

CAPITULO 2

SISTEMAS VECTORIAL Y RASTER

Como lo habíamos discutido anteriormente, los elementos geográficos en un territorio pueden ser representados mediante formas geométricas simples, esto es puntos, líneas y polígonos. Adicionalmente podemos agregar un modelo de representación abstracta del espacio, esto es, vectores o matrices (raster). En base a la postura anterior, podemos definir a los SIG por la forma de representar el espacio en dos modelos o formatos, el modelo vectorial y el raster.

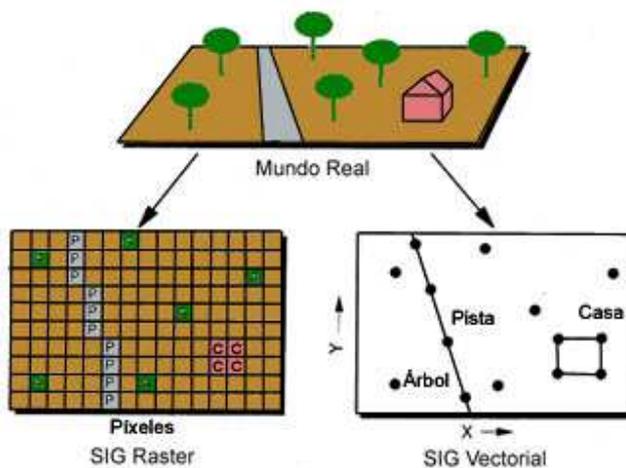


Figura 2.1.- Representación de las entidades geográficas del territorio (Mundo real) mediante modelos numéricos y con entidades geométricas (Modelo Raster y Vector).

La elección de uno u otro modelo de representación de nuestros objetivos y el tipo de análisis a aplicar. En general la estructura de datos vectorial es la opción más usada para hacer cartografía temática, sin embargo su estructura de datos es mucho más compleja y este hecho hace que cualquier análisis ocupe mucho tiempo en el PC proceso. Por otra parte, si se desea realizar un análisis sobre datos espaciales continuos. la mejor opción es el formato raster, que es mucho más rápido en

cualquier proceso numérico por su estructura sencilla. Ambos formatos tienen fortalezas y debilidades, de las cuales se muestra un resumen en la tabla siguiente.

Objetivo	Modelo Vectorial	Modelo Raster
Almacenamiento espacial	Coordenadas x,y para puntos, líneas y polígonos	Celdas de igual tamaño ordenadas en filas y columnas (Matrices)
Representación espacial del objeto (Feature representation)	Puntos Líneas Polígonos (áreas)	Puntos - celda Líneas - conjunto de celdas adyacentes con estructura lineal. Polígonos - conjunto de celdas adyacentes con estructura superficial.
Cartografía	Precisión, posición. No para fenómenos continuos.	Imágenes, fenómenos continuos.

El Formato Raster

El formato raster se fundamenta en la división del área de estudio en una matriz de celdillas, generalmente cuadradas. Cada una de estas celdillas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la misma, tradicionalmente llamada pixel (picture element). Este formato, por tanto, cubre la totalidad del espacio, este hecho supone una ventaja fundamental ya que pueden obtenerse valores de forma inmediata para cualquier punto del mismo.

La matriz numérica, puede contener tres tipos de datos:

- Valores numéricos en caso de que la variable representada sea cuantitativa.
- Identificadores numéricos en caso de que se trate de una variable cualitativa. Estos identificadores se corresponden con etiquetas de texto que describen los diferentes valores de la variable cualitativa, los cuales pueden encontrarse anexos en una base de datos.
- Identificadores numéricos únicos para cada una de las entidades representadas en caso de que la capa raster contenga entidades (puntos, líneas o polígonos)

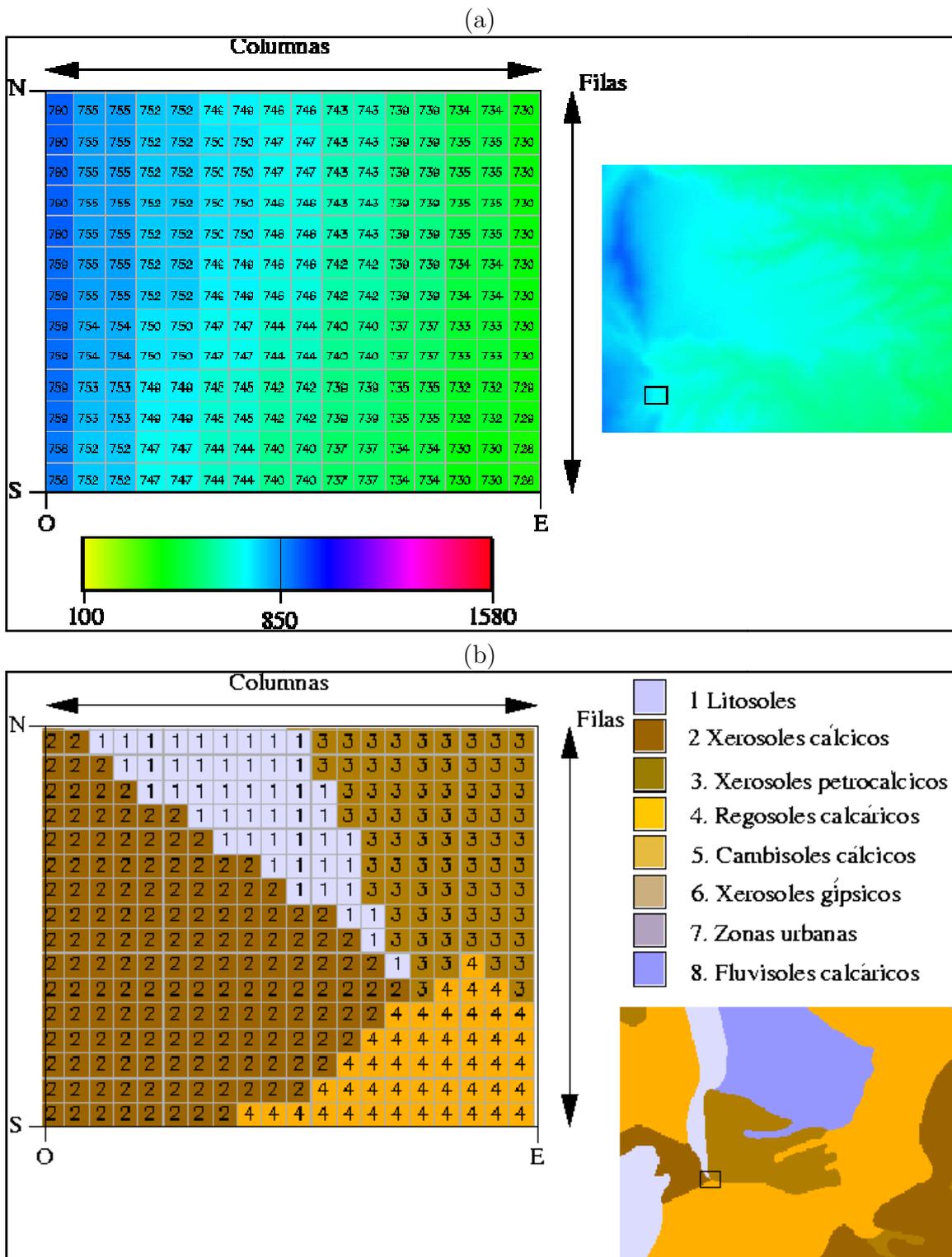


Figura 2.2.- Ejemplo de la estructura raster para representar datos continuos(a) y discretos(b) mediante la asignación de tablas de color.

La información geométrica de la estructura matricial del archivo viene anexa a los datos, ya sea en un archivo separado o integrado a los datos espaciales. Normalmente se debe contar con información de su posición en el espacio y geometría de la matriz, esto es:

- Número de filas (nf)
- Número de columnas (nc)
- Coordenadas de las esquinas de la matriz o capa raster (e, w, s, n)
- Resolución o tamaño de pixel en latitud y en longitud (r_y , r_x)

Normalmente el número de filas y columnas son constantes y el número total de elementos de matriz o pixeles (celdas) es la multiplicación entre ambos valores. Es bueno mencionar que las imágenes de satélite se ven afectadas por la curvatura de la Tierra, efecto que hay que corregir y que veremos en otro capítulo.

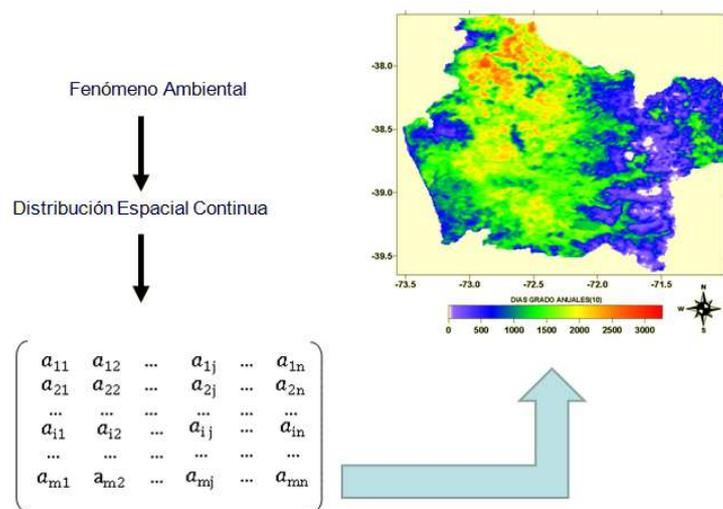
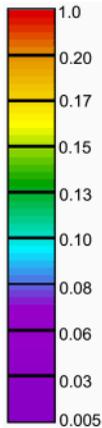


Figura 2.4.- La estructura matricial o raster presenta ventajas comparativas al momento de representar o modelar variables ambientales continuas.



Adicionalmente, y para que se pueda desplegar una capa raster en la pantalla del computador es necesaria una tabla de colores (Paleta de colores), que relaciona los valores de pixel y el color a representar o que se pintará cada celdilla en la pantalla (Ver figura adjunta). En caso de que la variable sea cualitativa, la tabla de asignación de color que haga corresponder a cada identificador numérico una etiqueta de texto descriptiva. A modo de ejemplo, la figura 2.2 muestra la estructura raster para representar datos continuos(a) y discretos(b) mediante la asignación de tablas de color.

Fortalezas y debilidades del modelo raster

Fortalezas

1. Es una estructura de datos simple.
2. Las operaciones de superposición de mapas se implementan de forma más rápida y eficiente.
3. Cuando la variación espacial de los datos es muy alta el formato raster es una forma más eficiente de representación.
4. El formato raster es requerido para un eficiente tratamiento y realce de las imágenes digitales.

Debilidades

1. La estructura de datos raster es menos compacta. Las técnicas de compresión de datos pueden superar frecuentemente este problema.
2. Ciertas relaciones topológicas son más difíciles de representar.
3. La salida de gráficos resulta menos estética, ya que los límites entre zonas tienden a presentar la apariencia de bloques en comparación con las líneas suavizadas de los mapas dibujados a mano. Esto puede solucionarse utilizando un número muy elevado de celdas más pequeñas, pero entonces pueden resultar ficheros inaceptablemente grandes.

El Formato Vectorial

Al contrario de lo que ocurre con el formato raster, el formato vectorial define objetos geométricos (puntos, líneas y polígonos) mediante la codificación explícita de sus coordenadas. Los puntos se codifican en formato vectorial por un par de coordenadas en el espacio, las líneas como una sucesión de puntos conectados y los polígonos como líneas cerradas (formato orientado a objetos) o como un conjunto de líneas que constituyen las diferentes fronteras del polígono (formato Arco/nodo).

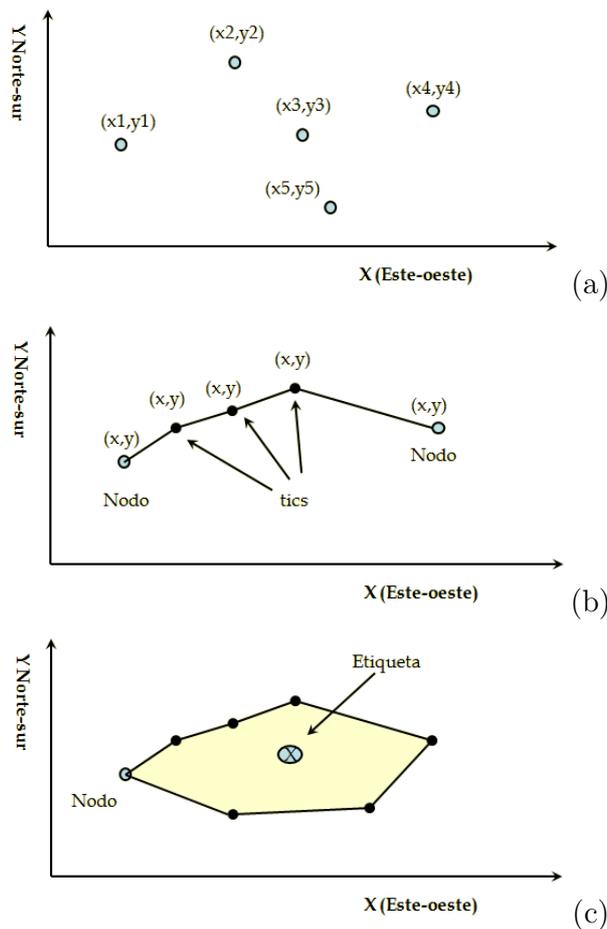


Figura 2.5.- Ejemplo de la representación vectorial para puntos (a), líneas(b) y polígonos(c).

Este formato resulta especialmente adecuado para la representación de entidades reales ubicadas en el espacio (carreteras, ríos, parcelas de cultivo). También resulta más adecuado que el raster cuando se manejan datos que suponen un valor

promediado sobre una extensión de territorio que se considera homogénea, los límites de la misma pueden ser arbitrarios o no (por ejemplo estadísticas municipales, profundidad de acuíferos, etc.).

El modelo vectorial Conceptualiza el espacio como una colección de objetos discretos, los cuales pueden ser representados espacialmente por entidades cartográficas (puntos, líneas o polígonos) y descritos por un conjunto de propiedades (atributos). En el formato vectorial, además de codificar la posición de las entidades, necesitamos establecer las relaciones topológicas entre las mismas, especialmente en lo que se refiere a los mapas de polígonos.

El término topología hace referencia, en el contexto de los SIG vectoriales, a relaciones entre los diferentes objetos para originar entidades de orden superior.

- Los nodos de dos líneas en contacto deben tener las mismas coordenadas.
- Un polígono se define, en el modelo arco-nodo, 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 entidad y este es único, no se repite en ninguna otra entidad.
- Se dispone de algún modo de codificar los polígonos isla. Se trata de los polígonos completamente rodeados por otro polígono debiéndose informar al polígono contenedor de la existencia del polígono isla para tenerlo en cuenta al calcular su área.

Una base de datos cartográfica digital habitualmente está conformada por varios mapas temáticos de una misma área geográfica. Dependiendo de su naturaleza y de la escala de trabajo, los objetos geográficos podrán ser representados por puntos líneas o polígonos en la cartografía. Cada tipo de entidad se representa en una mapa distinto o capa específica (Layer). Ejemplo de una representación de puntos, líneas y polígonos es mostrada en la figura 2.5.

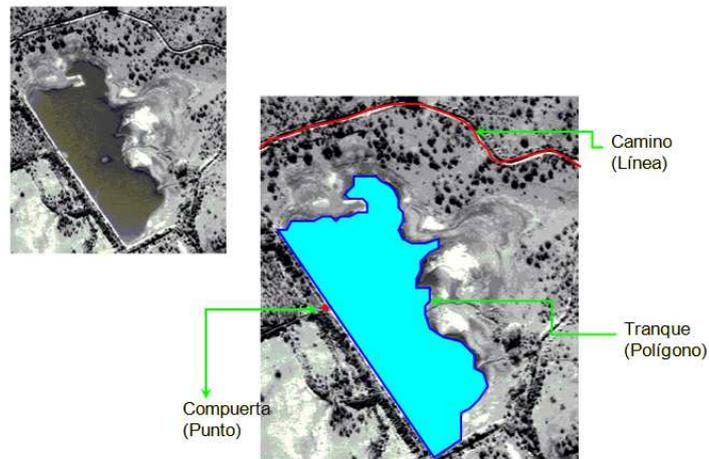
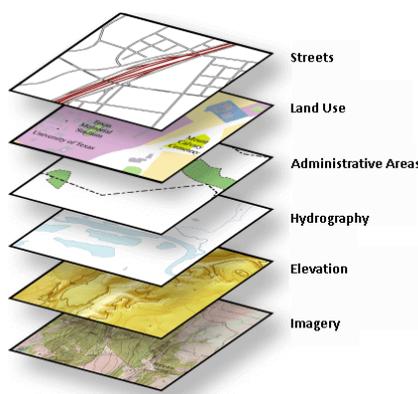


Figura 2.6.- Ejemplo de modelación vectorial para el caso de un tranque en una localidad específica.

La figura anterior muestra un ejemplo de aplicación del modelo vectorial para representar cartográficamente un objeto geográfico. En la parte superior derecha se observa una imagen satelital de un área cualquiera, resaltando una zona dedicada a almacenar agua por medio de un tranque. Los elementos geográficos relevantes que ahí aparecen son digitalizados, como son el caso de los límites del tranque y un camino que pasa por su entorno. En el caso del tranque este es representado por un polígono, el camino representado por una línea y la ubicación de la compuerta para liberar el agua por un punto. Adicionalmente podrían haber otras estructuras que también, previo a un análisis, deben ser representadas por puntos, líneas y polígonos.



En un SIG las capas temáticas son representaciones lógicas y en entidades separadas. Cada entidad corresponde a una capa de información, con sus formas y ubicaciones geográficas, además de información descriptiva sobre cada entidad o atributos los cuales se encuentran asociados por medio de una base de datos. La figura adjunta muestra un ejemplo de este concepto.

La organización de la información espacial en capas geográficas se ha masificado y ahora es el método más empleado en los SIG para el manejo lógico de la información,

de tal forma que este arreglo constituye la base de cómo los SIG representan, utilizan, administran y aplican la información geográfica.

Asociada a la componente gráfica o espacial, se encuentra una componente no espacial. Se trata de tablas o bases de datos que representan los distintos atributos asociados al elemento geográfico representado en la cartografía, esto es cada entidad presente en el mapa tiene asociado un registro en una tabla (Figura 28). La tabla asociada puede tener datos de distinta naturaleza, como números, textos o fechas, entre algunos, como se muestra en la tabla siguiente.

Numérico	245 3.16879 12.34E(+5)
Caracteres (String)	"nombres" "45" "#\$%&?¿"
Booleano	"Falso" "Verdadero"
Fecha	12/07/2010 07-12-2010

Los valores numéricos en una base de datos pueden ser

Byte : para enteros comprendidos entre 0 y 255. El requisito de almacenamiento es 1 byte.

Entero : para enteros comprendidos entre -32.768 y 32.767. El requisito de almacenamiento es 2 bytes.

Entero largo : para enteros comprendidos entre -2.147.483.648 y 2.147.483.647. El requisito de almacenamiento es 4 bytes.

Simple : para valores numéricos de punto flotante comprendidos entre $-3,4 \times 10^38$ y $3,4 \times 10^38$ de hasta siete dígitos significativos. El requisito de almacenamiento es 4 bytes.

Doble : para valores numéricos de punto flotante comprendidos entre $-1,797 \times 10^308$ y $1,797 \times 10^308$ de hasta quince dígitos significativos. El requisito de almacenamiento es 8 bytes.

Id. de réplica : para almacenar un identificador único global necesario para la réplica. El requisito de almacenamiento es 16 bytes. Observe que la réplica no se admite con el formato de archivo .acddb.

Decimal : para valores numéricos comprendidos entre $-9,999... \times 10^27$ u $9,999... \times 10^27$. El requisito de almacenamiento es 12 bytes.

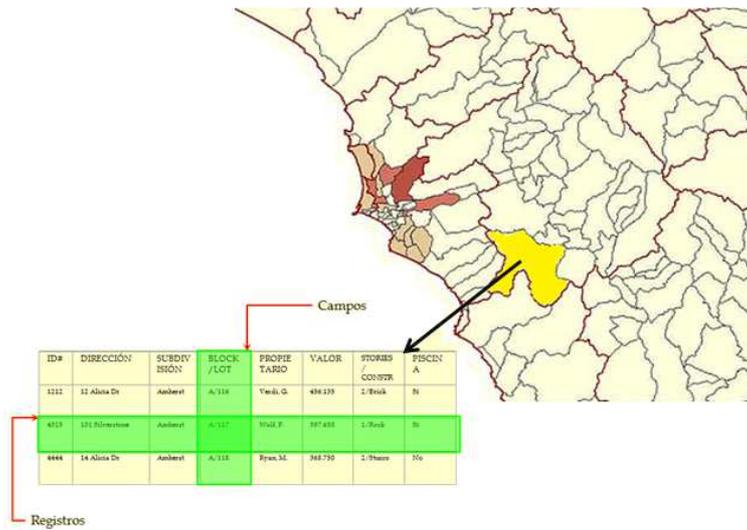


Figura 28.- Asociada a los elementos gráficos presentes en la cartografía se encuentra una base de datos que contiene los atributos de cada elemento.

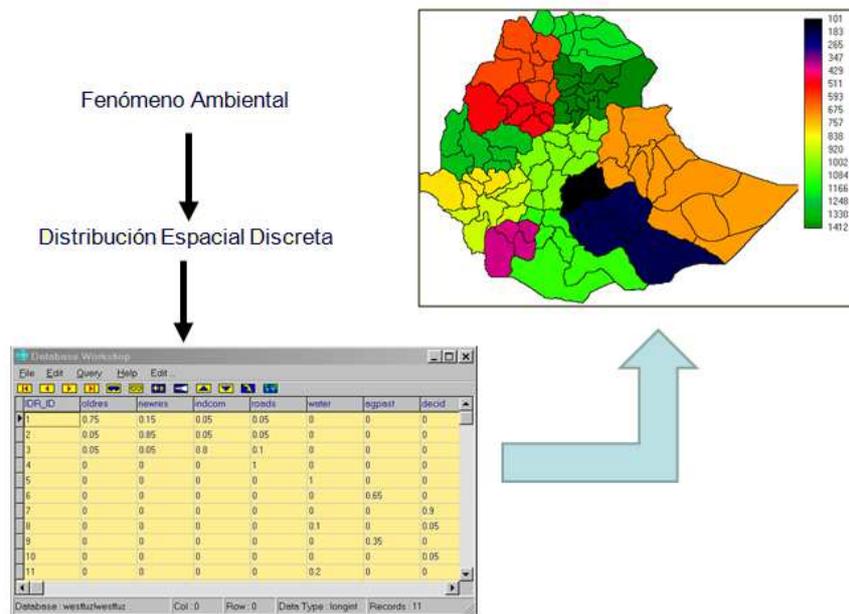


Figura 2.9.- La estructura vectorial presenta ventajas comparativas al momento de representar o modelar variables ambientales discretas.

La base de datos asociada al archivo vectorial se encuentra regida por los modelos de bases de datos relacionales. Además se cuenta con un sistema de enlace de información contenida en tablas separadas que permite facilitar la búsqueda en bases de datos complejas o muy extensas.

Fortalezas y debilidades del modelo vectorial

Fortalezas

1. Genera una estructura de datos más compacta que el modelo raster.
2. Genera una codificación eficiente de la topología y, consecuentemente, una implementación más eficiente de las operaciones que requieren información topológica, como el análisis de redes.
3. El modelo vectorial es más adecuado para generar salidas gráficas que se aproximan mucho a los mapas dibujados a mano.

Debilidades

1. Es una estructura de datos más compleja que el modelo raster.
2. Las operaciones de superposición de mapas son más difíciles de implementar.
3. Resulta poco eficiente cuando la variación espacial de los datos es muy alta.
4. El tratamiento y realce de las imágenes digitales no puede ser realizado de manera eficiente en el formato vectorial.

Sistema de Gestión de Base de Datos (SGBD)

Un SGBD permite el almacenamiento, manipulación y consulta de datos pertenecientes a una base de datos organizada en uno o varios ficheros. En el modelo más extendido (base de datos relacional) la base de datos consiste, de cara al usuario, en un conjunto de tablas entre las que se establecen relaciones. A pesar de sus semejanzas (ambos manejan conjuntos de tablas) existen una serie de diferencias fundamentales entre un SGBD y un programa de hoja de cálculo.

El método de almacenamiento y el programa que gestiona los datos (servidor) son independientes del programa desde el que se lanzan las consultas (cliente). En lugar de primarse la visualización de toda la información, el objetivo fundamental es

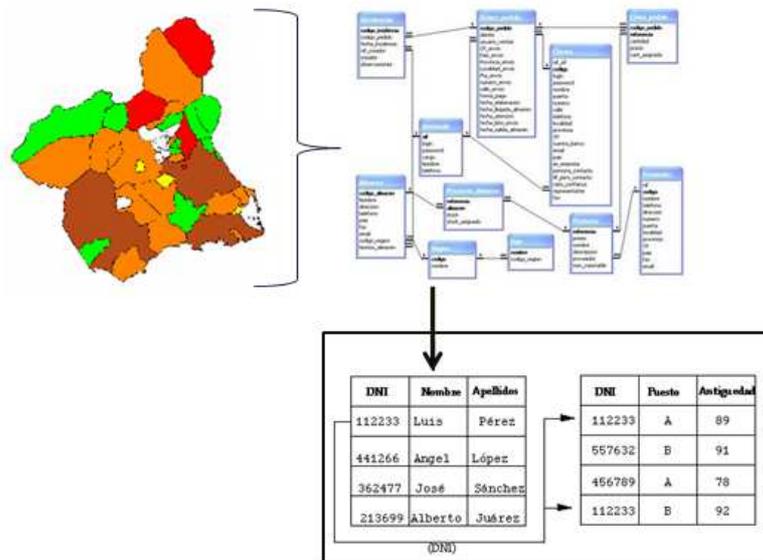


Figura 2.11.- Ejemplo de la asociación elementos gráficos y una base de datos relacional.

Bases de datos objeto-relacionales

La idea es mantener el esquema de tablas entre las que se establecen relaciones pero permitiendo como atributos tipos más complejos, denominados tipos abstractos de datos (ADT) que admiten objetos geométricos. Deben poder definirse nuevos tipos de datos que permitan almacenar la geometría (puntos, líneas, polígonos, etc.).

Las funciones y operadores ya existentes se adaptan a estos datos espaciales y se opera con un lenguaje apropiado. El lenguaje SQL se extiende para manipular datos espaciales, incluyendo funciones como distancia, cruce de líneas, punto en polígono, etc., que se vieron el tema dedicado al formato vectorial. En el nivel físico, es decir en el modelo y archivo digital, se realizan cambios profundos.

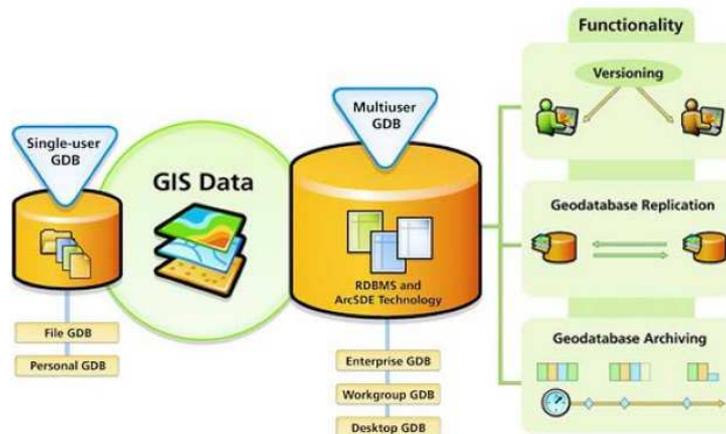


Figura 2.12.- Diagrama conceptual de una geodatabase.

Concepto de Geodatabase

El concepto de Geodatabase es uno de los conceptos que han experimentado en los últimos años una mayor expansión en el mundo de los SIG. Se trata simplemente de una base de datos que almacena toda la información relativa a un conjunto de entidades espaciales (geometría, topología, identificadores, datos temáticos, etc.). Posibilidad de usar SQL, una versión ampliada de SQL en realidad, para hacer consultas y análisis sobre mapas vectoriales. Mayor integración, en una sola herramienta, de todas las funciones para trabajar con información vectorial. En términos simples, se trata de un lugar o contenedor de los datos espaciales y sus atributos. El concepto de Geodatabase hace referencia al hecho de que todos los datos SIG (Archivos gráficos y bases de datos) son almacenados en una ubicación específica para un fácil acceso, manejo y administración de ellos (Ver Figura 2.12).

"El modelo de almacenamiento de la geodatabase está basado en una serie de simple aunque esencial de conceptos de bases de datos relacionales y aprovecha los puntos fuertes del sistema de administración de base de datos (DBMS) subyacente. Las tablas simples y los tipos de atributos bien definidos se utilizan para almacenar los datos de esquema, regla, base y atributos espaciales de cada dataset geográfico. Este enfoque proporciona un modelo formal para el almacenamiento y trabajo con los datos. A través de este enfoque, el lenguaje estructurado de consultas (SQL), una serie de funciones relacionales y operadores, se puede utilizar para crear, modificar y consultar tablas y sus elementos de datos"(ESRI).

Es posible comentar varias ventajas y desventajas de la utilización de una Geodatabase. Entre las ventajas podemos mencionar:

a) Gestión de Datos Centralizada: Debido a que todos los datos de una Geodatabase son almacenados directamente en sistemas gestores de bases de datos, todo lo desarrollado en un proyecto es almacenado en un repositorio común, único y centralizado. Esta característica facilita notablemente la administración de los datos y todos los procesos.

b) Edición multiusuario: El método de geodatabase permite la edición multiusuario y el seguimiento de cambios en los datos, lo que significa que los usuarios pueden acceder a los mismos datos simultáneamente.

c) Implementación de comportamiento: Permite trabajar con elementos más intuitivos, lo que implica que los usuarios pueden aplicar sofisticadas reglas y relaciones entre los datos, lo que conlleva a más eficiencia en el ingreso y la edición de los datos. La orientación a objetos se maneja adecuadamente definiendo los dominios de los campos, valores por defecto, rangos de validación, implementación y reglas.

d) Modelado de relaciones espaciales complejas: La Geodatabase incorpora tipos de datos geográficos distintos, lo que genera una maximización de su potencial de uso en cuanto a las herramientas del SIG.

e) Integración a otros sistemas informáticos: El método permite la integración de los datos con otros sistemas informáticos.

La principal desventaja de una Geodatabase es el manejo de multiusuario que es un problema complejo, en cuanto a sus posibilidades o permisos y las necesidades de los mismos.

2.1.- Análisis vectorial en SIG

Los actuales sistemas de información geográficas poseen una capacidad analítica que se ha venido incrementando a medida de que mejoran los computadores y los métodos y técnicas numéricas. Actualmente se pueden realizar procesos estadísticos complejos, pero además análisis espacial complejo donde los algoritmos operan

indistintamente con las base de datos gráfica y relacional. En análisis espacial, sin embargo, es un concepto muy amplio y engloba un conjunto de técnicas y métodos complejos. Su dominio va del simple análisis descriptivo de los datos hasta los más complejos análisis numéricos que nos podamos imaginar. Este parte del capítulo tratara de develar algunos de los análisis más útiles y presentar los inicios del análisis espacial de datos vectoriales.

2.1.1.- Consultas y búsqueda espacial y temática

Todos los SIGs poseen herramientas de búsqueda, despliegue y consulta de datos geográficos y ArcGis no es la excepción. En efecto, ArcGis 9.3 posee una serie de aplicaciones (software específico) agrupadas en módulos específicos(conjunto integrado de aplicaciones) que le confieren su particularidad. El programa ArcGis Desktop está configurado como un sistema avanzado de aplicaciones y como una estructura modular, visión de ESRI para un SIG. Los módulos son: ArcView, ArcEditor y ArcInfo. ArcGis se encuentra organizado en tres productos esenciales: ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, los cuales los revisaremos a continuación.



ArcMap: Es el componente primario de este sistema modular y es la aplicación de entrada. El objetivo de este módulo es el despliegue de información, gestión de información como efectuar consultas, crear mapas de alta calidad gráfica, desarrollo de aplicaciones y todo tipo de operaciones matemáticas y geométricas sobre los datos.



ArcCatalog: Esta aplicación proporciona herramientas para organizar y administrar varios tipos de información geográfica de ArcGIS Desktop. Entre los tipos de información que se pueden organizar y administrar están: geodatabases, archivos ráster, mapas, geoprocamiento, modelos y comandos Python, entre algunos. Este módulo organiza los contenidos en una vista de árbol que mejoran el trabajo sobre los datos ya que permite seleccionar un elemento, ver sus propiedades y acceder a las herramientas con las que realizar operaciones específicas.

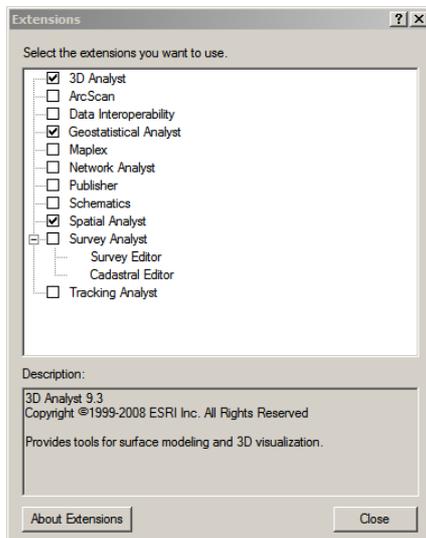


ArcToolbox: Es el módulo que posee en forma organizada las herramientas de geoprocamiento. También es posible que estas pueden manejarse también desde ArcCatalog. La ventana de ArcToolbox contiene cajas de herramientas, que a su vez contienen herramientas y juegos de

herramientas. Por lo general cada herramienta posee un menú de ayuda para facilitar el aprendizaje y la operatibilidad en la aplicación de la misma a datos geográficos.

Cuadro 1.1.- Descripción de algunas extensiones encontradas en ArcGis Desktop.

Extensión ArcGis	Descripción breve
3D Analyst	Proporciona herramientas para la visualización en tres dimensiones, análisis y la generación de superficies. También proporciona herramientas para el modelado tridimensional y análisis, como análisis de cuenca visual y la línea de visión, altura de punto de interpolación, perfiles, determinación de caminos, y el contorno.
ArcScan	Proporciona herramientas y comandos que le permiten tomar imágenes digitalizadas o escaneadas de mapas y convertirlos en capas de entidades basadas en vectores, tales como shapefiles y geodatabases.
ArcPress	Impresión avanzada de mapas.
Data Interoperability	Aplicación para el manejo de múltiples formatos de datos espaciales. (la estructura interna de un archivo que permite el uso de la computadora). Estos formatos se presentan en dos variedades: ArcGIS nativo y no nativo de ArcGIS.
Geostatistical Analyst	Extensión creada para el modelado avanzado de superficies mediante métodos deterministas y geoestadísticos. Las capas rasters generados por esta extensión pueden ser utilizados posteriormente utilizando otras extensiones de ArcGIS como ArcGIS Spatial Analyst y ArcGIS 3D Analyst.
Image Server	Permite administrar y procesar grandes volúmenes de datos raster y proporciona acceso a toda la empresa dentro de los SIG, CAD, imágenes y aplicaciones Web.
Maplex	Esta extensión permite controlar cómo las etiquetas se deben colocar en relación con las funciones, cómo las etiquetas pueden ser modificadas o reducidas para permitir una mayor colocación de la etiqueta cuando se restringe el espacio disponible, y cómo se resuelven los conflictos entre las etiquetas cuando el espacio disponible es limitado.
MrSID	Creación y compresión de mosaicos de imágenes.
Network Analyst	La extensión ArcGIS Network Analyst permite generar un dataset de red y realizar los análisis en un dataset de red.
ArcGIS Publisher	Esta extensión ofrece la capacidad de compartir y distribuir sus mapas y datos GIS fácilmente. Convierte ArcMap (. Mxd) y ArcGlobe (.3 dd) documentos en el formato de mapa publicado (. Pmf) se utiliza con ArcReader. Los mapas publicados de ArcMap son dos dimensiones (2D), mientras que los publicados de ArcGlobe son tres dimensiones (3D).
Schematics	Permite visualizar la red representaciones geográficas y esquemática en el mismo entorno. Esta extensión se compone de potentes herramientas que permiten generar de forma automática, visualizar y manipular la representación gráfica de la red utilizando la información de base de datos.
Spatial Analyst	Esta extensión proporciona una amplia gama de modelos espaciales y funciones de análisis. Puede crear, consultar, mapear y analizar datos raster basados en células, realizar análisis raster/vector integrado; derivar nueva información procedente de los datos existentes, información de consulta a través de múltiples capas de información, e integrar plenamente los datos raster basados en células con las fuentes de datos vectoriales tradicionales .
Survey Analyst/Survey Editor	Es una aplicación que le permite almacenar y trabajar con las mediciones topográficas de terreno. Además, Editor permite mejorar la precisión de otras capas GIS utilizando ubicaciones de los puntos definidos por las observaciones de campo.
Tracking Analyst	Es la extensión de objetos de asignación que se mueven o cambian de estado a través del tiempo. Consiste en un conjunto de herramientas para cargar, visualizar y analizar información espacio-temporal.



Por otra parte ArcGis Desktop posee una serie de extensiones para el análisis específico sobre información geográfica, sin embargo hay que poseer las licencias necesarias para poder tener acceso a ellos. Estas extensiones realizan trabajos específicos para un análisis más profundo de los datos, donde se incluye además modelamiento espacial. Entre algunas tenemos 3D Analyst, Geostatistical Analyst, Spatial Analyst, Network Analyst, Schematics, Tracking Analyst. El cuadro 1.1 muestra una lista de algunas extensiones disponibles para ArcGis Desktop. Adicionalmente han sido desarrolladas otras extensiones aún más específicas, como Solar Analyst para la estimación de la radiación solar, o ArcSwat para el modelamiento hidrológico, entre algunas. La figura adjunta muestra la ventana de activación de extensiones ubicada en Tools -> Extensions de la barra de menú de ArcMap.

2.1.2.- Edición de elementos vectoriales y atributos

La interfaz gráfica de ArcMap es bastante intuitiva y al ir a Inicio->**Programas->ArcGis->ArcMap**, o desde el icono en el escritorio en Windows, se despliega la siguiente ventana.

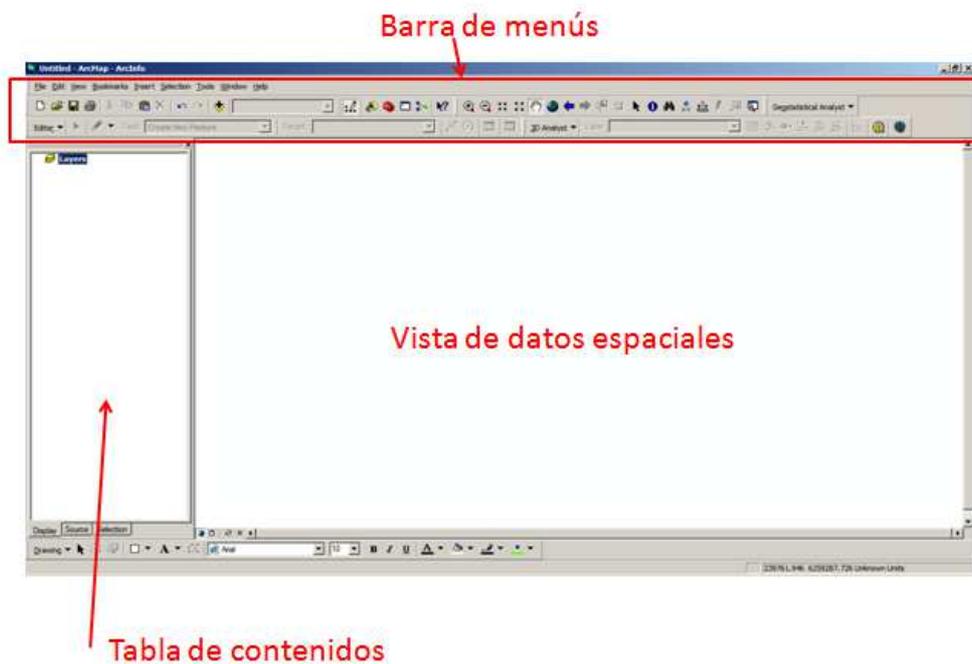


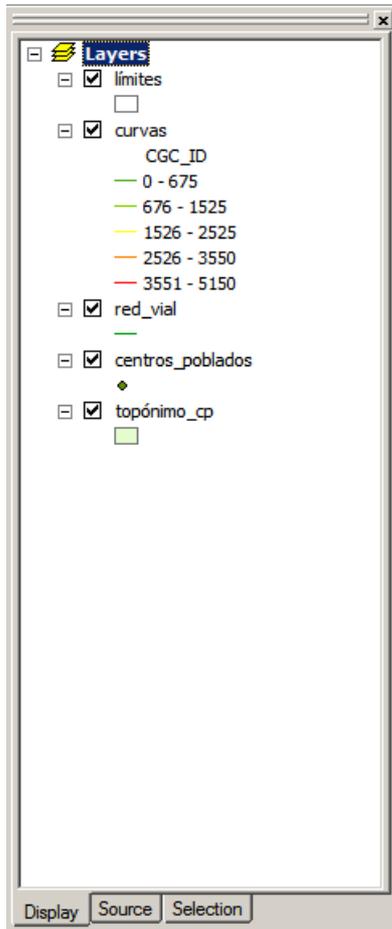
Figura 2.14.- Interfaz gráfica de ArcMap.

Si deseamos ver una cobertura o archivo shapefile, que es el formato nativo de archivos vectoriales de ArcMap, debemos usar el botón **Add** (), para quitar una cobertura se usa el botón **Remove** (), ambos se encuentran en la barra de menús.



Figura 2.15.- Ejemplo del despliegue de datos en ArcMap.

Cuando se agregan muchas coberturas la tabla de contenidos los muestra uno a uno, y si el usuario lo desea puede realizar varias opciones sobre el despliegue de los mismos.



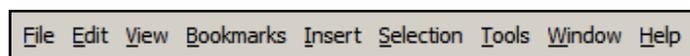
Por ello el objetivo de la **tabla de contenidos** es mostrar las coberturas activas por el usuario junto a sus respectivas leyendas. Esta barra es movable y también puede quedar estática en un lugar, que por defecto es el lado izquierdo de la ventana activa de ArcMap. Si Usted observa con cuidado la tabla de contenidos está compuesta por 3 pestañas, esto es **Display**, que se muestra por defecto, **Source** y **Selection**.

La pestaña **Display** muestra todas las coberturas con las cuales el usuario está trabajando, donde el orden de aparición es por defecto por el orden de adición, sin embargo es posible después darle el orden necesitado. Con el botón derecho sobre cada cobertura se despliega un menú de coberturas, que veremos más adelante.

La pestaña **Source** muestra las coberturas asociadas con su carpeta contenedora. Además muestra los archivos de datos no espaciales como las tablas.

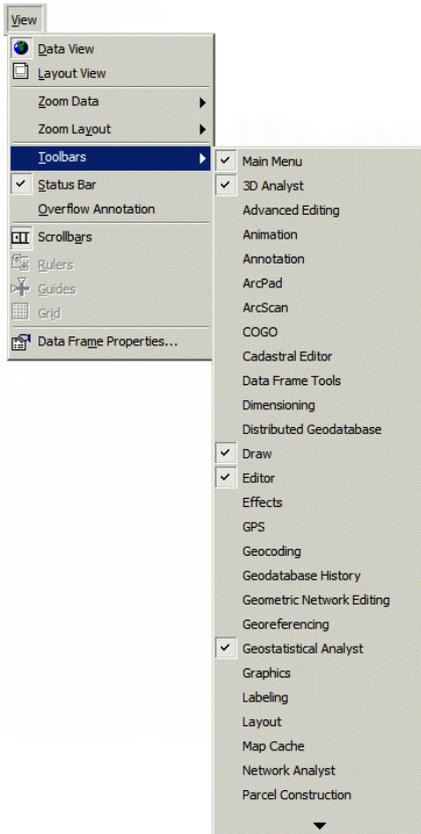
La pestaña **Selection** muestra en una forma distinta el listado de datos seleccionados o coberturas.

ArcMap posee una barra de Menús llamada "main menu" donde se encuentran todas las opciones y funciones del programa.



Bajo este menú se encuentra una barra de opciones básicas, donde a partir de iconos se puede acceder a algunas funciones. Por defecto la barra estándar es la siguiente





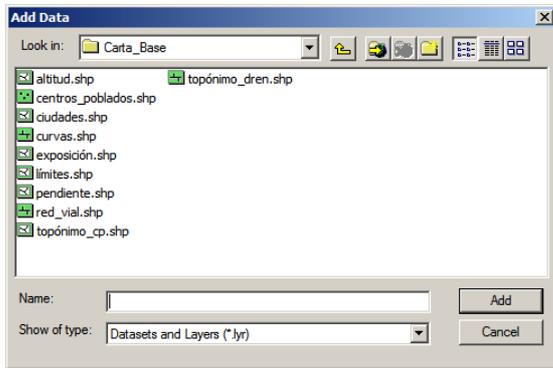
Es posible ir agregando barras de herramientas al menú del programa por medio de **View-> Toolbars** en la barra principal, según lo muestra la figura de la izquierda. Hay que tener en cuenta que varias de ellas necesitan tener activas algunas extensiones para poder ser adicionadas en la barra de menús activa.

Una de las barras más activada por los usuarios es **Tools**, mostrada a continuación.



Dentro de las opciones de esta barra encontramos

	Zoom In y Out centrado en un sector específico.
	Zoom In y Out centrado en la vista actual.
	Movimiento del mapa hasta una zona determinada(Pan).
	Muestra toda la extensión de las coberturas activas o Full Extent.
	Zoom anterior o posterior (Prev - Next)
	Selecciona y deselecciona elementos espaciales (Select Features)
	Selección de elementos (Select Elements)
	Información de un elemento contenido en la tabla de datos asociada(Identify).
	Búsqueda de datos en la tabla (Find).
	Permite marcar un punto alguna coordenada (Go to XY).
	Permite conocer distancia y area mediante la digitalización en pantalla(Measure).
	Permite ejecución de hperlink.



Si adicionamos diferentes coberturas con Add () y buscamos las opciones adecuadas en la tabla de contenidos, estas se aplican en la ventana de vista de datos especiales. La figura adjunta muestra la ventana que se despliega al momento de hacer un click en Add. A partir de esa ventana se buscan los archivos que se utilizarán en las carpetas de su disco duro.

La tabla de contenidos y la vista de datos espaciales se verá como lo muestra la figura siguiente.

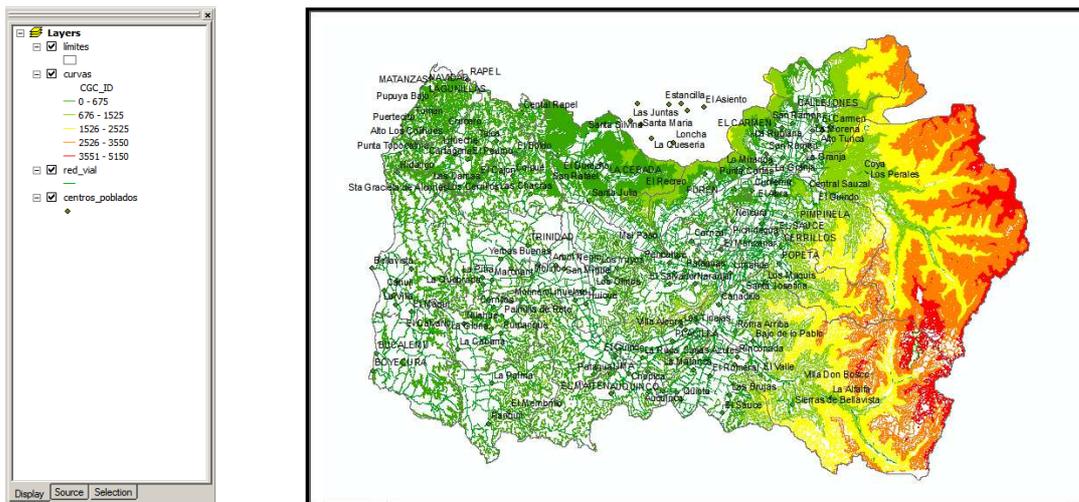
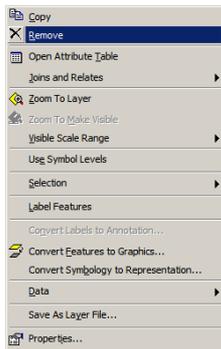
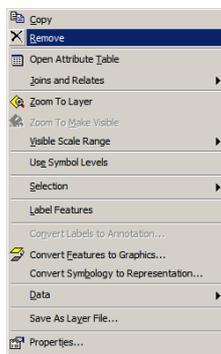


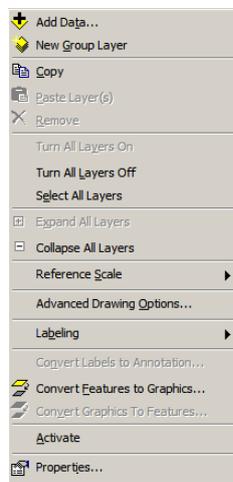
Figura 2.16.- Despliegue de datos geográficos en ArcMap.



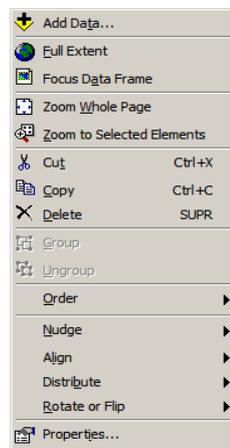
Normalmente al cargar una cobertura ArcMap selecciona en forma aleatoria los colores con los que se van a desplegar los elementos espaciales. Con el botón derecho del mouse uno accede a un menú de las coberturas, donde se puede remover (**Remove**) el archivo solo desde la vista de datos o consultar la tabla de atributos (**Attribute Table**). Estos menús contextuales son un submenú de las aplicaciones asociadas y depende de donde se realiza el click con el botón derecho del mouse, esto en la tabla de contenidos o la vista de datos (Figura 2.17).



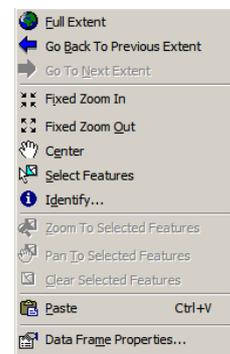
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.17.- Submenús de Coberturas(a), Layers(b), Layout(c) y Data View(d).

Para modificar los colores de los elementos desplegados en la Vista de Datos, debe realizarse un click sobre el nombre de la cobertura o sobre la leyenda de la misma.

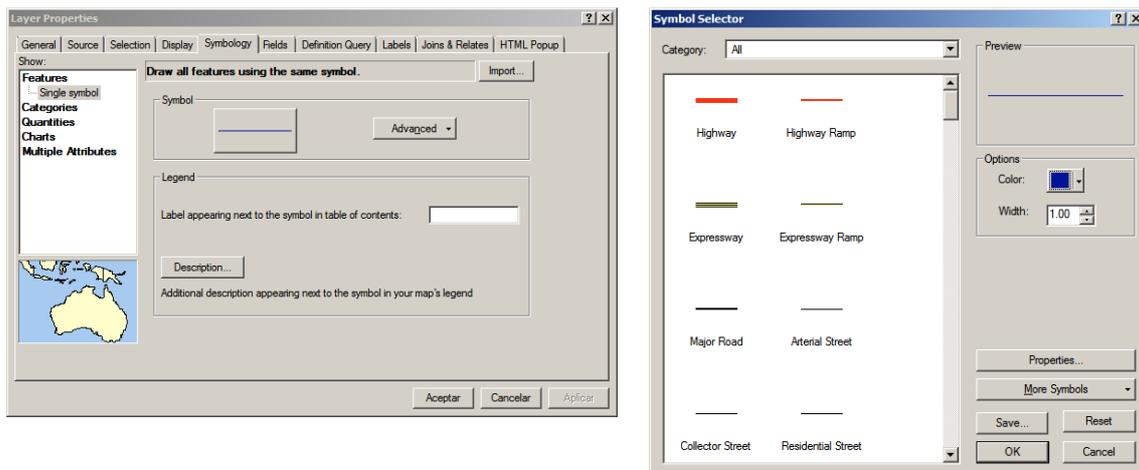


Figura 2.18.- Ventanas de los menús **Layer Properties** y **Symbol Selector**.

El menú **Layer Properties** tiene las siguientes funciones asociadas para el cambio del despliegue de la información

General: Define la forma como se muestra el mapa mediante el uso de escalas.

Source: Define la referencia física del archivo.

Selection: Cambia la forma de mostrar los datos seleccionados en la Vista de Datos.

Symbology: Herramienta para seleccionar los símbolos y colores para el despliegue de los datos. Escoger cuales campos o atributos se desean mostrar, cambiar el modo de visualizar los datos para cada campo numérico.

Labels: Definir la forma de mostrar las etiquetas(Labels) de la cobertura

Definition Query: Selección de los datos a visualizar.

Joins&Relates: Definir cuales tablas o datos se pueden relacionar a una cobertura particular.

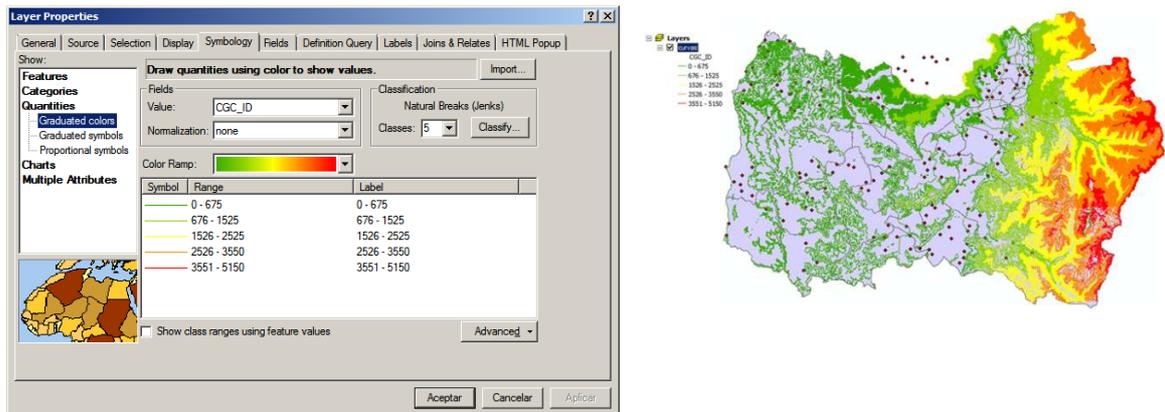


Figura 2.19.- Ejemplo de la aplicación del menú **Layer Properties** para cambiar la visualización en la **Vista de Datos** de las curvas de nivel de la Región de O'Higgins.

Magnifier: Es una herramienta que despliega una ventana de efecto lupa que permite ver con más detalles los elementos desplegados en la Vista de Datos. Esta opción se encuentra disponible en la barra de menú **Window->Magnifier**. Haciendo click con el botón derecho del mouse sobre la barra de título es posible cambiar las propiedades (Properties). La ventana se arrastra sobre la Vista de datos para cambiar la zona del despliegue a visualizar.

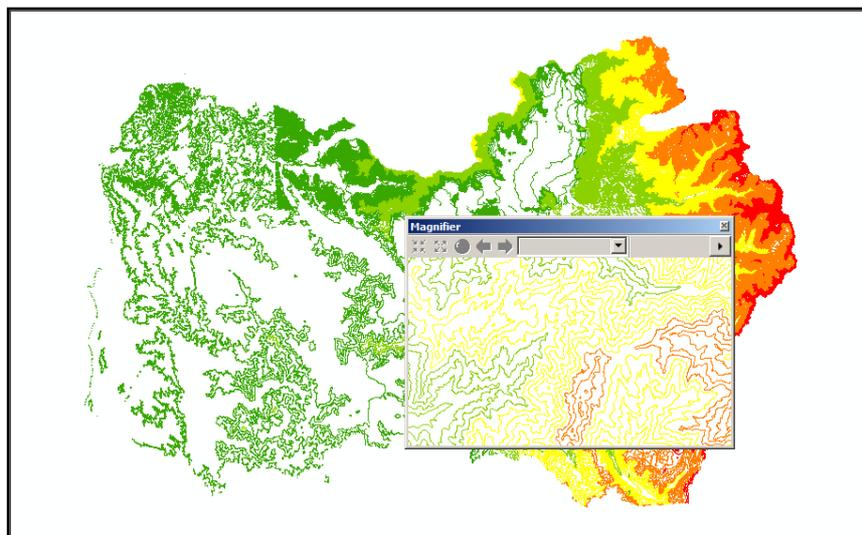


Figura 2.20.- Herramienta Magnifier que permite observar con más detalle los elementos espaciales.

Overview: La herramienta **Overview** es muy importante cuando se está trabajando con archivos muy extensos y se ha usado el **Zoom In** en muchas oportunidades y se pierde la noción de ubicación en el área geográfica de trabajo por parte del usuario. Esta herramienta muestra en una pequeña ventana la ubicación del Zoom de trabajo en una visión general del Layer, como se muestra en la figura 2.21. En la ventana **Layers Overview** se puede mover el rectángulo achurado en rojo (Drag) y se puede cambiar la zona de observación detallada. La activación de esta herramienta está en la barra de menú **Window->Overview**. Cuando se realiza Zoom es posible volver a tener toda el área que cubre la cobertura con el icono .

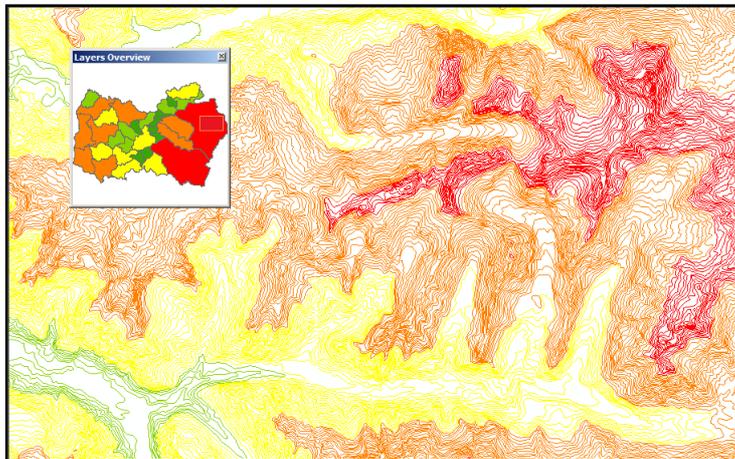
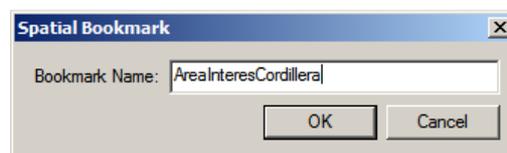


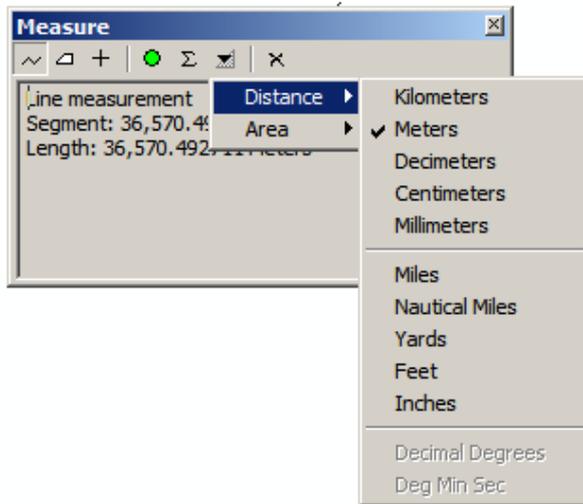
Figura 2.21.- Herramienta Overview que permite tener en una visión general de la zona donde se ha realizado el zoom en el layer.

Bookmark: Es un marcador espacial que sirve para delimitar o definir un área de interés para su uso posterior. Se accede a esta herramienta en el menú principal como **Bookmark->Create**, luego se despliega una ventana para dar un nombre apropiado al área de interés



Se recomienda haber definido el área de interés previamente y tenerla ubicada realizando el zoom en el área escogida. Para poder acceder a esta Área de Interés

posteriormente ir a **Bookmark** en el menú principal y elegir el nombre del área de interés que aparece en el nuevo menú que se desplegó.



Measure: Corresponde al botón de medición de distancias () en la barra de menús **Tools**. La opción  permite seleccionar las unidades en que serán desplegados los datos de distancia y área en la ventana de cálculo.

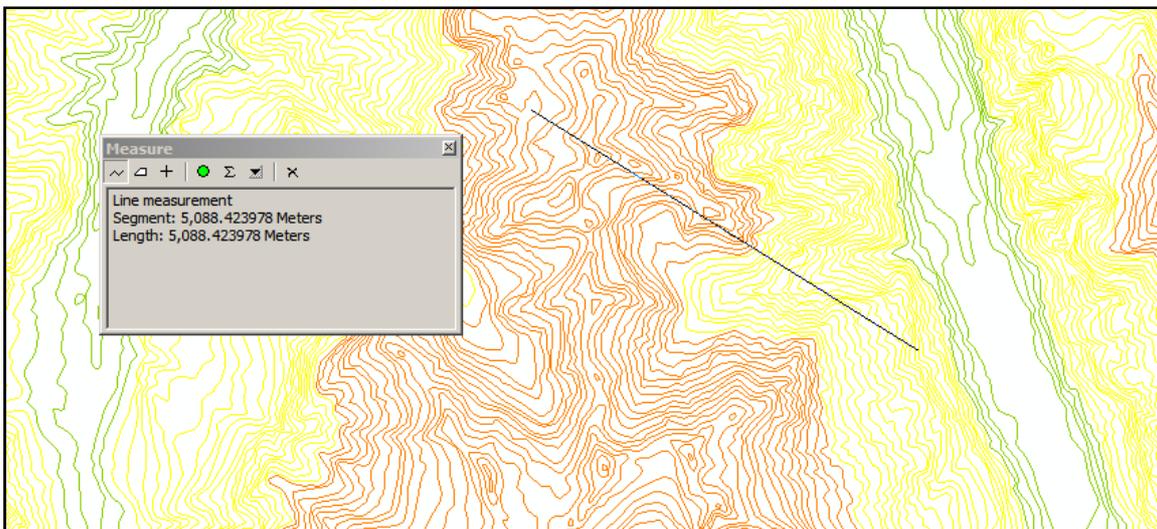


Figura 2.22.- Ventana **Measure** para medir distancia y áreas.

Identify: Es una herramienta para consulta e identificación de elementos espaciales. Por lo general muestra los atributos temáticos en una ventana con características de una tabla. Para activar el comando, se realiza un click en la barra de menú en el

botón  y después se hace un click sobre el elemento que se desea consultar en la Vista de Datos, el resultado se muestra en la figura 2.23.

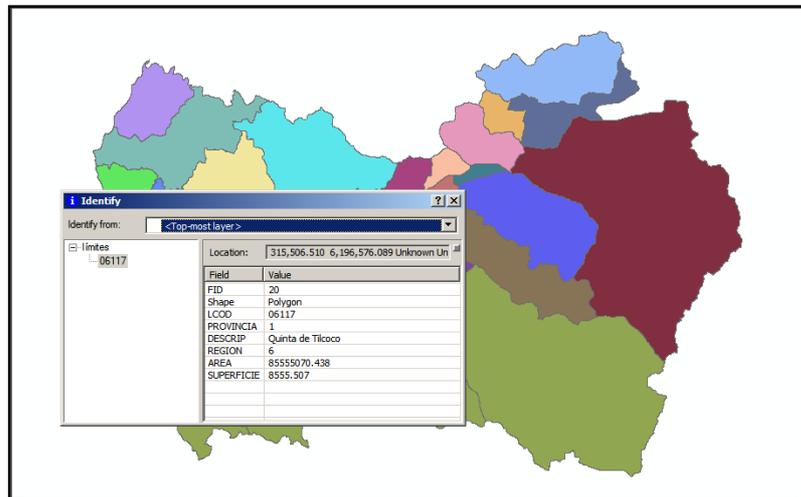


Figura 2.23.- Consulta de valor de atributo en una archivo de polígono usando la herramienta Identify.

Selección de elementos espaciales: Seleccionar y deseleccionar elementos espaciales () se realiza para realizar alguna operación. Por ejemplo borrar, mover o copiar ese elemento. Los elementos seleccionados aparecen resaltados en la Vista de Datos y en la tabla de atributos simultáneamente.

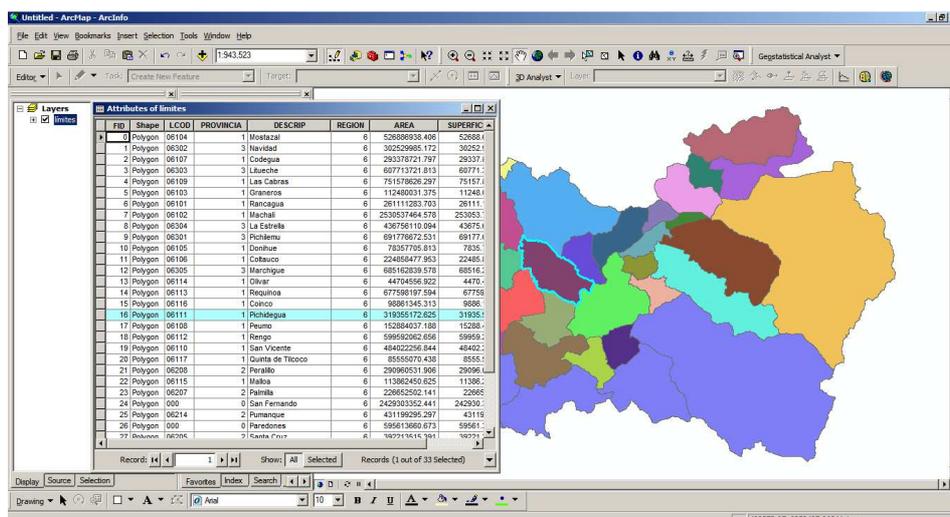


Figura 2.24.- Selección de elementos de una cobertura.

El usuario debe definir, si lo desea, cuáles de las coberturas activas del mapa son posibles de ser seleccionadas y cuáles no debe ser afectadas. Esta herramienta se encuentra en el menú **Selection->Set Selectable Layers**, donde se despliega la siguiente ventana para activar o desactivar los layers que serán seleccionables.

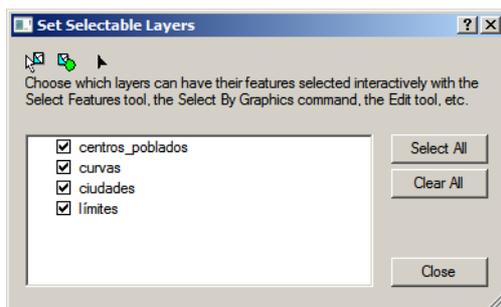
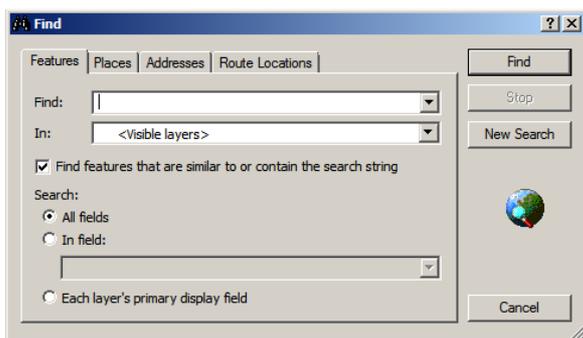


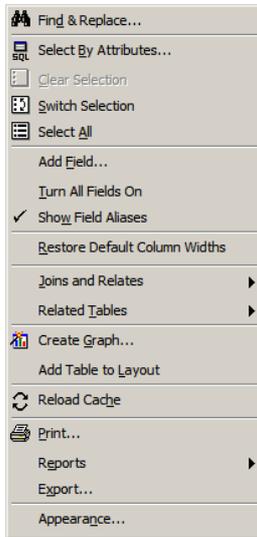
Figura 2.24.- Herramienta Set Selectable Layers.



Find features: Esta herramienta() es utilizada para encontrar elementos espaciales basado en su atributo temático.

Atributos de los Elementos Espaciales: Los elementos espaciales poseen atributos temáticos los cuales se encuentran almacenados en una tabla que se encuentra relacionada con el archivo gráfico en cada cobertura. La figura 2.25 muestra como ejemplo una tabla de datos para una región de Chile y que contiene datos de las distintas características de los suelos. Las tablas de atributos también pueden estar asociadas o relacionadas a otras tablas mediante un campo común.

Las tablas se componen de filas y columnas, donde las filas corresponden a los atributos, los cuales están asociados con la capa de información mediante un identificador. Las columnas corresponden a los campos o los distintos tipos de información descriptiva, la cual puede ser numérica, de texto(String) o de fecha (Date).



ArcMap permite la manipulación de los datos al interior de una tabla, permitiendo añadir, borrar registros, pero además crear y borrar campos. La figura de la izquierda muestra el menú de opciones (**Options**) que se activa en la barra inferior de la tabla de atributos. En ella se muestran las opciones ya mencionadas anteriormente junto a una serie de opciones nuevas con las que se puede hacer gestión de la base de datos de atributos.

También si hay una selección previa de algunos elementos, es posible solo desplegar estos valores (**Show**) en la opción **Selected** en la barra inferior de la tabla, en caso contrario usar **All**.

FID	Shape	FIRST_SIMB	SERIE	REGION	ORDEN	CLASE_TEXT	PROF	DAP	ARENA	LIMO	ARCILLA	CDC	PMP	CORG	MO
0	Polygon	A	ARDOS												
1	Polygon	ACH	ACHIBUENO	7	Inceptisol	franco	115	1.6	35.3	45.03	19.66	25.32	12.7	0.95	1.66
2	Polygon	AER	AERODROMO												
3	Polygon	AGD	AGUA DEL GATO	13-5	Mollisol	franco arcillo limo	85		8.89	24.44	16.67	17.32	13.21	0.97	1.68
4	Polygon	AGF	AGUA FRIA	9	Inceptisol	franco limoso	100	0.95	25.59	38.69	35.7	36.4	22.46	1.97	3.35
5	Polygon	AIT	AITUI	10	Andisol	franco limoso	110	0.54	90.9	3.46	5.88	48.87	40.21	7.2	12.2
6	Polygon	AJL	AJIAL	6	Inceptisol	franco arcillo aren	105		47.89	31.2	20.91	19.67	11.86	1	1.69
7	Polygon	ALC	ALERCE	10	Andisol	franco	86	0.55	76.93	21.21	1.86	45.88	31.52	5.55	9.44
8	Polygon	ALH	ALMAHUE	6	Vertisol	arcilloso	120		32.92	54.69	0	39.33	27.8	1.15	1.98
9	Polygon	ALT	ASOCIACION ALTO COLORADO	7-8	Alfisol	franco arcillo aren	95		22.61	7.62	19.68			0.22	0.37
10	Polygon	ANL	ANLEHUE	9-8	Mollisol	franco limoso	140		17.64	27.35	5.01	14.76	7.13	0.53	0.91
11	Polygon	ANT	ANTUCO	8	Andisol	franco arenoso	75	1.57	91.05	8.31	0.64	7.82	3.64	0.84	1.42
12	Polygon	ANV	ANTIVERO	6	Mollisol	franco arenoso muy	100		49.07	34.3	16.63	21.36	11.49	0.91	1.79
13	Polygon	AP	TERRAZAS ALUVIALES RIO ALLPEN												
14	Polygon	ARC	ARAUCAÑO	9	Ultisol	franco arcilloso	110	1.03	14.24	21.92	63.83	28.71	20.33	1.19	2.03
15	Polygon	ARN	ARENALES	8	Entisol	arenoso	150	1.57	98.79	1.21	0	3.85	2.4	0.22	0.38
16	Polygon	ART	ARTIFICIO	5	Mollisol	arcillo limoso	95		14.08	47.91	38.01	32.78	20.64	1.91	3.29
17	Polygon	ATL	ANTHUALA	8	Ultisol	franco arcillo limo	140	0.97	17.82	26.02	55.94	38.22	28.88	0.78	1.33
18	Polygon	ATN	ALANTARA	6	Inceptisol	franco arcillo limo	130		9.36	44.12	46.52	40.28	25.29	1.44	2.46
19	Polygon	ATO	CORTE ALTO	10	Andisol	franco arcillo limo	194	0.82	56.17	30.91	12.92	56.41	26.64	1.32	2.24
20	Polygon	AYN	ARRAYAN	8	Andisol	franco limoso	140	0.9	10.88	75.02	15.35	60.27	36.47	4.27	7.31
21	Polygon	AYT	AYTUE	7-6	Alfisol	franco limoso	110		10.18	22.89	16.93	15.3	11.86	0.63	1.09
22	Polygon	BAA	BARROS ARANA	9	Andisol	franco limoso	40	0.74	28.04	47.76	24.16	65.5	36.28	6.13	10.4

Figura 2.25.- Tabla que contiene los atributos temáticos de los elementos espaciales.

Los formatos de tablas que puede manejar ArcMap son

- **Geodatabase:** Personal, por medio de MSAccess, o Compartida por medio de Oracle, MS SQL, y otras RDMNS.
- **Coverage:** Es el formato nativo para guardar información tabular para coberturas ArcInfo(Info).

- **Shapefile:** Formato Dbf, que es un formato antiguo DBase y es utilizado en los archivos tipo Shapefile para guardar los atributos de los elementos geograficos.

El software ArcGis puede además asociar tablas con otros formatos diferentes y también realizar transformaciones entre distintos formatos, pero limitado. Las bases de datos deben ser eficientes y fáciles de manejar por los usuarios. Generalmente esta es diseñada con anticipación a la entrada de datos en la misma. Se recomienda escoger el tipo de datos adecuado para representar a los elementos geográficos, eliminándose todo dato repetido en la tabla.

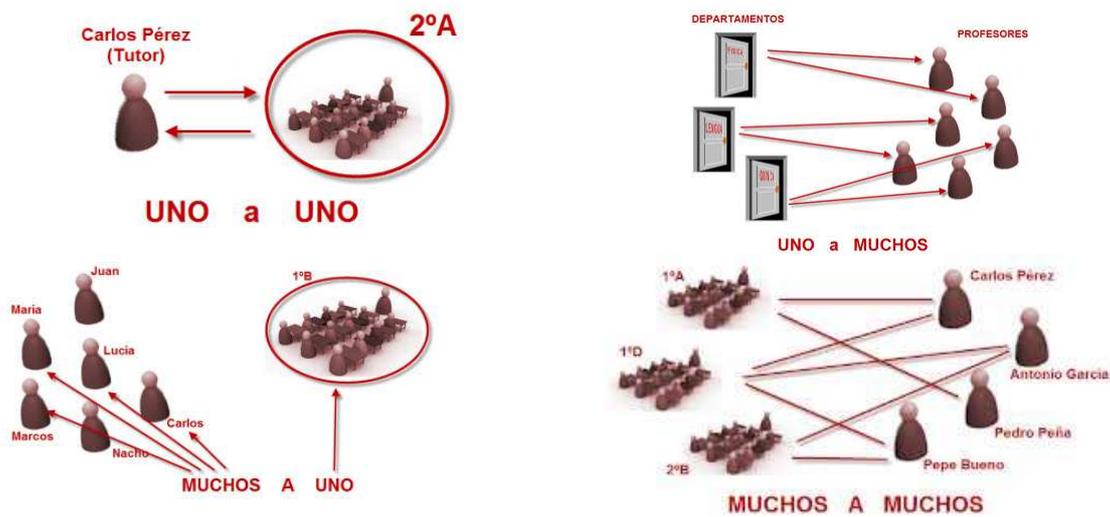


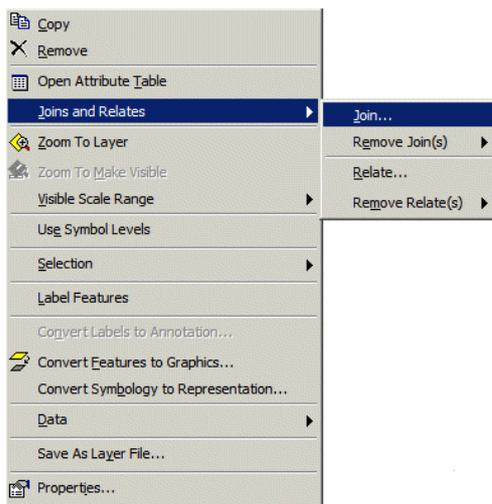
Figura 2.26.- Ejemplo del manejo de tablas en bases de datos.

La base de datos creada puede ser relacional (RDBMS), esto es se encuentra relacionada con otras tablas de forma lógica(cardinalidad). Las relaciones pueden ser del tipo

- Relación uno a uno: Es el tipo de relación más común y que más eficientemente maneja ArcMap. En este caso, el tipo de relación ocurre cuando un registro en la tabla le corresponde un único registro en otra tabla.

- Relación uno a muchos y viceversa: Este es uno de los casos más frecuentes, pero no es manejado con facilidad por ArcMap. En este caso, el tipo de relación ocurre cuando un registro en una tabla le corresponden dos o más registros asociados en otra(s) tabla(s).
- Relación muchos a muchos: No es una estructura muy común y por lo general es las relaciones entre los registros son complejas.

Las tablas se asocian entre ellas utilizando campos especiales con valores únicos en la tabla que comúnmente se llama tabla principal. Estos campos son usualmente llamados **primary key** (para la tabla principal) y **foreign key** (para las tablas asociadas). En ArcMap existen herramientas para manejar las tablas, como unir tablas y asociación de ellas.



Join: Es usado para conectar físicamente dos tablas. Puede unir tablas con cardinalidad 1 a 1 o muchos a 1. Los campos tienen que ser del mismo tipo de datos.

Relate: Permite definir relaciones entre tablas en cuya cardinalidad es uno a muchos o muchos a muchos. Las tablas se mantienen independientes, esto es, las tablas no quedan unidas físicamente.

ArcMap posee una herramienta muy interesante, esta consiste en la confección de graficoa partir de la información contenida en los campos de las tablas. Esta aplicación que se encuentra en el menú **Options** de la barra inferior de la tabla de atributos con el nombre **Create Graph**. En las opciones del tipo de gráfico permite realizar de barras, de líneas, de area, de torta (Pie), Box plot y diagramas de dispersión (scatter plot). La figura 2.27 muestra un ejemplo de la aplicación de la herramienta Create Graph para realizar un grafico de barras.

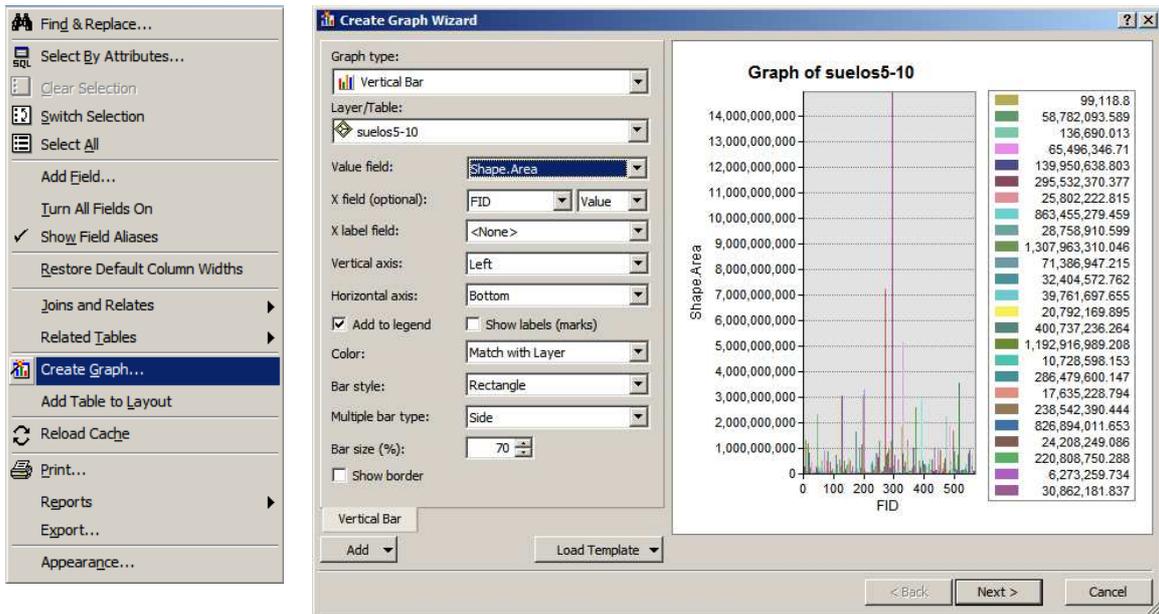


Figura 2.27.- La herramienta Create Graph dentro del menú Options de la tabla de atributos permite realizar grafico.

Para añadir un campo se debe ir al menú Options ubicado en la barra inferior de la tabla de atributos y seleccionar **Add Field**, según se muestra en la figura siguiente. Parra borrar el campo basta realizar un click con el botón derecho de mouse y aparece un pequeño menú donde está la opción **Delete Field**.

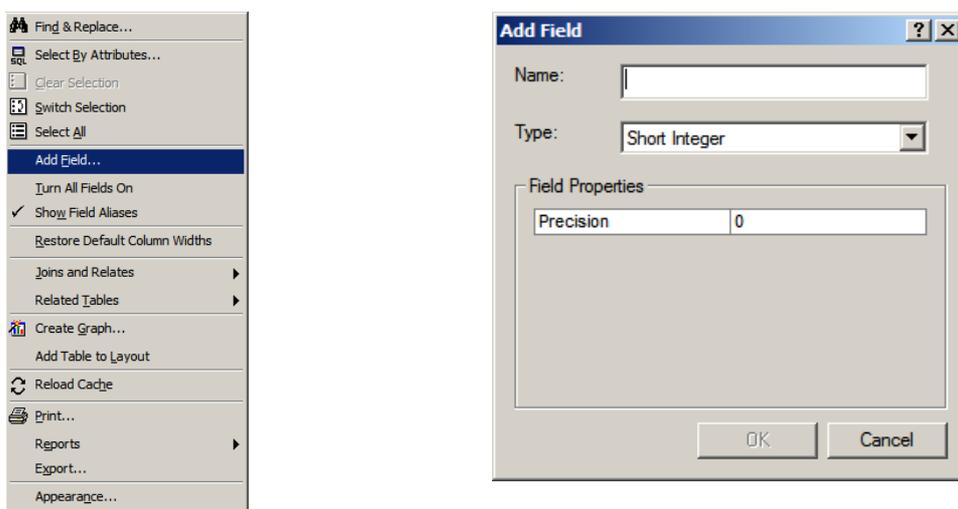


Figura 2.28.- Herramienta Add para crear campos en la tabla de atributos a partir del menú Options.

Nótese en la figura 2.28 el hecho de que hay que tener claridad sobre el tipo de registro (Type) y las propiedades del campo. Los tipos de registros que son admitidos en la creación de un nuevo campo son Short Integer, Long Integer, Float, Double, Text, Date. Las diferentes opciones se describen a continuación

Name: nombre o identificación del campo (hasta 10 caracteres)

Type: tipo de datos que pueden introducirse en un campo. Los tipos son:

Short Integer: números enteros (entre -32.000 y 32.000 aprox.)

Long Integer: números enteros(entre -2 y 2 billones aprox.)

Float: Números decimales (hasta 7 dígitos aprox.)

Double: Números decimales(hasta 15 dígitos aprox.)

Text: Texto

Date: Fecha

Precision: longitud del campo. En los tipos float y double la precisión debe tener en cuenta el número total de dígitos incluida la coma decimal. La escala indica el número de decimales. Por ejemplo para almacenar el número 9,5 tenemos que definir una precisión de 3 y una escala de 1

Scale: Número de decimales a usar.

El cuadro siguiente muestra los tipos de datos numéricos soportados en ArcMap.

Tipo Datos	Rango Almacenamiento	Tamaño(Bytes)	Aplicaciones
Short Integer	-32768 hasta 32767	2	Números enteros
Long Integer	-2147438648 hasta 2147483647	4	Números enteros de mayor rango
Float	-3,4x10 ⁺³⁸ hasta 1,2x10 ⁺³⁸	4	Números reales.
Double	-2,2x10 ⁺³⁰⁸ hasta 1,8x10 ⁺³⁰⁸	8	Números reales de mayor escala.

El cuadro siguiente muestra la precisión y escala sugerida para unos ejemplos relacionados con los tipos de datos numéricos soportados en ArcMap y mostrados en la tabla anterior.

Rango	Tipo Datos	Precision	Scale
0 a +99	Short Integer	2	0
-99 a +99	Short Integer	3	0
0 a +99.999	Long Integer	5	0
-99.999 a +99.999	Long Integer	6	0
0,001 a 0,999	Float	4	3
1.000,00 a 9.999,99	Float	6	2
-123.456,78 a 0	Double	9	2
0 a 1.234,56789	Double	9	5

Cuando se agrega(Add) un campo en la tabla de atributos, este puede ser ingresado manualmente o calculado. Para realizar el cálculo se hace un click con el botón derecho del mouse sobre el nombre del campo y se despliega el menú mostrado en la figura 2.29, y al aplicar **Field Calculator**, se despliega la ventana con la aplicación.

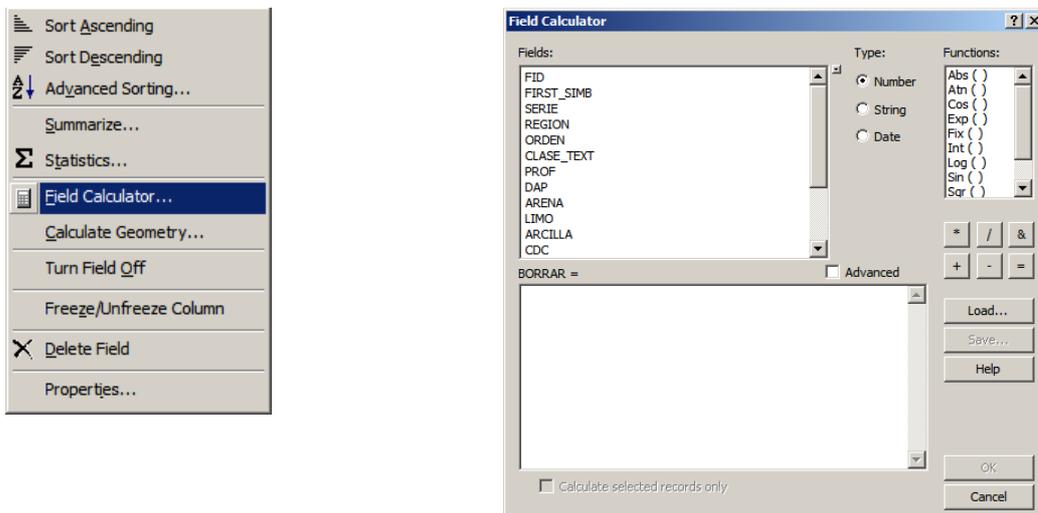
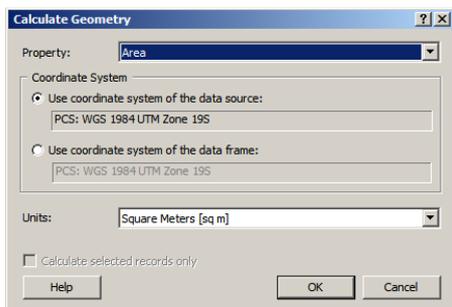


Figura 2.29.- Herramienta Field Calculator para el ingreso de campos nuevos en la tabla de atributos.

Como ejemplo si queremos estimar una variable cualquiera a partir de la base de datos, la formula que debemos introducir debe ser del tipo

$$\text{BORRAR}=[\text{DAP}] * [\text{PROF}] * ([\text{CDC}]- [\text{PMP}])/100$$

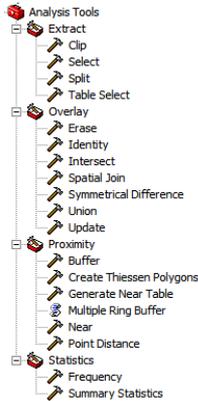
Para seleccionar las variables para insertarlas en la ecuación basta hacer doble click con el botón izquierdo del mouse.



También en el mismo menú mostrado en la figura 2.29, se puede ingresar a **Calculate Geometry**. Esta herramienta permite el cálculo del centroide, área y el perímetro en el caso de polígonos. En el caso de puntos grabara las coordenadas de los mismos en una nueva columna.

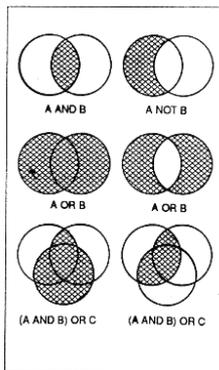
En el caso de una cobertura de líneas es posible tener nuevos campos con la longitud de cada una, la coordenada de inicio y de fin, y la coordenada del centroide.

Operaciones lógicas y matemáticas



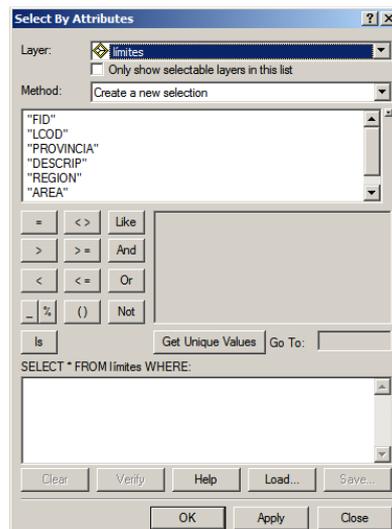
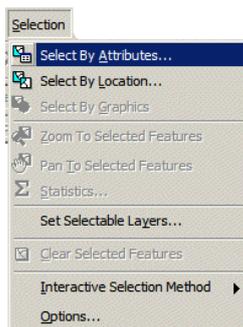
La mayoría de las opciones para el cálculo y aplicación de funciones matemáticas se encuentra en **ArcToolBox->Analysis Tools** o también en las opciones de la tabla de atributos.

Al lado izquierdo se muestran las herramientas que trae Analysis Tools: Extracción de datos, Superposición de datos y coberturas, Análisis de Vecindad y Estadística.



Operaciones Lógicas: Con los archivos vectoriales es posible emplear el álgebra clásica ($>$, $<$, $=$) y álgebra de Boole (A unión B, A no B, A intersección B, ni A ni B).

El general este tipo de comandos y funciones son posibles de encontrar en muchos SIGs, en especial en ArcGis. La opción para acceder a este tipo de procesos, se encuentra en





Operaciones Matemáticas: Todos los SIGs comerciales y de código abierto incluyen programas a partir de los cuales están implementadas las funciones básicas: suma, resta, multiplicación, división, raíces cuadradas y razones trigonométricas, entre algunos. Estas opciones de funciones matemáticas pueden ser de gran utilidad para diferentes aplicaciones.

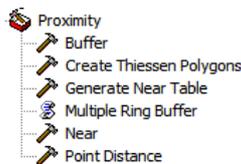
Operaciones Estadísticas: los programas permiten tratar nuestra tabla de atributos mediante calculo de medias, varianzas, desviaciones típicas etc. También es posible observar la distribución de nuestros datos mediante histogramas.

Operaciones Geométricas: Cálculos de distancias, áreas, volúmenes y orientaciones son básicos en este tipo de software dedicado al análisis espacial. De nada sirve presentar mapas de colores y formas optimas, si desconozco las superficies o distancias entre los distintos símbolos del mismo. Para el cálculo de algunos parámetros geométricos se puede usar el menú Options de la barra inferior de la tabla de atributos. El Area(Area) y el perímetro(Perimeter) de un polígono irregular vienen dados por

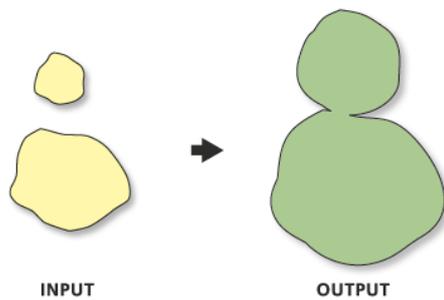
$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (X_i \cdot Y_{i+1} - X_{i+1} \cdot Y_i) \quad (2.1)$$

$$P = \sum_{i=1}^N \sqrt{(X_i - X_{i+1})^2 + (Y_i - Y_{i+1})^2} \quad (2.2)$$

2.1.3.- Análisis de vecindad y proximidad: Corredores y áreas de influencia



Para muchas aplicaciones en GIS se requieren realizar análisis de proximidad. Supongamos que un urbanista desea conocer la distancia a los diferentes barrios para ubicar un parque y que todos los barrios se ubiquen a una distancia mínima. En este caso un análisis de proximidad determinaría cuales lugares en una capa de información están o se encuentran localizados a una distancia específica de un cierto lugar definido con anterioridad.

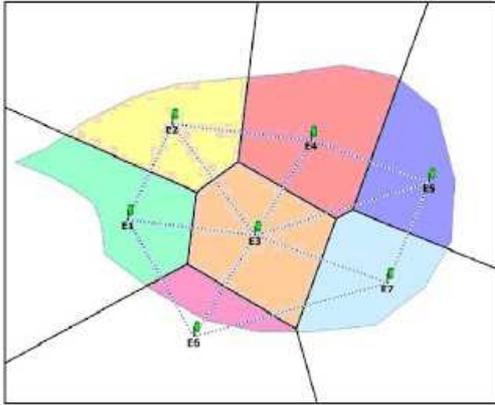


Buffer: Crea polígonos de amortiguamiento a una distancia especificada por las Entidades de entrada. Un opcional de dissolve se puede realizar para eliminar buffers superpuestas. **ArcToolBox ->Analysis Tools->Proximity->Buffer.**



Figura 2.30.- Áreas de influencia aplicada en cartografía.

Polígonos de Thiessen o Voronoi: Los polígonos de Thiessen (1911) es un método de interpolación simple nombrado así en honor al meteorólogo estadounidense Alfred H. Thiessen, y básicamente son una construcción geométrica que permite realizar una partición del plano euclídeo en un área delimitada. Estos objetos también fueron además estudiados por el matemático ruso Georgy Voronoi, y debido a esto también se denominan polígonos o diagramas de Voronoi y por el matemático Gustav Lejeune Dirichlet, de donde se denominan teselación de Dirichlet. Este método fue desarrollado originalmente para estimar la precipitación espacial ya que su aplicación es simple y entrega resultados satisfactorios. Este tipo de método se ha aplicado a datos cuantitativos y cualitativos, sin embargo se cree más apropiado cuando los datos son cualitativos.



La forma de crearlos es unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia. La figura adjunta muestra un ejemplo de la construcción de los polígonos.

El método de los polígonos de Thiessen es usado para delimitar áreas de influencia a partir del conjunto de puntos utilizados. El tamaño y la configuración de los polígonos depende de la distribución de los puntos originales. Una de las limitantes del método es estimar el error asociado, ya que el valor asociado al polígono corresponde a un solo punto.

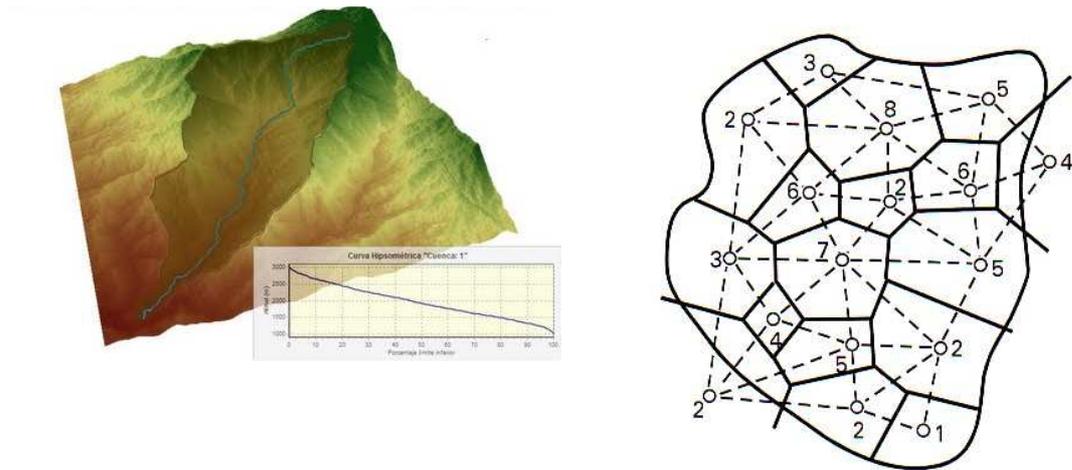


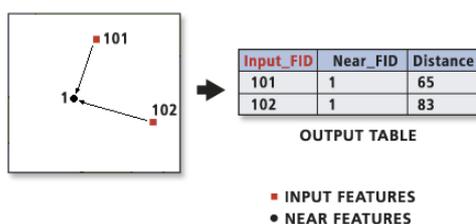
Figura 2.31.- Los polígonos de Thiessen pueden ser utilizados para calcular la precipitación media de una cuenca hidrográfica.

Los polígonos de Thiessen son utilizados para calcular la precipitación media de una cuenca, ya que ellos relacionan la precipitación medida en cada punto y su área de influencia dada por los polígonos de Thiessen. Desde un punto de vista cuantitativo, la superficie de cada polígono se utiliza como si esta fuese el área de influencia de la estación meteorológica que midió precipitación, y que se encuentra localizada al

interior de un polígono. El área de cada uno de estos polígonos (A_i) debe ser calculada para poder realizar el cálculo de la precipitación media de la cuenca mediante la expresión:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (2.3)$$

Cuándo este cálculo se limita a una cuenca específica, es probable que algunos datos de estaciones queden fuera de la cuenca, sin embargo la cuenca contenga polígonos asociados a estas estaciones limítrofes y que quedaron fuera. Lo que se hace normalmente es estos casos es que se asigna el valor de la estación limítrofe más cerca al polígono para realizar el cálculo y solo se considera esa área interior a la cuenca. Para el cálculo de los polígonos de Thiessen es necesario ir a **ArcToolBox - >Analysis Toos->Proximity->Create Thiessen Polygons**.



Point Distance: Esta herramienta determina la distancia entre las entidades de puntos en las Entidades de entrada a todos los puntos en el Cercano Características dentro del radio de búsqueda.

2.1.4.- Reclasificación, Disolución

El software ArcMap posee varias opciones para resumir o clasificar datos numéricos ubicado en **Properties > Symbology > Quantities > Classify**. Las opciones de clasificación en el despliegue de los datos son muy útiles para una representación más adecuada de la cartografía final. Las opciones para la clasificación son varias, esto es Manual, Intervalos iguales, Intervalos definidos, Cuantiles, Natural Breaks(Jenks), Intervalo Geométrico, Desviación Estándar. En algunas opciones es posible elegir además el número de clases que se desea obtener finalmente.

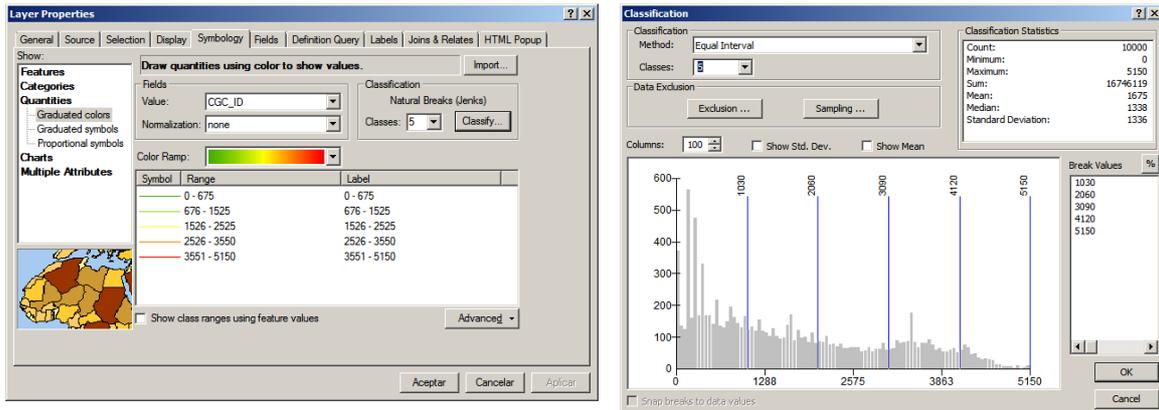
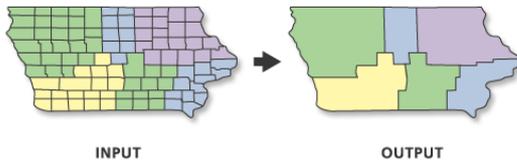
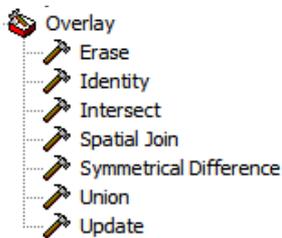


Figura 2.32.- Opciones para clasificación en el despliegue de los datos Properties > Symbology > Quantities > Classify.



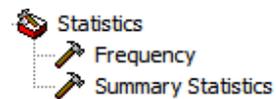
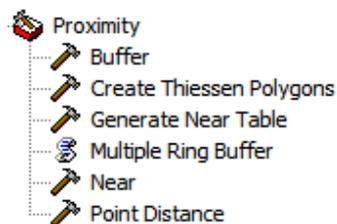
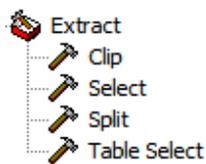
Dissolve (Dissolver): Es un proceso de agregación en el que una nueva función de mapa se crea mediante la fusión de polígonos adyacentes, líneas, o regiones que tienen un valor común para un atributo especificado. Dissolve es una de las herramientas de gestión de datos utilizados para las características de generalizar y combina características similares basadas en un atributo o atributos especificados.

2.1.5.- Fusión, Superposición, Unión e intersección

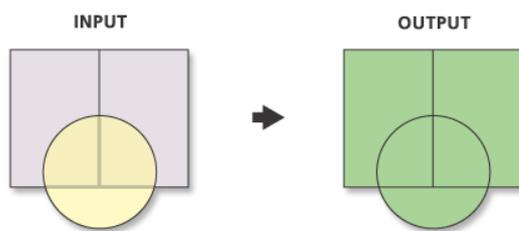


Superponer u overlay es una herramienta básica de cualquier GIS la cual es utilizada para la integración de datos. El objetivo de esta herramienta es la superposición de diferentes coberturas de temas específicos, y de esta forma generar nuevas coberturas, que contienen información de cada una de las coberturas iniciales. Estas superposiciones pueden ser realizadas utilizando operaciones lógicas y/o matemáticas. En el caso de ArcMap, esta se encuentra en **ArcToolBox** en **Analysis Tools**.

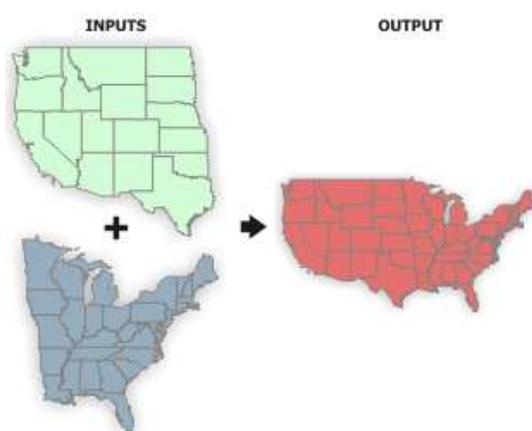
Entre las opciones de Overlay encontramos Erase, Identify, Intersect, Spatial Join, Symmetrical Difference, Union y Update. Sin embargo Analysis Tools posee aun más herramientas de análisis sobre coberturas, como las mostradas a continuación.



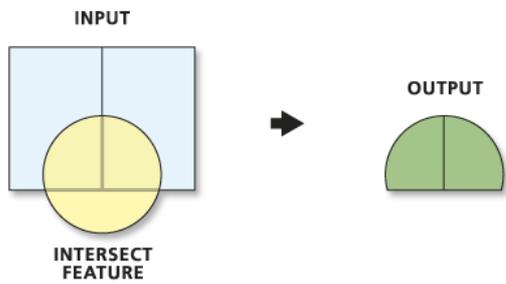
Discutiremos a continuación las más usadas en los diferentes procesos de análisis en ArcMap.



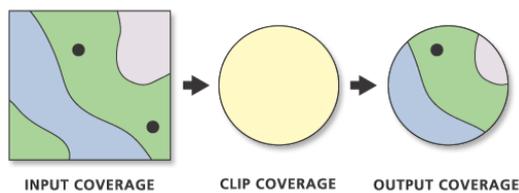
Union: Genera una intersección geométrica entre coberturas. Todas las entradas deben ser de un tipo de geometría común y la salida será del mismo tipo de geometría. Esto significa que un número de clases de elemento de polígono y capas de entidades se puede unir. Las características de salida tendrán los atributos de los archivos de entrada que se superponen.



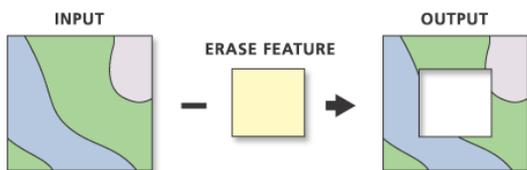
Merge (Append): Es una función de ArcGis que permite fusionar una entidad segmentada para conformar una sola unidad.



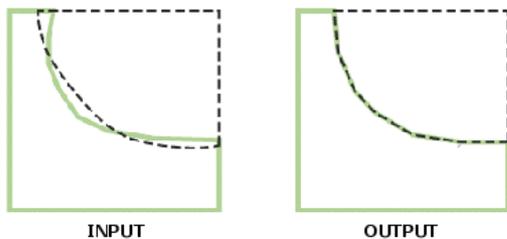
Intersect: Calcula la intersección geométrica de las coberturas de entrada. Características o porciones de las características que se superponen en todas las capas y/o clases de entidad se escribirán en la clase de entidad de salida.



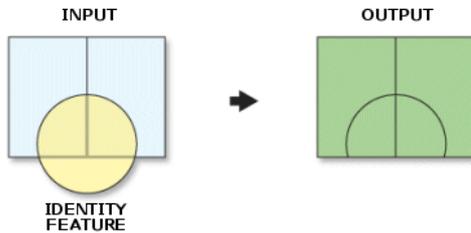
Clip: Extrae entidades de entrada que se superponen a las entidades del clip. Utilice esta herramienta para recortar una parte de una clase de entidad utilizando una o más de las entidades de otra clase de entidad como molde. Esto es particularmente útil para crear una nueva clase de entidad, también conocida como área de estudio o área de interés (AOI), que contenga un subconjunto geográfico de las entidades de otra clase de entidad mayor.



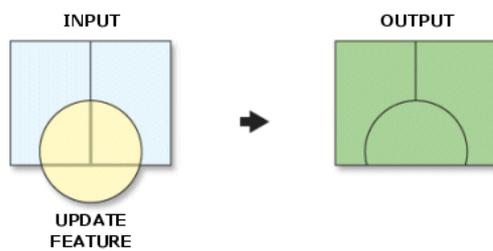
Erase: Crea una clase de entidad mediante la superposición de las Entidades de entrada con los polígonos de las funciones de borrado. Solamente aquellas porciones de las Entidades de entrada que caen fuera de las funciones de borrado fuera de las fronteras se copian a la clase de entidad de salida.



Integrate: Es una de las herramientas de gestión de datos para la manipulación de las clases de entidad. Esta herramienta compara las clases de entidad y hace idénticos o coincidentes cualquier línea o vértices que están a una cierta distancia unos de otros.



Identify: Es una herramienta de análisis utilizado para realizar análisis de superposición en las clases de entidad. Esta herramienta combina las porciones de características que se superponen la identidad cuenta para crear una nueva clase de entidad.



Update: Es otra de las herramientas de análisis para realizar superposición en las clases de entidad. Esta herramienta actualiza los atributos y la geometría de una clase de entidad de entrada o la capa de la clase de entidad Update o capas que se superponen.

2.1.6.- Conversión Vector-Raster.



Todos los GIS traen herramientas para la conversión raster-vector o viceversa. En ArcMap hay varias formas convertir datos hacia el formato raster, por ejemplo el convertir un archivo de puntos en un raster. Para reliaizar esta tarea se utilizarán las herramientas de geoprocresamiento para la conversión. Las herramientas de conversión vector a raster se encuentran en **ArcTooBox** en **Conversion Tools->To Raster**, cuyas herramientas se muestran en la figura adjunta.

Hay un número de herramientas de geoprocresamiento principales que le permiten convertir datos a raster y desde raster, que se muestran en la tabla siguiente.

Herramienta	Descripción
De ASCII a ráster	Convierte un archivo ASCII que representa datos ráster en un dataset ráster.
De entidad a ráster	Convierte las entidades a dataset ráster.
De flotante a ráster	Convierte un archivo de valores de punto flotante binarios que representa datos ráster en un dataset ráster.
De punto a ráster	Convierte las entidades de punto a dataset ráster.
Polígono a ráster	Convierte las entidades de polígono a dataset ráster.
Polilínea a ráster	Convierte las entidades de polilínea a dataset ráster

2.2.7.- Model Builder

ModelBuilder es una aplicación que se utiliza para crear, editar y administrar modelos. Los modelos creados, corresponden a diagramas de flujos para trabajos específicos que encadenan secuencias de herramientas de geoprocésamiento y suministran la salida de una herramienta a otra herramienta como entrada. ModelBuilder también se puede considerar un lenguaje de programación visual para crear ejecuciones de trabajos específicos. La herramienta se encuentra en Geoprocésamiento -> ModelBuilder, o en el icono  en la barra de menús principal.

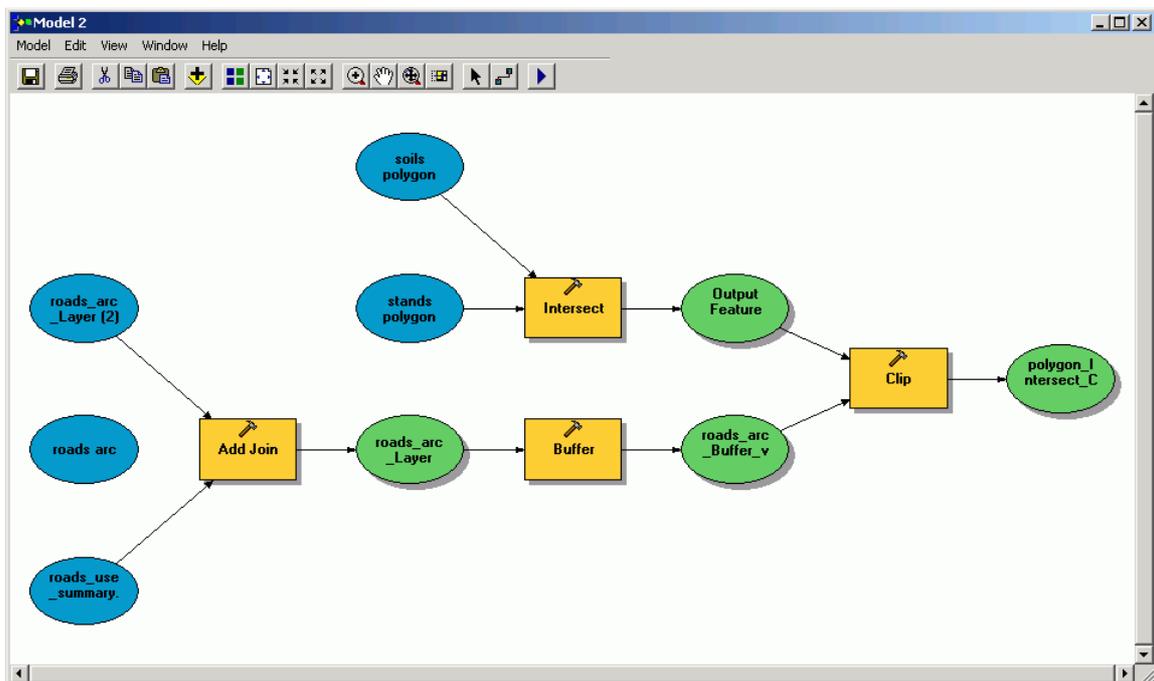


Figura 2.33.- Ejemplo de Model Builder.

2.2.- Análisis raster en SIG

Habíamos discutido del formato raster que es una forma de representar el espacio por medio de la división del mismo en una matriz de celdillas. ArcMap posee herramientas para el análisis de este tipo de datos. El modelo de datos Raster es también conocido como Grid, y ha sido aplicado fundamentalmente al análisis espacial y Modelado en estudios ambientales y de recursos naturales, sobre todo a datos de naturaleza continua. Este formato puede ser simple, como es el caso de una matriz (monobanda), o complejo con múltiples matrices (Multibanda) tradicional en teledetección, y como se muestra en la figura siguiente.

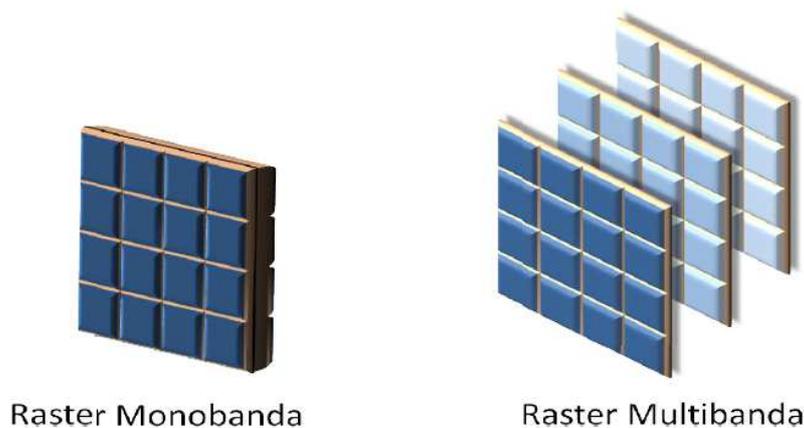


Figura 2.34.- Formato Raster simple o monobanda y complejo o Multibanda o Multiespectral.

Podemos clasificar los datos en formato raster desde el punto de vista del pixel, la estructura(número de bandas) y según su procedencia:

Pixel	Continuos Discretos o Temáticos
Estructura	Monobanda Multibandas Hiperbandas
Procedencia	Imágenes aéreas y satelitales Modelos Digitales de Terreno Calculo Numérico

Las principales características de un raster son

a) Valor: Dice referencia al valor almacenado en cada una de las celdas del raster, esto es, estos valores podrán ser números enteros o reales.

b) Resolución Espacial: Corresponde al tamaño del pixel, pero es la dimensión lineal mínima de la unidad más pequeña del espacio geográfico que tiene una representación explícita en la matriz de datos.

b) Georeferenciación: La matriz de datos puede estar asociada a coordenadas geográficas y tener una orientación en el espacio. La figura 2.35 muestra en forma esquemática la correspondencia entre coordenadas de mapa y coordenadas de matriz.

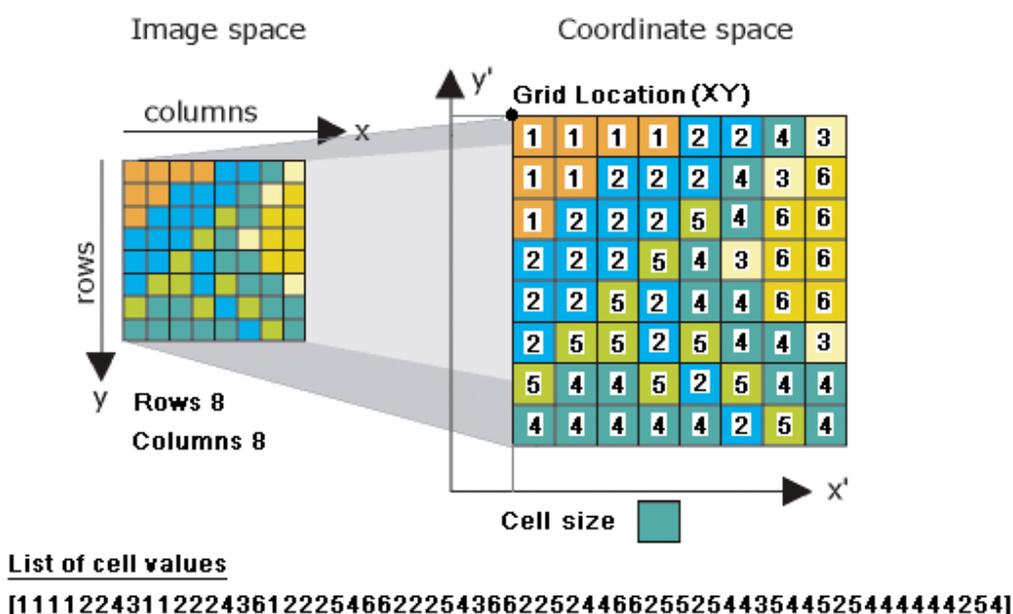


Figura 2.35.- Relación entre coordenadas de mapa y de matriz en un archivo raster.

Generalmente para definir la posición al interior de un archivo raster, es necesario conocer las coordenadas de por lo menos dos extremos de la matriz. Según el sistema se utiliza la esquina inferior izquierdo como el mínimo y la esquina superior derecho como el máximo, pero también es posible utilizar las otras esquinas para definir las coordenadas al interior del archivo raster. Los corners son conocidos como Lower Left, Lower Right, Upper Left y Upper Right. A estas esquinas se les conoce adicionalmente su posición en el sistema de coordenadas cartesianas, además se

conoce la resolución del pixel, por lo que es fácilmente calculable la posición de cada pixel mediante las ecuaciones

$$X = \text{MinX} + (\text{Col} + 0.5) \cdot \text{ResX} \quad (2.4)$$

$$Y = \text{MinY} + (\text{Fil} + 0.5) \cdot \text{ResY} \quad (2.5)$$

donde las coordenadas X e Y corresponden al centro de cada pixel celda, Fil y Col son la Fila y Columna que se desea conocer su posición, ResX y ResY corresponden a la resolución o tamaño del pixel. Los valores MinX, MinY, MaxX, MaxY corresponden a las coordenadas de las esquinas superior izquierda y la esquina inferior derecha de la matriz o capa raster respectivamente. Los valores que caracterizan espacialmente la matriz pueden almacenarse directamente en una cabecera de archivo, o en archivo anexo a la matriz de datos. Las ecuaciones 2.4 y 2.5 asumen la convención de que la primera fila y la primera columna son la fila 0 y la columna 0. Para la asignación de las coordenadas la primera columna en una capa ráster es la de la izquierda, mientras que la primera fila será la superior aumentando hacia abajo, en sentido contrario al que siguen las coordenadas geográficas y las representaciones en un modelo vectorial. En el caso contrario, si se conocen las coordenadas geográficas y se desea conocer las coordenadas de matriz, las ecuaciones son

$$\text{Col} = \text{int}[(X - \text{MinX})/\text{ResX}] \quad (2.6)$$

$$\text{Fil} = \text{int}[(Y - \text{MinY})/\text{ResY}] \quad (2.7)$$

Los archivos raster son visualizados en la pantalla del computador por medio de paletas de colores o combinaciones de bandas en el caso de archivos multibandas. Además podemos saber el número de orden del pixel por:

$$n = N\text{Col} \cdot \text{Fil} + \text{Col} \quad (2.8)$$

de manera que la primera celdilla es la número cero y la última la $(N\text{Col} \cdot N\text{Fil}) - 1$, donde NCol y NFil es el número de columnas y filas totales de una matriz respectivamente.

El formato raster puede ser aplicado como un modelo del espacio asociado al mundo real donde es posible asociar cada matriz (Layer Raster) para representar distintas entidades y variables. En el caso de que una entidad al interior de un archivo raster no contenga datos y el valor cero es un dato, es posible usar el concepto de valor nulo o NULL, donde no exista nada. Por ello es fundamental definir este valor y los programas SIG han definido muchos valores asociados, como por ejemplo -9999 o NaN(Not a Number) que es número muy grande ($\text{NaN} < \text{Infinito}$) y es usado también como un error en los cálculos sobre todo cuando hay desbordamiento.

Formato de la matriz

Una matriz puede ser almacenada en el computador (Disco Duro) como un archivo binario o ASCII, los cuales corresponden al formato básico de almacenamiento de archivos computacionales.

El formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange) corresponde a un sistema de codificación que asigna a cada carácter alfanumérico (A-Z, a-z, 0-9) o de control (retorno de carro, paso de línea, etc.) un valor entre 0 y 255. De este forma los textos se almacenaran utilizando un byte por carácter más los correspondientes caracteres de control. En el caso de los números esto es directo ya que se representan a sí mismos. La figura siguiente muestra un archivo ASCII de una matriz de datos, usada por ArcMap como sistema de importación y exportación de datos, adicionalmente puede contener información del valor nulo (NULL) o **nodata_value** (-999999).

```

ncols      13
nrows     12
xllcorner -70.7583339
yllcorner -32.7166661
cellsize  0.00833333076923063
946 860 819 830 829 892 859 824 857 925 946 1061 1128
1121 925 800 809 809 811 825 849 934 1074 1172 1075 1168
955 877 788 792 799 791 837 899 943 1047 1041 1002 1090
1036 779 769 775 781 820 832 868 837 820 858 954 987
761 753 761 764 760 750 750 755 777 821 864 920 978
745 734 738 740 743 737 734 754 800 888 980 1121 1008
717 726 722 730 730 723 727 733 823 901 1184 1329 1401
698 712 709 714 716 718 728 760 811 888 1035 1304 1303
685 688 689 695 814 827 763 810 877 931 1225 1285 1073
669 669 678 684 793 941 1051 995 1052 1021 1002 1069 999
656 660 689 775 830 839 973 984 936 879 886 1071 1035
635 649 627 626 751 726 864 807 757 749 807 970 958

```

Figura 2.37.- Ejemplo de un archivo ASCII de ArcRaster para importación y exportación de datos.

En el caso del formato binario la situación es más compleja, ya que es posible almacenar un registro o celda en byte(1 byte), integer (2 byte), float (4 bytes) y double(8 bytes), según sea el caso asociado al tipo de registro. A continuación se muestra una tabla con la asociación entre número usado y bytes necesarios para almacenarlo.

Tipo	Almacenamiento (Bytes)
Boleano	4
Caracter, caracter con o sin signo	1
Integer sin signo	4
Integer corto sin signo	2
Integer largo con signo	4
Integer largo	8
Float (Real)	4
Float Complex	8
Double	8
Double Complex	16
Long	8
Long Complex	16
Pointer	4
Vector	16

En el modelo raster, el formato binario es la forma más eficiente de trabajo, primeramente porque ocupa menos espacio total que si fuera ASCII, y en segundo lugar porque permite el acceso directo a los datos, esto es el acceso a un pixel específico, solamente conociendo su ubicación en la fila y columna respectiva. Lo anterior es posible porque todos los registros (píxeles) de un archivo raster tienen el mismo tamaño en bytes. El formato ASCII, por otra parte, solo permite el acceso secuencial, esto uno a uno, desde el primer al último registro.

El formato matricial binario de ArcInfo es un formato específico de trabajo del programa y de uso interno del mismo. Este formato es muy distinto al formato ASCII Grid de ArcInfo, que como ya lo habíamos discutido anteriormente es un formato usado para el intercambio entre sistemas. Los archivos se pueden convertir entre el formato binario y ASCII con los comandos GRIDASCII y ASCIIGRID en ArcInfo. El formato Grid tiene normalmente asociadas tablas en el directorio de trabajo, pero también archivos que contienen la definición de proyección en formato ESRI (prj.adf). Los archivos tienen GRID las siguientes funciones:

dblbnd.adf: Contiene los límites (LLX, LLY, URX, URY).

hdr.adf: Este es el encabezado, y contiene información sobre los tamaños de baldosas, y el número de fichas en el conjunto de datos.

sta.adf: Contiene estadísticas, en particular, filas, columnas, mínimo, máximo, media y desviación estándar.

vat.adf: Es la tabla de atributos de valor asociada al archivo raster.

w001001.adf: Este es el archivo que contiene los datos de la matriz.

w001001x.adf: Este es un archivo que contiene punteros a cada una de los registros en el archivo raster w001001.adf.

La tabla siguiente muestra varios formatos utilizados para almacenar información raster.

Type	Description
BMP	Bitmap graphic raster dataset format
GIF	Graphic Interchange Format for raster datasets
GRID	ESRI's GRID raster dataset format
IMAGINE Image	ERDAS IMAGINE raster data format
JP2000	JPEG 2000 raster dataset format
JPEG	Joint Photographic Experts Group raster dataset format
PNG	Portable Network Graphic raster dataset format
TIFF	Tag Image File Format for raster datasets
GEOTIF	Variant enriched with GIS relevant metadata
netCDF	Network Common Data Form(UCAR)

Despliegue de datos

La pantalla de un computador es un sistema raster, esto es, es un espacio rectangular dividido en pixeles que pueden tomar distintos colores. Por tanto, para el despliegue de una capa raster en la pantalla del computador, el programa GIS deberá establecer una correspondencia entre los valores numéricos de la matriz y el color que mostrara. Adicionalmente debe realizar un calce geométrico entre el tamaño de la matriz y la pantalla, Si la matriz es más grande que la pantalla solo se representan en ella algunos pixeles sino que una proporción, por ejemplo sólo uno de cada dos, o uno de cada tres, o uno de cada cuatro, o etc....Si la matriz es más pequeña que la pantalla no se deberá hacer remuestreo, sin embargo si es mucho más pequeña, deberá mostrar repetidamente un pixel hasta ocupar toda el área visual de la pantalla, motivo por el cual los pixeles al hacer zoom se ven como cuadrados (La figura 2.2 muestra un ejemplo de ello).

En cuanto al color a mostrar en pantalla la asignación se realiza mediante una función lineal, que relaciona los valores de los niveles digitales del archivo raster monobanda con los colores a asignar, diseñados por el usuario, más conocido como

paleta de color. Una paleta de color corresponde a un archivo que contiene en el primer campo un número (ColorMap) y sus respectivos niveles de Rojo(R), Verde (G) y Azul (B), ver figura 3.38(a). la equivalencia entre nivel digital y color lo muestra la figura 2.38(b), la cual está dada por la ecuación

$$\text{COLOR} = \left[\frac{255}{(\text{MAX} - \text{MIN})} \right] \cdot (\text{ND} - \text{MIN}) \quad (2.9)$$

donde ND, corresponde al nivel digital o valores de los pixeles, MAX y MIN corresponden al valor máximo y mínimo en la matriz de datos sin considerar el NULL, el cual se despliega como color de fondo, que puede ser negro o blanco.

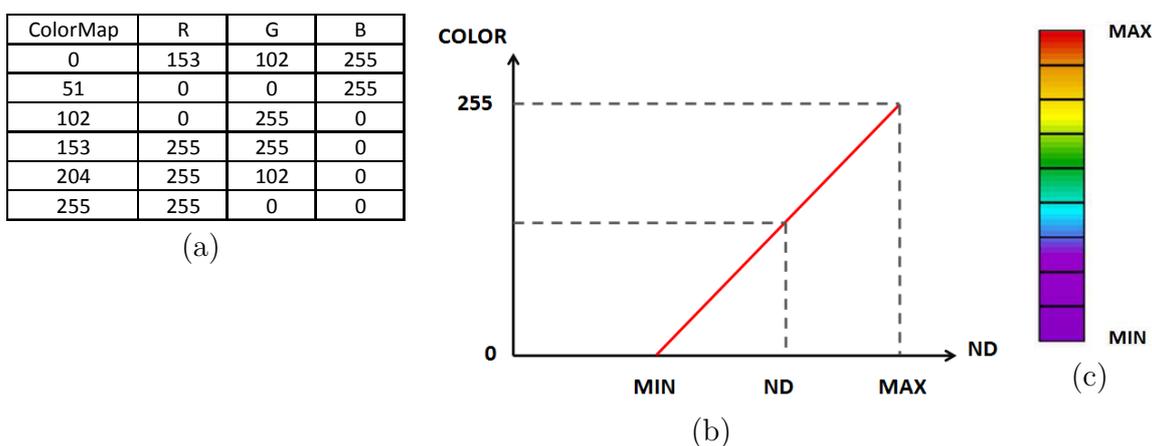
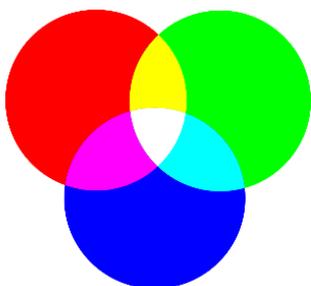


Figura 2.38.- Ejemplo de la correspondencia entre los niveles digitales(ND) de un archivo raster monobanda y la correspondiente asignación del color, denominada paleta de color.



La figura 2.39 muestra a modo de ejemplo un archivo raster de altitud desplegado en pantalla utilizando un paleta llamada rainbow(Arcoíris). En el caso de que los archivos raster sean multibandas, la asignación del color se realiza utilizando tres bandas, las cuales pueden ser elegidas en forma arbitraria por el usuario, según sean sus necesidades de análisis.

El color se construye asignando el respectivo R, G y B a con las bandas seleccionadas y normalizadas para formar el color, recordando que el color se forma con una proporción de cada color primario R, G y B.

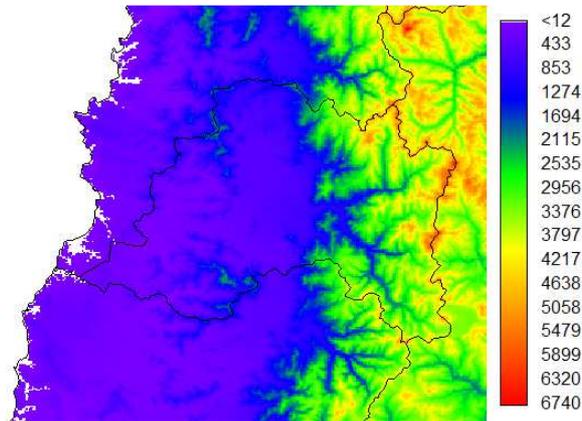


Figura 2.39.- Ejemplo de un archivo raster de altitud desplegado en pantalla utilizando un paleta llamada rainbow(Arcoíris).

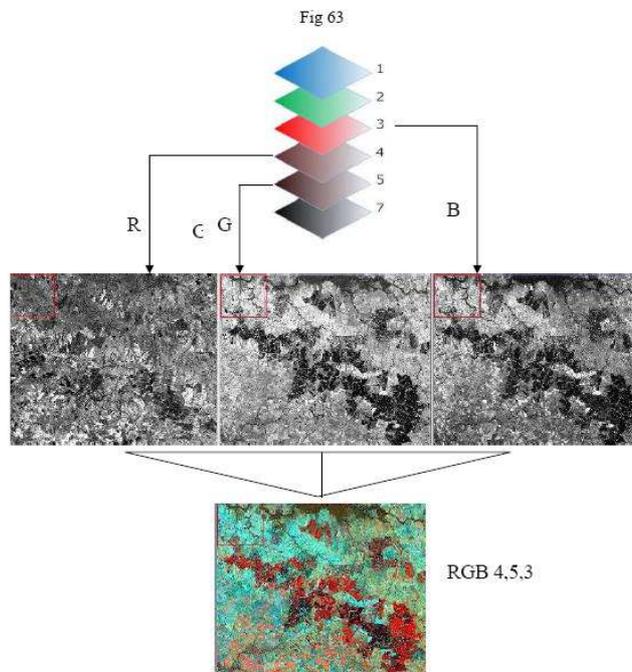


Figura 2.40.- Ejemplo de un archivo raster multibanda que corresponde a una imagen satelital LANDSAT, denominada falso color.

2.2.1.- Estadística de la imagen

Antes comenzar un análisis más exhaustivo de un archivo raster(imagen satelital) es importante tener una idea descriptiva básica de la misma. Esto se logra con la obtención de las estadísticas elementales para sintetizar y describir el archivo matricial. Entre algunas tenemos valores máximos y mínimos, el rango de valores de una imagen, las medidas de tendencia central media y moda, medidas de dispersión como la varianza, aplicados a todos los niveles digitales de la matriz. Otro análisis fundamental es el histograma de la imagen, que nos da cuenta de la distribución espacial de los pixeles para hacer algunos procesos en la imagen, que discutiremos más adelante en el capítulo de teledetección. Ahora haremos un recordatorio de la estadística descriptiva.

Media de una distribución

El valor medio o media de una distribución μ se puede interpretar como el valor esperado de la variable aleatoria x . También se le llama momento de primer orden respecto al origen y se interpreta como el lugar donde están concentrados los valores que toma la variable.

$$\begin{aligned}\mu &= E(x) = \sum x \cdot f(x) && \text{para } x \text{ discreta.} \\ \mu &= E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) \, dx && \text{para } x \text{ continua}\end{aligned}\tag{2.10}$$

Mediana de una distribución

Para explicar este concepto, consideramos una variable discreta x cuyas observaciones las hemos puesto en una tabla y las hemos ordenado de menor a mayor. Llamaremos mediana al valor de la variable que deja por debajo de sí al 50 % de las observaciones. Por tanto, si n es el número de observaciones, la mediana corresponderá a la observación $[n/2]+1$. Desde un punto de vista formal sea una x variable aleatoria y $F(x)$ su función de distribución acumulada, la mediana corresponde a la solución de la ecuación

$$F(x) = 0.5\tag{2.11}$$

Moda de una distribución

La moda en un conjunto de valores aleatorios x se define como el valor de ocurrencia más frecuente, de esta forma la moda es el valor que maximiza $f(x)$ y que satisface la ecuación

$$\begin{aligned} \text{Max}_{i=1}^N [f(x_i)] & \quad \text{para } x \text{ discreta.} \\ \frac{df(x)}{dx} = 0 \text{ y } \frac{d^2 f(x)}{dx^2} < 0 & \quad \text{para } x \text{ continua} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Varianza de una distribución

La varianza σ^2 de una distribución de una variable aleatoria x corresponde al segundo momento central con respecto a la media. Este momento describe la variabilidad respecto a la media y se representa por

$$\begin{aligned} \sigma^2 = V(x) = E[(x - \mu)^2] &= \sum (x - \mu)^2 \cdot f(x) & \text{para } x \text{ discreta.} \\ \sigma^2 = V(x) = E[(x - \mu)^2] &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \cdot f(x) \cdot dx & \text{para } x \text{ continua} \end{aligned} \quad (2.13)$$

A la raíz cuadrada de la varianza se le llama desviación estándar y se designa por

$$\sigma = \sqrt{V(x)} = \sqrt{\sigma^2} \quad (2.14)$$

Coefficiente de variación de una distribución

El coeficiente de variación C_v , se interpreta como una medida de la dispersión y se define como el cociente entre la desviación estándar y la media, de acuerdo a

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2.15)$$

Covarianza

La covarianza Cov , se interpreta como una medida de la dispersión conjunta entre dos variables aleatorias.

$$S_{x,y} = E[(X - E(X)) \cdot (Y - E(Y))]$$

$$S_{x,y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \mu_{x,y} \quad (2.16)$$

Sesgo de una distribución

El sesgo de una distribución γ es interpretado como una medida de la asimetría de las distribuciones y se puede estimar por

$$\gamma = \frac{\mu^3}{\sigma^3} = \frac{E[(x - \mu)^3]}{\sigma^3} \quad (2.17)$$

Este momento se puede interpretar como

Si $\gamma = 0$ la distribución es simétrica.

Si $\gamma > 0$ la distribución se encuentra sesgada hacia la derecha.

Si $\gamma < 0$ la distribución se encuentra sesgada hacia la izquierda.

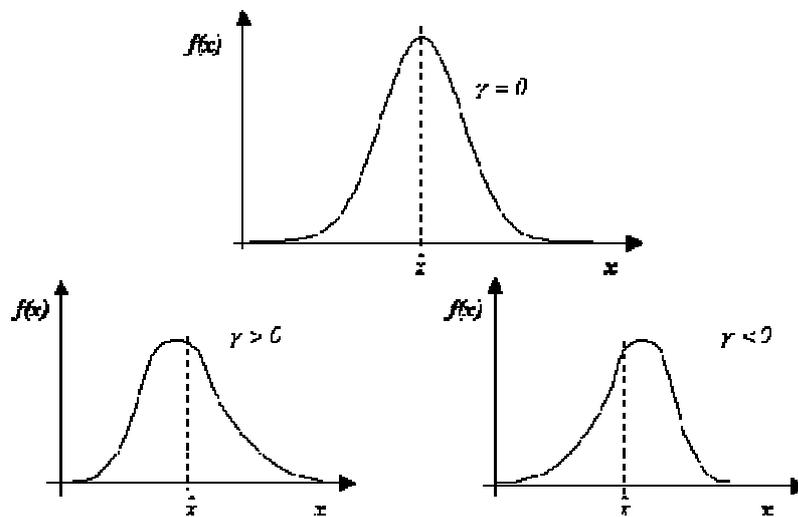


Figura 2.41.- Ejemplo del efecto de la asimetría para una distribución normal. Su valor es cero cuando la distribución es simétrica, positivo cuando existe asimetría a la derecha y negativo cuando existe asimetría a la izquierda.

Curtosis de una distribución

La curtosis de una distribución κ es interpretado como una medida de achatamiento o aplanamiento de la función de densidad $f(x)$, y se puede estimar por

$$\kappa = \frac{\mu^4}{\sigma^4} = \frac{E[(x-\mu)^4]}{\sigma^4} \quad (2.18)$$

Luego este momento es interpretado de acuerdo a

Si $\kappa > 3$ la distribución es Leptocúrtica

Si $\kappa = 3$ la distribución es Mesocúrtica

Si $\kappa < 3$ la distribución es Platicúrtica

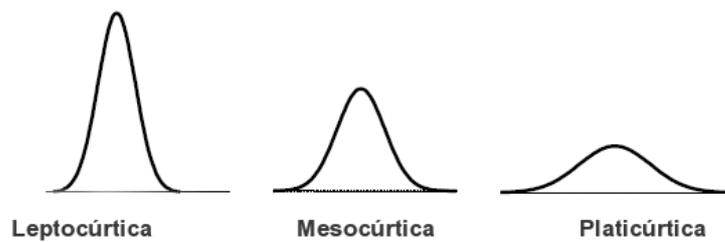


Figura 2.42.- Ejemplo del efecto de la curtosis para una distribución normal.

Es posible redefinir la curtosis en términos de la distribución normal, cuyo valor es 3, por lo que la definición 12 la podemos reescribir como

$$\kappa' = \kappa - 3 = \frac{\mu^4}{\sigma^4} - 3 \quad (2.19)$$

De forma análoga a la definición de κ , podemos escribir en relación a κ' lo siguiente

Si $\kappa' > 0$ la distribución es Leptocúrtica

Si $\kappa' = 0$ la distribución es Mesocúrtica

Si $\kappa' < 0$ la distribución es Platicúrtica

Diagrama de dispersión

Es la representación gráfica más útil para describir el comportamiento conjunto de dos variables o también llamado nube de puntos. En estos gráficos cada caso aparece representado como un punto en el plano definido por las variables denominadas x e y, normalmente independiente y dependiente.

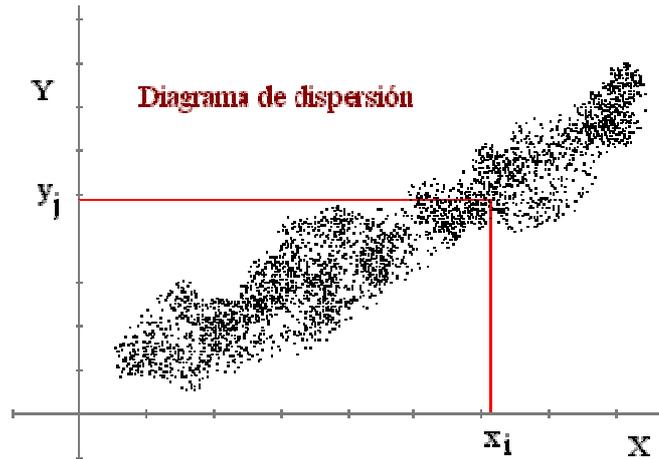


Figura 2.43.- Diagrama de dispersión para un conjunto de datos.

Al observar la nube de puntos en el grafico se podrá inferir que existe algún grado de asociación entre las variables. El grado de asociación entre las variables se puede apreciar si los puntos se agrupan en torno a alguna tendencia, por ejemplo algún tipo de curva.

Correlación y regresión

Podemos entender la **correlación** como una medida que da cuenta del grado de relación existente entre dos variables. Lo anterior, a priori, podría implicar que en estos grados de asociación no importaría cual es la causa y cual es el efecto, o cual variable depende de la otra. Usualmente para medir el grado de asociación entre variables se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson, mostrado en la ecuación 14.

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (2.20)$$

El coeficiente de correlación varía entre -1 y 1, donde estos valores extremos representan una correlación perfecta, en cambio 0 representa ausencia de correlación. En la ecuación 14 n representa al número total de datos, μ al valor medio y σ la desviación estándar, de cada variable respectivamente x e y . la ecuación 14 también puede ser expresada en términos de la covarianza, la cual se muestra en la ecuación 15.

$$r = \frac{Cov(x, y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (2.21)$$

Usualmente suele utilizarse r^2 llamado coeficiente de determinación.

La **regresión** es una técnica estadística utilizada para modelar la relación existente entre dos o más variables usando para ello ecuaciones matemáticas conocidas o mezclas entre ellas. Por lo tanto el objetivo de este método estadístico es construir modelos que permitan predecir el comportamiento de una variable dada en función de otras por medio de relaciones funcionales. En las ciencias ambientales el método de regresión ha sido utilizado ampliamente para interpretar y explicar situaciones reales. Sin embargo, es común que este método sea mal aplicado, sobre todo cuando no se realiza una selección adecuada de las variables que van a construir las ecuaciones de la regresión, o también llamadas variables explicativas o descriptoras.

Para determinar los valores numéricos de los parámetros de la función teórica que se ajustará a los valores de X e Y , se pueden utilizar varios métodos de estimación, entre los cuales tenemos

- Gráfico
- Mínimos cuadrados
- Momentos
- Máxima verosimilitud

Cualquiera sea el método empleado para realizar la estimación de los parámetros las diferencias entre ellos, si están correctamente aplicados, deberán ser mínimas.

Adicionalmente para obtener un modelo de regresión no es suficiente encontrar la ecuación, porque además debemos evaluar que tan adecuado es el modelo de

regresión obtenido. Para esto se usa el coeficiente de determinación r^2 conjuntamente con un test estadístico de bondad del ajuste.

La estadística descriptiva básica e histograma puede ser aplicado a una imagen desde **Layer Properties** o usando la herramienta de **ArcToolBox** llamada **Spatial Analyst**, como lo muestra la figura siguiente.

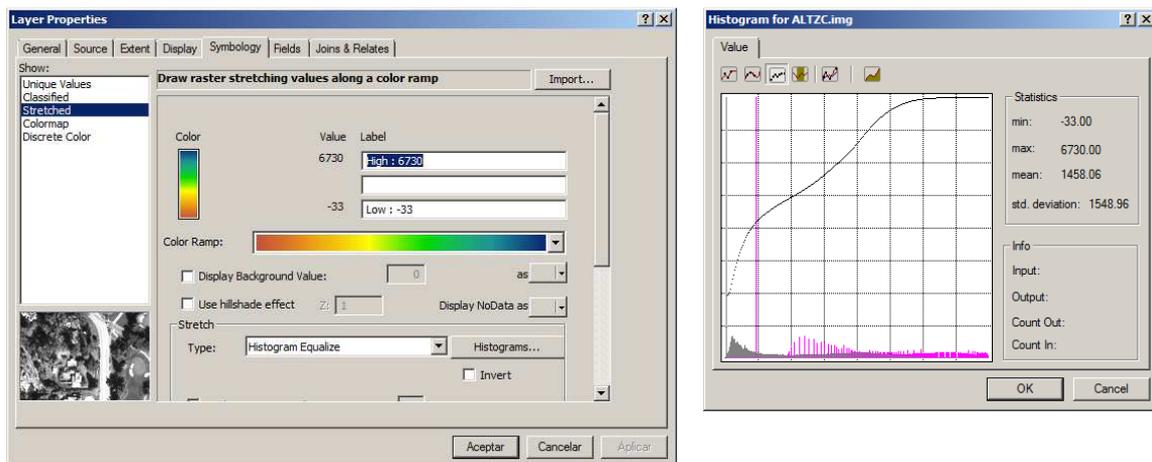


Figura 2.44.- Ejemplo del cálculo de la estadística básica de un archivo raster de altitud o modelo digital de elevación a partir la herramienta **Layer Properties** o **Spatial Analyst**.

2.2.2.- Reclasificación

Esta operación matemática es de tipo local y se realiza pixel a pixel, y el proceso consiste en el reemplazo de las celdas del archivo raster de entrada por nuevos valores en el archivo raster de salida basándonos en un criterio previamente definido por el usuario. El procedimiento de análisis se inicia con la agrupación de los datos continuos en valores discretos o temáticos de acuerdo a un criterio o regla de decisión. Esta función se encuentra en **ArcToolBox**, **Spatial Analyst**—>**Reclassify**. Antes de aplicar Reclassify es necesario ir a Layer Properties y de ahí a la pestaña **Symbology** donde cambiamos las propiedades de despliegue usando Classified, solo ahí estamos en condiciones de realizar la clasificación del archivo raster. El método de clasificación usado para Classified puede ser cualquiera de los

métodos estadísticos ahí mencionados en las opciones (intervalos iguales, rupturas naturales, o especificado por el usuario entre otros). A continuación se pueden ver los parámetros necesarios para reclasificar un raster en la figura siguiente.

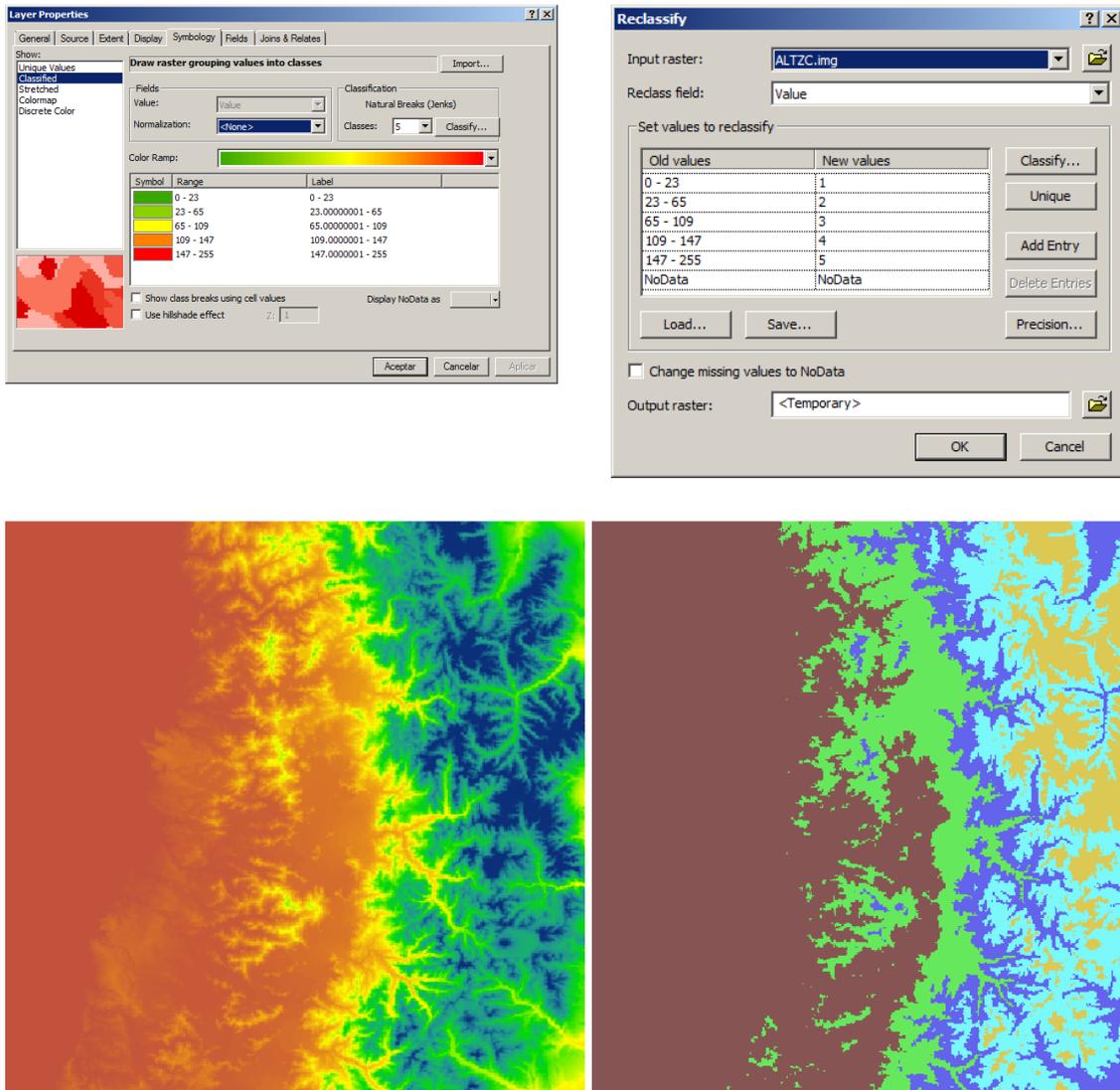


Figura 2.45.- Reclasificación del raster de alturas en rangos cualesquiera.

2.2.3.- Algebra de imágenes

Una de las herramientas más útiles de geoprocésamiento proporcionadas por Spatial Analyst es la calculadora raster que viene incorporada en dicha extensión. La figura 2.46 muestra la ventana de dialogo de la calculadora raster y se muestra como una herramienta útil y potente para el análisis raster. Esta nos provee de forma facil e interactiva una serie de funciones que van desde operadores aritméticos, operadores booleanos y funciones predefinidas. Esta herramienta se sustenta en las operaciones de álgebra de archivos matriciales, definidas como las operaciones algebraicas que se realizan sobre capas de son aplicables a cada pixel dentro de la capa raster. Adicionalmente las operaciones podría realizarse también a los píxeles vecinos o a todo el conjunto de píxeles. La Calculadora raster se divide en las siguientes secciones:

1. Zona de selección de capas raster.
2. Zona de Selección de operadores
3. Zona de escritura de la operación o conjunto de operaciones de álgebra de mapas

La ventana de dialogo de la calculadora raster se muestra a continuación.

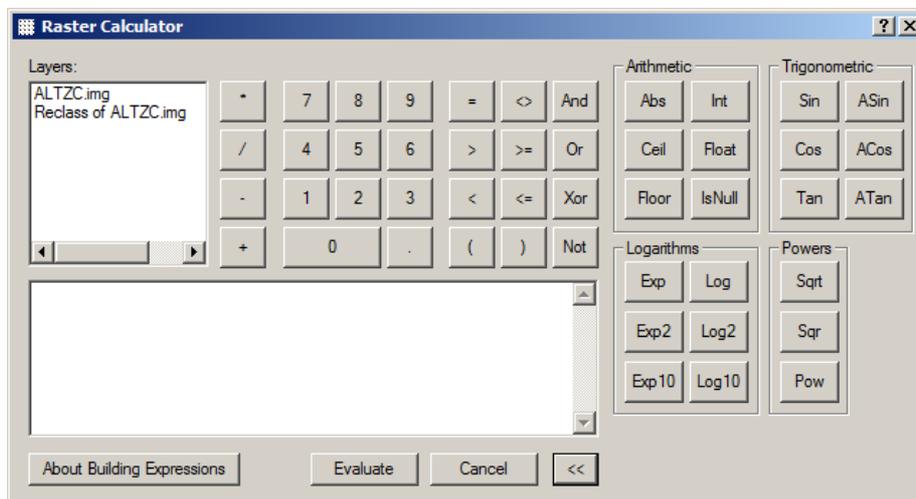


Figura 2.46.- Calculadora raster (Raster Calculator) de Spatial Analyst.

2.2.4.- Interpolación espacial

La interpolación espacial la podemos definir como un procedimiento matemático que es utilizado para estimar el valor de una variable o atributo en una localidad específica a partir de valores obtenidos de puntos vecinos, ubicados al interior del área de estudio. La interpolación normalmente es utilizada partiendo de un número finito de observaciones en terreno, por ejemplo variables derivadas de estudios de suelos, los cuales posteriormente son transformados a un espacio continuo de forma de conocer su patrón espacial que sea comparable con las observaciones puntuales de base en cuanto a su tendencia espacial (Burrough y McDonnell 1998).

La interpolación es un proceso matemático utilizado para estimar y predecir la distribución espacial de una variable a partir de una muestra. Normalmente a la predicción del valor se le denomina extrapolación, debido a que la estimación de la variable va más allá de los límites de la muestra. En esta sección se analizarán los métodos de interpolación globales y locales.

Interpolación por tendencia.

La forma más conveniente de estimar la distribución espacial de una variable es mediante el uso de variables auxiliares, que describen satisfactoriamente la variable de interés. La idea general es encontrar una función que de cuenta de la tendencia espacial de la variable, para ello el método se basa en el uso de regresiones múltiples. Esta puede ser encontrada a partir del método de los mínimos cuadrados o por minimización. El caso más simple es la tendencia espacial de la variable, de tal forma que esta puede ser representada por

$$Z(x, y) = \sum b x^\gamma y^\delta \quad (2.22)$$

Si usamos variables auxiliares la ecuación anterior puede ser escrita como

$$Z(x, y) = \sum_k b_k y_k(x, y) \quad (2.23)$$

donde $y_k(x, y)$ es una variable auxiliar, y b_k es una constante. Esta ecuación muestra el hecho que una variable puede depender linealmente de otras.

Interpolación con ponderación con la distancia

Este método se basa en la premisa de que los puntos más próximos a la muestra son más parecidos a ella. Además a medida que me alejo del punto muestral, menos parecidos a él son los demás puntos. De tal forma que existe una relación de parentesco entre un punto muestral y sus vecinos. Esa relación de parentesco queda expresada por una función ponderada con la distancia. El valor que tomara un punto desconocido, pero en la vecindad del punto muestral será la media ponderada por la distancia. Matemáticamente esto se expresa por la relación

$$Z(x, y) = \frac{\sum_{i,j} z(i, j) W(i, j)}{\sum_{i,j} W(i, j)} \quad (2.24)$$

donde $Z(x,y)$ es el valor interpolado de un punto no muestral, $z(i,j)$ es el valor de un punto muestral al interior de un radio de búsqueda definido, y $W(i,j)$ son los pesos estadísticos asignados y dados por

$$W(i, j) = \frac{1}{D(i, j)^n} \quad (2.25)$$

donde $D(i,j)$ corresponde a la distancia euclidiana desde el punto a considerar y un punto muestral al interior de la vecindad definida, y n es un exponente. Usualmente el exponente usado es 2, en la figura 2.47 muestra la función W para dos exponentes.

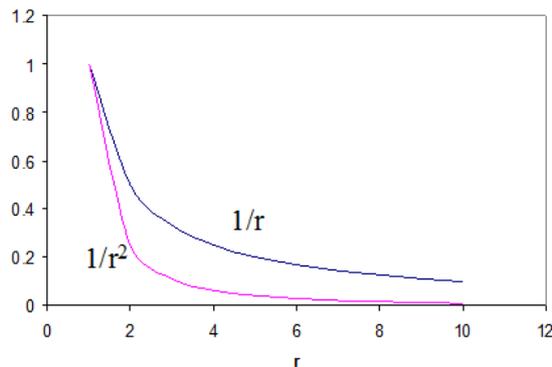
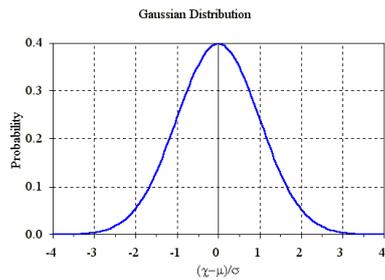
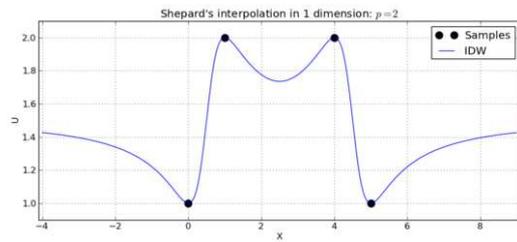


Figura 2.47.- Función definida como inverso al cuadrado de la distancia para usar como peso estadístico en la interpolación ponderada por la distancia.

Otro aspecto importante respecto de las funciones de peso W es que es posible utilizar aquellas que no se indeterminen en el punto, como la función Gaussiana o la Shepard, entre algunas.



(a)



(b)

Figura 2.48.- Kernels alternativos para usar como funciones W en la interpolación.

También es posible utilizar un número máximo de vecinos y/o una distancia máxima para hacer la interpolación, de esta forma podemos asegurarnos que solo los vecinos más cercanos tienen un peso significativo en la estimación (Figura 2.49).

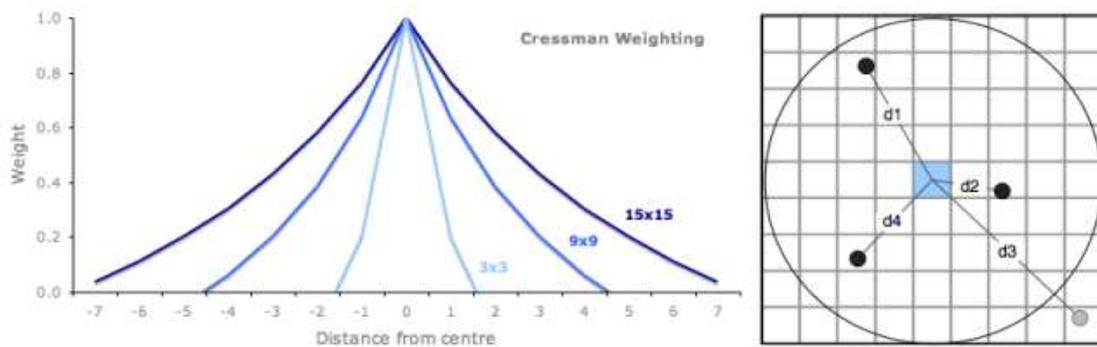


Figura 2.49.- Vecindad utilizada para la interpolación.

Interpolación segmentaria

Este tipo de interpolación también es llamada spline, y deriva su nombre de la forma como se dibujaba una curva, usando un curvígrafo. La idea es usar segmentos diferentes con ajustes polinomiales diferentes, esto es interpolar diferenciadamente por segmentos homogéneos. Específicamente es aplicar polinomios de orden inferior a diferentes subconjuntos de datos. Estos polinomios conectores reciben el nombre de funciones de interpolación segmentaria (spline functions). La figura siguiente muestra el concepto de spline, derivado de las antiguas herramientas de dibujo técnico como el curvímetro y la cercha, donde se podría generar la curva teórica que unía los puntos de forma exacta o con alguna tolerancia asociada a la tendencia de los puntos.

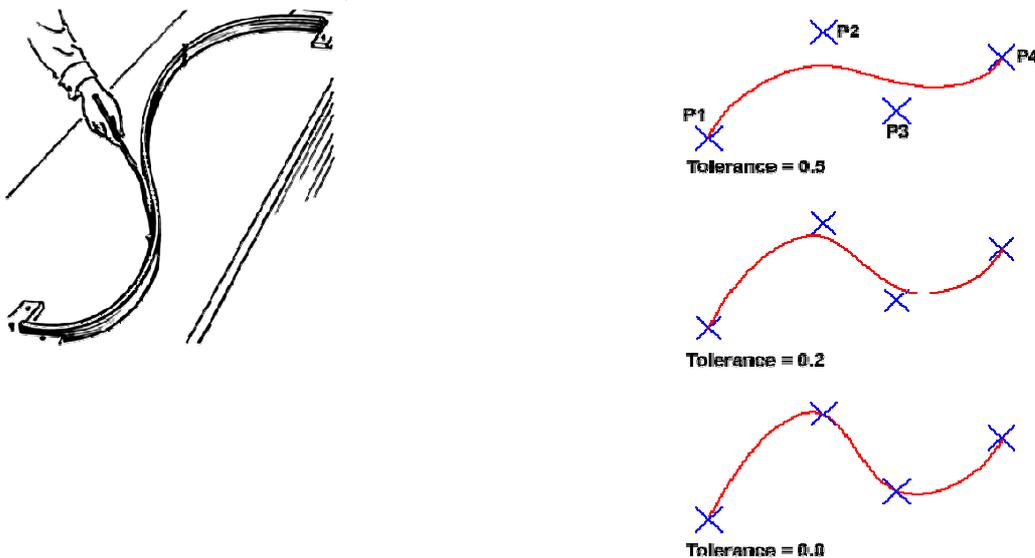


Figura 2.50.- Spline, y deriva su nombre de la forma como se dibujaba la curva teórica, usando un curvígrafo (Cercha).

Triangulación

Este tipo de interpolación comienza en la construcción de una red de triángulos irregulares (Triangulated Irregular Network TIN). Esto tiene la peculiaridad de que no se exige continuidad estadística de la superficie a estimar. Además se puede construir incorporando una variedad de estructuras auxiliares. Este método se adapta muy bien a la distribución de los datos y su densidad. Finalmente conserva los datos que son usados en sus vértices. La creación de un TIN se compone de dos pasos particulares, la triangulación propia y la

selección de los puntos a usar. En el caso de los SIG, el método más usado es el de la triangulación de Delaunay.

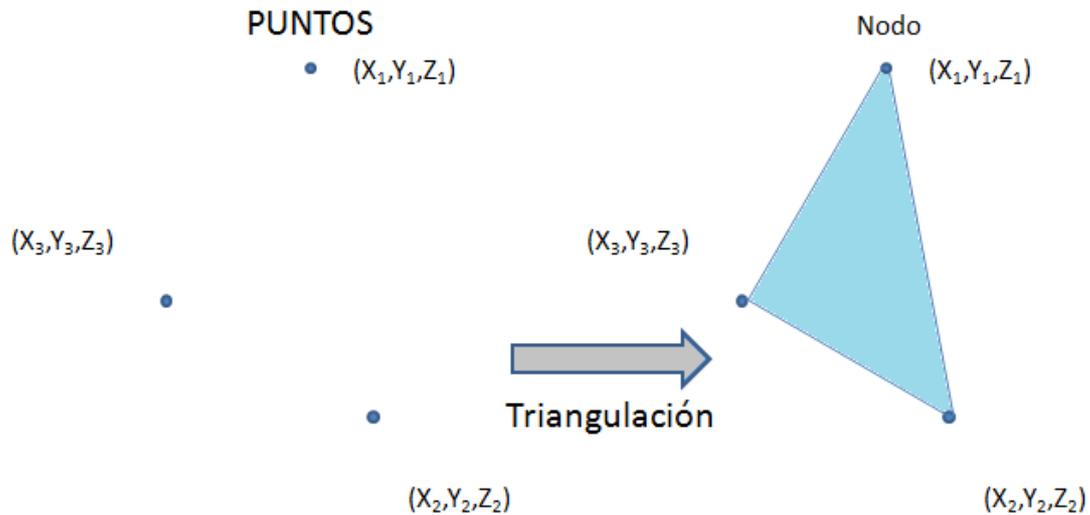


Figura 2.511.- Esquema de la construcción de una red de triángulos irregulares a partir de puntos.

La forma más simple de construir un TIN es a partir del uso de todos los vértices y nodos de las curvas o puntos digitales. Pero esto no es tan deseable, en efecto esto genera una enorme cantidad de elementos y la redundancia debida a la digitalización que no hacen un aporte significativo. Los métodos de triangulación más utilizados pueden agruparse en las siguientes clases

a.- Inserción incremental: Comienza con una triangulación mínima y progresiva y selectivamente se le van añadiendo nuevos puntos.

b.- Reducción selectiva : Consiste en la eliminación de puntos a partir de un modelo masivo mediante criterios de incremento mínimo del error.

La figura 2.51 muestra una representación esquemática de la construcción de una red de triángulos irregulares a partir de puntos, e cambio la figura 2 muestra una triangulación de Delaunay realizada a partir de un conjunto de puntos tomados al azar desde un modelo digital de elevación.

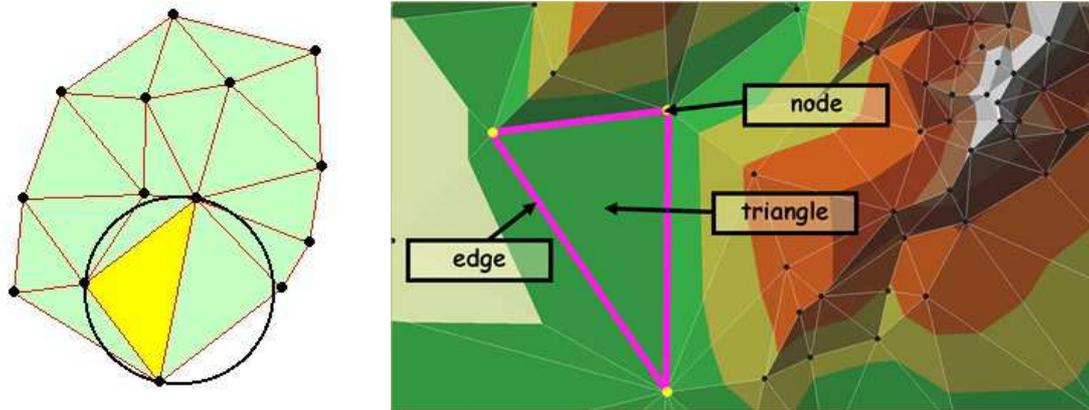


Fig. 2.52.- Triangulación de Delaunay de un conjunto de puntos

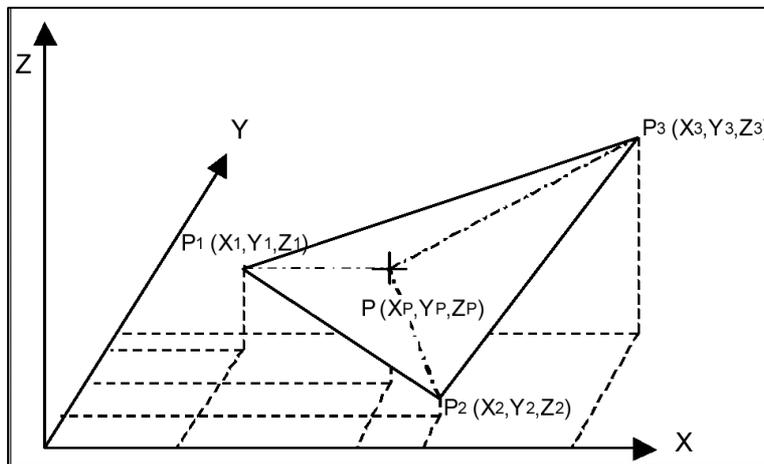


Fig 2.53.- Esquema que muestra la estimación de un valor al interior de un triángulo.

La interpolación o la estimación del valor de Z en el punto P , viene dado por

$$Z(P) = \lambda_1 \cdot Z_1 + \lambda_2 \cdot Z_2 + \lambda_3 \cdot Z_3 \quad (2.26)$$

donde λ son pesos que se utilizarán para la interpolación y que depende de la distancia.

Interpolación usando polígonos Thiessen de Voronoi

Como vimos en el capítulo de vectores, es un método simple desarrollado para estimar áreas de influencia, sin embargo además es usado para realizar interpolación entre puntos. En este caso la superposición subyacente que se emplea para establecer la función de interpolación, consiste en admitir que cada punto no muestral se parece, más que a ningún otro, al punto muestral más próximo. De este modo, la interpolación consiste simplemente en asignar a cada punto el valor de la variable del punto muestral más próximo a él. Es un procedimiento local ya que se usa un punto muestral en el cálculo de los valores de cada lugar. Los valores iniciales de los puntos muestrales no son alterados después del proceso de interpolación, de hecho son los mismos que existían antes. Pues evidentemente el punto muestral más cercano a uno del mismo carácter es el mismo.

2.2.5.- Modelos digitales del terreno

Un modelo digital de terreno (MDT) o modelo digital de elevación (MDE o DEM en inglés) es una representación matricial o raster de la topografía de un área de la tierra. La tabla siguiente muestra las características de algunos formatos disponibles en sitios de Internet

Nombre	Resolución	Cobertura geográfica	Editor	Postratamientos
DEM ASTER	30 m	La Tierra entera (bajo demanda)	NASA	No
DEM 1 grado	90 m	Estados Unidos	USGS	Si
DEM 7.5 minutos	10 y 30 m	Estados Unidos	USGS	Si
DEM CDED	23 m y 90 m	Canadá	CCOG	Si
GTOPO30	30" de arco (~ 1 km)	La Tierra entera	USGS/NASA	Si
DEM SDTS	10 y 30 m	Estados Unidos	USGS	si
NED	10 y 30 m	Estados Unidos	USGS	si
Visual DEM France*	75 m	Francia	IGN	Si
MNT BD Alti*	50 a 1.000 m	Francia	IGN	Si
Litto3D**	1 m	Zonas litorales francesas entre -10m y +10m	IGN/SHOM	Si
Shuttle Radar Topography Mission SRTM-3	90 m	80% de las tierras emergidas	NASA/NIMA	No
huttle Radar Topography Mission SRTM-1	30 m	États-Unis	NASA/NIMA	No
MOLA MEGDR	463 m	Marte (excepto zonas polares)NASA	Si	
Reference3D	30m	54 millones de km ² , 80 millones en 2014	IGN, Spot Image	Si
Nombre	Resolución	Cobertura geográfica	Editor	Postratamientos

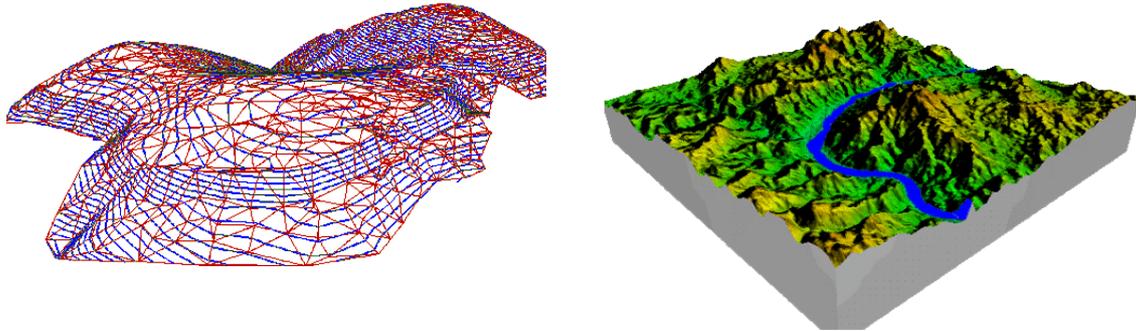


Figura 2.54.- El modelo digital del terreno es una representación numérica de la superficie.

En la literatura se muestran varios métodos para construir un MDT, pero los podemos clasificar en:

a) Métodos directos mediante Teledetección

- **Altimetría:** Se trata de instrumentos altimétricos montados en aviones o satélites artificiales orbitando la tierra. La hipótesis básica es que es posible determinar las diferencias de altitud entre la superficie terrestre y el vehículo que transporta el altímetro, y de esta manera estimar las altitudes en superficie.
- **Interferometría de imágenes radar:** Un sensor radar emite un pulso electromagnético que rebota en la superficie terrestre, y después el mismo satélite registra su regreso. Conociendo el tiempo de retardo del pulso y su velocidad puede estimarse la distancia entre satélite y terreno. En 1999 la NASA inició el proyecto SRTM (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) para elaborar un mapa topográfico de toda la Tierra a partir de este método.

b) Métodos directos de terreno

- **Topografía convencional:** Mediante el uso de estaciones topográficas en el campo terreno, se levantan los datos de altura, los cuales posteriormente son interpolados para construir las curvas de nivel.

- **Sistemas de Posicionamiento GPS:** Permite estimaciones suficientemente precisas de latitud, longitud y altitud de un punto, posteriormente deben interpolarse los datos

Métodos indirectos:

- **Restitución fotogramétrica:** Es realizada a partir de fotografía aérea analógica o digital utilizando la vista terrestre desde dos ángulos de observación.
- **Digitalización de curvas de nivel:** Un mapa ya confeccionado en papel es convertido en formato digital desde un escáner o una mesa digitalizadora. Posteriormente se deben interpolar entre las curvas para obtener el MDT.

Los modelos digitales de terreno son construidos a partir de diversos métodos numéricos de interpolación de puntos de alturas o curvas de nivel. El método más comúnmente utilizado es la triangulación con interpolación lineal, método implementado en ArcMap en **3D Analyst**.

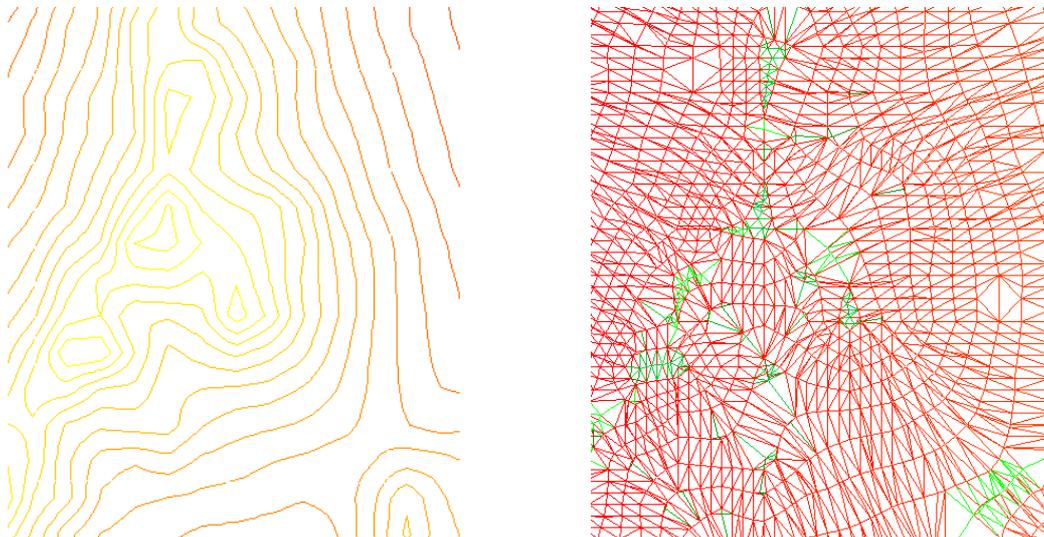


Figura 2.55.- Ejemplo de un grupo de curvas de nivel junto a su correspondiente triangulación de Delaunay.

La figura 2.55 muestra un zoom a un archivo de curvas de nivel cada 50 metros del norte de Chile. A partir de ellas realizaremos la construcción del TIN (Red de

Triángulos Irregulares o Triangulated Irregular Network), desde **3D Analyst-> Create/Modify TIN-> Create TIN from features...**, donde se despliega la siguiente ventana.

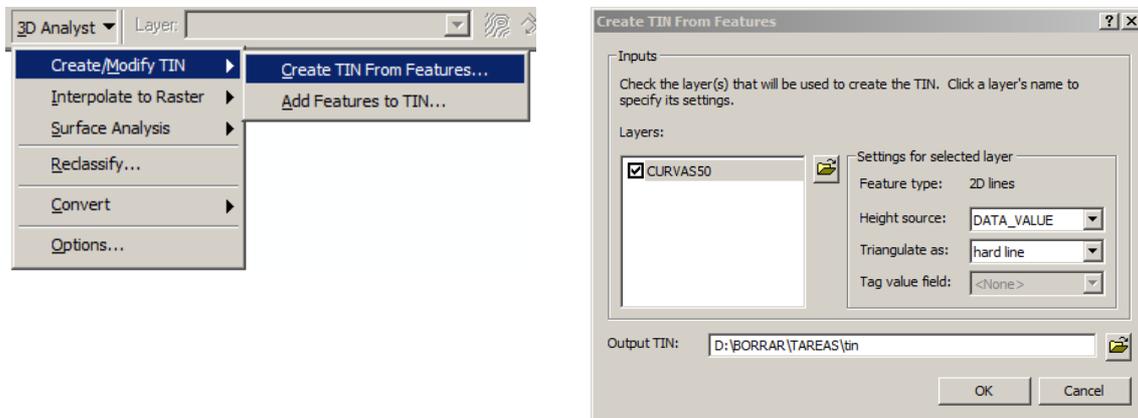


Figura 2.56.- Creación de un TIN a partir de un conjunto de curvas de nivel a partir de 3D Analyst-> Create/Modify TIN-> Create TIN from features.

La figura siguiente muestra el resultado del TIN, donde se muestra junto a las curvas de nivel originales. A pesar de su apariencia aún no es un modelo digital de elevación, pues ahora hay que convertir el TIN en una matriz de datos continua que represente a las alturas.

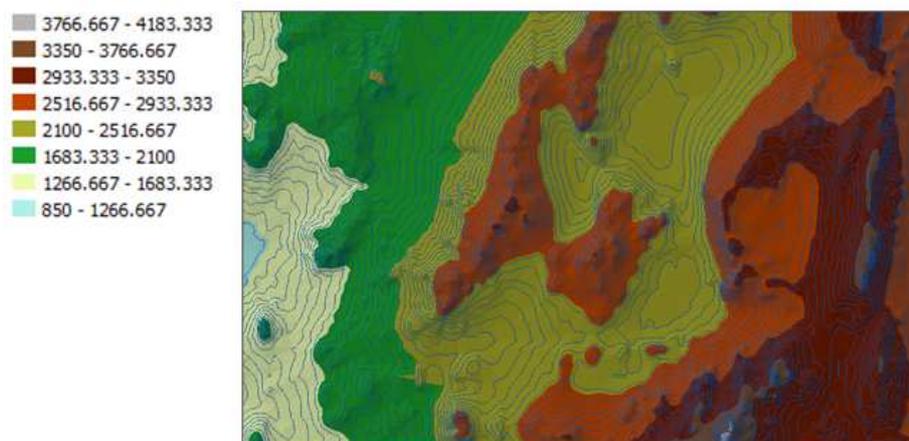


Figura 2.57.- Resultado del proceso de creación de TIN.

Para realizar lo anterior es necesario convertir el TIN en un archivo raster, lo que se realiza mediante **3D Analyst-> Convert-> TIN to raster**. La figura siguiente muestra el resultado de convertir el TIN generado en el ejemplo anterior utilizando la herramienta TIN to raster, cuyo resultado es un GRID con valores continuos de alturas o modelo digital de elevación.

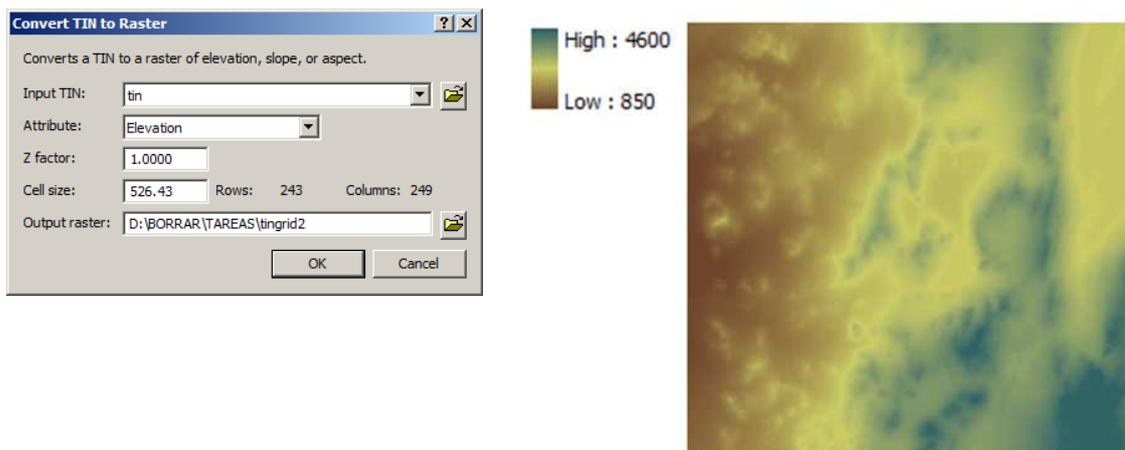


Figura 2.58.- Resultado del proceso de conversión de TIN a raster.

A partir del DEM es posible calcular diversas variables derivadas del mismo como pendientes, exposición, curvatura, rugosidad, unidades topográficas, iluminación, visibilidad y delimitación de cuencas, entre algunos. La mayoría de los procesos que describiremos más adelante calculan las tendencias topográficas del pixel utilizando un kernel de 3x3, o más si fuese necesario, como lo muestra la figura siguiente.

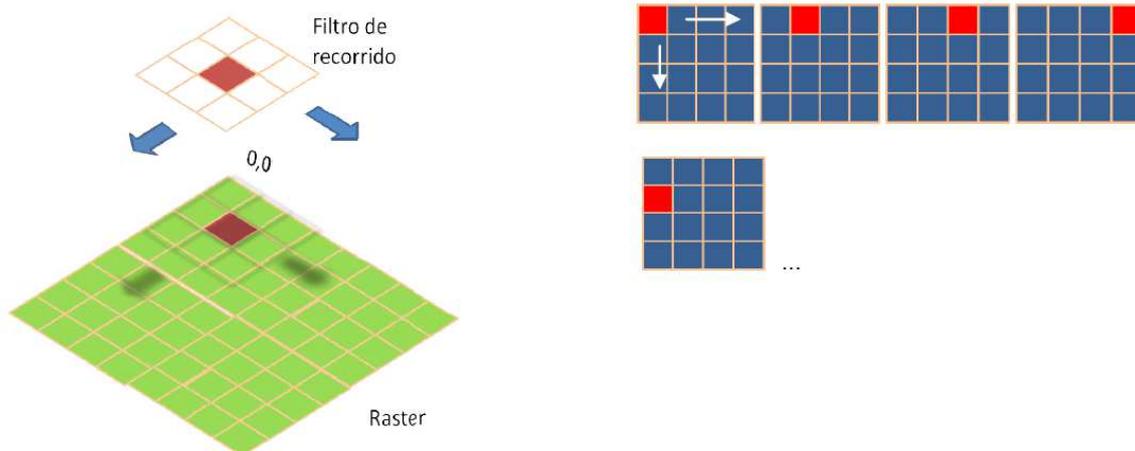


Figura 2.59.- Kernel utilizado para estimar variables derivadas del MDT.

Pendiente(Slope): Se define como "el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical". El cálculo es relativamente sencillo, sin embargo existen diferentes métodos para su estimación, y todos arrojan resultados similares pero diferentes. Por ello es importante conocer el algoritmo de calculo que está en el SIG que se está usando.

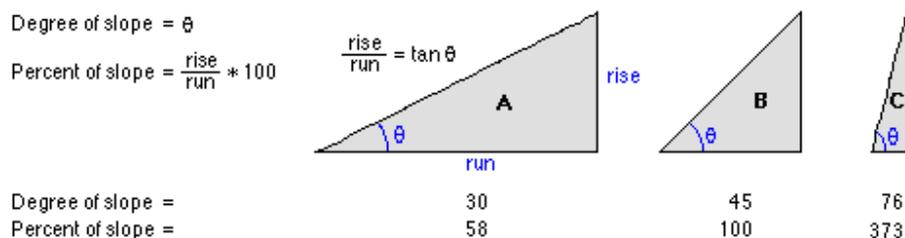


Figura 2.60.- Ejemplos de cálculo de pendiente en grados y porcentaje.

El método utilizado por ArcMap para el cálculo de la pendiente es

$$\text{slope_degrees} = 57.29578 \cdot \text{Tan}^{-1} \left[\sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \right] \quad (2.27)$$

donde los coeficientes cambian el territorio, pues dependen de las variaciones locales de la altura.

a	b	c
d	e	f
g	h	i

$$\left(\frac{dz}{dx}\right) = \frac{[(c + 2f + i) - (a + 2d + g)]}{8 \cdot x_cellsize} \quad (2.28)$$

$$\left(\frac{dz}{dy}\right) = \frac{[(g + 2h + i) - (a + 2b + c)]}{8 \cdot y_cellsize}$$

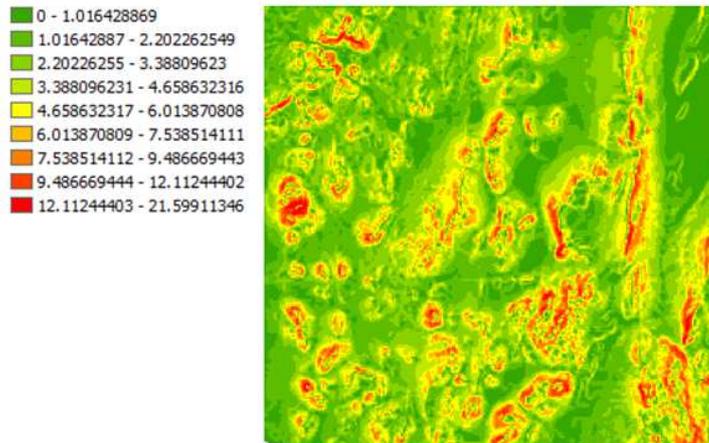


Figura 2.61.- Pendiente del terreno calculada en grados.

Exposición(Aspect): Este parámetro también se llama orientación del terreno, que es el ángulo medido en la dirección horaria desde el norte (acimut) donde se produce la máxima pendiente. Al igual que la pendiente, esta puede ser calculada a partir del MDT utilizando los 8 vecinos que rodean a la celda en la que se desea realizar el cálculo. El algoritmo implementado en ArcMap es el siguiente

$$\text{aspect} = 57.29578 \cdot \text{atan2} \left[\frac{dz}{dy}, -\frac{dz}{dx} \right] \quad (2.29)$$

donde

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & y \geq 0, x < 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & y < 0, x < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & y > 0, x = 0 \\ -\frac{\pi}{2} & y < 0, x = 0 \\ \text{undefined} & y = 0, x = 0 \end{cases}$$

Para el cálculo final debe tomarse en cuenta que

```

if aspect < 0 then
  cell = 90.0 - aspect
else if aspect > 90.0 then
  cell = 360.0 - aspect + 90.0
else
  cell = 90.0 - aspect
end if

```

Nótese que para una superficie plana la exposición toma el valor de -1 (Color gris), donde el resto de los valores se le asigna un color dado por la figura adjunta.

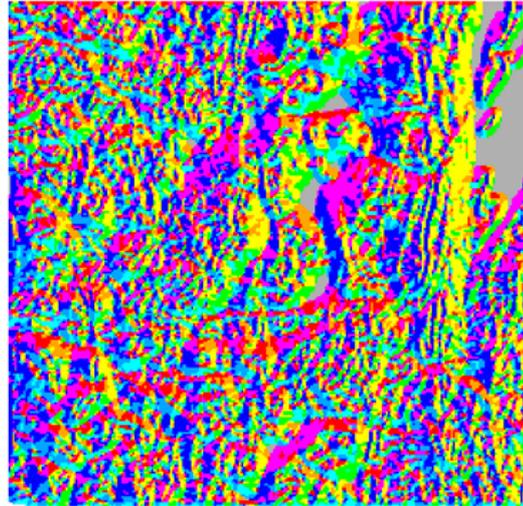
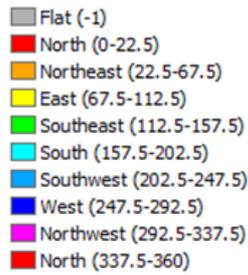
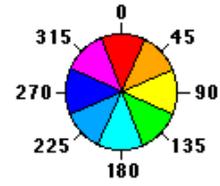
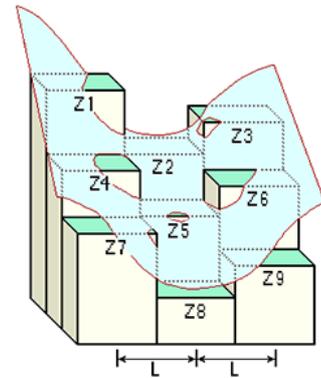


Figura 2.62.- Exposición del terreno calculada en grados respecto al norte (0°).

Curvatura: Corresponde al valor de la segunda derivada de la superficie celda a celda. La figura adjunta muestra un esquema del procedimiento de cálculo de la curvatura, basado en un plano de tendencia. Para el cálculo en cada celda se realiza una transformación polinómica de cuarto orden de la forma:



$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (2.30)$$

donde los coeficientes A, B, C, D, E, F, G, H e I, son calculados por

a	b	c
d	e	f
g	h	i

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\left[\frac{(Z1+Z3+Z7+Z9)}{4} - \frac{(Z2+Z4+Z6+Z8)}{2} + Z5 \right]}{L4} & (2.31) \\
 B &= \frac{\left[\frac{(Z1+Z3-Z7-Z9)}{4} - \frac{(Z2-Z8)}{2} \right]}{L3} \\
 C &= \frac{\left[\frac{(-Z1+Z3-Z7+Z9)}{4} + \frac{(Z4-Z6)}{2} \right]}{L3} \\
 D &= \frac{\left[\frac{(Z4+Z6)}{2} - Z5 \right]}{L2} \\
 E &= \frac{\left[\frac{(Z2+Z8)}{2} - Z5 \right]}{L2} \\
 F &= \frac{[-Z1+Z3+Z7-Z9]}{4L2} \\
 G &= \frac{(-Z4+Z6)}{2L} \\
 H &= \frac{(Z2-Z8)}{2L} \\
 I &= Z5
 \end{aligned}$$

Finalmente la curvatura se estima por

$$\text{Curvature} = -200 \cdot (D + E) \quad (2.32)$$

La herramienta se encuentra en **ArcToolBox, Spatial Analyst Tools-> Surface-> Curvature.**

La curvatura puede interpretarse de acuerdo a la siguiente regla:

- curvatura > 0.2, superficie convexa.
- curvatura entre -0.2 y 0.2, superficie plana.
- curvatura < -0.2, superficie cóncava.

Una vez que la curvatura es reclasificada es conveniente homogeneizar los resultados aplicando un filtro de mayoría.

La figura 2.63 muestra una visualización de la curvatura, donde la idea es utilizar esta cobertura calculada para describir las características físicas de una cuenca de drenaje para explicar los procesos de erosión y escorrentía. Teóricamente la curvatura del perfil afecta la aceleración y desaceleración del flujo superficial lo que puede

influir en la erosión y la sedimentación. La curvatura de la superficie se relaciona entonces con los conceptos de convergencia y divergencia del flujo.

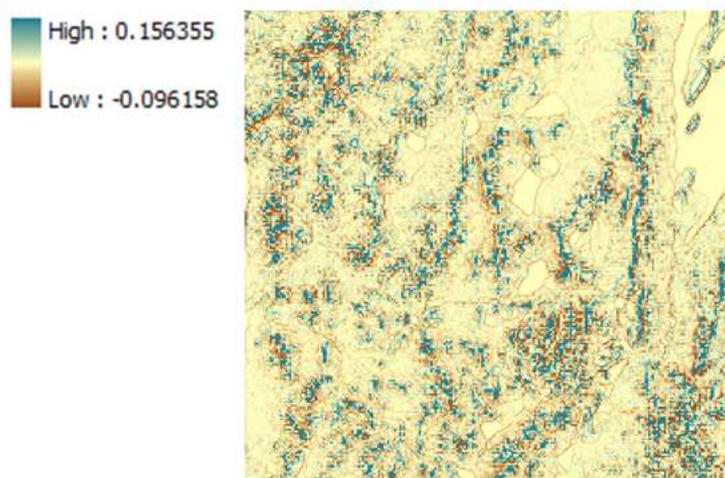


Figura 2.63.- Curvatura del terreno.

Unidades Topográficas: Estas corresponden realmente a una clasificación de las formas del relieve. Esta puede ser estimada a partir de los diferentes parámetros estudiados anteriormente, como la pendiente, exposición u orientación y curvatura. Todas estas nuevas capas de información se unen al modelo digital del terreno para realizar esta clasificación. De esta forma cada celda de la matriz altitud, tiene, además, asociado estos valores adicionales que la caracterizan desde un punto de vista geométrico, pero a partir del cual es posible definir unidades de pseudo paisaje. Un aspecto importante es que todas las variables auxiliares calculadas a partir del MDT poseen una fuerte dependencia de la resolución. La tabla siguiente muestra una descripción de los elementos de una caracterización morfométrica del terreno.

Elemento	Descripción
Punta	Convexo en todas las direcciones
Cresta	Convexo en una dirección ortogonal a una línea sin curvatura.
Collado	Convexo en una dirección ortogonal a una zona cóncava.
Ladera	Pendiente sin concavidad.
Plano	Pendiente nula y sin curvatura.
Canal	Cóncavo en una dirección ortogonal a una línea sin curvatura
Sumidero	Cóncavo en todas direcciones.

La definición anterior es posible hacerla operativa en una clasificación del MDT a partir de sus propiedades derivadas (pendiente, exposición u orientación y curvatura). La siguiente tabla es una recomendación para la caracterización de la morfometría superficial (Wood, 1996).

Forma	Pendiente	Curvatura	Conv _{max}	Conv _{min}
Punta	0	#	+	+
Cresta	0	#	+	0
	+	+	#	#
Collado	0	#	+	-
Ladera	+	0	#	#
Plano	0	#	0	0
	+	0	#	#
Canal	0	-	#	#
	+	#	-	-
Sumidero	0	#	#	#
	+	-	#	#

El esquema de clasificación propuesto por Wood se encuentra basado en 6 formas tipo que se caracterizan, de un modo semicuantitativo, de acuerdo a lo mostrado en la tabla anterior:

- + significa mayor que 0
- significa menor que 0
- # indiferente

Sin embargo es muy necesario definir los umbrales para cada variable a clasificar. El cálculo se realiza a partir de un kernel o ventana espacial de tamaño adaptativo.

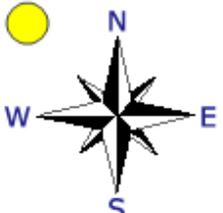
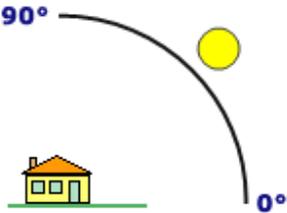
Los MDT y sus propiedades derivadas (pendiente, exposición u orientación y curvatura) son variables o factores de gran importancia en la aplicación un número significativo de procesos ambientales (Temperatura, Precipitación, Radiación solar, Hidrología superficial, erosión, modelación de nicho y hábitat, etc.). Por ello es posible utilizar el MDT y sus propiedades derivadas como variable independiente para estimar otras variables mediante procedimientos de regresión global o local.

Iluminación:

Crea un raster de iluminación o de relieve sombreado a partir del MDT utilizando para su cálculo el ángulo de la fuente de iluminación, con ello genera las respectivas sombras. Esta herramienta genera entonces la iluminación hipotética de una superficie estimando los valores de iluminación para cada pixel del MDT usado. La

forma de proceder es configurando la posición de una fuente de luz (Sol) y con este dato se calculan los valores de iluminación de cada pixel respecto de las celdas vecinas. Esta cobertura de iluminación mejora la visualización de una superficie y mejora el análisis producto de esta visualización gráfica. Por defecto, la distribución espacial de la iluminación (Luz y sombra) se representa con tonalidades de grises asociados a números enteros que van de 0 a 255 (aumenta de negro a blanco).

El cálculo de la iluminación se realiza conociendo la geometría solar, que son el acimut y la elevación solar, que se describen a continuación.

	
<p>Acimut: "Es la dirección angular del sol, medida de 0 a 360 grados desde el Norte en sentido de las agujas del reloj. Un acimut de 90° es Este. El acimut predeterminado es 315° (NO)".</p>	<p>Elevación Solar: "La elevación solar es el ángulo de la fuente de iluminación por encima del horizonte. Las unidades se expresan en grados, de 0 (en el horizonte) a 90 (arriba). El valor predeterminado es 45 grados".</p>

El algoritmo de cálculo es

$$\text{Hillshade} = 255 \cdot (A + B) \quad (2.33)$$

$$A = \text{Cos}(\text{Zenith_rad}) \cdot \text{Cos}(\text{Slope_rad})$$

$$B = \text{Sin}(\text{Zenith_rad}) \cdot \text{Sin}(\text{Slope_rad}) \cdot \text{Cos}(\text{Azimuth_rad} - \text{Aspect_rad})$$

donde Slope es la pendiente, Aspect es la exposición, en ambos casos del correspondiente pixel donde se está realizando el cálculo, ambos deben ingresarse en radianes a la ecuación 2.33.

ArcMap asigna el valor 0 a la iluminación de salida si el cálculo de ecuación 2.33 da valores negativos. El ángulo cenital en grados es

$$\text{Zenith_deg} = 90 - \text{Altitude}(\alpha) \quad (2.34)$$

donde la elevación solar (Altitude) α se calcula a partir de

$$\text{Sin}(\alpha) = \text{Sin}(\lambda) \cdot \text{Sin}(\delta) + \text{Cos}(\lambda) \cdot \text{Cos}(\delta) \cdot \text{Cos}(h_s) \quad (2.35)$$

donde λ es la latitud del pixel, δ es la declinación solar en el día que se está calculando la iluminación y h_s es el ángulo horario, que depende de la hora del día.

$$h_s = 15 \cdot |12 - \text{hora}| \quad (2.36)$$

donde la hora corresponde al tiempo de reloj para un día de 24 horas, desde la hora de la salida del sol hasta la puesta del sol. El sol avanza aproximadamente del orden de $15^\circ/\text{hora}$ durante el día, por lo cual de esta forma es posible estimar el ángulo horario a una determinada hora del día. Hay que tener en cuenta que si Azimuth ≥ 360 , entonces, Azimuth = Azimuth - 360.

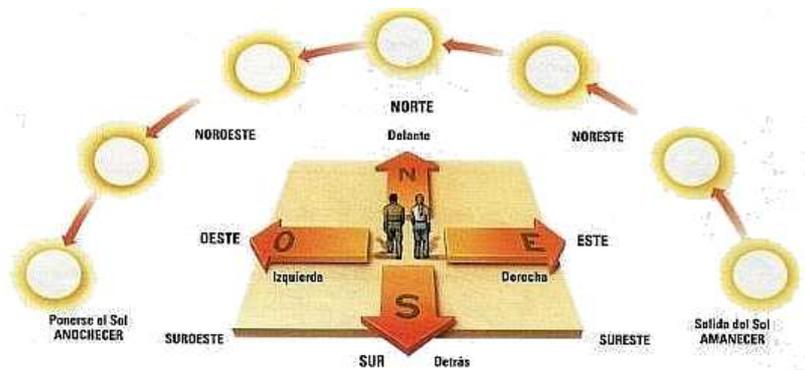
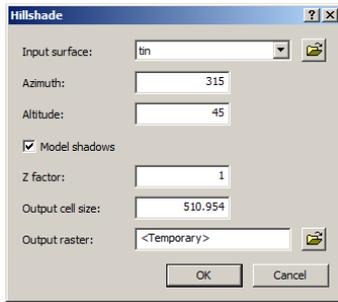


Figura 2.64.- Recorrido del sol durante un día que complet 180° en 12 horas aproximadamente, barriendo a una velocidad media de $15^\circ/\text{hora}$.



High : 245.573
Low : 181.013

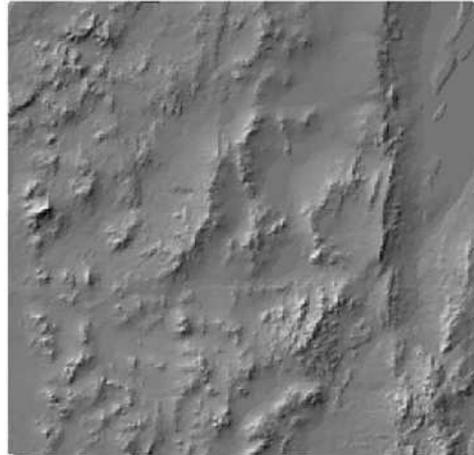


Figura 2.65.- Iluminación de una superficie por medio de un algoritmo numérico llamado Hillshade(Spatial Analyst Tools-> Surface-> Hillshade).

Visibilidad:

El cálculo de la visibilidad es conceptualizado como el área que un observador puede ver en todas direcciones desde un punto específico al interior de un MDT. Esta herramienta resulta de utilidad para el diseño de variadas redes, por ejemplo para la instalación de torres de monitoreo de incendios forestales, o para la ubicación de rellenos sanitarios al interior de un territorio. El algoritmo de cálculo parte de la base que dos puntos serán mutuamente visibles si la línea recta que los une no tiene obstáculos, esto es la altitud del terreno se encuentra bajo la cota de altitud de la línea de observación.

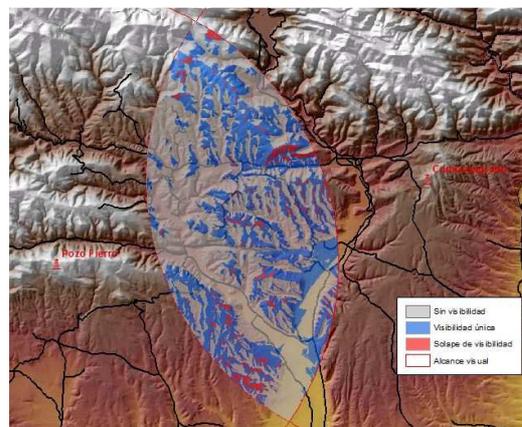
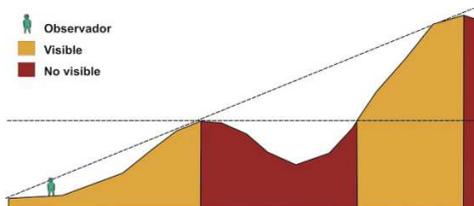


Figura 2.66.- Visibilidad desde un punto sobre un MDT y cuenca visual.

Asociado a la visibilidad se encuentra el concepto de cuenca visual desde un punto base ubicado sobre un MDT, que se encuentra definida como el conjunto de puntos sobre el MDT que son visibles por un observador ubicado en dicho punto base.

Por ejemplo este concepto resulta muy útil al momento de definir sitios de observación asociados a áreas de interés turístico. Otro aspecto para un posible uso es una posible la evaluación del impacto visual de intervenciones en el territorio y que potencialmente puedan tener efectos negativos sobre el paisaje. En general, un modelo de este tipo puede servir para la toma de decisiones, ya que es un cálculo objetivo y confiable, pero además le permite al usuario conocer y comparar diferentes alternativas sobre la incidencia visual de una intervención en el territorio.

Para aplicar esta herramienta hay que ir a **ArcToolBox->Spatial Analyst Tools-> Surface-> Viewshade** o usar la extensión **3D Analyst-> Surface Analyst-> Viewshade**.

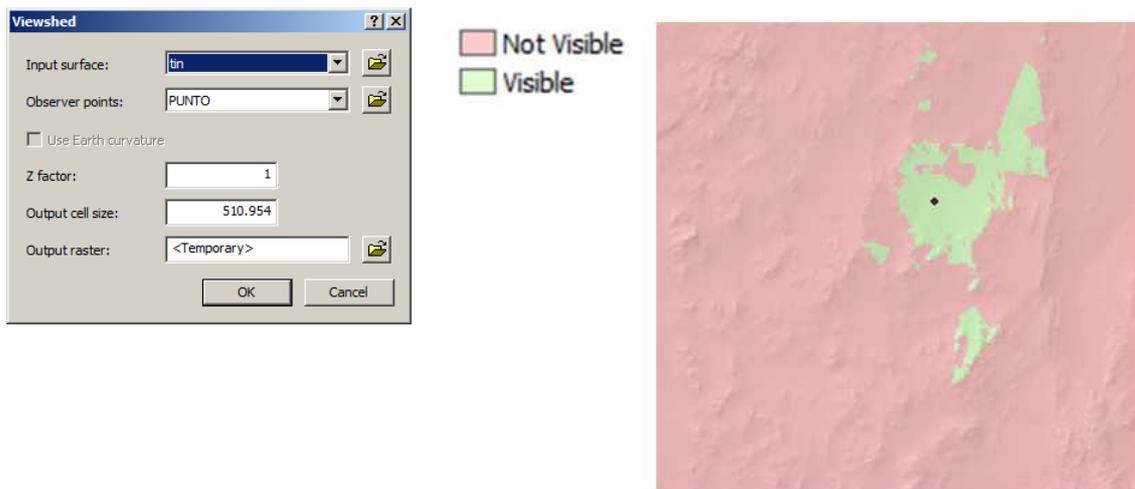
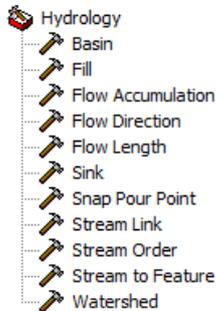


Figura 2.67.- Cálculo de la cuenca visual utilizando la herramienta Viewshed.

Delimitación de cuencas:

Una cuenca hidrográfica la podemos definir como un espacio dentro del territorio cuya delimitación está condicionada por la línea divisoria de las aguas. Internamente la cuenca corresponde a una red o sistema hídrico que conducen sus aguas a un cauce

principal. La cuenca es en sí un ente tridimensional, que integra las interacciones entre el uso del suelo, la litología y su singularidad topográfica.



ArcMap trae herramientas para estudios hidrológicos, que queda ubicada en **ArcToolBox->Spatial Analyst Tools->Hydrology**. Todas estas herramientas son de bastante utilidad en estudios ambientales. Entre los cálculos que puede realizar están el flujo, tanto en dirección como en acumulación, delimitación del área de la cuenca, entre algunas. Para delimitar las cuencas es necesario calcular primeramente la dirección del flujo superficial.

Las figuras 2.68 y 2.69 muestran las ventanas en ArcMap para **Flow Direction** y **Basin**, ambos en **ArcToolBox->Spatial Analyst Tools-> Hydrology**.

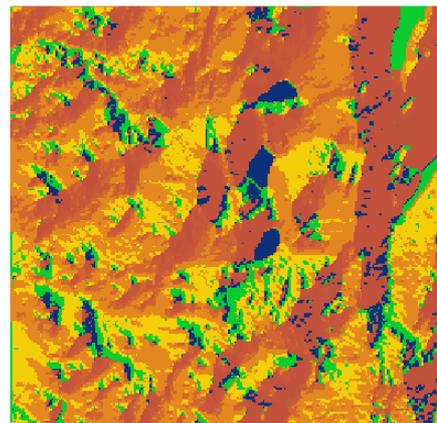


Figura 2.68.- Delimitación de las cuencas hidrográficas en un territorio.

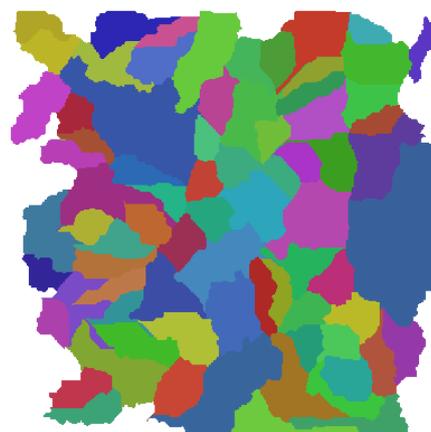
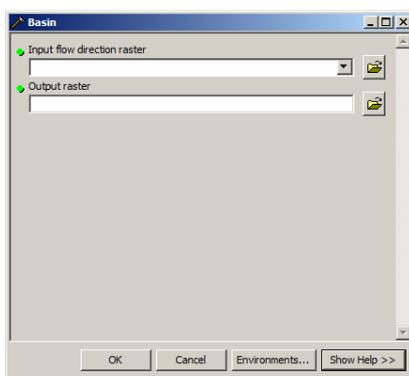


Figura 2.69.- Delimitación de las cuencas hidrográficas en un territorio.

2.2.6.- Conversión Raster-Vector

Como en el capítulo de molo vectorial revisamos la transformación vector->raster, también es posible la ruta opuesta raster->vector. El procedimiento de conversión de un raster a vector y viceversa se encuentra en la extensión **Spatial Analyst -> Convert -> Raster To Features o Features To Raster.**

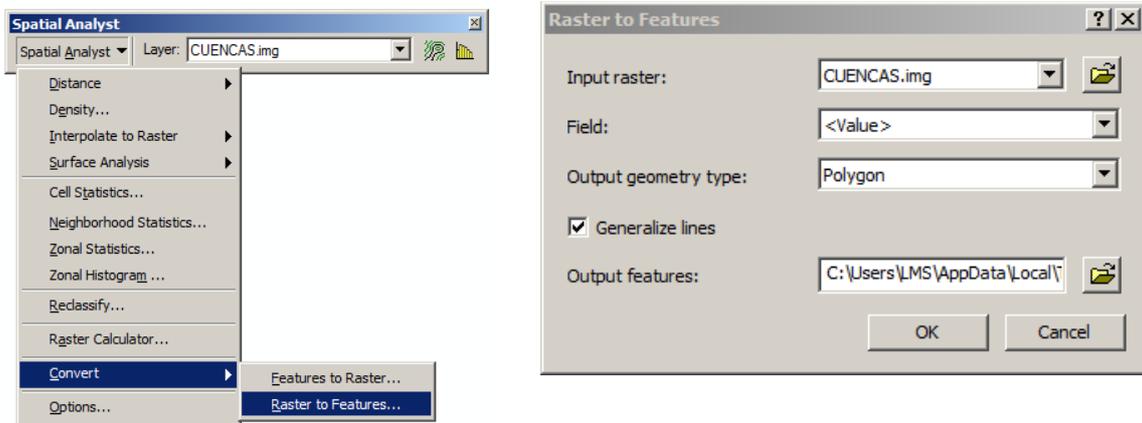


Figura 2.70.- Método para aplicar la conversión raster vector en Spatial Analyst.

Para la conversión Raster to Features debemos tener presente que esta conversión será posible si el archivo raster a convertir es de tipo discreto o temático. No es viable aplicar esta herramienta a archivos raster continuos, sin embargo si se clasifica será posible aplicar la conversión. Hay que notar que ArcMap aplicara un algoritmo de suavizado de los límites de las cuencas para darle una apariencia más estética.

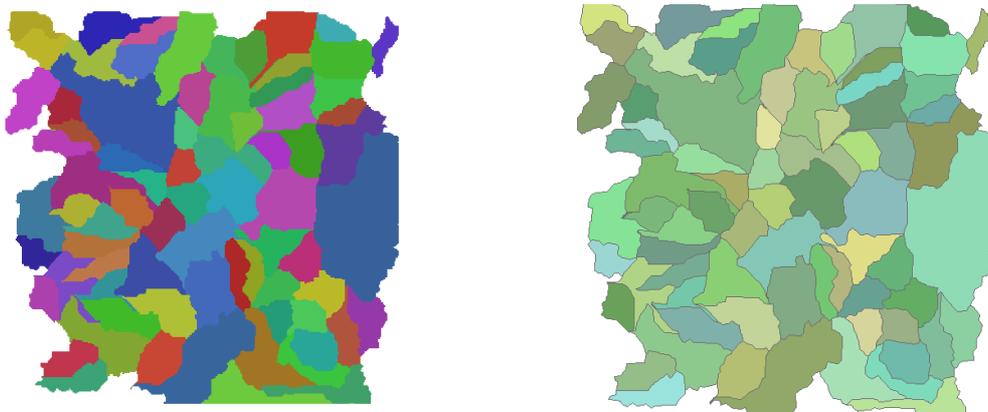


Figura 2.71.- Conversión de cuencas en formato raster a vectorial.