

TOPOGRAFIA Y GEODESIA

Titulación: Grado en Ingeniería Civil. Curso 2013-2014

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Cantabria

Autores: Javier M^º Sánchez Espeso y Raúl Pereda García

*Documentación
de apoyo para
los contenidos
del Bloque 1*

Introducción a la Topografía, Geodesia y Cartografía.	1
1 Topografía y Geodesia.	1
1.1 Superficies y elementos de referencia que usa la Geodesia.	2
1.1.1 Superficies matemáticas de aproximación: Geodesia geométrica.	2
1.1.2 Superficie física de aproximación: Geodesia física.	3
1.2 Sistemas de Referencia Geodésicos.	9
1.2.1 Elementos geográficos básicos de referencia.	9
1.2.2 Sistemas Geodésicos de referencia.	11
1.2.3 Sistema de coordenadas geográfico básico en un elipsoide.	16
1.2.4 Glosario de términos de uso frecuente.	17
1.3 Sistema de referencia y sistema de coordenadas oficial.	21
1.4 Redes Geodésicas y Topográficas.	21
1.4.1 Redes Geodésicas.	24
1.4.2 Red de Nivelación.	28
1.4.3 Redes Topográficas.	32
2 Cartografía.	35
2.1 Introducción a la cartografía.	35
2.2 Diseño Cartográfico.	36
2.2.1 Escala cartográfica: detalle y generalización de la información.	37
2.2.2 Modelización convencional de la superficie del terreno.	40
2.2.3 Introducción a las proyecciones cartográficas.	47
2.2.4 Modelos de datos.	60
Modelo vectorial.	60
Modelo ráster.	61
Nubes de puntos.	63
2.2.5 Formatos de información espacial.	64
2.2.6 Diccionarios de fenómenos.	65



- 3 Modelización y explotación digital de superficies tridimensionales. 73
 - 3.1 Definiciones..... 73
 - 3.2 Modelos de datos..... 74
 - 3.2.1 Mallas irregulares de triángulos..... 74
 - Precauciones típicas en la fase de importación de datos a un TIN..... 80
 - Errores típicos en la formación automática de la malla de triángulos. 81
 - Herramientas típicas de edición. 84
 - 3.2.2 Modelos regulares de puntos. 86
 - 3.2.3 Curvas de nivel. 87

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1.- Superficie matemática de aproximación: elipsoide de revolución..... 2

Ilustración 2.- Definición del Geoide. Relación con otras superficies de interés..... 4

Ilustración 3.- Utilidad del Geoide como superficie de referencia altimétrica..... 5

Ilustración 4.- EGM2008 en Península y Baleares (IGN). 6

Ilustración 5.- Ondulación del modelo de Geoide EGM2008-REDNAP (Elaboración propia). 6

Ilustración 6.- Altitud y altitud elipsoidal para un punto. 7

Ilustración 7.- Mapa de la ondulación del Geoide. 8

Ilustración 8.- Elementos de referencia en un elipsoide de revolución
(http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node6_mn.html)..... 9

Ilustración 9.- Verticales fundamentales en un punto..... 10

Ilustración 10.- Elementos básicos de Astronomía de posición (<http://www.xatakaciencia.com>).
..... 11

Ilustración 11.- Definición de un sistema de referencia terrestre. 13

Ilustración 12.- Campo de velocidades de los puntos que definen el marco ITRF2008
(http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/doc/ITRF2008-Vel.gif). 15

Ilustración 13.- Componentes del sistema de referencia espacial europeo. (http://www.ec-gis.org/sdi/ws/grid2003/ETRS89_tranf_EuroGrid_ws.ppt) 16

Ilustración 14.- Red de Primer Orden en España (www.ign.es)..... 23

Ilustración 15.- Vértice geodésico perteneciente a la ROI. Garita (T.M. Suances). 23

Ilustración 16.- Red IBERIA95 (www.ign.es). 25

Ilustración 17.- Red REGENTE (www.ign.es). 25

Ilustración 18.- ROI en la CCAA de Cantabria. Resaltado en negro los vértices REGENTE.
(www.ign.es) 26

Ilustración 19.- Reseña de un vértice perteneciente a REGENTE. 27

Ilustración 20.- Reseña de un vértice perteneciente a la ROI..... 28

Ilustración 21.- Clavo de nivelación origen para la red de nivelación España (www.ign.es). 29

Ilustración 22.- Gráfico de líneas de la nueva Red Española de Nivelación de Alta Precisión
(REDNAP). 30

Ilustración 23.- Reseña de una señal perteneciente a REDNAP. 31

Ilustración 24.- Programa de aplicaciones Geodésicas (v0.9, Enero 2012). 32

Ilustración 25.- Ejemplo de la reseña de un vértice en una red topográfica municipal
(Ayuntamiento Santander). 33

Ilustración 26.- Definiciones básicas usando el sistema de planos acotados. 41

Ilustración 27.- Definición de la superficie terrestre mediante curvas de nivel. 41



Ilustración 28.- Determinación de la pendiente en un punto. Cartografía escala 1:500, equidistancia 0,5 m.....	43
Ilustración 29.- Entorno del vértice geodésico Llusa. Hoja BTA 05:0035A-0605 de la C.A. de Cantabria.....	44
Ilustración 30.- Identificación de elementos geográficos característicos del relieve.....	46
Ilustración 31.- Reconstrucción del mapa de la ecúmene de Heródoto de Halicarnaso (Wikipedia).....	47
Ilustración 32.- Proceso genérico de proyección de una posición desde la superficie terrestre.....	48
Ilustración 33.- Planteamiento básico de una proyección: grados de libertad existentes.....	48
Ilustración 34.- Clasificación de las proyecciones según el punto de proyección.....	49
Ilustración 35.- Tipos de proyecciones según el punto de contacto, elección y posición de la superficie de proyección.....	50
Ilustración 36.- Líneas características en la esfera (Wikipedia).....	51
Ilustración 37.- Planisferio representado en coordenadas geográficas. Líneas geodésicas en color rojo, loxodrómicas en azul.....	51
Ilustración 38.- Hemisferio usando la proyección Gnomónica plana normal, polar Norte.....	52
Ilustración 39.- Planisferio usando la proyección Mercator.....	53
Ilustración 40.- Proyección gnomónica cilíndrica equidistante.....	54
Ilustración 41.- Proyección Lambert conforme cónica.....	55
Ilustración 42.- Asignación estricta de las zonas correspondientes a la proyección UTM.....	56
Ilustración 43.- Caracterización de la proyección UTM.....	58
Ilustración 44.- Caracterización de la proyección UTM. Detalle en la península para el huso 30N (UTM 30N).....	59
Ilustración 45.- Modelo vectorial. Entorno de la ETS Ingenieros de Caminos, Santander. Mapa a escala 1:1.500 (70x60mm).....	61
Ilustración 46.- Modelo ráster. Entorno de la ETS Ingenieros de Caminos, Santander.....	62
Ilustración 47.- Nube de puntos de la entrada del Departamento de Ingeniería Geográfica, ETS Ingenieros de Caminos de Santander.....	63
Ilustración 48.- Nube de puntos capturados desde una avioneta, con un LIDAR. Vista libre y perfil.....	64
Ilustración 49.- Principales formatos de información espacial.....	65
Ilustración 50.- Cartografía 1:1.000, soporte para trabajos de mantenimiento de carreteras... ..	66
Ilustración 51.- Cartografía 1:5.000 de la C.A de Cantabria, año 2001.....	66
Ilustración 52.- Ficha para el fenómeno curva de nivel en la base cartográfica de la Comunidad Valenciana, 1:5.000.....	67
Ilustración 53.- Ficha para el fenómeno ID_TIPO=0002 en la BTA05. Definición.....	68

Ilustración 54.- Ficha para el fenómeno ID_TIPO=0002 en la BTA05. Clasificación y método de obtención.	69
Ilustración 55.- Ficha para el fenómeno ID_TIPO=0002 en la BTA05. Selección y control de calidad.	70
Ilustración 56.- Ficha para el fenómeno ID_TIPO=0002 en la BTA05. Gráfico.....	70
Ilustración 57.- Ficha para el fenómeno ID_TIPO=0002 en la BTA05. Representación y rotulación.	71
Ilustración 58.- Importancia de los triángulos formados al modelizar una superficie de elevaciones.....	75
Ilustración 59.- Datos de partida en un levantamiento topográfico. (Cabezón de la Sal, Cantabria).....	77
Ilustración 60.- Consideración de todos los puntos como aleatorios. Izquierda: visualización con triángulos, derecha: visualización con isolíneas.	77
Ilustración 61.- Consideración puntos aleatorios y líneas de rotura. Izquierda: visualización con triángulos, derecha: visualización con isolíneas	78
Ilustración 62.- Flujo de trabajo para la formación, edición y explotación de un TIN.....	79
Ilustración 63.- Situación típica con curvas de nivel: exceso de vértices significativos. (Tamaño cuadro: 140x140 m)	80
Ilustración 64.- Reducción en el número de triángulos formados por efecto de la aplicación de un filtro.....	81
Ilustración 65.- Ajustes para la densificación de vértices en líneas de rotura (Civil3D 2012, de AutoDesk).....	81
Ilustración 66.- Cartografía escala 1:1.000, representada a escala 1:3.000 (original 140x80 mm)	82
Ilustración 67.- Triángulos formados por el modelo no válidos, en granate. (Original 140x80 mm).....	83
Ilustración 68.- Formación de triángulos planos en divisorias.....	84
Ilustración 69.- Edición de una zona en la que existen dos superficies, de interés el cauce. Imagen izda: original, imagen centro: modelo inicial, imagen dcha: modelo editado.....	85
Ilustración 70.- Ejemplo de modelización incorrecta del terreno natural (Cartografía: Esc. 1:1.000, equidistancia 1 m.).....	85
Ilustración 71.- Modelo digital de elevaciones. Tamaño de celda: 5 m. Escala representación: 1:25.000 (75x70 mm).....	86
Ilustración 72.- Obtención de un mapa de curvas de nivel a partir de un TIN desde un DEM....	88

Introducción a la Topografía, Geodesia y Cartografía.

En la práctica habitual de la Ingeniería Civil, en cualquiera de sus vertientes, es frecuente el diseño, valoración, o ejecución de actuaciones que se llevan a cabo sobre el territorio; siendo preciso efectuar este proceso en base a un proyecto que se elabora sobre un modelo del mismo. Gestionando adecuadamente este modelo de la realidad se llevan a cabo actividades muy diversas: planificación y análisis territorial, diseño de obras lineales, estudios hidráulicos,...

Para conseguir este objetivo final es preciso conocer las distintas ciencias, metodologías e instrumentación que permiten conseguir la meta planteada.

En particular en este bloque se introducirán los objetivos que tienen tanto la Topografía y la Geodesia como la Cartografía; poniendo de relieve la necesidad de conocer los sistemas de referencia involucrados en la definición de una posición espacial, los fundamentos de los modelos de datos cartográficos utilizados así como el modelo numérico de superficie habitualmente empleado.

Se plantea también el flujo de trabajo básico para la gestión de las diferentes fuentes cartográficas que hoy se manejan, así como fundamentos de creación, explotación y metodologías de trabajo típicas con modelos digitales de terreno.

1 TOPOGRAFÍA Y GEODESIA.

Para poder disponer de un modelo del territorio parece lógico conocer con precisión la forma de la tierra, así como el procedimiento de ubicar posiciones sobre la misma.

En relación al primer objetivo, el diccionario de la RAE define la Geodesia como “Ciencia matemática que tiene por objeto determinar la figura y magnitud del globo terrestre o de gran parte de él, y construir los mapas correspondientes”. Asimismo, define la Topografía como el “Arte de describir y delinear detalladamente la superficie de un terreno”.

Si bien los objetivos pueden parecer semejantes, en su origen la diferencia entre ambas ciencias ha sido la extensión abarcada: la topografía se concentra en pequeñas extensiones, en las que se podría prescindir de la forma real de la tierra y considerarla como plana, mientras que la Geodesia tiene en cuenta la forma real de toda la superficie terrestre.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



1.1 Superficies y elementos de referencia que usa la Geodesia.

1.1.1 Superficies matemáticas de aproximación: Geodesia geométrica.

Es comúnmente conocido que la tierra constituye uno de los planetas que forman el Sistema Solar, y que en relación al Sol está sometida a distintos movimientos, siendo los más importantes los de traslación, rotación, precesión y nutación.

Sí se pudiese admitir que la tierra estuviese constituida por un único material de densidad uniforme, que no existiese relieve alguno, que la rotación alrededor de su eje fuese totalmente regular y que no existiese atracción gravitacional por parte de ningún otro planeta o estrella, se puede entender que la figura geométrica regular cuya forma más se aproximaría a la superficie terrestre correspondería a un elipsoide de revolución, achatado por los polos, cuya definición básica se efectúa en base a las dimensiones de los semiejes mayor(a) y menor(b), como se observa en la figura 1.

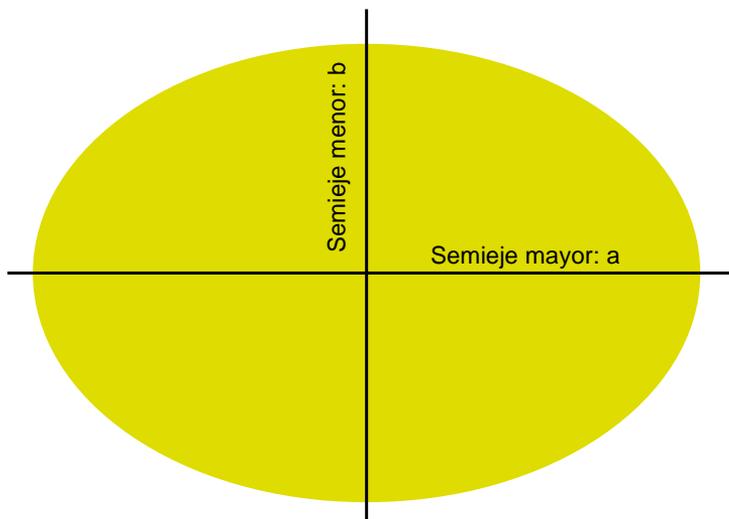


Ilustración 1.- Superficie matemática de aproximación: elipsoide de revolución.

La parte de la Geodesia que se dedica al estudio de las superficies matemáticas de aproximación de la tierra se denomina Geodesia geométrica. Para definir un elipsoide es habitual emplear otros parámetros, directamente relacionados con los dos valores principales de los semiejes a y b, siendo los más habituales el aplastamiento y la excentricidad.

$$\alpha = \frac{a-b}{a}; e = \frac{\sqrt{a^2-b^2}}{a} \quad \text{Ecuación 1.- Definición del aplastamiento y de la excentricidad}$$

Es importante destacar que la definición de esta superficie es totalmente convencional, pudiendo el alumno constatar cómo se han definido sucesivos elipsoides como figuras de

aproximación a la tierra, con ámbitos de aplicación diferentes: nacional, continental o global y para toda la superficie de la tierra.

En España, a modo de ejemplo, en los últimos 50 años se han empleado 3 elipsoides diferentes, cuyas características principales se enumeran en la tabla 1.

<i>Denominación</i>	<i>Ámbito</i>	<i>Periodo validez</i>	<i>Semieje mayor</i>	<i>Aplanamiento</i>
Struve	Nacional	Hasta 1970	6.378.298,3	1/294,73
Internacional, European Datum 1950, Ed50	Continental	Hasta 2007	6.378.388,000	1/297
World Geodetic System 1984, WGS84	Global	Actual	6.378.137,000	1/298,257223563

Tabla 1.- Elipsoides de referencia usados en España

Evidentemente, una vez se ha definido un elipsoide como superficie de aproximación de la tierra, la posición para cualquier punto situado sobre la misma se podrá referir al mismo elipsoide utilizando alguno de los distintos sistemas de coordenadas disponibles que se expondrán con posterioridad. Se debe tener presente que una misma posición en la Tierra quedará identificada por distintas parejas de coordenadas en los distintos elipsoides.

1.1.2 Superficie física de aproximación: Geodesia física.

La forma de la tierra se correspondería con un elipsoide de revolución si se cumpliesen las hipótesis enumeradas con anterioridad, que evidentemente no se verifican, de manera que la forma real de la tierra se caracteriza desde un punto de vista geométrico por ser totalmente irregular, pero en la que cada punto de la misma está en situación de equilibrio desde un punto de vista físico ante la actuación de las siguientes fuerzas principales, constituyendo de hecho una superficie equipotencial:

- Fuerza de atracción de los demás puntos de la tierra.
- Fuerza centrífuga debida a la rotación de la tierra.
- Fuerza de atracción de los demás planetas.

Es claro que existen infinitas superficies equipotenciales, cada una caracterizada por un potencial gravitatorio. A la superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre que coincide con el nivel medio de los océanos en mar abierto se le denomina Geoide, y constituye una superficie de referencia básica en tanto está directamente relacionada con una dirección fundamental en el ámbito de la Topografía, de la Geodesia y de numerosas disciplinas o actuaciones en la vida corriente, como es la dirección de la gravedad o dirección de la vertical, que permite por ejemplo definir una superficie horizontal, o al



construir una cuneta en una carretera, darle una pendiente adecuada que posibilite la evacuación del agua que recoge.

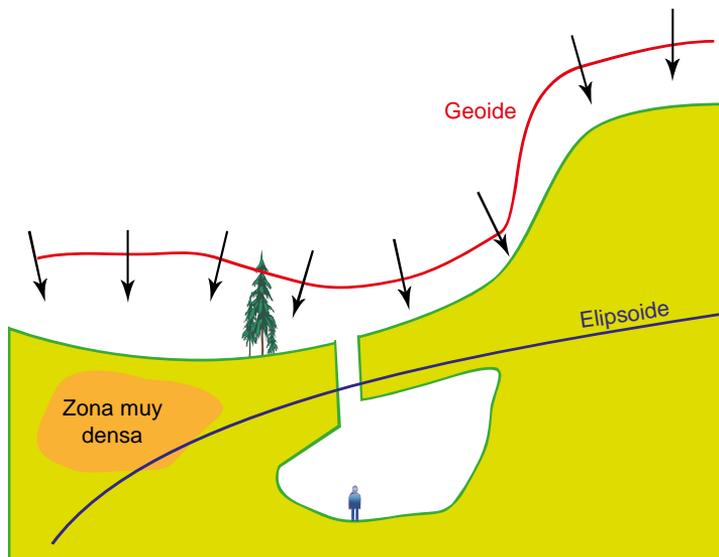


Ilustración 2.- Definición del Geoide. Relación con otras superficies de interés.

Sí se compara el Geoide con un elipsoide se pueden encontrar diferencias entre ambas superficies significativas, con valores de separación que pueden llegar a los 100 metros, y que de forma genérica se denomina ondulación del geoide. Por supuesto, ambas superficies no son paralelas, pudiendo llegar la variación del paralelismo entre ambas desde pocos segundos hasta valores en torno a un minuto sexagesimal en zonas muy abruptas.

Desde un punto de vista práctico, la utilidad y necesidad del Geoide está en que constituye una superficie de referencia altimétrica a partir de la cual y tomando como referencia la dirección de la vertical en cada punto, permite determinar diferencia de altitudes entre dos posiciones.

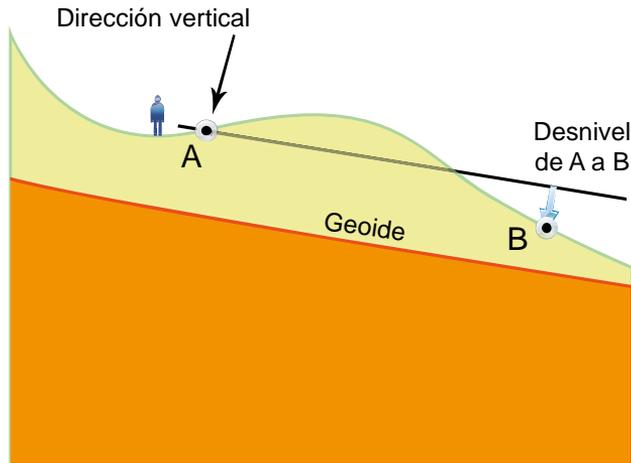


Ilustración 3.- Utilidad del Geoide como superficie de referencia altimétrica.

Un modelo de Geoide constituye una aproximación numérica continua del mismo, expresada como ondulaciones del Geoide referidas a un elipsoide concreto, es decir, para cada posición situada sobre el elipsoide de referencia –latitud, longitud-, se indica la posición del Geoide como la altitud sobre el elipsoide.

En la actualidad, el mejor modelo matemático disponible en la Península lo constituye el modelo denominado EGM-2008 - REDNAP, resultado de la adaptación del modelo gravimétrico mundial más reciente (EGM2008, Earth Gravitational Model, elaborado por la National Geospatial-Intelligence Agency –NGA- de EEUU, <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/>) al sistema de referencia vertical definido en España; efectuado este ajuste por el Instituto Geográfico Nacional en España.

A continuación se muestran las ondulaciones proporcionadas por dicho modelo para la Península, pudiéndose observar como los valores oscilan entre 40 y 60 m., situándose el Geoide por encima del elipsoide, referidas al elipsoide de referencia WGS84.

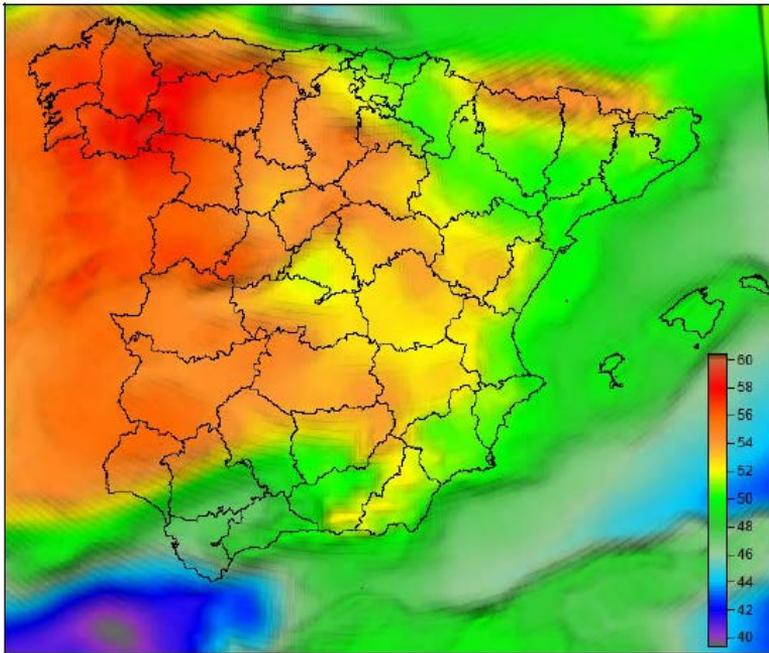


Ilustración 4.- EGM2008 en Península y Baleares (IGN).

A continuación se muestra con mayor detalle recortado al ámbito territorial de la Comunidad Autónoma de Cantabria.

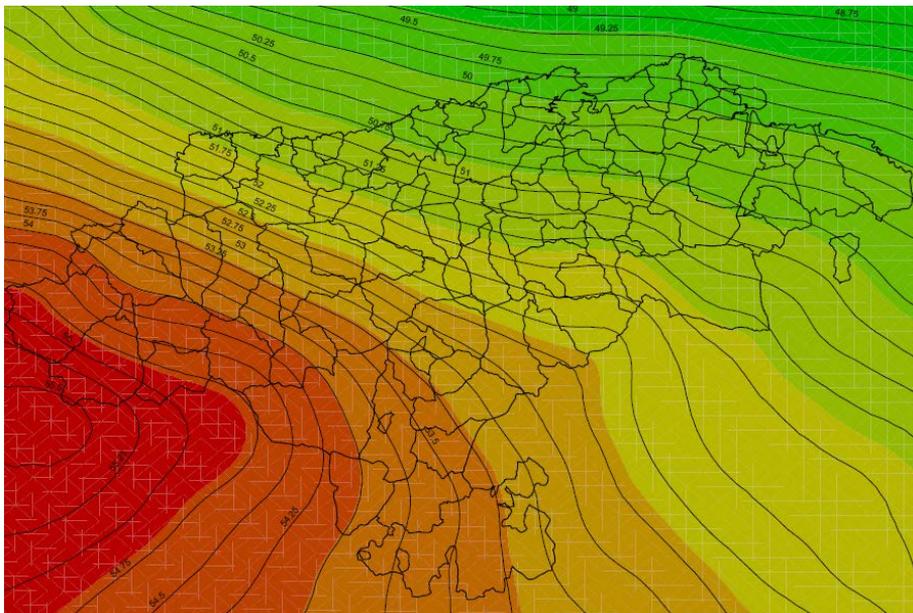


Ilustración 5.- Ondulación del modelo de Geoide EGM2008-REDNAP (Elaboración propia).

Para comprender el modelo expuesto anteriormente es preciso introducir el concepto de altitud para un punto como la distancia medida según la dirección perpendicular o normal desde una superficie de referencia hasta el punto.

Sí la superficie de referencia es un elipsoide, la altura se denomina altura elipsoidal (h). Sí la superficie de referencia es el Geoide, la altura obtenida es la altitud habitualmente empleada, debiendo denominarse con propiedad altura ortométrica (H), si bien es habitual denominarla simplemente altitud.

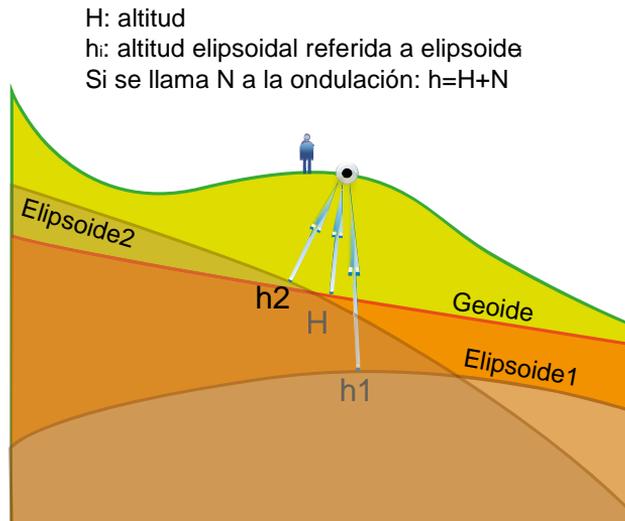


Ilustración 6.- Altitud y altitud elipsoidal para un punto.

EJERCICIO RESUELTO. ALTURA Y ALTURA ELIPSOIDAL.

En una determinada zona de Cantabria se conocen los datos siguientes para 3 posiciones, denominadas A,B y C:

Altitud de los puntos. $HA=10,50$ m, $HB=10,00$ m, $HC=10,00$ m.

Distancia reducida entre los puntos. $DAB = 45$ m, $DAC= 45$ m.

Ondulación del geoide, referida al elipsoide WGS84, expresada en metros, que se facilita en la figura siguiente.

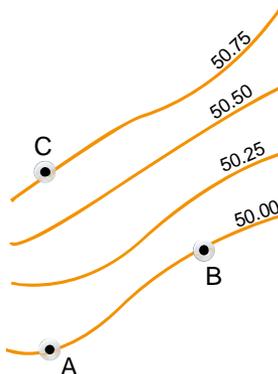


Ilustración 7.- Mapa de la ondulación del Geode.

Se plantean las siguientes cuestiones:

1.- Entre los puntos A y B, determinar la pendiente referida a ambas superficies expresada en %.

La determinación del desnivel referido al geode es directa, empleando las altitudes:

$$pendiente = \frac{10,00 - 10,50}{45} = -1,1 \%$$

Para obtener la pendiente que se obtendría al trabajar respecto al elipsoide será preciso conocer previamente las altitudes elipsoidales. A partir de los datos disponibles:

$$h_A = 10,50 + 50 = 60,50 \text{ m}$$

$$h_B = 10 + 50 = 60,00 \text{ m}$$

Por tanto, la pendiente que se obtendría utilizando altitudes elipsoidales será:

$$pendiente \text{ elipsoidal} = \frac{60 - 60,50}{45} = -1,1 \%$$

2.- Entre los puntos A y C, determinar la pendiente referida a ambas superficies expresada en %.

Con los nuevos datos, se obtiene en primer lugar la pendiente entre los puntos A y C:

$$pendiente = \frac{10,00 - 10,50}{45} = -1,1 \%$$

La altitud elipsoidal para el punto C es:

$$h_C = 10,00 + 50,75 = 60,75 \text{ m}$$

Por tanto, la pendiente que se obtendría utilizando altitudes elipsoidales será:

$$\text{pendiente elipsoidal} = \frac{60,75 - 60,50}{45} = 0,5 \%$$

3.- Se van a construir cunetas entre los puntos AB y AC para evacuar el agua que se recoge, siendo el origen de las mismas el punto A. ¿Funcionarán adecuadamente ambas cunetas?

Los desniveles, y en consecuencia las pendientes entre puntos, están relacionadas con la dirección de la vertical en cada punto y se refieren lógicamente al geoide. Las pendientes en ambos casos son negativas, lo que supone que la altitud del punto destino es menor que el origen, luego en consecuencia el agua podrá discurrir normalmente. No tiene sentido alguno emplear altitudes elipsoidales.

1.2 Sistemas de Referencia Geodésicos.

1.2.1 Elementos geográficos básicos de referencia.

Considerando un elipsoide de revolución como figura de aproximación de la superficie terrestre para poder referenciar una posición sobre la misma se definen los siguientes elementos de referencia generales, que se presentan en la figura 8.

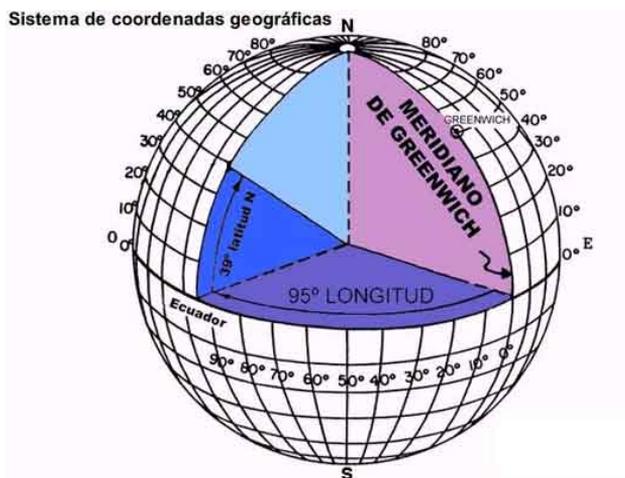


Ilustración 8.- Elementos de referencia en un elipsoide de revolución (http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node6_mn.html).

- Eje terrestre. Línea alrededor de la cual se produce el movimiento de rotación de la tierra. A los puntos de intersección en los que corta a la superficie terrestre se denominan polo norte y polo sur terrestre.

- Cualquier plano que contiene al eje de rotación de la tierra se denomina plano meridiano. La sección de cualquier plano meridiano con el elipsoide se denomina meridiano.
- Cualquier plano perpendicular al eje de rotación terrestre se denomina plano paralelo. La intersección de cualquier plano paralelo con el elipsoide se denomina paralelo. El plano paralelo que pasa por el centro de la tierra se denomina Ecuador, y divide al elipsoide en dos hemisferios: norte y sur.

Como se ha expuesto anteriormente, uno de los elementos geográficos más importantes en el desarrollo de la Geodesia es la vertical en un determinado punto. Considerando las dos posibles superficies de aproximación que se utilizan, se puede considerar dos verticales fundamentales en cualquier posición:

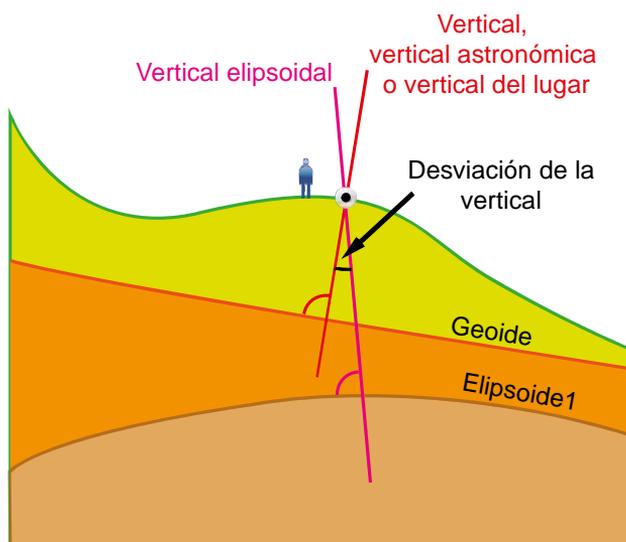


Ilustración 9.- Verticales fundamentales en un punto.

- Vertical respecto al Geoide. Para cada punto de la superficie terrestre toma una única dirección, que lógicamente coincide con la dirección de la plomada. Se denomina vertical del lugar, vertical astronómica, o simplemente vertical.
- Vertical respecto a un cierto elipsoide. Es la línea normal al elipsoide considerado en el punto, y se denomina vertical geodésica. Existen tantas verticales geodésicas como elipsoides se pueda considerar.

Al ángulo formado entre la vertical y la vertical geodésica se le denomina desviación de la vertical.

Finalmente, introducir algunos conceptos básicos que emplea la Astronomía de posición, que se denomina a la parte de la Astronomía que estudia la trayectoria y el movimiento de los astros para determinar la posición de puntos en la Tierra. Para ubicar un astro en relación a la superficie terrestre se emplea a una esfera ideal, sin radio definido, cuyo centro se supone coincidente con el de la superficie terrestre, denominada esfera celeste.

Para una posición concreta de un observador en la superficie terrestre, se denomina cenit a la intersección en sentido ascendente entre la vertical y la esfera celeste. Al punto opuesto, en sentido descendente, se le denomina nadir. Al plano perpendicular a la vertical en la posición del observador se le denomina plano horizontal. Al meridiano que contiene al cenit se le denomina meridiano astronómico del lugar. La recta que resulta de la intersección entre el meridiano astronómico y el plano horizontal tiene un especial interés geográfico, ya que indica la dirección norte-sur en la posición del observador. A esta recta se la denomina meridiana.

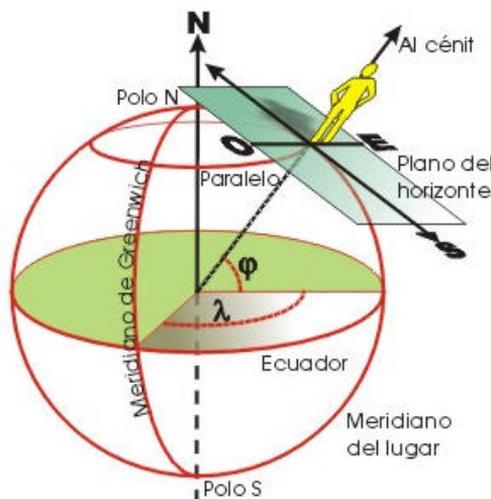


Ilustración 10.- Elementos básicos de Astronomía de posición (<http://www.xatakaciencia.com>).

1.2.2 Sistemas Geodésicos de referencia.

Uno de los campos de aplicación de la Geodesia que sin duda tiene una mayor trascendencia en la Ingeniería está en la definición de los Sistemas de Referencia, entendido en un sentido amplio, en tanto que realmente define los modelos y parámetros necesarios para poder obtener tanto posiciones en la superficie terrestre como incluso poder caracterizar el movimiento de la tierra como un planeta más.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



Para la completa y correcta definición de un Sistema de Referencia Terrestre, que se asume está ligado a la superficie de la tierra, se precisan concretar los siguientes datos:

- Posición del origen.
- Un plano XY de referencia, o alternativamente una dirección (y sentido positivo) para el eje Z.
- Una orientación para el eje X, o alternativamente un plano que corte al plano XY.
- Una escala.
- Otros modelos: constante de gravitación (GM), que define la masa total de la tierra; la velocidad de rotación terrestre (w) y un coeficiente de forma dinámica (J2). Entre paréntesis se indica su denominación habitual en Geodesia.

Por ejemplo, una posible definición de un hipotético Sistema de Referencia podría ser la siguiente, tal como se puede observar en la figura 11.

- Origen (1): el centro de masas de la tierra.
- El plano XY se define de forma indirecta, como plano que pasa por el origen y es perpendicular al eje de rotación medio, que a su vez constituye el eje Z positivo (2) en sentido ascendente. Evidentemente, constituye el plano Ecuador medio.
- La orientación para el eje X (3) se obtiene de la intersección del plano XY con el plano meridiano que pasa por una posición concreta de la superficie terrestre. En los Sistemas de Referencia habitualmente usados esta posición se concreta en una línea existente en el real observatorio de Greenwich (próximo a Londres).
- Finalmente, el eje Y (4) es el que corresponde para que el sistema de referencia sea dextrógiro.

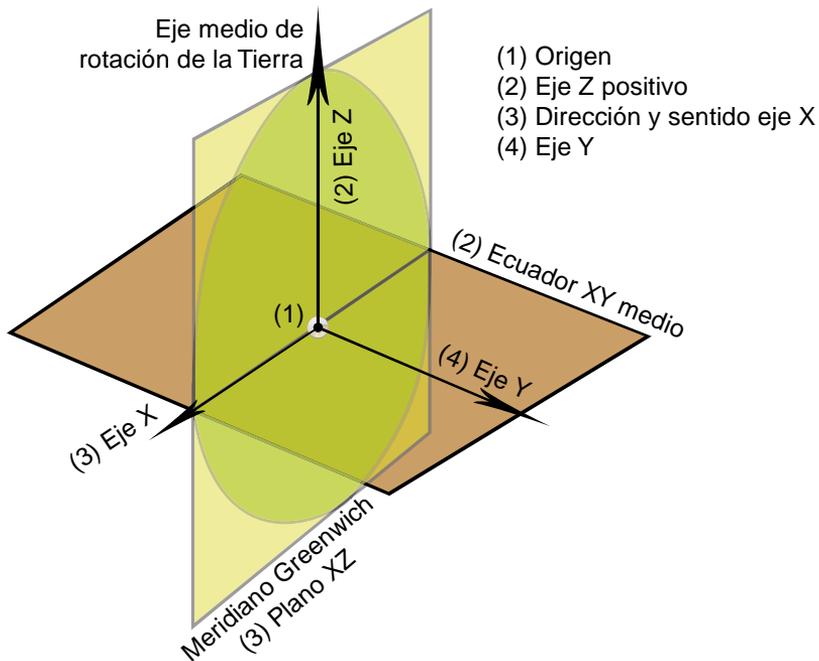


Ilustración 11.- Definición de un sistema de referencia terrestre.

Es claro que la definición de un sistema de referencia es totalmente convencional, pudiendo coexistir Sistemas de Referencia distintos en un mismo territorio en los que una misma posición en la superficie terrestre queda definida por coordenadas diferentes.

Es bastante frecuente referirse también a los modelos que definen un sistema de referencia, en su totalidad o a un subconjunto de los mismos, con el término de Datum. Indicar que se han utilizado Datum diferentes a lo largo del tiempo, y que en la actualidad se pueden encontrar tipologías diferentes:

- Datum local planimétrico. Son definiciones en las que el Sistema de Referencia se limita a una porción de la superficie terrestre, e intentan minimizar las diferencias que hay en la zona de aplicación del mismo entre la superficie de aproximación matemática (elipsoide) y la superficie de aproximación física (geoide). El sistema de referencia European Datum del año 1959, conocido como ED50, fija como datum los siguientes valores:
 - Elipsoide: Hayford (a,aplanamiento).
 - Para definir la posición del elipsoide, se establece una ubicación en el cual se referencia relativamente el elipsoide y el geoide (habitualmente se hace coincidir la vertical y la ondulación del geoide), que se denomina punto

astronómico fundamental. Este punto se fijó en la torre Helmert, situada cerca del observatorio ubicado en la localidad de Postdam (próximo a Berlín).

- Meridiano de origen: el que queda definido por el meridiano que pasa por Greenwich.
- Datum local vertical. Para concretar la superficie equipotencial de referencia que define el geoide se necesita una marca física que materializa el concepto teórico ideal de nivel medio del mar y en consecuencia la altitud $H=0,00000$ m. En España se ha definido este origen en el mareógrafo de Alicante en un cierto periodo de tiempo (1870 a 1882), correspondiente al nivel medio del mar en dicha posición. En Holanda, el nivel medio del mar se define en una posición concreta en el puerto de en Amsterdam; o en Alemania en el punto terrestre para el cual se tenían referencias de que su altitud era la mínima en el país.
- Datum global. La IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) encargó en 1991 al IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) la tarea de definir, realizar y promover el uso del sistema de referencia terrestre internacional (International Terrestrial Reference System, ITRS), cumpliendo las siguientes condiciones:
 - Origen: coincidente con el centro de masas de la tierra, incluyendo los océanos y la atmósfera.
 - Unidad de longitud: el metro.
 - Orientación. Las direcciones proporcionadas por el BIH (Bureau International de l'heure) en una época convencional, fijada en el tiempo 1984.0.
 - Controlar la evolución en el tiempo.

La materialización práctica de un sistema de referencia constituye lo que se denomina un marco de referencia (International Terrestrial Reference Frame, ITRF), y está constituido por el conjunto de los elementos que lo materializan, que no se reduce exclusivamente a un conjunto de puntos con coordenadas que lo materializan sino también por las técnicas y metodologías de cálculo usadas para su obtención, que en la actualidad supone el uso combinado de cinco metodologías distintas (VLBI - Very Long Baseline Interferometry-, LLR, SLR - Satellite Laser Ranging -, GPS - Global Positioning System- y DORIS).

Hasta el momento se han concretado 12 marcos de referencia ITRF, desde el primero denominado ITRF88 hasta el último definido como ITRF2008. La precisión en la definición de las posiciones que se está consiguiendo, y que se considera mejor de 1 centímetro,

está permitiendo llegar a determinar los movimiento relativos de las distintas placas tectónicas que constituyen la cubierta de la superficie terrestre y que se traduce en la obtención tanto de las coordenadas como también en la determinación de las velocidades de movimiento asociadas a los puntos que definen los marcos de referencia.

En la figura 12 se presenta el campo de velocidades asociado al marco de referencia ITRF2008, y en el que se puede observar cómo la placa continental europea, en la que se encuentra España, se mueve de media unos 3 cm/año en sentido noreste.

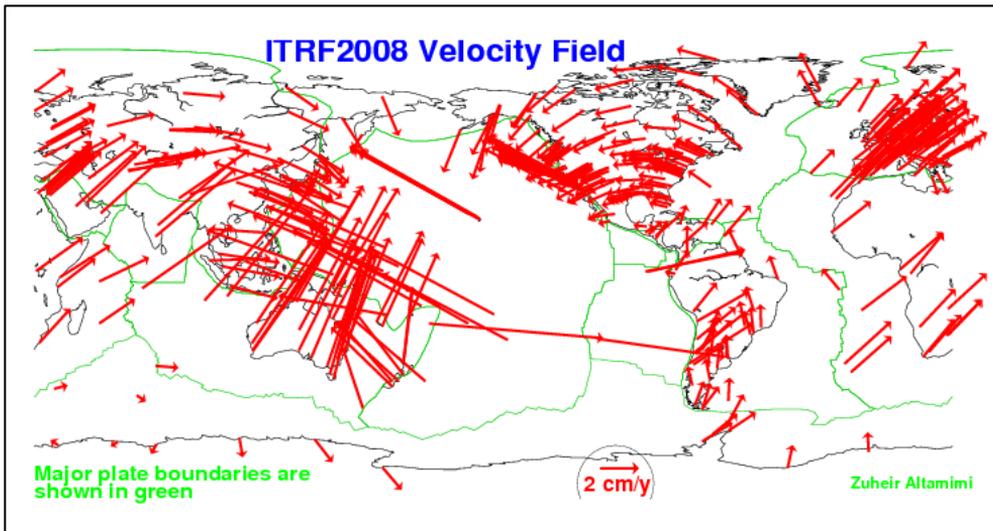


Ilustración 12.- Campo de velocidades de los puntos que definen el marco ITRF2008 (http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/doc/ITRF2008-Vel.gif).

A nivel práctico en cartografía en general, y en Ingeniería en particular, adoptar un sistema de referencia en el cual las coordenadas son variables el tiempo no es adecuado.

Con el objetivo principal de dotar de un marco de referencia continental a Europa, la X comisión de la IAG (International Association Geodesy), dependiente de la IUGG, crea una subcomisión denominada EUREF (European Reference Frame), que establece que el sistema de referencia terrestre más apropiado para Europa sea el ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), que se define coincidente con ITRS en la época 1989.0 y fijo a la parte estable de la placa euroasiática.

Indicar finalmente que se recomienda por EUREF la adopción del sistema de referencia europeo tanto a nivel de sistema de referencia terrestre como a nivel de referencia vertical.

European georeferencing by coordinates

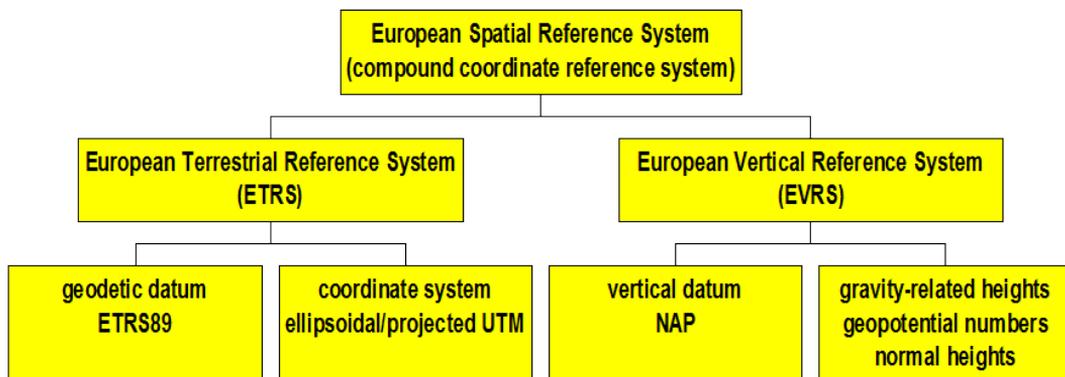


Ilustración 13.- Componentes del sistema de referencia espacial europeo. (http://www.ec-gis.org/sdi/ws/grid2003/ETRS89_tranf_EuroGrid_ws.ppt)

1.2.3 Sistema de coordenadas geográfico básico en un elipsoide.

Una vez se ha definido un sistema de referencia, se puede describir la posición de un punto situado sobre la superficie terrestre referida al mismo. Si bien una posición tiene intrínsecamente un claro carácter tridimensional, el hecho de emplear un sistema de referencia compuesto, formado por 2 superficies, justifica definir la posición de un punto como la combinación de 2 coordenadas complementarias:

- Coordenadas bidimensionales, referidas inicialmente a la posición situada sobre el elipsoide. De forma genérica, se denomina a estas coordenadas como planimetría.
- Coordenada unidimensional para la altitud, determinada sobre la normal al geode, que se denomina de forma genérica como altimetría.

Para definir la posición planimétrica de un punto sobre la superficie de un elipsoide, supuestos fijados los elementos de referencia que se han expuesto con anterioridad y que fundamentalmente se concretan en la definición del plano del Ecuador así como de un meridiano origen, se emplearán inicialmente las coordenadas geográficas: latitud y longitud elipsoidal. En el siguiente apartado se procederá a definir ambas coordenadas.

La ventaja potencial que poseen las coordenadas geográficas sobre otros sistemas de coordenadas es su carácter continuo, que permite describir una posición ubicada en cualquier parte de la superficie terrestre, para cualquier latitud y longitud. Sin embargo, en Cartografía e Ingeniería, como se expondrá con posterioridad, no son un sistema de coordenadas habitualmente utilizado por la dificultad que supone obtener a partir de

coordenadas geográficas las magnitudes que habitualmente se emplean: distancia entre puntos, ángulo entre dos direcciones, o superficie de un polígono, entre otras.

1.2.4 Glosario de términos de uso frecuente.

Finalmente, y a modo de resumen de gran parte de los conceptos expuestos con anterioridad, se adjunta una relación de los términos geodésicos de uso más frecuente, según se recoge en el documento denominado "Términos y definiciones de la ISO 19111, versión 1.0, elaborado por el Consejo Superior Geográfico en el año 2007.

Grupo de trabajo para la transición a ETRS89 Consejo Superior Geográfico Términos y definiciones de la ISO 19111 v 1.0 2007-10-05

La siguiente relación sigue un orden alfabético:

- **Altitud; h, H:** Distancia a un punto desde una superficie de referencia elegida a lo largo de una normal a esa superficie.

NOTA 1.- Véase altitud elipsoidal y altitud relacionada con la gravedad.

NOTA 2.- La altitud de un punto de fuera de la superficie se trata como positiva, a la altitud negativa también se la llama profundidad.

- **Altitud elipsoidal; altitud geodésica; h;** Distancia a un punto desde el elipsoide medida a lo largo de la normal al elipsoide por este punto positiva si es ascendente o el punto está fuera del elipsoide.

NOTA.-Solo se usa como parte de un sistema de coordenadas geodésicas tridimensional y nunca en sí misma.

- **Altitud relacionada con la gravedad; H:** Altitud que depende del campo de gravedad terrestre.

NOTA.- En particular, altitud ortométrica o altitud normal, que son ambas aproximaciones de la distancia de un punto al nivel medio del mar.

- **Aplanamiento; f:** Razón de la diferencia entre el semieje mayor (a) y el semieje menor (b) de un elipsoide al semieje mayor: $f = (a-b)/a$.

NOTA.- A veces se proporciona la inversa del aplanamiento $1/f = a/(a-b)$ en lugar del aplanamiento; $1/f$ es también conocida como aplanamiento recíproco.

- **Conversión de coordenadas:** Cambio de coordenadas basado en una relación uno a uno, desde un sistema de coordenadas a otro basado en el mismo datum.

EJEMPLO Entre sistemas de coordenadas geodésicas y cartesianas, o entre coordenadas geodésicas y coordenadas proyectadas, o cambios de unidades tales como de radianes a grados o de pies a metros.

NOTA.- Una conversión de coordenadas usa parámetros que tienen valores constantes.

- **Coordenada:** Cualquiera de los n números de una secuencia que designa la posición de un punto en un sistema n dimensional.

NOTA 1.- En un sistema de referencia de coordenadas, los números deben ser dados con unidades.

NOTA 2.- Una operación con coordenadas se realiza con las coordenadas en un sistema fuente que produce las coordenadas en el sistema objetivo.

- **Datum:** Parámetro o conjunto de parámetros que sirven como referencia o base para el cálculo de otros parámetros.

NOTA.- Un datum define la posición del origen, la escala y la orientación de los ejes del sistema de coordenadas.

- **Datum geodésico:** Datum que describe la relación de un sistema de coordenadas con la Tierra.

NOTA.- En la mayoría de los casos, el datum geodésico incluye una definición de elipsoide.

- **Datum para ingeniería; datum local:** Datum que describe la relación de un sistema de coordenadas con una referencia local.

NOTA.- Los datums para ingeniería excluyen tanto los datums geodésicos como los verticales.

EJEMPLO Un sistema para identificar posiciones relativas a pocos kilómetros del punto de referencia, por ejemplo, de una obra civil.

- **Datum vertical:** Datum que describe la relación de las altitudes relacionadas con la gravedad con la Tierra.

NOTA.- En la mayoría de los casos los datums verticales estarán referidos a un nivel medio del mar basado en observaciones del nivel de agua en un largo periodo de tiempo. Las altitudes elipsóidicas son tratadas como relativas a un sistema de coordenadas elipsóidico tridimensional referido a un datum geodésico. Los datums verticales incluyen datums de sondeos (usados para fines hidrográficos), en cuyo caso las altitudes pueden ser negativas o profundidades.

- **Elipsoide:** Superficie engendrada por la rotación de una elipse alrededor de un eje principal.

NOTA.- En esta norma internacional, los elipsoides son siempre achatados en el polo, esto significa que el eje de rotación es siempre el eje menor.

- **Este; E:** Distancia en un sistema de coordenadas, hacia el este (positivo) o hacia el oeste (negativo) desde una línea norte-sur de referencia.

- **Geoid:** Superficie de nivel que mejor ajusta el nivel medio del mar local o globalmente.

NOTA.- “Superficie de nivel” significa una superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre que es perpendicular en todos sus puntos a la dirección de la gravedad.

- **Latitud geodésica; latitud elipsoidal; j:** Ángulo que forma el plano ecuatorial con la perpendicular al elipsoide desde un punto dado, se toma positiva hacia el norte.

- **Longitud geodésica; longitud elipsoidal; l:** Ángulo que forma el plano meridiano principal con el plano meridiano de un punto dado, se toma positiva hacia el este.

- **Meridiano:** Intersección de un elipsoide por un plano que contiene el semieje menor del elipsoide.

NOTA.- Este término se usa a menudo para el arco que va de un polo al otro polo más que la figura completa cerrada.

- **Meridiano de Greenwich:** Meridiano que pasa por la posición del Círculo Meridiano de Airy en el Real Observatorio de Greenwich, Reino Unido.

NOTA.- Muchos datums geodésicos usan el meridiano de Greenwich como meridiano principal. Su posición precisa difiere poco entre distintos datums.

- **Meridiano principal; meridiano cero:** Meridiano desde el cual se cuantifican las longitudes de los otros meridianos.

- **Nivel medio del mar:** Nivel medio de la superficie del mar sobre todos los periodos de marea y variaciones estacionales.

NOTA.- Nivel del mar en un contexto local normalmente significa el nivel medio del mar en la región, calculado a partir de las observaciones en uno o más puntos en un periodo de tiempo dado. El nivel medio del mar en un contexto global difiere del geoid pero aproximadamente no más de 2 m.

- **Norte; N:** Distancia en un sistema de coordenadas, hacia el norte (positivo) o hacia el sur (negativo) desde una línea de referencia este-oeste.

- **Operación de coordenadas:** Cambio de coordenadas, basado en una relación uno a uno, desde un sistema de referencia de coordenadas a otro.

NOTA.- Supertipo de transformación de coordenadas y conversión de coordenadas.

- **Proyección cartográfica:** Conversión de coordenadas desde un sistema de coordenadas geodésicas a uno plano.

- **Referencia espacial:** Descripción de la posición en el mundo real.

NOTA.- Esto puede tomar la forma de una etiqueta, código o conjunto de coordenadas.

- **Semieje mayor; a:** Radio más largo de un elipsoide de revolución de dos ejes.

NOTA.- Para un elipsoide que represente a la Tierra, este es el radio del ecuador.

- **Semieje menor; b:** Radio más corto de un elipsoide de revolución de dos ejes.

NOTA.- Para un elipsoide que represente a la Tierra, es la distancia desde el centro del elipsoide a cualquiera de los polos.

- **Sistema de coordenadas:** Conjunto de reglas matemáticas que especifican cómo las coordenadas tienen que asignarse a los puntos.

- **Sistema de coordenadas cartesianas:** Sistema de coordenadas que da la posición de puntos respecto de n ejes mutuamente perpendiculares.

NOTA n es 1, 2 ó 3 para los fines de esta norma internacional.

- **Sistema de coordenadas de una proyección:** Sistema de coordenadas bi-dimensional resultante de una proyección cartográfica.

- **Sistema de coordenadas geodésicas;** sistema de coordenadas elipsóidicas: Sistema de coordenadas en el que la posición es especificada, por la latitud geodésica, la longitud geodésica y (en los casos tridimensionales) la altitud elipsóidica.

- **Sistema de coordenadas polares:** Sistema de coordenadas en el que la posición está definida por la dirección y la distancia desde el origen.

NOTA:- En tres dimensiones también se llama sistema de coordenadas esféricas.

- **Sistema de referencia de coordenadas:** Sistema de coordenadas que está referido al mundo real a través de un datum.

NOTA.- Para datums geodésicos y verticales, estarán referidos a la Tierra.

- **Sistema de referencia de coordenadas compuesto:** Sistema de referencia de coordenadas que usa otros dos sistemas de referencia de coordenadas independientes para describir una posición.

EJEMPLO: Un sistema de referencia de coordenadas basado en sistemas de coordenadas bi o tri-dimensionales y otro sistema de referencia de coordenadas basado en un sistema de altitudes relacionado con a la gravedad.

• **Transformación de coordenadas:** Cambio de coordenadas desde un sistema de referencia de coordenadas a otro sistema de referencia de coordenadas basado en un datum diferente a través de una relación uno a uno.

NOTA-. Una transformación de coordenadas usa parámetros obtenidos empíricamente a partir de un conjunto de puntos con coordenadas conocidas en ambos sistemas de referencia de coordenadas.

1.3 Sistema de referencia y sistema de coordenadas oficial.

El sistema de referencia geodésico que debe ser utilizado para generar toda la información geográfica y cartográfica oficial se fija en el RD 1071/2007, de 27 de Julio, y busca la *“completa integración de la información geográfica y de la cartografía oficial española con la de otros países europeos y con los sistemas de navegación”*.

Sintéticamente, establece el siguiente sistema de referencia geodésico y de coordenadas a utilizar:

- Sistema de referencia geodésico oficial: ETRS89, European Terrestrial Reference System 1989, en la Península y las islas Baleares. Específica que se materializa por el marco que define la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales, REGENTE, y sus densificaciones.
- El sistema de coordenadas empleado para la representación planimétrica, para cartografía terrestre a escalas mayores de 1:500.000 será ETRS-Transversa de Mercator.
- Sistema de referencia altimétrico: como referencia se tomarán los registros del nivel medio del mar en Alicante, en la Península. Se materializará en la Red de Nivelación de Alta Precisión.

1.4 Redes Geodésicas y Topográficas.

En 1870 se crea en España el Instituto Geográfico, asignándole como principales cometidos “realizar los trabajos relativos a la determinación de la forma y dimensiones de la Tierra, triangulaciones geodésicas de diversos órdenes, nivelaciones de precisión, triangulación topográfica, topografía del mapa y de catastro, así como las cuestiones relativas a pesos y medidas”. Este organismo, que en la actualidad se denomina Instituto Geográfico Nacional, dependiente del Ministerio de Fomento, ha precisado para

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



desarrollar las labores encomendadas de construir físicamente hitos en los que se materializase el sistema de referencia vigente en cada momento, y que de forma genérica se denominan redes geodésicas.

Como principales objetivos de las redes geodésicas se podrían enumerar:

- Concretar en señales los valores de su posición referidas al sistema de referencia vigente, posibilitando que a partir de las mismas se generen nuevas redes, de menor precisión, usadas con fines muy diversos: creación de mapas, trabajos fotogramétricos, control de deformaciones, trabajos topográficos,...
- Obtener en estas señales los observables que permiten modelizar con precisión el sistema de referencia, como pueden ser valores de gravedad, altitud, longitud y latitud,...

En los distintos países ha sido habitual denominar a la Red Geodésica Principal, en el sentido de constituir la red de mayor cobertura con la máxima precisión posible con las metodologías e instrumentos disponibles, como Red de Primer Orden. En España, esta red se ha configurado con señales separadas distancias entre 30 y 50 kilómetros, ubicadas además en lo alto de picos o cerros, siempre posiciones elevadas, con visibilidad directa entre ellas, consecuencia de los instrumentos y metodologías empleadas en su observación. Esta red está formada por un total de 285 vértices, y su configuración se puede observar en la figura 14.

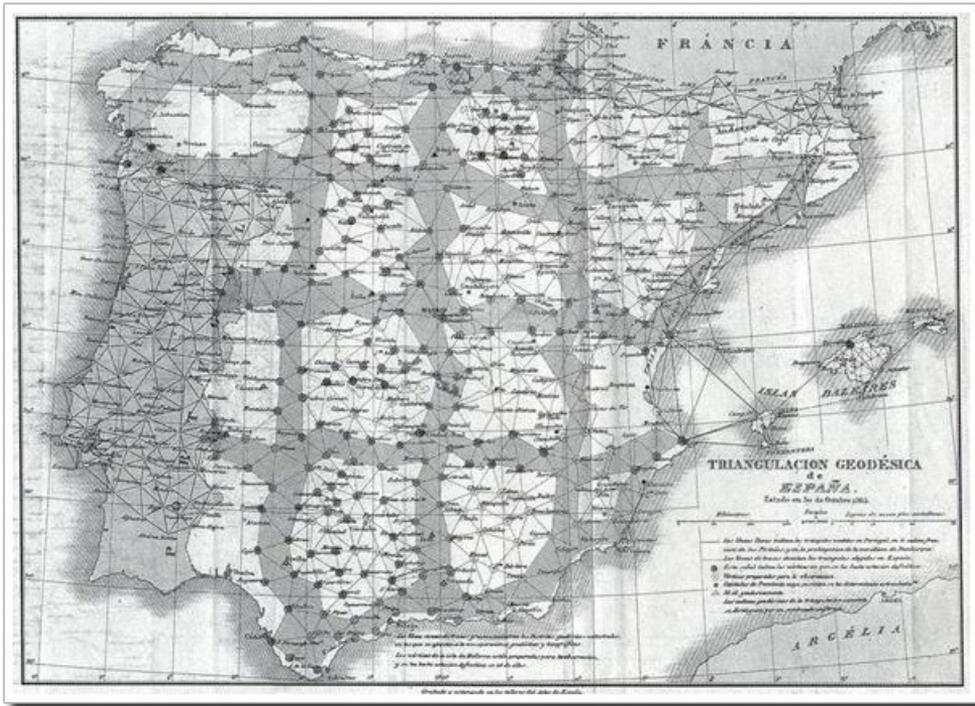


Ilustración 14.- Red de Primer Orden en España (www.ign.es).

Esta primera red pretende establecer un marco homogéneo en toda la península, en base a la cual se observan nuevas redes encajadas en la misma que materializan vértices a una distancia significativamente inferior, de media entre 4 y 8 kilómetros, también ubicados en zonas elevadas con visibilidad directa entre ellas, que constituye la denominada Red de Orden Inferior (ROI), y que consta aproximadamente de unos 11000 vértices. Los vértices Geodésicos están materializados de forma típica por un cilindro de hormigón, de 1,20 m. de altura y 0,30 m de diámetro.

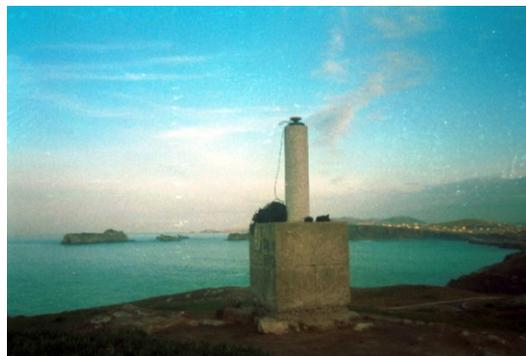


Ilustración 15.- Vértice geodésico perteneciente a la ROI. Garita (T.M. Suances).

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



Indicar que en la actualidad, utilizando técnicas de medida basadas en metodologías de Geodesia Espacial es posible observar redes cuya precisión relativa es mejor que las redes Geodésicas existentes, y que se denominan redes de orden cero. En muchos casos los vértices geodésicos que las constituyen son los mismos que anteriormente constituían la ROI, pero sus coordenadas se han determinado con mucha mayor precisión. A su vez, las redes de orden cero se clasifican jerárquicamente en tres clases:

- Clase A. Sus posiciones deben tener una precisión mejor de 1 centímetro en sus coordenadas, y deben estar observadas de forma continua, determinándose por tanto el vector velocidad para las mismas.
- Clase B. Deben tener una precisión mejor de 1 centímetro, pero no se exige conocer el vector velocidad para las mismas.
- Clase C. Precisión mejor de cinco centímetros en sus coordenadas, y no se exige vector velocidad.

De forma complementaria, y para definir la superficie de referencia en altimetría, y de nuevo ligado a las técnicas e instrumentos utilizados para determinar desniveles con la máxima precisión, se han observado las denominadas redes de nivelación, que se desarrollan habitualmente utilizando las vías de comunicación, bien carreteras, bien ferrocarril.

Pertenecientes también a esta categoría se deberían considerar la Red Gravimétrica Nacional, destinada a observar valores para la gravedad absoluta, y la red de Mareógrafos, cuyo origen está en la definición de la señal principal que convencionalmente fijó el origen de altitudes de la cartografía en España.

1.4.1 Redes Geodésicas.

Las Redes Geodésicas, en sentido amplio, que constituyen el marco que define el sistema de referencia geodésico y utilizadas especialmente para la obtención de coordenadas planimétricas son las que se enumeran a continuación, ordenadas según su precisión de mayor a menor:

- Red de estaciones permanentes utilizando técnicas de Geodesia espacial (GNSS, Global Navigation Satellite System). Constituye la materialización de la red de orden cero y clase A.
- Red IBERIA95. Constituyen la materialización de la red de orden cero, clase B, formada por 27 vértices pertenecientes a la ROI.



Ilustración 16.- Red IBERIA95 (www.ign.es).

- Red REGENTE. Se observó para materializar el sistema de referencia oficial en España, ETRS89, y está constituida por 1029 vértices pertenecientes a la ROI, con una densidad de un vértice por cada hoja del mapa topográfico nacional de España a escala 1:50.000. Integra los vértices pertenecientes a IBERIA95.



Ilustración 17.- Red REGENTE (www.ign.es).

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



- Red geodésica nacional en ETRS89. En base al marco definido por la red REGENTE, se ha procedido a dotar de coordenadas al resto de vértices de la ROI en el nuevo sistema de referencia.

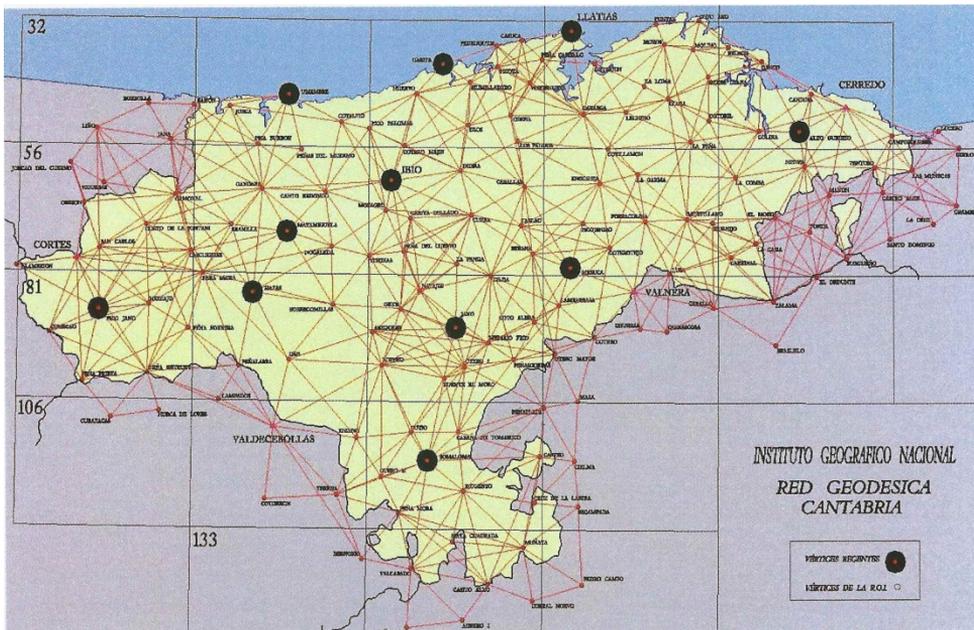


Ilustración 18.- ROI en la CCAA de Cantabria. Resaltado en negro los vértices REGENTE. (www.ign.es)

La información de las coordenadas para cada uno de los vértices de las distintas redes está libremente accesible a través de internet en la página del Instituto Geográfico Nacional. A continuación, y a modo de ejemplo, se muestra la información relevante de las reseñas para dos vértices geodésicos, pertenecientes a las redes REGENTE y ROI, en la que se proporcionan las coordenadas del vértice en los distintos sistemas de referencia que actualmente coexisten, usando distintos sistemas de coordenadas, y cuya interpretación se debe efectuar correctamente.

Número.....:	3519
Nombre.....:	Llatias
Municipio..:	Santander
Provincia..:	Cantabria
Fecha de Construcción.....:	30 de septiembre de 1985
Pilar con centrado forzado..:	1,20 m de alto, 0,30 m de diámetro.
Último cuerpo.....:	4,00 m de alto, 1,98 m de ancho.
Total cuerpos.....:	2 de 4,20 m de alto.

Coordenadas Geográficas:		
Sistema de Ref.:	ED 50	ETRS89
Longitud.....:	- 3° 48' 06,7439"	- 3° 48' 11,55008"
Latitud.....:	43° 29' 18,2670"	43° 29' 14,40628"
Altitud.....:		122,673 m (CF)
Compensación:	01 de octubre de 1987	28 de noviembre de 2004

Coordenadas UTM. Huso 30 :		
Sistema de Ref.:	ED 50	ETRS89
X.....:	435157,59 m	435051,473 m
Y.....:	4815453,64 m	4815248,148 m
Factor escala....:	0,999651713	0,999651887
Convergencia...:	- 0° 33' 07"	- 0° 33' 10"
Altitud sobre el nivel medio del mar:		71,796 m. (BP)

Ilustración 19.- Reseña de un vértice perteneciente a REGENTE.

Número.....:	5776
Nombre.....:	Canto Redondo
Municipio..:	Cabezón de la Sal
Provincia..:	Cantabria
Fecha de Construcción.....:	01 de agosto de 1984
Pilar sin centrado forzado..:	1,20 m de alto, 0,30 m de diámetro.
Último cuerpo.....:	0,40 m de alto, 1,00 m de ancho.
Total cuerpos.....:	1 de 0,40 m de alto.

Coordenadas Geográficas:

Sistema de Ref.:	ED 50	ETRS89
Longitud.....:	- 4° 16' 11,5660"	- 4° 16' 16,44325" ±0.097 m
Latitud.....:	43° 16' 33,6068"	43° 16' 29,69793" ±0.082 m
Altitud.....:		727,039 m ±0.074 (BP)
Compensación.:	01 de octubre de 1987	01 de noviembre de 2009 <small>Elipse de error al 95% de confianza.</small>

Coordenadas UTM. Huso 30 :

Sistema de Ref.:	ED 50	ETRS89
X.....:	396953,44 m	396846,420 m
Y.....:	4792334,65 m	4792129,012 m
Factor escala....:	0,999730611	0,999730892
Convergencia...:	- 0° 52' 14"	- 0° 52' 17"
Altitud sobre el nivel medio del mar:		674,841 m. (BP)

Ilustración 20.- Reseña de un vértice perteneciente a la ROI.

En el caso de los vértices de la red de estaciones permanentes GNSS, se proporcionan directamente observaciones para ser utilizadas empleando equipos GNSS.

1.4.2 Red de Nivelación.

Su objetivo es el establecimiento de señales que establecen con precisión el sistema de referencia altimétrico, referido al Geoide. El establecimiento del punto fundamental altimétrico, que constituye el origen de altitudes para todas las redes de nivelación en España se ha fijado en el mareógrafo de Alicante, observándose a partir del mismo el desnivel para la señal que constituye el clavo de nivelación denominado como NP-1, que

se encuentran el interior del ayuntamiento de la ciudad, y que constituye el origen de todas las redes de nivelación en España.

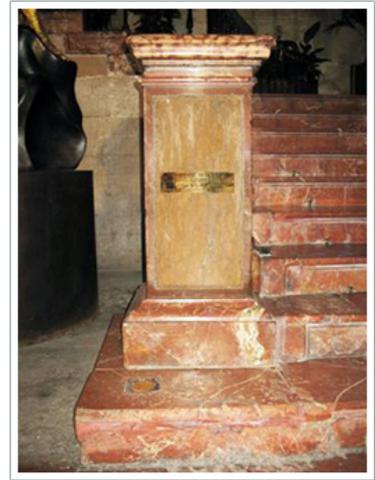


Ilustración 21.- Clavo de nivelación origen para la red de nivelación España (www.ign.es).

A partir de esta señal, y utilizando las mejores metodologías y los mejores instrumentos en cada época destinados a la observación de desniveles, se han establecido señales ubicadas a lo largo de líneas de ferrocarril y de carreteras nacionales, y que materializan el marco de referencia altimétrico.

Indicar que prácticamente hasta finales de la primera década en este siglo se ha estado utilizando la denominada Red de Nivelación antigua en todos los trabajos cartográficos, geodésicos y fotogramétricos realizados, y que estaba constituida por señales que se han observado y procesado en un período que se puede concretar entre 1871 y 1988.

Entre los años 1999 y 2007 se ha procedido a rediseñar, materializar y observar una nueva red de señales repartidas en toda la geografía peninsular, y que constituyen la denominada Red de Nivelación de Alta Precisión (REDNAP), que proporciona clavos espaciados aproximadamente 1 km, a lo largo de carreteras, autovías y autopistas, y que tiene una longitud aproximada de 16500 km. La obtención de los datos de las líneas y de las reseñas correspondientes a los clavos se debe efectuar en la web del IGN.

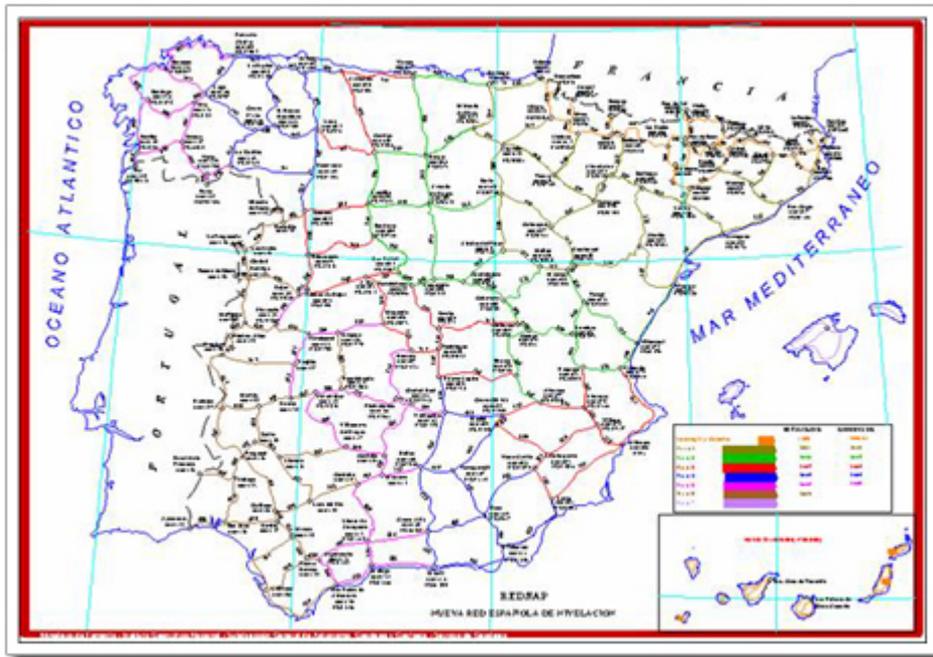


Ilustración 22.- Gráfico de líneas de la nueva Red Española de Nivelación de Alta Precisión (REDNAP).

A continuación se muestra a modo de ejemplo una reseña para una señal perteneciente y compensada en la REDNAP.



Servicio de Programas Geodésicos

Subdirección General de Astronomía, Geodesia y Geofísica

Reseña de Señal de Nivelación

11-feb-2012

Situación Geográfica:

Número: 20234162
Nombre: NGJ937
Línea o Ramal: 20234. Colindres - Vargas (Tramo 2 antigua 234)

Municipio: Medio Cudeyo
Provincia: Cantabria
Hoja MTN50: 35
Señal: Principal **En posición:** Horizontal
Señalada: 01 de junio de 1974
Nivelada: 01 de febrero de 2004

Datos Geodésicos:

Altitud ortométrica: 38,8995 m.
Geopotencial: 38,14025 u.g.p.
Gravedad en superficie: 980480,39 mgals. *Observada*
Cálculo: 01 de mayo de 2008

Coordenadas Geográficas ETRS89:

Longitud: - 3° 46' 01,885"
Latitud: 43° 23' 46,791"
Altitud elipsoidal: 89,3 m.
Precisión: ± 0,1 m.

Reseña:

Clavo metálico semiesférico incrustado aproximadamente en el Km. 12 de la margen S de la Carretera N-635a, en un muro de contención, casi frente a la carretera a Pedreña.

Enlaces:

Anterior: 20234161 - SSK13a
Posterior: 20234163 - NGJ938
Agrupada con: 20234163 - NGJ938.



Ilustración 23.- Reseña de una señal perteneciente a REDNAP.

Finalmente indicar que para consultar las coordenadas de cualquier señal que configuran cualquiera de los 2 marcos de referencia expuestos hasta el momento, existe una aplicación distribuida por el Instituto Geográfico Nacional que aglutina el acceso a toda la información más actualizada, denominada Programa de aplicaciones geodésicas, y que se muestra en la figura siguiente.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210





Ilustración 24.- Programa de aplicaciones Geodésicas (v0.9, Enero 2012).

1.4.3 Redes Topográficas.

Es evidente que si la captura de toda la información espacial en un mismo territorio emplea el mismo marco en los sistemas de referencia utilizados, el intercambio de información geográfica estará asegurado. Con este objetivo, todas las actuaciones que se lleven a cabo en Ingeniería y que tengan un claro componente espacial deberán ser definidas empleando los sistemas de referencia establecidos - que normativamente solo obligan a su uso a los organismos oficiales-, empleando para su captura nuevas redes adaptadas al objetivo del proyecto desarrollado y que se apoyen a su vez en las Redes Geodésicas descritas con anterioridad. A estas redes se les denomina de forma genérica redes topográficas, existiendo numerosas con objetivos muy diversos, indicándose a continuación algunas de las más típicas, sin carácter exhaustivo:

- Redes municipales. Empleadas por los ayuntamientos para el control de todas las actuaciones que tienen lugar en cada municipio.

- Redes asociadas a servicios de infraestructuras. Ejemplos característicos pueden ser las redes destinadas al control de los servicios de abastecimiento, electricidad,...
- Redes asociadas al desarrollo de proyectos e ingeniería: construcción de un tramo de carretera, construcción de un puente,...

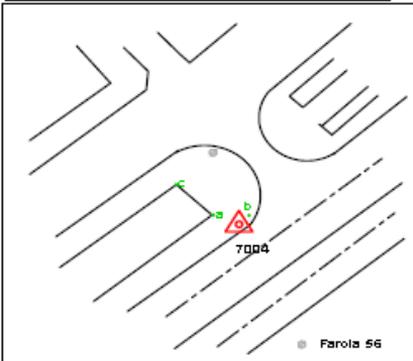
A continuación, y a modo de ejemplo, se muestra una reseña de la red de vértices propiedad del Ayuntamiento de Santander para el control de todas las actuaciones municipales.


9.06/2004

RED DE VERTICES DEL MUNICIPIO DE SANTANDER



VERTICE	7004	SEÑAL	Clavo reglamentario, sobre acera.
Coordenadas Planimétricas UTM		Altitud NMMA	
X	435055,635	Y	4813568,553
Coef. Reduación		T	
0,999994		38,627	
Coef. Proyección		G	
0,999652		38,645	
VERTICES VISIBLES		Referencias	
VERTICE	AZIMUT (gr)	Diferencia reducida horizontal e elevación	
7003	84,6362	a	3,14
7005	289,7321	b	0,54
		c	10,48



● Farola 56





Ilustración 25.- Ejemplo de la reseña de un vértice en una red topográfica municipal (Ayuntamiento Santander).

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



Indicar finalmente de la existencia de redes activas, empleando técnicas de Geodesia Espacial, existentes en la mayoría de las Comunidades Autónomas y que permiten la obtención de coordenadas en el marco de referencia ETRS89, en tiempo real y con precisiones adecuadas para gran parte de los trabajos de ingeniería; cuestión que se ampliará con posterioridad en el apartado de Geodesia Espacial.

2 CARTOGRAFÍA.

2.1 Introducción a la cartografía.

La cartografía tiene por objeto el diseño, preparación y creación de todos los tipos de mapas, constituyendo una representación de los fenómenos geográficos existentes en la realidad, seleccionados durante el proceso de formación del mapa de tal modo que todos aquellos elementos y detalles que resulten de interés para la finalidad del mapa queden claramente visibles.

Un mapa constituye en consecuencia una representación convencional de la realidad, en la que el productor, el cartógrafo, partiendo de la realidad existente y conforme a una serie de normas y modelos cartográficos trata de transmitir al usuario final la realidad de partida, que busca un uso concreto del mapa. El cartógrafo debe decidir, entre otros aspectos, cuestiones como la incorporación y el detalle en la representación de fenómenos existentes, como puede ser un edificio o una carretera, así como añadir otros elementos que no son visibles por sí mismos, como puede ser el límite de un término municipal o el nombre de un paraje. Cada elemento que aparece en un mapa debe poder ser identificado sin ambigüedad por el usuario, cualquiera que sea el modelo de datos empleado. Se deben emplear además textos o rótulos para resaltar o identificar elementos o aspectos de interés para la finalidad del mapa, y si también se precisa considerar la tercera dimensión o altitud de las entidades, esta se deberá codificar siguiendo modelos que permiten su interpretación en representaciones formalmente bidimensionales. Un mapa de una gran extensión de terreno en tres dimensiones debe constituir una representación convencional que permita el análisis de la misma con unas dimensiones y detalle que se deben poder apreciar a simple vista por el usuario final de la misma.

Si se tiene en cuenta que el diseño y realización de un mapa debe ser adecuado al objetivo que el usuario espera del mismo, es claro que existen numerosos tipos de mapas posibles, y en consecuencia numerosas clasificaciones de la tipología de los mapas. Una clasificación habitual es la que emplea los dos puntos de vista siguientes:

- Según la escala del mapa.

Se distingue entre mapas de escalas grandes – escalas con denominador pequeño y mucho detalle en el contenido, por ejemplo 1:1.000– y de escalas pequeñas – escalas con denominador grande y poco detalle, por ejemplo 1:50.000 -.

- Según la finalidad con la que se diseña el mapa. Se distinguen 2 grandes categorías:

- Mapas topográficos. Su objetivo principal es conseguir una representación lo más detallada y precisa tanto de la superficie terrestre como de los objetos fijos e identificables que existen sobre la misma. En este tipo de mapas se podrá encontrar, por ejemplo, tanto la definición de una montaña como la forma y dimensiones de un edificio.
- Mapas temáticos. Utilizando como base un mapa topográfico, se desarrolla de forma especial algún aspecto concreto de la realidad mediante símbolos, cualitativos y cuantitativos, para cualquier tipo de fenómeno que tenga alguna componente espacial. Un ejemplo puede ser el mapa de la incidencia de una cierta enfermedad en un territorio, o el mapa de la red del Metro de una ciudad.

Este tipo de mapas se suelen clasificar en función de la finalidad perseguida, distinguiéndose las siguientes categorías de uso frecuente: físico, político, geológico, catastral, climático, urbanístico, poblacional, económico, estadístico, biológico, transporte, turístico,...

Si bien se trabajará con bases cartográficas diversas, las habitualmente utilizadas en el marco de la Ingeniería Civil como soporte básico para el desarrollo de proyectos están constituidas por mapas topográficos de escalas grandes, centradas en modelizar la superficie terrestre y los objetos situados sobre la misma con elevada precisión y nivel de detalle, y que constituyen el objetivo principal de la asignatura.

Como se indicó anteriormente el proceso de creación de un mapa conlleva el conocimiento, la elección y aplicación de un conjunto de procedimientos y de normas que permiten al cartógrafo su realización, y que los ingenieros como destinatarios técnicos deberán entender para interpretar adecuada y eficazmente el modelo de la realidad que se ha pretendido transmitir. Es habitual diferenciar dos etapas en la fase de formación, con objetivos claramente diferenciados:

- Diseño cartográfico. Engloba el conjunto de condicionantes que tienen como objetivo traducir los requerimientos del usuario del mapa a conceptos técnicos que posibiliten su formación.
- Redacción cartográfica. Supone conocer el uso de las variables visuales habitualmente usadas y que permiten la correcta interpretación de los mapas.

2.2 Diseño Cartográfico.

El proceso de codificación de la información exige explicitar, para el objetivo del mapa, distintos tipos de cuestiones:

- Criterios de selección. Supone concretar qué información se debe capturar.
- Mecanismos de generalización. Nivel de detalle con el que se debe capturar cada fenómeno geográfico.
- Clasificación. Explicitar la asignación de entidades del mundo real a los fenómenos correspondientes en la base cartográfica.
- Priorización. Ordenación en función de su importancia o interés en el mapa.
- Carácter métrico del mapa. Concretar el sistema de referencia y la proyección cartográfica para obtener una representación bidimensional.
- Tratamiento del relieve. Modelo para definir la superficie de la Tierra.
- Estructura de la información a capturar. Modelo de datos y formato de la información.

El resultado final de esta fase es un documento en el que se detallan desde un punto de vista cartográfico todos los aspectos anteriores, y que de forma genérica se denomina modelo o diccionario de datos.

2.2.1 Escala cartográfica: detalle y generalización de la información.

Como se expondrá en sucesivas unidades temáticas, las distintas metodologías de captura de información geográfica permiten localizar tridimensionalmente cualquier posición sobre la superficie terrestre, prácticamente para cualquier precisión requerida en Ingeniería. La captura de cualquier fenómeno de interés se efectuará obteniendo su forma y dimensiones reales, empleando ternas de coordenadas:

- Para definir la planimetría se empleará una pareja de coordenadas, del tipo (longitud, latitud) si se usan coordenadas geográficas o (x,y) si se usan coordenadas proyectadas
- Para definir la tercera dimensión se obtendrá la altitud del fenómeno respecto a una superficie de referencia.

La primera cuestión que se plantea consiste en definir cuál es el nivel de detalle con el cual se tienen que capturar los elementos existentes en la realidad en función del objetivo del mapa. Por ejemplo: ¿Cómo se debe capturar una carretera de calzada única y doble sentido, con un ancho de plataforma de nueve metros, en un mapa destinado al diseño en Ingeniería?. ¿O cómo se debe de capturar un pequeño edificio de planta cuadrada, con unas dimensiones aproximadas de cinco metros, en un mapa destinado a la planificación territorial de un municipio?.

La respuesta desde un enfoque cartográfico a esta cuestión, que supone fijar el nivel de información planimétrico del mapa, es coherente con el objetivo buscado de obtención de una representación que pueda ser observada a simple vista: el detalle de los elementos será aquel que admita la representación gráfica del mapa que se está diseñado, y que viene establecida en la escala del mapa. Es decir, el nivel de detalle mínimo será aquella dimensión que pueda ser apreciada en una representación gráfica o papel a la escala de formación.

Es frecuente admitir en cartografía que la separación mínima entre dos puntos dibujados para que puedan ser apreciados de forma individual como tales se fija en 0,2 mm., por ejemplo: sí dos puntos distan 0,4 mm. una persona con agudeza visual normal es capaz de diferenciar claramente ambos.

De la combinación de los dos conceptos expuestos anteriormente, formados por el establecimiento de la distancia mínima que puede ser identificada en una representación gráfica y que en Cartografía se denomina límite de percepción visual (LPV), unido al concepto de escala que identifica a un mapa y que traduce esa distancia a magnitud real, proporcionan de una forma clara e inequívoca el nivel de detalle que caracteriza a una base cartografía.

En la tabla siguiente se procede a explicitar para las escalas más habituales en Ingeniería cual es el nivel de detalle que deberán tener los fenómenos geográficos seleccionados.

<i>Escala del mapa</i>	<i>Límite de percepción visual (mm, papel en representación)</i>	<i>Nivel de detalle (m, unidades reales)</i>
1:500	0,2	0,1
1:1.000	0,2	0,2
1:2.000	0,2	0,4
1:5.000	0,2	1
1:10.000	0,2	2
1:25.000	0,2	5

Tabla 2.- Nivel de detalle planimétrico para las escalas más habituales en Ingeniería.

Por tanto el nivel de detalle exigido para una cierta escala en una base cartográfica permite concretar para cualquier fenómeno, con una forma y dimensiones bien definidos en la realidad, cual deberá ser tanto la geometría como el nivel de generalización en su captura. A modo de ejemplo, y para los supuestos planteados anteriormente y que en el mundo real son perfectamente identificables como polígonos, se procede a indicar en la

siguiente tabla cual debería ser la geometría básica con la que se debería incorporar a tres de las escalas más habituales, teniendo en cuenta el nivel de detalle que admite la misma.

<i>Escala</i>	<i>Carretera, 9 de m. de ancho</i>	<i>Edificio, 5 m. de lado</i>
1:1.000	Polígono, por el borde	Polígono, por el borde
1:5.000	Polígono, por el borde	Polígono, por el borde
1:10.000	Polígono, por el borde	Polígono, por el borde
1:25.000	Línea, eje medio	Punto, o nada (*)

Tabla 3.- Selección de la geometría básica de un fenómeno geográfico en función del nivel de detalle del mapa.

A su vez, la captura en cada escala deberá estar generalizada en su forma nuevamente según el detalle correspondiente. A modo de ejemplo, a continuación se presenta cuál debería ser el criterio de simplificación en el detalle para el edificio con la forma y dimensiones indicadas.

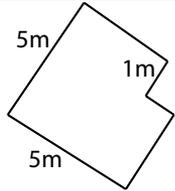
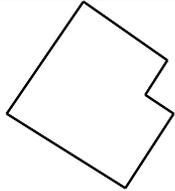
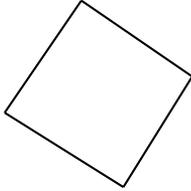
Croquis del edificio real	
Croquis del edificio que se debe capturar a escala 1:1.000	
Croquis del edificio que se debe capturar a escala 1:5.000	
Croquis del edificio que se debe capturar a escala 1:25.000	Sin representación, o si es singular 

Tabla 4.-Generalización de un fenómeno en función del nivel de detalle del mapa.

Esta relación directa que existe entre el nivel de detalle y la escala del mapa, y que se cuantifica en el valor del límite de percepción visual, justifica una denominación muy habitual de los mapas en función de su escala en las cuatro categorías siguientes:

- Planos técnicos: con nivel de detalle elevado. Corresponde a las siguientes escalas, denominadas grandes: 1:100, 1:200, 1:500, 1:1.000, 1:2.000, 1:5.000 y 1:10.000.
- Mapa topográfico: 1:25.000, 1:50.000, 1:100.000 y 1:200.000.
- Mapa geográfico: 1:400.000, 1:500.000 y 1:800.000.
- Mapas generales: 1:1.000.000 y escalas menores.

2.2.2 Modelización convencional de la superficie del terreno.

A diferencia de la captura y representación que se efectúa con otros fenómenos geográficos como pueden ser un río o una edificación, fácilmente identificables por poseer formas definidas, la superficie terrestre es una superficie continua en la que varía la altitud en cada posición y que no puede ser registrada de una forma evidente, haciendo preciso la elección de algún modelo simplificado para su definición.

Respecto al tratamiento de la altitud en un mapa topográfico indicar en primer lugar que el sistema de representación empleado habitualmente es una proyección cilíndrica (el punto de vista se supone está en el infinito), ortogonal (los rayos de proyección se proyectan perpendicularmente al plano de proyección) sobre un plano horizontal, también denominada sistema de planos acotados.

La representación de las primitivas geométricas básicas en este sistema de proyección es la que se muestra en la figura siguiente, estableciéndose las siguientes definiciones:

- Altitud de un punto. Es la altura existente entre la superficie de referencia altimétrica y el punto.
- Distancia geométrica, real o inclinada entre dos puntos. Distancia tridimensional entre los puntos, correspondiente al segmento BC, por ejemplo.
- Distancia reducida, horizontal o simplemente distancia entre dos puntos. Proyección de la distancia geométrica sobre un plano horizontal u otra superficie, para el ejemplo anterior el segmento b_c . Observar en consecuencia que cuando se demanda la distancia entre dos puntos se está requiriendo la distancia reducida.
- Superficie reducida, agraria o simplemente superficie de un polígono. Es el resultado del cálculo de la superficie de la proyección sobre un plano horizontal del polígono. A modo de ejemplo, para el elemento definido por los vértices ABD en la superficie, será el polígono abd . Es importante destacar que el área es una propiedad de polígonos contenidos en un plano, sea este horizontal o inclinado. No existe área para un elemento cerrado cuyos vértices están a cotas diferentes.

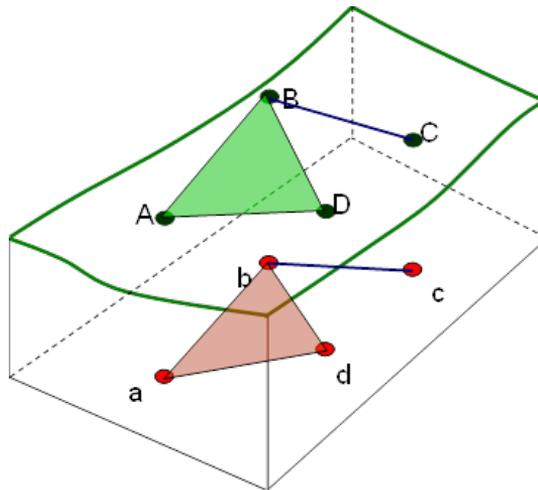


Ilustración 26.- Definiciones básicas usando el sistema de planos acotados.

El modelo habitualmente empleado para definir la superficie del terreno procede a obtener, mediante el uso de diferentes metodologías que serán objeto de estudio posteriormente, las líneas que resultarían al cortar la superficie terrestre con planos horizontales equidistantes en desnivel, para a continuación proceder a proyectar dichas líneas, representándose por tanto en el mapa las posiciones en las que la superficie posee una altitud determinada. A estas líneas se las denomina curvas de nivel o isohispas, caracterizándose por el intervalo altimétrico o equidistancia con las que se representan dos curvas consecutivas.

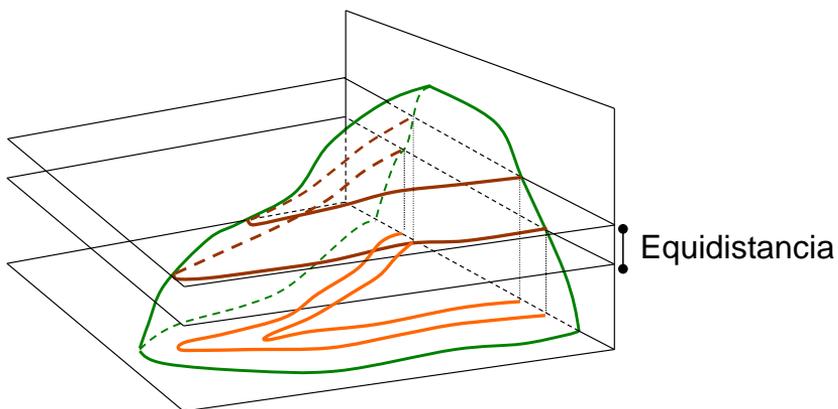


Ilustración 27.- Definición de la superficie terrestre mediante curvas de nivel.

Definido el modelo de la superficie terrestre como se ha indicado es importante tener presente que el terreno comprendido entre dos isohispas es, a priori, indeterminado;

debiendo asumir que varía de forma gradual entre las mismas. A continuación se enumeran condiciones que deben verificarse, así como la terminología y convencionalismos de uso frecuente que se deberán tener presentes en su interpretación:

- Dos curvas de nivel nunca se pueden cortar ni superponerse.
- En una extensión suficientemente amplia, las curvas siempre son elementos cerrados.
- Las cotas de curvas de nivel consecutivas siempre deben ser series de valores uniformes, crecientes o decrecientes, siendo la diferencia de altitud entre cada dos curvas la equidistancia. Cuando las curvas delimitan una zona hundida o deprimida respecto al terreno próximo, se etiquetan o simbolizan de forma especial, designándose curvas de depresión, cuya identificación es de interés en Ingeniería. Al resto de curvas se las denominará curvas normales.
- Si existen curvas normales cerradas consecutivas, las interiores tienen más cota que las exteriores. En caso de tratarse de curvas de depresión, las curvas interiores tienen menos altitud que las exteriores.
- Para facilitar la interpretación global del terreno es habitual etiquetar y destacar una curva cada cierto intervalo, habitualmente una curva cada 5. A estas curvas se las denomina curvas maestras o directoras.
- Si las curvas de nivel definen el fondo de una zona sumergida se denominan curvas batimétricas o isobatas.

La separación en el mapa entre las curvas de nivel proporciona información sobre la pendiente del terreno. Si se define la pendiente en un punto P como la máxima pendiente del terreno en el mismo, para proceder a su cálculo se procederá a emplear la expresión siguiente, que se apoya en el segmento AB que pasa por el punto P y que corta a las curvas de nivel según el segmento de longitud mínima.

$$pendiente (\%) = \frac{\text{desnivel cota } A - B}{\text{distancia reducida } A - B} = \frac{\text{equidistancia}}{\text{distancia reducida } A - B}$$

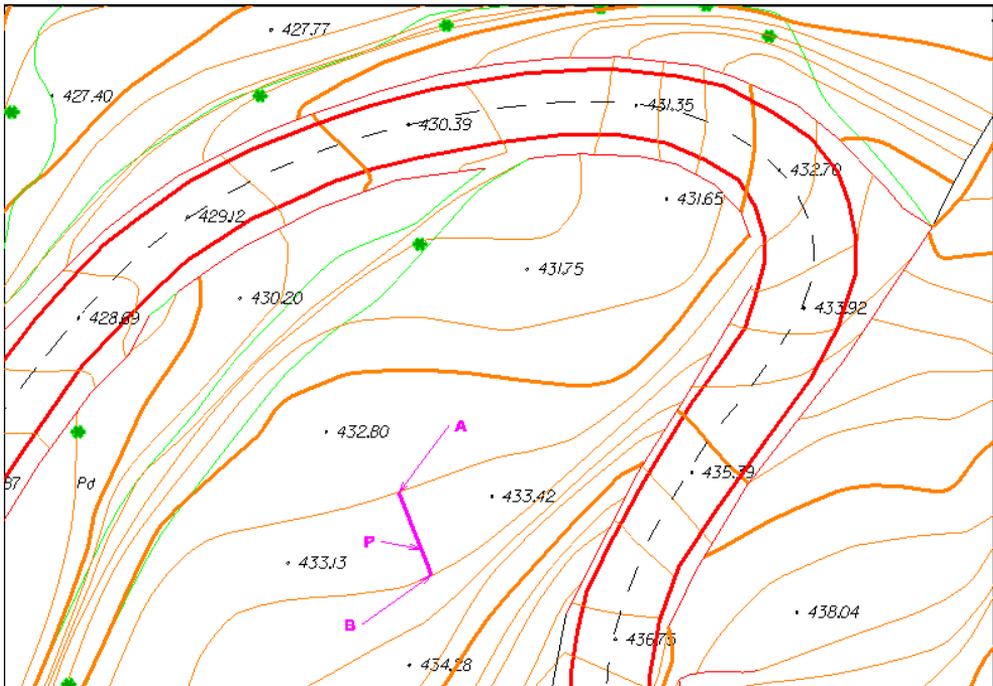


Ilustración 28.- Determinación de la pendiente en un punto. Cartografía escala 1:500, equidistancia 0,5 m.

En tanto la equidistancia es constante entre dos curvas consecutivas, la pendiente y la mínima distancia entre las mismas son magnitudes inversamente proporcionales: a mayor separación entre curvas la pendiente es menor, y viceversa.

Para calcular la cota en una posición entre dos curvas, se procederá a interpolar linealmente la misma sobre la línea de máxima pendiente que pase por la posición deseada.

Si a la hora de definir el terreno se observase que la suposición de variación gradual entre dos curvas consecutivas en una zona determinada no es correcta, se debería proceder a definir nuevas curvas con una separación mitad de la equidistancia, denominadas curvas intercalares, que además quedarán interrumpidas cuando de nuevo se pueda suponer que el terreno varía gradualmente.

Finalmente indicar que es habitual complementar la superficie del terreno definida mediante las curvas con la captura de la altitud para posiciones aisladas del terreno, denominados puntos de cota, con diferentes objetivos. En relación a la propia superficie, los puntos de cota buscan identificar puntos singulares del terreno como pueden ser la cima de una zona elevada (pico, cerro,...), el fondo de una depresión (sima, hoyo) o el punto más bajo en un collado o puerto, entre otros.

- Puntos elevados: También denominados picos, cerros, colinas o altos. Las curvas de nivel se cierran envolviendo el punto elevado, siendo las más interiores las de mayor altitud.
- Depresiones absolutas: forman las simas u hoyas. Las curvas de nivel son cerradas, y las de menor altitud son las más interiores. Si existe un curso de agua que fluye hacia el mismo, se denomina sumidero.
- Crestas o sierras. Son las líneas imaginarias que resultan al unir puntos elevados consecutivos. Lógicamente, son divisorias. Los puntos bajos existentes entre dos puntos elevados se denominan collados o puertos, y su interés estriba en que constituyen los pasos naturales entre las cuencas vertientes que separan.

Los conceptos anteriores se muestran en la ilustración siguiente, en la que únicamente se ha mantenido las curvas de nivel y las posiciones de los puntos de cota, para que se proceda a intentar identificar morfológicamente, con las pautas indicadas, los elementos geográficos descritos.



Ilustración 30.-.- Identificación de elementos geográficos característicos del relieve. Mapa E:1:5.000, entorno del núcleo de Rases, en el Municipio de Potes (Cantabria).

Finalmente indicar cuál es el criterio habitualmente admitido que establece la precisión altimétrica de una base cartográfica. Está directamente relacionado con la equidistancia, y se establece en la cuarta parte de la misma. En la tabla siguiente se relacionan, para las escalas más habituales en Ingeniería, el valor de la equidistancia más frecuente y la precisión esperada.

Escala del mapa	Equidistancia típica (m)	Precisión altimétrica(m)
1:500	0,5	0,12
1:1.000	1	0,25
1:2.000	2	0,50
1:5.000	5	1,25
1:25.000	10	2,50

Tabla 5.- Precisión altimétrica: relación con la equidistancia.

2.2.3 Introducción a las proyecciones cartográficas.

La necesidad de obtener representaciones bidimensionales para formar un mapa de la tierra, cuya figura no es desarrollable, ha supuesto históricamente una necesidad que se ha resuelto de formas muy diversas. A modo de ejemplo, ya en la antigua Grecia en el año 450 A.C. se crea el mapa de la ecúmene o tierra habitada por una cultura, atribuido al Historiador y Geógrafo Heródoto, que se ha conservado hasta nuestros días y del que se muestra una reconstrucción en la figura siguiente.



Ilustración 31.- Reconstrucción del mapa de la ecúmene de Heródoto de Halicarnaso (Wikipedia).

Las expresiones que permiten convertir una posición situada sobre la tierra a su homóloga en un mapa son el objeto de estudio de la Cartografía matemática, y de forma genérica se denominan proyecciones cartográficas. De forma rigurosa, la proyección se efectúa en dos fases, que se enumeran a continuación:

- Reducción del punto situado en la superficie terrestre a la superficie de referencia. Este paso a su vez involucra dos fases consecutivas: reducción del punto situado en la tierra a su posición en el geoide, y reducción desde el geoide hasta finalmente el elipsoide base usado en la proyección. El resultado final será conocer la posición sobre el elipsoide, expresada habitualmente en coordenadas geográficas: longitud y latitud.
- Proyección a la superficie de referencia final adoptada. El resultado es una pareja de coordenadas proyectadas, o coordenadas rejilla, habitualmente denominadas X e Y, o coordenadas Este y Norte respecto un sistema de referencia definido en la superficie adoptada. No se deben confundir con las denominadas comúnmente coordenadas planas, que resultan directamente de la aplicación de alguna metodología de captura de información espacial sin emplear ninguna proyección y respecto a un sistema de referencia local.

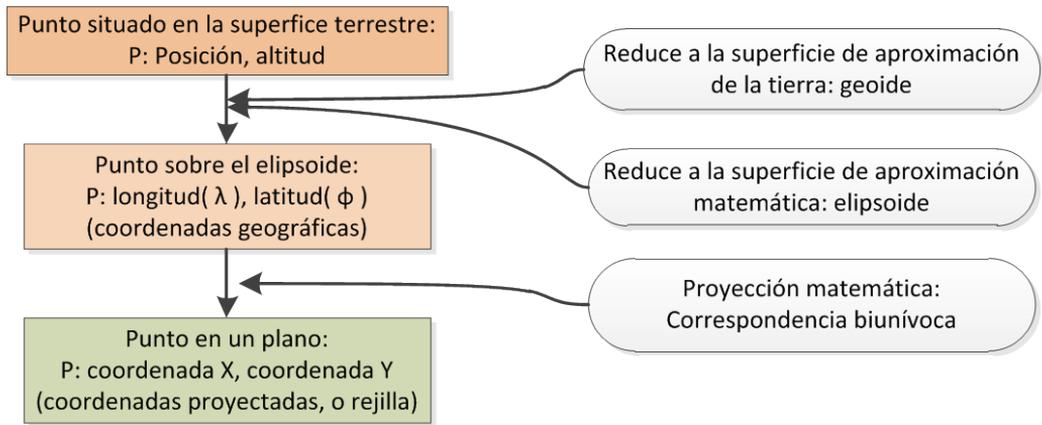


Ilustración 32.- Proceso genérico de proyección de una posición desde la superficie terrestre.

Para comprender el resultado de una proyección debe conocerse cuál es la metodología y los grados de libertad que ha sido preciso fijar al definir la misma, en concreto: punto origen, superficie desarrollable elegida y posición de la misma respecto al elipsoide de aproximación. Definidos estos ajustes, proyectar un punto situado sobre el elipsoide de referencia supone determinar la intersección de la línea definida por el punto a proyectar y el origen de la proyección con la superficie de proyección, como se muestra en la figura siguiente.

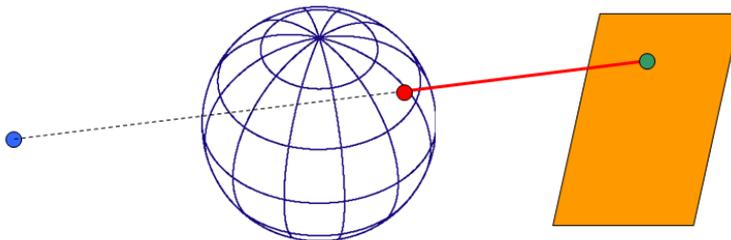


Ilustración 33.- Planteamiento básico de una proyección: grados de libertad existentes.

Respecto a la ubicación del punto origen de proyección, es claro que caben cuatro posibilidades en relación al elipsoide, que toman las denominaciones que se indica:

- Gnomónica: punto situado en el centro del elipsoide.
- Estereográfica: punto situado sobre el elipsoide.
- Escenográfica: punto situado en el exterior del elipsoide, a una distancia finita.
- Ortográfica: punto situado en el exterior del elipsoide, a distancia infinita.

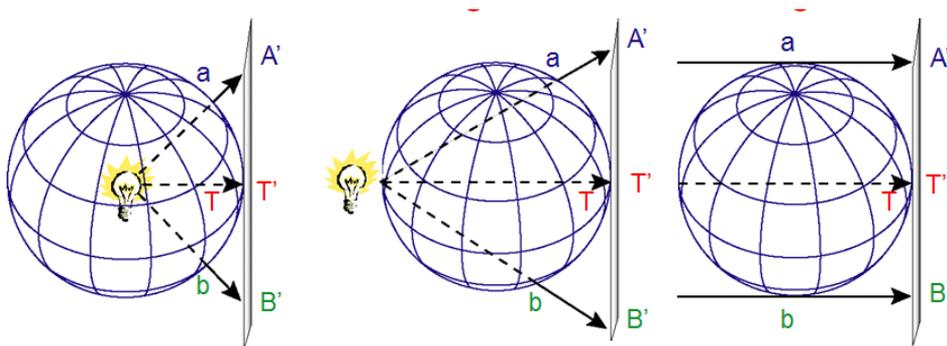


Ilustración 34.- Clasificación de las proyecciones según el punto de proyección.

Respecto a la elección de la superficie de proyección es usual elegir superficies desarrollables, siendo las más usadas el plano, el cono y el cilindro, que dan lugar a las proyecciones planas, cónicas y cilíndricas, respectivamente.

Definido el punto origen y la superficie de proyección, solo queda determinar su posición en relación al elipsoide, siendo habitual fijar uno o varios puntos de contacto entre ambas superficies, denominados puntos o líneas principales o de tangencia, que constituyen zonas muy especiales ya que definen posiciones en las cuales la deformación o distorsión de los elementos situados en el elipsoide al ser proyectados es nula.

El hecho de que toda proyección obtiene una representación distorsionada del fenómeno original situado sobre el elipsoide, justifica la existencia de distintas proyecciones atendiendo al propósito específico buscado con el mapa, que puede ser muy variado, abarcando desde proyecciones para ser usadas en áreas pequeñas, con nivel de detalle elevado, hasta proyecciones para obtener representaciones de toda la superficie terrestre, usadas en planisferios o hemisferios a escalas pequeñas.

El desarrollo matemático que define la proyección proporciona expresiones que convierten posiciones desde el elipsoide a la superficie desarrollable y viceversa. Obtiene además expresiones que permiten conocer la deformación existente en las magnitudes básicas de un fenómeno geográfico, cuantificada en los coeficientes de anamorfosis. A modo de ejemplo, se denomina coeficiente de anamorfosis lineal a la relación que existe entre una longitud proyectada y la misma reducida al elipsoide

En función de la magnitud básica del fenómeno en la superficie que interesa mantener en la proyección, se distinguen tres grandes grupos de proyecciones:

- **Conformes.** Buscan conservar la forma local de los fenómenos, manteniendo los ángulos.

- Equivalentes. Preservan la magnitud de la superficie de los fenómenos, distorsionando el resto de propiedades del mismo: ángulos y distancias. En esta proyección, meridianos y paralelos pueden no cruzarse según ángulos rectos.
- Equidistantes. Mantiene las distancias entre ciertas posiciones de la proyección, ya que no existe proyección alguna que mantenga la escala en toda la extensión proyectada.

En función del punto de contacto y la relación entre el eje de rotación de la tierra y el eje principal de la superficie desarrollable, se distingue entre proyecciones normales (eje principal coincidente con el eje de rotación), transversas (eje principal normal al eje de rotación) y oblicuas.

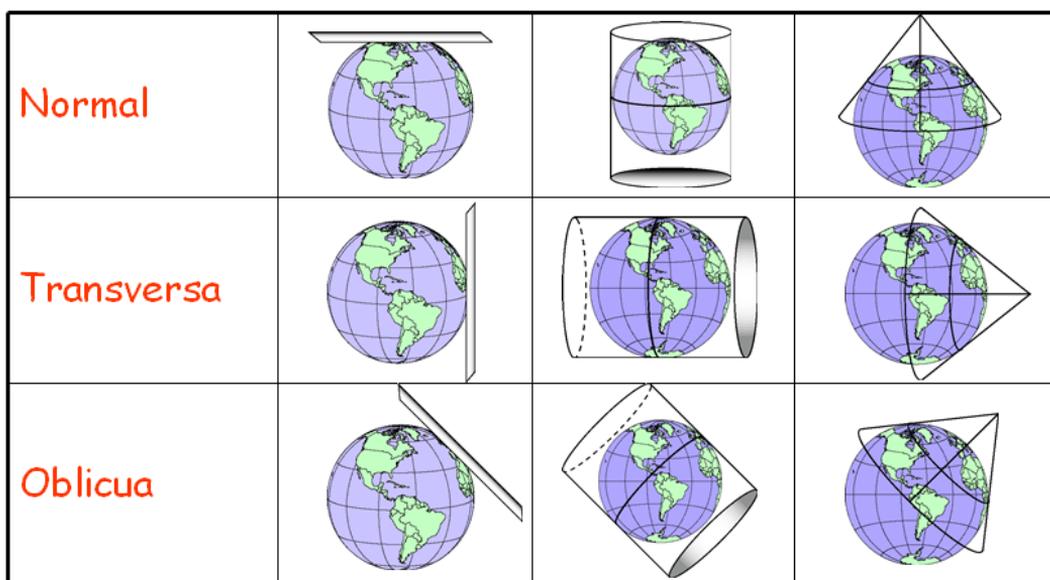
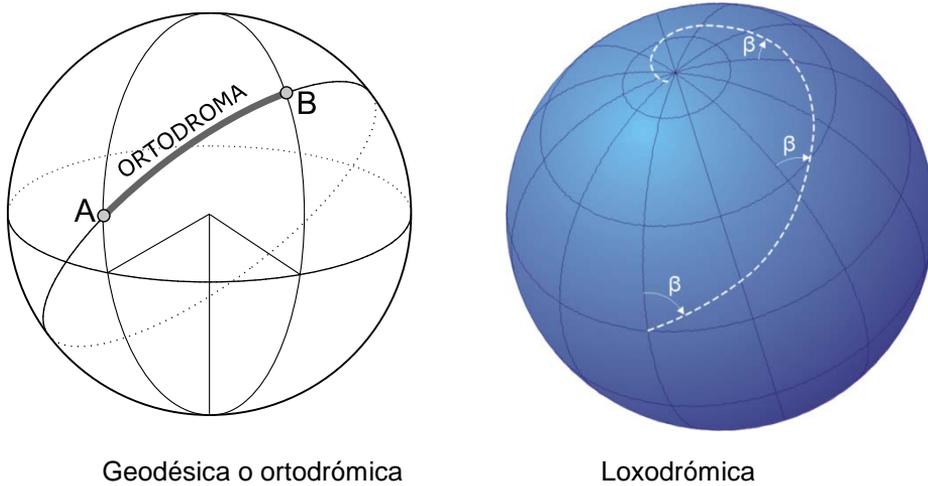


Ilustración 35.- Tipos de proyecciones según el punto de contacto, elección y posición de la superficie de proyección.

A continuación se presentan algunas proyecciones muy usadas a nivel de mapamundi, detallando sus valores más característicos. Para observar mejor el efecto de la proyección, además de mostrar los distintos continentes se procede a representar en las mismas dos tipos de líneas características entre tres posiciones de la tierra: origen en Santander y destino en New York y Perth (Australia):

- Geodésicas o ortodrómicas. Son las líneas de distancia mínima entre dos puntos en la esfera. Coinciden con círculos máximos.
- Loxodrómicas. Líneas que cortan a los meridianos de la esfera con el mismo ángulo, es decir, son líneas de rumbo constante.



Geodésica o ortodrómica

Loxodrómica

Ilustración 36.- Líneas características en la esfera (Wikipedia).

En primer lugar se muestra un planisferio sin usar proyección alguna, empleando las coordenadas geográficas como coordenadas rejilla. Se representan también las líneas características descritas anteriormente, así como meridianos y paralelos con un intervalo constante de 30° a modo de referencia.

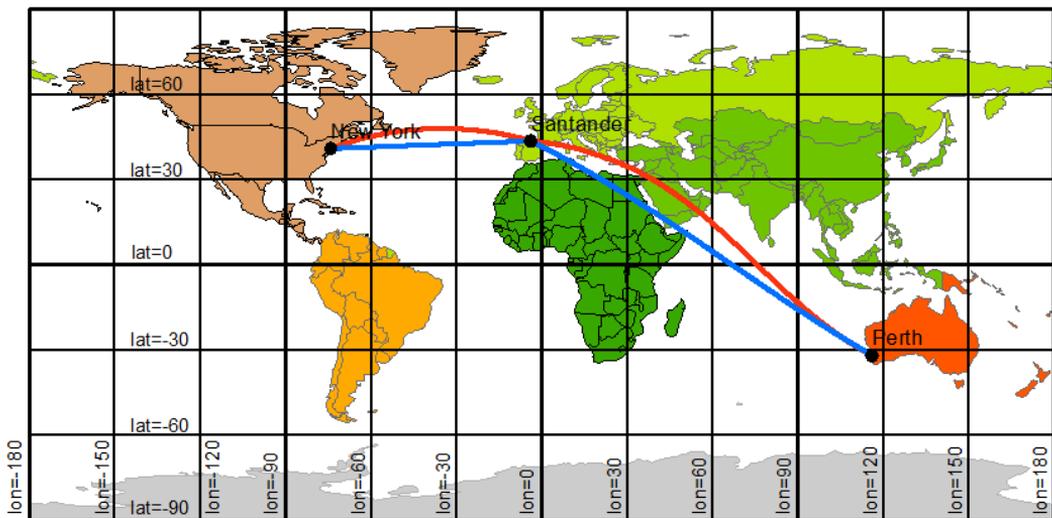


Ilustración 37.- Planisferio representado en coordenadas geográficas. Líneas geodésicas en color rojo, loxodrómicas en azul.

Una proyección en la que las líneas geodésicas aparecen como líneas rectas es la acimutal, caracterizada como se describe a continuación para el punto de contacto situado en el polo Norte.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



Método de proyección.	Gnomónica plana normal, norte.
Punto / línea de contacto	Polo Norte. Se denomina también azimutal polar norte
Propiedades	Los meridianos aparecen como líneas rectas. Los paralelos como círculos. Las geodésicas aparecen como rectas. Las distorsiones a partir de 30° son elevadas.
Limitaciones	No puede proyectar el ecuador, ni el hemisferio Sur.

Tabla 6.- Características de la proyección Gnomónica Polar Norte.

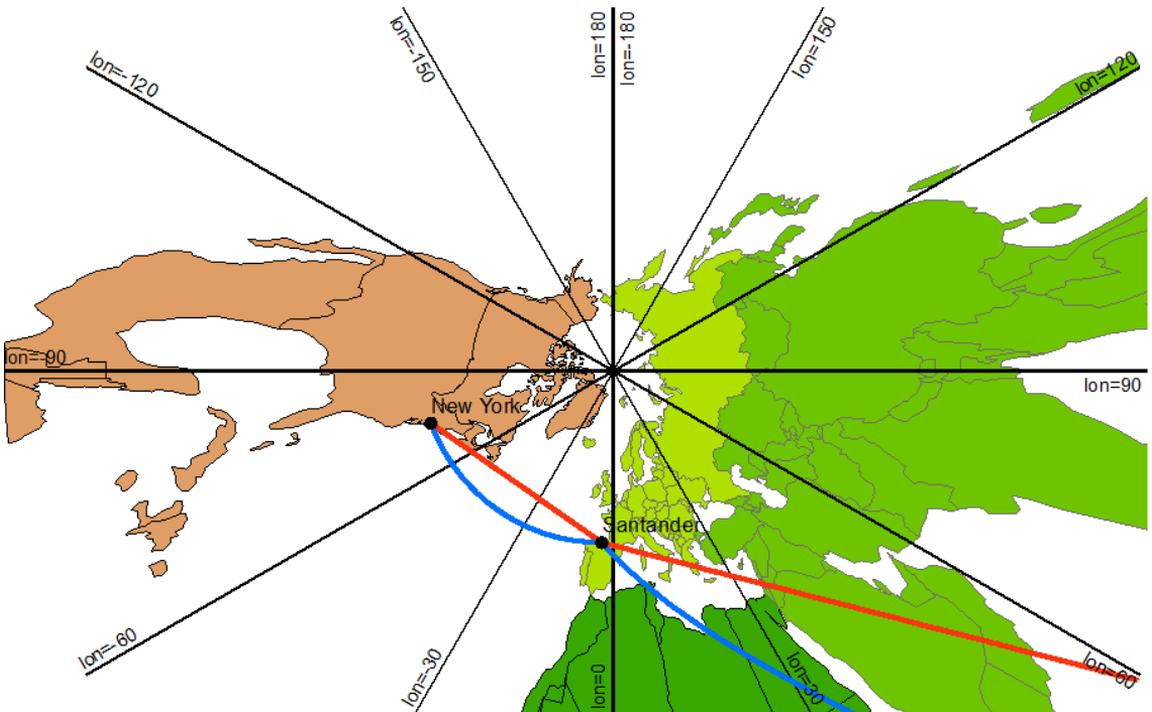


Ilustración 38.- Hemisferio usando la proyección Gnomónica plana normal, polar Norte.

Una de las más usadas es la Mercator, que recibe su nombre en honor del matemático que la desarrolló en el siglo XVI. Es una proyección conforme, en la que las líneas rectas en la proyección son líneas de acimut constante, que justifica su amplio uso en navegación. Las características que la describen se resumen en la siguiente tabla.

Método de proyección.	Gnomónica. Proyección cilíndrica normal.
Punto / línea de contacto	Ecuador.
Propiedades	Conforme. Las deformaciones en las superficies y distancias aumentan al alejarse del ecuador.
Limitaciones	Zona óptima de empleo: próxima al ecuador. Las zonas polares no aparecen representadas, la distorsión en escala en las latitudes altas es importante.

	Destacar que las dimensiones con las que aparece Rusia, Norte de Europa y América del Norte son irreales.
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla 7.- Características de la proyección Mercator.

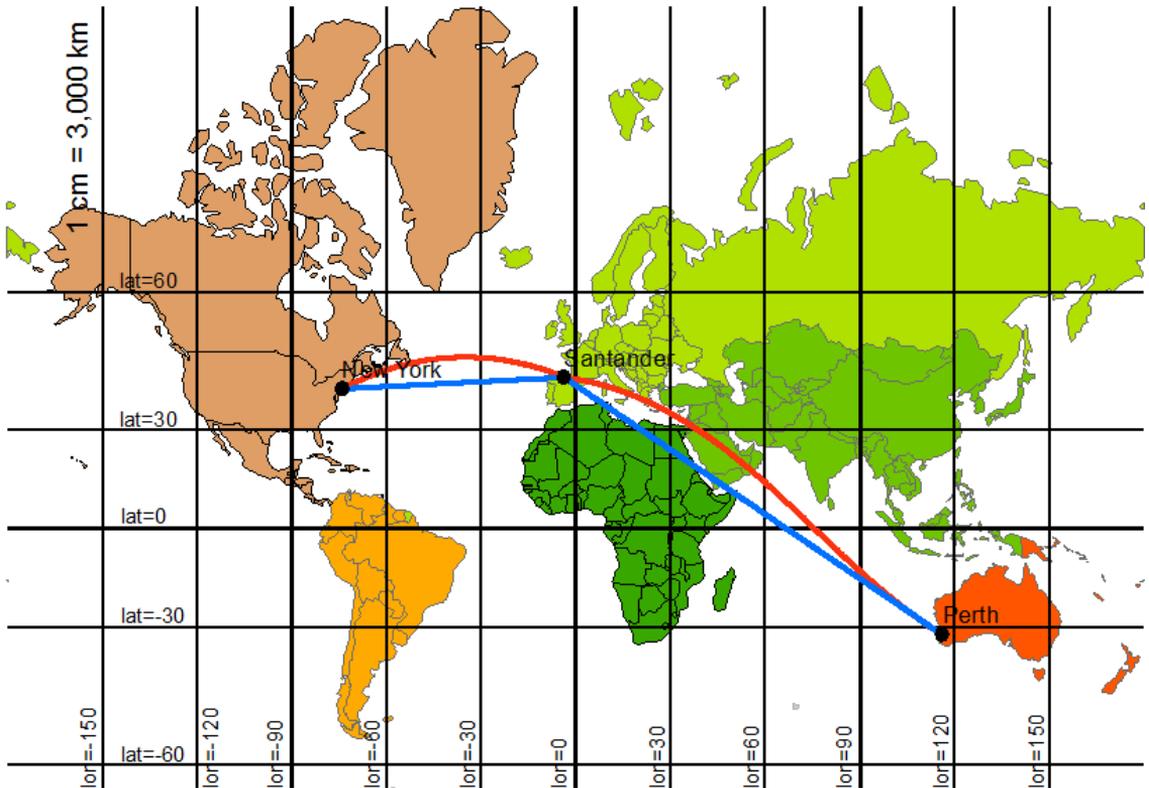


Ilustración 39.- Planisferio usando la proyección Mercator.

Una variante muy usada es la proyección equidistante cilíndrica.

Método de proyección.	Gnomónica. Proyección cilíndrica normal.
Punto / línea de contacto	Ecuador
Propiedades	Equidistante. La distancia se mantiene a lo largo de los meridianos y paralelos.
Limitaciones	Las deformaciones en ángulos y superficies aumentan la separarse del paralelo estándar

Tabla 8.- Características de la proyección equidistante cilíndrica.

El aspecto del planisferio usando esta proyección es el siguiente.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



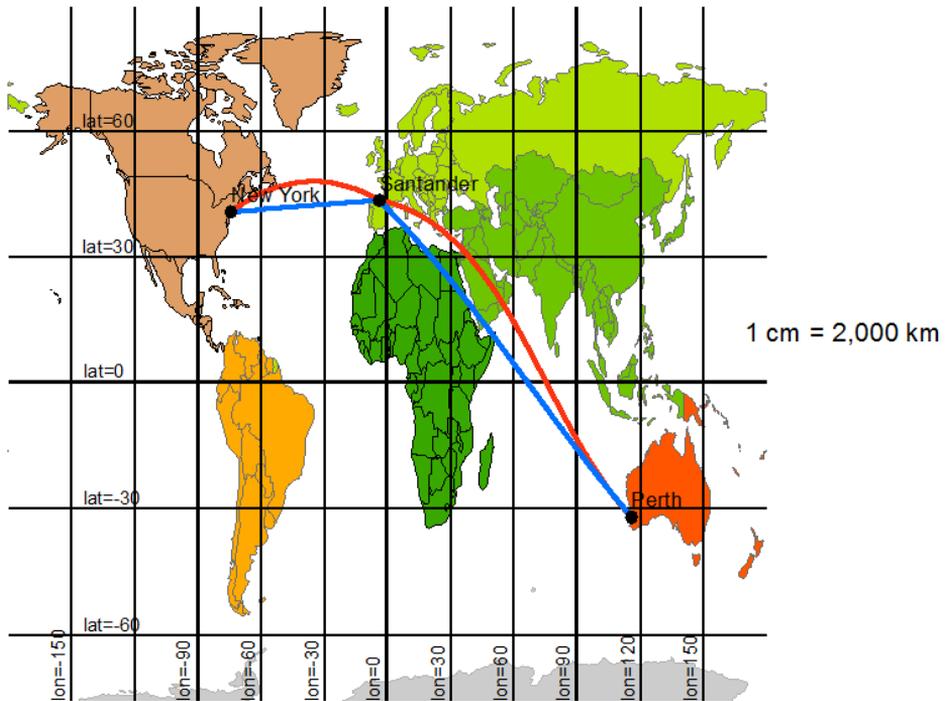


Ilustración 40.- Proyección gnomónica cilíndrica equidistante.

A continuación se muestra el resultado del uso de una proyección que usa como superficie un cono, denominada Lambert Conforme Cónica.

Método de proyección.	Gnomónica. Proyección cónica normal.
Punto / línea de contacto	Dos paralelos: a 43° y 62° norte. Es una proyección secante.
Propiedades	Conforme. Reduce las deformaciones en superficie y distancias entre los paralelos estándar, y las aumenta en las zonas exteriores.
Limitaciones	No debería usarse para zonas alejadas de los paralelos estándar.

Tabla 9.- Características de la proyección Lambert cónica normal.

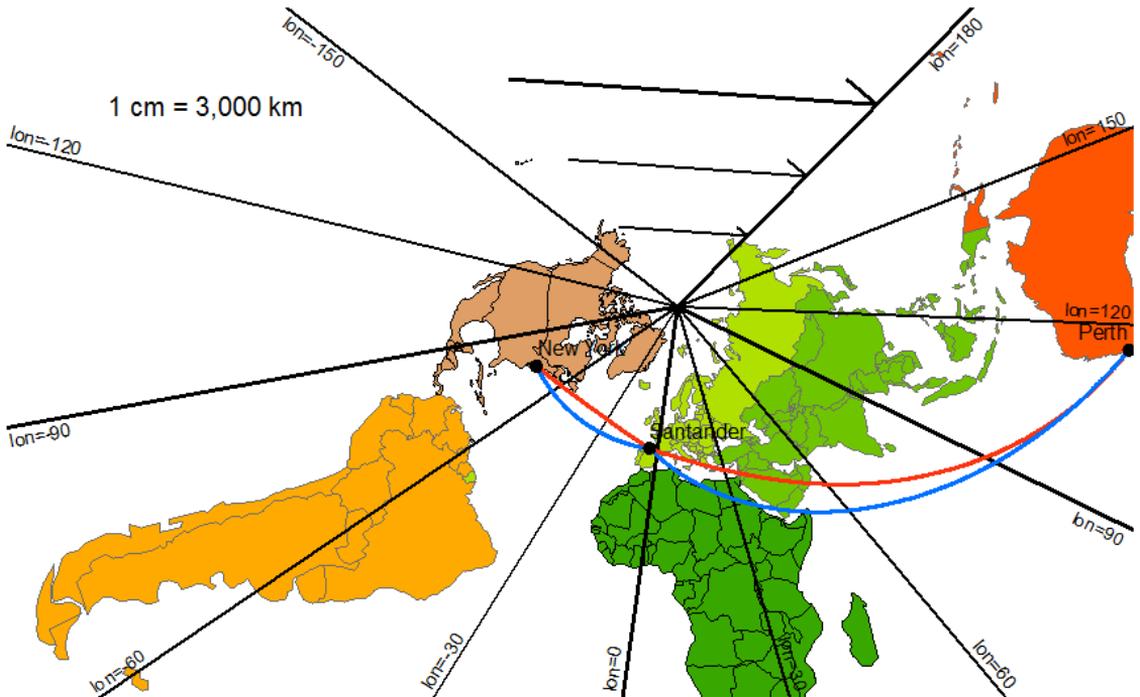


Ilustración 41.- Proyección Lambert conforme cónica.

Como se ha podido observar las proyecciones cartográficas producen deformaciones pequeñas en las magnitudes no conservadas en el entorno de las líneas de contacto, aumentando la magnitud de las mismas a medida que la distancia del fenómeno a proyectar se aleja de las líneas principales.

Para obtener mapas a escalas grandes el sistema de proyección cartográfica más usado actualmente, denominado proyección Universal Transversa Mercator (UTM), se basa en la proyección Mercator y usa un cilindro cuyo eje está en posición transversa, fijando como línea principal un meridiano concreto. Con objeto de acotar las deformaciones que se producen al alejarse del meridiano estándar, se recurre a imponer un límite para el empleo de la proyección que se fija en un intervalo de $\pm 3^\circ$ de longitud a ambos lados del mismo, denominándose huso a cada zona de la tierra que se proyecta en un cilindro concreto. Por otra parte, y debido a las deformaciones que se producen en las zonas polares, se limita también su empleo a zonas comprendidas entre $\pm 80^\circ$ de latitud.

Es evidente que con objeto de poder emplear esta proyección para cualquier posición en el elipsoide, y debido a la restricción de 6° de longitud indicada, el carácter de universal se consigue repitiéndose la misma en las 60 zonas o husos diferentes que resultan de dividir el elipsoide, proyectándose cualquier punto situado sobre la superficie en el cilindro

correspondiente. La numeración de los husos se inicia en el antimeridiano de Greenwich (longitud = 180°), al que se asigna el huso 1, incrementándose la numeración en sentido antihorario y correspondiendo a la Península la situación que se indica en la figura siguiente, que supone la división del territorio en tres husos distintos, denominados respectivamente huso 29 (zona comprendida entre -12° y -6° de longitud, meridiano estándar a 9°W), huso 30 (-6° a 0° de longitud, meridiano estándar a 3°W) y huso 31 (0° a 6° de longitud, meridiano estándar a 3°E). Por razones de claridad en el mapa, se ha limitado la representación al hemisferio norte, entre 25°N y 50°N de latitud, aproximadamente.

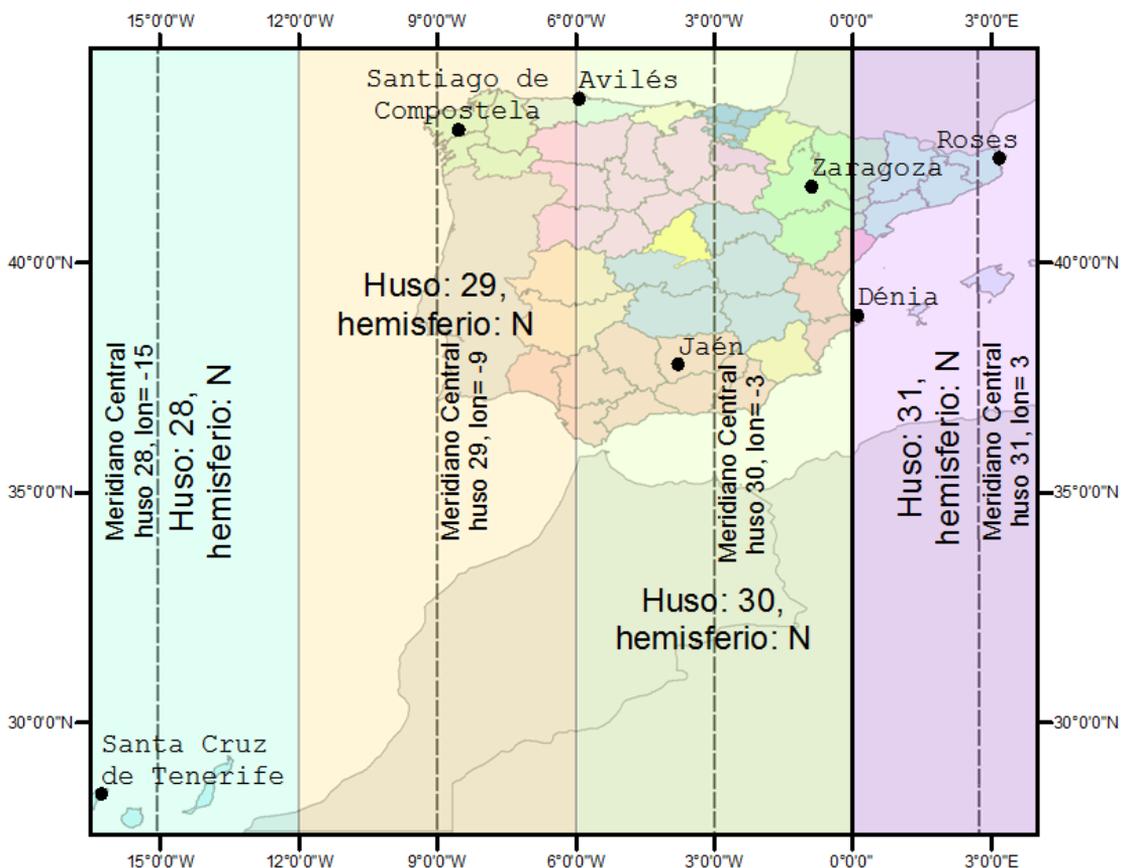


Ilustración 42.- Asignación estricta de las zonas correspondientes a la proyección UTM. Mapa en coordenadas geográficas (sin proyección).

Con objeto de contrastar las implicaciones de la proyección UTM en distintos husos, a continuación se indican las coordenadas geográficas referidas al sistema de referencia ETRS89 para algunas poblaciones situadas en varias zonas características.

Población	lon (deg)	lat (deg)
Zaragoza	-0.89212437°	41.6487597°
Jaén	-3.78113304°	37.7849049°
Avilés	-5.92449107°	43.5554868°
Santiago de Compostela	-8.5443122°	42.8824204°
Roses	3.17730019°	42.2651492°
Dénia	0.10381939°	38.8407669°
Santa Cruz de Tenerife	-16.2671207°	28.4634040°

Tabla 10.- Coordenadas geográficas en ETRS89 para algunas poblaciones de España.

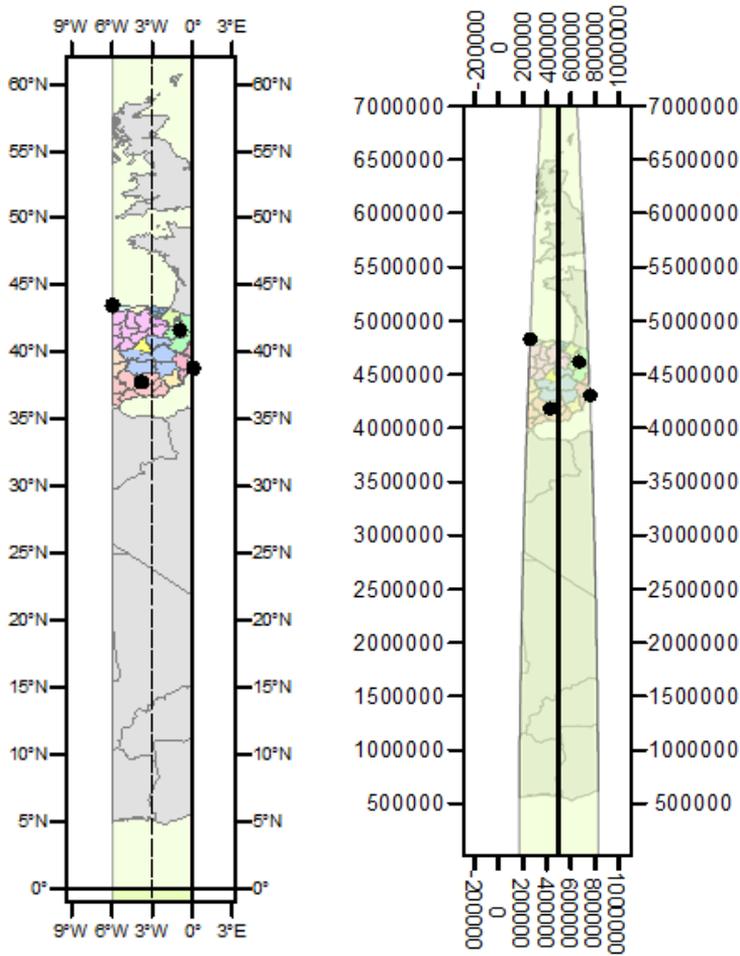
En cada huso de la proyección se procede a proyectar la zona correspondiente del elipsoide conforme a las siguientes indicaciones, siendo el resultado el que se presenta a continuación particularizado para el huso 30, hemisferio Norte, a modo de ejemplo.

- Proyección conforme.
- Meridiano estándar: en principio, coincidente con el meridiano central del huso. Al coincidir esta línea en el elipsoide y en la proyección, se mantendrán las distancias. Las máximas deformaciones en distancia y superficie estarán en consecuencia en los extremos del huso.
- Por simetría, el origen de la proyección está situado en el punto de intersección entre el meridiano estándar y el ecuador.

Se define el eje Y en sentido positivo coincidente con la transformada del meridiano estándar, y el eje X en dirección ortogonal, positivo hacia el este.

En el hemisferio Norte, se retranquean las coordenadas X o Este 500.000,00 m. hacia el oeste, denominándose de forma habitual a esta magnitud falso este, con objeto de que no existan coordenadas negativas para las abscisas en la proyección. Por el mismo motivo en el hemisferio Sur, además se efectúa un retranqueo en las coordenadas Y o Norte de 10.000.000,00 m, denominado falso norte.





**Ilustración 43.- Caracterización de la proyección UTM.
Ejemplo para el huso 30 en el hemisferio Norte (UTM 30N).**

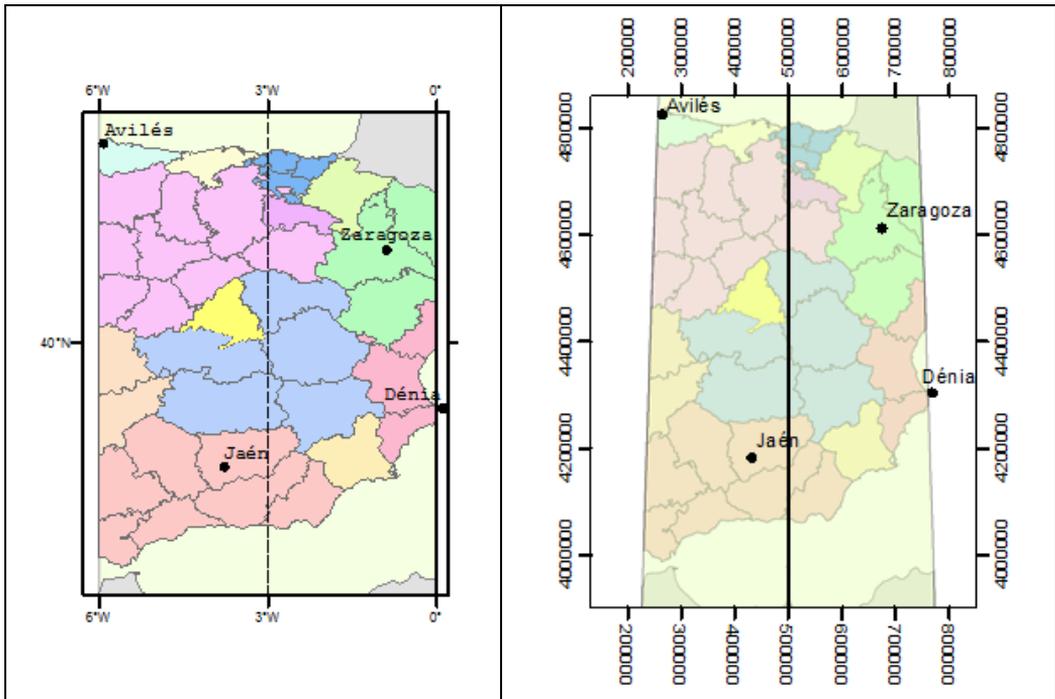


Ilustración 44.- Caracterización de la proyección UTM. Detalle en la península para el huso 30N (UTM 30N).

En consecuencia, la identificación correcta de una posición usando este sistema de proyección debe incorporar los tres datos siguientes: sistema de referencia usado (ETRS89), huso (30, por ejemplo) y hemisferio (N, por ejemplo).

Aquellas zonas del territorio localizadas en las proximidades de los extremos del huso podrán expresarse en coordenadas pertenecientes a ambos husos, seleccionándose el huso adecuado en función de la ubicación mayoritaria de la zona de interés del trabajo. Es claro que no se pueden mezclar coordenadas para una misma zona expresadas en husos distintos. A continuación se presentan las coordenadas correspondientes a alguna de las poblaciones enumeradas anteriormente, mostrándose las dobles parejas de coordenadas proyectadas para aquellas situadas en zonas límites de la proyección.

Población	X H29N	Y 29N	X 30N	Y 30N	X 31N	Y 31N
Zaragoza			675530.6	4612925.8		
Jaén			431218.2	4182237.5		
Avilés	748415.8	4827100.0	263782.8	4826659.5		
Roses					514622.5	4679231.3
Dénia			769394.9	4303685.3	248630.4	4303092.8

Tabla 11.- Coordenadas para poblaciones expresadas en distintos husos de la proyección UTM.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



2.2.4 Modelos de datos.

Los modelos de captura y almacenamiento de la información geográfica se pueden clasificar en tres tipos de datos básicos: modelo vectorial, modelo ráster y nubes de puntos.

Modelo vectorial.

Los objetos del mundo se identifican y capturan con sus geometrías básicas, que pueden ser puntos, líneas, polígonos, superficies o volúmenes.

Cualquier fenómeno se define por un conjunto discreto de vértices, para los que se obtienen sus coordenadas tridimensionales, definiéndose la forma en función de la geometría que le corresponde según el nivel de detalle preciso.

Por ejemplo: se establece que un edificio debe ser definido por los vértices significativos que definen su parte más elevada, normalmente el alero del tejado; capturándose como una línea poligonal cerrada. No se emplea un polígono porque esta primitiva gráfica debe de ser plana, situación que no corresponde a la realidad para este fenómeno en un caso general. Se entiende que el edificio es la parte interior de la figura cerrada. Si se considerase por ejemplo la definición de una cuneta en una escala 1:1.000, se debería definir como una línea que modelizará su eje, y su captura se haría de forma discreta en los vértices significativos. Se entiende que la cuneta queda definida por la línea representada entre cada pareja de vértices consecutivos.

En este modelo es preciso vincular a la geometría del fenómeno un código o un conjunto de atributos que permitan su identificación, y que además lo complementen con información adicional si es posible. Por ejemplo, un borde de carretera deberá tener vinculada información que permita su identificación en la clase que le pueda corresponder, como puede ser carretera asfaltada o camino, y entre las pavimentadas las que tienen una o dos calzadas separadas. Además, si es posible se deberá enriquecer con otros atributos que pueden ser de interés, como puede ser el nombre o la clave de la misma, por ejemplo.

Destacar las siguientes ventajas para este modelo:

- Identificación sencilla y clara entre el elemento almacenado y el fenómeno del mundo representado.
- La captura de los vértices necesarios se puede efectuar con la definición y precisión requerida.
- Permite establecer relaciones espaciales (topología) entre fenómenos, como pueden ser las siguientes, por ejemplo:

- Un edificio (capturado con geometría de polígono) es interior a una manzana (capturada también como un polígono).
- Un poste (con geometría de punto) es coincidente en su posición con un vértice de un tendido eléctrico (con geometría de línea poligonal).

A continuación se muestra un ejemplo, en el que se destaca la captura del edificio de aulas de la ETS de Ingenieros de Caminos así como algunos jardines del entorno como fenómenos con geometría de polígono, y el borde de la Avda. de los Castros como elemento lineal.

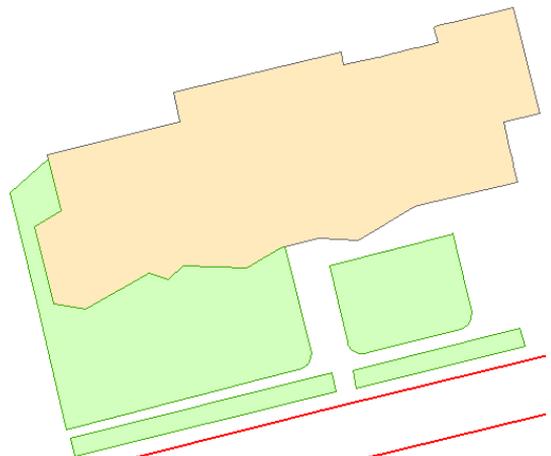


Ilustración 45.- Modelo vectorial. Entorno de la ETS Ingenieros de Caminos, Santander. Mapa a escala 1:1.500 (70x60mm)

Modelo ráster.

Este modelo se basa en la división del área de trabajo en celdas idénticas, de forma generalmente cuadrada, que almacenan un valor que caracteriza al fenómeno que se superpone a la superficie de la celda. La orientación de las celdas se suele imponer incidente con los ejes del sistema de proyección utilizado, y tanto para su ubicación en el espacio como para las dimensiones de los lados se suelen utilizar magnitudes sencillas, por ejemplo: lado de celda de 25 centímetros y unas coordenadas significativas para una celda de la rejilla, que habitualmente se fijan en la esquina superior izquierda, redondeadas al metro.

Si se modelizan fenómenos con contornos bien definidos, como puede ser el caso de un cambio de uso en el tema de cubierta terrestre, por ejemplo entre un bosque y un prado, y el borde entre ambos fenómenos tiene lugar en el interior de una celda, se acuerda asignar a esta el valor correspondiente al fenómeno predominante en la misma.

Una vez adjudicado un valor, se asume que éste es constante en toda la superficie de la celda, cambiando su valor en los bordes. La definición por tanto de un fenómeno se obtiene implícitamente por el borde del conjunto de celdas contiguas que toman el código correspondiente al mismo. En las figuras siguientes se ha procedido rasterizar los fenómenos vectoriales mostrados con anterioridad.

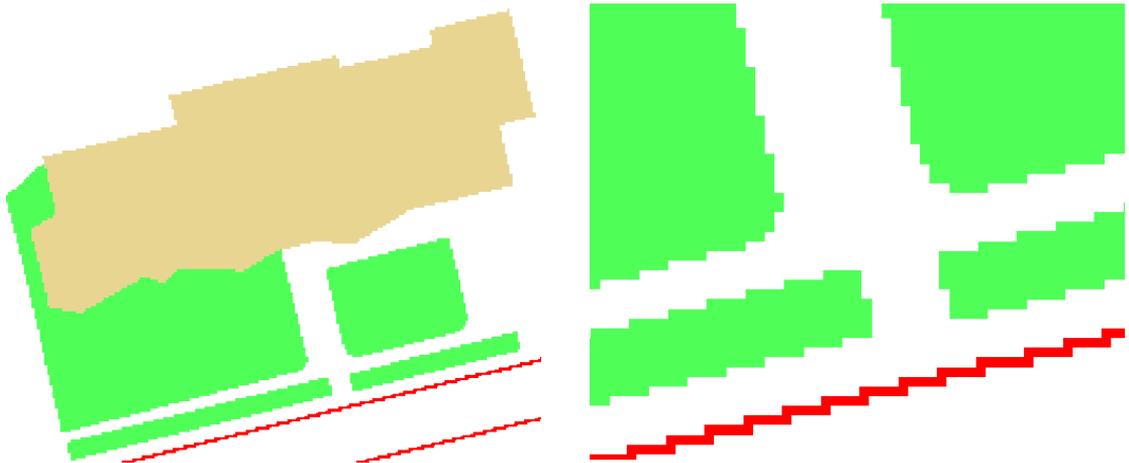


Ilustración 46.- Modelo ráster. Entorno de la ETS Ingenieros de Caminos, Santander. Izquierda, escala 1:1.500; derecha, detalle a escala 1:400 (70x60mm).

El tamaño de la celda fija la precisión de los elementos capturados, y deberá ser lo suficientemente pequeño para obtener el nivel de detalle requerido, pero teniendo presente también que el volumen de información que se almacena aumenta significativamente al reducirse el tamaño de la celda, debido a que la decisión de reducir por ejemplo el lado a la mitad, implica almacenar un volumen de información cuatro veces superior.

Es frecuente admitir que el tamaño de la rejilla debe ser del orden de un tercio de la mínima dimensión que se quiere capturar, para permitir su identificación en el modelo. Por ejemplo, si se requiere un nivel de detalle de un metro, el tamaño adecuado para la rejilla deberá ser del orden de 30 centímetros.

Finalmente indicar que este modelo es especialmente adecuado para trabajar con fenómenos que varían de forma continua, como puede ser la altitud en una superficie de elevaciones o el color en una ortoimagen. Es también muy eficiente para el análisis espacial entre numerosos temas, debido a que su almacenamiento informático se efectúa utilizando estructuras matriciales, que son gestionadas con facilidad.

Su principal y evidente desventaja es la dificultad de representar con detalle objetos del mundo real.

Nubes de puntos.

Están formados por conjuntos inmensos de posiciones tridimensionales capturados de forma masiva y totalmente automática, caracterizados por su densidad superficial, desde valores típicos de 1 punto hasta 250.000 puntos por m², e incluso mayores.

Es importante destacar que no se capturan fenómenos de forma explícita, sino que se procede a capturar de forma continua cualquier fenómeno existente, sin que exista identificación individual de los mismos ni posibilidad de asignar información temática.

Es usual asignar a cada posición un valor de intensidad, en el sentido de cantidad de energía reflejada en el fenómeno y registrada nuevamente en el instrumental empleado en su captura.

Las principales ventajas de este modelo son la continuidad en la definición de los fenómenos, la rapidez en la captura y las precisiones que es posible obtener. Pero debido al elevadísimo número de puntos capturados, para su uso es imprescindible filtrar, clasificar, seleccionar y adecuar los puntos capturados al objeto del proyecto.

A continuación se presentan dos ejemplos de este modelo de datos, capturados con el sensor próximo y lejano a los objetos de interés.

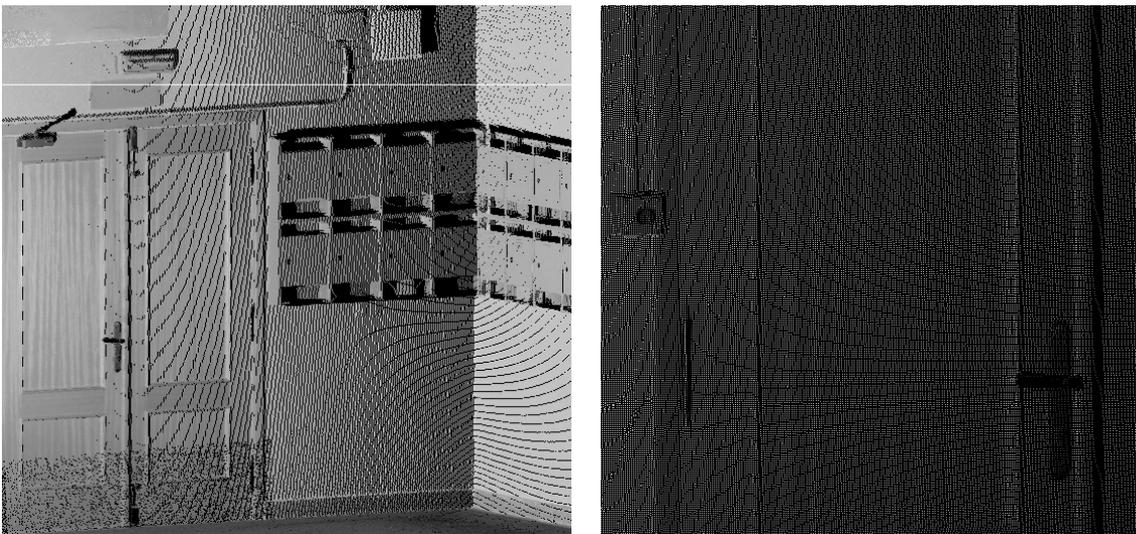


Ilustración 47.- Nube de puntos de la entrada del Departamento de Ingeniería Geográfica, ETS Ingenieros de Camines de Santander.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



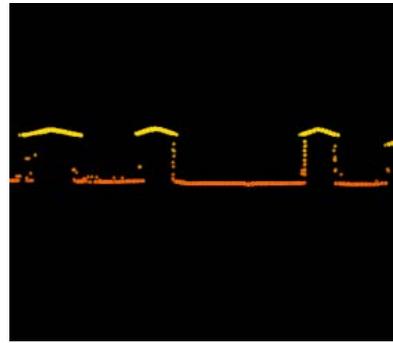
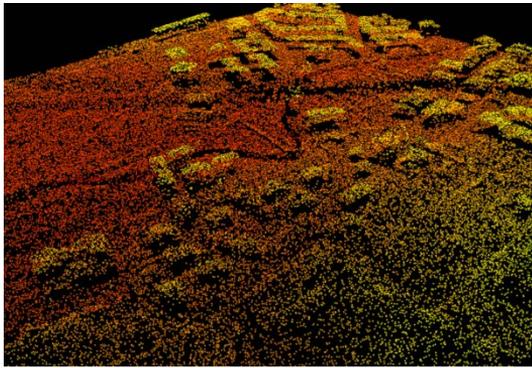


Ilustración 48.- Nube de puntos capturados desde una avioneta, con un LIDAR. Vista libre y perfil.

2.2.5 Formatos de información espacial

Existen numerosos formatos de documentos digitales que almacenan información espacial. Sin carácter exhaustivo, a continuación se enumeran e indican características básicas de los formatos más habituales.

<i>Modelo de datos</i>	<i>Campo aplicación típico</i>	<i>Tipo y extensión fichero</i>	<i>Empresa propietaria, herramienta típica de uso</i>	<i>Notas</i>
Vectorial	Cartografía	Binario, dwg	AutoDesk, autoCad [1]	
Vectorial	Cartografía	Binario, dgn	Bentley, microStation [2]	
Vectorial	Cartografía	Ascii, dxf		Estándar de intercambio.
Vectorial	Sistemas de información geográfica	Binario, shp		Estándar de intercambio. Son varios ficheros.
Vectorial y ráster	Sistemas de información geográfica	Binario, mdb o gdb	Esri, ArcGis [3]	Formatos de bases de datos espaciales.
Ráster	Ortoimagen	Binario, tif	Adobe. [2], [3], Map de Autodesk [4]	Necesita archivo de georreferencia, mismo nombre y extensión tfw.
Ráster	Ortoimagen	Binario, jpg	[2], [3], [4]	Necesita archivo de georreferencia, mismo nombre y extensión jgw.
Ráster	Ortoimagen	Binario, ecw	Ermapper, [2], [3], [4]	Formato muy eficiente, tamaño muy reducido.
Ráster	Ortoimagen	Binario, sid	LizardTech [2], [3], [4]	Formato muy eficiente, tamaño muy reducido.

Ráster	MDE	Ascii, asc	[3], [4]	Esri Ascii grid
Vectorial y ráster	Publicación de mapas	Binario, pdf	Adobe	Existe versión geoespacial, que usa dimensiones, coordenadas y capas.
Nube de puntos	MDE,MDS	Binario, LAS	ISPRS	Estándar de intercambio
Nube de puntos	Ingeniería, arquitectura,...	Binario, fls	FARO	

Ilustración 49.- Principales formatos de información espacial.

2.2.6 Diccionarios de fenómenos.

Desde el punto de vista de la explotación digital, toda base cartográfica numérica deberá ir acompañada de un documento en el cual se explicita de forma concreta y detallada las siguientes informaciones:

- Para todos los fenómenos que incluye: definición, forma de captura, ajustes usados para su identificación única, atributos temáticos que se ha asignado, criterios de selección y croquis ilustrativos de los mismos.
- Sistema de referencia empleado. En concreto: superficie de referencia geodésica, el sistema de proyección y la superficie de referencia altimétrica.
- Leyenda, que explicita el significado de los signos y representaciones convencionales utilizadas.

A este documento se le denomina habitualmente diccionario de fenómenos.

Para las escalas de detalle en Ingeniería no existen estándares comúnmente aceptados, estableciéndose estas condiciones bien por parte del promotor de la base cartográfica, en función de sus necesidades; bien por parte de la empresa productora de la base cartográfica, según sus propios usos y costumbres.

Esta situación genera la existencia de hecho de una gran disparidad en distintas bases cartográficas generadas inicialmente con un mismo objetivo, como puede ser por ejemplo una base cartográfica a escala 1:1.000 destinada al desarrollo de un proyecto para el trazado de una vía de comunicación.

Los diccionarios de fenómenos existentes evidencian la situación descrita, como se puede constatar en los ejemplos que se presentan a continuación, mostrando parcialmente este documento.



- Base cartográfica en formato CAD para la explotación y mantenimiento de una vía de comunicación. Escala 1:1.000, con equidistancia de 1 m. Para cada fenómeno se detallan los ajustes empleados por el sistema para su visualización, que a su vez se emplean para identificar al mismo.

Por ejemplo: una curva de nivel normal será todo elemento perteneciente a la capa 1, con código de color 6, estilo de línea de tipo 0 y grosor de entidad con valor 0.

CONCEPTO	LV	CO	LC	WT	CÉLULA	TEXTO	FT	TX	JF
RELIEVE									
Curva de nivel	1	6	0	0					
Curva directora	2	6	0	2					
Curva depresión	3	6	3	0					
Curva depresión directora	4	6	3	2					
Escarpado arriba	5	6	es1	2					
Escarpado abajo	5	0	0	0					
Punto de cota	6	0	0	0			23	0'5	CC
Texto de cota	7	0	0	0			23	1'5	LC
Rotulación de directoras	9	0	0	0			23	1'5	CC

Ilustración 50.- Cartografía 1:1.000, soporte para trabajos de mantenimiento de carreteras.

- Base cartográfica en formato CAD, destinada a la planificación y ordenación del territorio. Escala 1:5.000, equidistancia 5 m. Cartografía de la C.A. de Cantabria, del año 2001. Como se observa, cada fenómeno se deberá identificar exclusivamente por la capa en la que está.

ALTIMETRÍA:

- 11001 CURVA DE NIVEL (FINA)
- 11002 CURVA DE NIVEL (MAESTRA)/TEXTO COTA CURVA NIV
- 11003 CURVA AUXILIAR
- 11004 CURVA DE DEPRESION (FINA)
- 11005 CURVA DE DEPRESION (MAESTRA)
- 11006 PUNTO ACOTADO

Ilustración 51.- Cartografía 1:5.000 de la C.A de Cantabria, año 2001.

- Base cartográfica en formato CAD, destinada a la planificación y ordenación del territorio. Escala 1:5.000, equidistancia 5 m., de la C.A. Valenciana. Es un documento que incluye más de 400 páginas, describiéndose de forma individual cada fenómeno en una ficha. Se incluye a continuación la correspondiente a un elemento del tema de relieve.

ELEMENTO					
CURVA DE NIVEL					
CÓDIGO		GEOMETRIA			
ORO04		LÍNEA			
DESCRIPCIÓN					
Línea que une puntos que tienen la misma altitud sobre el nivel del mar, dando una información gráfica de la morfología del terreno, pero que no representa ningún elemento topográfico.					
NIVEL	COLOR	ESTILO LÍNEA	GROSOR	PRIORIDAD	PRIORIDAD INTERNA
8	15	00	0	3	
MODO DE RESTITUCIÓN					
Se restituirán de manera continua, siempre en el mismo sentido y de modo que no se crucen ni entre ellas, ni una curva consigo misma (bucles). Los únicos casos en que se interrumpirán serán los siguientes:					
<ul style="list-style-type: none"> — En los bordes de las hojas. 					
La altitud de las curvas de nivel será múltiplo de 5 m, exceptuando aquellas que coincidan con la cota de las curvas de nivel directoras (25 m y sus múltiplos).					
El área mínima delimitada por una curva de nivel será de 1 mm ² a la escala de representación.					

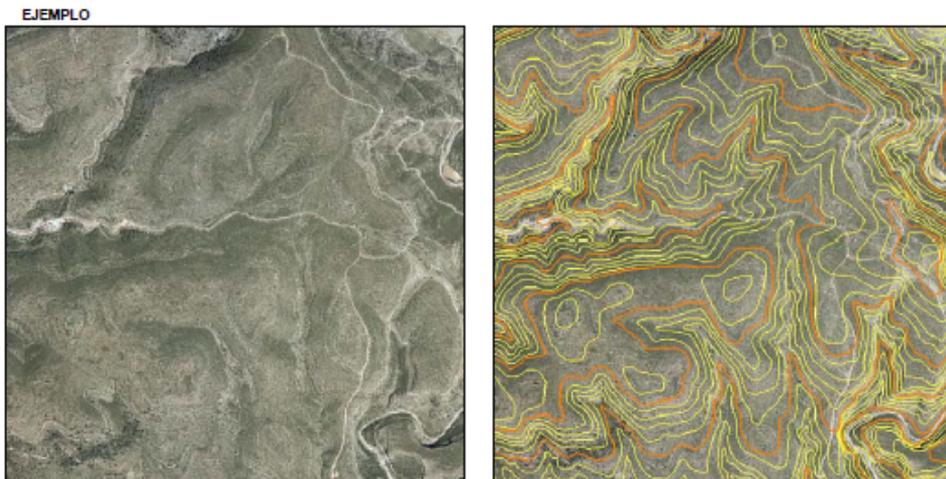


Ilustración 52.- Ficha para el fenómeno curva de nivel en la base cartográfica de la Comunidad Valenciana, 1:5.000.

Si bien la situación general para las bases cartográficas de detalle más usadas en Ingeniería Civil es la descrita anteriormente, hay que destacar el esfuerzo llevado a cabo por parte de los organismos cartográficos responsables a nivel de Comunidades Autónomas (CC.AA) , Diputaciones Forales (DD.FF.) y desde la Administración General

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



del Estado en consensuar un diccionario común de fenómenos que haga posible el intercambio, integración e interoperabilidad para las escalas 1:5.000 y 1:10.000 a nivel Nacional, que se ha concretado en la definición del modelo denominado Base Topográfica Armonizada (BTA), totalmente definido para la escala 1:5.000 y que está siendo ampliamente adoptado por las distintas CC.AA y DD.FF.

En el caso particular de nuestra Comunidad autónoma, conocer que se ha producido para la totalidad del territorio una nueva base cartográfica a escala 1:5.000 conforme a este modelo, a disposición pública desde el año 2010. Las especificaciones de este modelo (BTA05, v1.0) se pueden obtener en las siguientes direcciones:

- IDE de la C.A. de Cantabria: <http://cartografia.cantabria.es/documentacion>.
- Consejo Superior Geográfico, organismo dependiente del Instituto Geográfico Nacional: http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/CSG/ARMONIZACION/

Destacar que el modelo de datos empleado para esta nueva base cartográfica abandona el formato CAD para adoptar el formato GIS, en concreto, el formato de intercambio estándar shapefile. A continuación se muestra la ficha correspondiente al fenómeno curva de nivel en el diccionario BTA05, caracterizado por el tipo en la base 0002.

FENÓMENO N1	Curva de nivel	0002
DEFINICIÓN	Línea imaginaria de altitud constante que sirve para describir la forma tridimensional de la superficie terrestre.	
GEOMETRÍA	línea	
ATRIBUTOS		
CATEG_0002 • normal • maestra • auxiliar	NOR MAE AUX	Categoría de la curva de nivel. Curva de nivel a la equidistancia definida para la base (5 m). Curva de nivel a la equidistancia de 5 curvas de nivel sencillas (25 m). Curva de nivel a la mitad de equidistancia de las curvas de nivel sencillas (2,5 m).
TIPO_0002 • en depresión • caso genérico	DEP CGN	Tipo de la curva de nivel. La curva de nivel delimita una zona de depresión. La curva de nivel no delimita una depresión.
FIABILIDAD • baja fiabilidad • caso genérico • sin clasificar	BCA CGN SCL	Fiabilidad en la captura de la entidad. La fiabilidad es inferior a la esperada (bosque, núcleos urbanos, etc). Cumple con la fiabilidad esperada en la base. No clasificado según el atributo FIABILIDAD.

Ilustración 53.- Ficha para el fenómeno ID_TIPO=0002 en la BTA05. Definición.

CLASIFICACIÓN Y MÉTODO DE OBTENCIÓN

Las curvas de nivel pueden ser capturadas utilizando diferentes técnicas y métodos de obtención, pero constituyen líneas continuas.

Si se utiliza el método de restitución, se representan mediante polilíneas, sin operaciones posteriores de densificación, de suavizado o interpolación.

Aquellas obtenidas por interpolación se calculan automáticamente, sobre el modelo triangular de elevaciones del terreno generado a partir del conjunto de fenómenos que modelan el terreno, ya sean de la base o recogidos en el proceso de restitución fotogramétrica con este fin.

En las zonas de pendiente superior al 80%, se realiza el curvado posteriormente mediante la interpolación de un modelo numérico, apoyado en líneas de rotura y con tangencia en las curvas de nivel exteriores a la zona.

Las curvas de nivel capturadas mediante digitalización se obtienen mediante el registro de entidades vectoriales sobre un modelo de mayor precisión a la necesaria para la base.

Según el atributo CATEG_0002, se considera **"/maestra"** la curva de nivel cuya altitud es múltiplo de 25 m; se clasifica como **"/normal"** la curva de nivel cuya altitud es múltiplo de 5 m y no es maestra.

En zonas donde el terreno es muy llano, en que la distancia entre curvas de nivel a intervalo de 5 m consecutivas supera 1 Km en proyección horizontal, se han intercalado curvas a una equidistancia de 2,5 m, clasificándose como **"/auxiliar"**.

Según el atributo TIPO_0002, se clasifican como **"/en depresión"** las curvas de nivel que delimitan una zona donde el terreno está hundido con respecto a las regiones circundantes (es decir, cuando existe una concavidad cerrada en el terreno); en estos casos las curvas se capturan con orientación, dejando la zona de depresión a la derecha. En el resto de casos, las curvas se consideran como **"/caso genérico"**.

Atendiendo a la FIABILIDAD, hay zonas en las que el terreno está parcialmente oculto (en bosque, núcleos urbanos, etc.), casos en que difícilmente poseen la fiabilidad esperada, por lo que las curvas de nivel se clasifican como **"/baja fiabilidad"**.

De otro modo, se clasifican como **"/caso genérico"**.

Ilustración 54.- Ficha para el fenómeno ID_TIPO=0002 en la BTA05. Clasificación y método de obtención.

SELECCIÓN

El sistema de referencia respecto al cual se expresan las altitudes tiene la dirección vertical y sentido hacia el cenit.

El área mínima que delimita una curva de nivel es de 6,25 m².

Las zonas de depresión se capturan para profundidades iguales o iguales a 15 m.

Sólo hay curvas de nivel intercaladas en zonas de terreno muy llano y cuya longitud mayor o igual que 1,5 km.

NOTAS

Las curvas de nivel son continuas en todo el territorio, también en el interior de las masas de agua, edificaciones y zonas urbanas, independientemente de que sus tramos puedan o no ser representados.

En las depresiones las curvas de nivel son líneas orientadas dejando la zona de depresión a la derecha, tomando el atributo TIPO_0002 el valor “**en depresión**”.

CONTROLES DE CALIDAD**•Exactitud posicional**

Vertical absoluta: por defecto, aporta información sobre la precisión de las cotas de puntos de las curvas de nivel comparadas con las de puntos bien definidos correspondientes a los anteriores, calculadas o conocidas.

Vertical relativa: comporta verificar la coherencia altimétrica entre las curvas de nivel y su intersección con los siguientes fenómenos:

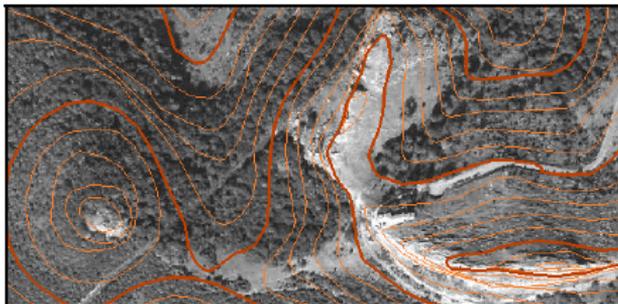
- *Cambio brusco de pendiente.*
- *Corriente natural* – intersección con los márgenes o ejes, según corresponda.
- *Carretera, Camino, Senda, Ferrocarril* – intersección con los márgenes o ejes, según corresponda, de las vías de comunicación que están visibles y en la superficie del terreno.

•Consistencia lógica

Consistencia conceptual: comporta la conformidad a los siguientes controles:

- Conectividad 3D con el fenómeno *Curva de nivel* dentro de un mismo bloque.
- Orientación de líneas (sólo para curvas de nivel clasificadas como “/en depresión”).
- Línea de *Costa natural* (si se recoge a cota 0)

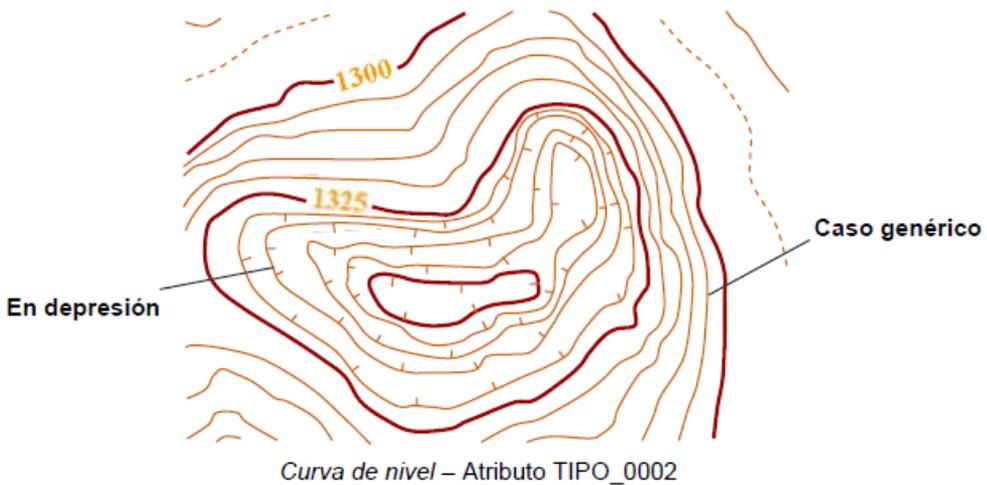
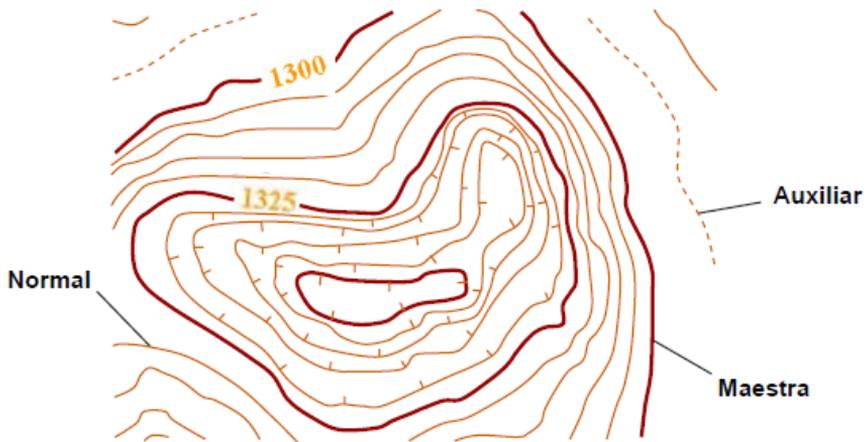
Ilustración 55.- Ficha para el fenómeno ID_TIPO=0002 en la BTA05. Selección y control de calidad.



En zonas de vegetación alta y tupida que impida la visión estereoscópica, la cota del terreno es estimada, haciéndose constar en el atributo FIABILIDAD mediante el valor “/baja fiabilidad”.

Ilustración 56.- Ficha para el fenómeno ID_TIPO=0002 en la BTA05. Gráfico.

Para facilitar su interpretación, se coloca una etiqueta, el texto correspondiente a la altitud, expresada en metros sobre las curvas de nivel maestras.



Los criterios a tener en cuenta para la rotulación de las etiquetas son:

- se sitúan encima de las curvas de nivel y alineados con las maestras, sin interrumpir el dibujo de las demás. Las cifras no incluyen el punto de millar.
- añadir criterio de densidad del etiquetado y distancia máxima y mínima del etiquetado a lo largo de una misma curva.
- se colocan por grupos alineados.
- el ángulo (azimut) de los textos estará entre 0 y 180 grados.

No se representan los tramos de curva de nivel en el interior de masas de agua, edificaciones ni zonas urbanas.

Ilustración 57.- Ficha para el fenómeno ID_TIPO=0002 en la BTA05. Representación y rotulación.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



3 MODELIZACIÓN Y EXPLOTACIÓN DIGITAL DE SUPERFICIES TRIDIMENSIONALES.

3.1 Definiciones.

En primer lugar se procede a definir diversos términos que describen distintos tipos de superficies o de componentes de las mismas.

- Modelo digital de elevaciones (Digital Elevation Model, DEM). El uso más extendido para este término se refiere a un conjunto de puntos regularmente espaciados según las direcciones X e Y, para los que se almacena la altitud del terreno natural, sin considerar la existencia de cualquier construcción o de vegetación. A veces se refiere también a cualquier modelo de definición para la superficie terrestre, como un término genérico.
- Modelo digital de terreno (Digital Terrain Model, DTM). Habitualmente se refiere a los datos de tipo puntual y/o lineal que definen tanto los fenómenos como los cambios en la forma en la superficie terrestre, excluyendo vegetación y construcciones humanas. Es también usual emplearlo para referirse al propio modelo de superficie generado.
- Modelo digital de superficies (Digital Surface Model, DSM). Se trataría de datos de elevaciones ordenados de forma similar a un DEM, pero referidos a la máxima altitud en cada posición: bien el terreno natural en superficie, bien la copa de la vegetación donde exista, o a la parte superior de construcciones humanas, como pueden ser edificios, estructuras,...
- Malla irregular de triángulos (Triangulated Irregular Network, TIN). Es una superficie continua formada por triángulos totalmente irregulares, no solapados, que recubriría totalmente la superficie terrestre. Este es el modelo más adecuado cuando es básico definir con precisión formas del terreno o fenómenos existentes.
- Línea de rotura (breakline). Se refiere a cualquier entidad lineal tridimensional que describe bien un cambio suave en la forma de la superficie terrestre - línea de quiebro en un talud, por ejemplo -, bien un cambio brusco, como puede ser la huella de un edificio en el terreno o el borde de un río, por ejemplo.
- Curvas de nivel (contour line). Líneas de igual altitud del terreno, para una superficie de referencia.
- Puntos aleatorios, o de relleno (mass points). Puntos irregularmente distribuidos para los que se conoce su altitud, que complementan la definición de la superficie.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



3.2 Modelos de datos.

Cualquier modelo de elevaciones de una superficie deberá proporcionar la altitud para cualquier posición de la misma, de forma continua, a partir de un conjunto discreto de puntos para los que se conoce su altitud (y que además por cuestiones prácticas y económicas, debería ser el menor posible), usando técnicas de interpolación.

Es importante destacar que una superficie de elevaciones proporcionará para una posición planimétrica (X,Y) un único valor para la altitud. De forma genérica, si en una posición existe más de una altitud de interés, se deberán considerar tantas superficies como resulte necesario. Por ejemplo, si se quiere modelizar para una misma posición tanto la superficie de un puente como el río que atraviesa, se deberán definir de la forma oportuna dos superficies distintas, una para cada fenómeno con distinta altitud.

La densidad y distribución de los puntos capturados deberá ser:

- Compatible con la precisión final que se desea tener para la superficie.
- Adecuada para el modelo de superficie empleado.

Como se comprobará con posterioridad, los errores que se producirán en la definición de la superficie, en el caso más general, se deben al incumplimiento de alguna o de las dos condiciones expuestas anteriormente.

Existen tres estructuras de datos digitales que se usan de forma habitual para definir y almacenar superficies de elevaciones:

- Mallas irregulares de triángulos.
- Modelos regulares de puntos.
- Curvas de nivel.

3.2.1 Mallas irregulares de triángulos.

Este modelo plantea la definición de la superficie discretizando el terreno según caras o facetas triangulares, del tamaño adecuado para que se adapten al mismo hasta el nivel que se requiera. La forma y distribución de los triángulos es totalmente irregular, constituyendo globalmente una superficie continua, denominada habitualmente por su denominación inglesa: triangulated irregular network (TIN). Una vez formada la malla, la elevación para una cierta posición se obtiene de forma directa a partir de la superficie triangular en la que está contenida.

La obtención de la red de triángulos a partir de un conjunto de puntos irregularmente repartidos es un problema muy conocido y ampliamente estudiado en el ámbito de la geometría computacional, con aplicaciones en numerosas disciplinas: robótica, elementos

finitos, realidad virtual,... El algoritmo más utilizado para su obtención es el de la triangulación de Delaunay, para el que se destacan inicialmente dos premisas básicas: para un conjunto concreto de posiciones, garantiza que la malla formada siempre es la misma, independiente de la ordenación de los puntos; y además que los triángulos formados son lo más equiláteros posibles.

Para un conjunto mínimo de 2 superficies triangulares, definidas a partir de 4 posiciones no colineales para las que se conoce la altitud de las mismas, el algoritmo de Delaunay procede definir sin ambigüedad los triángulos que cumplen las premisas anteriores, debiendo tener presente que la modelización que se ha obtenido está directamente ligada a las caras formadas, y que distintos conjuntos de triángulos generan distintos modelos de la superficie, partiendo del mismo conjunto de posiciones como se expone a continuación.

En la figura * se procede a formar a partir de un conjunto de puntos $\{p1,p2,p3,p4\}$, con altitudes respectivas $\{z1=10, z2=5, z3=10,z4=5\}$, los dos triángulos posibles, cuya diagonal estará formada por el segmento $\{p1-p3\}$ o por el $\{p2-p4\}$. Indicar que el algoritmo de Delaunay elegirá cuáles serán los triángulos que responden a sus criterios de formación, y que gráficamente se puede deducir que corresponden a la diagonal $\{p2-p4\}$. Pero que si se quiere obtener la elevación para un nuevo punto, representado por la posición correspondiente al círculo azul, se podrá observar como su altitud es diferente en función de las caras formadas:

- En la figura de la izquierda la posición es interior al triángulo $\{p1,p2,p3\}$, pudiéndose estimar una cota para el mismo de 8 m.
- En la figura de la derecha está situado en el vértice común a ambos triángulos, y le correspondería en consecuencia una cota de 10 m.

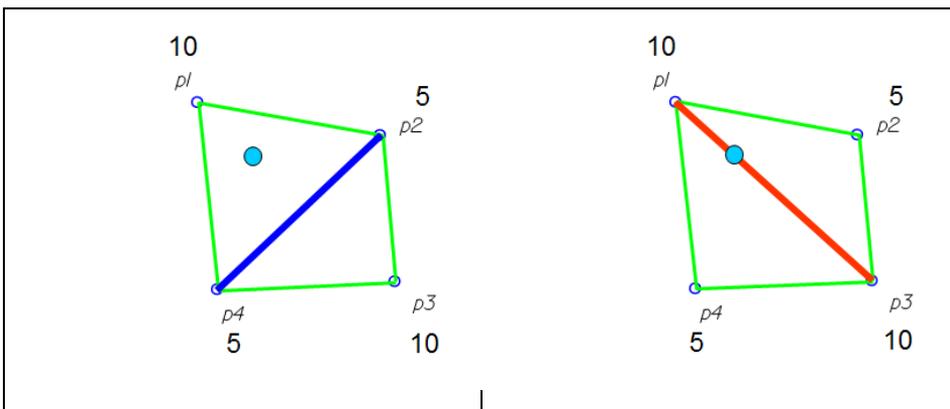


Ilustración 58.- Importancia de los triángulos formados al modelizar una superficie de elevaciones.



Es evidente que si el objeto de la malla de triángulos es modelizar una superficie de elevaciones no es indiferente las caras concretas que se generan, debiéndose controlar su formación. Con esta finalidad, destacar en primer lugar que una de las grandes ventajas de este modelo es que los vértices de las caras están formados directamente por las posiciones y elevaciones capturadas o disponibles, y que estos constituyen los datos a partir de los que se formará la malla y que pueden ser convenientemente seleccionados por el productor de la base cartográfica, interesando diferenciar en la elección de estas posiciones dos tipos de datos:

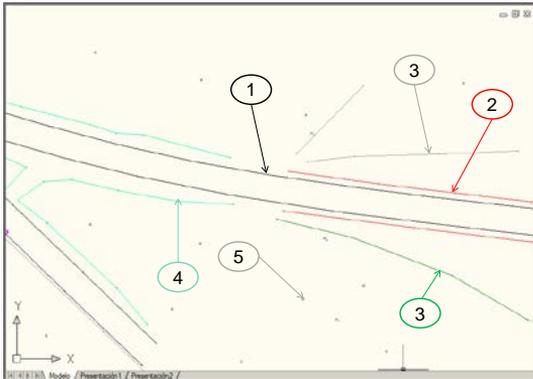
- Puntos aislados, que definen la forma general de la superficie, cuando esta varía de forma suave y continua.
- Vértices de elementos lineales, que forman posiciones críticas de la superficie en el sentido de definir quiebros o discontinuidades en la pendiente de la misma, que pueden tener un carácter natural, como pueden por ejemplo una línea de talud, el borde de un río o los extremos de una falla; o un origen artificial, definiendo límites de construcciones realizadas por el ser humano que interrumpen la continuidad del terreno: el borde de un canal, el límite de una carretera o la huella de un edificio, a modo de ejemplo.

Para controlar que la formación de la malla de triángulos es adecuada, se puede imponer como coacción adicional la exigencia de que cada tramo de los elementos lineales descritos anteriormente forme necesariamente un lado de triángulo en el modelo TIN, garantizando en consecuencia que los quiebros existentes en la superficie queden reflejados en el modelo, determinándose el resto de los lados de las caras a partir de los puntos aislados conforme al criterio de Delaunay.

A los puntos aislados, que en principio serán los más abundantes, y que se ordenarán conforme al criterio básico se les denomina habitualmente puntos aleatorios, puntos de masa o puntos de relleno, y a los elementos lineales que definen discontinuidades en la superficie y se impone formen lados de algún triángulo se las denomina líneas de rotura (breaklines).

A continuación se muestra una sucesión de imágenes en la que se puede observar con claridad la necesidad del control de la malla formada mediante la incorporación de roturas a un modelo:

- Datos de partida: obtenidos en un levantamiento topográfico, en la que se representan los puntos aleatorios y las líneas de rotura existentes, que definen una zona en la que existe una carretera en trinchera en el este de la imagen.



- 1.- Rotura. borde de carretera
- 2.- Rotura. Cuneta.
- 3.- Rotura. Cabeza de talud.
- 4.- Rotura. Borde de aglomerado.
- 5.- Punto aleatorio

Ilustración 59.- Datos de partida en un levantamiento topográfico. (Cabezón de la Sal, Cantabria)

- Malla de triángulos obtenida considerando todos los vértices como puntos aleatorios. Como se observa, no responde al terreno que se quiere modelizar.

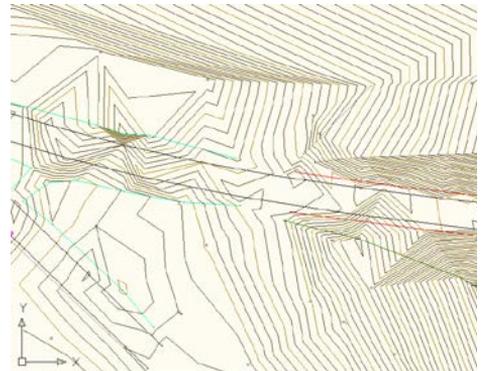
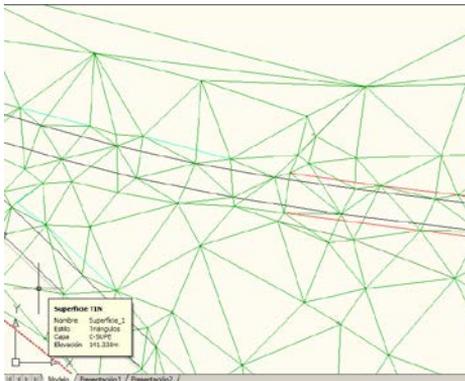


Ilustración 60.- Consideración de todos los puntos como aleatorios. Izquierda: visualización con triángulos, derecha: visualización con isolíneas.

- Malla de triángulos con incorporación de las entidades lineales como líneas de rotura.

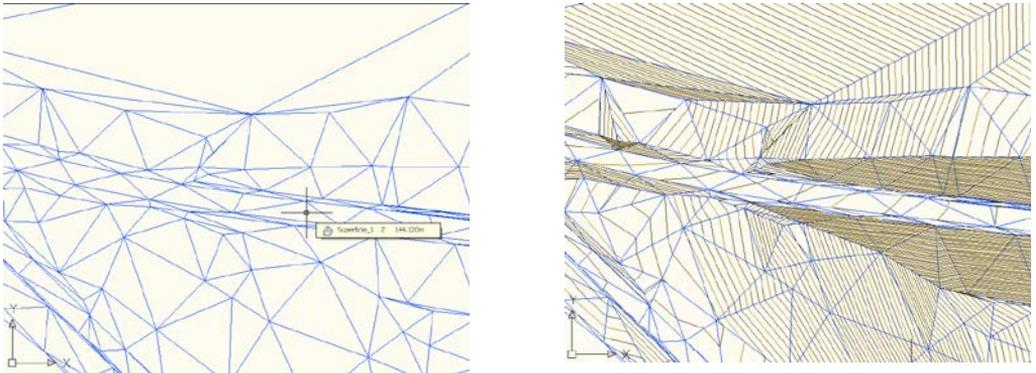


Ilustración 61.- Consideración puntos aleatorios y líneas de rotura. Izquierda: visualización con triángulos, derecha: visualización con isolinéas

Entre las ventajas de este modelo destacar las siguientes:

- Permite adaptarse a terrenos complejos, muy variables.
- Permite incorporar con detalles construcciones humanas, si son de interés por formar un MDS.
- Mantener los datos originales, tanto en posición como en altitud, incorporándolos como vértices en el modelo.

Entre las desventajas la principal es el coste de adquisición de los datos precisos, económico y temporal, así como la mayor necesidad de recursos computacionales para su gestión.

El flujo típico de trabajo para la formación y explotación de un MDT es el que se muestra en la figura siguiente, que comprende tres fases básicas:

- A partir de los datos disponibles, formación del TIN. Supone identificar en la fuente cartográfica los datos que precisa este modelo, que serán distintos para las tres opciones existentes:
 - Levantamiento fotogramétrico, el más habitual. Esta fuente cartográfica proporciona tres tipos de componentes al TIN: líneas de rotura, curvas de nivel y puntos aleatorios. En referencia a las curvas de nivel indicar que son un componente que las herramientas de trabajo tienden a diferenciar de las líneas de rotura, ya que si bien su comportamiento básico es el de una rotura (debe ser necesariamente lado de un triángulo del modelo), tiene características singulares: todos sus puntos están a la misma cota y, salvo

situaciones especiales, un triángulo no deberá tener todos su vértices en una curva de la misma altitud.

- Levantamiento topográfico. La captura a medida que se hace con este tipo de base cartográfico permite generar modelos muy precisos. Incorpora únicamente datos de tipo de punto aleatorios y líneas de rotura.
- Modelo Digital de elevaciones. Este modelo ráster proporciona exclusivamente puntos de masa. Al no considerar roturas, el modelo generado no reflejará con claridad las discontinuidades del terreno, proporcionando un modelo suavizado el mismo.
- Revisión del modelo formado, y edición en aquellas zonas en las que el modelo no responda a la superficie. Esta fase supone visualizar el modelo, usando la representación más adecuada, así como conocer las herramientas de edición disponibles.
- Explotación y análisis del modelo. Finalmente se procederá a explotar la superficies, desde distintos puntos de vista:
 - Obtención de visualizaciones de la misma.
 - Análisis de la superficie.
 - Base para la definición de otras superficies.

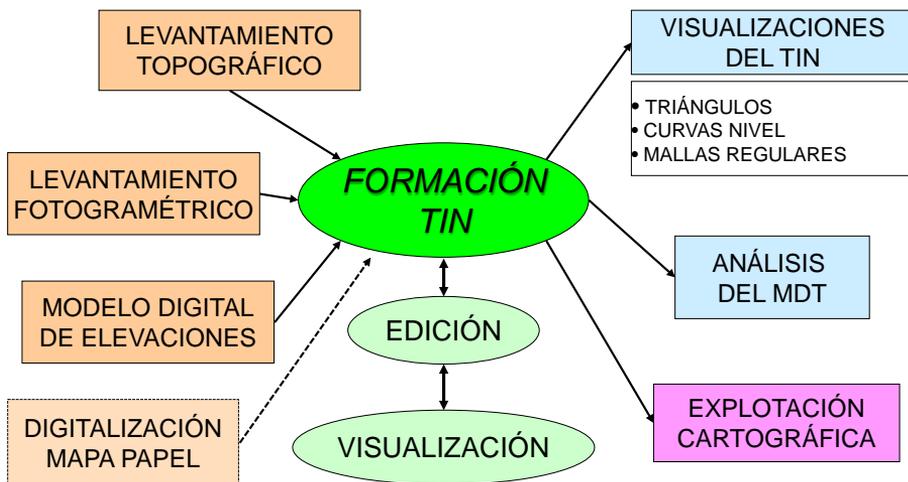


Ilustración 62.- Flujo de trabajo para la formación, edición y explotación de un TIN.

Precauciones típicas en la fase de importación de datos a un TIN.

A continuación se enumeran situaciones habituales características para los datos de partida que tienden a generar modelos TIN poco eficientes.

La primera situación está relacionada con la importación de curvas de nivel. Es muy frecuente que cuando se utiliza una entidad de tipo línea poligonal en el entorno de trabajo para almacenar la misma, con objeto de que la apariencia sea correcta se procede a definir la curva con una densidad de puntos muy elevada.

El efecto de este comportamiento en la formación del TIN es la creación de numerosos triángulos innecesarios en el sentido que no aportan precisión para la obtención de la elevación pero que ralentizan la gestión del modelo. Para resolver la situación planteada la solución pasa por el filtrado de vértices innecesarios, usando algoritmos de filtrado que emplean como parámetros dos ajustes básicos, de distancia y ángulo, basados en variantes de un algoritmo muy conocido, propuesto por Douglas y Peucker en 1973.

A continuación se muestra, para una base cartográfica a escala 1:5.000, representada a escala 1:2.000, un conjunto de curvas de nivel en las que, con asideros, se muestran los vértices que las definen.

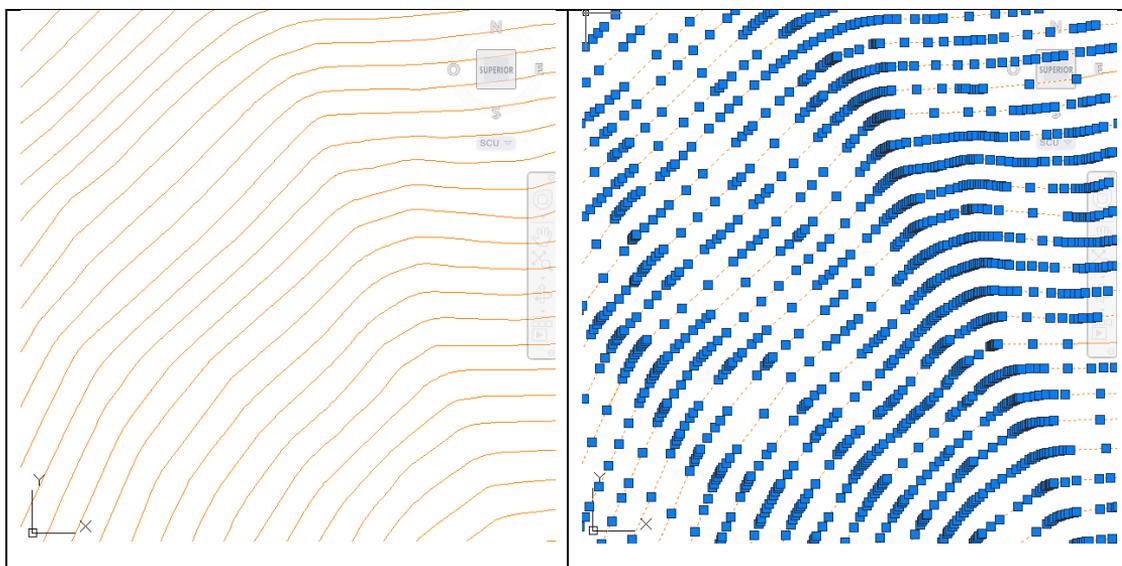


Ilustración 63.- Situación típica con curvas de nivel: exceso de vértices significativos. (Tamaño cuadro: 140x140 m)

Si se procede a generar los triángulos sin filtrar las curvas, la situación que se obtiene es la que se muestra en la figura siguiente en la imagen de la izquierda. En la ventana derecha se muestra la misma zona en la que se han filtrado las mismas eliminando puntos significativos que estén situados a una distancia menor de 15 mm - que puede

considerarse como un extremo máximo para este ajuste- con un ángulo de cambio de 4º (parámetros usados en la herramienta civil3D 2012, de autoDesk).

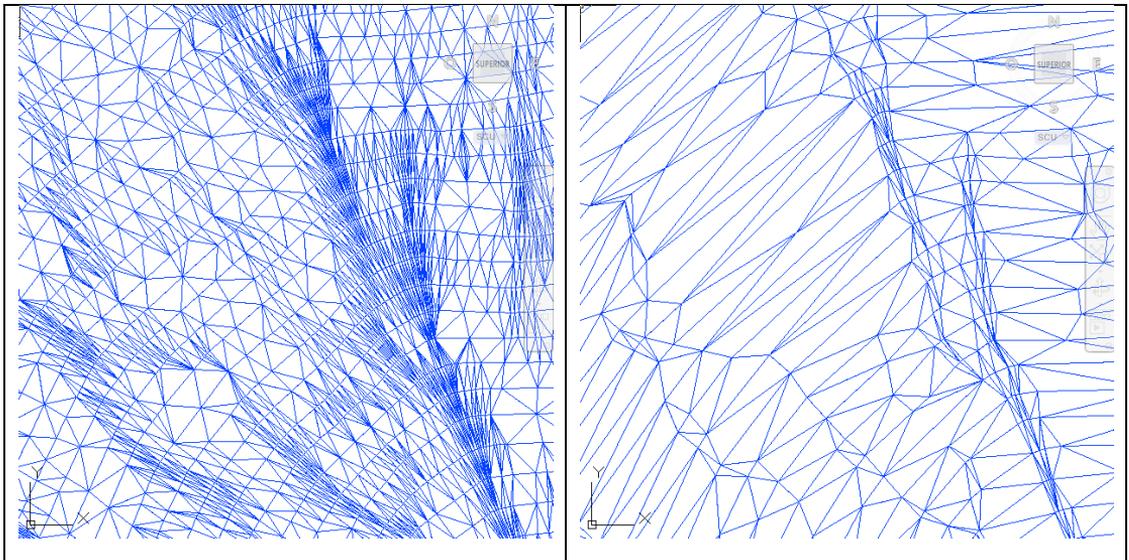


Ilustración 64.- Reducción en el número de triángulos formados por efecto de la aplicación de un filtro.

La situación contraria, vértices muy separados que provocaría la formación de triángulos muy alargados, potencialmente inadecuados para la interpolación, es poco frecuente; pudiendo aparecer para componentes del modelo de tipo roturas. Con esta finalidad algunas herramientas proporcionan ajustes destinados a la densificación de estos tramos de líneas.

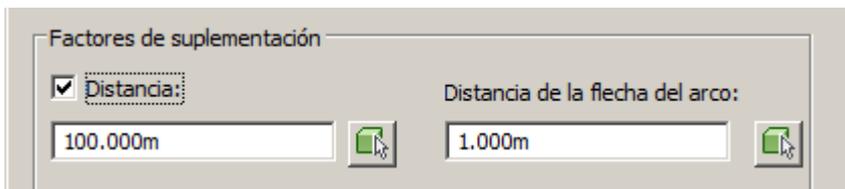


Ilustración 65.- Ajustes para la densificación de vértices en líneas de rotura (Civil3D 2012, de AutoDesk).

Errores típicos en la formación automática de la malla de triángulos.

Se destacan dos situaciones para las que habitualmente las herramientas de formación de modelos TIN generan triángulos erróneos, que provocan lógicamente una explotación incorrecta si se trabaja con los mismos.

La primera es consecuencia directa de una característica intrínseca de la triangulación obtenida según el algoritmo de Delaunay, que forma todos los triángulos interiores al límite convexo del conjunto de puntos empleado. Si se parte de un conjunto de datos cuyo límite

es irregular, y que habitualmente además no está definido de forma explícita, el resultado es la formación de triángulos en los contornos del modelo que completan la superficie hasta el límite indicado, apoyándose en puntos que en el terreno realmente no son contiguos, y que se identifican con claridad debido a que los lados de los mismos son significativamente mayores que la media en el modelo, además de por su forma alargada.

En las figuras siguientes se muestra esta situación, para una base cartográfica a escala 1:1.000 de la carretera nacional N-621A, entre los Pk 183+200 y 183+600, próximo al núcleo de San Pedro de las Baheras.

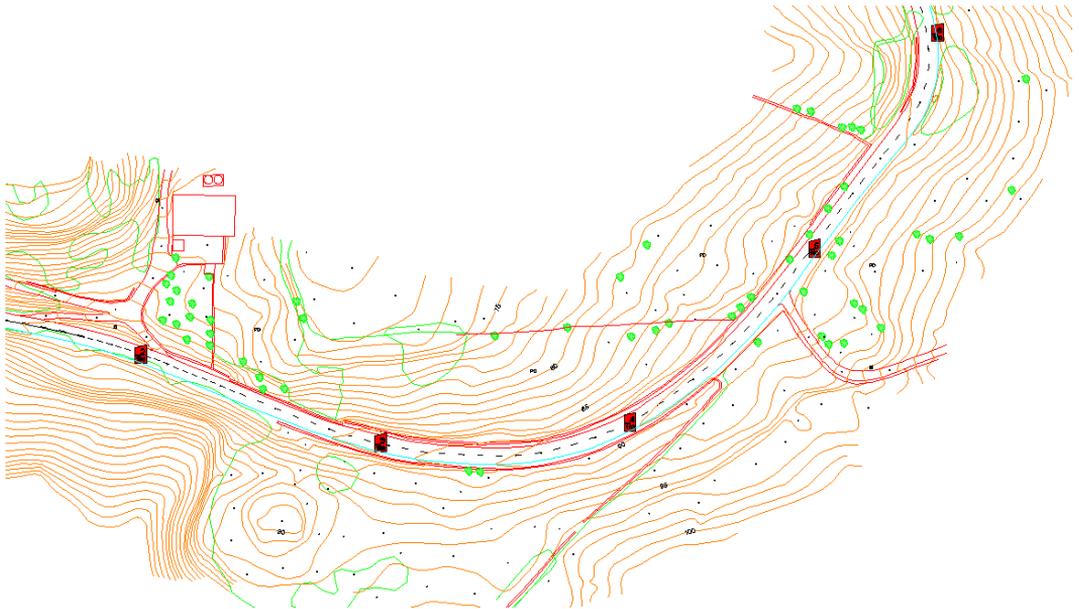


Ilustración 66.- Cartografía escala 1:1.000, representada a escala 1:3.000 (original 140x80 mm)

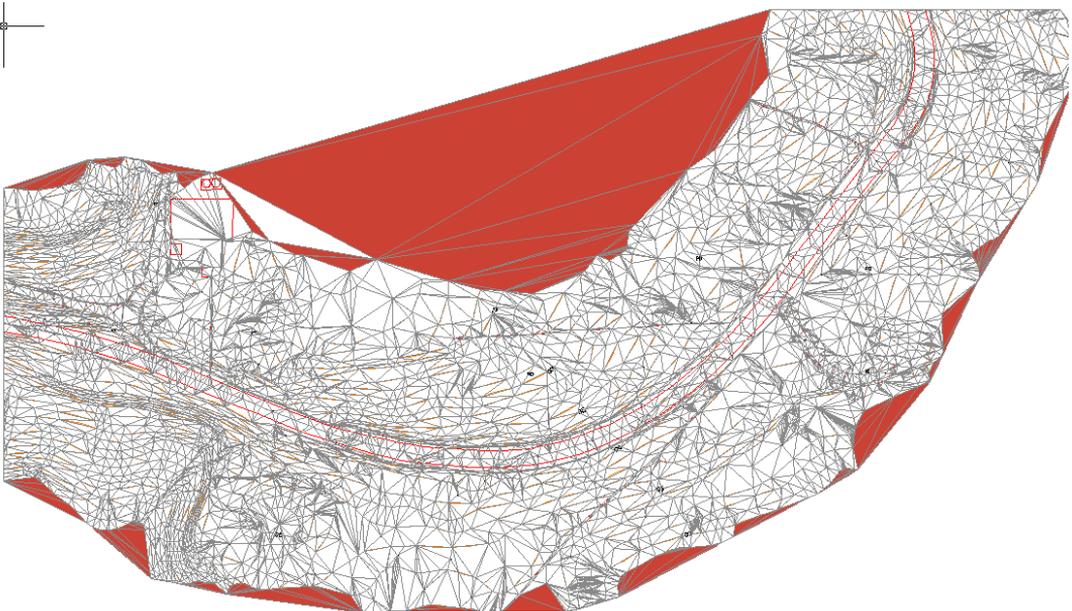


Ilustración 67.- Triángulos formados por el modelo no válidos, en granate. (Original 140x80 mm)

Frente a esta situación distintas herramientas de gestión de modelos TIN proponen variadas soluciones:

- La solución por defecto: dejar todos los triángulos hasta el límite convexo de las posiciones empleadas, confiando al usuario la responsabilidad de eliminar los erróneos.
- Incorporar al modelo un componente especial que explicita el límite válido formado por un polígono, que usualmente se denominado contorno.
- Fijar un lado máximo de triángulo, eliminándose todos aquellos que superen en alguno de sus lados este valor.

Otra situación típica en la que se crean caras erróneas la constituyen zonas de divisorias con bajas pendientes en las que se separan las curvas de nivel, al generarse triángulos en los que todos sus vértices están apoyados en una misma curva, modelizando en consecuencia una zona plana inexistente. En la figura siguiente se presenta un ejemplo de esta situación, cuya solución pasa bien por la edición manual, incorporando una rotura, bien por la aplicación de algoritmos específicos destinados a la solución de esta situación, como es el caso de la aplicación civil3D.

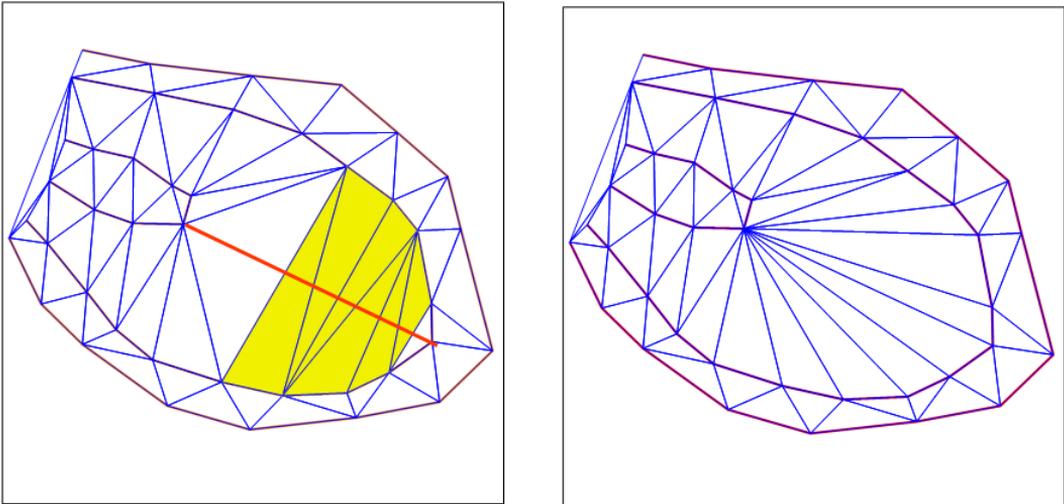


Ilustración 68.- Formación de triángulos planos en divisorias.

Herramientas típicas de edición.

Una vez formado el modelo y revisados los problemas típicos descritos, se deberá verificar globalmente la malla de triángulos generada para detectar zonas en las que la modelización no responde a la superficie, editando manualmente la malla. La identificación de estas áreas es una habilidad en la que participan por igual técnica y arte, distinguiéndose dos flujos de trabajo:

- Problemas en zonas en las que típicamente existen construcciones humanas. En estas situaciones la solución habitual suele conllevar la incorporación de nuevas roturas, o la edición – borrado de datos existentes para formar la superficie que se sabe correcta. A continuación se muestran dos ejemplos:
 - Una zona en la que coexisten dos superficies, como sucede cuando un río es atravesado por un puente, por ejemplo. Se muestra la situación inicial y la final, si el objetivo es la modelización adecuada del cauce para un estudio hidrológico.

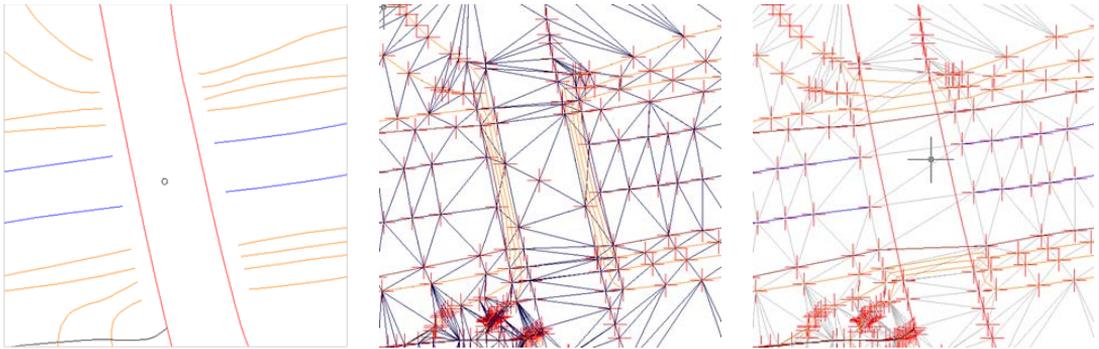


Ilustración 69.- Edición de una zona en la que existen dos superficies, de interés el cauce. Imagen izda: original, imagen centro: modelo inicial, imagen dcha: modelo editado.

- Existencia de un muro, que se ha capturado en la cartografía únicamente en su parte superior. Su modelización correcta exige la creación e incorporación como rotura de su límite inferior, que deberá ser definido en base a los datos disponibles.
- Zonas de terreno natural. En este caso se aconseja visualizar el modelo TIN en base al uso de curvas de nivel, y buscar las zonas con apariencia errónea o “extraña”. A continuación se muestra un ejemplo, en el que el talud de la carretera se conoce es más continuo del obtenido inicialmente.

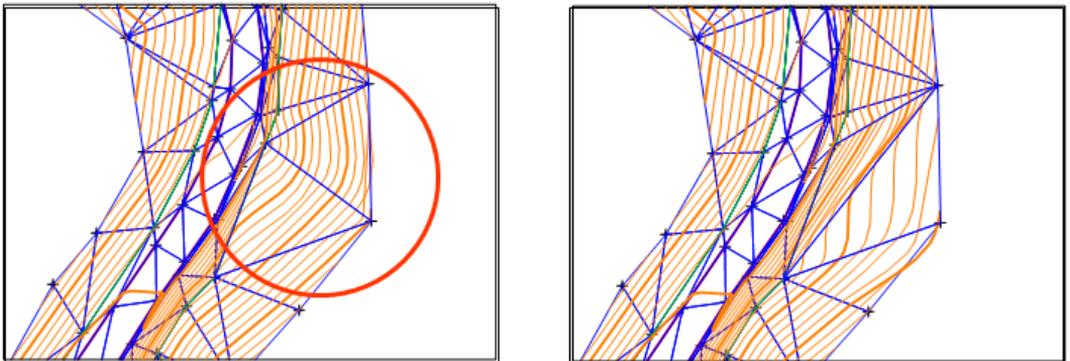


Ilustración 70.- Ejemplo de modelización incorrecta del terreno natural (Cartografía: Esc. 1:1.000, equidistancia 1 m.)

Las herramientas típicas de edición en los entornos de trabajo son las que se enumeran a continuación:

- Puntuales: eliminación de posiciones de puntos o vértices de líneas del modelo.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



- Lineales: inserción, eliminación o intercambio de roturas.

3.2.2 Modelos regulares de puntos.

Se emplea un modelo de datos ráster, en el que se almacena la altitud de la superficie para el centro de cada celda. La resolución de la rejilla, habitualmente cuadrada, determina la precisión con la que se modeliza la superficie, pudiéndose encontrar rejillas con tamaños muy diversos:

- Distribuidas por el CING, para cualquier posición en España (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>): resolución de 25 y 50 m, para algunas Comunidades hasta 5 m.
- Modelos a nivel mundial, con un tamaño correspondiente a 1 minuto sexagesimal de arco, el modelo ETOPO1 (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>).

En función de la naturaleza de la elevación almacenada, se distingue:

- Si se almacena la cota del terreno, al modelo se le denomina Modelo Digital de elevaciones (DEM).
- Si se almacena la máxima cota existente en la celda, considerando también construcciones humanas, vegetación o cualquier otro elemento existente sobre la superficie, se denomina Modelo Digital de Superficie (DSM).

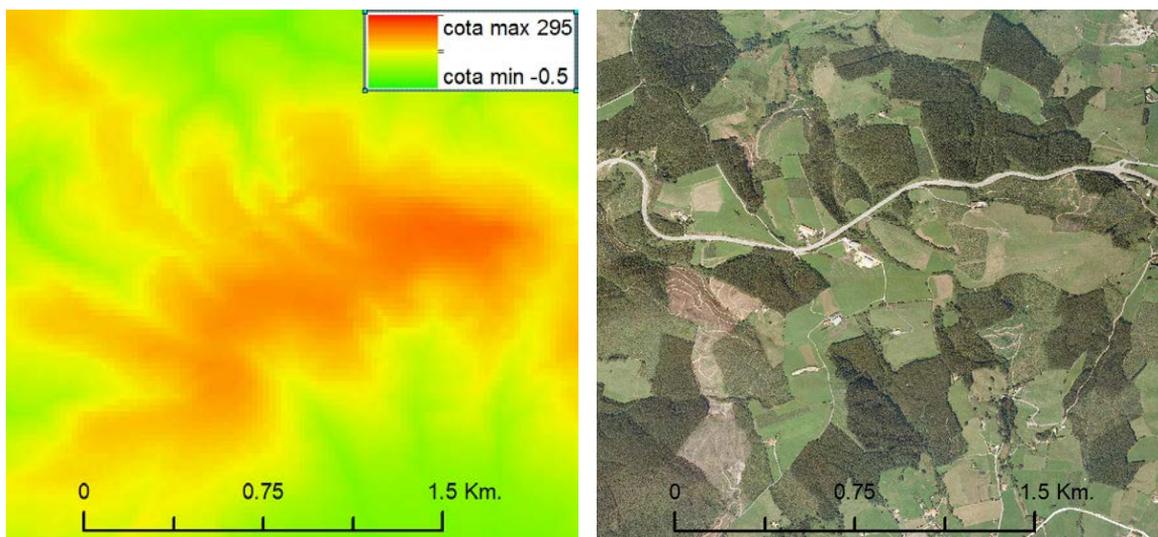


Ilustración 71.- Modelo digital de elevaciones. Tamaño de celda: 5 m. Escala representación: 1:25.000 (75x70 mm)

La principal ventaja de este modelo es la eficiencia y rapidez tanto en la visualización como en el análisis de la superficie, existiendo para este modelo más algoritmos de

análisis que para cualquier otro modelo de datos existentes. Son muy usados para aplicaciones que usan escalas medias y pequeñas.

Como desventaja evidente destacar la incapacidad de representar discontinuidades existentes en la superficie, como puede ser por ejemplo el borde de un río, o localizaciones de interés, como puede ser el punto más bajo en una depresión; o construcciones humanas de cualquier tipo. Además, en terrenos en los que no hay variación en la altitud, se deben almacenar todas las posiciones, aunque celdas contiguas tomen el mismo valor.

Las metodologías de formación de este tipo de modelos se pueden dividir en tres grandes grupos:

- Captura directa, habitualmente empleando procesos semiautomáticos con metodologías fotogramétricas, en los que un operador captura la elevación en según una rejilla preestablecida.
- Interpolación automática directa a partir de otro modelo de superficie, normalmente formado por una malla TIN.
- Interpolación a partir de un conjunto de puntos capturados con alguna metodología automática, de bajo coste de adquisición, distinguiéndose dos grandes bloques de metodologías:
 - Deterministas. Métodos de interpolación más habituales: inverso a la distancia, vecino más próximo o superficies de ajuste.
 - Probabilísticas. Destacar los modelos geoestadísticos, y en particular, el krigeaje (kriging).

3.2.3 Curvas de nivel.

Se considera que este modelo es la mejor representación cartográfica de una superficie, con el que cualquier usuario, con un aprendizaje básico, a partir de la observación de las curvas de nivel complementadas con puntos aislados, puede llegar a tener un conocimiento muy detallado de la superficie, en base a la identificación de elementos característicos como vaguadas, divisorias, collados, cerros, simas, direcciones de flujo en cursos de agua, pendientes de laderas, y otras características que resultan mucho menos evidentes en un TIN o en un DEM.

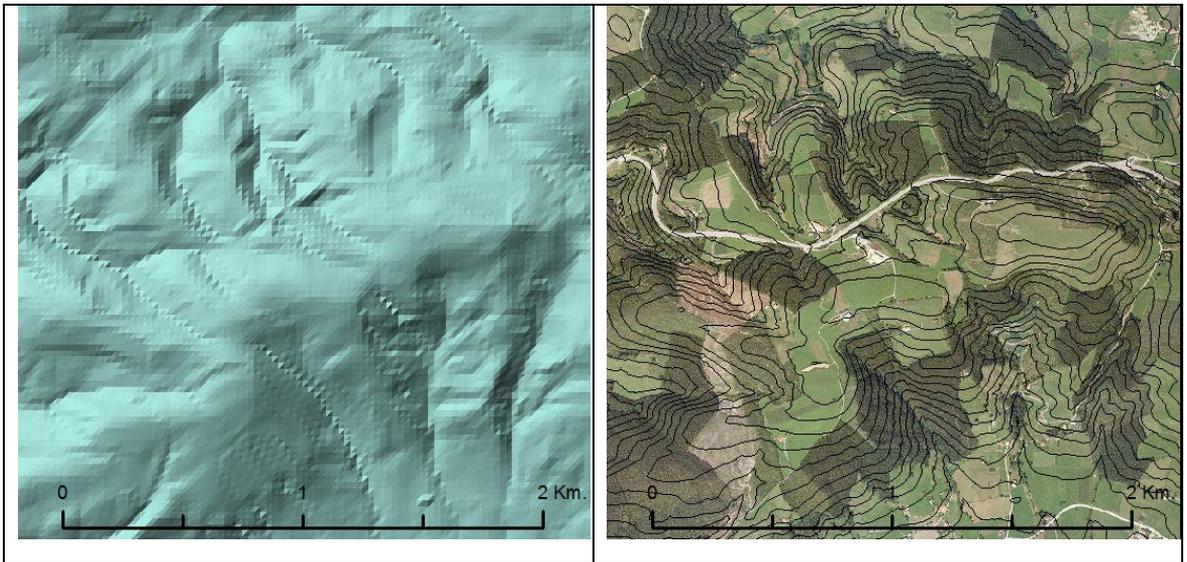
La creación de las curvas de nivel siempre se obtiene por interpolación a partir de alguno de los modelos anteriores, y desde un punto de vista exclusivamente informático, se pueden considerar como un producto final, con el que no se puede efectuar análisis alguno. Si se pretende obtener a partir de un conjunto digital de curvas de nivel un nuevo conjunto de curvas con una equidistancia distinta, o un perfil del terreno, se debe generar

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210



un modelo TIN y desde el mismo obtener los productos enumerados, nunca de forma directa de las curvas originales.



**Ilustración 72.- Obtención de un mapa de curvas de nivel a partir de un TIN desde un DEM.
Escala de representación: 1:25.000 (75x70 mm).**