

Capítulo 2

Aspectos Teóricos

2.1 Consideraciones sobre ingeniería sísmica

La ingeniería sísmica es la combinación de una serie de conceptos, los cuales considerados en forma conjunta, permiten el análisis y diseño de una obra capaz de resistir los efectos de los sismos que se puedan presentar en el futuro. La ingeniería sísmica combina conocimientos de áreas como la sismología, la geología, la dinámica de estructuras y de suelos, y el diseño estructural.

Las rupturas de la corteza terrestre, derivadas de la ocurrencia de un gran sismo, tienen particularidades que se asocian a las del sismo que las originó. La magnitud del sismo y la profundidad focal, son dos variables que condicionan la posibilidad de que la ruptura de una falla geológica activa sea evidente en la superficie del basamento de la roca. Así mismo, la posibilidad de que la ruptura en la roca se prolongue hasta la superficie del subsuelo depende del espesor y de las características de deformación del suelo.

Se debe considerar el comportamiento de las construcciones que se puedan ver sometidas a violentas sacudidas derivadas de la acción de un sismo intenso. Las construcciones de concreto reforzado tienen sus particularidades frente a las cargas de sismo, como también las tienen las de acero o las de mampostería. Las construcciones de tierra o materiales pétreos tienen comportamientos particulares, probablemente más inciertos que los de otros materiales de construcción.

El comportamiento de las construcciones frente a la acción de las cargas sísmicas corresponde a un estado dinámico, producido por fuerzas inerciales que estimulan deformaciones en cualquier dirección.

2.1.1 Tectónica global y origen de los terremotos

En la **Fig. 2-1** se muestra un modelo de la posición de las placas tectónicas. En total se aprecian las siguientes 22 placas: América, Eurasia, África, India, Antártida, Pacífica, Nazca, Somalia, Filipina, Arábica, Caribe, Cocos, China, Persa, Turquía, Egea, Nuevas Hébridas, Adriática, Juan de Fuca y Rivera.

La Placa Pacífica es la mayor y está claramente definida. Ésta se separa de Nazca, Cocos y Rivera mediante la parte principal de la dorsal del este del Pacífico. La Placa Cocos se separa de Nazca por intermedio de la dorsal de Galápagos, así como se separa de la Placa Pacífica mediante la dorsal del Pacífico Este. El límite entre la Cocos y la Pacífico tiene velocidades de separación de las placas que varían y van en aumento hacia el sur.

Los movimientos relativos de las placas tectónicas engendran deformaciones semielásticas en las inmediaciones de los contornos de las placas que chocan entre sí. Estas deformaciones implican un almacenamiento lento de energía elástica dentro de los contornos deformados. La densidad de energía almacenada será máxima en las inmediaciones de las zonas de contacto entre las placas e irá disminuyendo a medida que el volumen bajo consideración esté más alejado del borde.

El área de superficie terrestre es constante, por lo que si en las dorsales hay expansión del lecho marino es necesario que en otras partes haya desaparición de superficie terrestre para mantenerla constante. La desaparición se lleva a cabo en las fosas marinas, también llamadas zonas de subducción, las cuales están bastante bien definidas en la actualidad.

La más notable es la del borde del Océano Pacífico, la cual conforma el llamado Cinturón de Fuego del Pacífico, a lo largo del cual ocurre la mayor liberación de energía acumulada en función del tiempo.

En términos generales se pueden producir sismos en los ambientes tectónicos siguientes:

- a) Zonas de subducción, correspondientes a los límites del choque entre dos placas tectónicas en los cuales una se desliza por encima de la otra; los sismos que ocurren en las zonas de subducción, o entre los límites de dos placas, son llamados sismos interplaca.
- b) Zona de Benioff de la placa subducida. Este ambiente es complementario al de subducción, en el que la placa subducida penetra al interior terrestre con una inclinación gobernada por las condiciones regionales.
- c) Fallamientos geológicos activos en el interior de una placa tectónica. En zonas de debilidad los esfuerzos tienden a liberarse, generando sismos en forma frecuente.
- d) Actividad volcánica, que en general produce sismos de baja magnitud salvo en erupciones extraordinarias.
- e) Actividad humana, tal como la explosión de bombas atómicas, grandes cargas de dinamita o simplemente el derrumbe de galerías remanentes de actividades mineras.

En la **Fig. 2-2** se muestran los principales tipos de fallas que pueden dar origen a sismos.

2.1.2 Transmisión de la energía sísmica

La energía elástica acumulada a lo largo del tiempo en las zonas de convergencia o de movimientos relativos entre diferentes bloques de la corteza, se libera súbitamente cuando se producen los desequilibrios, propios de un sismo. La energía liberada se debe disipar para que el medio pueda retornar a una condición de equilibrio. La disipación obedece a los fenómenos

de fricción y de debilitamiento de la intensidad energética al aumentar el área por la cual pasa la misma cantidad de energía, a medida que las ondas se alejan de la fuente que las originó.

Las ondas sísmicas transmiten un estado de esfuerzos mediante complicadas trayectorias de las partículas del medio transmisor y tienen una importancia fundamental en la ingeniería sísmica. En la inmensa mayoría de los sismos, su acción sobre las construcciones no se debe a que la ruptura las afecta directamente, sino a las sacudidas producidas por las ondas que se propagan por el subsuelo donde se cimenta la construcción. Una onda sísmica transporta un estado de esfuerzos con amplitudes, frecuencias y velocidades que dependen de las características de la fuente sísmica y del medio transmisor. Existen dos tipos de ondas sísmicas: las internas, que se propagan por el interior de los sólidos, y las ondas superficiales, que se pueden transmitir por su superficie o por los contactos entre cambios bruscos de la rigidez del medio (ver Fig. 2-3).

Las ondas internas son ondas libres que se transmiten en cualquier dirección por el interior de los cuerpos. Existen dos clases, las ondas longitudinales o de compresión (ondas P), y las ondas transversales o de cortante (ondas S). La velocidad de las ondas P siempre es superior a la velocidad de las ondas S, por lo que llegan primero a una estación sismológica. Las ondas P casi siempre son débiles en términos relativos a las ondas S, por lo que las ondas S tienen una mayor capacidad de destrucción porque tienen mayor amplitud con períodos relativamente similares a los de las ondas P.

Las ondas superficiales son de dos tipos: ondas R de Rayleigh, que se desplazan por la superficie de manera que las partículas describen trayectorias elípticas, y ondas L de Love, que semejan las ondas de cortante. La velocidad de las ondas superficiales es similar a la de las ondas S, y sus períodos dominantes son bastante mayores, permitiéndoles propagarse a grandes distancias con menor atenuación que las ondas internas.

Por razones de una menor atenuación geométrica y de una menor frecuencia relativa dominante en las ondas superficiales, la atenuación general de estas ondas es varias veces menor que la que se presenta en las internas.

2.1.3 Características principales de los sismos

A continuación se resumirán las principales características de los sismos, tales como la magnitud del mismo, el foco, el epicentro, la intensidad, el momento sísmico y la energía sísmica.

2.1.3.1 Magnitud del sismo

La magnitud es una medida cuantitativa e instrumental del tamaño del evento, relacionada con la energía sísmica liberada durante el proceso de ruptura en la falla. Existen varias formas de determinar la magnitud de un sismo: (Ref. 10).

- *Magnitud Local o de Richter*: se define como el logaritmo de base 10 de la amplitud máxima (en micrómetros) del registro de un sismógrafo Wood-Anderson localizado a 100 km del epicentro del sismo. La magnitud de Richter (M_L) es la escala de magnitud más conocida aunque no siempre es la más apropiada para describir el tamaño del evento.

- *Magnitud de ondas de superficie*: La magnitud de Richter no distingue entre los diferentes tipos de ondas. En cambio, otras magnitudes están basadas en la amplitud de un tipo de onda en particular. Para distancias epicentrales grandes, las ondas de cuerpo son atenuadas lo suficiente para que predominen las ondas de superficie. La magnitud de ondas de superficie (M_s) desarrollada por Gutenberg y Richter en 1936, está basada en la amplitud de las ondas de superficie Rayleigh, de la forma:

$$M_s = \log A + 1.66 \log \Delta + 2.0$$

donde A es el máximo desplazamiento en micrómetros y Δ es la distancia epicentral del sismógrafo medido en grados. La magnitud de ondas superficiales es comúnmente utilizada para sismos con una profundidad focal menor a 70 km y distancias no mayores de 1000 km.

- *Magnitud de ondas de cuerpo*: para sismos de foco profundo las ondas superficiales son muy pequeñas, para poder utilizar la magnitud de ondas de superficie. La magnitud de ondas de cuerpo (m_b) desarrollada por Gutenberg en 1945, es una escala de magnitud basada en la amplitud de los primeros ciclos de las ondas P cuando no son fuertemente influenciadas por la profundidad focal. La magnitud de ondas de cuerpo puede ser expresada como:

$$m_b = \log A - \log T + 0.01 \Delta + 5.9$$

donde A es la amplitud de las ondas P medida en micrómetros y T es el período de la onda P (usualmente 1 segundo).

- *Magnitud de duración (M_D)*: está basada en la duración total del sismo, puede utilizarse para describir sismos pequeños.

- *Magnitud local (M_{JMA})*: la Agencia Meteorológica Japonesa utiliza los largos períodos de las ondas para determinar esta escala de magnitud local para sismos en Japón.

- *Magnitud Momento (M_w)*: las escalas de magnitud anteriores están basadas en la medición de las características de los sismos. Para sismos fuertes la medición de estas características comienza a ser menos dependiente del evento que para sismos pequeños. Este fenómeno se refiere a la saturación de las escalas de magnitud; la de ondas de cuerpo y Richter se saturan para valores de magnitud entre 6 y 7, y la de ondas superficiales para magnitudes superiores a 8. La única escala de magnitud que no se satura es la magnitud momento, la cual se basa en el momento sísmico, que se mide directamente a partir de los factores que producen la ruptura.

La magnitud momento está dada por:

$$M_w = \frac{\log M_0}{1.5} - 10.7$$

donde M_0 es el momento sísmico en dinas-cm.

La relación entre las varias escalas de magnitud pueden verse en la Fig. 2-4. En esta figura se observa la saturación de las distintas escalas, en comparación con la escala de magnitud momento.

2.1.3.2 Foco y epicentro

El foco es la zona donde se inicia la liberación de energía que da origen al sismo. El foco también es llamado hipocentro o epifoco. El epicentro es la proyección del foco sobre la superficie terrestre, su ubicación se logra a partir de los registros de los sismogramas.

La profundidad del foco permite clasificar el evento en :

- Sismos superficiales: cuando el foco se localiza entre 0 a 20 km de profundidad.
- Sismos someros: para profundidades entre 20 a 70 km
- Sismos intermedios: con foco entre 70 a 300 km
- Sismos profundos: con profundidades entre 300 a 700 km.

2.1.3.3 Intensidad

Es el efecto local que produce un sismo sobre diferentes sitios. Es una medida de la fuerza del movimiento del terreno y depende de la distancia a la fuente sísmica. En la actualidad la escala de intensidades más empleada es la de Mercalli-Cancani, modificada por Wood-Newman, por lo que se le conoce como escala de Mercalli modificada o escala MM. Esta escala de intensidad depende de la subjetividad de los evaluadores.

Por otro lado, se han desarrollado otras formas de cuantificar la intensidad con base instrumental, estas son: la intensidad espectral de Housner y la intensidad de Arias.

2.1.3.4 Momento Sísmico

Es una medida del tamaño del sismo en función de las propiedades físicas de la roca y de las dimensiones del área de ruptura. Es un concepto que permite cuantificar y comparar sismos entre sí y se evalúa mediante la expresión:

$$M_0 = A * D * G$$

donde :

M_0 : Momento Sísmico

A: Área de la falla

D: Longitud del desplazamiento de la falla

G: Rigidez al cortante, aproximadamente $3 \cdot 10^{11}$ dinas/cm²

2.1.3.5 Energía Sísmica

Cuando se produce un sismo, gran parte de la energía de deformación acumulada en la roca se disipa en forma de calor; una parte menor es irradiada en forma de ondas sísmicas.

La de Gutenberg - Richter (1956), es una expresión que relaciona la magnitud de las ondas de superficie (M_s) con la energía sísmica (E_s): $\log E_s = 11.8 + 1.5 M_s$

2.2 Sistemas de información geográfica

2.2.1 Definición y características

Un Sistema de Información geográfica (SIG) es un paquete de computadora diseñado para permitir la captura, manejo, modificación, manipulación, análisis, síntesis y despliegue de datos referidos en forma geográfica. En un SIG, objetos y características del mundo real son representados como elementos de mapa con atributos asociados a ellos. El SIG combina las ventajas de los sistemas automatizados de cartografía, sistemas de manejo de bases de datos y sistemas de análisis y simulación (Ref. 29).

Las aplicaciones más comunes de los SIG incluyen mapas de uso de la tierra, estimación de amenazas naturales, estudios de impacto ambiental, simulación de flujo de acuíferos, análisis de flujos de tránsito, y estudios de población y mercadeo.

Actualmente existen alrededor de 100 productos computacionales relacionados con los SIG. Estos varían en capacidad, complejidad, habilidad para interactuar con otros paquetes informáticos, precio y requisitos de plataforma computacional y sistema operativo.

Para la realización de este proyecto se utilizará el programa Arc/Info PC Versión 3.5. Algunas de sus características son:

- Fue desarrollado por el Instituto de Investigación en Sistemas Ambientales (Environmental Systems Research Institute; ESRI) en California, Estados Unidos.
- Es reconocido como el estándar mundial para SIG, con más de 30 000 usuarios en unas siete mil entidades en el mundo.
- Puede operar tanto con modelos de datos de rastreo y de vectores e incluye una interface de manejo de base de datos relacional que permite la integración con sistemas comerciales de manejo de bases de datos. La versión para plataforma de PC solo puede manejar datos en forma vectorial, la versión para plataforma UNIX si permite ambos tipos de datos.

2.2.2 Atributos de un SIG

Los atributos de un SIG pueden dividirse en las siguientes categorías:

2.2.2.1 Captura de datos

Se refiere a la entrada de datos al SIG, en la que objetos del mundo real con ubicaciones geográficas deben ser convertidos en elementos cartográficos. Usualmente es la parte más cara y que más tiempo consume dentro de un proyecto. Dependiendo de la capacidad del paquete SIG, los datos pueden ser introducidos mediante lectores ópticos, digitalizadores, archivos ASCII, o por conversión de datos.

2.2.2.2 Análisis

Los tipos de análisis que pueden llevarse a cabo con un SIG varían entre los diferentes paquetes disponibles. Los siguientes procedimientos de análisis son típicos de un SIG (y ayudan a definir al paquete como un verdadero SIG y no simplemente un programa de cartografía automático):

- Superposición e intersección de mapas: permiten el análisis de las relaciones espaciales entre los diferentes tipos de datos. La intersección es la creación de un nuevo mapa a partir de dos o más mapas, el cual contendrá todos los elementos de cada uno de los mapas a partir de los cuales fue creado (ver Fig. 2-5).
- Análisis de atributos: los atributos asociados a elementos cartográficos pueden ser analizados con funciones tales como expresiones lógicas o matemáticas.

- **Mediciones:** ejemplos de mediciones de datos cartografiados incluyen longitud, área, ángulo, pendiente, o distancia entre dos ubicaciones. Las mediciones son usualmente dadas en unidades de coordenadas del mapa, de esta forma, mapas referenciados mediante latitud y longitud deben ser proyectados a la superficie de la Tierra para la medición en unidades normales (metros o pies, por ejemplo).
- **Análisis de redes:** Usado para resolver problemas que tratan con la conectividad de elementos cartográficos, tales como distribución de tránsito o flujo en tuberías.
- **Análisis de cercanía:** Las relaciones espaciales entre datos cartográficos son analizadas con procedimientos de cercanía o proximidad. Se pueden tomar decisiones con base en la cercanía (o lejanía) que un ítem dado tenga con respecto a otros ítemes, especialmente en un mapa nuevo creado a partir de una intersección de mapas (ver Fig.2-6).

2.2.2.3 Manipulación

Los siguientes procedimientos de manipulación de datos son típicos de un SIG:

- **Fusión de mapas:** Se refiere a la unión de dos mapas, usualmente de regiones diferentes pero adyacentes, para formar un mapa combinado. Los elementos cartográficos y los atributos asociados a ellos generalmente requieren ser del mismo tipo y tener las mismas definiciones para que la fusión sea exitosa (ver Fig.2-7).
- **Proyección:** Usado para representar la superficie curva de la Tierra en una superficie bidimensional (p.ej., la pantalla de la computadora o los mapas impresos). A su vez, sirven para convertir mapas referenciados mediante latitud y longitud a coordenadas que puedan ser medidas en metros o pies.
- **Actualización:** Los elementos cartográficos y los atributos asociados a ellos deben ser mantenidos al día con respecto a su ubicación y a sus datos descriptivos. Procedimientos de actualización de los mapas y sus atributos varían entre los diferentes paquetes SIG, pero la mayoría permiten la actualización de elementos y registros individuales así como también procesamiento en grupo (ver Fig. 2-8).
- **Generalización:** Usado para eliminar elementos cartográficos que podrían ser innecesarios o que podrían estar causando confusión o error a un mapa. Comúnmente usado también para suavizar líneas dentadas mediante la eliminación de vértices intermedios, o para eliminar aquella información que no sea necesaria para el análisis (ver Fig. 2-9).
- **Adición:** Usado para combinar datos de varias maneras dependiendo de la capacidad del paquete SIG utilizado. Varios elementos cartográficos con sus atributos asociados pueden ser combinados y representados como un solo elemento con nuevos atributos que

representen el tipo de combinación utilizado (e.g. suma, producto, promedio, maximización)

2.2.2.4 Selección

Se refiere a un proceso de búsqueda de información usada para facilitar el acceso a, y el análisis de, un conjunto de atributos. Es usado para identificar un conjunto específico de elementos cartográficos sobre los cuales se puede hacer un análisis o una manipulación. Las selecciones con SIG son usualmente de los siguientes dos tipos: espacial (usado para preguntas relativas a la ubicación de elementos cartográficos), o de atributos (relativas a los atributos asociados con los elementos cartográficos).

En la Fig. 2-10 se muestra un ejemplo de indagación, en el que se conserva en el mapa únicamente aquellos elementos que cumplan con una condición específica.

2.2.2.5 Despliegue

Uno de los aspectos más importantes de un SIG es su habilidad para desplegar y reportar información tal como datos almacenados, superposición de mapas y análisis de resultados. El despliegue es usado para facilitar la transferencia de información de los analistas a los ejecutores de una manera clara y eficaz. Los principales formatos de despliegue incluyen:

- **Tablas:** Usadas para reportar atributos, tanto de todos los registros como de aquellos resultantes de una indagación.
- **Mapas:** Permite la comunicación rápida y clara de la información cartografiada. Varios mapas pueden ser superpuestos para mostrar las relaciones espaciales entre los datos o los resultados.

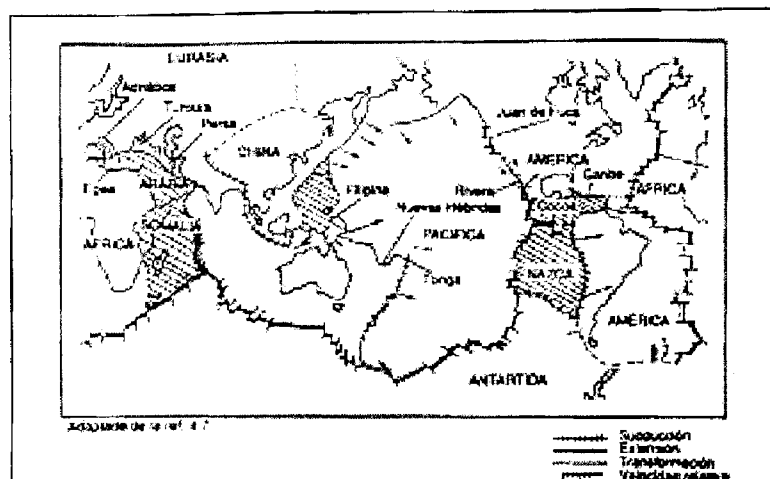


Fig. 2-1: Principales placas tectónicas (Ref. 24)

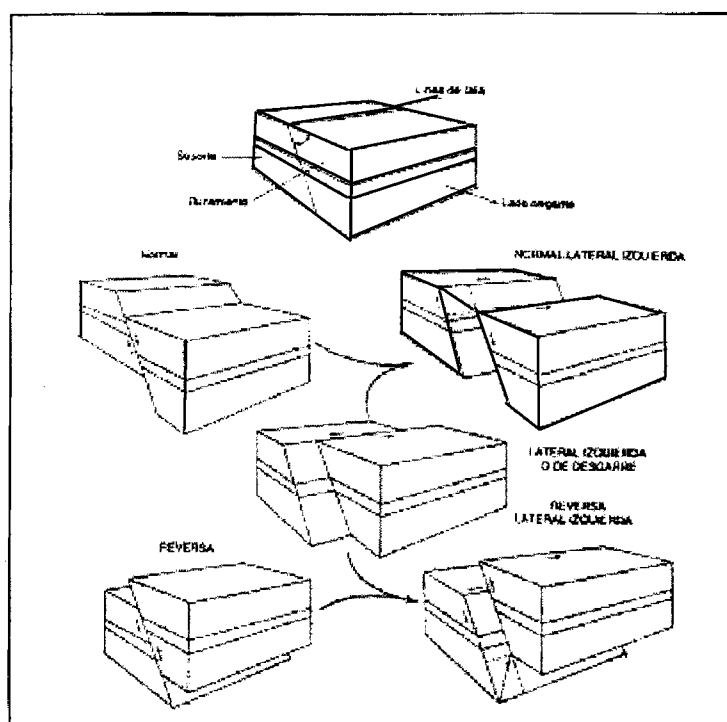


Fig. 2-2: Tipos de fallas geológicas (Ref. 24)

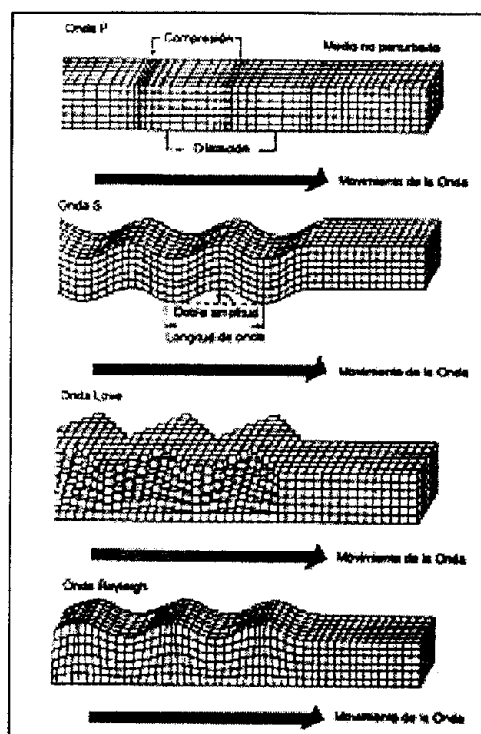


Fig. 2-3: Dirección de propagación de las ondas sísmicas y el medio transmisor (Ref. 24)

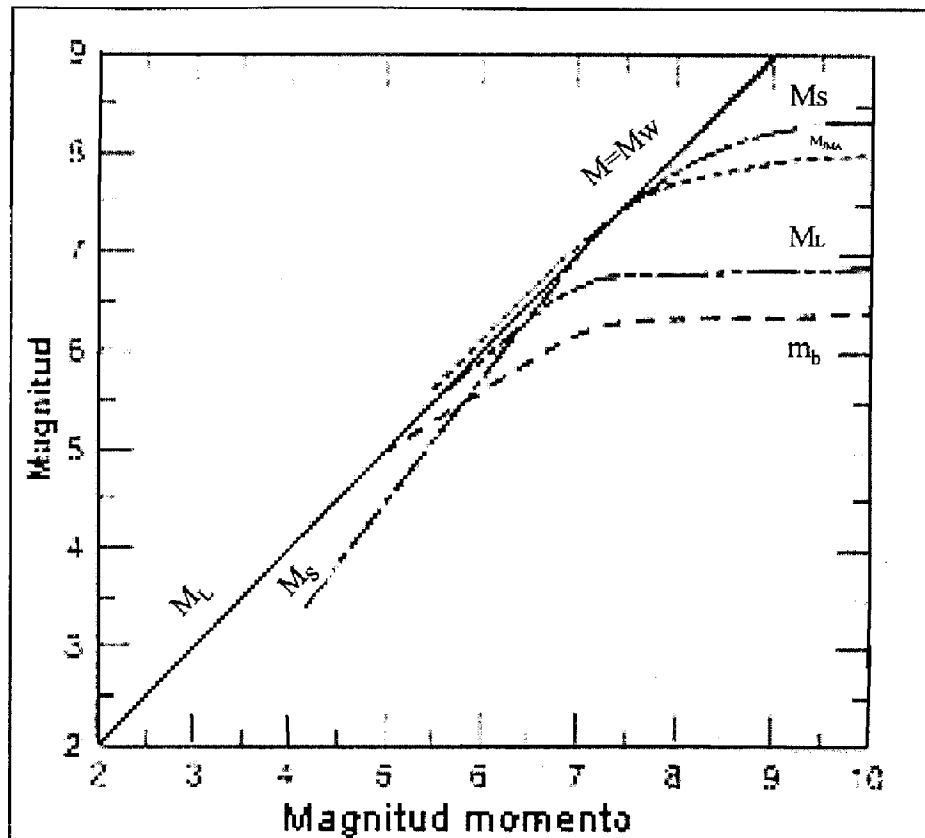


Fig. 2-4: Relaciones entre la magnitud momento y otras magnitudes (adaptado de Ref. 10)

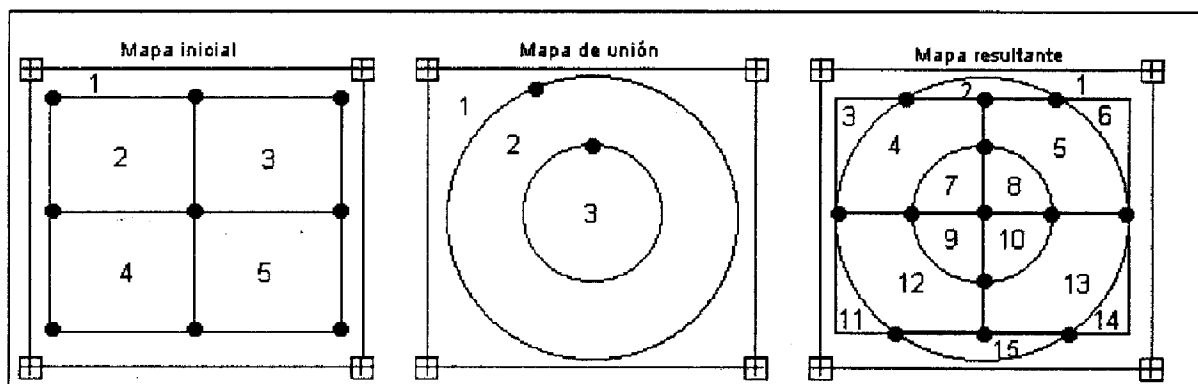


Fig. 2-5: Procedimiento de unión de mapas (adaptado de la Ref. 14)

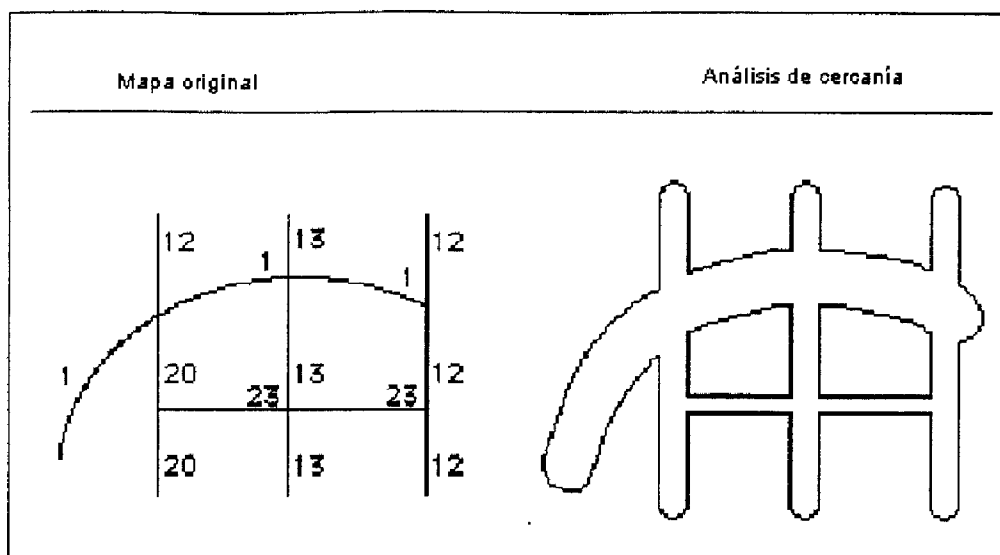


Fig. 2-6: Análisis de cercanía usando un SIG (adaptado de la Ref. 14)

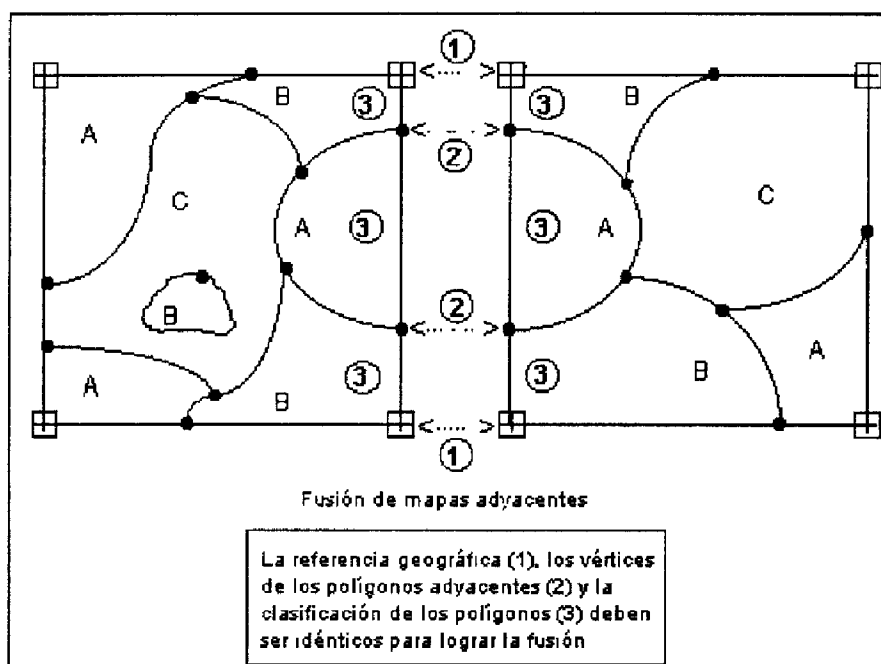


Fig. 2-7: Fusión de mapas adyacentes (adaptado de la Ref. 14)

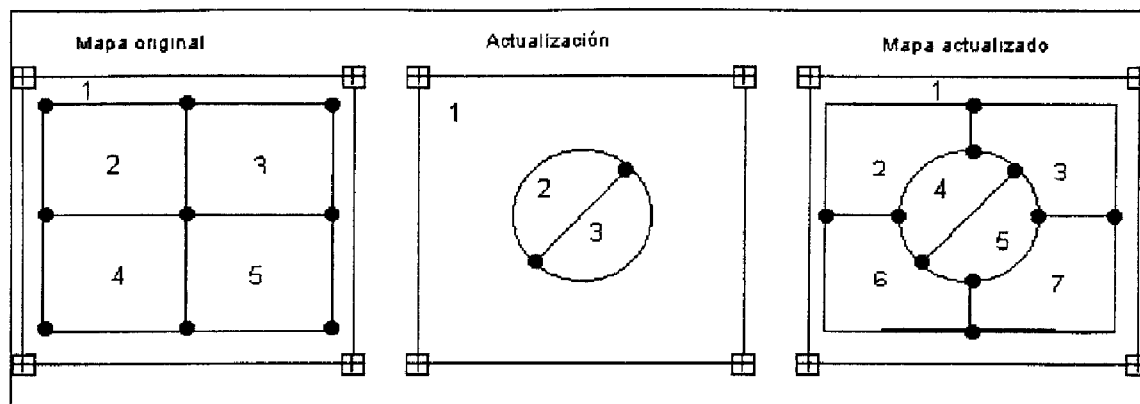


Fig. 2-8: Actualización de mapas (adaptado de la Ref. 14)

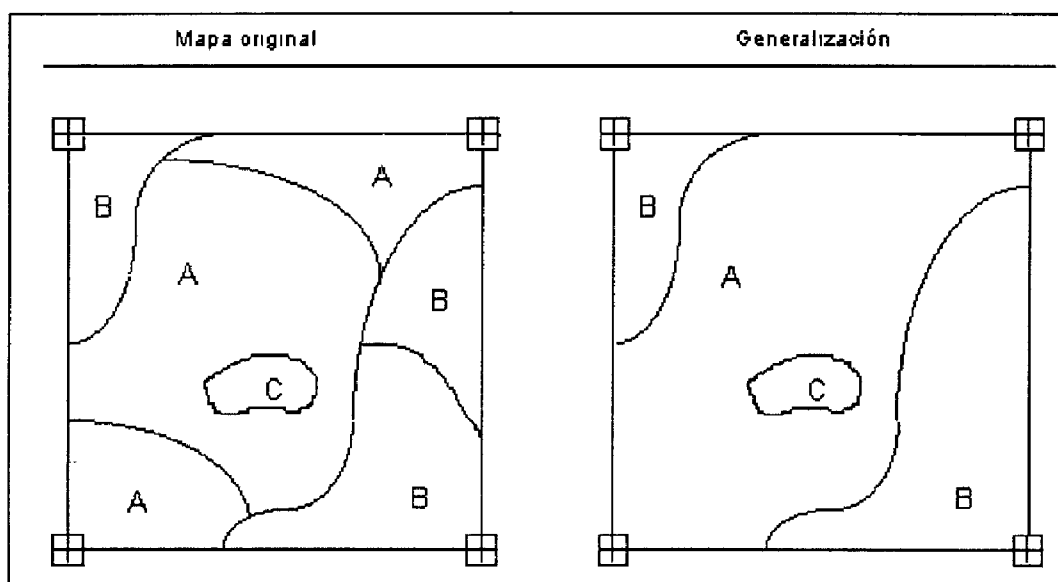


Fig. 2-9: Generalización de mapas (adaptado de la Ref. 14)

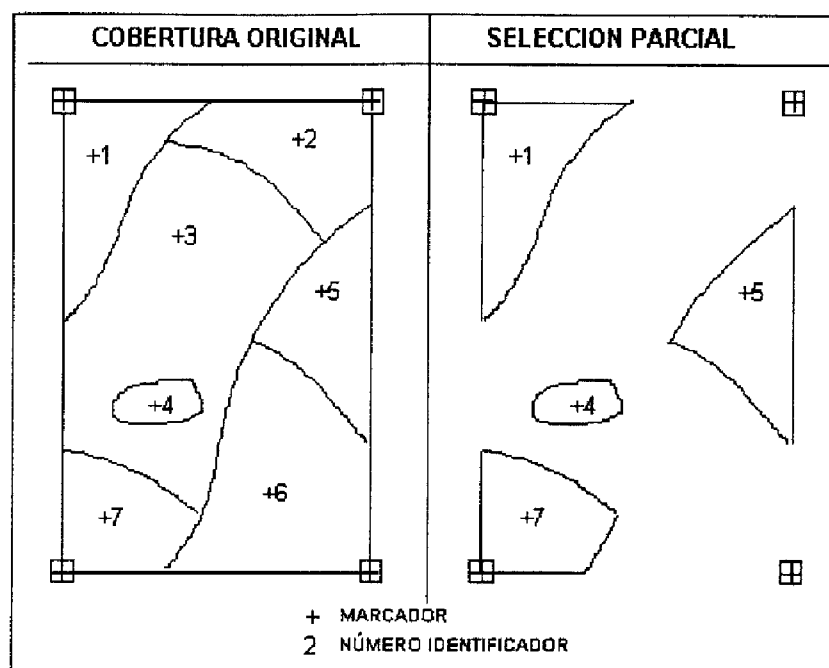


Fig. 2-10: Ejemplo de selección con un SIG
(adaptado de la Ref. 14)