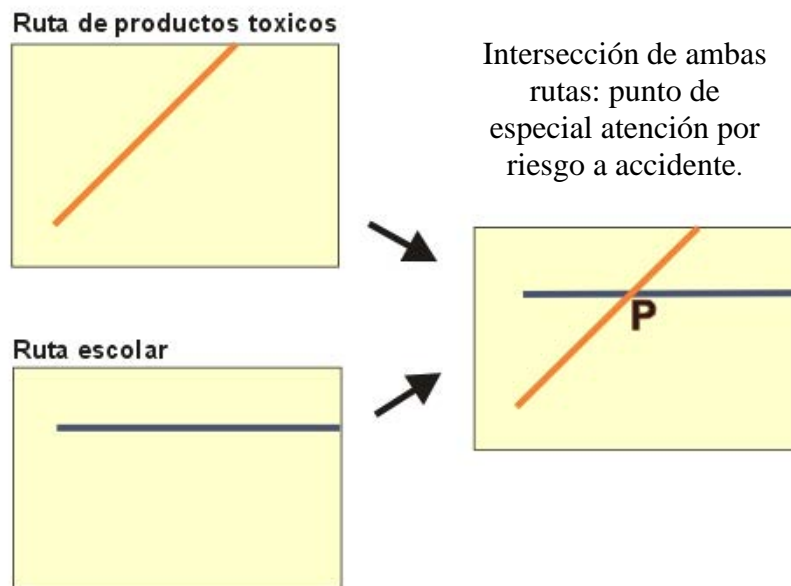


Figura 4.2-4. Ejemplo de intersección de líneas.

4.3 Análisis espacial de objetos poligonales.⁶

Plantea una serie de conceptos: *forma*; conversión de polígonos a líneas y de *líneas a polígonos*; *grado de contigüidad e interconexión del conjunto de polígonos*; y *las operaciones espaciales*.

⁶ Moolenaar (1998) cap. 4.

4.3.1 Forma de los objetos poligonales.

Es la relación constante de la posición y distancia de los puntos de su perímetro. Existen numerosos índices de forma que dan una medida precisa y cuantitativa de este concepto y tienen las siguientes propiedades:

- *Reversibilidad.* Capacidad de reconstruir de manera completa la forma al conocer el valor del índice.
- *Generalidad.* Utilidad del índice para cualquier tipo de formas.
- *Flexibilidad.* Grado de manipulación de la información del índice.

El fundamento de los índices es comparar las formas reales con las ideales de los cuerpos geométricos regulares a partir de una serie de medidas simples: perímetro (P), área (A), eje máximo (L1), eje máximo perpendicular (L2), radio del círculo inscrito en el polígono que posea la mayor superficie (Ri), y radio del círculo circunscrito de menor superficie (Rc). (Figura 4.3-1). Apéndice A.6.

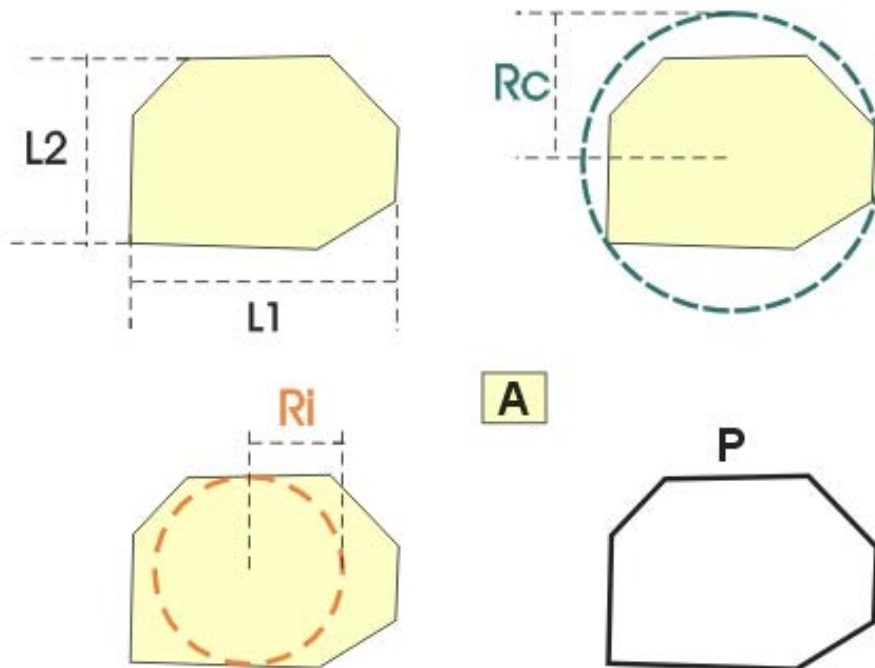


Figura 4.3-1 Índices de forma de los objetos poligonales.

4.3.2 Conversión de polígonos a líneas

Se realiza considerando el perímetro del polígono asignándole las características temáticas originales (Figura 4.3-2, Pág. 111).

4.3.3 Conversión de líneas a polígonos.

Se considera que se cuenta con un polígono en lugar de una línea al unir con una recta los puntos extremos. Esta operación otorga nuevas propiedades como la extensión superficial (Figura 4.3-3, Pág. 111).

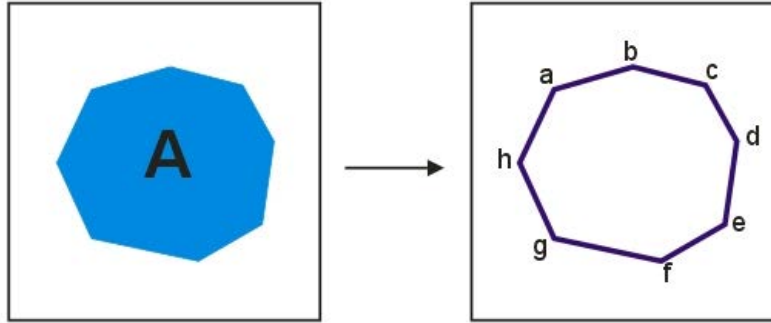


Figura 4.3-2 Transformación de polígono a línea.

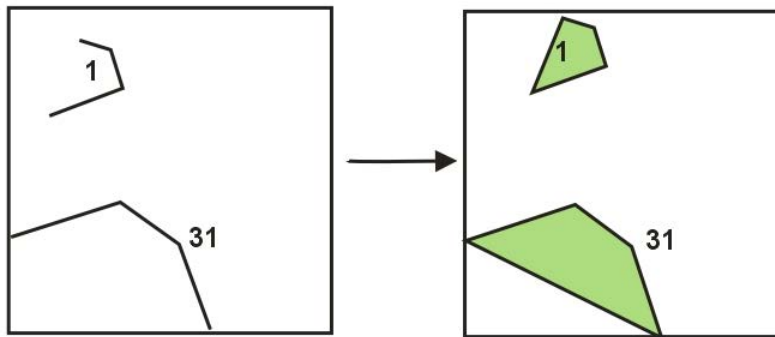


Figura 4.3-3 Cambio de tipo de objeto espacial, de línea a puntos y polígonos.

4.3.4 Análisis de contigüidad e interconexión del conjunto de los polígonos.

La contigüidad de un conjunto de polígonos se refiere a su estructura en conjunto o la inmediación de un objeto con respecto a otro. Puede ser:

Próxima a una figura geométrica regular (como un cuadrado) y tener una distribución espacial organizada y repetitiva similar a un tablero de ajedrez (Figura 4.3-4). O ser *irregular*, como sería la distribución de los municipios de un estado (Figura 4.3-5).

La *interconexión del conjunto* calcula cuántos *vecinos* tiene cada polígono, es decir, cuántos polígonos comparten con él un arco o trozo de límite.

En las siguientes figuras (4.3-4 y 4.3-5), los números indican la cantidad de vecinos contiguos de cada objeto.⁷

3	5	5	5	3
5	8	8	8	5
5	8	8	8	5
5	8	8	8	5
3	5	5	5	3

Figura 4.3-4 Número de vecinos de cada casilla del tablero de ajedrez.

⁷ Demers (1999) pp. 35-37.



Figura 4.3-5 Número de vecinos contiguos de cada polígono

4.3.5 Análisis de sobreposición de polígonos ⁸

Es la función más utilizada en los SIG. Genera polígonos con nueva información a través de la intersección de los ya existentes. Es una operación compleja pues engloba mayor número de variantes.

Los tipos de sobreposición son: “unión”, “intersección” e “identidad”.

- *Unión*: Simplifica la información compleja al integrar objetos o capas de información junto con sus atributos (Figura 4.3-6 y 4.3-7 a).
- *Intersección* selecciona y recupera aquellos elementos espaciales y atributivos que se encuentren presentes en la región de las capas de información a las que se les aplica la operación (Figura 4.3-7 b).
- *Identidad* selecciona y recupera los elementos espaciales y atributivos que se encuentren presentes en la cobertura de entrada (Figura 4.3-7 c).

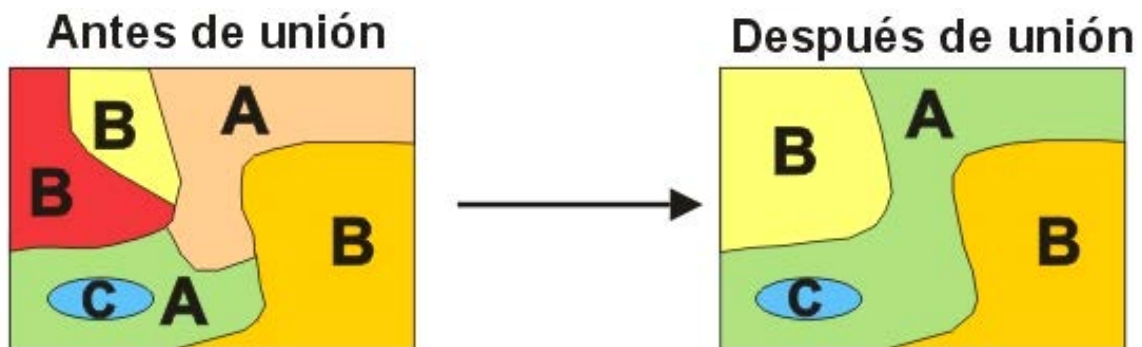


Figura 4.3-6 Operación unión en objetos poligonales.

⁸ Demers (1999) pp. 238-240, 292-293, 336-340.

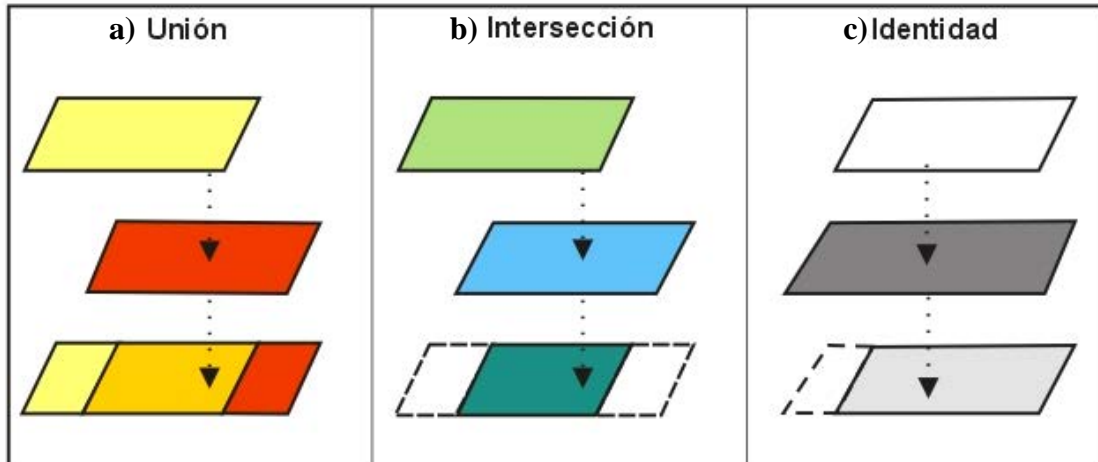


Figura 4.3-7 Operaciones de sobreposición espacial.

Después de realizar cualquiera de los tres tipos de sobreposición, existen tres procesos: el *geométrico*, el *topológico* y el de *carácter temático*. Todos generan una base de datos nueva que contiene la información correlacionada.

Consisten en:

1. Geométrico: Obtener las coordenadas (x, y) de los puntos en que se producen las intersecciones de los polígonos. Esto tiene fácil resolución geométrica, el inconveniente reside en la gran cantidad de operaciones matemáticas que es preciso realizar.
2. Topológico: Elaborar la topología de cada polígono otorgándoles identificadores individuales, que en muchos casos se forman por la unión o concatenación de los identificadores de los polígonos de origen.
3. Temático: Se otorgan valores a cada nuevo polígono asociados a las variables temáticas originales. El método difiere de acuerdo con el tipo de las variables relacionadas a los polígonos de origen.

a) Funciones de sobreposición:⁹

a.1) Funciones que no consideran ningún tipo de continuidad espacial.

Solo se consideran los atributos relacionados con cada localización, son independientes de los valores próximos o vecinos.

Ejemplo 1.

Para protección del medio ambiente, la superposición de dos capas: Ocupación del suelo X Zonas afectadas por incendios.

$$(x, y, bosque) + (x, y, zona quemada) = (x, y, bosque quemado)$$

⁹ Maguire, Goodchild, Rhind (2001) cap. 3.

Ejemplo 2.

Planeación de pozos: localizar lugares viables para la construcción de pozos de extracción de agua considerando su proximidad con la población con el fin de minimizar costos. Se realiza sobreponiendo el área del acuífero (capa de información inicial A) con el área de la mancha urbana (capa de información inicial B) de una región (Figura 4.3-8).

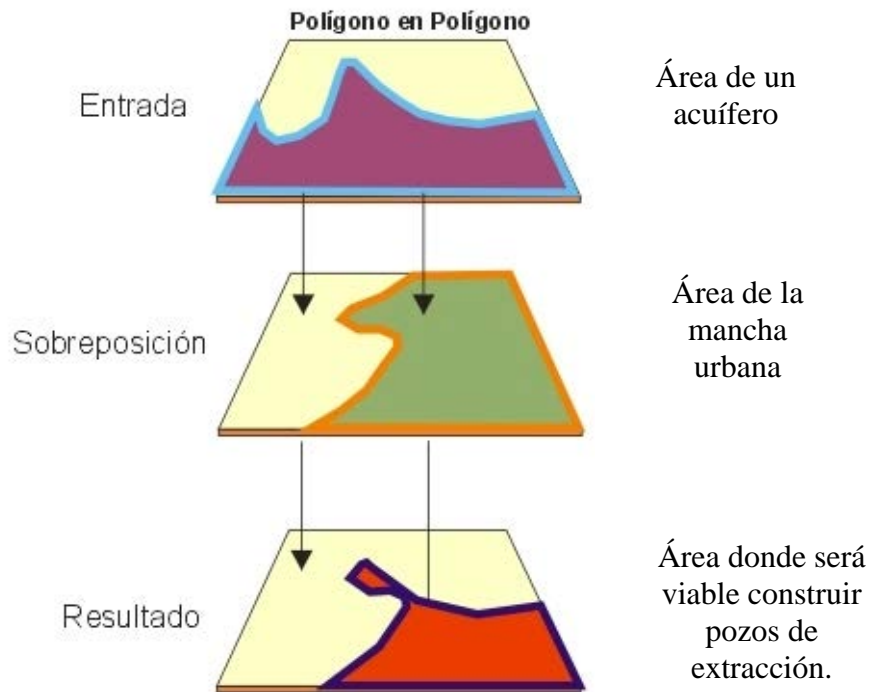


Figura 4.3-8 Análisis de superposición de polígonos, operación intersección.

a.2) Funciones que consideran continuidad o vecindad espacial.

Considera las propiedades de la región a la que pertenece la localización. Estas propiedades corresponden a parámetros intrínsecos derivados de su ubicación, con respecto a los emplazamientos vecinos.

a.3) Funciones que consideran la variación del espacio geográfico en el tiempo.

El ámbito de aplicación de estas funciones es muy amplio. En especial se adapta para el desarrollo de modelos predictivos (procesos de erosión, salinización, deforestación, crecimiento urbano, oscilaciones en el nivel del agua, etc.)

El conjunto de funciones descritas anteriormente se implementa mediante el uso combinado de operadores matemáticos (adición, sustracción, multiplicación, división, exponenciación) y operadores lógicos o booleanos (and, or, xor, not, etc.).

Los métodos de cálculo que utilizan los operadores lógicos, emplean las reglas de la lógica booleana para operar con los atributos y las propiedades espaciales.

Las funciones lógicas o de álgebra booleana, utilizan los operadores *AND*, *OR*, *XOR*, *NOT*, *EQV*, *IMP*, cuyas relaciones siempre pueden representarse.

Los operadores booleanos a diferencia de los aritméticos, no son conmutativos. El resultado depende de la prioridad entre *AND* con respecto a *OR*.

El empleo de este tipo de operadores combinado, permite la obtención de índices de gran significación (pendientes, orientaciones, interconectividad y otros)

Ejemplo 3.

Para el área de protección civil, generar un mapa que muestre las zonas de riesgo por exposición a productos tóxicos a partir de dos capas iniciales:

1. Almacenes: contiene las zonas donde se recolectan productos tóxicos.
2. Ruta: trayectoria de los vehículos que transportan dichos productos.

La Figura 4.3-9 muestra los dos mapas iniciales con algunos polígonos identificados por números. En ambas capas la variable temática asociada es binaria, con valor igual a 1 si en el polígono hay riesgo y con valor igual a 0 si no hay (Tabla 4.3-1, Pág. 116).

La solución consiste en usar el operador O (OR) para determinar los polígonos del nuevo mapa que tienen riesgo. Se establece como prioridad la presencia de riesgo en cualquier intersección.

La sobreposición genera un nuevo mapa con tres polígonos llamado Riesgo. Mediante una operación lógica booleana se determina para cada polígono del mapa resultante el valor de la variable temática (Riesgo) asociada, el polígono 2 del mapa de salida tiene valor 1, ya que es el resultado de la intersección del polígono 3 del mapa (Almacenes) con valor temático 1 y del 2 con valor 0 (Ruta), al emplear el operador OR el resultado es 1.

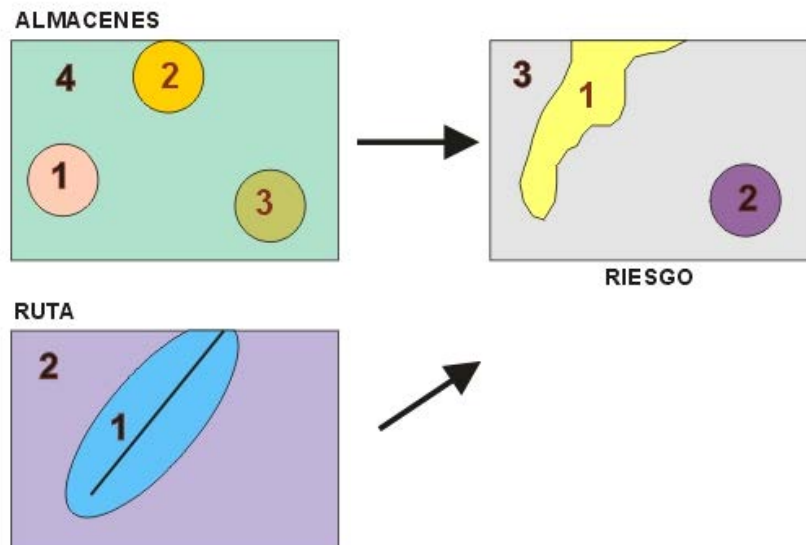


Figura 4.3-9 Sobreposición de polígonos. Operaciones con variables booleanas.

Variables iniciales				Variable final	
Mapa "Almacenes"		Mapa "Ruta"		Mapa "Riesgo"	
Polígono	Riesgo	Polígono	Riesgo	Polígono	Riesgo
1	1	1	1	1	1
2	1	2	0	2	1
3	1			3	0
4	0				

Tabla 4.3-1 Valores correspondientes a cada mapa.

Ejemplo 4.

Ordenamiento territorial: Se cuenta con dos capas de información:

1. Los usos de suelo de una región, U (residencial); I (industrial); R (reserva).
2. El mapa generado en el ejemplo 3, que muestra las zonas con riesgo de exposición a productos tóxicos con valor 1 y las no expuestas con valor 0.

Se trata de generar la intersección de ambos mapas para conocer que porción de la superficie de cada tipo de uso de suelo se encuentra dentro de las áreas de riesgo (Figura 4.3-10).

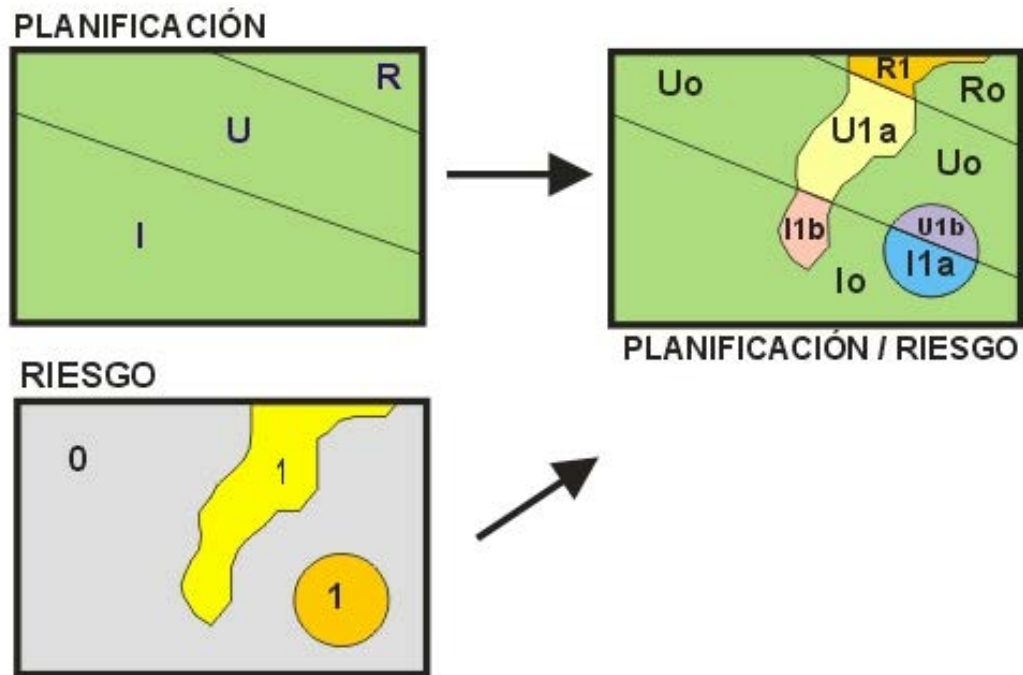


Figura 4.3-10 Sobreposición de polígonos. Intersección de variables nominales /ordinales.

Se crea un nuevo mapa con una serie de variables temáticas asociadas: residencial/con riesgo valor 1, residencial/sin riesgo valor 2, industrial/con riesgo valor 3, etc. (Tabla 4.3-2, Pág. 117).

POLÍGONO	TIPO DE SITUACIÓN
U1a	1, Residencial con riesgo
U1b	1, Residencial con riesgo
U0	2, Residencial sin riesgo
I1a	3, Industrial con riesgo
I1b	3, Industrial con riesgo
I0	4, Industrial sin riesgo
R1	5, Reserva con riesgo
R0	6, Reserva sin riesgo

Tabla 4.3-2 Mapa planificación / riesgo.

b) Operadores¹⁰

Los operadores matemáticos (*Suma, Multiplicación, Exponenciación, Logaritmos, ecuaciones, etc.*) son utilizados para derivar información a partir de atributos básicos. En estas ecuaciones algebraicas pueden intervenir constantes y valores numéricos.

Ejemplo 5.

Área ambiental: Se desea establecer un mapa de peligro de contaminación de las aguas por la acción conjunta de los dos contaminantes. Resultado de una actividad industrial previa, se tienen dos capas de información iniciales (Figura 4.3-11, Pág. 118) con las cifras depositadas en el suelo de una región de:

1. plomo
2. mercurio

Se observa el mapa de plomo con dos polígonos cuyos depósitos del metal son de 100 y 25 gr/m².

En el mapa mercurio también existen dos polígonos pero de diferente geometría, con depósitos de mercurio de 70 y 10 gr/m².

Se valora que el peligro ocasionado por el mercurio es tres veces superior al generado por el plomo. La variable temática “riesgo combinado” asociada al mapa resultante de la sobreposición de polígonos (Figura 3.3-11) se obtiene la expresión algebraica siguiente:

$$RIESGO = 3 * MERCURIO + PLOMO$$

Por ejemplo, el valor 310 de riesgo combinado es el resultado de sumar a los 100 gr/m² de contaminación de plomo, la cantidad de 3*70 de contaminación de mercurio.

¹⁰ Bernhardsen (1999) pp. 235-237

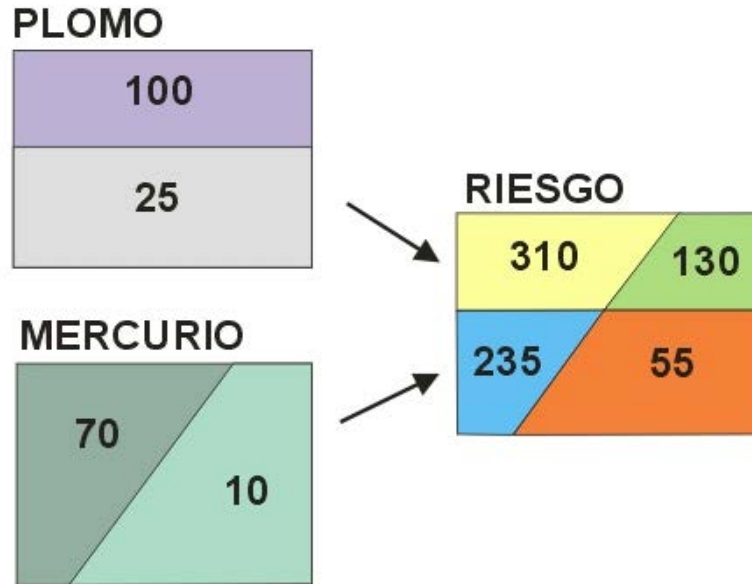
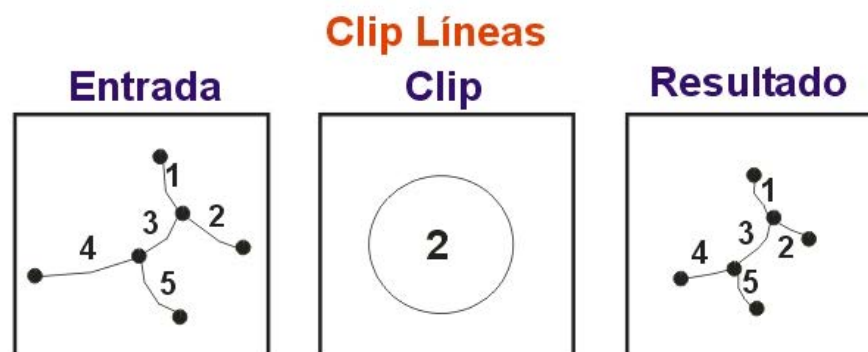


Figura 4.3-11 Sobreposición de polígonos. Álgebra de mapas.

c) Extracción espacial de polígonos¹¹

Otro tipo de análisis espacial es el de *extracción espacial de polígonos*. La operación de *clip* se encarga de extraer datos espaciales y atributivos de alguna capa, con la finalidad de contar únicamente con la información requerida y no saturar la capacidad de procesamiento.

Para hacer uso del clip se necesita una *capa de entrada*, que almacenará cualquier tipo de elementos espaciales; y la *cobertura de extracción* debe ser de elementos poligonales. La cobertura de salida serán elementos de la clase espacial de la capa de entrada. Con respecto a la tabla de atributos, la capa resultante contendrá los mismos elementos que la tabla de atributos de la capa de entrada (Figura 4.3 -12).



¹¹ Bernhardsen (1999) pp. 259-261.

Clip Polígonos

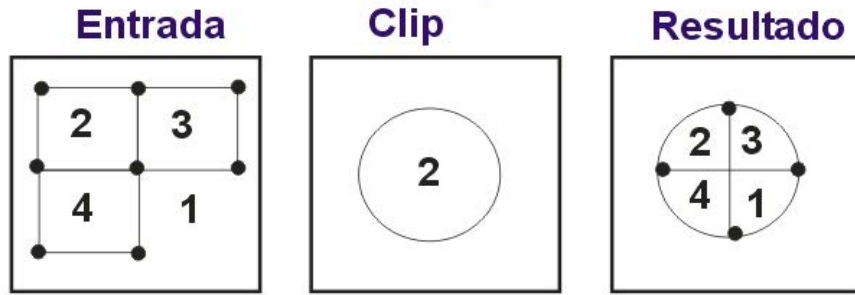


Figura 4.3-12 Método de clip para objetos espaciales.

Ejemplo 6.¹²

Protección civil: Conocer la altura media en las zonas de riesgo (Figura 4.3-13). Se cuenta con dos capas de información:

1. Altitudes sobre el nivel del mar existentes en una región.
2. Un mapa de riesgo de exposición a productos tóxicos.

La solución requiere la composición del mapa de alturas empleando el de riesgo como *máscara* o *clip* de las regiones donde se calculará la media aritmética de las alturas que existen en los polígonos incluidos en ella.

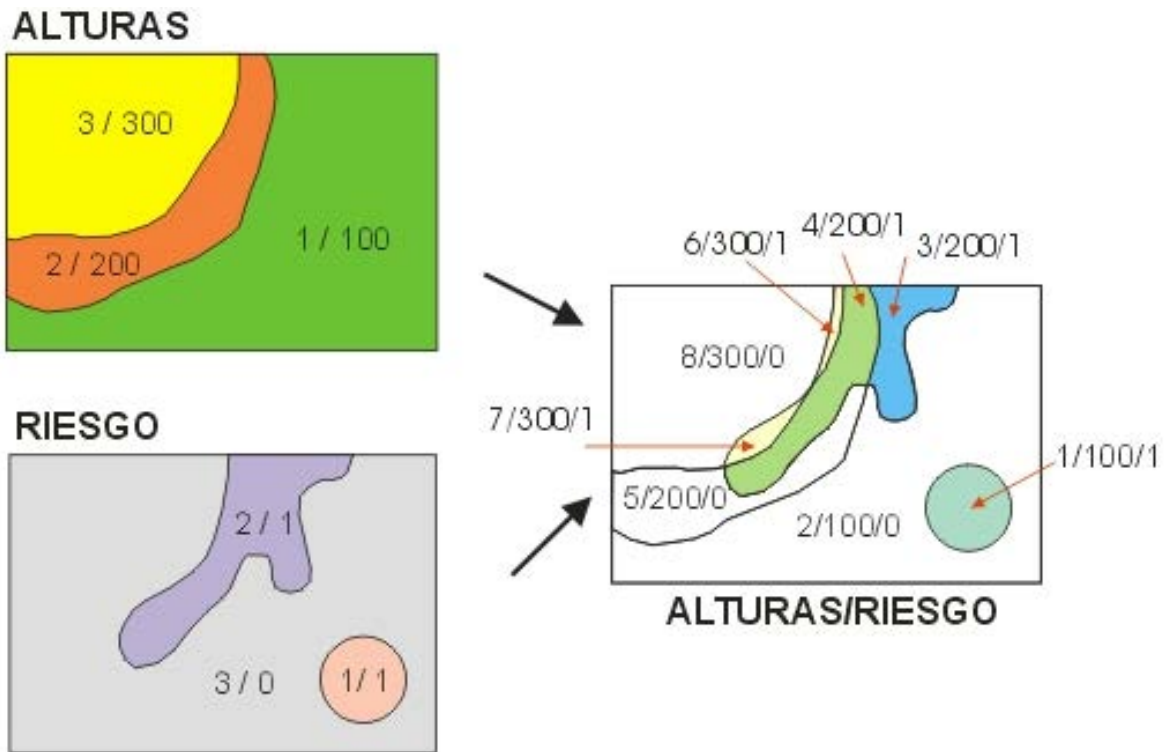


Figura 4.3-13 Sobreposición de polígonos. Composición de mapas.

¹² Mitchell (1997) cap. 4-6.

Mapa "Alturas"		Mapa "Riesgo"		Mapa "Alturas/Riesgo"	
Polígono	Altura	Polígono	Riesgo	Polígono	Altura
1	100	1	1	1, 3	100
2	200	2	1	4	200
3	300	3	0	6, 7	300

Tabla 4.3-3 Composición de mapas.

d) Interpolación areal.

Una de las capas de información inicial solo contiene una partición del espacio en polígonos y se desea conocer que valores adopta en esta región la variable cuantitativa asociada a la otra capa.

Ejemplo 7.

Protección civil: Interesa conocer el volumen de la población que reside en una zona afectada por el riesgo de contaminación.

1. Población que reside en cada colonia de la zona.
2. Mapa que muestra las zonas con riesgo de exposición a productos tóxicos.

Se usa la interpolación areal para calcular la población de cada uno de los polígonos generados por la intersección de los dos mapas iniciales y después, se agregan estas poblaciones para hallar la población total residente en la zona de riesgo.

Se debe calcular cual es el porcentaje de cada nuevo polígono sobre el total de la sección censal a la que pertenezca (Figura 4.3-14). La tabla 4.3-4 muestra las zonas de riesgo formadas por polígonos A1, B1, C1a, C1b, C1c. La población de la zona de riesgo es de 2,400 hab.

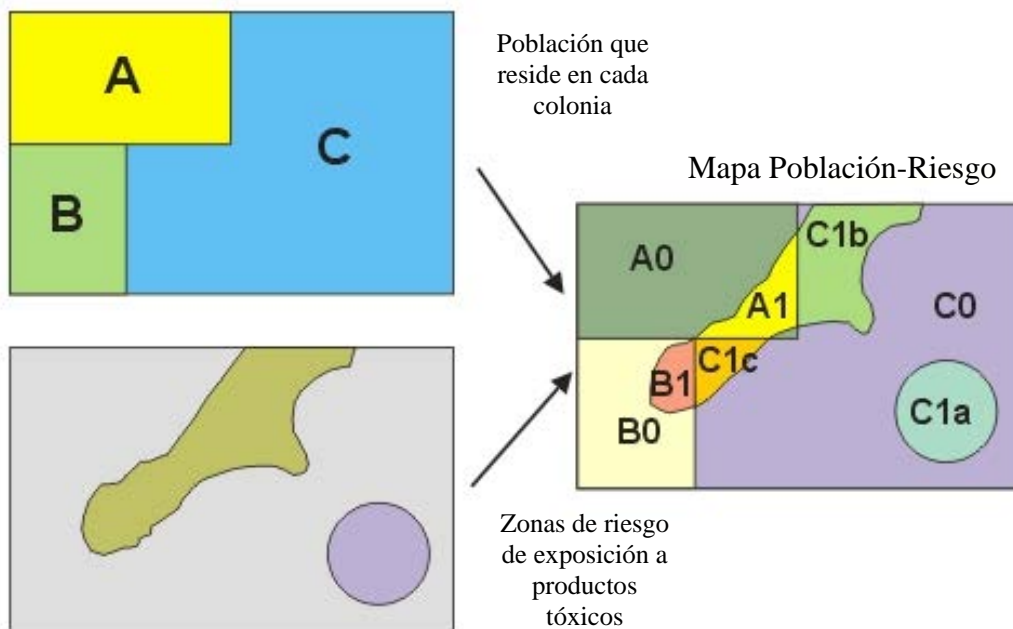


Figura 4.3-14 Sobreposición de polígonos. Composición de mapas.

Mapa "Población"		Mapa "Población/Riesgo"		
Polígono	Población	Polígono	Proporción	Población
A	3,000	A0	0.8	$0.8 \times 3,000 = 2,400$
B	4,000	A1	0.2	$0.2 \times 3,000 = 600$
C	2,000	B0	0.7	$0.7 \times 4,000 = 2,800$
		B1	0.3	$0.3 \times 4,000 = 1,200$
		C0	0.7	$0.7 \times 2,000 = 1,400$
		C1a	0.15	$0.15 \times 2,000 = 300$
		C1b	0.10	$0.10 \times 2,000 = 200$
		C1c	0.05	$0.05 \times 2,000 = 100$

Tabla 4.3-4 Interpolación areal.

e) Análisis de proximidad

Consiste en la definición alrededor de un objeto espacial de un entorno con una anchura predefinida. En caso de tratarse de un objeto puntual, la situación es semejante a la conversión de un objeto puntual en poligonal.

Ejemplo 8.

Protección civil: Establecer una zona de riesgo alrededor de los almacenes y fábricas que usan productos tóxicos a partir de un mapa de puntos.

Mediante una circunferencia con un radio definido en función de la toxicidad se estima que a más de 500 metros el riesgo es nulo (4.3-15).

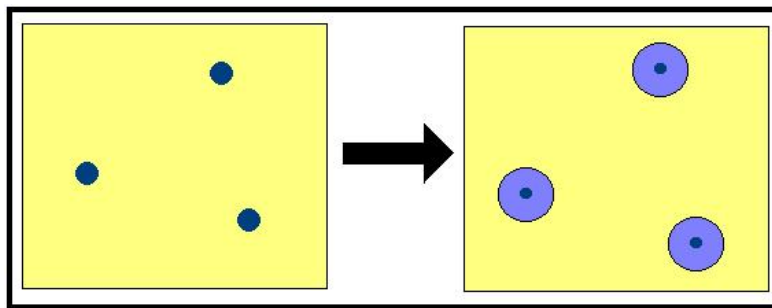


Figura 4.3-15 Área de influencia de un punto.

Si el objeto es una línea, la forma de obtener las descripciones de las dos líneas paralelas a la original es relativamente compleja y exige entre otras cosas, obtener la bisectriz de varios ángulos. Resuelto el problema geométrico de generar un corredor alrededor de una línea, se superpone el polígono creado sobre la otra capa de información para poder conocer cuales elementos (de los existentes en esa capa) están dentro del área de influencia.

Ejemplo 9.

Planeación del transporte: Obtener el área de influencia de un tramo carretero por el que pasa una ruta de transporte de productos tóxicos.

Se establece un corredor paralelo a la carretera de 1000 metros de anchura, dado que se sabe que por encima de 500 metros el riesgo de toxicidad es inexistente (4.3-16).

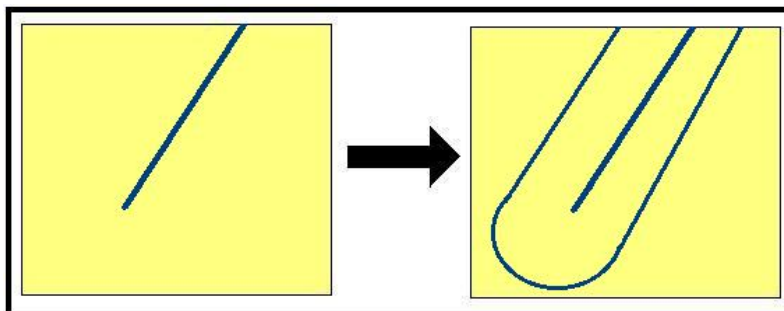


Figura 4.3-16 Área de influencia de una línea.

Cuando el objeto es un polígono, la generación de un corredor tiene tres variantes pues el polígono es considerado como una línea por su frontera y el corredor se puede trazar hacia el exterior de la línea, hacia el interior o hacia ambos lados.

El Análisis de Proximidad cuenta con dos métodos: el “buffer” y el de “vecinos cercanos” para localizar diversas áreas, puntos o líneas de interés con base en una distancia base para la generación de áreas con este parámetro.

i) Método búfer¹³

Consiste en proporcionar una distancia, la cual se utilizará como parámetro base para la localización o recuperación de datos espaciales tanto para elementos puntuales, lineales o poligonales.

Este método crea un nuevo polígono que representa la distancia especificada y nuevos elementos pueden estar contenidos en él (Figura 4.3-17).

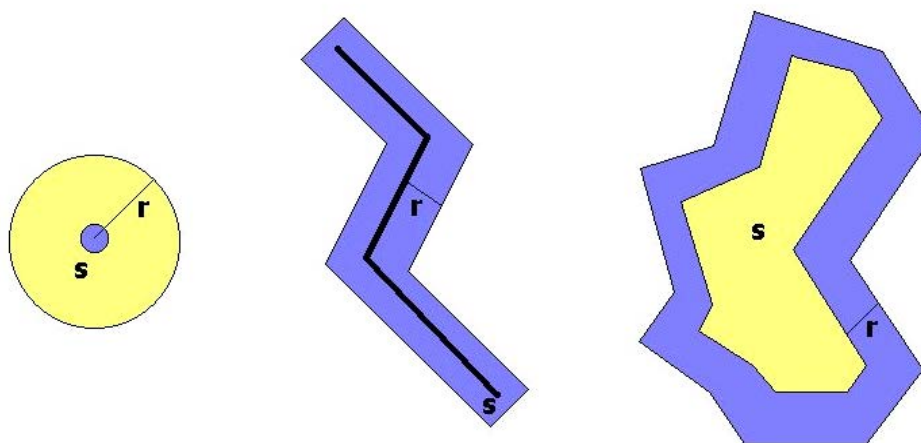


Figura 4.3-17 Regiones de expansión o zona de buffer.

Una primera opción es utilizar el punto como centro de una circunferencia o círculo (Figura 4.3-18, Pág.123). Es necesario que el usuario especifique además

¹³ Demers (1999) pp. 248-253.

el diámetro. Los atributos temáticos asignados al punto se asignan ahora a la línea o al círculo (Tabla 4.3-5).

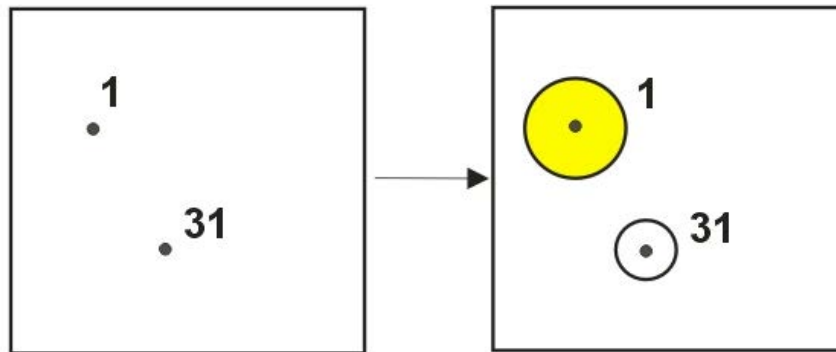


Figura 4.3-18 Cambio de tipo de objeto espacial de puntos a líneas y polígonos.

Valores temáticos asociados a puntos

PUNTO	POBLACIÓN	EMPLEOS
1	1000	100
31	500	93

Valores temáticos asociados a polígonos

POLÍGONO	POBLACIÓN	EMPLEOS	EXTENSIÓN SUPERFICIAL
1	1000	100	50 Km ²

Valores temáticos asociados a líneas

LÍNEAS	POBLACIÓN	EMPLEOS	LONGITUD DE LA LÍNEA
31	500	93	10 Km.

Tabla 4.3-5 Tablas de valores temáticos.

Con el análisis buffer se puede combinar la operación espacial de intersección; esto es generar un área de acuerdo al argumento del buffer que incluya todos los atributos que cumplan con la condición de distancia del mismo. Se puede observar en la página 126 un ejemplo de utilización de diferentes operaciones espaciales: unión, intersección y *buffer*.

ii) *Polígonos de Thiessen o vecinos cercanos*¹⁴

A partir de un conjunto de puntos se delimita en torno a cada uno de ellos la parte del espacio que está más cerca de él que de cualquier otro (Figura 4.3-19, Pág. 124). Cada punto existente queda asociado/convertido en un polígono y sus valores temáticos se refieren ahora a toda la extensión ocupada por este (Tabla 4.3-6).

¹⁴ Brassel (1979) cap. 2.

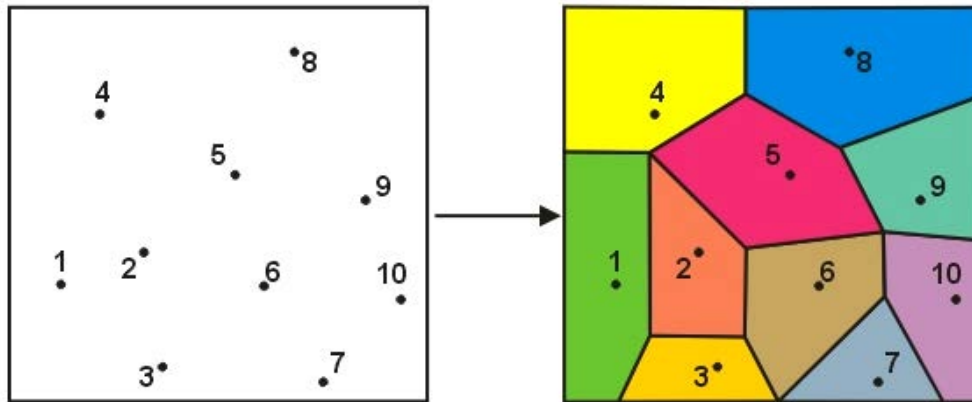


Figura 4.3-19 Polígonos de Thiessen.

Valores temáticos asociados a los puntos

PUNTO	POBLACIÓN	EMPLEOS
1	100	50
2	90	30
3	120	40
4	200	50
5	210	100
6	400	36
7	500	100
8	100	10
9	120	12
10	110	19

Valores temáticos asociados a los polígonos

PUNTO	POBLACIÓN	EMPLEOS	ÁREA (Km ²)
1	100	50	12
2	90	30	13
3	120	40	15
4	200	50	10
5	210	100	19
6	400	36	15
7	500	100	10
8	100	10	9
9	120	12	8
10	110	19	10

Tabla 4.3-6 Tablas de valores temáticos.

f) Problemas con la sobreposición de polígonos.

La operación de sobreposición de objetos espaciales poligonales presenta dificultades en muchas ocasiones debido a la aparición de *polígonos ficticios*.¹⁵

Ocurre cuando se sobreponen dos capas de información cuyos polígonos tienen límites semejantes o incluso iguales. En estos casos el número de nuevos

¹⁵ También llamados en inglés *slivers*.

polígonos generados puede ser muy grande y muchos de ellos tienen una extensión superficial muy reducida y una forma bastante definida y repetida en todos ellos. (Figura 4.3-20-a).

Al sobreponer los contornos semejantes, pero no exactamente iguales, se producen numerosos polígonos que no existen. La causa de esto reside en los errores de digitalización de polígonos.

Las posibles soluciones son:

- Definir un margen de tolerancia en torno a cada línea que se intersecta para considerar una línea en lugar de dos (Figura 3.3-20-b).
- Eliminar los polígonos ficticios buscar tamaños mínimos de extensión superficial.

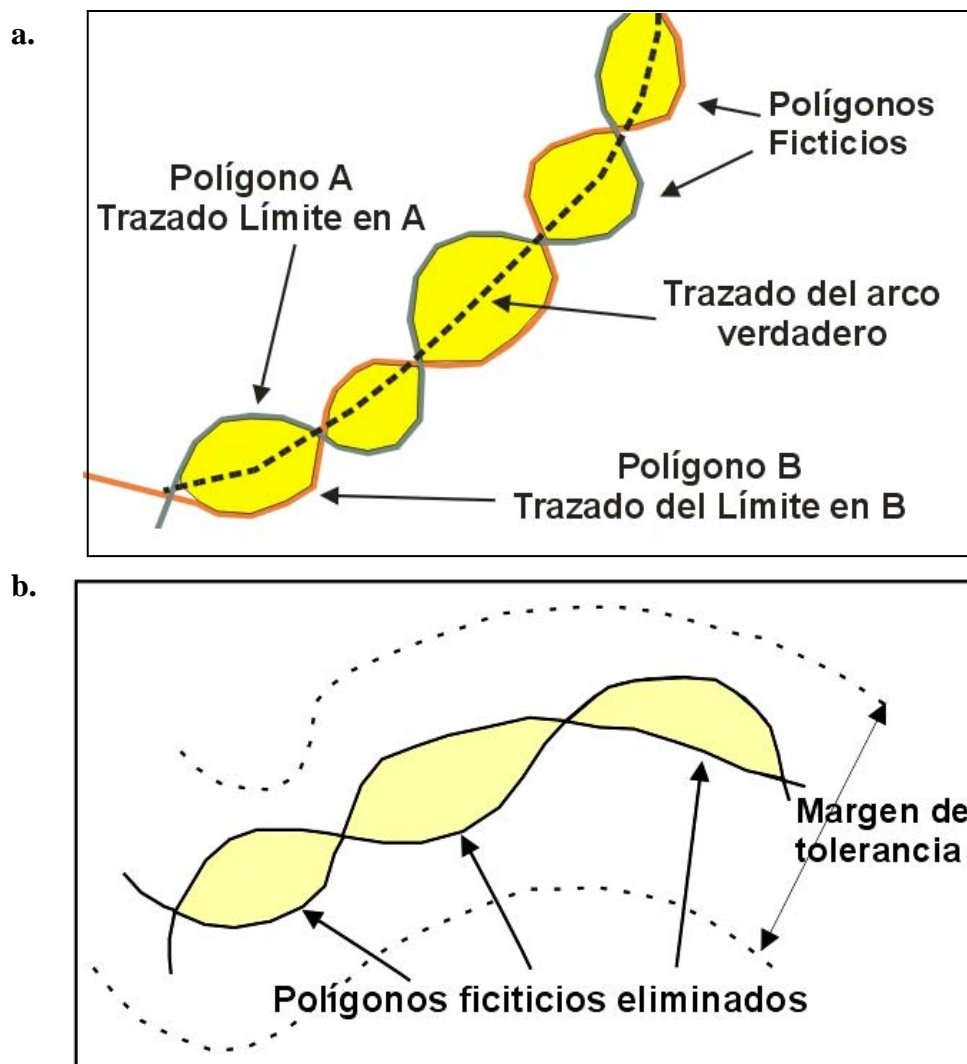


Figura 4.3-20 a) Polígonos ficticios en sobreposición de polígonos; b) Margen de tolerancia en torno a una línea para eliminar polígonos ficticios.

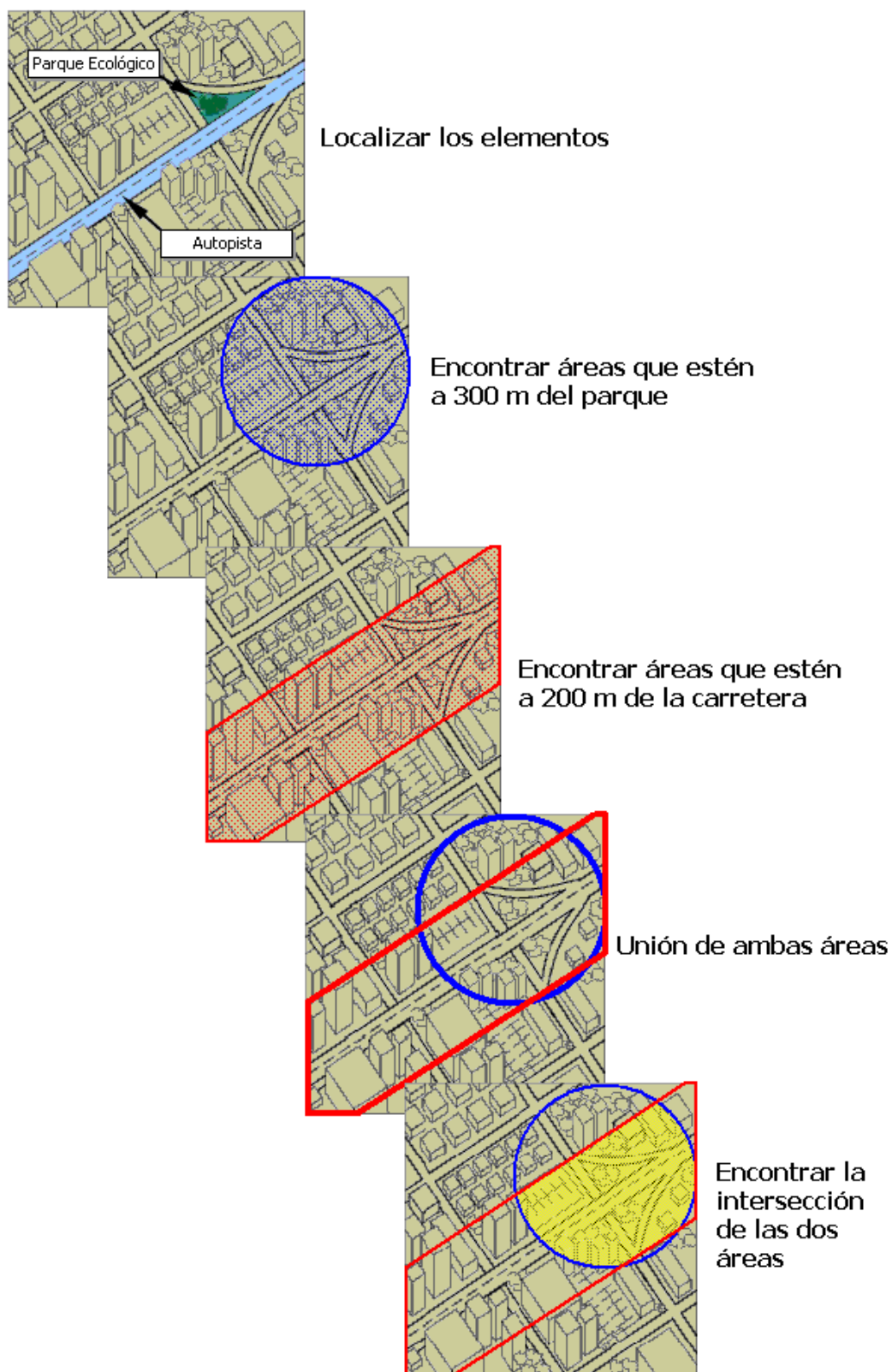


Figura 4.3-21 Resultado del análisis espacial utilizando operaciones como la unión, intersección, sobreposición y buffer.

5

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN UN PROYECTO DE INGENIERÍA CIVIL

Los temas tratados hasta ahora se han enfocado a la definición de los elementos y sus funciones, la metodología general y los tipos de análisis espaciales que realizan los sistemas de información geográfica. El presente capítulo es una síntesis del conocimiento anterior, con el fin de implementar estos sistemas al proceso de planeación de proyectos de ingeniería civil, comenzando desde la fase de diseño y creación de la base de datos.

Objetivo

Organizar el proceso básico requerido para desarrollar sistemas de información geográfica aplicados a la planeación y al análisis de proyectos de ingeniería civil.

TRASCENDENCIA

A pesar de que la tendencia actual es el desarrollo y comercialización de bases de datos específicas elaboradas por diferentes organismos

gubernamentales y privados, conocer este proceso es fundamental para entender las variables involucradas en cualquier proyecto que utilice esta tecnología. Se puede considerar en consecuencia, que debido a la disponibilidad de la información recopilada y ordenada, la labor fundamental de los técnicos actuales de SIG es el diseño del proyecto y su consecuente análisis más que la creación de las bases de datos.

Conocer los aspectos generales sobre el *desarrollo* de las bases de datos en los proyectos en sistemas de información geográfica es útil por diversas razones:

- Los SIG que son utilizados como herramienta para la investigación básica suelen necesitar del desarrollo de nuevas bases de datos.
- Aunque hay bastante información en formato estandarizado compatible con los SIG, existen diferentes modelos de datos. Aún no se logra unificar los criterios para el formato de archivos utilizados por los diversos programas, sin embargo se han hecho propuestas. Uno de los proyectos más interesantes para lograr dicha estandarización es el elaborado por el consorcio abierto de SIG, *Opensig*¹. En México, el INEGI coordina el SNIG², que emite los criterios para concertar los trabajos geográficos que desarrollan las diversas entidades de la Administración Pública Federal y los gobiernos estatales a fin de contar con información comparable, homogénea y oportuna.
- Los SIG necesitan actualización constante. No se limita a agregar nuevas capas de información sino que también exista la flexibilidad en el diseño para suponer un replanteamiento global de la base de datos.
- Aunque se trabajen dos proyectos en SIG sobre una misma zona, estos pueden ser completamente disímiles debido a las diferencias en la escala de trabajo. Por lo tanto un proyecto a una escala poco usual puede significar la necesidad de modificarlo o inclusive comenzar nuevamente desde el principio, con el fin de utilizar información que se encuentre registrada en otra escala.
- La consideración de los SIG como herramientas útiles para cualquier tipo de empresa con un volumen de negocios importante va en aumento. Manejar con eficacia estos sistemas incrementa el valor del profesionista por la extensión de sus capacidades como planeador o analista de problemas complejos. Un ingeniero civil que maneje SIG, tiene amplia posibilidad de ser contratado para trabajar en la iniciativa privada o en el gobierno.

¹ <http://www.opengis.org/>

² Sistema Nacional de Información Geográfica. www.inegi.gob.mx/inegi/default.asp

5.1 Diseño y organización de un SIG.³

El diseño de un proyecto SIG implica centrar la atención sobre los siguientes puntos:

- *Cliente.*
- *Objetivo del proyecto.*
- *Fuentes de datos.*
- *Base teórica.*
- *Programas y equipo.*
- *Desarrollo de herramientas.*
- *Tiempo/personal/potencia informática.*
- *Escala de trabajo.*
- *Presentación de los resultados del análisis.*
- *Actualización.*
- *Presupuesto disponible.*
- *Estructura organizacional.*

5.1.1 Cliente

Es la entidad que busca la resolución a un estado de insatisfacción, puede ser particular, empresarial o gubernamental.

5.1.2 Objetivo del proyecto

Es la situación o resultados que se desean obtener después de desarrollar un proyecto. Puede ser la resolución de un problema concreto (como la comprobación de una hipótesis) o el desarrollo de una base de datos (por ejemplo un inventario) para ser usado posteriormente. Con el fin de cumplir este objetivo es necesario contar con *datos de partida* (que formarán parte de la base de datos) y una *base teórica* (conjunto de algoritmos y modelos que permitirán pasar de los datos de partida al *resultado*).

En esta etapa se deben establecer los alcances del proyecto que incluye la determinación de las áreas de estudio y las capas de información.

Es útil contestar las siguientes preguntas para identificarlo:

1. ¿Cuál es el problema a resolver?
2. ¿Cómo se puede resolver?
3. ¿Qué alternativas existen?
4. ¿Qué detalle se requiere de la información?
5. ¿Quién utilizará el sistema?

³ Bernhardsen (1999) cap. 17, pp. 289-295, 312-314.

5.1.3 Fuentes de datos.

Con frecuencia es necesario ampliar los datos requeridos para el desarrollo del proyecto, siempre en función del análisis empleado. Se puede comparar a los SIG con los diagramas de caja negra, ya que son sistemas con entradas que se convierten en salidas tras pasar por una serie de transformaciones provocadas por la estructura que lo conforma. Las fuentes de obtención de los datos generalmente son:

- Documentación histórica.
- Toponimia.
- Cartografía oficial.
- Bases de datos procedentes de otros programas.
- Datos de campo.

a) Documentación histórica.

Incluye: códices, planos, lienzos, mapas, genealogías, anales, títulos y libros de oraciones. Algunos de estos documentos son de interés geotécnico, geológico e hidrológico para la descripción del subsuelo: localizan cauces de antiguos ríos y barrancas; trazos y cruces de antiguos canales; configuración o distribución en extensión de ex-lagos y lagunas, bordes o diques; calzadas, etc.

Su estudio puede contribuir en particular al análisis de la historia de cargas de determinados predios, ayudando a comprender el comportamiento de estructuras y de sus posibles problemas.

b) Toponimia.

En el caso de localidades, la importancia que tienen los nombres para referir o designar un rasgo dentro del ámbito geográfico es indiscutible. Identifican en forma rápida y objetiva e incluso llegan a describirlos. Contar con datos básicos constituye una valiosa herramienta para el análisis integral de los fenómenos que se desarrollan en el espacio geográfico.

La toponimia arroja con frecuencia información interesante sobre la topografía y la naturaleza del subsuelo en el sitio considerado (Tlalpan: tierra firme; Xaltepec: cerro de jales; Ixtapalapa: lugar de piedras blancas, Tepeyacac: nariz de la montaña, etc.).

c) Cartografía oficial.

El INEGI produce diversos tipos de datos geográficos, entre los que destacan los archivos de datos digitales que representan a su vez diversos objetos geográficos. Para fines prácticos, tales datos se agrupan en tres clases:

1. *Conjuntos de Datos Vectoriales.* Corresponden a la presentación digital de los mapas que tradicionalmente ha elaborado el INEGI: consignan los rasgos u objetos geográficos mediante una representación de puntos y líneas que conforman áreas, esos datos se encuentran separados por temas en diferentes capas de información tales como vías de comunicación, localidades, hidrografía, curvas de nivel, etcétera.

2. *Conjuntos de Datos Raster.* Se incluyen las imágenes satelitales y los modelos de elevación del terreno. La estructura de estos archivos es de un arreglo matricial de valores de un atributo particular (valores de la reflectancia del terreno para imágenes satelitales o valores de altura del terreno cuando se trata de los modelos de elevación del terreno).
3. *Conjuntos de Datos Alfanuméricos.* Archivos de tipo texto con diferentes atributos considerados de interés, relativos a los diferentes rasgos existentes en los conjuntos de datos vectoriales. En esta clase, se incluyen archivos de nombres geográficos (topónimos y localidades), puntos geodésicos, puntos de muestreo para mapas de recursos naturales, descripciones de unidades temáticas, etcétera.

Los archivos digitales mencionados tienen diferentes niveles de generalización de acuerdo con lo que se quiera analizar.⁴

d) Bases de datos procedentes de otros programas.

Cualquiera que sea el software utilizado, puede llegar la necesidad de importar capas de información almacenadas en formato SIG pero con un modelo de datos incompatible. Todos los programas disponen de herramientas que facilitan el proceso de importación/exportación de datos, sin embargo la transformación es diferente para datos raster y vectorial.

En el primer caso no hay demasiadas dificultades puesto que la codificación de datos raster no difiere excesivamente de unos programas a otros pues se trata de matrices de números.

El caso de los vectoriales es más complejo, debido al modo de codificar aspectos como los bordes de área, los polígonos isla y principalmente, la existencia de dos concepciones acerca de los datos espaciales (CAD y SIG) multiplica la cantidad de formatos diferentes. Generalmente se trata de formatos con derechos de autor, que cambian con las versiones de los programas. La consecuencia es que no siempre los módulos de importación funcionan correctamente, siendo necesaria en muchos casos la edición manual.

e) Datos de campo.

Corresponden a observaciones directas, como sondeos, mediciones topográficas (tradicionales o con GPS), imágenes satelitales o aéreas, aforos y encuestas.

5.1.4 Base teórica

Corresponde a la interpretación de los fenómenos mediante la conceptualización del SIG. Es necesario contar con conocimiento sobre el problema con el fin de incluir la información necesaria en el modelo para conseguir los objetivos. Es fundamental en este paso la construcción de la base de datos (sección 5.2).

⁴ <http://www.inegi.gob.mx>

5.1.5 Programas y equipo.⁵

Un proyecto de SIG no debe limitarse al manejo de un programa, ya que lo *importante son los datos*. De hecho no existe impedimento para utilizar diferentes programas en forma complementaria como: CAD para digitalizar, paquetes estadísticos para el análisis de datos y programas de gestión de bases de datos no espaciales (DBMS). Normalmente un *programa de gestión de SIG* incluye un conjunto de modelos y algoritmos que se organizan normalmente de forma modular.

Es conveniente realizar las siguientes preguntas antes de comprar cualquier programa SIG:

1. ¿Se conoce a alguien que lo utilice?
2. ¿Quién lo maneja?, ¿es un colaborador potencial?
3. ¿Se ha utilizado en algún proyecto similar?
4. ¿Puede manejar todos los formatos de datos que necesita el proyecto?
5. ¿Puede manejar el volumen de datos que se van a generar?
6. ¿Permite acceder a los algoritmos utilizados y a diseñar?
7. ¿Puede ejecutarse en las computadoras y sistemas operativos disponibles o habrá que comprar y/o aprender nuevos?
8. ¿Dispone de herramientas sencillas para la importación/exportación de información?
9. El costo del programa.
10. ¿La compañía que lo produce se mantendrá en el mercado el tiempo suficiente para resolver los problemas que surjan?
11. ¿Permite automatizar procedimientos?
12. ¿Perderá en algún momento la eficiencia respecto a las necesidades futuras previsibles?

Junto con las preguntas anteriores, hay que considerar que existen diversos tipos de software útiles para proyectos SIG:

1. Respecto a la filosofía y objetivos de desarrollo.
2. Raster o Vectorial.
3. Basados en menús o en comandos.
4. Modelación cartográfica o dinámica.

Ningún programa de SIG puede ser el mejor de los programas posibles y cubrir todas las expectativas. Los programas se especializan en función del tipo de datos que utilizan, las aplicaciones y la lógica de trabajo.

La clasificación respecto a la filosofía y objetivos de desarrollo se refiere a:

- SIG comerciales (ArcInfo, Geomedia, ArcView, MapInfo, Smallworld).
- SIG gratuitos o semigratuitos (SPRING, PCRaster, IDRISI).

⁵ Aronoff (1989) pp. 209-225; Somers (1994) cap. 4.

Según el tipo de datos que manejan:

- SIG Raster. Incluyen principalmente herramientas para el manejo de variables espaciales (IDRISI, GRASS, ERMapper, SPRING, PCRaster).
- SIG Vectorial. Orientados al manejo de objetos (ArcInfo, ArcView, MapInfo, Geomedia).

Por la forma de organizar el trabajo:

- SIG basados en menús, orientados normalmente a la gestión empresarial o administrativa (ArcView, IDRISI para windows, MapInfo, Geomedia, SPRING)
- SIG basados en comandos, orientados a la investigación (GRASS, ArcInfo, IDRISI para MSDOS, PCRaster). La ventaja de éstos es la capacidad de programar y ejecutar scripts⁶ complejos.

Finalmente, la clasificación orientada a “*modelos cartográficos–modelos dinámicos*” es:

- Los programas orientados a crear modelos cartográficos producen nuevos mapas de las variables contenidas en una base de datos o de nuevas variables calculadas a partir de las disponibles, lo que supone simplemente una operación de cartografía automática. A estos programas se les conoce como programas de *desktop mapping*, que son realmente un *complemento* a los SIG. Gran parte de la popularización de los SIG se debe a este tipo de aplicaciones ya que han permitido introducir la dimensión espacial de la información en forma sencilla.
- Los modelos dinámicos utilizan herramientas de análisis espacial y álgebra de mapas para el desarrollo y verificación de hipótesis acerca de la distribución espacial de las variables y objetos. Integran modelos matemáticos de procesos naturales dinámicos. Estos programas son los adecuados para la toma de decisiones, planificación física, ordenación territorial, estudios de impacto ambiental entre muchas otras aplicaciones. A estos programas gestores de SIG se les llama *profesionales*. Por citar algún ejemplo, el programa Arcview en sus versiones posteriores a la 3.x y Arcinfo cumplen con estos requisitos. El determinar que programa entra en esta clasificación es difícil, pues muchas veces la habilidad e imaginación del usuario determina el alcance del programa. Algunos proyectos realizados con este tipo de programas son: determinación de áreas susceptibles de inundación en un período de retorno T, consecuencias ambientales de un embalse aguas abajo, y mejoras en la eficiencia del consumo de agua en una población.

⁶ Script: Archivo de comandos.

5.1.6 Desarrollo de herramientas⁷

Es posible desarrollar herramientas complementarias que faciliten el trabajo o que realicen operaciones que el programa SIG originalmente no es capaz de llevar a cabo. Debido al gran número y complejidad de las operaciones que un SIG debe llevar a cabo, existen una serie de características deseables en un buen programa de gestión de SIG:

- a) *Modularidad*. Implica que prácticamente todas las operaciones de SIG pueden descomponerse en una otras más sencillas. Un enfoque modular en el que cada operación sencilla pueda ejecutarse de forma independiente al sistema incrementa la sencillez y la flexibilidad.
- b) *Trabajo en línea de comandos*. Con relación a la característica anterior, al utilizar la línea de comandos se pueden combinar distintos módulos para crear operaciones complejas.
- c) *Apertura del programa*. Todos los sistemas informáticos se dividen en *abiertos* y *propietarios*. Los sistemas propietarios defienden sus licencias y no permiten la intromisión del usuario en los algoritmos del programa. Los sistemas abiertos son aquellos que hacen público el código fuente (la manera en que hacen las operaciones y almacenan los datos). Las ventajas de un sistema abierto son evidentes, permiten verificar si los algoritmos utilizados son válidos para los objetivos, además es posible integrar extensiones al programa original para mejorar las operaciones.
- d) *Facilidad de programación*. El nivel más avanzado de usuario de SIG es el programador. En proyectos grandes y complejos, las herramientas disponibles en un SIG pueden no ser suficientes, por tanto el usuario necesita incorporar sus propios módulos.

El desarrollo de herramientas de SIG complejas se apoya decisivamente en las solicitudes de los usuarios, desde consultas simples a la base de datos hasta la elaboración de algoritmos.

5.1.7 Tiempo/personal/potencia informática

La *potencia informática* requerida esta determinada por el tipo de módulos que se van a utilizar y el volumen (número y tamaño de los archivos) de la información de partida. Es pertinente considerar la actualización frecuente del hardware debido a que los proyectos SIG siempre están en constante crecimiento.

Normalmente los proyectos se autorizan muy ajustados de tiempo y dado que el trabajo con SIG puede demorar, es necesario considerar en el diseño del proyecto la cantidad de personal requerido, su *nivel de preparación* y la *automatización de tareas*. Un SIG es utilizado por diversos usuarios. De acuerdo a sus necesidades y presupuestos existen cuatro categorías (Figura 5.1-1).

⁷ Huxhold (1991) cap. 8.



Figura 5.1-1 Categorías de usuarios de programas de SIG.

- *Elaboradores de mapas*: Solicitan representar los datos en un mapa, realizar reportes y mostrar resultados en forma efectiva, realmente no requieren de un programa gestor de SIG.
- *Desktop mapping o mapeo de escritorio*:⁸ Interesados en diseñar y crear sus propios mapas, ubicar eventos y lugares, consultar, comparar y manipular mapas y agregar salidas cartográficas de calidad a sus presentaciones. Manejan un ambiente híbrido SIG/CAD.
- *SIG de escritorio*:⁹ Requieren encontrar rasgos y tendencias, analizar relaciones, integrar información multimedia, crear soluciones personalizadas.
- *SIG profesional*: Tienen como objetivo crear y administrar bases de datos espaciales, modelar y analizar alternativas, desarrollar aplicaciones específicas y construir sistemas corporativos.

La automatización de tareas en SIG se ha desarrollado gracias a los lenguajes de SCRIPT o MACROS. Son lenguajes sencillos que realizan operaciones de alto nivel. ArcInfo desarrolló en principio un lenguaje de macros AML, después otro más potente AVENUE y finalmente ha optado por utilizar VisualBASIC.¹⁰

Hay que manejar a la automatización con la debida precaución, ya que los resultados intermedios pueden pasar sin revisión y filtrar algunos errores.¹¹

⁸ Cowen (1998) cap. 7-8

⁹ Gray y Maizel (1995) pp. 178-179.

¹⁰ Dangermond (1983) pp. 212-225.

¹¹ Burrough, McDonnell (1998) pp. 178-185.

5.1.8 Escala de trabajo.

Cuando se trabaja en SIG se distinguen dos:

1. Escala de trabajo y de los datos de entrada (a la que ocurren los fenómenos que se estudian).
2. Escala de representación (presentación de los resultados finales).

Por ejemplo para realizar un mapa de la erosión potencial sobre la región del valle de México, no tiene ningún sentido partir de un mapa topográfico a escala 1:200,000 ya que los procesos de erosión y la variabilidad espacial de los factores que los condicionan actúan a una escala mucho más detallada.

5.1.9 Presentación de los resultados del análisis.

Los SIG proporcionan múltiples opciones para crear mapas y reportes. Los productos finales deben estar directamente relacionados con los objetivos del proyecto, deben ser variados en su presentación de resultados: gráficas, reportes y mapas temáticos o mapas base. Todas las salidas están construidas directamente a partir de los atributos de la base de datos del SIG, por lo que si se hace alguna actualización en ella, la presentación también será renovada.

Otro método de presentación de resultados es a través de mapas generados por alguna consulta descriptiva o espacial (vea el capítulo 3).

5.1.10 Actualización.

Con el tiempo se van desarrollando nuevos algoritmos y modelos que amplían la capacidad de análisis de estos sistemas.

Para el correcto funcionamiento del SIG es necesaria la creación de un equipo multidisciplinario que se encargue del mantenimiento global de la información gráfica-alfanumérica disponible.

Al realizar cualquier actualización en la cartografía, es indispensable la presentación de un plano a partir del cual se cotejará directamente la información existente. Es necesario llevar a cabo una revisión minuciosa de la modificación propuesta, empleando las herramientas que dispone el sistema, comprobando que se ajuste a las condiciones de ubicación física y al conjunto de ejecuciones permitidas. En el caso de que la información sea aportada en formato digital se verificará que se adecuen al formato requerido los conceptos geográficos: coordenadas, proyección, escala, etc. El encargado en el mantenimiento del SIG ejecutará la introducción de datos, rehaciendo las condiciones topológicas y renovando el conjunto global de la información, de manera que los distintos usuarios puedan acceder a ella de una forma rápida y sencilla. Además será el responsable de ejecutar en forma periódica exportaciones de información cartográfica, para que sea actualizada por las distintas instituciones dependientes.

Con respecto a la información alfanumérica, se debe comprobar que los datos de consulta sean en todo momento los reales. Para evitar errores, esto se realiza directamente en las bases de datos, así cualquier cambio estará perfectamente documentado.

5.1.11 Presupuesto disponible.

Se deberá *comprar* todo lo que falte. Se debe valorar la viabilidad financiera del proyecto antes de ponerlo en marcha.

5.1.12 Estructura organizacional.

La información contenida en cualquier SIG es valiosa y costosa. El personal encargado de la elaboración del sistema debe ser confiable para evitar el espionaje y piratería de los datos. Dado que una cantidad considerable de recursos es encauzada a estos proyectos y que seguramente la totalidad de usuarios no explotarán el conjunto de capacidades del sistema, es necesario restringir el acceso en función de su uso. Esto se logra con relativa sencillez mediante la implementación de contraseñas y cuentas para diferente tipo de usuarios. El cliente debe proponer este aspecto.

5.2 Construcción de la Base de Datos.

Forma parte de la base teórica. De esta etapa depende la precisión y calidad de los productos finales. Incluye:

- Delimitar el área de estudio.
- Definir las capas de información.
- Codificación de los atributos y construcción del diccionario de datos.

5.2.1 Delimitar el área de estudio

Imponer límites lógicos, ya que no es costeable extenderse a una magnitud no manejable. Está en función de los objetivos del proyecto y se relaciona directamente con la escala de trabajo. La delimitación es hecha por factores varios como son la división política, altitud, temperatura, tipo de suelo, región, etc.

5.2.2 Definición de las capas de información.

Dependiendo del análisis a realizar, se determinan las capas de información (o *elementos geográficos*). Los atributos que se requieran para cada elemento pueden ser varios y deben basarse en el criterio del análisis y el objetivo del proyecto (Tabla 5.2-1).

Elemento geográfico	Clase de elemento	Atributos
Suelos	Polígonos	Tipo
Uso de Suelo	Polígonos	Código de uso de suelo Costo por hectárea
Camino	Líneas	Código del camino, Carriles
Drenaje	Líneas	Orden, Flujo
Pozos	Puntos	Profundidad

Tabla 5.2-1 Descripción de elementos geográficos, clases y atributos correspondientes.

5.2.3 Codificación de atributos y construcción del diccionario de datos.¹²

Después de determinar los atributos que se requieren por cada capa, se deben decidir los parámetros específicos para cada atributo y los tipos de valores a almacenarse. Se definirá el tipo de los atributos ya sea numérico, carácter ó fecha. Por ejemplo si se desea almacenar nombres de calles se utilizará caracteres, y en el caso de costos el valor será numérico.

El diccionario de datos consiste en la descripción de todas las capas y atributos (metadatos) y mantiene una referencia clara durante el desarrollo del proyecto (Tabla 5.2-2). También deben definirse que posibles valores tomarán los atributos y los rangos de los datos.

Una vez hecho lo anterior se organiza la información en capas, esto dependerá del programa de SIG que se utilice. Existen dos formas comunes de organización: por *tipo de elemento* (puntos, arcos y polígonos) y por *tema*. Generalmente se organiza por tipo de elemento y almacena en capas separadas.

Elemento	Clase	Atributos	Tipo	Valores	Descripción	
Suelos	Polígonos	Clasificación	Numérico	0	Adecuado	
				1	No Adecuado	
Uso del Suelo	Polígonos	Código uso de suelo (CUS)	Numérico	100	Agrícola	
				200	Urbano	
				300	Bosque	
				400	Agua	
		Costo por hectárea (CPH)	Numérico	Valor monetario actual		
Caminos	Líneas	Código del camino (CC)	Carácter	XXXXX		
					2	2 carriles
					4	4 Carriles
		Carriles	Carácter	6	6 Carriles	
Drenaje	Líneas	Orden	Numérico	1	Primer orden	
				2	Segundo orden	
				3	Tercer orden	
		Flujo	Numérico	Valor del flujo		
Pozos	Puntos	Profundidad	Numérico	1	Entre 0 y 50 m	
				2	Entre 50 y 100 m	

Tabla 5.2-2 Ejemplo de un diccionario de datos para un SIG.

¹² Aronoff (1989) pp. 115-118; Jones, Kidner, Luo, Bundy (1996) cap. 3.

5.3 Aplicación

Existe un amplio campo de aplicación¹³ de los SIG. Se pueden clasificar en:

1. Planeación y ordenamiento territorial (aprovechamiento de recursos naturales, desarrollo urbano, políticas públicas, toma de decisiones, planeación integral).
2. Estudios ambientales (base de datos de variables ambientales, datos sobre suelo, erosión, vegetación, cuencas, integración y análisis de variable).
3. Estudios económicos y sociales (tenencia de la tierra, catastro rural y urbano, censos económicos y de población, actividades electorales, dotación y prestación de servicios, análisis de mercados).

Por citar sólo un aspecto, en nuestro país, la dinámica que experimentan los recursos naturales puede resumirse en los efectos manifestados en:

- El ritmo de deforestación
- La sobreexplotación de los acuíferos
- El proceso de desertificación
- La urbanización acelerada de la población
- La contaminación de cuerpos de agua
- Los niveles de erosión del suelo
- La pérdida de la biodiversidad.

Los proyectos de ingeniería civil al tener carácter multidisciplinario, abarcan en su totalidad los campos mencionados, por ello la importancia de exponer la utilidad de estos sistemas como herramienta básica para el desempeño de la profesión.

Otras aplicaciones exitosas son aquellas usadas en problemas comunes de negocios. Esto es posible gracias a la capacidad de relacionar información a lugares específicos, como direcciones de calles, códigos postales y datos censales. Es viable crear "mapas de negocios" que ayuden a identificar patrones y entender sus relaciones no aparentes en tablas y diagramas.

Los SIG sirven si se explora la localización de tiendas, la reorganización de territorios de ventas, mejora de rutas de reparto, identificación de nuevos mercados, o elaboración de mapas. Aplicaciones como estas son básicas para la ingeniería de transporte, otra rama de la ingeniería civil.

En lo que respecta a los servicios municipales, una gran parte de la gestión municipal que realiza una administración local está relacionada con el territorio, lo que implica que aproximadamente el 80% de los datos que maneja se puedan vincular, directa o indirectamente al espacio geográfico del municipio como:

¹³ Kaplan (1996) cap. 3-6; Longley, Goodchild y Maguire (1999) cap. 8; Mitchell (1997) cap. 11-13.

Apoyo en Planeación: diseño y operación de redes de agua. Cálculo de la demanda actual y futura del agua, diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Identificación de fuentes contaminantes. Caracterización del agua por zona. Planes de distribución y rutas óptimas de recorrido.

Dada la importancia y consecuencias que tiene la gestión del territorio, el conocimiento y manejo de los SIG resulta útil, debiendo ser un componente fundamental de cualquier sistema de información corporativo.

5.3.1 Sistema de Información geográfica de sondeos geotécnicos¹⁴

a) Antecedentes

La necesidad de contar con información de sondeos geotécnicos surgió a raíz de los sismos registrados en septiembre de 1985, que causaron grandes daños en construcciones grandes y medianas, así como en casas habitación. En esa época no se habían realizado los estudios correspondientes de mecánica de suelos para detectar con exactitud el comportamiento y tipo de suelo sobre el cual se encontraban desplantadas las construcciones.

b) Cliente

El Instituto de Ingeniería de la UNAM y la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos iniciaron con el apoyo parcial de diversos patrocinadores.

c) Objetivo del proyecto

El Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos tiene como objetivo almacenar sistemática y permanentemente la información puntual disponible sobre los rasgos generales del subsuelo, a través de los datos obtenidos en sondeos geotécnicos de diferentes tipos y que permita el manejo simultáneo de información cartográfica y bases de datos geotécnicas. El sistema pretende cubrir a futuro las principales ciudades de la República aunque actualmente los trabajos se enfocan principalmente al valle de México.

Los requisitos con las que se desarrolló el sistema son:

- Presentar en forma clara la información geográfica de la zona en estudio.
- Mostrar la información descriptiva o temática de los sondeos que se encuentren localizados, si es que existen, en el área seleccionada por el usuario.
- Ser de manejo sencillo, dado que está enfocado a ingenieros del área de ingeniería civil o de especialistas en mecánica de suelos, que en ocasiones no se encuentran familiarizados con el manejo de sistemas de información geográfica.

¹⁴ El proyecto que brevemente se expone es realizado por el Dr. Gabriel Auvinet Guichard, en el instituto de ingeniería de la UNAM. El autor participó en el proyecto.

d) Fuentes de datos.

Para comprender la naturaleza de los depósitos de suelo, rellenos y formaciones geológicas sobre los que se edifica la ciudad de México, fue necesario partir de dos marcos de referencia: el *geográfico* y el *físico*.

El marco geográfico permitió entender la naturaleza de los elementos tanto naturales como artificiales construidos por el hombre y que se encuentran distribuidos sobre la superficie del terreno en la Cuenca de México. Sus fuentes de información son:

- Documentación histórica
- Cartografía
- Topografía
- Hidrografía
- Fotografías aéreas
- Imágenes de satélite

El marco físico permitió comprender la naturaleza de los depósitos de suelo, rellenos y formaciones geológicas que se asientan en el territorio de la Cuenca de México:

- Geología
- Geomorfología
- Geofísica
- Geotecnia

Al establecer el marco geográfico y físico se elaboraron mapas topográficos, geomorfológicos, geológicos, hidrológicos y de zonificación geotécnica. Parte de esta información se encontró en forma de planos, grabados e ilustraciones, que para fines de su integración se tuvo la necesidad de vectorizar.

También se utilizó información digital editada por el INEGI, donde se encuentra información básica de topografía, hidrografía y geología. Contar con una división del territorio de manera regular proporciona compatibilidad, permite actualizar o agregar nueva información, facilita la difusión con otras instituciones generadoras de información.

Una vez obtenidos los sondeos se procedió a su localización sobre cartas urbanas¹⁵ impresas a escala 1:10,000 de la Ciudad de México con el fin de encontrar sus coordenadas cartesianas.

e) Base teórica.

La creación de la base de datos es uno de los elementos principales del sistema. Busca almacenar y sistematizar la información disponible sobre el subsuelo de las principales áreas urbanas del país. De esta etapa depende la precisión y calidad de los productos finales. Incluye:

¹⁵ Definen la traza y mancha urbanas a nivel de calles y manzanas. Cada una comprende un rectángulo de 6.0 x 5.50 km referidas en proyección Universal Transversa de Mercator, UTM.

i) Delimitar el área de estudio.

Con el propósito de facilitar el manejo de la información para el análisis de detalle se dividió la extensión de 9,600 km² de la cuenca de México en siete áreas atendiendo a los diversos problemas locales del subsuelo relacionados con el diseño y construcción de cimentaciones. Cada área cuenta con características propias: galerías de minas antiguas al poniente, alta compresibilidad en la planicie de los ex-lagos, inestabilidad de los techos de galerías y cavernas de coladas lávicas al poniente y sur, etcétera.

ii) Definir las capas de información.

En función de los objetivos del proyecto, se determinaron las siguientes capas de información (Tabla 5.3-1):

Elemento geográfico	Clase de elemento	Atributos
Sondeos geotécnicos	Puntos	Vea el diccionario de datos (Tabla 5.3-2)
Curvas de igual hundimiento	líneas	Piezometría del NAF, tipo de suelo.
Período de vibrar del suelo	líneas	Tiempo en segundos
Geología	Polígonos	Clasificación
Hidrología	Líneas	Gasto, tipo
Curvas de nivel	Líneas	Elevación
Vialidades	Líneas	Nombre del camino, colonia
Estaciones acelerográficas	Puntos	Información sísmológica
Uso de suelo	Polígonos	Población afectada, carga aproximada aplicada
Pozos de extracción	Puntos	Profundidad, gasto

Tabla 5.3-1 Capas de información del SIG-SG.

La información proveniente de exploraciones directas y puntuales del subsuelo corresponde a diferentes tipos de sondeos geotécnicos que proporcionan la variación estratigráfica y propiedades índice, mecánicas y dinámicas con la profundidad. Esta información sobre el subsuelo, constituye la base para efectuar el análisis de detalle: describir las características espaciales de la distribución de los materiales acerca de los depósitos de suelo, rellenos y formaciones geológicas sobre cartografía urbana a nivel de manzanas y calles en la ciudad de México.

Otras capas de información relevante relacionadas a la modelación geotécnica son las curvas de igual hundimiento¹⁶, período de vibrar del suelo (Figura 5.3-2, Pág. 144); el plano de localización de baterías y pozos profundos de extracción de agua (Figura 5.3-1 b, Pág. 143); el plano de localización de estaciones acelerométricas (Figura 5.3-1 a, Pág. 143), la piezometría y datos geofísicos.

¹⁶ Las curvas de igual hundimiento son isóneas de los hundimientos regionales causados por la aplicación de cargas al suelo.

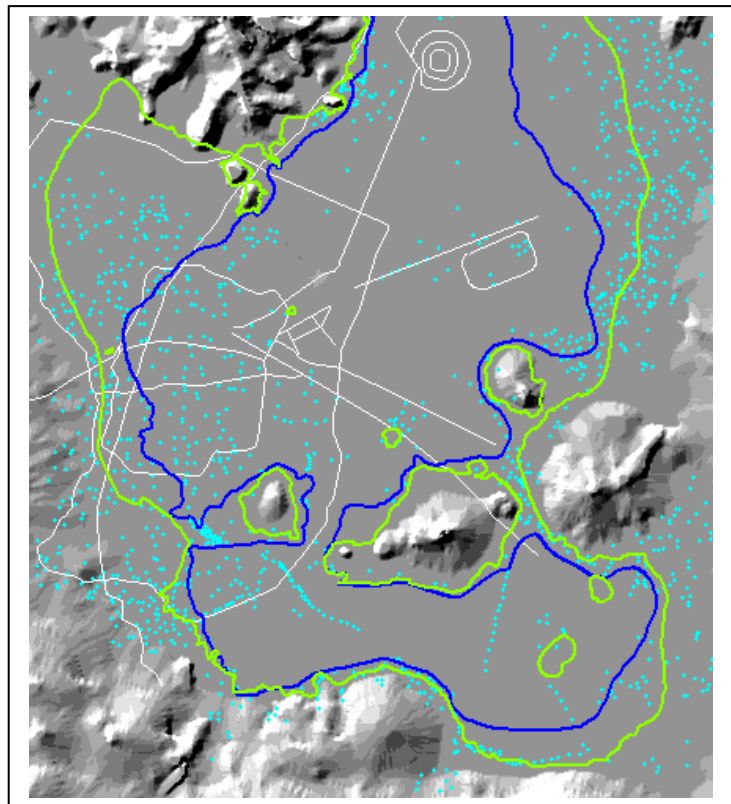
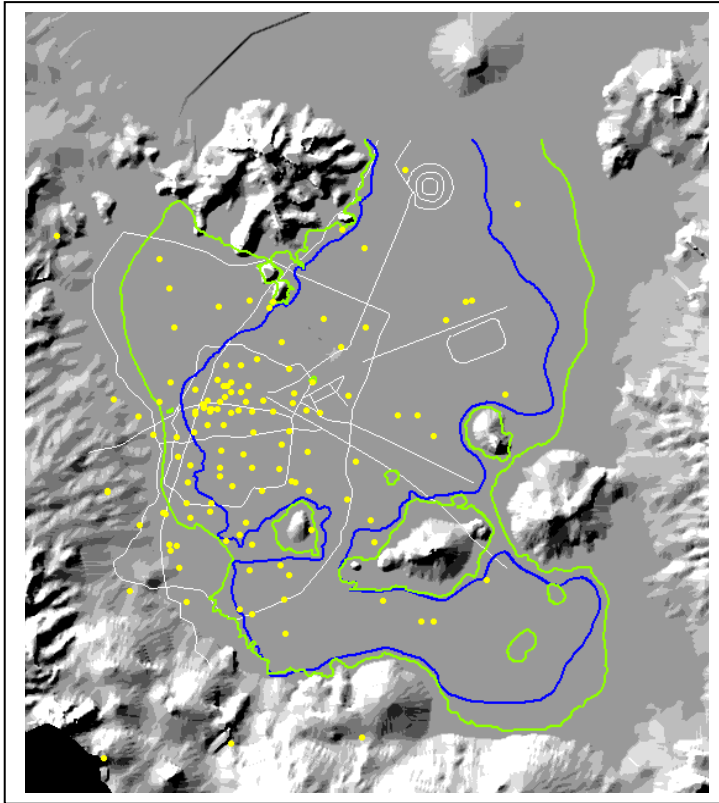


Figura 5.3-1 a. Estaciones acelerográficas, b. Distribución de pozos.

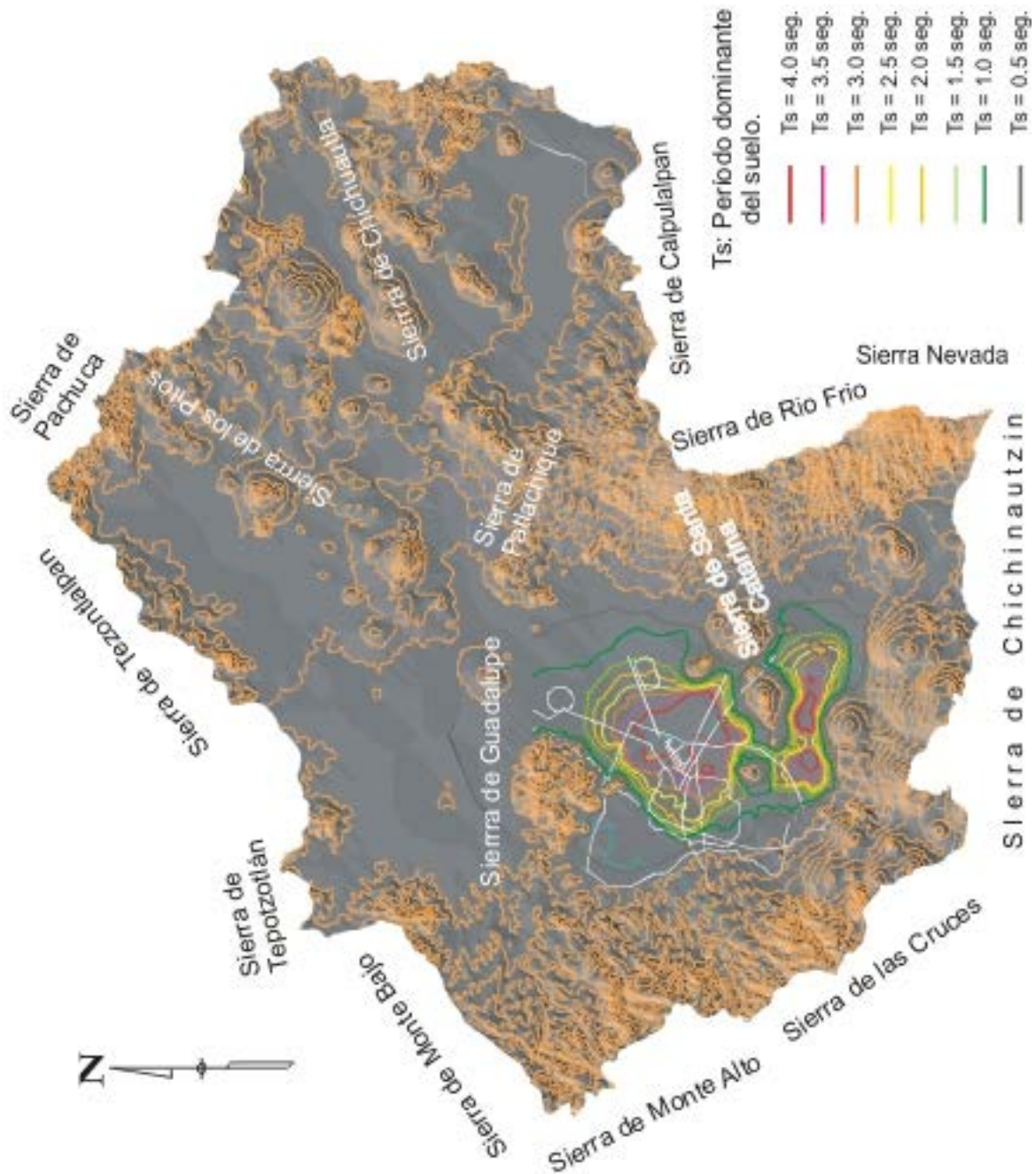


Figura 5.3-2 Período de vibrar del suelo.

iii) *Codificación de los atributos y construcción del diccionario de datos.*

Se localizó en planta cada tipo sondeo en la cartografía digital de la ciudad de México, buscando la mayor exactitud posible y marcando su posición con su clave numérica adyacente. Estos sondeos son almacenados en el formato digital de una base de datos espaciales. La información se agrupa de acuerdo al tipo de sondeo utilizado en la exploración, para esto se clasificó mediante las claves siguientes: 00: Fuente bibliográfica o desconocida, 01: Pozo a cielo abierto con muestreo

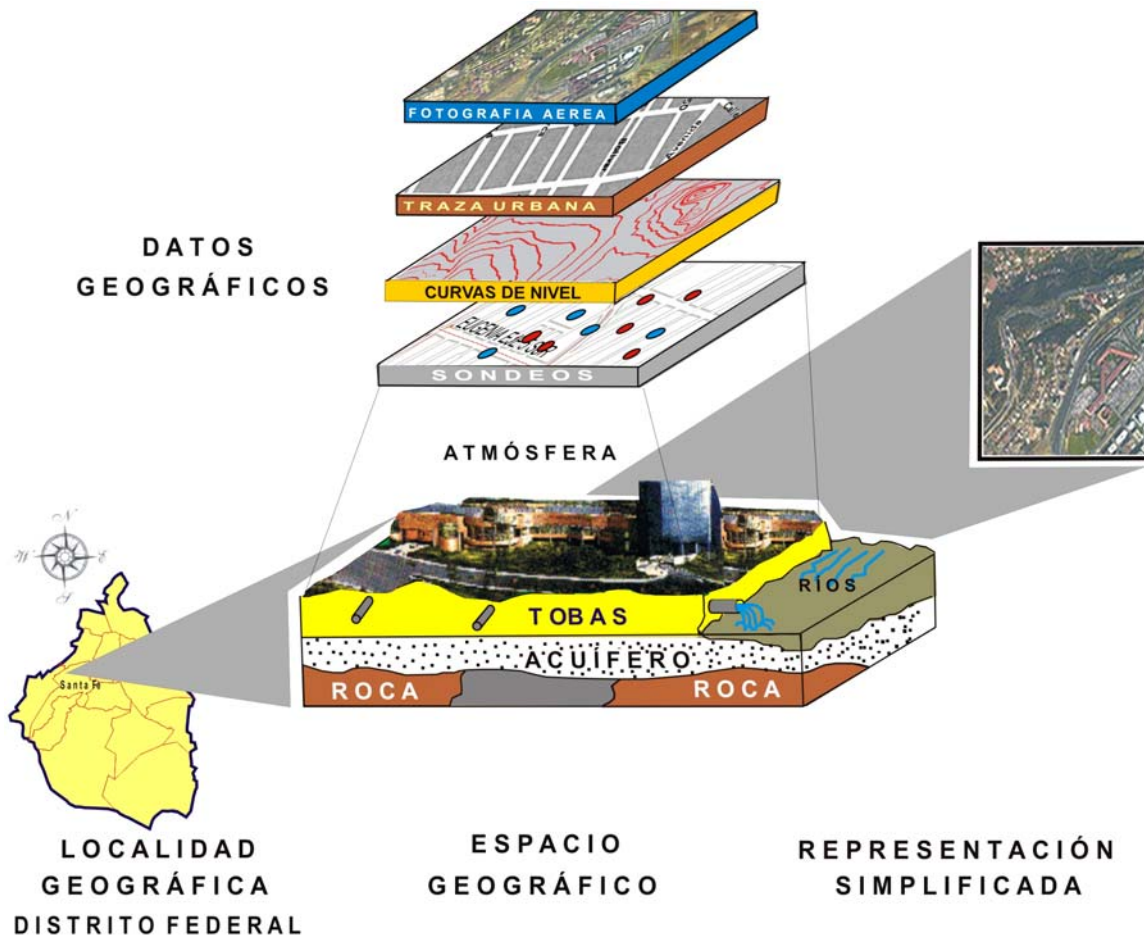
inalterado (PCA), 02: Sondeo de Penetración Estándar (SPT), 03: Sondeo de Cono Dinámico (CD), 04: Sondeo de Cono Eléctrico (SCE), 05: Sondeo Mixto (SM).

El diccionario de datos para la capa de información de los sondeos (Tabla 5.3-2) contiene:

CAMPO	TIPO	OPCIONES	DESCRIPCIÓN
CLAVE	Numérico		Número del registro que corresponde a cada sondeo contenido dentro de la base de datos, dicho número es secuencial, único e irreplicable
MES	Alfanumérico	De Enero a Diciembre (12 meses)	Mes en que se realizó el sondeo
AÑO	Alfanumérico		Año en que se realizó el sondeo
TIPO	Alfanumérico	Anexo de listado	Tipo o técnica de exploración empleada en la exploración
EJECUTOR	Alfanumérico		La compañía que realizó o ejecuto el sondeo
CALLE NUMERO	Alfanumérico		Dirección donde se realizó el sondeo, únicamente calle y número
ENTRE CALLES	Alfanumérico		Las calles entre las cuales se ubica el sitio del sondeo, incluyendo del caso de encontrarse en esquina
COLONIA	Alfanumérico		
DELEGACIÓN	Alfanumérico	Anexo de listado	Delegación o municipio
CIUDAD	Alfanumérico	México D.F., Edo. de México	
ENTIDAD	Alfanumérico	D.F., Edo. de México	El estado
COORDENADA X	Numérico	Incluye seis enteros y dos unidades después del punto decimal	Coordenadas X en el sistema UTM
COORDENADA Y	Numérico	Incluye siete enteros, el punto decimal y dos unidades después del punto	Coordenadas Y en el sistema UTM
COORDENADA Z	Numérico	Incluye cuatro enteros, el punto decimal y dos unidades después del punto	Coordenadas Z sobre el nivel del mar
PROFUNDIDAD	Numérico	Incluye tres enteros, el punto decimal y dos unidades después del punto	Profundidad máxima de exploración alcanzada por el sondeo
PROFUNDIDAD DEL NAF	Alfanumérico	Incluye dos enteros, el punto decimal y dos unidades después del punto	Nivel de aguas freáticas
ZONA	Alfanumérico	Zona I: Lomas; zona II: transición, zona III: Lago	Zona geotécnica del RCDF
OBSERVACIONES	Alfanumérico	Información adicional relevante sobre el sondeo	
IMAGEN	Alfanumérico		Imagen o fotografía electrónica del sondeo

Tabla 5.3-2 Estructura de la base de datos del SIG-SG.

Se presenta a continuación en la Figura 5.3-3 el modelo conceptual del SIG geotécnico.



MODELO CONCEPTUAL

Figura 5.3-3 Modelo conceptual del SIG geotécnico.¹⁷

iv) Programas y Hardware.

Los programas y equipo de cómputo que permitieron el acopio, manipulación y transformación de los datos espaciales (mapas, imágenes de satélite) y no espaciales (atributos).

Programas:

- ILWIS¹⁸ ®. Modelos digitales del terreno e imágenes de satélite.
- Map Info ®. Georreferenciación de la cartografía.
- Arc View ®. Integración de la información.
- AutoCad Map ®. Vectorización.
- Surfer ®. Creación de mapas de contornos y aplicaciones estadísticas.
- Corel Draw ®. Ecuilización de imágenes.

¹⁷ Fuente: Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.

¹⁸ Integrated Land and Water Information System

Equipo:

- Estaciones de trabajo. Integración de la información.
- Computadoras personales. Captura de la información y elaboración de la base de datos.
- Red local. Comunicación entre todos los dispositivos.
- Escáner. Captura de sondeos.
- Tableta digitalizadora. Captura de cartografía.
- Impresoras y plotters. Salida y representación.

v) *Desarrollo de herramientas.*

El desarrollo e implantación del S.I.G. se realizó en forma escalonada. La primera fase de desarrollo incluyó:

- Cartografía digitalizada de la zona en estudio, creación de un mapa llave.
- Aplicaciones personalizadas de consulta de información gráfica y alfanumérica, incluyendo: sondeos geotécnicos, topografía, geología e hidrología.

Posteriormente se amplió la funcionalidad del modelo, adicionando aplicaciones externas al sistema de gestión: información sísmológica y de pozos de extracción de agua.

vi) *Tiempo/personal/potencia informática.*¹⁹

Para el correcto funcionamiento del SIG-SG fue necesario un equipo multidisciplinario. Se requirieron ingenieros civiles especialistas en geotecnia con conocimiento de las herramientas de desarrollo en SIG e informáticos. Este grupo se encargó de implementar nuevas aplicaciones al software con el fin de optimizar, personalizar, realizar el mantenimiento y gestionar la información del sistema.

El grupo de expertos participará en:

- Modificación y conversión de la información
- La resolución de problemas que surjan en torno al sistema.
- Apoyo a otros departamentos resolviendo dudas y realizando entrevistas periódicas a los usuarios para mejorar la funcionalidad.

El trabajo en el área de captura de datos se repartió en departamentos encargados del procesamiento de sondeos, cartografía, georreferenciación y construcción en la base de datos.

Debido a la novedad y complejidad del SIG-SG, debe capacitarse a todo el personal que tenga acceso a la gestión y consulta, se recomiendan cursos de formación, distinguiendo entre los usuarios del sistema y los técnicos encargados del mantenimiento.

¹⁹ Bernhardsen (1999) cap. 17, pp.293-295.

vii) *Escala de trabajo.*

Dado que la unidad de estudio es la cuenca de México, se emplearon 16 cartas topográficas escala 1:50,000 que dividen el territorio en secciones regulares estándar. Al unir estas cartas, se forma el bloque denominado mosaico cartográfico que se emplea como mapa llave o índice.

Toda la información empleada fue convertida a un mismo sistema de referencia estándar, el UTM (Universal Transverso de Mercator), con el datum NAD 27 para Norteamérica.

viii) *Presentación de los resultados del análisis*

La Figura 5.3-4 muestra el funcionamiento del SIG geotécnico desplegando los datos de un sondeo, los aspectos de información general y localización del sondeo.

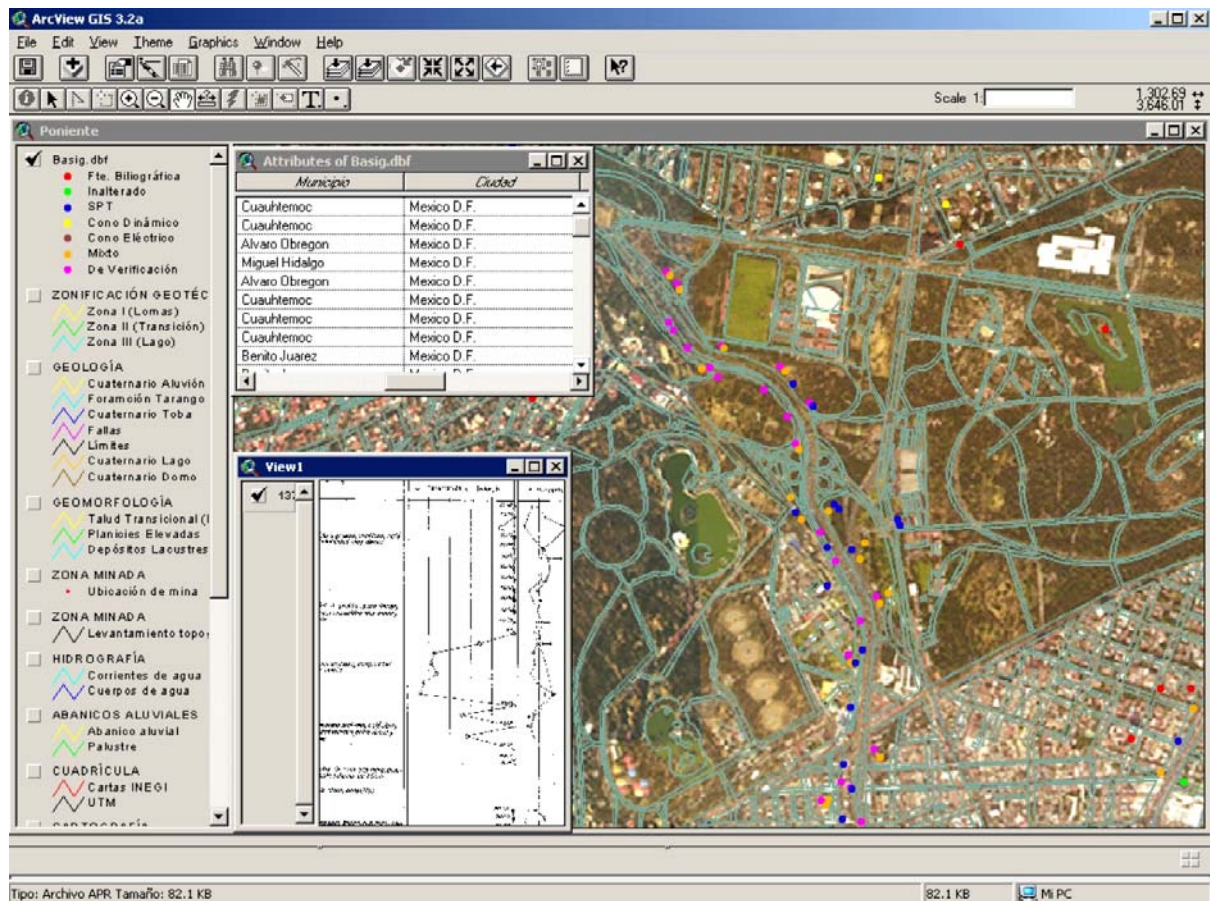


Figura 5.3-4 Funcionamiento del SIG geotécnico.

Para el análisis e interpretación de la información geotécnica se utilizaron perfiles estratigráficos de los sondeos recopilados y se elaboraron diversos cortes (Figura 5.3-5)

Con los cortes (Figura 5.3-6) fue posible identificar la estratigrafía regional que existe en esta zona, y por otra parte establecer con mayor claridad las

formaciones denominadas como Manto superficial, Formación Arcillosa Superior, Primera Capa Dura, Formación Arcillosa Superior y el contacto con los Depósitos Profundos. Estas formaciones fueron identificadas de acuerdo al tipo de material y sus propiedades estratigráficas, además de la profundidad del Nivel de Aguas Freáticas (NAF).

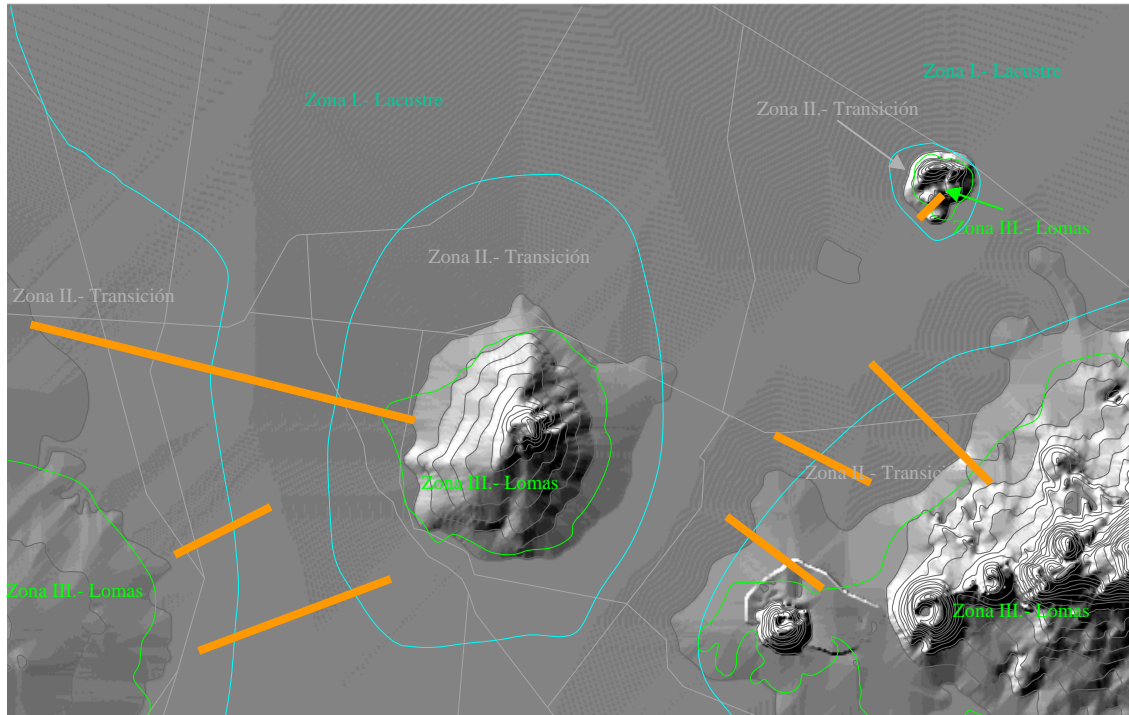


Figura 5.3-5 Zonificación geotécnica local y cortes estratigráficos.

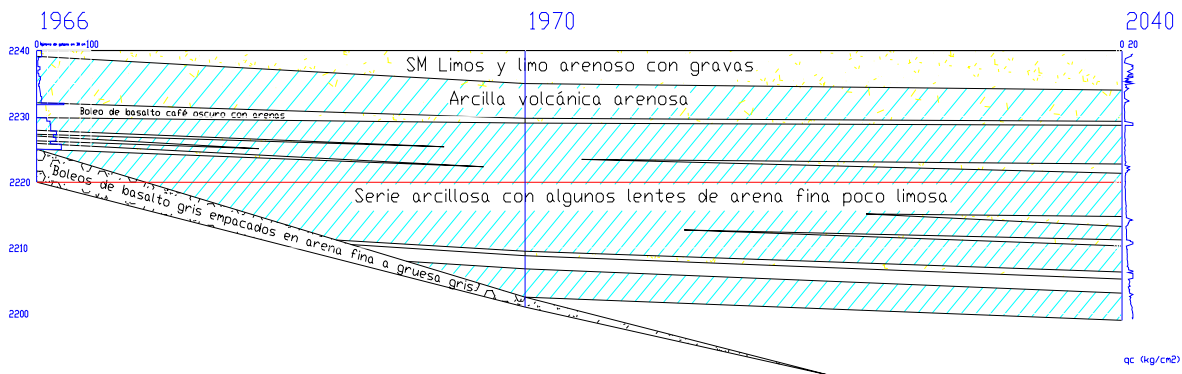


Figura 5.3-6 Estratigrafía regional obtenida con 3 sondeos geotécnicos .

El análisis que permite definir el mapa de zonificación geotécnica se basa en una modelación espacial como la que ofrecen las tecnologías de los SIG para facilitar las tareas relativas a la descripción de las características espaciales de los depósitos de suelo, rellenos y formaciones geológicas (Figura 5.3-7, Pág. 150).

Esta modelación constituye el principio básico sobre el que se sustenta la metodología del análisis dirigido a la descripción de las características espaciales del subsuelo en múltiples aspectos y que se orientan a la definición del mapa de la zonificación geotécnica y la creación de un modelo con el que es posible ampliar el tipo de análisis (Figura 5.3-8, Pág. 151).

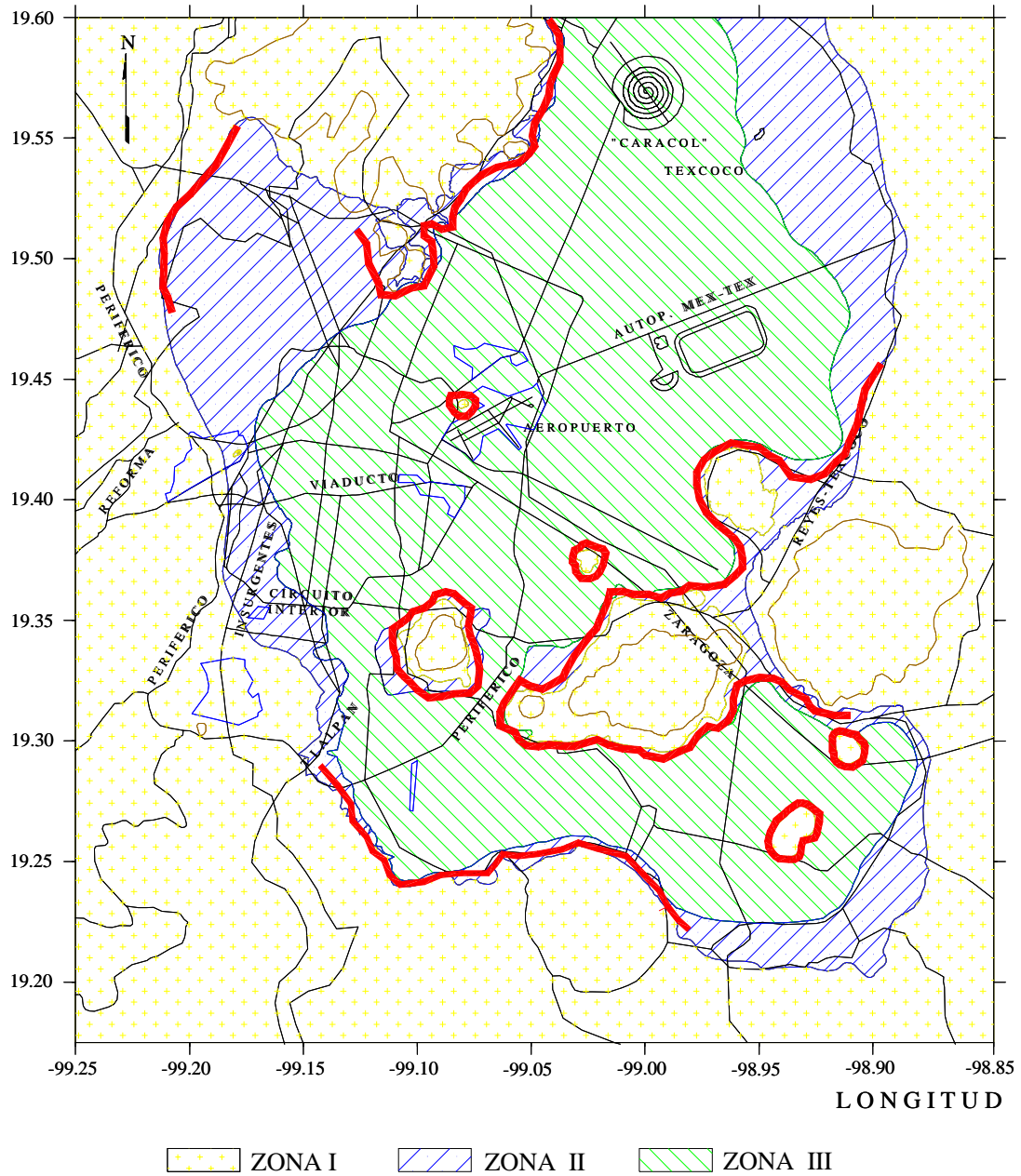


Figura 5.3-7 Mapa de zonificación geotécnica con zonas de peligro de agrietamiento por transición abrupta (rojo), producto del análisis SIG.

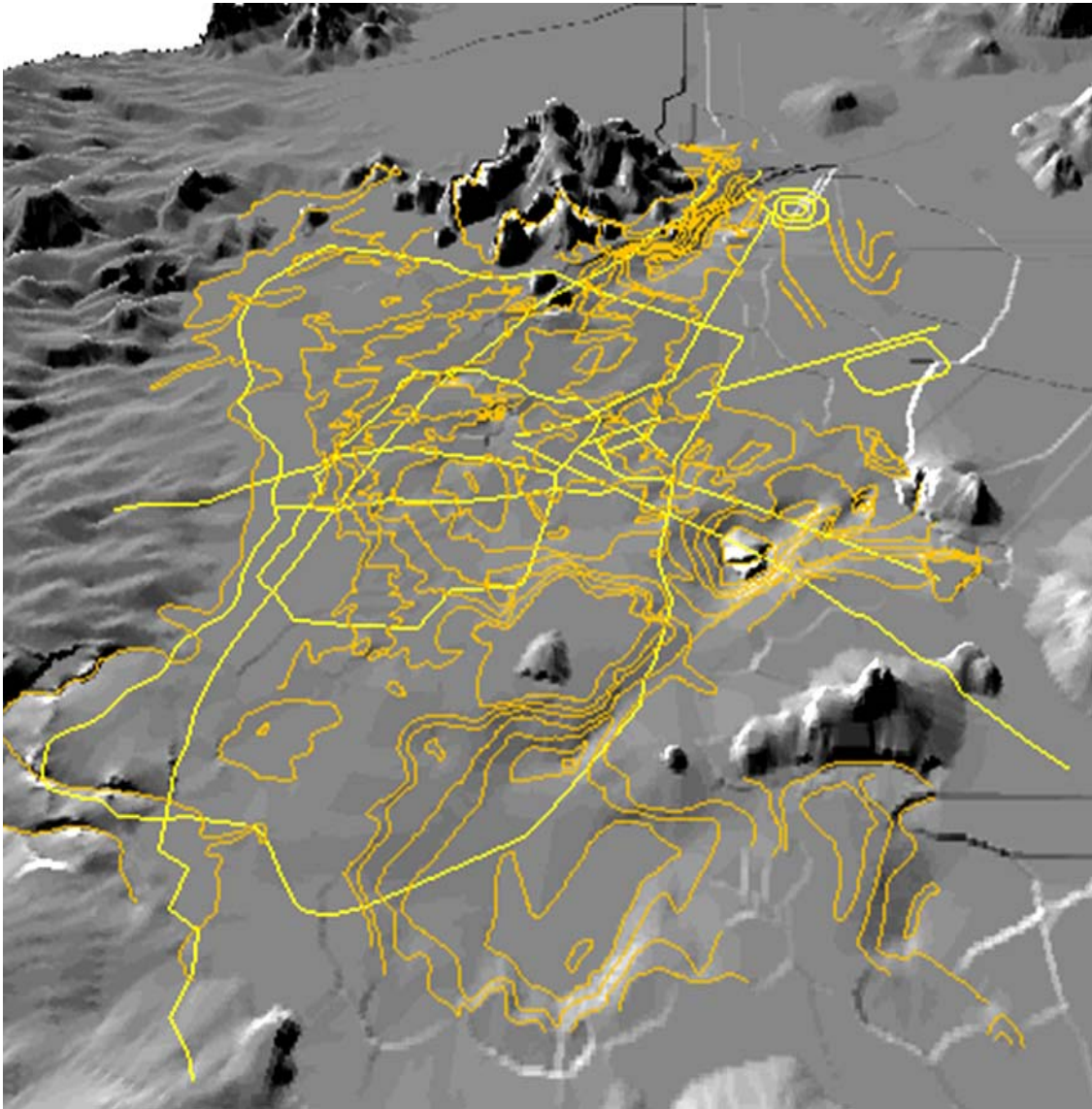


Figura 5.3-8 Velocidad de hundimiento regional.

ix) Actualización.

Los datos deben actualizarse en el momento de conocer variaciones, esto implica que todas las secciones encargadas de la elaboración realicen sus reajustes de forma rápida y exhaustiva, con el fin de que la información se encuentre sincronizada.

x) Presupuesto disponible.

El uso de la tecnología SIG es cara, y más aún cuando se trata de proyectos con esta magnitud. La inversión inicial es alta debido a la obtención de licencias de los programas, equipo y costo por obtención de la información.

En este caso el costo por obtención de la información no fue representativo, pues el instituto de ingeniería de la UNAM, por su labor de investigación, tiene convenios con diversas entidades gubernamentales y privadas.

Para dar una idea, los costos mensuales indirectos (incluyendo mantenimiento del equipo y consumibles), durante el año 2002 fueron del orden de los \$100,000. El sueldo del personal es variable dependiendo de su función. Un especialista con conocimientos en SIG puede ganar de \$25,000 a \$50,000 mensuales. Por lo anterior fue de suma importancia realizar un buen análisis sobre los períodos de terminación y financiamiento antes de comenzar el proyecto.

xi) Estructura organizativa

El SIG es el centro funcional de todas las consultas, actualizaciones y modificaciones que se introduzcan tanto en la base de datos como en las aplicaciones desarrolladas. El acceso a la información geotécnica por medio de consultas que soliciten localización y perfiles estratigráficos será restringido, pues los usuarios podrán consultar únicamente datos para usos concretos. La modificación de los datos estará restringida a los técnicos designados para el mantenimiento y digitalización de la cartografía.

xii) Alcances del proyecto SIG-SG

Con este modelo es posible:

- Generar o revisar zonificaciones del subsuelo y apoyar la práctica profesional de la ingeniería de cimentaciones.
- Hacer adecuaciones a Reglamentos de Construcción, Normas Técnicas para el análisis de Cimentaciones, criterios de diseño sísmico y estudios de riesgo sísmico.
- La información creada es de gran valor práctico para las instituciones de enseñanza e investigación y las entidades federales.
- Instalar funciones para correlacionar la información contenida en diversos campos de la base de datos, incluyendo la posibilidad de evaluar algunas funciones estadísticas.
- Incluir la capacidad para dibujar planos de curvas de igual profundidad de capas típicas del subsuelo.
- Desarrollar e instalar funciones que permitan elaborar perfiles estratigráficos del terreno, a lo largo de ejes seleccionados por el usuario.

El SIG-SG es un sistema que eventualmente tendrá cobertura nacional y hará más eficiente la labor de difusión de información geotécnica entre los especialistas del país. La combinación del conocimiento adquirido a través del SIG-SG, el criterio ingenieril y la experiencia, permitirán fijar el número, tipo y profundidad de los sondeos geotécnicos de un programa racional de exploración. La consulta al SIG-SG, la exploración geotécnica de detalle y la realización de las pruebas necesarias de laboratorio estarán ligadas secuencialmente.

CONCLUSIONES

Los resultados que se obtuvieron de la investigación son los siguientes:

Es bien conocido que en el territorio existen conflictos periódicos: dificultades para el confinamiento de residuos, depredación de los bosques, contaminación de suelos y cuerpos de agua, usos ilegales de suelo, problemas de urbanización, incapacidad para ofrecer alternativas viables para la atracción de capital, etc. Puesto que los municipios son la unidad territorial, una de las aportaciones de la tesis fue identificar las áreas municipales más aptas para la utilización de los S.I.G y que son parte del campo de estudio de la ingeniería civil:

- Catastro.
- Urbanismo.
- Infraestructura de la vía pública (pavimentación, alumbrado, mobiliario urbano, etcétera).
- Compañías de servicios (agua, saneamiento, limpieza, electricidad, telefonía, gas, etcétera).
- Tráfico y Transporte.
- Actividades Económicas.
- Patrimonio.
- Población.
- Sanidad y Asuntos Sociales.

Cabe resaltar que la implantación de este tipo de sistemas en zonas rurales es incuestionable. La disponibilidad de una herramienta de este tipo permite una explotación óptima de los recursos naturales, ya que los análisis involucran gran número de variables, lo que hasta hace pocos años era impensable por el tiempo y costo que ello suponía.

Otra contribución fue definir el perfil del ingeniero civil técnico en sistemas de información geográfica. El uso de estos sistemas no es sencillo, ya que además

de contar con los llamados “conocimientos básicos”: inglés, computación, cartografía, topografía, percepción remota, análisis espacial y teoría de sistemas, se requiere conocimiento sobre el proceso de diseño, desarrollo y funcionamiento de los SIG. Dependiendo del tipo de proyecto, también serán necesarios conocimientos especializados como: geotecnia, hidráulica, transporte, urbanismo, etcétera, con el fin de hacer conceptualizaciones adecuadas de los fenómenos.

Se concluye que los Sistemas de Información Geográfica no sustituyen el criterio, juicio o experiencia de los especialistas, más bien son una herramienta tecnológica que enriquece las diferentes fases del análisis y aumentan la habilidad del usuario para la toma de decisiones en investigación, planeación o administración. Para ello, es indispensable el conocimiento pleno de las funciones y algoritmos empleados por estos sistemas para los análisis.

Debido a que la tendencia es mayor complejidad y difusión de estos sistemas, la demanda de profesionistas que desarrollen aplicaciones específicas utilizando técnicas de modelación es alta. Además de valorar la dimensión espacial de los fenómenos, se debe dar especial importancia al tiempo: actualmente todo cambia en forma rápida y constante. Ahí radica el valor estratégico de los SIG: permiten una visión dinámica del territorio, ayudan a inferir comportamientos anteriores, retratan situaciones actuales y predicen comportamientos futuros. Ello justifica lo propuesto.

Algunas de las ventajas principales por el uso de los SIG identificadas durante el trabajo de investigación son:

Ventajas	Descripción
Realizar análisis y consultas geográficas	Disminuyen el tiempo de respuesta, encuentran relaciones en las variables y localizan fallas en la información.
Mejorar la integración organizacional	Facilitan la comunicación y el intercambio de información; eliminan la redundancia y duplicidad de datos.
Apoyar la toma de decisiones	Elaboran escenarios.
Elaborar mapas	Formato digital a cualquier escala, actualizables.

El objetivo de crear una metodología de los SIG aplicable a los proyectos de ingeniería civil se efectuó con éxito, logrando identificar varios niveles de complejidad para el análisis y consulta:

1. Niveles básicos, que son los más utilizados: localización y condición geográfica.
2. Niveles complejos: tendencias, rutas, patrones y modelamiento.

Una observación pertinente es que no se debe limitar el uso de la tecnología SIG al almacenamiento de datos y a la producción de cartografía automatizada. Con estos sistemas es posible construir diferentes escenarios, diagnosticar procesos y simular posibles soluciones a los problemas abordados.

El potencial de un Sistema de Información Geográfica depende en gran medida del tipo y volumen de los datos contenidos en el sistema. Este aspecto implica un incremento desmesurado en los costos. Aunque la mayor parte de la información la poseen los ayuntamientos y dependencias gubernamentales, los costos significativos en la obtención de los datos se restringen a su adecuación al formato digital. La tendencia en este rubro es la comercialización de bases de datos numéricas.

La fusión de los SIG con las tecnologías de ingeniería civil, brinda al usuario una base de datos unificada que sirve a proyectos multidisciplinarios. Durante los siguientes años, desarrollos tecnológicos y metodológicos mayores pueden anticiparse con efectos significativos en el uso de los SIG. En el futuro habrá soluciones en SIG lejanas a las actuales que empleen otro tipo de recursos computacionales como hipertextos, sonido, video y realidad virtual. Será posible conocer las características de cualquier lugar sin tener la necesidad de hacer gran cantidad de investigaciones, ya que se contarán con sistemas de información mundial, que serán una aglomeración de los diversos SIG actuales. Los avances más importantes predecibles son aplicables debido al aumento en la capacidad de almacenamiento y microprocesadores más poderosos, además de desarrollos significativos en software, lenguajes de programación y telecomunicaciones. Esto permitirá una miniaturización de los sistemas de información geográfica, por lo que podrán ser transportados como cualquier teléfono celular, pero conteniendo gran capacidad de análisis en tiempo real. Un mayor número de países reconocerán la importancia económica y estratégica de la tecnología de la información y se involucrarán en mayor cantidad de proyectos de investigación y desarrollo SIG.

Otro aspecto importante será que los métodos de obtención y captura de la información mejorarán, serán más económicos y además tendrán mayor disponibilidad. El desarrollo de organizaciones que compartan información en internet aumentará, lo que permitirá a los usuarios obtener datos precisos en una forma económica y rápida.

La tendencia en software es el desarrollo de sistemas expertos (también llamados sistemas inteligentes basados en el conocimiento) que utilizan técnicas de inteligencia artificial. Son sistemas de cómputo que capturan el conocimiento de expertos con altas habilidades, usualmente como un juego de reglas y lo hacen disponible a usuarios novatos. Este tipo de tecnología aplicada a los SIG, permitirá que personas sin conocimiento puedan realizar análisis espaciales con sólo realizar consultas al sistema. Desafortunadamente aún falta tiempo para llegar a esto, por lo que es necesario conocer los fundamentos y metodología de los SIG para poder emplearlos.

Actualmente las soluciones SIG en internet están cada vez más orientadas a la obtención de datos por parte de los usuarios sin tener que pagar por ello, creándose esquemas de financiamiento por publicidad de mapas (localización de servicios y empresas).

En el uso profesional de SIG, la significancia social más grande será en los temas ambientales, ya que gracias a la documentación y análisis sistemáticos que proveen estos sistemas, será posible prevenir y evitar catástrofes naturales. El éxito futuro del uso de los sistemas de información geográfica depende no de los operadores, sino de quienes hacen las decisiones en base a la información producida.

Cuando los ingenieros civiles traten con familiaridad los principios y técnicas usadas en los análisis geográficos, formularán nuevos planteamientos que de otra manera no hubieran concebido. Cuando esto suceda, habrán llevado su manera de planear y hacer negocios a otro nivel. Consiguientemente se propone integrar estas herramientas al proceso de formación de las nuevas generaciones de ingenieros, ya que es una beta aún sin explotar que coloca en una posición estratégica a los profesionistas que dominen este conocimiento.

Por lo anterior se concluye que el objetivo general de la presente tesis fue alcanzado.

APÉNDICE A

Modelación

A.1 Concepto de modelo

La obtención de la información, es posible mediante dos formas: la observación directa de la realidad o mediante el uso de modelos.

Para una mejor aproximación de la realidad, deben usarse modelos diferentes y complementarios. En un sistema de información los modelos deben ser creados a partir de datos, procesos, actividades y eventos. Si se requieren modelos para tener la certeza de que la información es apropiada, se debe considerar:

- La fuente, para determinar la confiabilidad del modelo.
- Método con el que trabaja, reflejado en la precisión del modelo.
- Sitio o territorio considerado en la elaboración del modelo.
- Condiciones específicas de la realidad sobre la que esta basada el modelo.

La palabra modelo, se define como una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades¹. De la definición se deduce que la versión de la realidad realizada a través de un modelo pretende reproducir solamente algunas propiedades del objeto o sistema original y se ve representado por otro objeto de menor complejidad.

Los modelos se construyen estableciendo una relación de correspondencia con la realidad cuyas variantes pueden producir modelos de características notablemente diferentes. Turner² distingue tres tipos básicos: Los *modelos icónicos*, *analógicos* y los *simbólicos*.

¹ Joly, 1988

² 1970, pg. 364

A.2 Modelos icónicos.

En los modelos icónicos, la relación de correspondencia se establece a través de las propiedades morfológicas. Una maqueta es un modelo del objeto representado donde la relación establecida es fundamentalmente una reducción de escala. Vea la Figura A.2-1. En un modelo icónico se conservan las proporciones del objeto real mediante una reducción de escala y una selección de las propiedades representadas.



Figura A.2-1 Globo terráqueo

A.3 Modelos análogos.

Los modelos análogos poseen algunas propiedades similares a los objetos representados pero sin ser una réplica morfológica de los mismos. Un mapa es un modelo de la realidad establecido mediante un conjunto de convenciones relativamente complejo que conduce a un resultado final claramente distinto del objeto representado (Figura A.3-1).

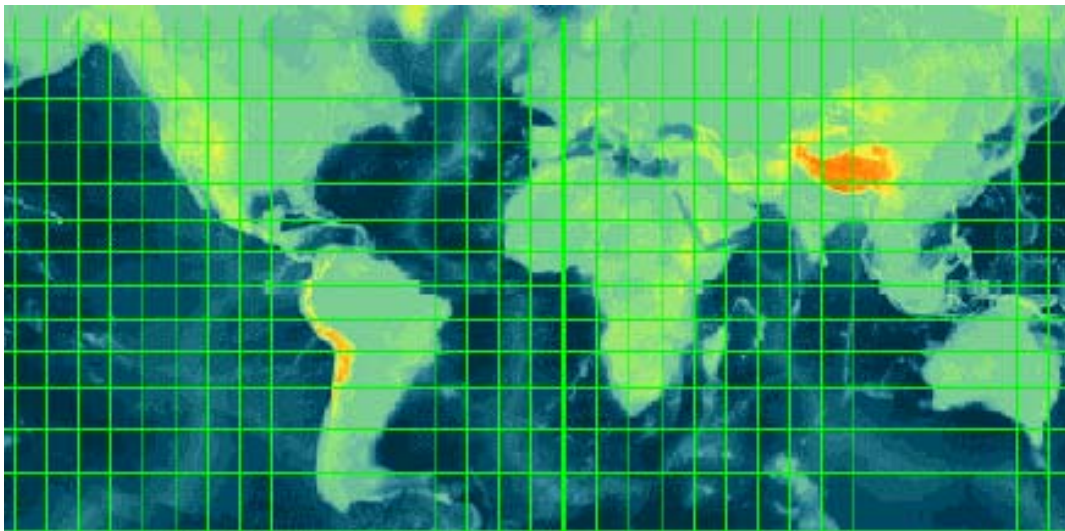


Figura A.3-1 Representación de la Tierra en una proyección cilíndrica conforme de Mercator.

A.4 Modelos simbólicos.

Finalmente, en los modelos simbólicos se llega a un nivel superior de abstracción ya que el objeto real queda representado mediante una simbolización matemática (ya sea geométrica, estadística, etc.).

Un ejemplo de modelo simbólico es la representación de un edificio mediante la identificación y transformación en una estructura geométrica de sus elementos básicos (Figura A.4-1). El modelo así construido permite por ejemplo, la aplicación de algoritmos para la estimación de esfuerzos a los que está sometido.



Figura A.4-1 Reconstrucción de un edificio prerrománico, ejemplo de modelo simbólico

Los tres tipos de modelos anteriormente citados pueden ser usados para la conformación de un SIG, dependiendo de las necesidades del análisis.

A.5 Consideraciones respecto a los modelos.

Algunos autores llegan a incluir la siguiente expresión de finalidad en la propia definición de modelo: "un objeto M es un modelo de X para un observador O, si O puede utilizar M para responder a cuestiones que le interesan acerca de X"³; o bien, según Ríos⁴: "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". La elaboración de modelos debe realizarse de manera que la relación de correspondencia entre el objeto real y el modelo sea al menos parcialmente reversible y exista, por tanto, una relación simétrica que permita 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 que de esta forma las

³ Aracil, 1986; pg. 123

⁴ 1995: pg. 23

respuestas derivadas del modelo sean aplicables sobre a la realidad sin perder sentido (Figura A.5-1).

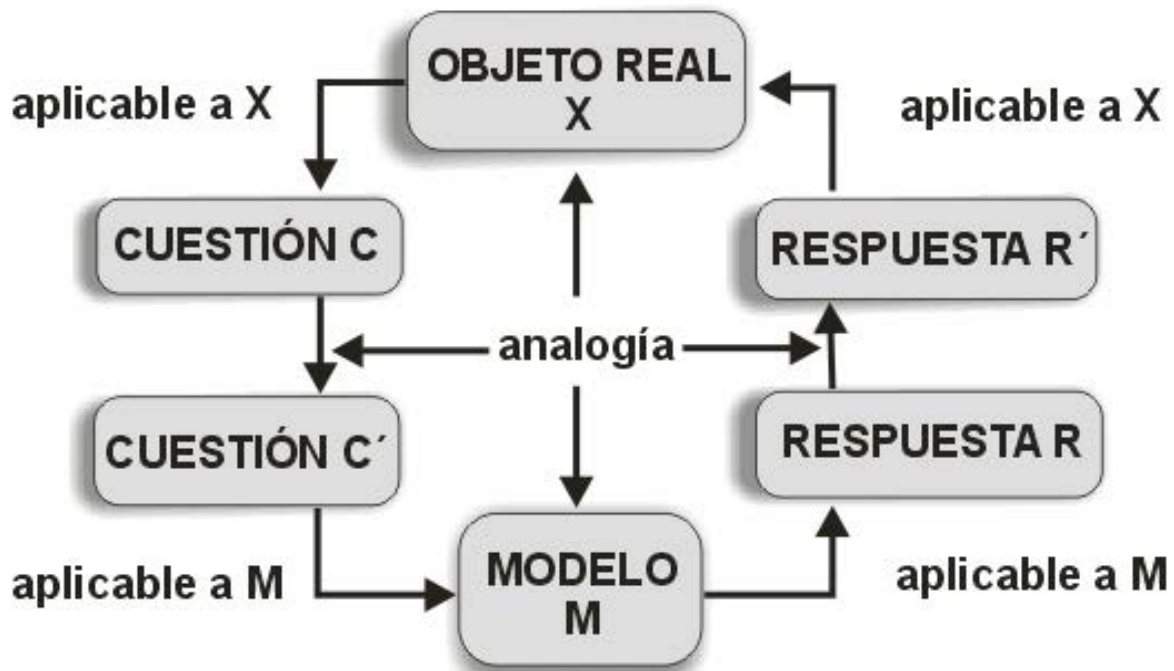


Figura A.5-1 Correspondencia entre los objetos reales y los modelos.

La utilidad de los modelos para conocer o predecir, esta condicionada principalmente por una buena selección de factores relevantes para el problema y una adecuada descripción de sus relaciones funcionales que pueden valorarse sometiendo los resultados a verificación experimental. En efecto, si del uso del modelo M se deduce una propiedad determinada, ésta será previsiblemente aplicable al objeto real X. El contraste experimental puede servir de mecanismo de realimentación para realizar ajustes, tanto en los elementos que componen el modelo como en las relaciones que se establecen entre ellos. La modelización pretende reducir el error manteniendo una complejidad reducida.

En efecto, un modelo es necesariamente 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. Estos supuestos son los encargados de señalar, por ejemplo, qué factores son relevantes para el modelo y cuáles pueden ser obvios⁵.

⁵ Ver Popper, 1984; Págs. 64-70 para una discusión más amplia.

APÉNDICE B

Georreferenciación

A.6 Definición

Es necesario hablar sobre las características específicas de los *datos espaciales* también llamados *datos geográficos* o *georreferenciados*. En la literatura son usadas indistintamente las tres expresiones, pero en general se utilizará el vocablo datos espaciales.

El término dato espacial se refiere a la información que se puede ubicar en el espacio, sea con referencia a un sistema de coordenadas o a un orden topológico.

Este método consiste en la asignación de un punto en la superficie terrestre (obtenido por alguna fuente de información: Mapa en papel, puntos GPS, Geocoding o datos ligados directamente a la base de datos) a un par de coordenadas dentro de un sistema de coordenadas homogéneo. La georreferenciación es un procedimiento fundamentado en una base matemática, que consiste en proporcionar una referencia numérica del Mundo real a la información espacial, a través de diferentes transformaciones y algoritmos previamente diseñados. Una ventaja primordial que ofrecen los sistemas de información geográfica con respecto a los sistemas CAD, es la de contar con métodos para la georreferenciación de la información espacial.

La información geográfica contiene una referencia geográfica explícita como es la latitud y longitud o coordenadas rectangulares o en su defecto una dirección, un código postal, etc. Un proceso automatizado llamado geocodificar (geocoding) es utilizado para crear referencias geográficas explícitas (localizaciones múltiples) desde una referencia implícita (descripciones de cada dirección). Estas referencias geográficas permiten localizar distintos elementos como pueden ser negocios, áreas boscosas, etc. Así también es posible localizar eventos sobre la superficie de la tierra a través de algún tipo de análisis previo.

El método usado para georreferenciar imágenes de satélite o mapas en papel previamente escaneados, implica generar ecuaciones propias de proyección mediante un procedimiento estadístico de regresión múltiple que incluye la toma de puntos de control. Vea la Figura B.1-1.

Las correcciones necesarias para restaurar a cada punto de la imagen sus coordenadas reales se basan en ecuaciones polinómicas que permiten modificar de forma flexible sus coordenadas. El orden del polinomio determina la flexibilidad del ajuste y de la transformación, normalmente se emplean transformaciones de tipo lineal (polinomio de grado 1), cuadrático (polinomio de grado 2) o cúbico (polinomio de grado 3). Los casos más habituales son la transformación lineal y cuadrática.

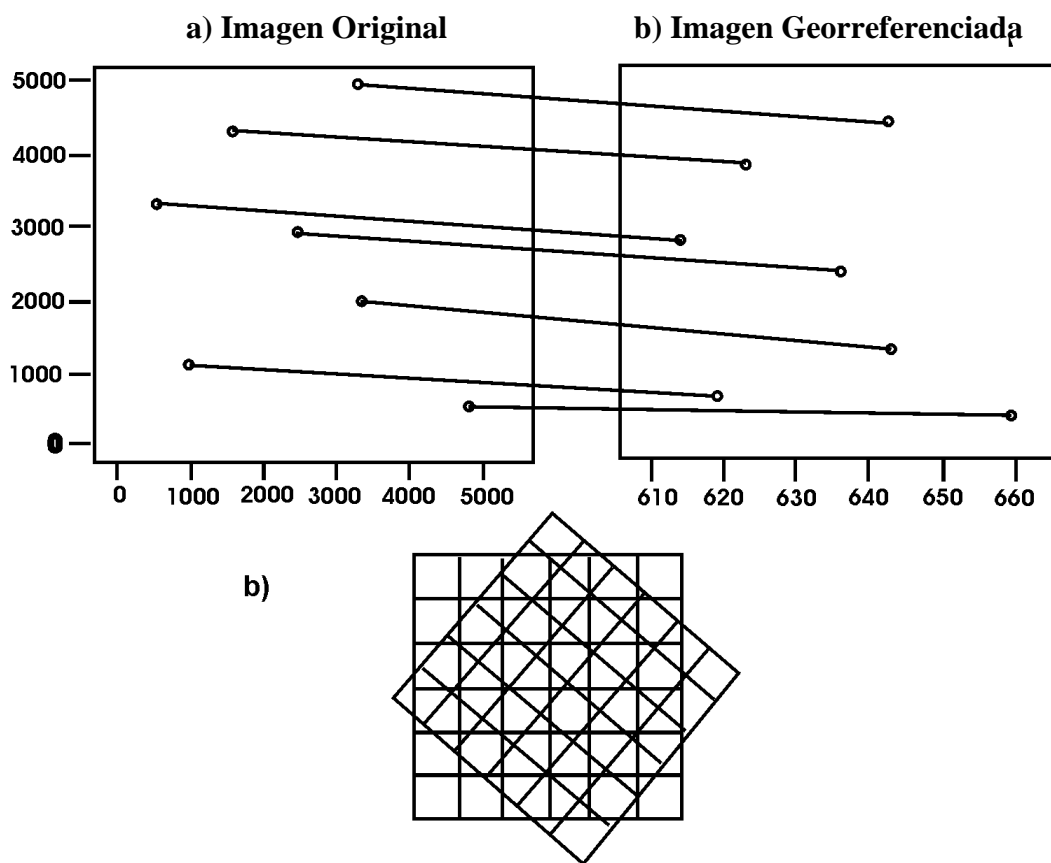


Figura A.6-1 Transformación de coordenadas y corrección geométrica mediante transformación lineal.

A.7 Transformación lineal.

La transformación lineal es la más sencilla, se asume que no hay distorsión en la imagen y simplemente se requiere una traslación (coeficientes A y E), cambio de escala (coeficientes B y H) y rotación de la imagen (coeficientes D y G).

Por tanto si el origen de coordenadas de la imagen original es (c=0, f=0) y asumimos que la rotación es despreciable (hemos colocado bien el mapa en el scanner) entonces:

- A = valor de X en el punto en el que c = 0
- E = valor de Y en el punto en el que f = 0
- B y H factores de escala
- D = E = 0

$$B = \frac{(\max X) - (\min X)}{(\max c) - (\min c)} \quad \text{Ecuación A.7-1}$$

$$H = \frac{(\max Y) - (\min Y)}{(\max f) - (\min f)} \quad \text{Ecuación A.7-2}$$

Ecuaciones para los casos más habituales de transformación lineal y cuadrática.

$$X = A + Bc + Df \quad \text{Ecuación A.7-3}$$

$$Y = E + Gc + Hf \quad \text{Ecuación A.7-4}$$

$$X = A + Bc + Df + Ec^2 + If^2 + Jcf \quad \text{Ecuación A.7-5}$$

$$Y = E + Gc + Hf + Kc^2 + Lf^2 + Mcf \quad \text{Ecuación A.7-6}$$

A.7.1 Procedimiento para la georreferenciación lineal de coordenadas

Casi todos los programas de SIG disponen de algún procedimiento para la georreferenciación de coordenadas. En general se basan en una serie de etapas básicas:

1. Se busca una serie de puntos de control (generalmente lugares muy destacados y visibles) y se averiguan las coordenadas de cada uno de ellos en los dos sistemas de coordenadas, (X, Y) y (c, f). En el caso de los mapas escaneados, X e Y aparecen en la imagen con lo que el procedimiento es más simple.
2. Determinación del tipo de transformación más adecuada en función del tipo de datos de partida y del número de puntos de control que hayan podido encontrarse.
3. Mediante mínimos cuadrados se obtienen los valores de los coeficientes de regresión a, b, c, d, e y f. Estos coeficientes así calculados permiten realizar una modificación del sistema de coordenadas con el mínimo grado de error.
4. Se aplican las ecuaciones anteriores, con los valores calculados de los coeficientes, a todas las coordenadas iniciales para obtener así sus nuevos valores en el sistema de referencia final.
5. Transferencia de la información de los píxeles originales a los píxeles resultantes del proceso de transformación. Con estas funciones de transformación va a crearse una nueva matriz correctamente posicionada, pero vacía y posiblemente rotada. El problema resulta más complejo de lo

que pudiera pensarse a primera vista. Idealmente, cada píxel de la capa transformada debería corresponderse a un solo píxel en la original. Lo normal, sin embargo, es que el píxel de la nueva imagen se sitúe entre varios de la original, incluso puede variar el tamaño de los píxeles.

A.7.2 Transformación cúbica

La transformación cúbica es más compleja, las ecuaciones son similares a las lineales y cuadráticas pero incluyendo términos elevados al cubo.

Empleando el procedimiento de los mínimos cuadrados, se pueden calcular los valores de los coeficientes A, B,..., N, a partir de las coordenadas de un conjunto de puntos de control.

Como regla general, el número de puntos de control debería ser mayor que el número de parámetros que se van a calcular, 6 en la transformación lineal, 12 en la cuadrática y 24 en la cúbica.

Es importante determinar cual es el tipo de transformación más adecuada en función del tipo de distorsiones que se supone que aparecen en la imagen y de la cantidad y calidad de los puntos de control. Es necesario tener en cuenta que cuanto mayor sea el grado de los polinomios implicados, más sensible será la transformación a errores en la selección de los puntos de control.

A.7.3 Métodos para abordar el traspase de valores

El traspase de valores de la capa original a la transformada puede abordarse por tres métodos dependiendo de la complejidad de la transformación realizada y del tipo de datos.

- Método del *vecino más próximo*. Sitúa en cada píxel de la imagen corregida el valor del píxel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los valores originales. Su principal inconveniente radica en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen. Es la más adecuada en caso de variables cualitativas, pero no en teledetección.
- *Interpolación bilineal*, supone promediar los valores de los cuatro píxeles más cercanos en la capa original. Este promedio se pondera según la distancia del píxel original al corregido, de este modo tienen una mayor influencia aquellos píxeles más cercanos en la capa inicial. Reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales pero difumina los contrastes espaciales.
- En la *convolución cúbica*, se considera los valores de los 16 píxeles más próximos. El efecto visual es mas correcto en caso de que se trabaje con imágenes de satélite o fotografías digitalizadas, sin embargo supone un volumen de cálculo mucho mayor.

APÉNDICE C

Bases de datos

A.8 Historia

Las bases de datos (DB)⁶ nacieron en la temprana época de los ordenadores digitales, a mediados de la década de los 50 y fueron una de las principales herramientas que éstos ofrecían. Surgieron como extensiones de programas Fortran que permitían acceso compartido a los datos. A finales de esta década se desarrollaron métodos de acceso soportados por el sistema operativo (acceso directo y secuencial) y maduraron con los sistemas operativos de segunda y tercera generación (principios de los 60). En esta época se desarrollaron las bases de datos estructuradas jerárquicamente y algo después las bases de datos de red. En esta temprana época no había distinción entre bases de datos. A finales de los 60, Ted Codd, investigador de IBM, desarrolló un lenguaje de programación de propósito general que denominó "programación relacional", basado en la teoría de conjuntos y la lógica. Este lenguaje contenía la esencia de lo que habría de ser el más extendido de los sistemas de bases de datos hasta la fecha, las bases de datos relacionales.

Actualmente todos los conceptos referentes a las bases de datos son claros y están definidos formalmente. La tecnología de gestión de bases de datos se halla en una etapa muy madura. Las bases de datos han evolucionado durante los pasados 50 años desde sistemas de archivos rudimentarios hasta sistemas gestores de complejas estructuras de datos que ofrecen un gran número de posibilidades.

Se puede definir a las bases de datos como: "Una serie de datos organizados y relacionados entre sí, los cuales son recolectados y explotados por los Sistemas de Información de una institución, empresa o negocio en particular".

⁶ Data Base en inglés.

A.9 Usos de las bases de datos

Las bases de datos proporcionan la infraestructura requerida por los Sistemas de Apoyo a la Toma de Decisiones (SATD) y por los Sistemas de Información Estratégicos (SIE). Estos tipos de sistemas explotan la información contenida en las bases de datos para apoyar el proceso de toma de decisiones o para lograr ventajas competitivas. Los Sistemas Transaccionales (ST) o los Sistemas Estratégicos (SIS) son los encargados de recolectar la información que contendrá la base de datos, por medio de las funciones de creación, bajas o modificación de la información. La forma de operar de estos sistemas puede ser por lotes⁷ o en línea. Los Sistemas de Bases de Datos (SBD) tienen cuatro componentes principales: datos, hardware, software y usuarios.

⁷ Batch en inglés.

APÉNDICE D

Algoritmos que componen el análisis espacial

A.10 Función de distancia

La forma generalizada de esta función matemática es:

$$D_{AB} = \left[\sum |X_{iA} - X_{iB}|^p \right]^{1/p} \quad \text{Ecuación A.10-1.}$$

Donde: X_{iA} y X_{iB} son las coordenadas de los puntos e i varía desde 1 a n , p es un parámetro que depende del plano en el que se encuentren los puntos.

La función D_{AB} debe cumplir varias propiedades:

1. Positividad, $D \geq 0$, la distancia siempre es igual o mayor que cero.
2. Identidad, si $D = 0$, entonces $A = B$, es decir A y B son el mismo lugar.
3. Simetría, $D(A,B)=D(B,A)$, la distancia entre A y B es la misma que entre B y A.
4. Desigualdad triangular, $D(A,B) \leq D(A,C)+D(C,B)$. La distancia entre los puntos A y B es igual o menor, nunca mayor, que la suma de las distancias que existen entre A y C, por un lado y entre B y C, por otro.

La función distancia que cumpla todas estas propiedades forma una métrica en sentido matemático. No todas las definiciones de distancia la forman. En el caso del espacio plano de dos dimensiones ($X_1 = X$ y $X_2 = Y$) las funciones distancia más usuales son:

Si $p = 1$ se trata de la denominada distancia de Manhattan.

$$D_{AB} = |X_b - X_a| + |Y_b - Y_a| \quad \text{Ecuación A.10-2}$$

Si $p = 2$, se formula la distancia Euclidiana:

$$D_{AB} = \sqrt{(X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2} \quad \text{Ecuación A.10-3}$$

En el caso de emplear coordenadas globales (latitud y longitud) la obtención de la distancia entre dos puntos trabaja en una geometría esférica, distinta a la plana. Para ello, la ecuación para determinar la distancia entre los puntos A y B es:

$$D_{AB} = R \cdot \arccos\left[\left(\sin\phi_A \cdot \sin\phi_B\right) + \cos\phi_A \cdot \cos\phi_B \cdot \cos(\lambda_A - \lambda_B)\right] \quad \text{Ecuación A.10-4}$$

Donde λ_A, λ_B son las longitudes, ϕ_A, ϕ_B las latitudes de los puntos y R es el radio de la Tierra:

La longitud de una línea se calcula como la suma de los segmentos de sus distancias:

$$\sum D_{AB} \quad \text{Ecuación A.10-5}$$

A.11 Procedimiento para calcular áreas en polígonos

El más usado es encontrar el área elemental que existe debajo de cada segmento lineal definido por dos vértices consecutivos. Esta área es la suma de un triángulo más un rectángulo. En la Figura D.2-1 el área elemental (A1) situada bajo el segmento lineal 1-2 está formada por el área del triángulo T y la del rectángulo R, es decir toda la superficie iluminada.

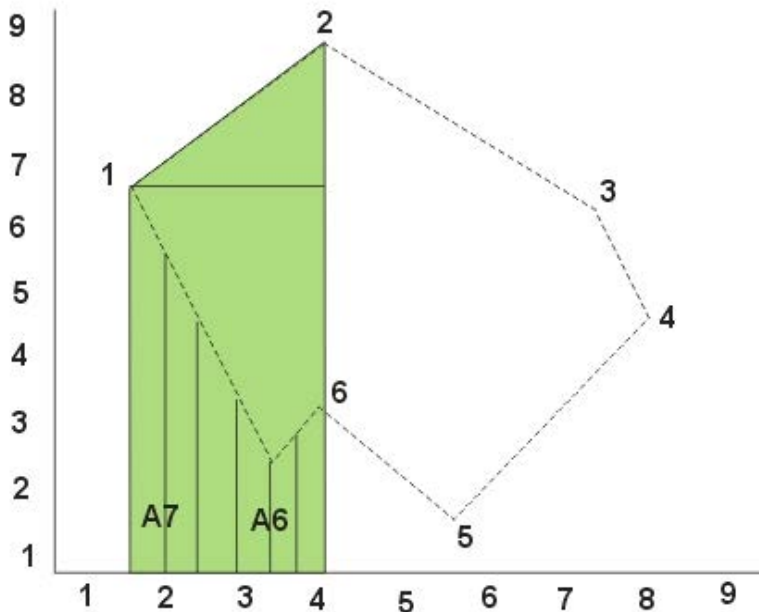


Figura A.11-1 Cálculo del área de un polígono irregular.

Matemáticamente se expresa:

$$A_T = \frac{1}{2} \cdot (X_2 - X_1) \cdot (Y_2 - Y_1) \quad \text{Ecuación A.11-1}$$

$$A_R = (X_2 - X_1) \cdot Y_1 \quad \text{Ecuación A.11-2}$$

Y el área total (ATOT) debajo de cada segmento lineal es AT + AR lo que equivale a:

$$A_{TOT} = (X_2 - X_1) \cdot \frac{(Y_2 - Y_1)}{2} \quad \text{Ecuación A.11-3}$$

En la práctica se aplica este procedimiento a cada vértice (i) y al siguiente (i+1) de todos los que delimitan un polígono y para el caso del último vértice, el primer vértice actúa como el siguiente de este. Siempre se procede en el sentido de las agujas del reloj. De este modo se calculan las áreas elementales A_i , algunas de ellas serán positivas y pueden incluir porciones exteriores al polígono, del mismo modo otras áreas tendrán valor negativo y establecen las superficies situadas fuera del polígono.

El área del polígono es la suma de todas las áreas elementales así calculadas. Los sumandos negativos restan las porciones que no deben ser incluidas. En la figura anterior el área que no está incluida dentro del polígono se identifica con los sumandos A_6 y A_7 restan esta porción, finalmente el cálculo realizado para todos los vértices obtiene el verdadero valor de la extensión superficial del polígono.

$$\text{Área del polígono} = \sum A_i \quad \text{Ecuación A.11-4}$$

A.12 Determinación de la existencia de un punto en un polígono.

El problema geométrico se resuelve de varias formas, algunas de ellas muy complejas. La más simple y rápida tiene su base en la topología de los dos mapas y el algoritmo básico consiste en lo siguiente (Figura D.3-1).

1. Se traza una línea paralela a uno de los ejes de coordenadas (por ejemplo, el X) que sale desde el punto en cuestión (el 1 en la Figura D.3-1 a) hacia uno de los dos lados (por ejemplo, a la derecha, hacia los valores más altos de la coordenada horizontal).
2. Se contabiliza cuántas veces corta esta recta al polígono en cuestión. Para ello se usa la geometría elemental que facilita encontrar los puntos de corte entre dos rectas. Si el número de corte es "par", el punto está fuera del polígono; por el contrario, si es "impar", está dentro del polígono.

Este método funciona bien en todas las circunstancias, en la Figura D.3-1 a, la línea trazada desde el punto 1 corta una vez al polígono A y dos veces a los otros

dos polígonos (el B y el C), de manera que se puede decidir que está dentro de A y fuera de los otros dos.

En la Figura D.3-1 b, la situación es más compleja. El polígono A tiene dos partes disjuntas o islas (separadas por el polígono B), pero dado que la línea desde el punto 2 a la derecha corta sus límites tres veces se puede concluir que 2 está dentro de A. Por su parte, una línea trazada desde el punto 1 situado fuera de A, lo corta siempre un número par de veces, tanto si la línea se traza hacia la derecha (corta una de las porciones de A dos veces) como a la izquierda (corta la otra porción seis veces). Igual ocurre si se considera la existencia de lagos dentro de un polígono, tanto en relación al punto 1 como al 2, las líneas trazadas desde cualquiera de ellos hacia la izquierda atraviesan lagos dentro del polígono A, también el número de cortes es el adecuado para discriminar si el punto en cuestión está dentro o fuera de A. En concreto, la línea que sale desde el punto 1 hacia la izquierda corta seis veces al polígono A (un número par de veces) y por lo tanto, está fuera de él. Por su parte la línea hacia la izquierda desde el punto 2 corta 3 veces a "A", es decir, está dentro. El procedimiento completo es más complicado, ya que es preciso repetirlo para cada punto que existe en el mapa original. Se debe recordar que un punto solo puede estar dentro de un polígono, de acuerdo con la definición de mapa de polígonos, que constituye una partición no solamente de una superficie.

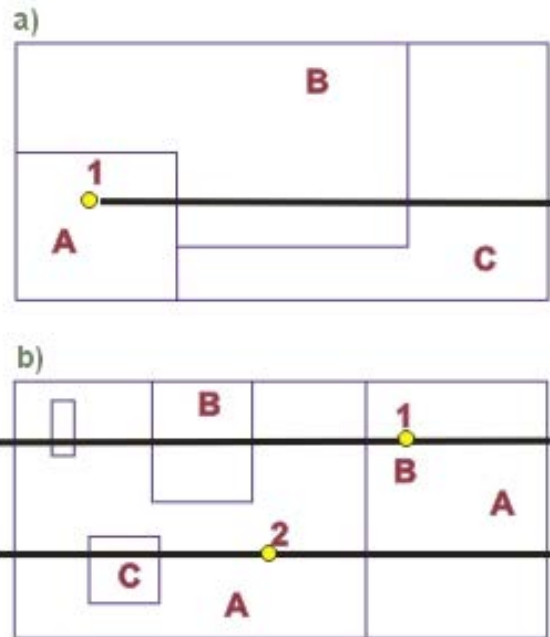


Figura A.12-1 Análisis de punto en polígono.

A.13 Conversión de una línea en un punto

Encontrar un punto medio de una línea, es decir aquella localización que deja a ambos lados la misma longitud. Una solución simple, es calcular la media aritmética de las coordenadas X e Y que delimitan la línea y fijar este punto como el medio de la línea.

$$X_M = \frac{\sum X_i}{N} \quad \text{Ecuación A.13-1}$$

$$Y_M = \frac{\sum Y_j}{N} \quad \text{Ecuación A.13-2}$$

Esta solución tiene el inconveniente de que en ocasiones el punto calculado no está situado sobre la línea de origen. Por lo que es necesario considerar otra forma de conversión.

- Se determina el valor de la coordenada X_c mediante la fórmula siguiente, siendo X_{min} y X_{max} los valores extremos (mínimo y máximo) que alcanza esta coordenada en la línea.

$$X_c = X_{min} + \frac{X_{max} - X_{min}}{2} \quad \text{Ecuación A.13-3}$$

- A continuación se determina Y_c estableciendo el punto de corte de la línea con la recta $Y = X_c$. En esta ocasión el punto de coordenadas X_c e Y_c se encuentran sobre la línea y es una buena aproximación a su punto medio o centroide.

Una tercera forma implica considerar a la línea como una sucesión de puntos localizados en cada vértice de la línea, de esta forma el problema se convierte en un problema de punto en punto.

A.14 Determinación de líneas en polígonos e intersección de líneas.

La Figura D.5-1 muestra como la línea A tiene un mínimo rectángulo que no coincide ni intersecciona con ninguna de las otras dos líneas (B y C); por lo tanto, no será necesario comprobar la intersección de sus segmentos rectos con el de las otras líneas. Una vez que se han seleccionado que segmentos lineales pueden cruzarse, el siguiente paso es determinar si realmente se cruzan. Para ello se determinan las ecuaciones de las dos rectas a partir de las coordenadas de sus vértices.

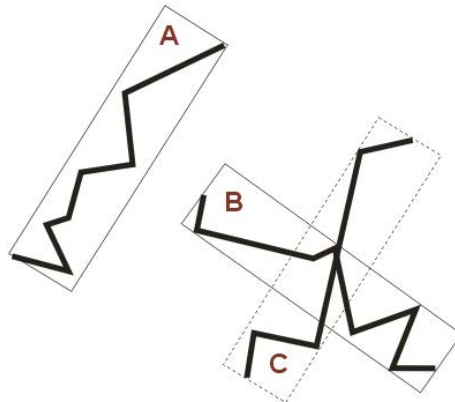


Figura A.14-1 Intersección de líneas. Método rectángulo encuadrante.

La Tabla A.5-1 indica los valores conocidos de las coordenadas de un segmento lineal y la forma de obtener sus ecuaciones (Figura D.5-2).

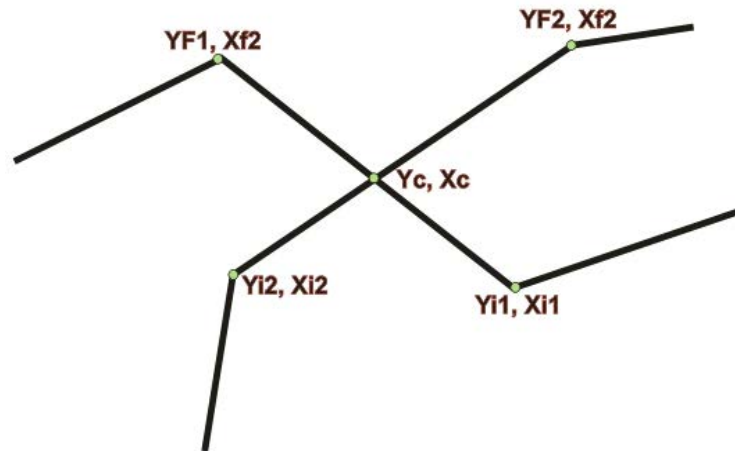


Figura A.14-2 Intersección de líneas.

Segmentos	X1	Y1	XF	YF	Pendiente	Ordenada origen
1	X11	Y11	XF1	YF1	m1	b1
2	X12	Y12	XF2	YF2	m2	b2
		$m1 = (Y_{F1} - Y_{11}) / (X_{F1} - X_{11})$		$b1 = Y_{11} - X_{F1} \cdot m1$		
		$m2 = (Y_{F2} - Y_{12}) / (X_{F2} - X_{12})$		$b2 = Y_{12} - X_{F2} \cdot m2$		

Tabla A.14-1 Cálculo de las ecuaciones de dos rectas.

Donde:

X1, Y1: Coordenadas del vértice inicial de cada segmento de recta
 XF, YF: Coordenadas del vértice final de cada segmento de recta

A continuación se determina si existe algún punto de intersección (X_c, Y_c) que cumpla simultáneamente las dos ecuaciones de las rectas; es decir, si:

$$Y_c = m1 \cdot X_c + b1 \quad \text{Ecuación A.14-1}$$

$$Y_c = m2 \cdot X_c + b2 \quad \text{Ecuación A.14-2}$$

Los valores Y_c, X_c se obtienen a partir de conocer los valores de los parámetros (pendiente y ordenada) de las dos rectas:

$$X_c = \frac{-(b1 - b2)}{(m1 - m2)} \quad \text{Ecuación A.14-3}$$

$$Y_c = b1 + m1 \cdot X_c \quad \text{Ecuación A.14-4}$$

No obstante, este punto de cruce puede estar situado fuera de la extensión de los dos segmentos lineales, pues es el punto de intersección de dos rectas de longitud infinita. Por ello, además de lo anterior, es preciso realizar algunas

comprobaciones de que el punto Y_c , X_c está dentro de los límites de los segmentos lineales usados. Para ello se aplican las siguientes ecuaciones:

$$(XF1 - X_c) * (X_c - X11) \geq 0 \quad \text{Ecuación A.14-5}$$

$$(XF2 - X_c) * (X_c - X12) \geq 0 \quad \text{Ecuación A.14-6}$$

$$(XF1 - Y_c) * (Y_c - X11) \geq 0 \quad \text{Ecuación A.14-7}$$

$$(XF2 - Y_c) * (Y_c - X12) \geq 0 \quad \text{Ecuación A.14-8}$$

A.15 Forma de un objeto espacial poligonal.

Uno de los índices de forma más conocido es la denominada razón de compacidad / circularidad (RC).

$$RC = \sqrt{\frac{A}{AC}} \quad \text{Ecuación A.15-1}$$

Siendo AC, el área del círculo que tiene el mismo perímetro (P) que el polígono. La razón de circularidad es un número adimensional que vale 1 cuando el polígono es un círculo. Para cualquier otra forma su valor oscila entre 1 y 0; cuanto más alejado de un círculo esté el polígono estudiado, más se acerca a 0 el índice.⁸

Un índice diferente se puede calcular trazando desde un punto central del polígono (su centroide) una serie de radios diferentes puntos del contorno, sus longitudes se comparan con las que tendría una circunferencia, de este modo se obtiene el índice de radios (S):

$$S = \sum_i \left[\left(\frac{L_{ri}}{\sum_i L_{ri}} \cdot 100 - \frac{100}{n} \right) \right] \quad \text{Ecuación A.15-2}$$

Donde L_{ri} es la longitud del radio i y n es el número de radios trazados desde el centroide del polígono. El índice S puede adoptar valores entre 0, para una circunferencia y 200 para una línea recta, en general valores superiores a 60 son raros e indican una forma sumamente alargada.⁹

A.16 Conversión de polígonos a puntos (cálculo del centroide).

La manera más simple es determinar la media de las coordenadas X e Y de los vértices que definen el polígono.

$$X_c = \frac{\sum X_i}{N_{ver}} \quad y \quad Y_c = \frac{\sum Y_i}{N_{ver}} \quad \text{Ecuación A.16-1}$$

⁸ Urwin, 1981

⁹ Clark, 1984

Esta solución no es muy recomendable pues en muchas ocasiones el centroide calculado puede estar localizado fuera del área del polígono, lo que no es adecuado si lo que se desea es el punto más representativo. Una solución alternativa es el siguiente algoritmo que asegura que en más ocasiones la localización será al interior del polígono.

Se determina el llamado “mínimo rectángulo encuadrante de un polígono”, para ello se calculan las coordenadas máximas (X_{max} e Y_{max}) y mínimas ($X_{mín}$ e $Y_{mín}$) de los vértices del polígono, como se puede ver en la Figura D.7-1.

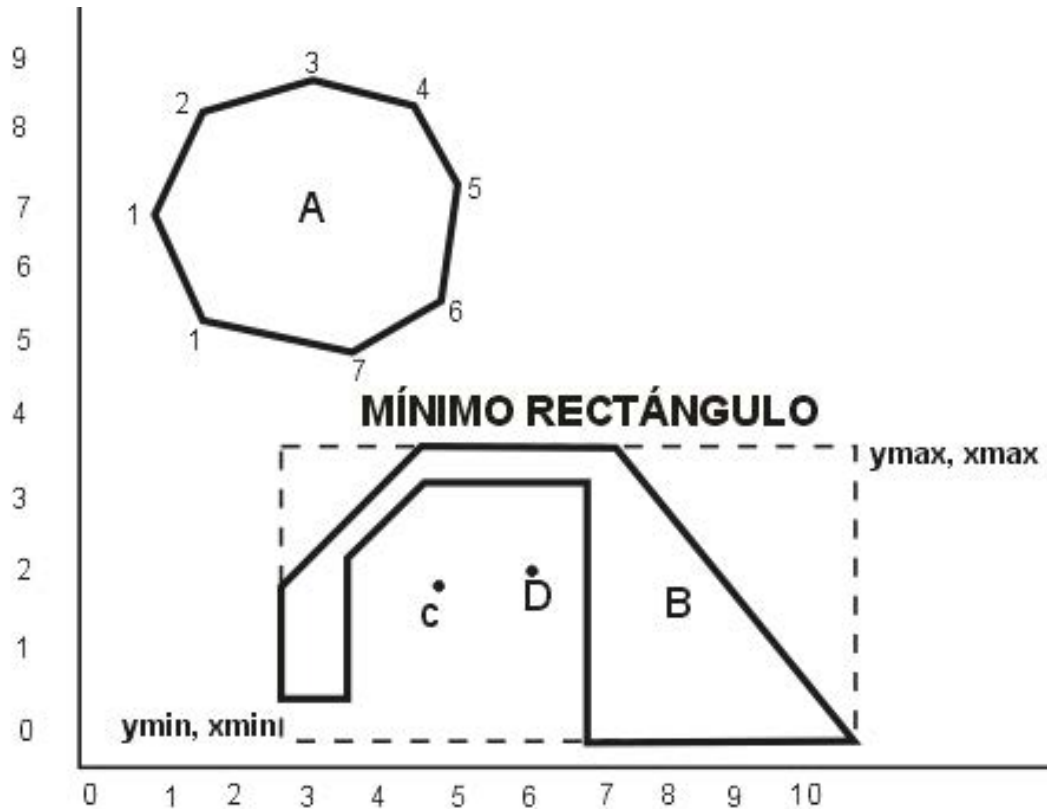


Figura A.16-1 Cambio de polígonos a puntos utilizando el método del mínimo rectángulo.

A continuación se obtienen las coordenadas X_c e Y_c mediante las fórmulas:

$$X_c = \frac{(X_{MAX} - X_{MIN})}{2} + X_{MIN} \quad \text{Ecuación A.16-2}$$

$$Y_c = \frac{(Y_{MAX} - Y_{MIN})}{2} + Y_{MIN} \quad \text{Ecuación A.16-3}$$

Tampoco este cálculo asegura que en todas las circunstancias el centroide esté en el interior del polígono. Otra forma es mediante coordenadas extremas:

Se determinan las coordenadas máximas y mínimas de los vértices del polígono en uno de los ejes de coordenadas, por ejemplo el X (Xmax, Xmin). Se obtiene el valor medio entre estos dos extremos:

$$X_{MED} = X_{MIN} + \frac{(X_{MAX} - X_{MIN})}{2}$$

Ecuación A.16-4

A continuación se calcula la recta que es paralela al otro eje de coordenadas (Y) y que pasa por ese punto medio. Se obtienen los puntos de corte de esta recta con el polígono y se ordenan de mayor a menor. Finalmente, se halla el punto intermedio entre el punto de corte que tenga el valor máximo de la coordenada "Y" y el punto de corte siguiente. El punto así determinado está situado, con total seguridad dentro del polígono y se puede aceptar como una representación del centroide o punto central del polígono (Vea la Figura D.7-2).

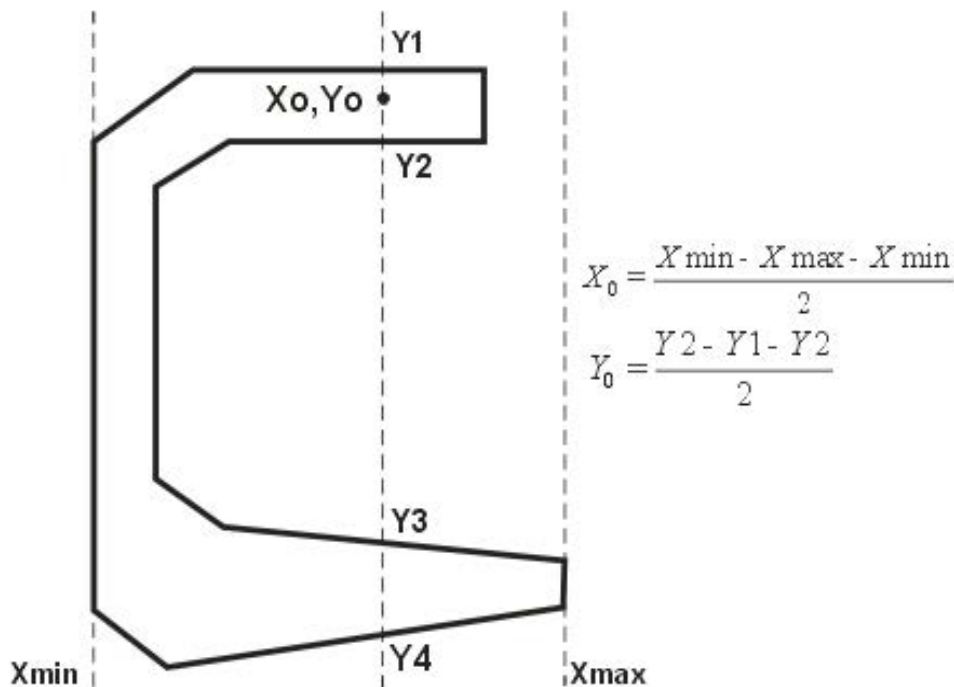


Figura A.16-2 Cálculo del centroide de un polígono por coordenadas extremas.

Una última posibilidad para determinar el centroide de un polígono es aprovechar el mismo mecanismo empleado para el cálculo del área, en ese caso las coordenadas (X_c e Y_c) se obtienen mediante las expresiones:

$$X_c = \Sigma \frac{(X_1 - Y_m) \cdot (X_1^2 + X_1 \cdot X_m + X_m^2)}{\sigma \cdot A}$$

Ecuación A.16-5

$$Y_c = \Sigma \frac{(X_1 - X_m) \cdot (Y_1^2 + Y_1 \cdot Y_m + Y_m^2)}{\sigma \cdot A}$$

Ecuación A.16-6

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A continuación se presenta un conjunto de definiciones breves y sintéticas de conceptos que se han descrito.

Nota:

Los significados que aquí se atribuyen se deben interpretar en el contexto apropiado.

A

Acimut o azimut.- Ángulo formado entre una línea y un meridiano se refiere a la orientación geográfica; la primera línea es la proyección sobre el plano XY del vector perpendicular al terreno en el punto en cuestión.

Administración de los datos.- Control de la adquisición, análisis, almacenamiento, recuperación y distribución de los datos.

Administrador de la base de datos.- 1. Persona o grupo de personas responsable de la definición, protección y eficiencia de la base de datos de una empresa. 2. Sistema que permite que múltiples usuarios independientes tengan acceso concurrente a la información.

Algoritmo.- Secuencia explícita y finita de operaciones que conduce a la solución de un problema aplicado. En los SIG se trata de un conjunto de operaciones de álgebra de mapas y/o sobre bases de datos que permiten obtener un resultado mediante combinación de información espacial y alfanumérica.

Validación de un algoritmo.- Proceso de verificación mediante el cual se asegura: (a) que el algoritmo está libre de errores sintácticos y de escritura y (b) que genere resultados correctos para cualquier combinación coherente de valores de las variables de entrada.

Almacenamiento espacio físico.- La acción de colocar datos en algún dispositivo.

Altimetría.- Medida de la altitud o elevación. La altitud se mide sobre una superficie de referencia (datum); la medida de profundidades bajo el agua se denomina batimetría.

Altura Geométrica.- La altura medida respecto al elipsoide de referencia.

Altura Ortométrica.- La altura medida con respecto al nivel medio del mar (respecto al geoide) Es invariante ante transformaciones del datum.

Área compleja.- Polígono con una o más "islas".

Atributo, atributo temático, variable temática. Medida de cantidad o cualidad asociada con un objeto (punto, línea, polígono, raster) dentro de un SIG.

Autocorrelación espacial.- Propiedad que adquieren diferentes valores en diferentes puntos del espacio, siendo semejantes en función de su cercanía.

B

Base de datos.- Conjunto de datos estructurados para permitir su almacenamiento, consulta y actualización en un sistema informático.

Binario.- Sistema de numeración basado en dos dígitos, 0 y 1.

binario	0	1	10	11	100	101	110
decimal	0	1	2	3	4	5	6

Buffer.- Una zona de distancia especificada alrededor de un objeto (punto, líneas y polígonos).

Buffering.- Operación espacial que determina las relaciones de proximidad entre los elementos.

C

Cad/Cam.- (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing) Diseño/Manufactura auxiliados por computadora.

Capa.- 1. Subconjunto de información espacial que trata de un tópico o tema. 2. Función del sistema de cómputo que permite representar distintas clases de

atributos pudiendo sobreponer o remover cada clase como si se dibujara en hojas transparentes.

Capa de datos espaciales.- Medio de almacenamiento de la información geográfica que se encuentra agrupada por tipos de elementos.

Cartografía.- Conjunto de técnicas utilizadas para la construcción de mapas.

Cartografía Base.- Colección de mapas y cartas empleadas como fuentes.

Catastro.- Registro público o levantamiento que define los límites de la propiedad.

Celda.- 1. Elemento básico de la información espacial de un raster. 2. Valor en una base de datos.

Centroide.- Punto interior de un polígono más próximo a su centro geométrico, puede ser exterior si el polígono no es convexo; en ese caso, el centroide se transfiere al lugar más próximo que cumpla la condición de interioridad.

Clasificación.- Proceso de agrupamiento de un conjunto de elementos en clases en el sentido estadístico: internamente homogéneas pero diferenciables por los valores de una o varias variables.

Coberturas.- La extensión de la superficie terrestre representada en un mapa o imagen.

Corrección Geométrica.- Corrección de las deformaciones y distorsiones de una imagen digital.

Cota.- Altitud asociada a un punto. Un mapa de elevaciones está formado por curvas de nivel o isohipsas y por puntos acotados.

Compresión.- Técnica de reducción del tamaño necesario para almacenar o transmitir una información concreta. Existen técnicas de compresión sin pérdida de la información original (por ejemplo, GIF en la compresión de imágenes digitales) o con pérdida controlada de información (por ejemplo, JPG para el mismo caso).

Coordenada.- Número usado para definir una posición en un sistema de referencia.

Coordenadas cartesianas.- Sistema bidimensional donde “x” es la medición de distancia horizontal y “y” las distancias verticales.

Coordenadas Geocéntricas.- Sistema cartesiano con origen en el centro del elipsoide seleccionado, en el que el plano XY coincide con el plano del ecuador, el eje X apunta al meridiano de Greenwich y el eje Z coincide con el eje de rotación del elipsoide. Se emplean frecuentemente en los GPS.

Coordenadas Geodésicas (Elipsoidales).- Descripción de un punto en el espacio tridimensional por medio de la longitud y latitud geodésicas y la altura geométrica, todas referidas a un elipsoide de referencia.

Coordenadas Geográficas.- Sistema de coordenadas curvas definido sobre el elipsoide de referencia. Se expresan como Longitud (*long*), Latitud (*lat*) y Altura (*h*).

Coordenadas Polares.- Sistema de coordenadas bidimensional en el que la posición se define por la distancia a un punto (polo) el ángulo a una línea de referencia.

Cuenca hidrológica.- Conjunto de puntos del terreno cuyas líneas de flujo convergen en un sumidero, que suele coincidir con un punto singular: una desembocadura o una confluencia de ríos,

D

Dato.- Hecho verificable de la realidad.

Datos espaciales o datos georreferenciados.- Información ubicable en el espacio y que cuenta con una referencia (sistema de coordenadas) o localización geográfica.

Datos vectoriales.- Representación de elementos geográficos como puntos, líneas y áreas.

Datos en formato raster.- Representación de elementos geográficos en áreas regulares determinadas arbitrariamente.

Datos alfanuméricos.- Información que contiene caracteres y números.

Datum.- Sistema geométrico de referencia empleado para expresar numéricamente la posición geodésica de un punto sobre el terreno. Se define en función de un elipsoide y por un punto tangente a la Tierra.

Digitalizar, digitalización.- Operación de codificar la información a formato binario.

Disolución (geométrica).- Proceso de unión de dos o más polígonos mediante la eliminación de los lados comunes. Se realiza para generalizar información temática, une los polígonos vecinos que comparten valores iguales para alguno de sus atributos.

DTM.- (Digital Terrain Model) Modelo Digital de Terreno.

E

Elipsoide.- Descripción simplificada de la forma y dimensiones de la Tierra. Se definen en función de un radio ecuatorial y uno polar.

Empírico.- Dato o información extraído de la observación o medida directa de la realidad.

Emulación.- Imitación de un proceso real mediante un modelo.

Entorno.- Conjunto de valores bajo los cuales se realiza una simulación. Concepto equivalente a escenario. Representa las condiciones de la simulación de un proceso.

Error.- Diferencia entre el valor medido o estimado y el valor real en un modelo. Es una estimación de la calidad de la información de un mapa.

Error aleatorio o sistemático.- También llamado observacional, son producto de las limitaciones del instrumento o del redondeo de cifras. Son inevitables.

Escáner.- Sensor óptico acoplado a un dispositivo de barrido para la digitalización de documentos. Con un escáner se recorre un documento mediante un sensor óptico que mide la reflectancia general (tonos de gris) o la de cada color primario para formar una imagen digital.

Escala.- Nivel de representación de la realidad; es la relación entre la distancia de un mapa y la distancia correspondiente en la realidad, comúnmente es expresada como una fracción.

Escala de grises.- Ordenamiento de los tonos de gris entre el blanco y el negro.

Escala gráfica.- Línea graduada en un mapa o plano empleada para relacionar las distancias en este con las distancias en el terreno.

Escalar.- 1. Aumentar o reducir las dimensiones de un objeto sin modificar sus proporciones. 2. Magnitud no vectorial.

Estándar.- Propiedad que garantiza la uniformidad en los métodos.

Exportar.- Proceso de transferir información de un sistema o plataforma a otro.

F

Fotografía aérea.- Fotografía de formato grande tomada desde un avión con cámaras especiales que registran en las márgenes fecha, hora y otras

características que permiten la identificación de la foto y las circunstancias en las que se tomó.

Fotogrametría.- Conjunto de técnicas implicadas en la obtención de datos métricos a partir de fotografías aéreas.

G

Geocodificar, geocoding.- Asignar una ubicación geográfica a los objetos.

Geocoding.- Proceso donde a un elemento de un mapa digital se le asigna un atributo de localización (coordenadas geográficas para servir como un identificador único).

Generalización.- Simplificación realizada al representar un objeto real mediante un modelo. Se aplica al proceso de eliminación selectiva de vértices en una forma geométrica para simplificarla.

Geoide.- Superficie equipotencial del nivel-del-mar a la cual la dirección de la gravedad es perpendicular en todas partes. La figura de la Tierra considerada como una superficie del nivel-medio-del-mar si los continentes no existiesen.

Geodésica.- Distancia más corta entre dos puntos sobre la superficie del elipsoide. En una esfera, una geodésica coincide con un círculo máximo.

Georreferenciar.- Asignar coordenadas geográficas a un objeto o estructura. El concepto aplicado a una imagen digital implica un conjunto de operaciones geométricas que permiten asignar a cada *píxel* de la imagen un par de coordenadas (x,y) en un sistema de proyección.

Geoestadística.- Rama de la estadística que estudia las variables regionalizadas.

GIS.- (Geographic Information System) Sistema de Información Geográfica.

GPS.- Acrónimo de Global Positioning System, o sistema de localización global. Hace referencia a un sistema mediante el cual es posible estimar las coordenadas actuales de una estación en tierra mediante la recepción simultánea de señales emitidas por varios satélites (llamados en conjunto constelación GPS).

Gravímetro.- Instrumento para medir las variaciones de la gravedad terrestre.

Grid.- Red Ortogonal, retícula.

H

Hardware.- Componentes físicos y equipos periféricos de una computadora.

Hipsometría.- Altimetría.

I

Imagen digital.- Representación gráfica de un objeto mediante una matriz regular que recoge valores de reflectancia. Estos valores suelen medirse mediante sensores sensibles a ciertos rangos de longitudes de onda de la luz. Ejemplos de estos sensores son los transportados por plataformas aéreas (aviones o satélites) o los integrados en un escáner para la digitalización de documentos impresos.

Incertidumbre.- Falta de certeza en un resultado derivada del error en los datos. En los procesos de incertidumbre está asociado un valor de probabilidad de que la medida sea correcta.

Información.- Conjunto de datos que al relacionarse adquieren sentido o un valor de contexto.

Información atributiva.- Es la información descriptiva que proporciona características acerca del elemento.

Información Geográfica (información espacial).- Forma y localización de un elemento geográfico (datos georreferenciados) que ha sido procesado dentro de un SIG.

Interpolación.- Estimación del valor de una variable en un punto a partir de otros datos próximos.

Interpolación bilinear.- En una estructura matricial, interpolación en función inversa de la distancia a los cuatro vecinos más próximos.

Intersección.- Operación de combinación de dos mapas en la cual se conservan las zonas incluidas en el dominio espacial común.

Isla.- Polígono dentro de otro (island, hole).

Isopleta.- Curva que une puntos de igual valor en altimetría, isopleta es equivalente a curva de nivel o isohipsa

Item.- Objeto, elemento de una base de datos.

L

Label.- Etiqueta.

Landsat.- Satélite artificial que recoge, registra y transmite imágenes digitales de la Tierra.

Latitud.- Posición norte-sur medida como el ángulo entre (la normal a) el punto y el plano del ecuador.

Leyenda.- Listado ordenado y estructurado de las relaciones símbolo/valor para las variables representadas en un mapa. Debe permitir interpretar los significados de los recursos gráficos usados, tanto para las variables cuantitativas como nominales.

Línea.- Conjunto ordenado de vectores encadenados en el modelo de datos vectorial.

Línea de flujo.- Línea que traza la trayectoria que seguiría la escorrentía superficial sobre el terreno. Una línea de flujo pasa de celda a celda siguiendo la máxima pendiente local.

Línea de ruptura.- Línea que rompe la continuidad de la superficie topográfica se utilizan en la construcción de modelos digitales de elevaciones en zonas como bordes de acantilados, líneas de cresta y otras formas abruptas

Link.- (Eslabón) Es una cadena. Segmento entre dos nodos sucesivos.

Longitud.- Posición este-oeste. Se define como el ángulo entre el plano del meridiano local y el plano del meridiano de referencia.

M

Manejador de base de datos.- Interfase con el usuario en el software de la base de datos.

Matriz.- Estructura de datos formada por elementos (celdas) dispuestos regularmente en filas y columnas. Es la estructura más usada para la construcción de modelos digitales del terreno e imágenes digitales, cada elemento de una matriz se denomina píxel.

Mapa.- Modelo gráfico de la superficie terrestre donde se representan objetos espaciales y sus propiedades métricas, topológicas y atributivas. Puede ser analógico (impreso sobre papel, por ejemplo) o digital (codificado en cifras, almacenado en un ordenador y presentado en una pantalla). Existen mapas métricos (diseñados para representar distancias, superficies o ángulos) y topológicos (diseñados para representar vecindad, inclusión, conectividad y orden en el contexto de los SIG).

Mapa derivado.- Mapa creado a través de la depuración o la combinación o el análisis de la información de otros mapas.

Mapa Índice.- Mapa de referencia que representa el entorno del área estudiada e identifica los mapas componentes o los mapas adyacentes.

Mapa Temático.- Mapa que ilustra las características de clase de una variable espacial en particular.

Medios tonos.- Técnica para representar una imagen continua por medio de líneas o puntos discretos.

Meridiano.- Círculo máximo perpendicular al plano del ecuador.

Metadatos.- Información sobre las características de un conjunto de datos. Incluyen información anexa al cuerpo de datos principal, sobre extensión geográfica, estadísticas, autoría, metodología, calidad de la información, etc.

Modelo.- Representación simplificada de un objeto.

Modelo analítico.- Modelo construido mediante ecuaciones resolubles

Modelos Arco-Nodo.- Objetos geométricos de dimensión 2, representados como una sucesión de líneas denominadas arcos.

Modelo Cartográfico.- Procedimiento que combina operaciones GIS para construir modelos más complejos de análisis espacial.

Modelo dinámico.- Las propiedades de sus componentes cambian; se aplica a procesos.

Modelo geo-relacional.- Incluye información derivada de la localización (área, perímetro) para utilizarla en operaciones matemáticas junto con el resto de las variables.

N

Nodo.- Vértice inicial o final de una línea. Se aplica por extensión a las entidades puntuales que están interconectadas en una estructura en red. El orden de los nodos (inicial→final) permite asignar a la línea un sentido y dejar definidos los conceptos topológicos de izquierda/derecha.

O

Objeto.- 1. En base de datos, fenómeno caracterizado por un conjunto de atributos; 2. En cartografía, la representación digital de una entidad o rasgo.

Ondulación del Geoide.- La distancia entre el nivel medio del mar y el elipsoide de referencia.

Operación espacial.- Función con argumentos espaciales.

Operaciones Booleanas.- Sistema lógico combinatorio basado en la álgebra de Boole. Las operaciones son AND, OR, XOR (OR exclusiva). IMP (implicación), EQV (equivalente), y NOT; son las operaciones comúnmente utilizadas en el análisis geográfico son: AND (intersección) y OR (unión)

Ortofoto.- Fotografía aérea modificada geoméricamente para ajustarla a un sistema de proyección geográfica. En ella se han eliminado las distorsiones debidas a la perspectiva, al movimiento de la cámara y al relieve de forma que posee las mismas propiedades métricas que un mapa.

P

Par estereoscópico.- Dos imágenes del mismo lugar tomadas desde diferentes puntos de vista. Las imágenes pueden ser analógicas o digitales. Se utilizan en fotogrametría para restituir el relieve.

Peligrosidad.- Probabilidad de ocurrencia en un ámbito temporal y espacial determinado de un fenómeno natural potencialmente dañino suele utilizarse como sinónimo el término amenaza.

Pendiente.- Ángulo entre la línea normal a la superficie del terreno y la vertical la pendiente. Puede estimarse directamente a partir del modelo digital de elevaciones mediante filtros.

Percepción Remota.- Adquisición de información sobre las propiedades de un objeto empleando instrumentos que no están en contacto directo con él.

Píxel.- Cada uno de los elementos discretos en los que se divide una imagen digital. Tecnicismo de origen inglés que procede de la contracción de picture element.

Planimetría.- La representación de la posición horizontal.

Polígono.- Figura geométrica plana formada por al menos un anillo externo. Pueden tener anillos internos en cuyo caso se habla de polígonos compuestos.

Polígonos isla.- Polígonos completamente rodeados por otros polígonos.

Polilínea.- Conjunto ordenado de vértices x, y, los cuales representan una línea o un límite.

Precisión.- Calidad del proceso de medida de una magnitud.

Precisión espacial de los datos.- En los modelos raster, se relaciona con el tamaño de las celdillas; en el caso de los mapas de puntos, la resolución se relaciona con la distancia media entre los puntos.

Proyección, *proyección cartográfica.*- Conjunto de transformaciones métricas definidas para representar la superficie de la tierra sobre un plano. Existen varias proyecciones, cada una posee propiedades diferentes en cuanto a las métricas del objeto real y de su representación plana; por ejemplo, en una proyección conforme se conservan los ángulos (los paralelos y meridianos se cortan en ángulo recto) y en una equivalente se conservan las superficies.

Punto.- Objeto de área nula representado por sus coordenadas.

Punto de control.- Un punto cuya localización es conocida. Punto de ubicación en el terreno conocida que puede identificarse en la imagen o mapa y por tanto emplearse para hacer las transformaciones para la georreferenciación de la imagen o mapa.

R

Raster.- Modelo de datos que forma un mosaico regular, cada componente del mosaico es una unidad de superficie que recoge el valor medio de la variable representada (altitud, reflectancia, etc.); las componentes pueden ser cuadradas (celdas) o no (triangulares, hexagonales...). Un modelo de datos *raster* está basado en localizaciones.

Red.- Modelo de datos formado por nodos y conexiones entre ellos. Estos elementos pueden tener atributos propios como longitud, resistencia, sinuosidad, etc.

Rectificaciones.- Conjunto de técnicas empleadas para eliminar deformaciones o errores en aerofotografías, imágenes de satélite o mapas.

Red de coordenadas.- Representación plana de la red de líneas correspondientes a las del elipsoide terrestre.

Red geodésica de apoyo.- Garantiza el paso de la superficie física de la tierra a la superficie del elipsoide y una situación correcta de los objetos geográficos del mapa de acuerdo con la red de coordenadas.

Reflectancia.- Razón entre la radiación recibida y la reflejada por un objeto.

Región.- Área continua con alguna característica uniforme. Polígono.

Rejilla cartográfica.- Red de coordenadas cuyo valor está en relación con el sentido geográfico de los meridianos y paralelos.

Remote Sensing.- Percepción remota.

Riesgo.- Pérdidas esperadas de los elementos vulnerables ante la ocurrencia de un fenómeno determinado el riesgo suele valorarse en unidades monetarias (ver vulnerabilidad) riesgo específico: grado de pérdidas esperadas como consecuencia de un fenómeno determinado; es igual a la peligrosidad por la vulnerabilidad

S

Shapefile.- Archivo de formas, nativo de ESRI. Se encuentra constituido por un archivo de índices, un archivo de formas y un archivo de base de datos, este formato no almacena la topología de los objetos.

Símbolo.- Representación gráfica de una entidad geográfica. Las clases de símbolos son líneas y polígonos (áreas).

Sistema.- Conjunto de elementos interrelacionados con un objetivo común.

Sistemas de ayuda a la toma de decisiones.- Los datos y la base de conocimientos (reglas, etc.) se estructuran para servir de ayuda a la toma de decisiones, facilitando posibles contestaciones y simulaciones de lo que podría ocurrir en caso de adoptar alguna postura.

Sistema de gestión (manejador) de bases de datos (SGBD).- Sistema informático diseñado para la creación, modificación, corrección, actualización y consulta de bases de datos tabulares relacionados con los recursos que se analizan.

Sistema de información geográfica.- Sistema de gestión de bases de datos (SGBD) con herramientas específicas para el manejo de información espacial y sus propiedades los tipos de propiedades que un SIG debe poder analizar tanto independiente como conjuntamente son tres: métricas, topológicas y atributivas.

Sistema de coordenadas.- Marco de referencia espacial que permite la definición de localizaciones mediante coordenadas. Éstas pueden ser lineales (sistemas cartesianos, con ejes ortogonales) o esféricas (donde se utilizan como coordenadas el acimut y elevación angular).

Sistema experto.- Sistema de decisión basado en reglas que genera la respuesta de mayor probabilidad ante un conjunto dado de datos de entrada.

Sistema de información.- Serie de operaciones que van desde la planeación, la observación y la recopilación de datos hasta el almacenamiento y análisis de los datos para derivar información que ayude en algún proceso de toma de decisiones.

Sobreposición espacial.- Procedimiento GIS para generar una nueva capa de información como una función de la entrada de dos o más capas.

Sombreado.- Proceso de asignación de un valor de reflectancia a cada punto de un mapa para simular el relieve con el sombreado. Hace más interpretable el relieve simulando el aspecto que tendría ante una fuente de luz; el procedimiento más sencillo es asignar un valor de reflectancia proporcional al ángulo de incidencia del vector luminoso sobre el terreno.

SQL.- Acrónimo de *structured query language*. Lenguaje estándar de gestión de bases de datos. Se ha convertido en un estándar por lo que es posible acceder a bases de datos de procedencia diversa mediante consultas en este lenguaje.

T

Tabla.- Objeto constituido por registros en una base de datos relacional.

Teoría de gráficos.- Relaciones topológicas para expresar la posición relativa de diversos elementos del mapa.

Tesela.- Unidad elemental del modelo de datos *raster*. Puede considerarse sinónimo de celda, aunque esta última denominación suele reservarse para las teselas rectangulares.

Tics.- Puntos de control. Puntos de ubicación conocida usados para definir la transformación de un sistema de referencia o proyección a otro.

TIN.- Estructura vectorial usada para construir modelos digitales del terreno. TIN son las siglas de *triangulated irregular network*; se trata de una estructura de datos que representa el relieve mediante una red irregular de triángulos adosada al terreno, sin solapamientos y donde cada vértice se define por sus coordenadas espaciales (x,y,z).

Topografía.- Descripción de las formas del terreno.

Topología.- Referencia a las propiedades no métricas de un mapa y que permanecen invariables ante cambios morfológicos, de escala o de proyección (vecindad o adyacencia, inclusión, conectividad y orden).

Transformación de Datum.- Procedimiento computacional para convertir las coordenadas de un punto del sistema definido con un datum al sistema definido por otro.

Transformación Geométrica.- Georreferenciación una imagen digital.

Transformación Lineal.- Escalamiento, rotación, reflexión y traslación de imágenes.

V

Validación.- Proceso de comprobación de que datos y métodos responden a un estándar

Variable regionalizada o campos o superficie.- variables espaciales que muestran propiedades similares, son objetos tridimensionales con dos dimensiones que representan los ejes espaciales y una tercera que representa una tercera variable cuantitativa representada en cada punto del espacio.

Vector.- Entidad geométrica definida por una magnitud y un sentido.

Vectorial.- Modelo de datos en el que la realidad se representa mediante estructuras conformadas por vectores. Una estructura vectorial puede ser compleja: una cadena de vectores forma un arco; una cadena de arcos forma un anillo; uno o varios anillos definen un polígono se trata de un modelo de datos basado en objetos (geométricos) frente al modelo *raster*, basado en localizaciones

Vectorizar.- Transformación de una estructura raster en una vectorial suele aplicarse a la operación de “rescatar” líneas a partir de documentos escaneados (mapas o planos).

Vértices.- Nodos, en particular los puntos intermedios en una poligonal.

Vulnerabilidad.- Porcentaje de pérdida de un elemento como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud determinada. Se expresa en un rango 0 (ningún daño) a 1 (pérdida completa); es un concepto que se aplica en análisis de riesgo.

REFERENCIAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, *Committee on Cartographic Surveying and Mapping Division*, ASCE. New York, U.S.A., 2003.

ANTENNUCCI, J.C.; BROWN K.; CROSWELL P.L.; KEVANY, M.J., *Geographic Information Systems*, New York and London Chapman & Hall. E.U., 1991.

ARONOFF, S., *GIS: A management perspective*, WDL, Ottawa, Canadá, 1989.

BATTY, M., *Environment and Planning B: Planning and design*, Geo Information International, U.K., 1992.

_____ y LONGLEY, P., *Analytical GIS: the future spatial analysis, modeling in a GIS environment*, Geo Information International, Cambridge, U.K., 1996.

BERNHARDSEN, T., *Geographic Information Systems*, Norwegian Mapping Authority, Geo Information International, Cambridge, U.K., 1992.

_____, *Geographic Information Systems: An Introduction*, 2nd edition, John Wiley & Sons, E.U., 1999.

BERRY, B.J.L., *Spatial analysis: a reader in statistical geography*, Englewood Cliffs, Prentice Hall, E.U., 1968.

BERTALANFFY, L., *General systems theory: foundations, development and applications*, Braziller, New York, E.U., 1969.

BRASSEL, K. E.; REIF, D., *A procedure to generate Thiessen polygons*, Geographical Analysis Press, E.U., 1979.

BURROUGH, P.A.; MCDONNELL, R.A., Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, U. K., 1998.

COPPOCK, J.T.; RHIND,D.W., The History of GIS, John Wiley & sons, Cambridge, U.K., 1991.

COWEN, D. J., GIS versus CAD versus DBMS: What are de differences, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Institute, E.U., 1998.

DANGERMOND, J., Design and implementation of computer based GIS, IGU Comisión on Geographical data sensing & processing, Amherst N. Y., E.U., 1983.

DEMERS, M.N., Fundamentals of GIS, 2nd edition, John Wiley & Sons, E.U., 1999.

DESPOTAKIS, V.K.; GIAOUTZ, M.; NIJKAMP, P., Dynamic GIS models for regional sustainable development, Springer, Berlin, 1993.

FELICISIMO, A.M., Modelos digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales, Pentalfa Ediciones, España, 1994.

FORSSELL, B., Radio navigation systems, Prentice Hall, E.U., 1991.

FORTHERINGHAM, A.S; ROGERSON, P.A., Spatial Analysis and GIS, Taylor & Francis. London, U.K., 1994.

GRAY, R. J.; MAIZEL, M. S., A survey of GIS for natural resources decision making, The American farmland trust, Washington, E.U., 1995.

HARDER C., Arcview GIS means business, Environmental Systems Research Institute INC., California, E.U., 1997.

HAGGET, P.; CLIFF, A.D.; FREY, A.E., Locational analysis in human geography, 2nd edition, Edward Arnold, London, U.K., 1977.

HEARNSHAW, H.M.; UNWIN, D.J., Visualization in GIS, John Wiley & Sons, Chichester, U.K., 1994.

HERRING, J., The mathematical modelling of spatial and non spatial information in GIS, Dordrecht, Kluwer,E.U., 1991.

HUXHOLD, W.E., An Introduction of Urban Geographic Information Systems, Oxford University Press, U. K., 1991.

JONES, C.B; KIDNER, D.B.; LUO; L.Q.; BUNDY, G.L.; WARE, J.M., Database design for multi-scale spatial information system, International Journal of GIS. E.U., 1996.

KAPLAN, E.D., Understanding GPS: Principles and applications, Artech House. E.U., 1996.

KOELN, G.T.; COWARDIN, L.M.; STRONG, L.L., Geographic information systems: research and management techniques for wildlife and habitats, 5th edition, T.A. Bookhout, E.U., 1994.

LEICK, A., Satellite Surveying, John Wiley & Sons, E.U., 2001.

LONGLEY, P.A.; GOODCHILD, M.F.; MAGUIRE, D.J.; RHIND, D.W., GIS: Management issues & applications, 2nd edition, John Wiley & Sons, E.U., 1999.

_____; _____; _____ y _____, Geographic Information Systems and Science, John Wiley & sons, E.U., 2001.

LÓPEZ BLANCO, JORGE, Sistemas de Información Geográfica (SIG): Conceptos, definiciones y contextos metodológico que involucra su uso, Quivera, Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Planeación Urbana y Regional. México, 1998.

MAC EACHREN, A.M.; TAYLOR, D.R.F., Visualization in modern cartography, Pergamon, Oxford, U.K., 1994.

MAGUIRE, D.J., Computers in geography, Longman Scientific & technical, E.U., 1989.

_____; An overview and definition of GIS, John Wiley & sons, E.U., 1991.

_____; GOODCHILD, M.F.; RHIND, D.W.; MALING, D.H., Coordinate systems and map projections for GIS, John Wiley & sons, E.U., 1991.

_____; _____; _____, Geographical Information Systems: Principles and Applications, John Wiley & sons, E.U., 2001.

MITCHELL, A., Geographic Information Systems at work in the community: Zeroing in, Environmental Systems Research Institute, INC., E.U., 1997.

MONMONIER, M. S., Computer-aided cartography: Principles and prospects, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.

MOOLENAR, M., An introduction to the theory of Spatial Object Modelling for GIS, Taylor & Francis, London, U.K., 1998.

OCHOA, C.J., El Geosistema de Información Municipal como Herramienta de Modelización de la Administración Pública, Mapping, nº 28, España, 1996.

_____, El nuevo escenario de las tecnologías de la información en la Administración Local, Mapping, nº 28, España, 1996.

OPENSHAW, S., A view on the GIS crisis in geography Environment and Planning, Pergamon, E.U., 1991.

SOMERS, R., GIS organization and staffing, URISA, E.U., 1994.

THOMAS, P. D., Spheroidal Geodesics, Reference Systems and Local Geometry, Mc Graw Hill, E.U., 1970.

WALKER, J.D.; BLACK, R.A.; LINN, J.K.; THOMAS, A.J.; WISEMAN, R.; D'ATTILIO, M.G., Development of Geographic Information Systems-Oriented Database for Integrated Geological and Geophysical Applications, GSA Today: A Publication of the Geological Society of America, E.U., 1996.

WRIGHT, D.J.; GOODCHILD, M.F.; PROCTOR, J.D., Desmytifying the Persistent Ambiguity of GIS as Tool vs. Science, The annals of the Association of American Geographers, E.U., 1997.

Páginas de internet:

<http://www.asce.org/publications/> (aplicaciones de los SIG).

<http://www.geog.ubc.ca/courses/geog470/notes/intro.html> (introducción a SIG).

<http://www.inegi.gob.mx/> (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática).

<http://www.gva.es/icv/GLOSARIO.htm> (terminos empleados en lo SIG).

<http://www.lsgi.polyu.edu.hk/cyber-class/geodesy/> (conceptos de geodesia).

<http://nivel.euitto.upm.es/mab/tematica/htmls/proyecciones.html>
(proyecciones cartográficas).

<http://www.mercator.org> (sistema de proyecciones mercator).

http://www.spatial-info.org/shtml/init_csi.shtml (operaciones espaciales).

<http://www.uco.es/bb1rofra/documentos/proyecciones/proyecciones.html>
(proyecciones cartográficas).

http://www.uco.es/bb1rofra/documentos/utm/coordenadas_utm.html
(explicación sobre los tipos de coordenadas empleadas en los SIG).

<http://www.ncgia.ucsb.edu>

<http://www.wiley.co.uk/wileychi/gis/resources.html> (información y recursos de SIG).