



Sistema de Información Geográfica Avanzado

**Ingeniero Agrimensor
Tecnólogo en Cartografía**

Modelos Digitales de Elevación & LIDAR (I)

- Un Modelo Digital de Elevación (MDE o DTM) es una **representación visual y matemática de los valores de altura de un terreno con respecto a un plano.**
- Permiten caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.
- Estos valores están contenidos en un modelo ráster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

Modelos Digitales de Elevación & LIDAR (II)

- Un terreno puede describirse como una función de dos variables continua $z = f(x,y)$; z es la cota del terreno en el punto de coordenadas (x,y) .
- En un MDE se aplica la función f sobre un dominio espacial concreto, D ; de ahí que un MDE puede describirse como $MDE = (D,f)$.
- En la práctica f no es una **función continua** sino que se resuelve a **intervalos discretos**; por lo que el MDE está compuesto por un **conjunto finito** elementos. En consecuencia: $MDE = \{(D,f)\}$.

Representación del relieve (I)

- La representación del relieve siempre ha tenido importancia relevante para conocer la información que existe acerca de los elementos en la superficie de la Tierra.
- Son de gran importancia para el análisis y estudios de muy diversa índole en los campos de ingeniería civil y ciencias de la tierra.
- El estudio de la forma de la superficie y los elementos presentes en el mismo constituye un importante insumo para muchos usuarios como cartógrafos, geólogos, hidrólogos, ingenieros, militares y ahora en la actualidad para los SIG.

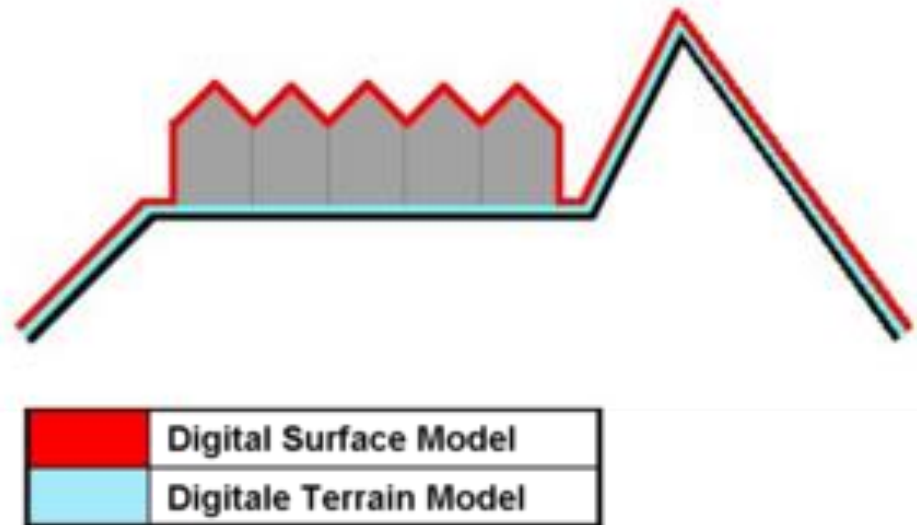
Representación del relieve (II)

- Desde su creación en la década de los 50 ha constituido un medio para el conocimiento y representación del terreno y para lograr análisis de los elementos presentes en el mismo mediante el uso de equipo y software especializado.



Representación del relieve (III)

- Estos modelos constituyen un medio para lograr la representación del relieve en forma muy versátil y funcional ya que a partir del mismo se puede conocer la conformación o morfología del terreno (MDT) sino también los elementos de origen antrópico y la vegetación presente en el mismo (MDS).



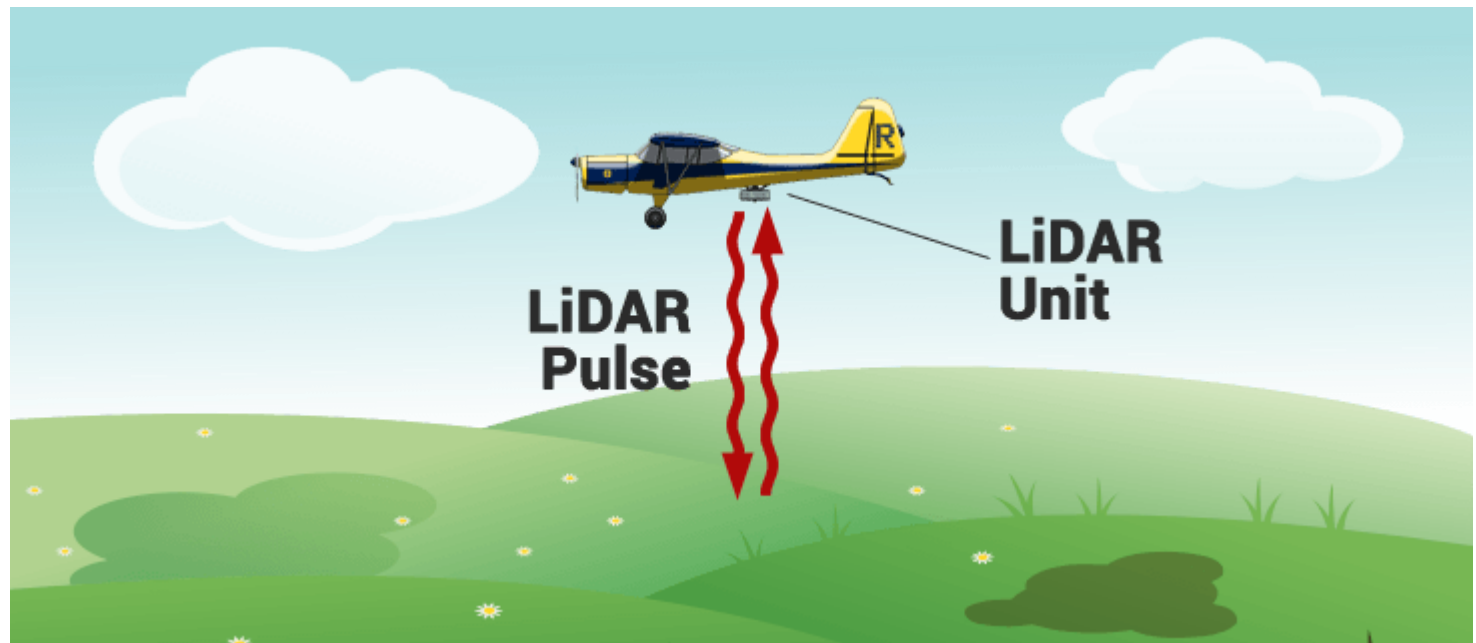
Representación del relieve (IV)

- Es posible derivar o generar información a partir de los modelos digitales de elevación que nos posibilita que tengamos más datos de apoyo para el cumplimiento de objetivos, toma de decisiones y desarrollo de proyectos relacionados con el relieve, los datos de apoyo derivados pueden ser curvas de nivel, corrientes de agua, mapas de pendientes, redes irregulares de triángulos (TIN), imágenes del relieve sombreado o mapa de sombras, puntos acotados de altura, modelos vectoriales de la altura de los elementos presentes en el terreno, líneas estructurales, entre otros.

DEM, DSM & DTM (I)

¿Qué es un Modelo Digital de Superficie (DSM)?

- En un sistema Lidar los pulsos de luz viajan hacia el suelo, rebotan y retornan siendo detectados por los sensores y devolviendo la distancia a la Tierra.



DEM, DSM & DTM (II)

¿Qué es un Modelo Digital de Superficie (DSM)?

- La tecnología LIDAR ofrece una enorme **nube de punto** con valores de elevación que varían.
- Estos valores de elevación pueden provenir de la parte superior de los edificios, copas de los árboles, líneas eléctricas y otros tipos de características.
- **Un DSM captura las características naturales y las construcciones (naturales y/o artificiales) sobre la superficie de la Tierra.**
- Un DSM es especialmente útil en el modelado 3D y es relevante en las telecomunicaciones, la planificación urbana, la aviación y la silvicultura. Esto es porque los objetos se **extruyen** de la Tierra.

DEM, DSM & DTM (III)

¿Qué es un Modelo Digital de Superficie (DSM)?

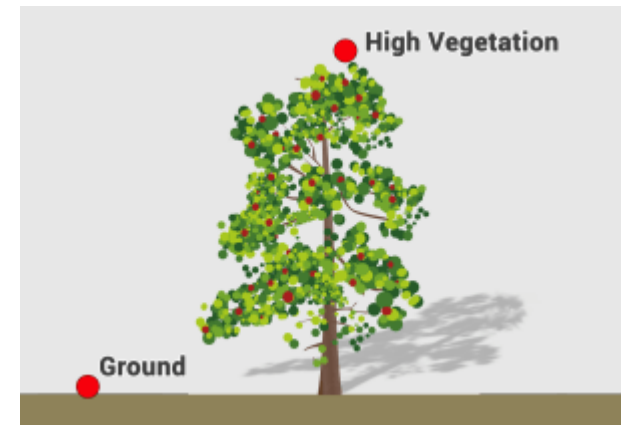
Algunos ejemplos:

- **Aplicaciones de aviación:** las obstrucciones de la pista en la zona de aproximación se puede examinar con un DSM para asegurar que no colisiones.
- **Manejo de la vegetación:** A lo largo de una línea de transmisión, superponiendo un DSM para ver dónde y cómo mucha vegetación está invadiendo.
- **Análisis de impacto visual:** se utiliza los DSM para comprobar cómo un edificio propuesto afectaría a la cuenca visual de otros residentes y negocios.

DEM, DSM & DTM (IV)

¿Qué es un Modelo Digital de Elevación (DEM)?

- Un modelo de elevación digital es un ráster que representa la superficie de la Tierra regularmente espaciados con referencia a un dato vertical común.
- Las líneas eléctricas construidas (edificios y torres) y naturales (árboles y otros tipos de vegetación) no están presentes en un DEM.



DEM, DSM & DTM (V)

¿Qué es un Modelo Digital de Elevación (DEM)?

Algunos ejemplos:

- **Modelación hidrológica:** Un DEM se utiliza para delimitar las cuencas hidrográficas, el cálculo de acumulación de flujo y averiguar la dirección del flujo.
- **Estabilidad del terreno:** Las zonas propensas a las avalanchas son zonas de alta pendiente con escasa vegetación, que es útil en la planificación de una carretera o subdivisión residencial.
- **Clasificación de suelo:** Los DEM ayudan a identificar los tipos de suelo en función de la elevación.

DEM, DSM & DTM (VI)

¿Qué es un Modelo Digital de Terreno (DTM)?

Dependiendo del país puede ser dos cosas:

- En algunos países, un MDT en realidad es sinónimo de un DEM.
- En los Estados Unidos y otros países, un DTM es un conjunto de datos vectoriales compuesta de puntos espaciados regularmente y características naturales tales como crestas y líneas de corte. Un DTM perfecciona un DEM mediante la inclusión de elementos vectoriales.

Estructura de datos (I)

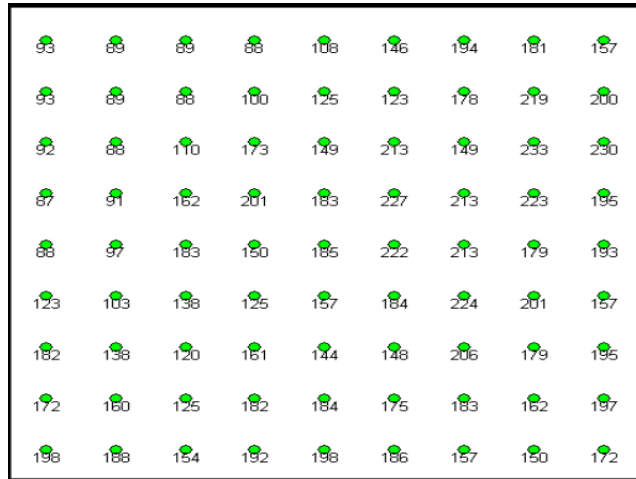
Estructuras vectoriales:

- **Puntos:** Elementos de tipo punto con la cota en la componente temática o elementos de tipo punto3D.
- **Lineas:** Elementos de tipo líneas que representa curvas de altitud constante (curvas de nivel).
- **TIN:** Red de triángulos irregulares.

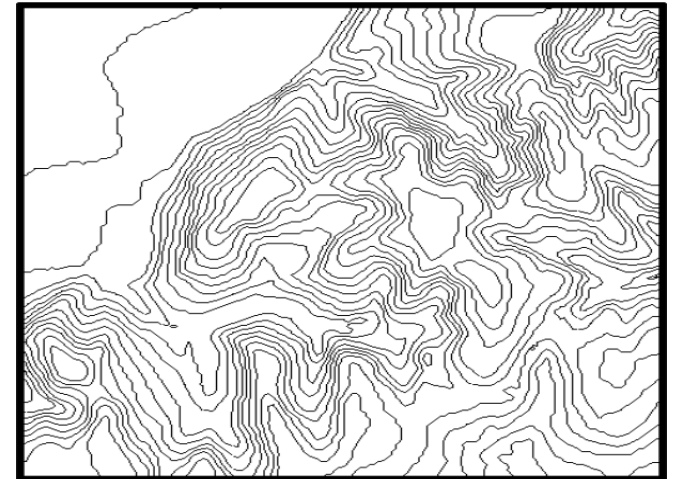
Estructuras ráster:

- **Matrices regulares:** malla de celda rectangular con valor de cota uniforme para toda el píxel.
- **Quadrees:** matrices imbricadas en una estructura jerárquica.

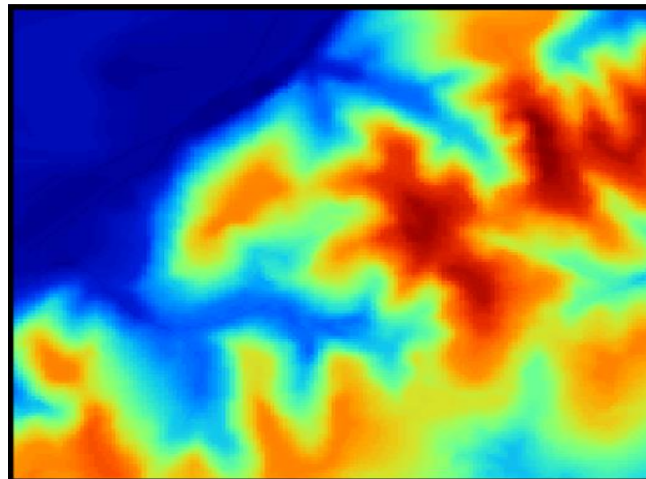
Modelos utilizados (I)



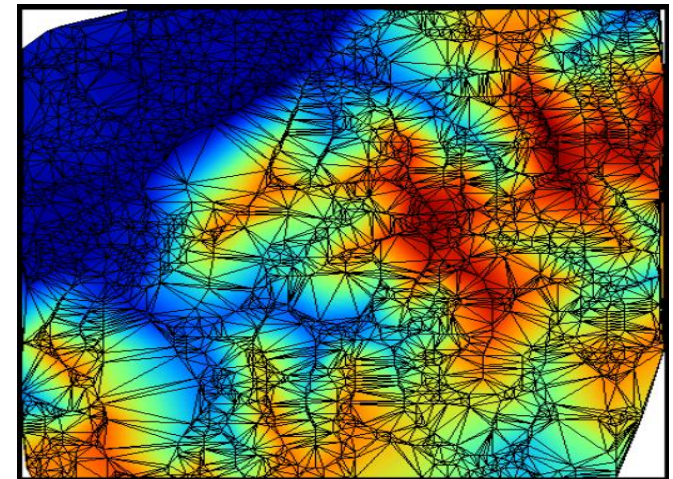
Puntos regulares o irregulares



Curvas de nivel



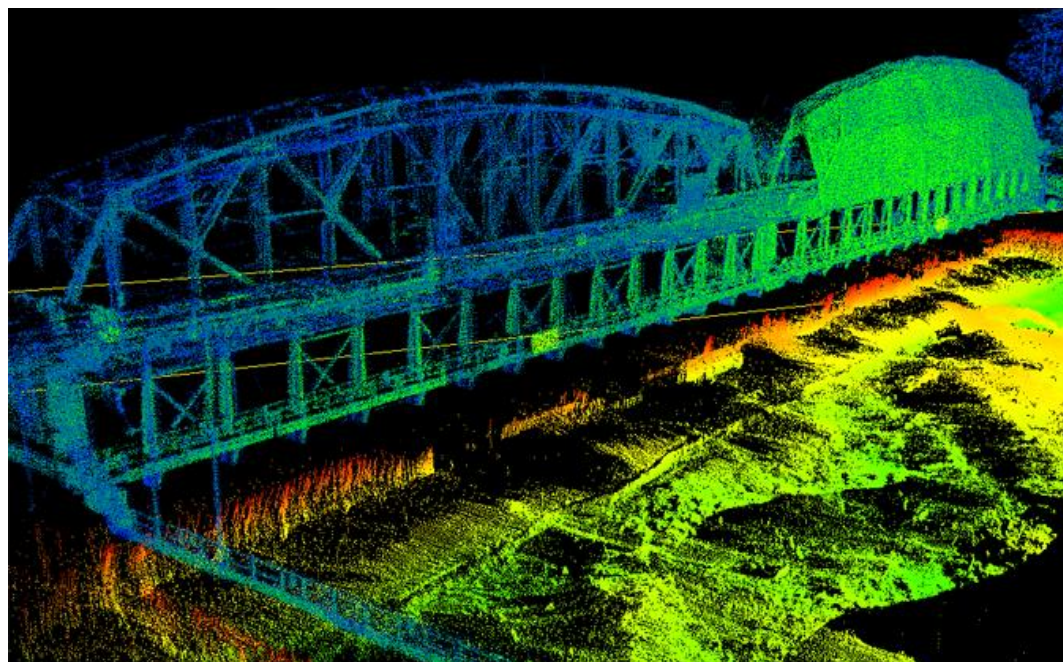
Modelo ráster



TIN

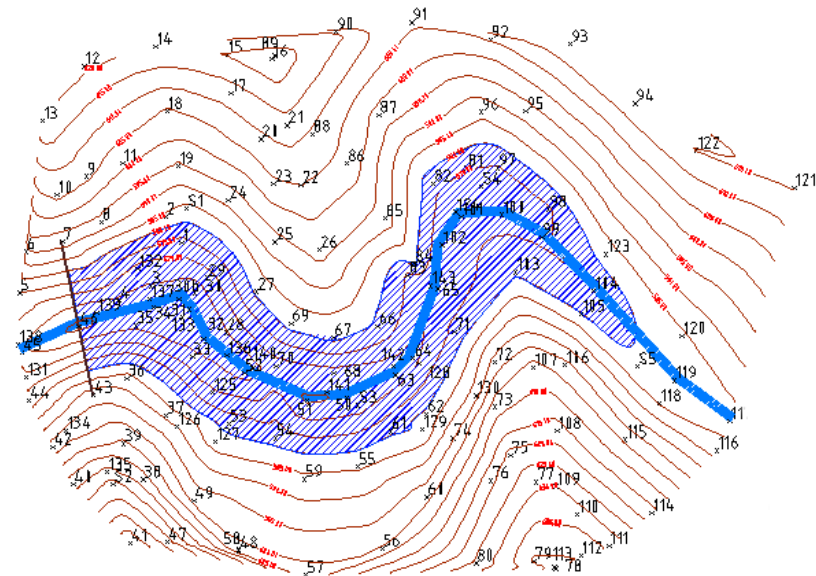
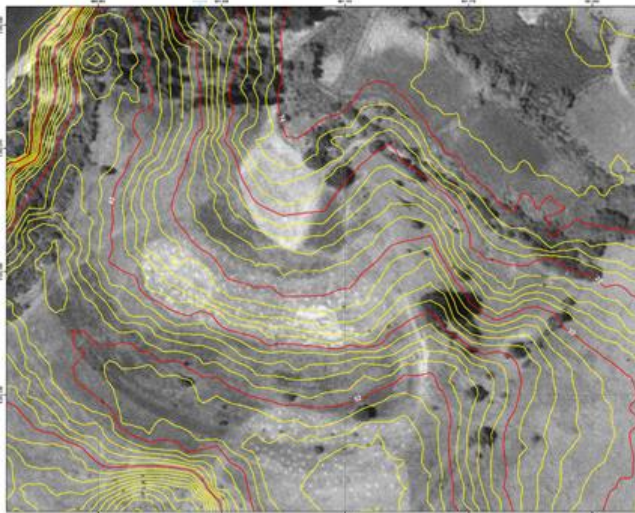
Puntos con altura (I)

- Serie de puntos espaciados con información de la elevación solo en dichos puntos.
- El espaciamiento puede ser **regular** (mediciones topográficas) o **irregular** (nubes de puntos Lidar).



Curvas de Nivel (I)

- Una curva de nivel es aquella **línea que en un mapa une todos los puntos que tienen igualdad de condiciones y de altitud**. Suelen estar impresas en las cartas en color siena para el terreno y en azul para los glaciares y las profundidades marinas.



Curvas de Nivel (II)

- La estructura básica es la **línea** (o polilínea) definida como un vector de **n pares de coordenadas (x, y)** que describe la trayectoria de las curvas de nivel.
- El número de elementos de cada vector es variable.
- Una curva de nivel concreta queda definida mediante un vector ordenado de puntos que se sitúan sobre ella a intervalos adecuados —no necesariamente iguales— para garantizar la exactitud necesaria del modelo.

Curvas de Nivel (III)

- **La localización espacial de cada elemento es explícita**, conservando los valores individuales de coordenadas.
- En el caso más sencillo: el MDE está constituido por el conjunto de las curvas de nivel que pasan por la zona representada, separadas generalmente por intervalos constantes de altitud, más un conjunto de puntos acotados que definen lugares singulares —cimas, fondos de dolinas, collados, etc.—.

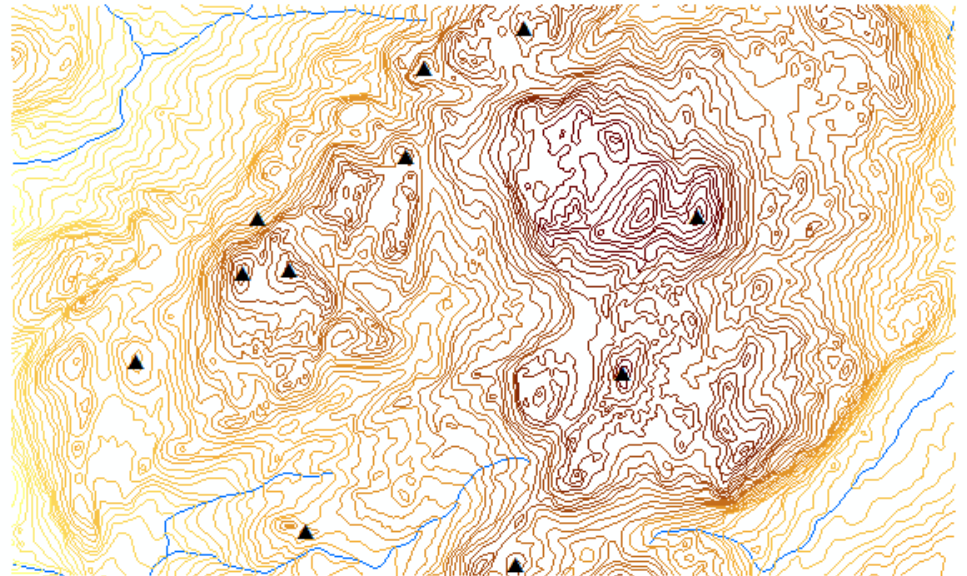
Curvas de Nivel (IV)

- Se generan a partir de **operaciones topográficas plani-altimétricas (directos)** o por métodos de **restitución fotogramétrica (indirectos)**.



Curvas de Nivel (V)

- Resumiendo: en todos los casos se obtiene un **modelo vectorial de líneas** donde cada elemento geográfico corresponde a un conjunto de puntos de igual cota (altura). El valor numérico de la cota forma parte de la componente temática de la capa obtenida.



Curvas de Nivel (VI)

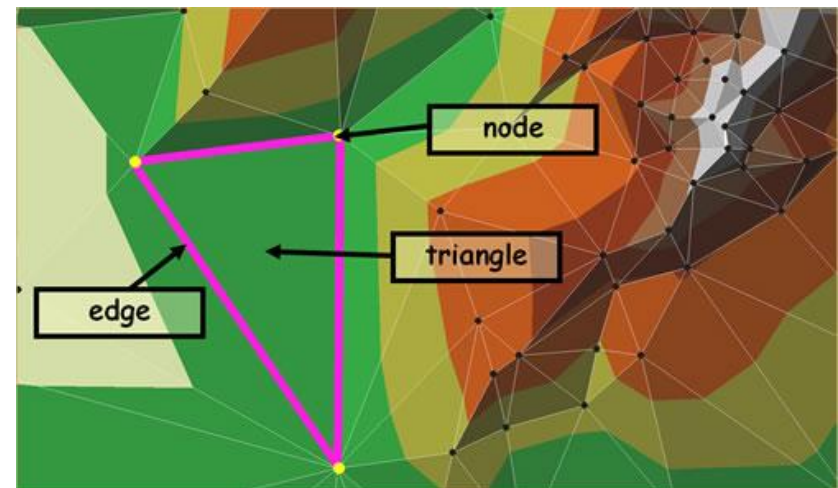
- Este modelo es el utilizado habitualmente en los **mapas impresos**.
- Es una estructura de datos **poco útil para el manejo por medios informáticos** pero la escasez de otras fuentes de datos obliga a que todos los SIG tengan herramientas para incorporarlos y usarlos, normalmente mediante transformaciones a otras estructuras (TIN o matrices). Con la incorporación de las nuevas tecnología esto ha ido cambiando progresivamente.

Redes de triángulos irregulares (I)

- Esta estructura de datos se compone de un **conjunto de triángulos irregulares adosados** y que suele identificarse por las siglas de su denominación inglesa: triangulated irregular network, TIN.
- Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve.

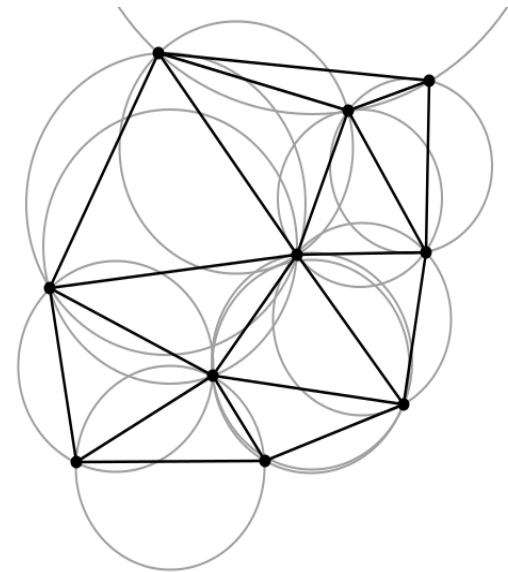
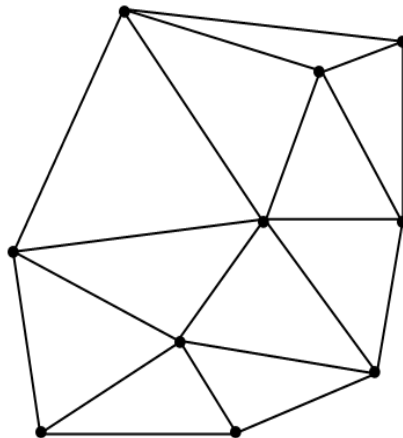
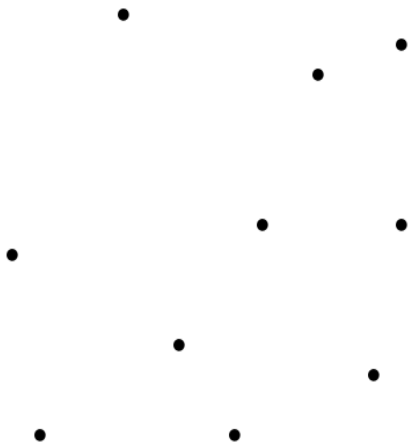
Redes de triángulos irregulares (II)

- Se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a un conjunto previo de puntos.
- El método de triangulación más utilizado se denomina **Triangulación de Delaunay** (Delaunay).



Redes de triángulos irregulares (III)

- Una **Triangulación de Delaunay** es una red de triángulos que cumple la **Condición de Delaunay**: *la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo.*

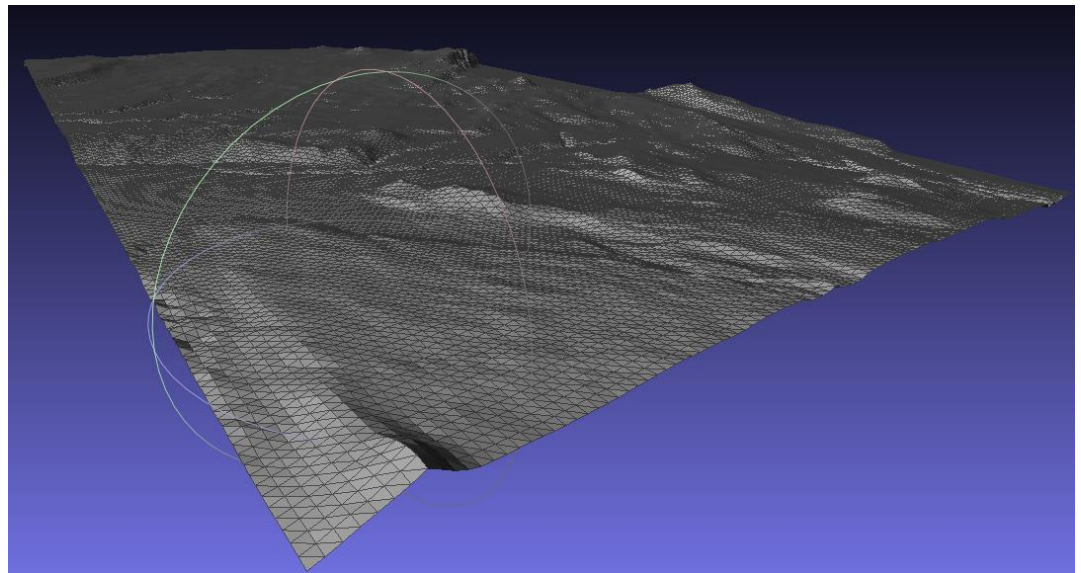


Redes de triángulos irregulares (IV)

- La circunferencia circunscrita de un triángulo es **vacía**, si no contiene otros vértices aparte de los tres que la definen.
- La Condición de Delaunay dice que **una red de triángulos es una triangulación de Delaunay si todas las circunferencias circunscritas de todos los triángulos de la red son vacías.**
- Esa condición asegura que los ángulos del interior de los triángulos son lo más grandes posible. Es decir, maximiza la extensión del ángulo más pequeño de la red.
- La Triangulación de Delaunay forma la envolvente convexa del conjunto de puntos (Convex Hull).

Modelo Raster (I)

- La estructura matricial tiene antecedentes remotos (Chapman, 1952).
- Esta estructura es el resultado de superponer una cuadrícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La cuadrícula adopta la forma de una red regular de malla cuadrada.



Modelo Quadtree (I)

- El mayor interés de las matrices jerárquicas está en que permiten solucionar el principal problema de las matrices regulares: su resolución espacial constante.
- El modelos de Quadtree permite codificar datos en el modelo raster que permite **reducir los requerimientos de almacenamiento y mejora las velocidades de acceso**.
- Se basa en **almacenar valores homogéneos por región** y no por pixel.
- El ráster se subdivide en forma recursiva en cuadrantes hasta que todas las regiones son homogéneas o hasta que se llega a un determinado nivel.

Modelo Quadtree (II)

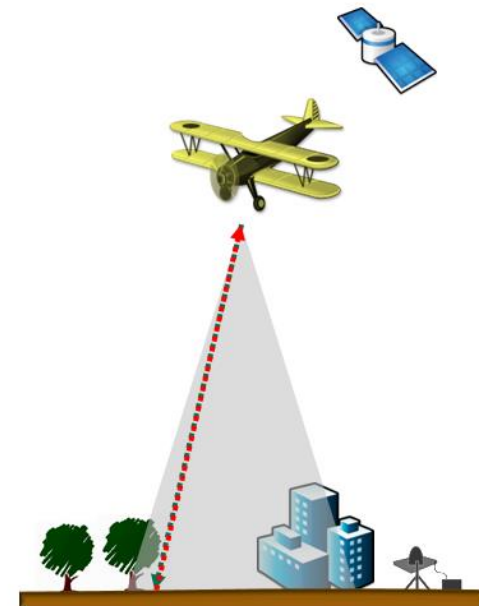


Datos LIDAR (I)

- El **LIDAR** (light detection and ranging) es una técnica de teledetección óptica que utiliza la **luz de láser** para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones de buena precisión de (x,y,z).
- LIDAR está surgiendo como una **alternativa rentable para las técnicas de topografía** tradicionales como una fotogrametría.
- LIDAR produce **nube de puntos masivas** que se pueden administrar, visualizar, analizar y compartir.

Datos LIDAR (II)

- Los componentes de hardware principales de un sistema LIDAR incluyen: **vehículo de recolección**, **sistema de escáner láser**, **GPS** e **INS** (sistema de navegación por inercia). Un sistema INS mide la rotación, inclinación y encabezamiento del sistema LIDAR



Datos LIDAR (III)

- Los datos de punto se procesan posteriormente después de que la recopilación de datos LIDAR se reconocen dentro de las coordenadas x,y,z georeferenciadas con alta precisión al analizar el rango de tiempo láser, ángulo de escaneo láser, posición del GPS e información del INS.
- Los pulsos láser emitidos desde un sistema LIDAR se reflejan desde objetos sobre y por encima de la superficie del suelo: vegetación, edificios, puentes, etc.

Datos LIDAR (IV)

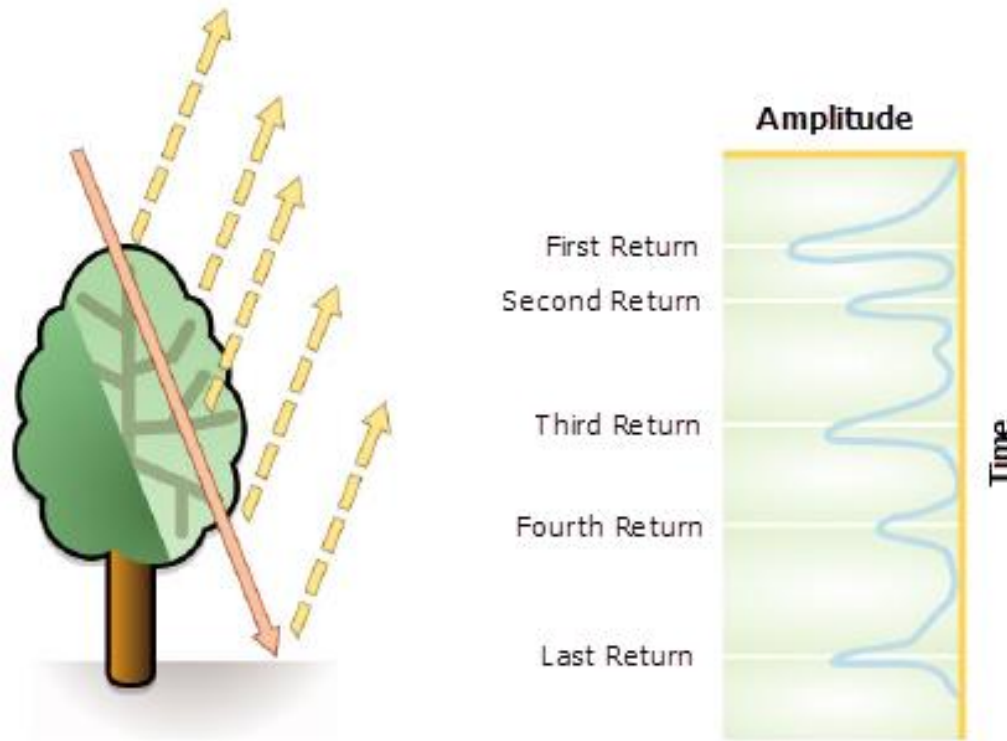
- Un pulso láser emitido puede regresar al sensor LIDAR como uno o muchas devoluciones.
- Cualquier pulso láser emitido que encuentre varias superficies de reflejo a medida que viaja hacia el suelo se divide en tantas devoluciones como superficies reflectoras existen.
- El primer pulso láser devuelto es el más importante y se asociará con la entidad más alta en el panorama como una copa de árbol o la parte superior de un edificio.

Datos LIDAR (V)

- La primera devolución también puede representar el suelo, en cuyo caso el sistema LIDAR solo detectará un regreso.
- Varias devoluciones pueden detectar las elevaciones de varios objetos dentro de la huella láser de un pulso láser saliente.
- Las devoluciones intermedias, en general, se utilizan para la estructura de la vegetación, y la última devolución para los modelos de terreno de suelo desnudo.

Datos LIDAR (VI)

- La última devolución no siempre será de una devolución del suelo. Por ejemplo: un caso en donde un pulso golpee una rama gruesa en su camino hacia el suelo y el pulso no llega en realidad al suelo.



Atributos del Punto LIDAR (I)

- La información adicional se almacena en la componente temática junto con la componente espacial (x,y,z).
- Atributos del punto LIDAR: intensidad, número de devolución, cantidad de devoluciones, valores de clasificación de punto, puntos que están en el borde de la línea de vuelo, valores RGB (rojo, verde y azul), tiempo del GPS, ángulo de escaneo y dirección de escaneo.

Atributos del Punto LIDAR (II)

- **Intensidad:** La fortaleza de la devolución del pulso láser que genero el punto LIDAR.
- **Número de devolución:** Un pulso láser emitido puede tener hasta cinco devoluciones dependiendo de las entidades en las que se refleja y las capacidades del escáner láser que se utiliza para recopilar los datos.
- **Número de devoluciones:** El número de devoluciones es el número total de devoluciones para un pulso dado.

Atributos del Punto LIDAR (III)

- **Clasificación de puntos:** Cada punto LIDAR que es postprocesado puede tener una clasificación que define el tipo de objeto que reflejó el pulso láser. Los puntos LIDAR se pueden clasificar en varias categorías que incluyen suelo o terreno desnudo, parte superior de cubierta forestal y agua. Las diversas clases se definen mediante códigos numéricos de enteros en el archivo LAS.
- **Borde de la línea de vuelo:** Los puntos se simbolizarán en base a un valor de 0 (interno) o 1 (en borde).

Atributos del Punto LIDAR (IV)

- **RGB:** Los datos LIDAR se pueden atribuir con bandas RGB (rojas, verdes y azules). Esta atribución con frecuencia viene de las imágenes recopiladas al mismo tiempo que la topografía LIDAR.
- **Tiempo del GPS:** La fecha de registro del GPS en la que se emitió el punto láser desde el avión. El tiempo está en segundos del GPS de la semana.

Atributos del Punto LIDAR (V)

- **Ángulo de escaneo:** El ángulo de escaneo es un valor en grados entre -90 y +90. A 0 grados, el pulso láser está directamente debajo del avión en nadir. A -90 grados, el pulso láser está en el lado izquierdo del avión, mientras que a +90, el pulso láser está a la derecha del avión en la dirección de la luz. La mayoría de sistemas lidar actualmente tienen menos de ± 30 grados.

Atributos del Punto LIDAR (VI)

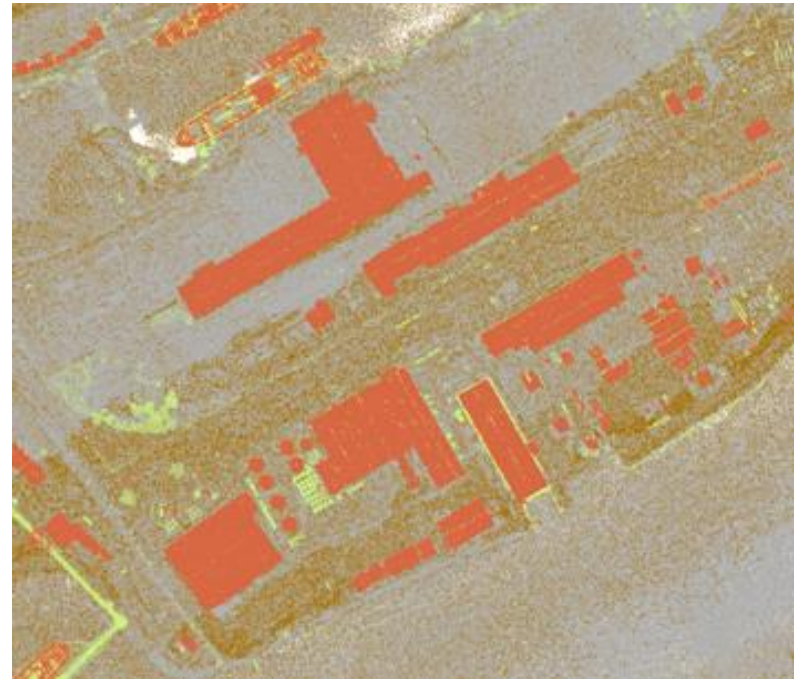
- **Dirección de escaneo:** La dirección de escaneo es la dirección en la que estaba viajando el espejo de escaneo en el momento del pulso láser de salida. Un valor de 1 es una dirección de escaneo positiva, y un valor de 0 es una dirección de escaneo negativa. Un valor positivo indica que el escáner se está moviendo del lado izquierdo al lado derecho de la dirección de vuelo en pista y un valor negativo es el opuesto.

Nubes de Puntos (I)

- Los datos LIDAR organizados espacialmente postprocesados se conocen como datos de la nube de punto.
- Las nubes de punto inicial son grandes colecciones de puntos de elevación 3D, que incluyen (x, y, z) junto con atributos adicionales como marcas de tiempo GPS.
- Las entidades de superficie específicas que el láser encuentra se clasifican después de que la nube de punto LIDAR inicial es postprocesada.

Nubes de Puntos (II)

- Las elevaciones de la tierra, los edificios, masa forestal, pasos elevados de autopista, y todo lo demás que el rayo láser encuentra durante la encuesta constituye los datos de nube de punto.



Productos derivados (I)

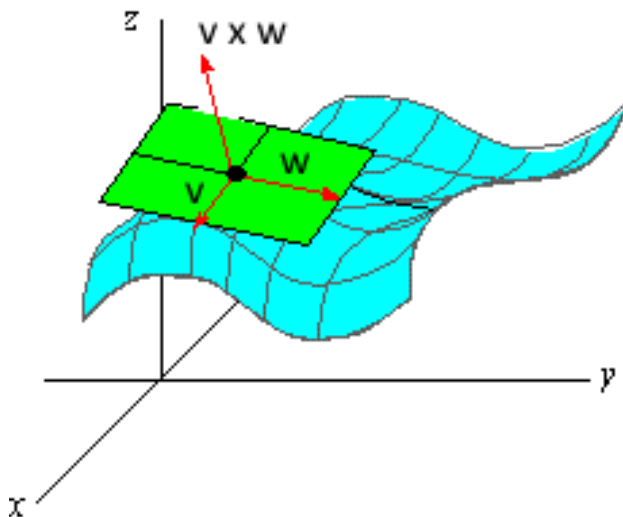
- A partir de los MDT es posible **construir un conjunto de modelos digitales que representan variables derivadas directamente de la topografía** (datos y relaciones topológicas entre los mismos), **sin intervención de datos auxiliares o información externa.**
- Los autores Franklin y Peddle (1987) mencionan cinco parámetros básicos en este contexto: **elevación, pendiente, orientación, convexidad y relieve.**
- El relieve (definido como la variabilidad de la superficie) es lo que otros autores denominan rugosidad.

Gradiente topográfico (I)

En un MDT, la altitud z en el entorno inmediato de un punto puede describirse de forma aproximada mediante un plano de ajuste.

$$z = a_{00} + a_{10} \cdot x + a_{01} \cdot y$$

Los coeficientes a_{10} y a_{01} representan las derivadas primeras de la altitud con respecto a los ejes X e Y .



$$a_{10} = \frac{\partial z}{\partial x}; a_{01} = \frac{\partial z}{\partial y}$$

Gradiente topográfico (II)

Estos coeficientes pueden representarse mediante vectores definidos por los valores de las componentes para los ejes X, Y, Z.

$$\vec{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \partial x \\ 0 \\ \partial z \end{bmatrix}; \vec{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \partial y \\ \partial z \end{bmatrix}$$

El producto vectorial de dos vectores tiene como resultado otro vector perpendicular a ambos. Entonces, el producto $\mathbf{v} \times \mathbf{w}$ nos define un vector \mathbf{P} , perpendicular al plano que los contiene y, por tanto, a la superficie topográfica a la cual se ajusta.

Gradiente topográfico (III)

Eliminando los términos nulos y operando obtenemos que:

$$\bar{\mathbf{P}} = \bar{\mathbf{v}} \times \bar{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} -\partial z \cdot \partial y \\ -\partial x \cdot \partial z \\ -\partial x \cdot \partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\partial z / \partial x \\ -\partial z / \partial y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{10} \\ -a_{01} \\ 1 \end{bmatrix}$$

El vector **P** es el **gradiente de z en el punto x,y**. El uso de los valores del gradiente es útil en el cálculo de los **modelos derivados**, así como en la ejecución de otras modelizaciones más complejas.

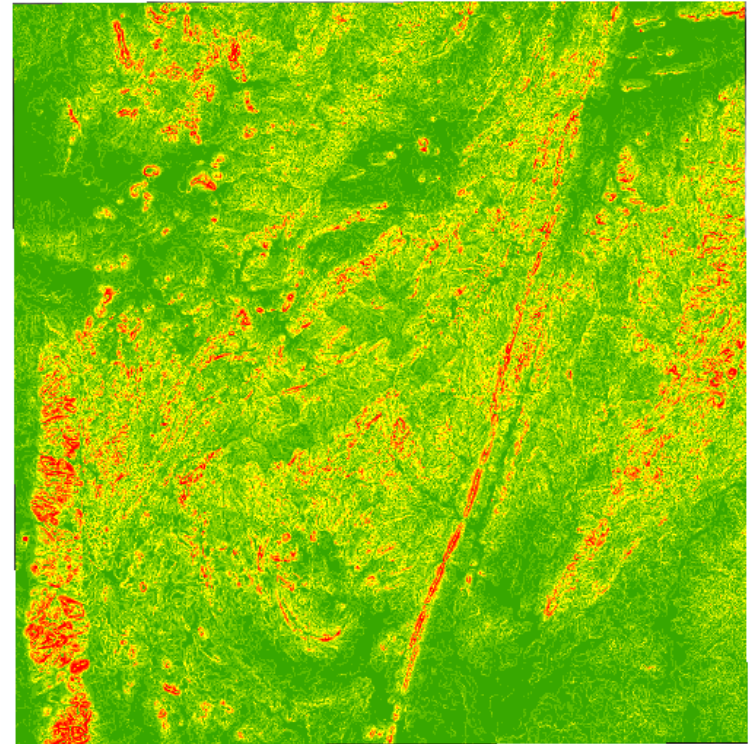
Gradiente topográfico (IV)

En MDT de tipo ráster, las estimaciones de los coeficientes del gradiente se realizan mediante operadores que se aplican sobre un entorno definido del punto problema (los 4 vecinos más próximos). Para un punto situado en la fila i , columna j , donde d es la distancia entre filas y columnas, los valores se calculan a partir de los cambios de altitud entre puntos vecinos. La opción más simple utiliza las expresiones siguientes:

$$a_{10} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2 \cdot d} \quad a_{01} = \frac{z_{i-1,j} - z_{i+1,j}}{2 \cdot d}$$

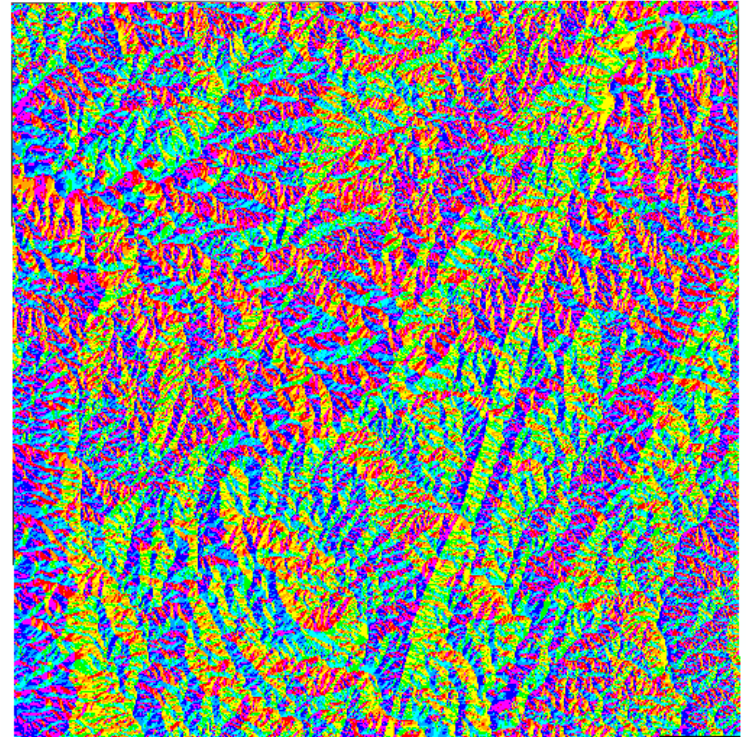
Pendiente (I)

- La **pendiente** en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector gradiente en ese punto y el eje Z (vertical).



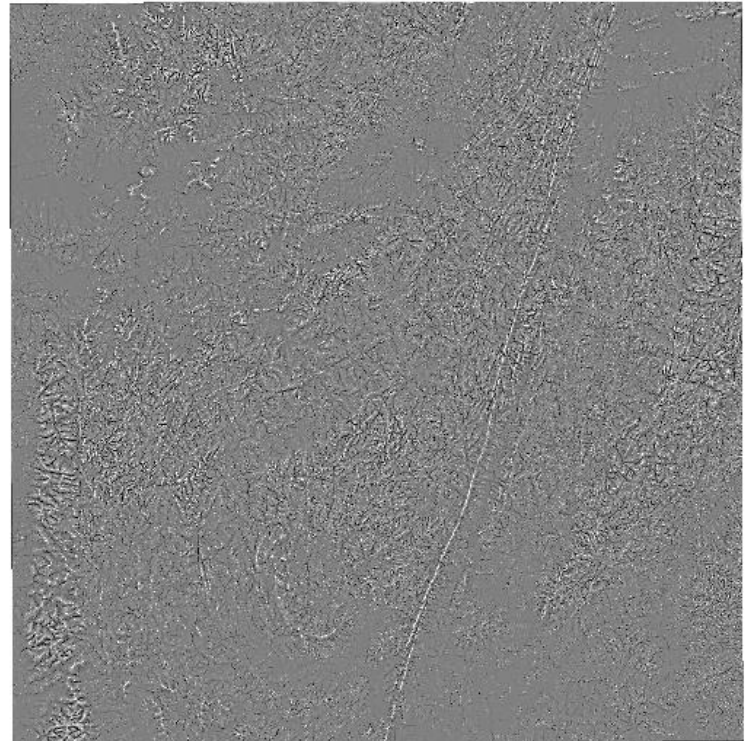
Orientación (I)

- La orientación en un punto es el ángulo existente entre el vector que señala la dirección Norte **N**, y la proyección sobre el plano horizontal del vector gradiente **P**.

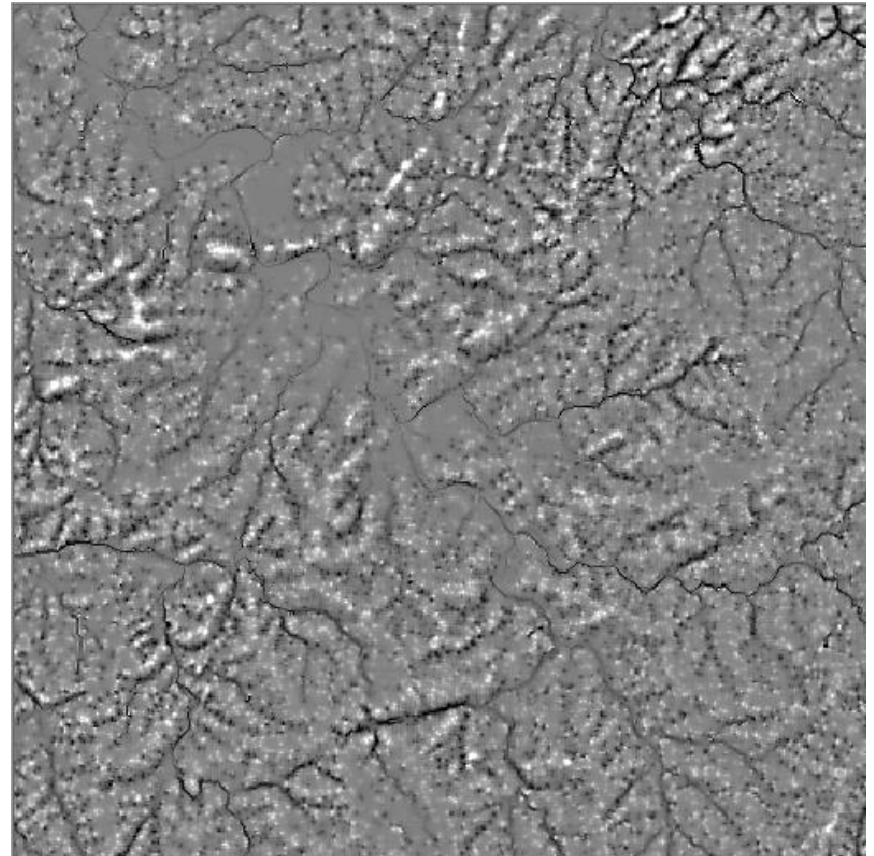
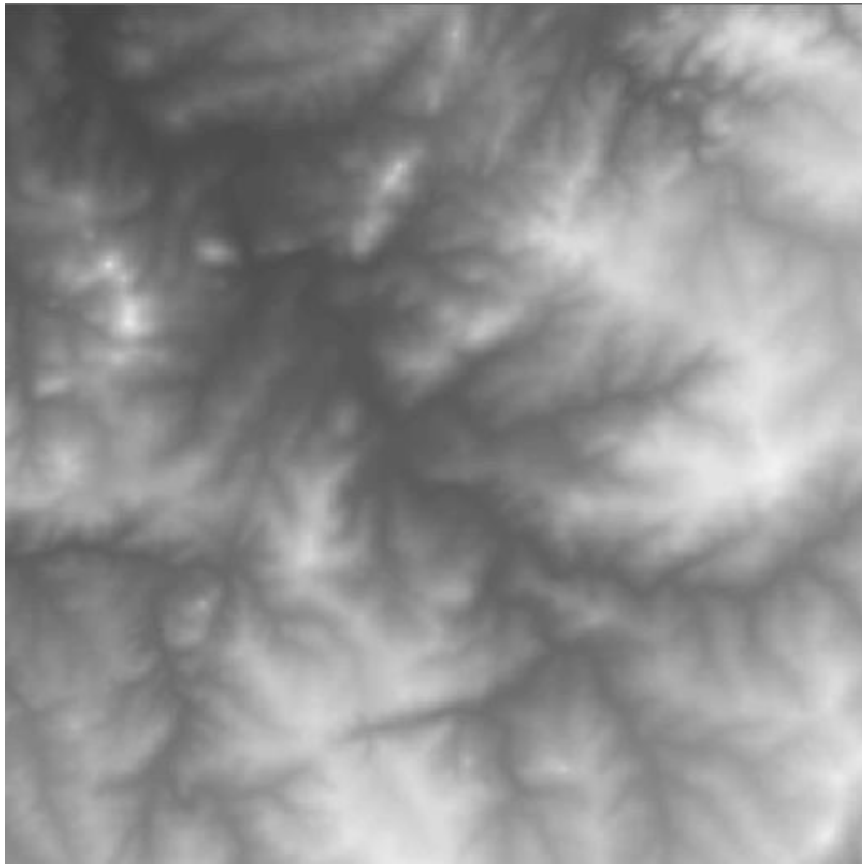


Curvatura (I)

- La **curvatura** en un punto es la **tasa de cambio en la pendiente**. Depende de las derivadas de segundo grado de la altitud (es decir, de los cambios de pendiente en el entorno del punto).

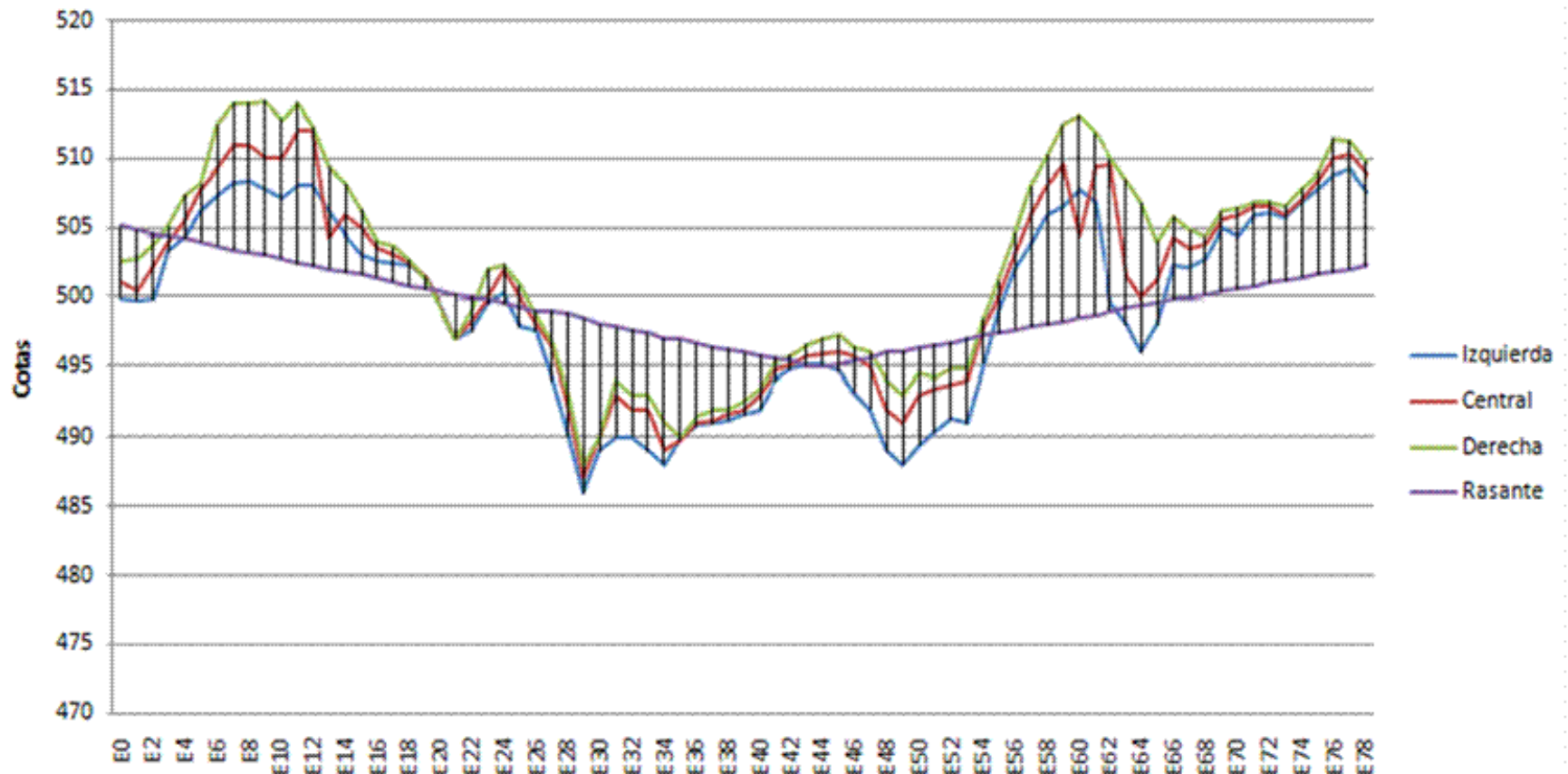


Curvatura (II)



Perfiles topográficos (I)

- Es una aplicación del cálculo de valores puntuales de altitud.



Perfiles topográficos (II)

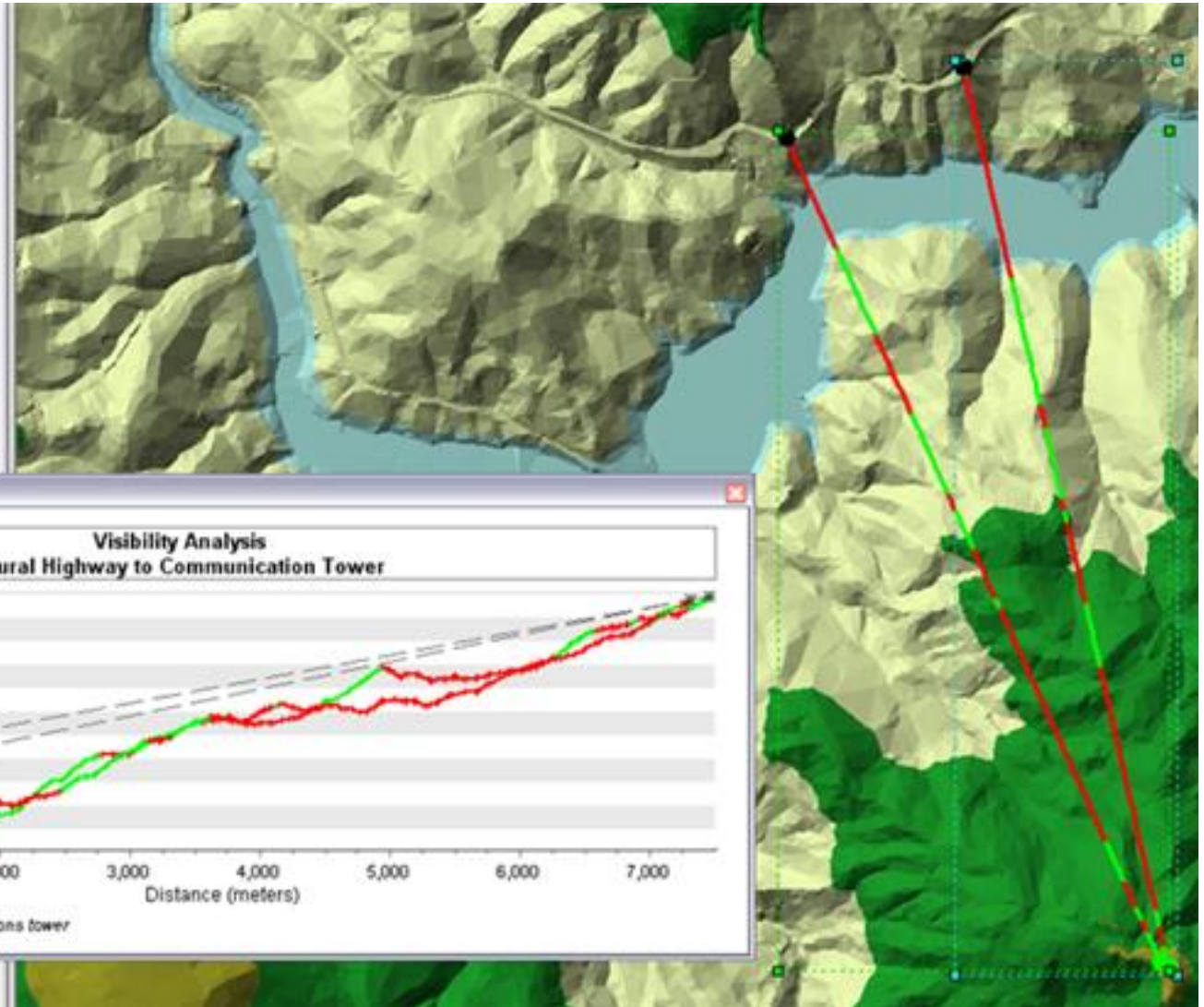
El problema se descompone habitualmente en los siguientes pasos:

1. Definir puntos inicial y final del segmento sobre el que se levantará el perfil topográfico.
2. Se fija el número de puntos del perfil (su resolución en el plano XY).
3. Se calculan las coordenadas (x,y) de cada punto del perfil.
4. Se estima por interpolación la altitud z de cada punto (x,y) .

Intervisibilidad entre dos puntos (I)

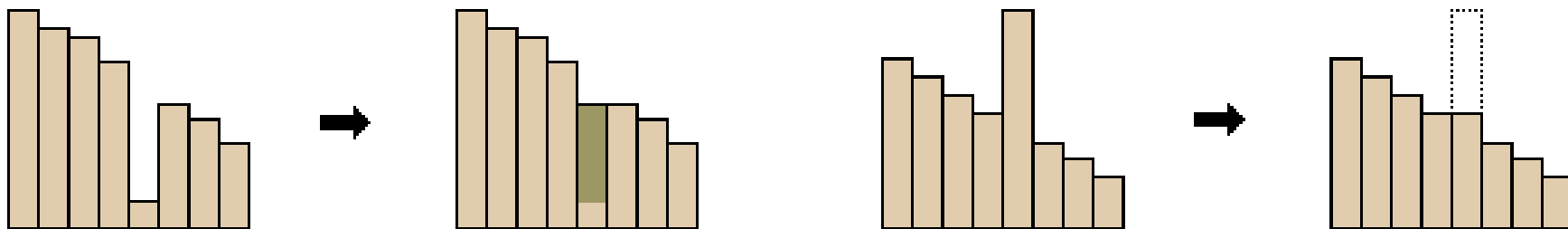
- Es una aplicación que utiliza el método de levantamiento de perfiles como base para una etapa posterior de análisis.
- La solución al problema de si dos puntos están conectados por una línea visual consiste en la construcción del perfil topográfico que los une y el análisis posterior de los puntos intermedios para comprobar si su altitud intercepta la línea visual.

Intervisibilidad entre dos puntos (II)



Rellenado (I)

- Con frecuencia, los sumideros (y picos) representan errores debido a la resolución de los datos o el redondeo de elevaciones al valor entero más cercano.
- Los sumideros se deben rellenar para garantizar la representación correcta de cuencas y arroyos. Si los sumideros no se rellenan, una red de drenaje derivada puede ser discontinua.



Rellenado (II)

- A modo de ejemplo: Para los MDT de resolución de 30 metros del Levantamiento geológico de los Estados Unidos (USGS) se encontró que del 0,9% al 4,7% por de las celdas en un DEM eran sumideros. El ajuste del valor medio de estos sumideros varía de 2,6 a 4,8 metros.
- Esto significa que para una cuadrícula de celda de 1.000 por 1.000 (1 millón de celdas), pueden haber de 9.000 a 47.000 sumideros para rellenar.

Dirección de flujo (I)

- Este análisis toma una superficie como entrada y proporciona como salida un ráster que **muestra la dirección del flujo que sale de cada celda**.
- Existen **ocho direcciones de salida** válidas que se relacionan con las ocho celdas adyacentes hacia donde puede ir el flujo.
- Este enfoque comúnmente se denomina el modelo de flujo de ocho direcciones (D8) y sigue un acercamiento presentado por los autores Jenson and Domingue.

Dirección de flujo (II)

78	72	69	71	58	49
74	67	56	49	46	50
69	53	44	37	38	48
64	58	55	22	31	24
68	61	47	21	16	19
74	53	34	12	11	12

Elevation surface

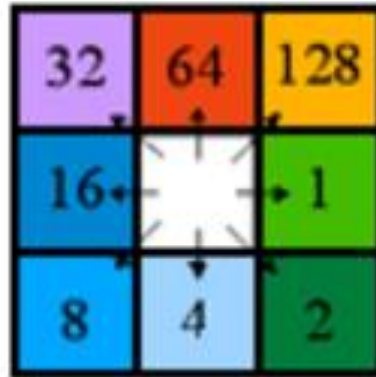


2	2	2	4	4	8
2	2	2	4	4	8
1	1	2	4	8	4
128	128	1	2	4	8
2	2	1	4	4	4
1	1	1	1	4	16

Flow direction

Dirección de flujo (III)

- La dirección de flujo está determinada por la **dirección del descenso más empinado**, o la caída máxima, desde cada celda.
- Cuando se encuentra la dirección de un descenso más empinado, la celda de salida se codifica con el valor que representa esa dirección.



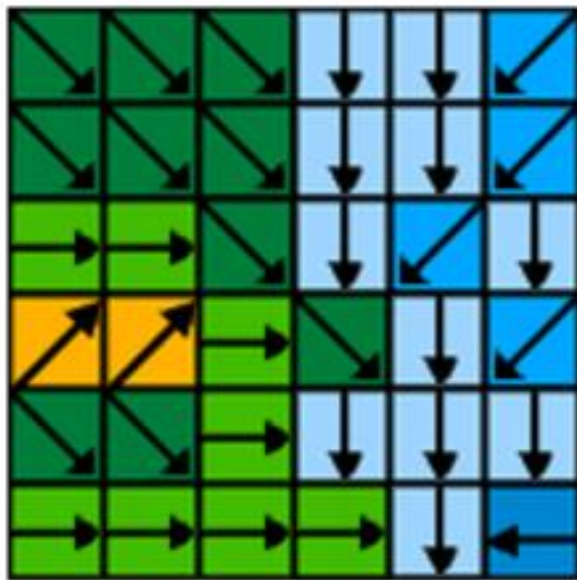
Direction coding

Dirección de flujo (IV)

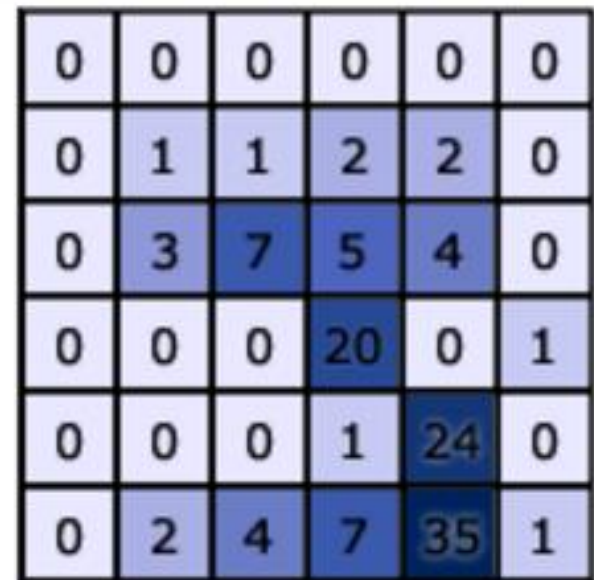
- Si todos los elementos próximos son más altos que la celda de procesamiento, se considerará un **ruido** que se rellena con el valor más bajo de los elementos próximos, y tiene una dirección de flujo hacia esta celda.
- Si un sumidero de una celda está junto al borde físico del ráster o tiene como mínimo una celda NoData como vecino, no se rellena porque la información del vecino no es suficiente.

Acumulación de flujo (I)

- Este análisis calcula el flujo acumulado como el peso acumulado de todas las celdas que fluyen en cada celda de pendiente descendente en el ráster de salida.



Flow direction



Flow accumulation

Acumulación de flujo (II)

- Las celdas con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y pueden ser útiles para identificar canales de arroyos.

Ejemplo (I)

- Creación de una cuenca visual.
- Creación de una cuenca hidrológica.

Lectura de Módulo

- ***“Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales”*** (Angel M. Felicísimo). Caps: 1, 2 y 3.