

4. INTRODUCCIÓN A LA CARTOGRAFÍA. PROYECCIÓN LAMBERT

4.1.- GENERALIDADES

La *Cartografía* es la ciencia que proporciona los criterios y los métodos para representar la superficie terrestre en un mapa. El elipsoide no es una superficie desarrollable, por lo que se hace necesario aplicar una transformación para pasar de las coordenadas geográficas a un sistema de coordenadas planas, cartesianas o polares. Existen muchas formas de aplicar dicha transformación, lo que da lugar a la existencia de numerosas *proyecciones cartográficas*.

En todas las proyecciones cartográficas la representación plana de la superficie de la Tierra sufrirá determinadas deformaciones, o *anamorfosis*, con relación al terreno original. Las anamorfosis son de distintos tipos y cada uno de los sistemas de proyección tiende a eliminar o reducir alguna o algunas de ellas, pero ninguno las elimina todas. En cada caso se aplicará el más conveniente, en función de las características del trabajo cartográfico concreto o de las exigencias de la normativa aplicable.

Las deformaciones lineales son la causa de que la longitud l de una línea en el terreno se transforma en otra longitud l' en la proyección. Se llama *módulo de deformación lineal* o *anamorfosis lineal* K a la relación entre ambos valores ($K=l'/l$). Una línea que no sufre deformación lineal, es decir para la cual $K=1$, se llama *automecoica*.

Del mismo modo, se llama *módulo de deformación superficial*, o *anamorfosis superficial* a la relación entre un área s en el terreno y su proyección s' ($S=s'/s$). Las proyecciones que conservan las áreas, aunque las figuras en el terreno y en la proyección dejen de ser semejantes, se denominan *equivalentes* o *autálicas*.

Se llama *deformación angular* o *anamorfosis angular* a la diferencia ($\alpha'-\alpha$) entre el ángulo α formado por dos líneas en el terreno y su equivalente α' en la proyección. Se denomina *proyección conforme* a aquella en la que se conservan los ángulos.

4.1.1.- Proyecciones cartográficas empleadas en minería

La proyección cónica conforme Lambert era la proyección oficial hasta que, por el Decreto 2.992/1968, fue sustituida por la UTM. Aunque está en desuso, la existencia de documentación minera referida a este sistema justifica su estudio.

La proyección UTM es de aplicación en cartografía minera desde que lo estableció la Ley de Minas y la modificación de 1980. Ésta define también el sistema de referencia geodésico para los trabajos mineros, que es el constituido por el datum europeo que, actualmente, se conoce como ED50.

Como se ha visto en 1.4, el RD 1071/2007 ha establecido el ETRS89 como nuevo sistema de referencia geodésico oficial en España. Su aplicación en cartografía minera implica que se seguirá empleando la proyección UTM pero en un sistema de referencia distinto, lo que significa diferencias de algunos centenares de metros entre las coordenadas UTM de un punto en el sistema ED50 y las referidas al ETRS89. De la transformación de coordenadas entre los distintos sistemas de referencia, y entre diferentes proyecciones cartográficas, nos ocuparemos en el capítulo 5.

4.2.- PROYECCIÓN LAMBERT

Es una proyección desarrollable sobre una superficie cónica, de vértice V , tangente al elipsoide a lo largo del paralelo central de la zona de interés (figura 4.1). Es una proyección conforme, es decir, conserva los ángulos. En el caso de la proyección Lambert que se empleó en España, se toma como paralelo central el de latitud 40° . En realidad, para reducir las deformaciones, la proyección se realiza sobre un cono secante al elipsoide, no sobre uno tangente. En la proyección Lambert española, el cono corta al elipsoide según dos paralelos equidistantes del paralelo 40° .

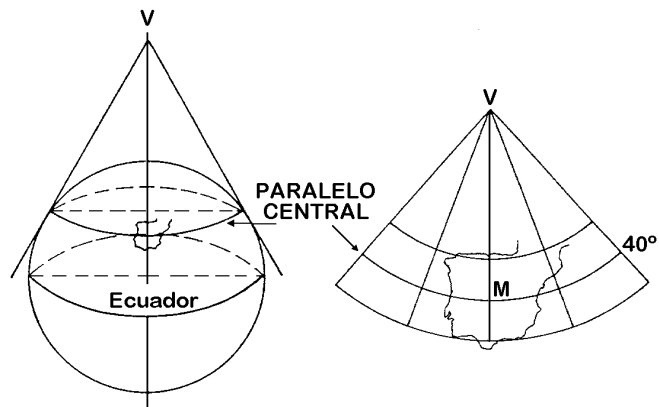


Fig. 4.1. Proyección Lambert

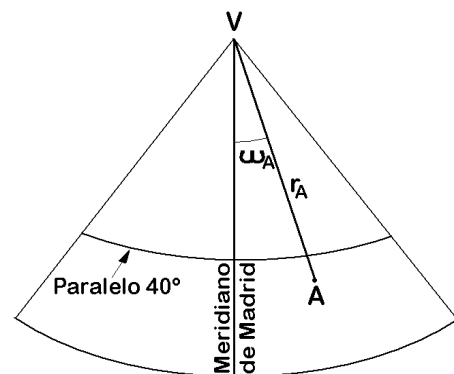


Fig. 4.2. Coordenadas polares

Al desarrollar el cono sobre una superficie plana (figuras 4.1 y 4.2) los meridianos se transforman en rectas concurrentes y los paralelos en arcos de circunferencia.

El origen de coordenadas cartesianas viene dado por la intersección del paralelo 40° y el meridiano de Madrid, que se toma como meridiano de referencia. El eje de las YY es el meridiano de referencia y el de las XX la tangente al paralelo por el origen de coordenadas. Para evitar la aparición de coordenadas negativas, se asigna al origen de coordenadas los valores:

$$X_0 = 600.000m \quad Y_0 = 600.000m$$

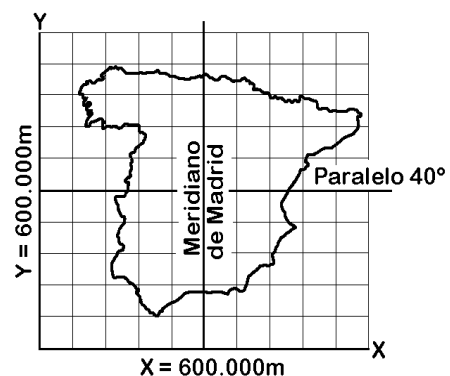


Fig. 4.3. Cuadrícula Lambert

El elipsoide empleado es el de Struve. Un punto A de la superficie terrestre puede situarse por sus coordenadas geográficas en este elipsoide, por sus coordenadas cartesianas Lambert o por sus coordenadas polares (figura 4.2). Éstas son el *radio vector* r , distancia entre el vértice V y el punto, y el ángulo ω , que

es la convergencia de meridianos respecto al meridiano de Madrid. El valor del radio vector es el mismo para todos los puntos de igual latitud.

4.3.- COORDENADAS LAMBERT

4.3.1.- Transformación de coordenadas geográficas en cartesianas

Sean M_A y L_A las coordenadas geográficas (longitud y latitud) de un punto A en este sistema que, como hemos indicado, utiliza el elipsoide de Struve. La longitud M_A estará referida al meridiano de Madrid. Las coordenadas polares r_A y ω_A del punto se calculan:

$$r_A = 12.380.512,98 \left(\operatorname{tg} \frac{90^\circ - L_A}{2} \right)^{\operatorname{sen} 40^\circ} \left(\frac{1 + e \operatorname{sen} L_A}{1 - e \operatorname{sen} L_A} \right)^{\frac{e \operatorname{sen} 40^\circ}{2}}$$

$$\omega_A = M_A \operatorname{sen} 40^\circ$$

siendo e la primera excentricidad del elipsoide de Struve. También se puede emplear la tabla de radios.

Las coordenadas cartesianas del punto A se calculan con las expresiones siguientes:

$$X_A = 600.000 + r_A \operatorname{sen} \omega_A$$

$$Y_A = 600.000 + r_0 - r_A \cos \omega_A$$

siendo $r_0 = 7.602.950,9m$ el radio vector del paralelo 40° .

4.3.2.- Transformación de coordenadas cartesianas en geográficas

Sean X_A e Y_A las coordenadas cartesianas del punto cuyas coordenadas geográficas pretendemos calcular. Empezamos por calcular las coordenadas polares del punto:

$$\operatorname{tg} \omega_A = \frac{X_A - 600.000}{600.000 + r_0 - Y_A} = \frac{X_A - 600.000}{8.202.950,9 - Y_A}$$

$$r_A = \frac{X_A - 600.000}{\operatorname{sen} \omega_A}$$

La convergencia sólo depende de la longitud M_A :

$$M_A = \frac{\omega_A}{\operatorname{sen} 40^\circ}$$

Para calcular la latitud L_A entramos en la tabla de radios con el valor obtenido para el radio vector r_A . Normalmente será necesario interpolar entre los valores de la tabla, por lo que se dan también las diferencias para cada $5'$ ($300''$).

Proyección Lambert: Tabla de radios

Latitud L	Radio vector r	Diferencias	Latitud L	Radio vector r	Diferencias
36° 00'	8.046.757,99	-9.257,09	40° 00'	7.602.950,91	-9.241,88
36° 05'	8.037.500,90	-9.256,32	40° 05'	7.593.709,03	-9.242,04
36° 10'	8.028.244,58	-9.255,58	40° 10'	7.584.466,99	-9.242,21
36° 15'	8.018.988,99	-9.254,86	40° 15'	7.575.224,78	-9.242,40
36° 20'	8.009.734,14	-9.254,15	40° 20'	7.565.982,38	-9.242,62
36° 25'	8.000.479,99	-9.253,46	40° 25'	7.556.739,76	-9.242,85
36° 30'	7.991.226,53	-9.252,79	40° 30'	7.547.496,91	-9.243,10
36° 35'	7.981.973,73	-9.252,14	40° 35'	7.538.253,81	-9.243,37
36° 40'	7.972.721,59	-9.251,51	40° 40'	7.529.010,43	-9.243,67
36° 45'	7.963.470,07	-9.250,90	40° 45'	7.519.766,77	-9.243,98
36° 50'	7.954.219,17	-9.250,31	40° 50'	7.510.522,79	-9.244,31
36° 55'	7.944.968,86	-9.249,73	40° 55'	7.501.278,48	-9.244,66
37° 00'	7.935.719,13	-9.249,18	41° 00'	7.492.033,82	-9.245,03
37° 05'	7.926.469,95	-9.248,64	41° 05'	7.482.788,79	-9.245,42
37° 10'	7.917.221,31	-9.248,12	41° 10'	7.473.543,36	-9.245,83
37° 15'	7.907.973,18	-9.247,63	41° 15'	7.464.297,53	-9.246,27
37° 20'	7.898.725,55	-9.247,15	41° 20'	7.455.051,26	-9.246,72
37° 25'	7.889.478,41	-9.246,69	41° 25'	7.445.804,55	-9.247,19
37° 30'	7.880.231,72	-9.246,24	41° 30'	7.436.557,36	-9.247,68
37° 35'	7.870.985,48	-9.245,82	41° 35'	7.427.309,68	-9.248,19
37° 40'	7.861.739,66	-9.245,42	41° 40'	7.418.061,49	-9.248,72
37° 45'	7.852.494,24	-9.245,03	41° 45'	7.408.812,77	-9.249,27
37° 50'	7.843.249,21	-9.244,67	41° 50'	7.399.563,50	-9.249,84
37° 55'	7.834.004,55	-9.244,32	41° 55'	7.390.313,66	-9.250,43
38° 00'	7.824.760,23	-9.243,99	42° 00'	7.381.063,23	-9.251,04
38° 05'	7.815.516,24	-9.243,68	42° 05'	7.371.812,18	-9.251,68
38° 10'	7.806.272,56	-9.243,39	42° 10'	7.362.560,51	-9.252,33
38° 15'	7.797.029,17	-9.243,12	42° 15'	7.353.308,18	-9.253,00
38° 20'	7.787.786,05	-9.242,87	42° 20'	7.344.055,18	-9.253,69
38° 25'	7.778.543,18	-9.242,64	42° 25'	7.334.801,48	-9.254,41
38° 30'	7.769.300,54	-9.242,42	42° 30'	7.325.547,08	-9.255,14
38° 35'	7.760.058,12	-9.242,23	42° 35'	7.316.291,94	-9.255,89
38° 40'	7.750.815,89	-9.242,05	42° 40'	7.307.036,04	-9.256,67
38° 45'	7.741.573,83	-9.241,90	42° 45'	7.297.779,37	-9.257,46
38° 50'	7.732.331,94	-9.241,76	42° 50'	7.288.521,91	-9.258,28
38° 55'	7.723.090,17	-9.241,64	42° 55'	7.279.263,63	-9.259,11
39° 00'	7.713.848,53	-9.241,55	43° 00'	7.270.004,52	-9.259,97
39° 05'	7.704.606,98	-9.241,47	43° 05'	7.260.744,55	-9.260,85
39° 10'	7.695.365,51	-9.241,41	43° 10'	7.251.483,70	-9.261,74
39° 15'	7.686.124,11	-9.241,37	43° 15'	7.242.221,96	-9.262,66
39° 20'	7.676.882,74	-9.241,35	43° 20'	7.232.959,29	-9.263,60
39° 25'	7.667.641,39	-9.241,35	43° 25'	7.223.695,69	-9.264,56
39° 30'	7.658.400,04	-9.241,36	43° 30'	7.214.431,13	-9.265,54
39° 35'	7.649.158,68	-9.241,40	43° 35'	7.205.165,59	-9.266,54
39° 40'	7.639.917,28	-9.241,46	43° 40'	7.195.899,04	-9.267,57
39° 45'	7.630.675,82	-9.241,54	43° 45'	7.186.631,48	-9.268,61
39° 50'	7.621.434,28	-9.241,63	43° 50'	7.177.362,87	-9.269,67
39° 55'	7.612.192,65	-9.241,75	43° 55'	7.168.093,19	

4.4.- ORIENTACIÓN LAMBERT

La dirección del eje Y de la cuadrícula de coordenadas cartesianas Lambert sólo coincide con la meridiana en el meridiano central, tal como se aprecia en las figuras 4.1 y 4.3. En cualquier otro punto, el eje Y Lambert y la meridiana formarán un ángulo ω , que es la convergencia de meridianos, cuyo valor dependerá de la longitud geográfica del punto en cuestión respecto al meridiano central.

La orientación Lambert es el ángulo α_A^B (figura 4.4) que forma una determinada alineación $A-B$ con la dirección del eje Y Lambert en uno de los extremos A de la misma, medido desde dicho eje y en dirección horaria. La diferencia entre ese valor y el acimut topográfico θ_A^B de la misma alineación es, precisamente, la convergencia entre el meridiano que pasa por A y el meridiano de Madrid ya que, como sabemos, el acimut está referido a la meridiana:

$$\alpha = \theta \pm \omega$$

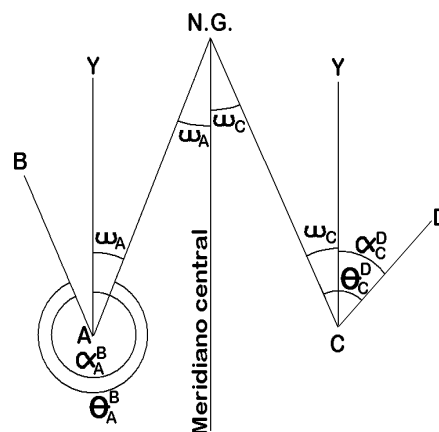


Fig. 4.4. Orientación Lambert

Según el punto se sitúe al este o al oeste del meridiano de Madrid, la convergencia se resta del acimut o se suma, tal como puede verse en la figura 4.4. En ésta:

$$\alpha_A^B = \theta_A^B + \omega_A$$

$$\alpha_C^D = \theta_C^D - \omega_C$$

Para calcular la orientación Lambert de una alineación a partir de las coordenadas cartesianas de sus puntos extremos, hemos de tener en cuenta las posiciones relativas de estos. Así, en los casos de la figura 4.4, será:

$$\alpha_A^B = 300^\circ + \arctan \frac{|Y_B - Y_A|}{|X_B - X_A|}$$

$$\alpha_C^D = \arctan \frac{|X_D - X_C|}{|Y_D - Y_C|}$$

4.5.- DISTANCIA LAMBERT

Para calcular la distancia Lambert entre dos puntos A y B a partir de sus coordenadas cartesianas, basta con hacer:

$$D_{AB} = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2}$$

Para calcular la correspondiente distancia geodésica, hay que dividir la distancia Lambert por el módulo de deformación lineal K . Los valores de K dependen de la latitud geográfica L y pueden calcularse con la expresión:

$$K = \frac{r \operatorname{sen} 40^\circ}{N \cos L}$$

r es el radio vector, N la gran normal (véase 2.2) y L la latitud. En el caso que nos ocupa, cálculo de la distancia geodésica entre dos puntos, conviene emplear, en lugar de los correspondientes a A , los valores medios de los dos puntos.

5. PROYECCIÓN UTM. CAMBIO DE ELIPSOIDE

5.1.- PROYECCIÓN UTM

UTM son las siglas de *Universal Transversa Mercator*. Se trata de una proyección desarrollable, sobre un cilindro tangente al elipsoide. Se denomina transversa porque la tangencia no se hace sobre un paralelo sino sobre un meridiano, que es la única línea automecoica en esta proyección (figura 5.1).

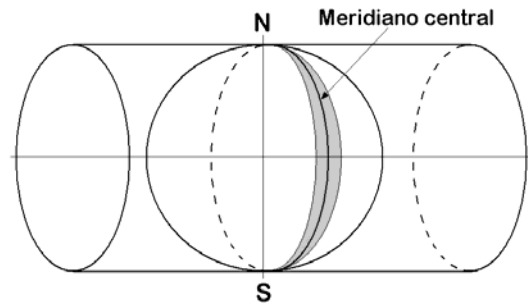


Fig. 5.1. Proyección UTM

El sistema de coordenadas cartesianas está formado por la proyección del Ecuador, que se toma como eje de las XX, y la proyección del meridiano de tangencia, que se toma como eje de las YY.

Las deformaciones lineales aumentan con el cuadrado de la distancia al meridiano de tangencia. Para mantenerlas en niveles aceptables se divide la Tierra en 60 husos, de 6° de amplitud cada uno, contando a partir del antimeridiano de Greenwich, y en cada huso se aplica la proyección cilíndrica con relación al meridiano que pasa por su centro. Existen, por tanto, dos ejes de simetría: el Ecuador y el meridiano de tangencia rectificado. Todos los husos son idénticos desde el punto de vista geométrico, lo que permite usar las mismas expresiones y tablas para realizar los cálculos en cualquiera de ellos. La proyección UTM se limita a la zona comprendida entre los paralelos +80° y -80°, completándose, en las zonas polares, por sendas proyecciones estereográficas. También se aplica, para reducir las deformaciones lineales, un factor de escala $K_0 = 0,9996$, lo que equivale a sustituir el cilindro tangente por uno secante. Aparecen así dos nuevas líneas automecoicas en cada huso, simétricas respecto al meridiano central.

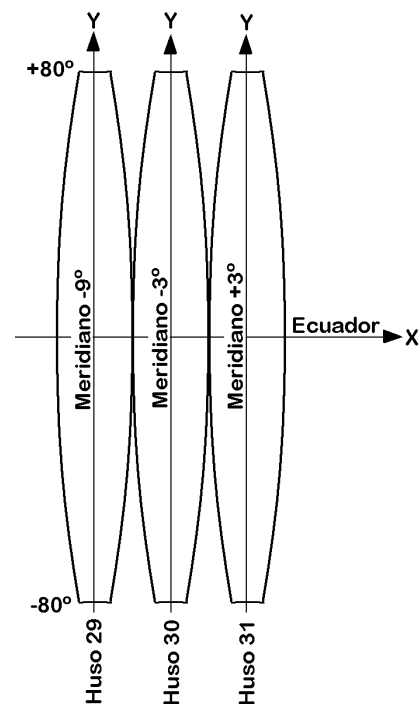


Fig. 5.2. Proyección UTM: husos 29,30 y 31

Por otra parte, la existencia de 60 husos complica de manera considerable el empleo de este sistema proyectivo, al hacerse necesario el empleo de fórmulas complejas para realizar cálculos entre puntos situados en distintos husos. La Península Ibérica, por ejemplo, se encuentra comprendida entre tres husos consecutivos, 29, 30 y 31 (figura 5.2). Para paliar, en parte, estos inconvenientes, existen unas zonas de

solape entre husos, de unos 85Km de anchura, en las que los vértices geodésicos están calculados en los sistemas de coordenadas de ambos husos.

Para evitar la aparición de coordenadas negativas, se asigna al origen de coordenadas de cada huso el valor $X_0 = 500.000m$. Por la misma razón, las coordenadas Y correspondientes al hemisferio sur se obtienen de la expresión $10 \cdot 10^6 - y$, siendo y la coordenada referida al Ecuador.

5.2.- COORDENADAS UTM

Las expresiones que se desarrollan en los apartados siguientes, y que permiten la transformación entre coordenadas geográficas y cartesianas UTM, son bastante complejas. Si se precisa realizar transformaciones de este tipo es muy recomendable utilizar una calculadora geodésica debidamente contrastada, como las que pueden encontrarse en Internet.

5.2.1.- Transformación de coordenadas geográficas en cartesianas

La transformación de coordenadas geográficas λ y φ de un punto, referidas al sistema ED50, a cartesianas UTM puede hacerse aplicando las expresiones siguientes:

$$y = (I) + (II) p^2 + (III) p^4 + A_6$$

En el hemisferio norte, $Y = y$. En el hemisferio sur, como hemos visto, se hace $Y = 10 \cdot 10^6 - y$

$$X = 500.000 + (IV) p + (V) p^3 + B_5$$

siendo:

$$p = \frac{(\lambda - \lambda_0)''}{10.000}$$

$(\lambda - \lambda_0)''$ es la diferencia entre la longitud λ del punto, referida al meridiano de Greenwich, y la longitud λ_0 del meridiano central del huso en que estemos calculando las coordenadas. La longitud del punto irá con su signo: si está situado al oeste de Greenwich, se pone signo negativo.

$$\begin{aligned} \beta &= m \varphi'' \operatorname{sen} 1'' - n \operatorname{sen} 2\varphi + u \operatorname{sen} 4\varphi - v \operatorname{sen} 6\varphi \\ \beta &= 6.367.654,495 \varphi'' \operatorname{sen} 1'' - 16.107,02762 \operatorname{sen} 2\varphi + \\ &\quad + 16,97445539 \operatorname{sen} 4\varphi - 0,021930759 \operatorname{sen} 6\varphi \\ \eta &= e' \cos \varphi \end{aligned}$$

β es la longitud del arco de elipse meridiana entre el Ecuador y el punto en cuestión. φ'' es la latitud del punto expresada en segundos. N es la gran normal en el punto. e' es la segunda excentricidad del elipsoide de Hayford. η es una función auxiliar.

$$\begin{aligned} (I) &= K_0 \beta & K_0 &= 0,9996 \\ (II) &= \frac{N \cos^2 \varphi \operatorname{tg} \varphi \operatorname{sen}^2 1'' K_0 10^8}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(III) &= \frac{N \cos^4 \varphi \operatorname{tg} \varphi \operatorname{sen}^4 1'' (5 - \operatorname{tg}^2 \varphi + 9 \eta^2 + 4 \eta^4) K_0 10^{16}}{24} \\
(IV) &= N \cos \varphi \operatorname{sen} 1'' K_0 10^4 \\
(V) &= \frac{N \cos^3 \varphi \operatorname{sen}^3 1'' (1 - \operatorname{tg}^2 \varphi + \eta^2) K_0 10^{12}}{6} \\
A_6 &= \frac{p^6 N \cos^6 \varphi \operatorname{tg} \varphi \operatorname{sen}^6 1'' (61 - 58 \operatorname{tg}^2 \varphi + \operatorname{tg}^4 \varphi + 270 \eta^2 - 330 \operatorname{tg}^2 \varphi \eta^2) K_0 10^{24}}{720} \\
B_5 &= \frac{p^5 N \cos^5 \varphi \operatorname{sen}^5 1'' (5 - 18 \operatorname{tg}^2 \varphi + \operatorname{tg}^4 \varphi + 14 \eta^2 - 58 \operatorname{tg}^2 \varphi \eta^2) K_0 10^{20}}{120}
\end{aligned}$$

5.2.2.- Transformación de coordenadas cartesianas en geográficas

La transformación de coordenadas cartesianas X e Y de un punto en coordenadas geográficas λ y φ puede hacerse aplicando las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned}
\varphi &= \varphi' + \frac{-(VII) q^2 + (VIII) q^4 - D_6}{3600''} \\
\lambda &= \lambda_0 + \frac{\Delta \lambda}{3600''}
\end{aligned}$$

$\Delta \lambda$ se obtiene de:

$$\Delta \lambda = (IX) q - (X) q^3 + E_5$$

El valor de q se obtiene de:

$$q = \frac{(X - 500.000)}{10^6}$$

Los valores de los coeficientes dependen de φ' , que es la latitud de un punto del meridiano central del huso que tenga la misma coordenada Y que el que queremos calcular. Se obtiene por interpolación a partir de:

$$\begin{aligned}
\varphi_1 &= \frac{Y}{K_0 m \operatorname{sen} 1'' 3.600''} \quad (1^a \text{ aproximación}) \\
\varphi_2 &= \frac{\frac{Y}{K_0} + n \operatorname{sen} 2\varphi_1 - u \operatorname{sen} 4\varphi_1 + v \operatorname{sen} 6\varphi_1}{m \operatorname{sen} 1'' 3.600''} \quad (2^a \text{ aproximación}) \\
\varphi' &= \frac{\frac{Y}{K_0} + n \operatorname{sen} 2\varphi_2 - u \operatorname{sen} 4\varphi_2 + v \operatorname{sen} 6\varphi_2}{m \operatorname{sen} 1'' 3.600''} \quad (3^a \text{ aproximación})
\end{aligned}$$

$$\text{con: } m = 6.367.654,495 \quad n = 16.107,02762 \quad u = 16,97445539 \quad v = 0,021930759$$

Con el valor de φ' se calculan los de la gran normal N' y la función η' . Con estos valores se obtienen los coeficientes para las ecuaciones anteriores:

$$(VII) = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{2 N'^2 \operatorname{sen} 1''} (1 + \eta'^2) \frac{1}{K_0^2} 10^{12}$$

$$\begin{aligned}
(VIII) &= \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{24 N'^4 \operatorname{sen} 1''} (5 + 3 \operatorname{tg}^2 \varphi' + 6 \eta'^2 - 6 \operatorname{tg}^2 \varphi' \eta'^2 - 3 \eta'^4 - 9 \operatorname{tg}^2 \varphi' \eta'^4) \frac{1}{K_0^4} 10^{24} \\
(IX) &= \frac{1}{N' \cos \varphi' \operatorname{sen} 1''} \frac{1}{K_0} 10^6 \\
(X) &= \frac{1}{6 N'^3 \cos \varphi' \operatorname{sen} 1''} (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \varphi' + \eta'^2) \frac{1}{K_0^3} 10^{18} \\
D_6 &= \frac{\operatorname{tg} \varphi' q^6}{720 N'^6 \operatorname{sen} 1''} (61 + 90 \operatorname{tg}^2 \varphi' + 45 \operatorname{tg}^4 \varphi' + 107 \eta'^2 - 162 \operatorname{tg}^2 \varphi' \eta'^2 - 45 \operatorname{tg}^4 \varphi' \eta'^2) \frac{1}{K_0^6} 10^{36} \\
E_5 &= \frac{q^5}{120 N'^5 \cos \varphi' \operatorname{sen} 1''} (5 + 28 \operatorname{tg}^2 \varphi' + 24 \operatorname{tg}^4 \varphi' + 6 \eta'^2 + 8 \operatorname{tg}^2 \varphi' \eta'^2) \frac{1}{K_0^5} 10^{30}
\end{aligned}$$

Si se conocen las coordenadas cartesianas UTM de un punto referidas a un determinado huso y se desea calcular las que corresponden al huso contiguo, puede operarse de la siguiente forma:

- Se calculan las coordenadas geográficas del punto.
- Se transforman de nuevo estas coordenadas en cartesianas, pero teniendo en cuenta que el valor de λ_0 a emplear será el que corresponda a la longitud del meridiano central del nuevo huso.

5.3.- ORIENTACIÓN UTM

La orientación UTM es el ángulo que forma una determinada alineación con la paralela al eje Y UTM del huso que corresponda trazada por uno de los extremos de la misma, medido desde dicha paralela y en dirección horaria. Como en el caso de la proyección Lambert, la diferencia entre la orientación UTM de una alineación y su acimut topográfico es la convergencia UTM, que suele denominarse por la letra griega γ .

Por tanto, la convergencia UTM en un punto es el ángulo γ que forman en ese punto el meridiano y la paralela al eje Y del huso trazada por el punto. Será negativa para valores situados al oeste del meridiano central del huso.

5.3.1.- Cálculo de la convergencia UTM a partir de las coordenadas geográficas

Se emplean las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned}
\gamma'' &= (XII) p + (XIII) p^3 + C_5 \\
(XII) &= \operatorname{sen} \varphi 10^4 \\
(XIII) &= \frac{1}{3} \operatorname{sen} \varphi \cos^2 \varphi (1 + 3 \eta^2 + 2 \eta^4) \operatorname{sen}^2 1'' 10^{12} \\
C_5 &= \frac{1}{15} \operatorname{sen} \varphi \cos^4 \varphi (2 - \operatorname{tg}^2 \varphi) p^5 \operatorname{sen}^4 1'' 10^{20}
\end{aligned}$$

p y η se calculan como en 5.2.

5.3.2.- Cálculo de la convergencia UTM a partir de las coordenadas cartesianas

Se emplean las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} \gamma'' &= (XV) q - (XVI) q^3 + F_5 \\ (XV) &= \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{N' \operatorname{sen} 1''} \frac{1}{K_0} 10^6 \\ (XVI) &= \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{3 N'^3 \operatorname{sen} 1''} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi' + \eta'^2 - 2\eta'^4) \frac{1}{K_0^3} 10^{18} \\ F_5 &= \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{15 N'^5 \operatorname{sen} 1''} (2 + 5 \operatorname{tg}^2 \varphi' + 3 \operatorname{tg}^4 \varphi' \eta'^2) q^5 \frac{1}{K_0^5} 10^{30} \end{aligned}$$

q , φ' , N' y η' se calculan como en 5.2 y tienen el mismo sentido que allí.

5.4.- DISTANCIA UTM

La distancia UTM a partir de las coordenadas cartesianas de dos puntos se calcula como en 4.5. Si las coordenadas de que se dispone son las geográficas, basta con transformarlas en cartesianas como se ha visto en 5.2.

Para calcular la correspondiente distancia geodésica, hay que dividir la distancia UTM por el módulo de deformación lineal K . Los valores de K se calculan en función de las coordenadas geográficas mediante:

$$\begin{aligned} K &= K_0 [1 + (XX) p^2] \\ (XX) &= \frac{1}{2} \cos^2 \varphi \operatorname{sen}^2 1'' (1 + \eta^2) 10^8 \end{aligned}$$

Para calcularlos a partir de las coordenadas cartesianas se emplea:

$$\begin{aligned} K &= K_0 [1 + (XVIII) q^2 + 0,00003 q^4] \\ (XVIII) &= \frac{1}{2 N'^2} (1 + \eta'^2) \frac{1}{K_0^2} 10^{12} \end{aligned}$$

De forma aproximada, los valores de K para la Península Ibérica pueden calcularse mediante:

$$K = K_0 [1 + 0,012325 q^2 + 0,00003 q^4]$$

5.5.- CAMBIO DE SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO

La Ley de Minas de 21 de julio de 1973 estableció que las cuadrículas mineras debían ir referidas al datum Madrid (elipsoide de Struve, meridiano de Madrid). La modificación de esta Ley, de 5 de noviembre de 1980, cambió el sistema de referencia en el que se definían los trabajos de cartografía minera, estableciendo como nuevo sistema el ED50 (elipsoide Hayford, meridiano de Greenwich).

Puesto que existe documentación minera referida al primer sistema y otra referida al segundo, es necesario, en ocasiones, realizar transformaciones entre

ambos, calculando las coordenadas en ED50 de puntos de los que se conocen sus coordenadas geográficas antiguas o viceversa.

Por otra parte, y como ya se ha explicado, el RD 1071/2007, de 27 de julio, estableció el ETRS89 como nuevo sistema de referencia geodésico para nuestro país. La cartografía española, y entre ella la minera, deberá adaptarse al nuevo sistema en los términos y plazos que se establezcan. Sobre la transformación de coordenadas en ED50 al nuevo sistema de referencia también nos ocupamos en este apartado.

5.5.1.- Transformación entre coordenadas geográficas antiguas y ED50

Si los puntos vienen dados por sus coordenadas cartesianas en un determinado sistema de referencia, calcularemos sus coordenadas geográficas en el mismo sistema antes de transformarlas al otro. Una vez transformadas, si fuese necesario, calcularemos sus coordenadas cartesianas. Estas operaciones de transformación entre coordenadas geográficas y cartesianas se explicaron en 4.3 y 5.2.

Para transformar coordenadas geográficas datum Madrid a datum ED50 pueden emplearse los siguientes procedimientos:

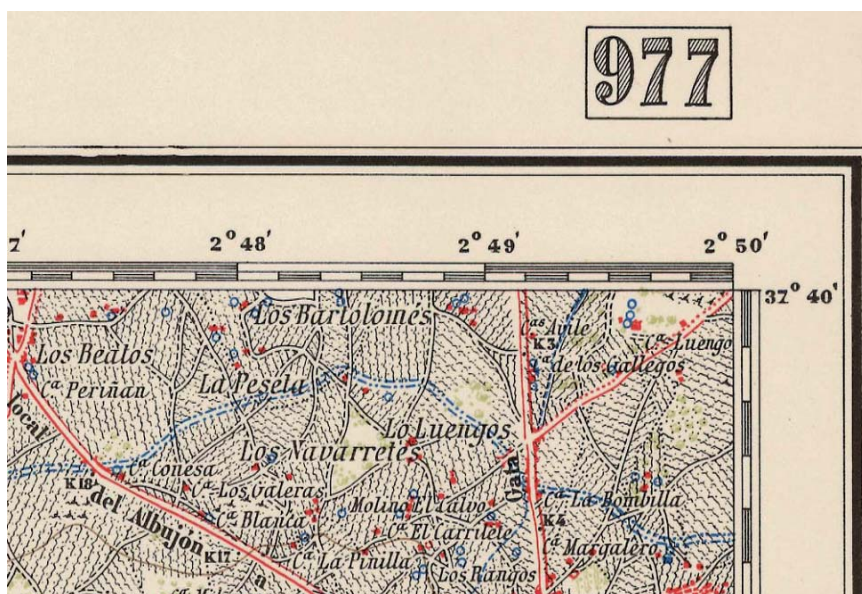


Fig. 5.3. Esquina noreste de la antigua hoja 977 (Cartagena) del MTN

Si se dispone de coordenadas en ambos sistemas de un vértice geodésico próximo

Disponiendo de las coordenadas geográficas en ambos sistemas de un vértice geodésico próximo al punto que se necesita transformar, podemos calcular las diferencias en longitud y latitud y aplicarlas a las coordenadas geográficas del punto. Siendo λ_V y φ_V las coordenadas geográficas datum ED50 y M_V y L_V las correspondientes al datum Madrid del vértice, haremos:

$$c_\lambda = \lambda_V - M_V$$

$$c_\varphi = \varphi_V - L_V$$

Estas diferencias se aplican a las coordenadas del punto:

$$\lambda_P = M_P + c_\lambda$$

$$\varphi_P = L_P + c_\varphi$$

Si se dispone de las coordenadas de las esquinas de la hoja del MTN

Disponiendo de las coordenadas geográficas de las esquinas de la hoja del Mapa Topográfico Nacional escala 1:50.000 (figura 5.3) en la que aparece el punto de interés, aplicaremos el procedimiento anterior empleando, en lugar del vértice, la esquina de la hoja más próxima al punto. Las hojas del MTN pueden encontrarse en la página web del Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es). Siendo λ_E y φ_E las coordenadas geográficas datum ED50 y M_E y L_E las datum Madrid de la esquina elegida de la hoja:

$$c_\lambda = \lambda_E - M_E$$

$$c_\varphi = \varphi_E - L_E$$

Las coordenadas del punto se calculan como en el caso anterior.

Estudio estadístico realizado por el Doctor Martín Asín

Este estudio figura en el libro *Geodesia y Cartografía Matemática* de Fernando Martín Asín. Para realizar la transformación hay que introducir la longitud del Observatorio Astronómico de Madrid (origen de longitudes del datum Madrid) referida al meridiano de Greenwich. Este valor es $\lambda_M = -3^\circ 41' 16,5''$.

Además, se proponen unas expresiones obtenidas de un estudio estadístico sobre la compensación en bloque de la red de vértices geodésicos. Para calcular las correcciones para el conjunto de puntos de la zona central y sur de la Península se pueden emplear las siguientes:

$$(c_\lambda)'' = 2,6620443 - 0,0036000 M_P + 0,0799200 L_P - 0,0000109 h + (\lambda_M)''$$

$$(c_\varphi)'' = 8,4386918 - 0,0367200 M_P - 0,0972000 L_P - 0,0000406 h$$

siendo M_P y L_P las coordenadas geográficas datum Madrid del punto, expresadas en grados, y h su altitud. La longitud λ_M debe expresarse en segundos. Las correcciones obtenidas c_λ y c_φ también se expresan en segundos y se aplican como en los casos anteriores.

5.5.2.- Cambio de sistema de referencia ED50 a ETRS89

En teoría, este cambio de datum podría llevarse a cabo recalculando las coordenadas de la red de vértices mediante una transformación conforme de siete parámetros (traslación, rotación y cambio de escala). En la práctica, sin embargo, el uso de métodos de medida distintos, criterios de ajuste diferentes, errores de medida, etc., provocan cambios de forma a lo largo de la red que hacen inviable este método. Una forma adecuada de realizar la transformación de coordenadas ED50 consiste en

considerar las distorsiones propias de cada zona, mediante un modelo que comprenda todo el territorio (España, en nuestro caso) de interés.

El RD 1071/2007 establece que los métodos para aplicar la transformación al nuevo sistema de las coordenadas referidas a los sistemas antiguos serán establecidos y hechos públicos por el Consejo Superior Geográfico en su página web.

En <http://www.ign.es/ign/layoutIn/herramientas.do> pueden encontrarse las siguientes herramientas:

- **Calculadora geodésica:** Transformación de puntos o ficheros de puntos de ED50 a ETRS89, tanto en coordenadas geográficas como en UTM, valores de ondulación del geoide y desviación de la vertical.
- **Rejilla de transformación de datum:** Herramienta oficial para la transformación de datum entre ED50 y ETRS89 en España, con una grado de acuerdo de sólo algunos centímetros en todo el territorio. Consta de dos rejillas, una para la península (PENR2009.gsb) y otra para Baleares (BALR2009.gsb). Están en formato NTV2 y contienen los incrementos en longitud y latitud entre estos dos datums.

Véase también: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>


6. SIG, TELEDETECCIÓN Y MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

6.1.- SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un SIG o *Sistema de Información Geográfica* (en inglés *GIS*, siglas de *Geographical Information System*) es una herramienta informática para el almacenamiento, visualización, gestión y análisis de información geográfica, es decir de información con una referencia geográfica dada. Antes de la aparición de los SIG la gestión de la información geográfica se realizaba mediante los mapas temáticos, esto es, con información sobre papel estática y de contenido limitado. Cada vez más se demanda el acceso a la información territorial de forma rápida, fiable y actual.

Para gestionar estos datos surgen los SIG, que asocian informáticamente y de forma conjunta la situación espacial de los elementos y la información temática (características de dichos elementos). Por tanto, un SIG tiene que trabajar a la vez con ambos tipos de información: espacial y temática. Estos sistemas tienen que ser capaces de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y presentar los resultados.

La información se almacena en capas temáticas, que pueden enlazarse geográficamente. Cada capa de información representa un aspecto del territorio: carreteras, red hidrográfica, viviendas, usos del suelo, etc. La información alfanumérica se almacena en forma de tablas, de manera individual o en conjuntos organizados (bases de datos). Las columnas se llaman campos (fields) y las filas registros (records). El diseño más habitual de una base de datos para SIG es el relacional, en el que los datos se almacenan en una colección de tablas vinculadas o enlazadas por sus campos en común (figura 6.1).



ID	AÑO	VEL_PROY	VEL_ESP	EMP	EXP
1	2006	120	120	DRAGADOS	GIASA
2	2003	120	120	FCC	GIASA
3	2005	120	120	ACS	GIASA
4	2005	120	120	OHL	GIASA
5	2002	120	120	FERROVIAL	GIASA

ID	PKO	PKF	TIPO_FIRME	ESP_TOTAL	TIPO_RO
1	0	120	Flexible	18	M-10
8	1	120	400 Semiflexible	16	M-10
9	1	400	610 Semirrígido	23	M-10
10	1	610	850 Rígido	8	M-10
11	1	850	953 Flexible	6	M-10
12	2	0	150 Semiflexible	18	M-10
13	2	150	200 Semirrígido	15	M-10

Fig. 6.1. Base de datos relacional

6.1.1.- Tipos de SIG

En función de la forma de almacenar los datos, podemos distinguir dos tipos: SIG vectoriales, que almacenan la información espacial fundamentalmente mediante líneas, y SIG ráster, que dividen el espacio en una cuadrícula regular.

SIG vectoriales

Los SIG vectoriales representan la geometría de las figuras digitalmente, mediante tres elementos geométricos:

- el punto, definido por sus coordenadas cartesianas
- la línea, definida por una sucesión de puntos

- el polígono, definido por una sucesión cerrada de líneas que rodean la superficie

El interés se centra, fundamentalmente, en la precisión de la situación espacial, definiendo fenómenos de límites bien establecidos. Cada uno de los elementos tendrá asociada una base de datos que describa los atributos de ese objeto (figura 6.2).

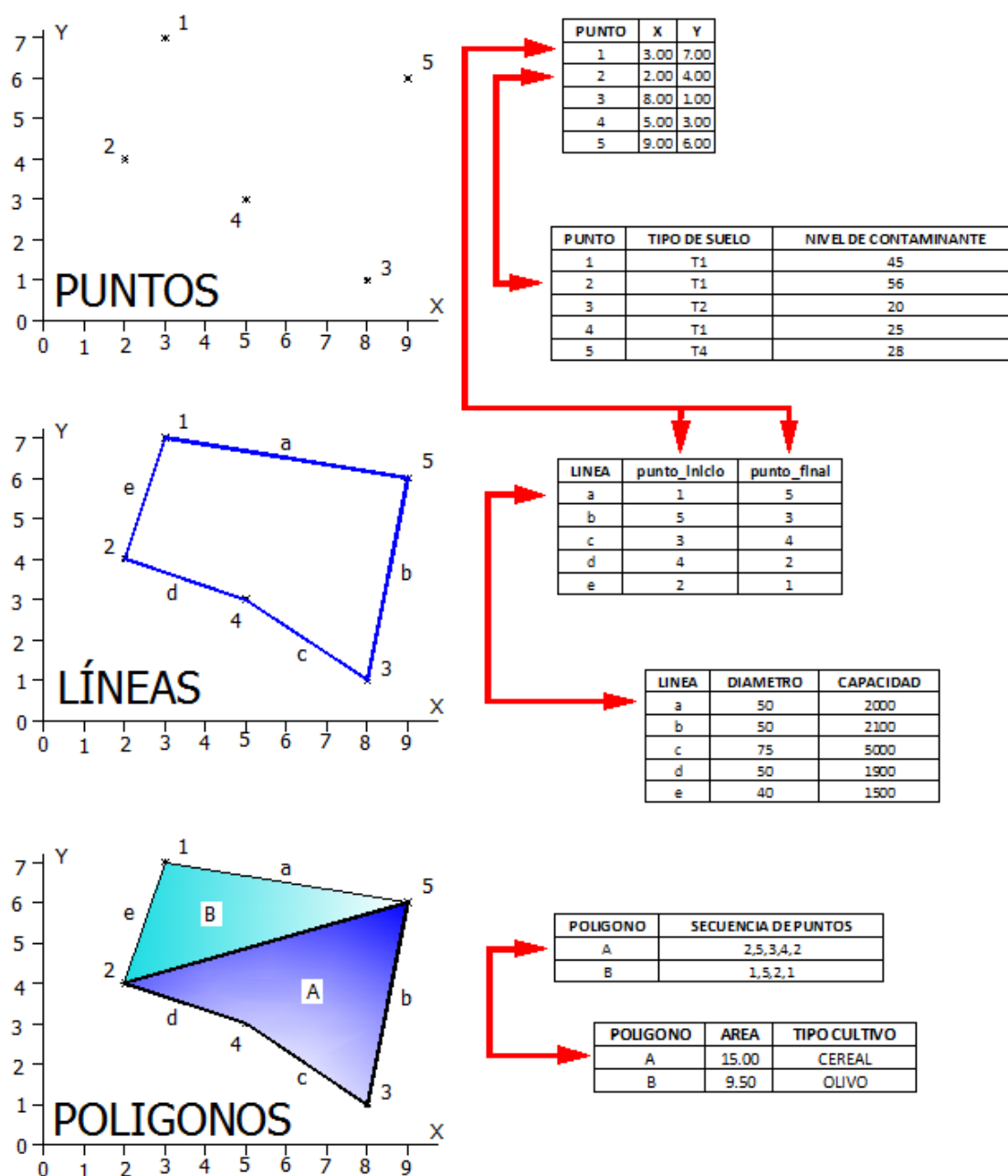


Fig. 6.2. Elementos geométricos de un SIG vectorial

Los SIG vectoriales son más adecuados cuando se representan objetos con límites bien establecidos, como pueden ser parcelas, caminos, etc. En este tipo de SIG se pueden establecer relaciones topológicas, que es el método usado para definir las relaciones espaciales entre los objetos que nos van a permitir realizar consultas conjuntas, tanto espaciales como temáticas.

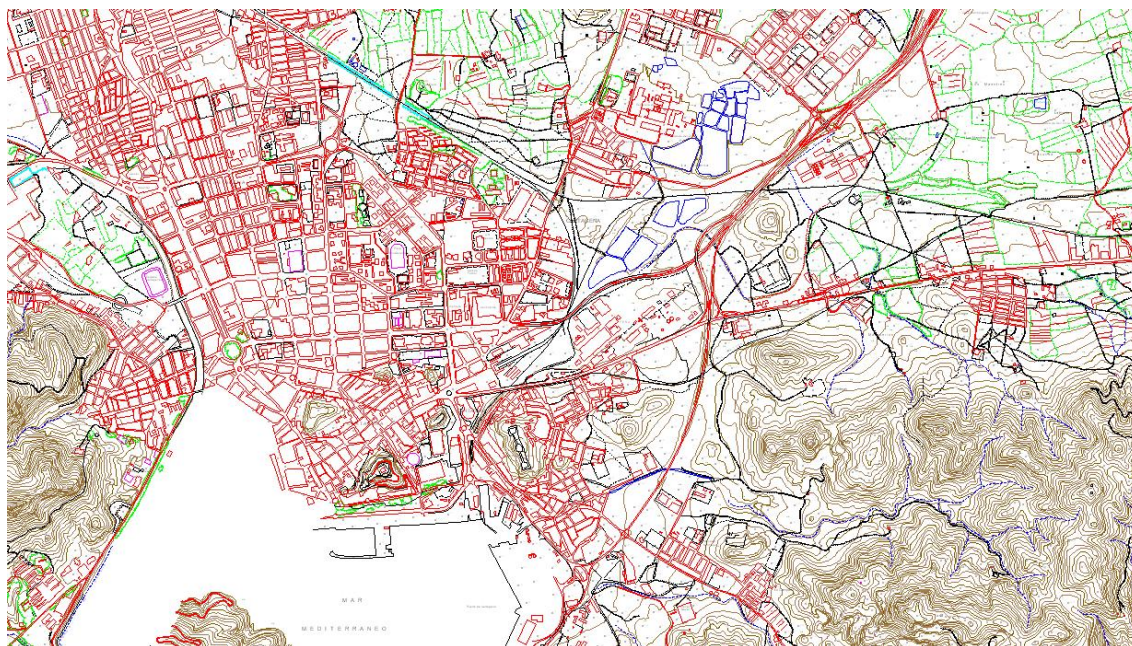


Fig. 6.3. Ejemplo de SIG vectorial: Mapa topográfico. Los elementos están representados mediante, puntos, líneas o polígonos cerrados. (Fuente: www.ign.es)



Fig. 6.4. Ejemplo de SIG vectorial: Mapa del SIOSE, Sistema de Información de Ocupación del Suelo. (Fuente: Ministerio de Medio Ambiente www.siose.es)

Un ejemplo de consulta podría ser: **Indícame cuál el camino más rápido entre dos puntos dados.** Para responder hay que conocer qué líneas están unidas (parte topológica), analizar sus longitudes y ver la velocidad límite en ellas (parte temática). Otro ejemplo: **Señala las parcelas que están junto al barranco de La Quintilla que tienen cultivo de cítricos y poseen un pozo de agua propio.** El análisis topológico consistiría en identificar las parcelas contiguas al elemento lineal

“barranco” y buscar los puntos que se encuentren dentro de esas parcelas. La parte temática sería buscar las parcelas con “cítricos” y los puntos con “pozo” que coincidieran con las anteriores.

SIG ráster

Los SIG ráster dividen el espacio en celdas cuadradas regulares, lo que, en esencia, es una imagen digital dividida en píxeles. Conociendo las coordenadas del centro de una de ellas y el tamaño de la malla regular se pueden calcular las coordenadas del resto y, por lo tanto, la imagen esta georreferenciada. La parte temática se resuelve asignando un valor numérico a cada celda.

El modelo ráster es de aplicación cuando hay que definir información asociada a zonas con límites difusos, como niveles de contaminación. Para definir espacialmente los objetos con precisión es necesario que las celdas sean lo más pequeñas posibles, lo que nos llevará a una resolución alta y por tanto un aumento de memoria, por lo que necesitaremos de más potencia computacional para tratar dicha información.

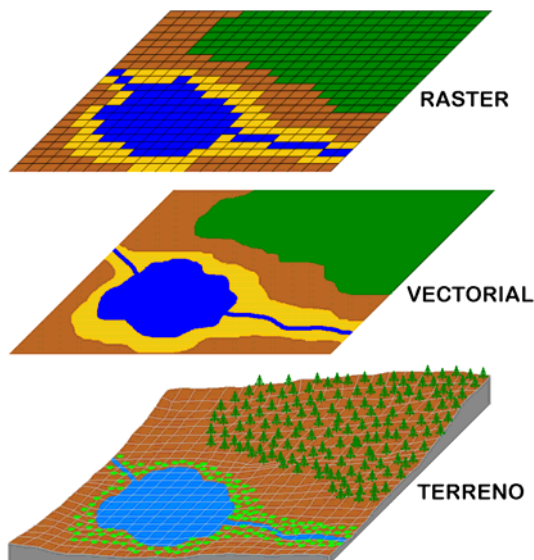


Fig. 6.5. Tipos de SIG

Algunos ejemplos de datos ráster pueden ser: fotos aéreas, modelos de elevaciones del terreno, temperaturas, usos del suelo, pluviometría, etc.

Los análisis o consultas que se pueden realizar con este tipo de SIG se solucionan superponiendo imágenes, es decir comparando diferentes valores temáticos en el mismo espacio (en las mismas celdas). Se trata de consultas como: **Selecciona las zonas cuyo uso del suelo sea bosque y que se encuentren por encima de 500 metros sobre el nivel del mar.**

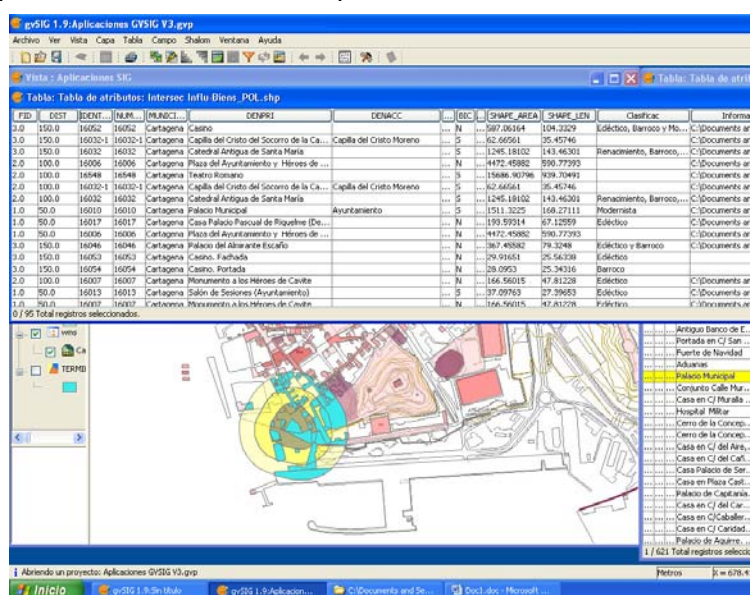
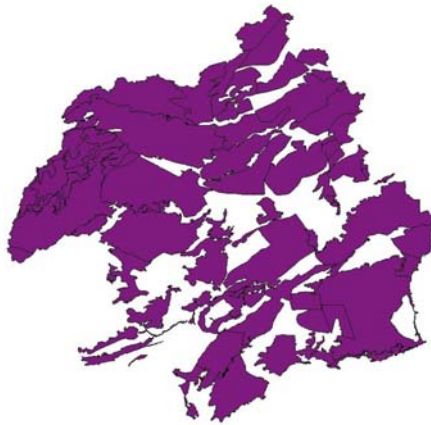
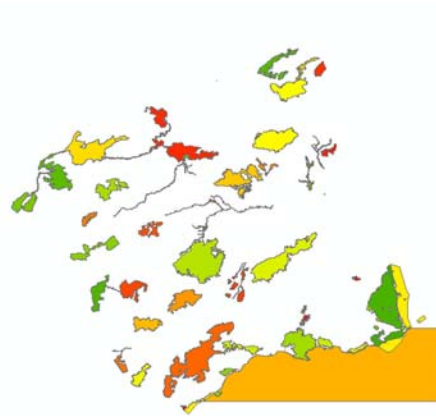


Fig. 6.6. Captura de pantalla de un SIG

Entre las herramientas SIG disponibles existen muchas que son capaces de manejar simultáneamente información de los dos tipos, ráster y vectorial.



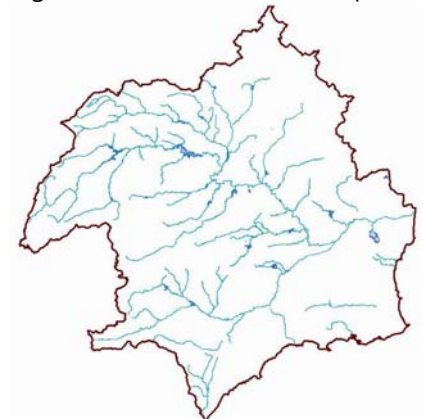
Cuencas de aguas subterráneas (VECTORIAL)



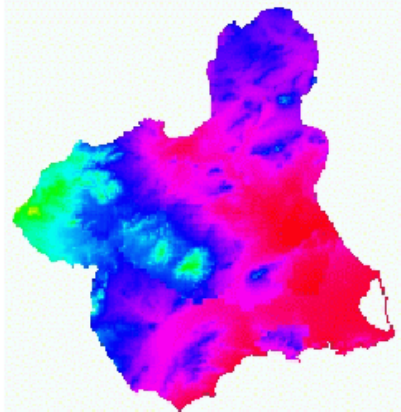
Lugares de Interés Comunitario (RSTER)



Modelo Digital de Elevaciones (RÁSTER)



Cuenca hidrográfica y red fluvial (VECTORIAL)



Mapa de temperaturas medias (RÁSTER)

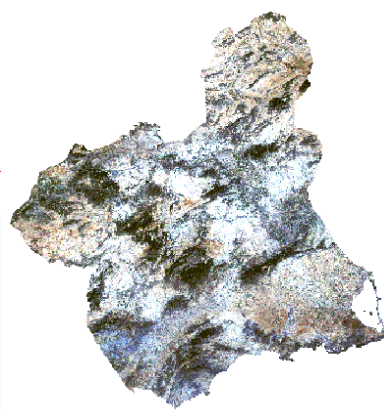


Imagen de teledetección (RÁSTER)

Fig. 6.7. Diversos ejemplos de información vectorial o ráster de la región de Murcia

La figura 6.7 muestra varios ejemplos de información vectorial y ráster. Nótese que los dos primeros ejemplos pueden ser de uno u otro tipo según estén definidos mediante polígonos o píxeles respectivamente.

6.2.- TELEDETECCIÓN

Llamamos *Teledetección* al conjunto de técnicas destinadas al estudio de la superficie terrestre a partir de información obtenida a distancia. El término engloba no

solo las técnicas de obtención de información, sino también las que se emplean para el procesamiento posterior de dicha información.

Al no existir contacto directo entre el objeto estudiado y el sensor que recoge la información, es necesaria la intervención de un elemento intermedio que sirva de transmisor de ésta. En Teledetección se emplea la energía electromagnética, cuya interacción con la materia puede ser cuantificada.

6.2.1.- Sistemas empleados

Los *sistemas pasivos* no emiten energía electromagnética, sino que registran la reflejada por los objetos que se pretende estudiar. Los sistemas que son a la vez emisores y receptores de energía electromagnética se denominan *sistemas activos*.

Se emplean distintos tipos de plataformas:

- **Plataformas terrestres:** camiones, globos cautivos, etc.
- **Plataformas aéreas:** aviones, globos estratosféricos, etc.
- **Plataformas espaciales:** satélites espaciales

Los satélites son de aplicación en la mayoría de los casos, siempre que se pueda trabajar con escalas pequeñas. Presentan dos ventajas importantes: la gran distancia de la plataforma a la Tierra permite una visión global de los fenómenos de interés; además, al seguir órbitas fijas, cada cierto tiempo se repiten las tomas sobre los mismos puntos, permitiendo un seguimiento temporal del fenómeno en estudio. Pueden ser:

- **Geoestacionarios:** Se sitúan en órbitas ecuatoriales. Acompañan a la Tierra en su movimiento de rotación, manteniéndose siempre sobre un punto determinado de la superficie terrestre. Debido a su gran altura, su resolución espacial es pequeña.
- **Heliosíncronos:** Siguen órbitas aproximadamente polares, calculadas de forma que el paso de cada órbita del satélite por un punto de la Tierra ocurre a la misma hora.

Entre los satélites más utilizados están: LANDSAT, SPOT, HCMM, METEOSAT, NOAA, ERS-1, ASTER, IKONOS, etc.

6.2.2.- El espectro electromagnético

La energía emitida por el Sol llega a la Tierra e interacciona con la materia, siendo reflejada o absorbida selectivamente en función de la frecuencia, tanto por los elementos situados en la superficie terrestre como por los distintos constituyentes de la atmósfera. En la figura 6.8 se esquematiza el espectro electromagnético con sus distintas zonas y las denominaciones que reciben.

La zona situada entre $0,35$ (visible) y $20\mu\text{m}$ (infrarrojo térmico) es la empleada por los sistemas pasivos. La zona entre $100\mu\text{m}$ y 10cm (microondas) se emplea con los sistemas activos. Para las zonas del espectro correspondientes a las frecuencias más altas, rayos cósmicos y rayos X, la atmósfera resulta prácticamente impenetrable. Para los rayos

ultravioleta la atmósfera se comporta como una capa más o menos opaca, dependiendo de la cantidad de ozono que se encuentra en la estratosfera.

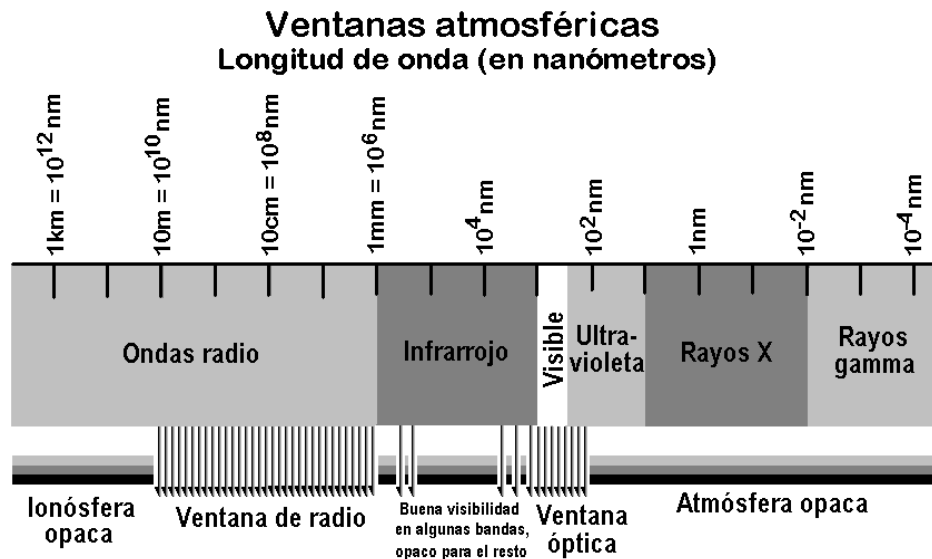


Fig. 6.8. El espectro electromagnético

Para la zona visible del espectro el mayor inconveniente radica en la presencia de vapor de agua suspendido en la atmósfera. Para el infrarrojo próximo y el térmico existen bandas de buena visibilidad. Finalmente, para la parte inferior del espectro la Tierra actúa como un cuerpo negro.

Los dos principales efectos negativos para Teledetección que sufre la radiación al atravesar la atmósfera son la *dispersión* y la *absorción* (figura 6.9). El primero provoca una difusión de la radiación directa causada por las moléculas gaseosas de la atmósfera. Debido al segundo la energía electromagnética es absorbida por los componentes de la atmósfera, impidiendo que se transmita y pueda ser captada. El resultado de estos dos efectos es una atenuación de la señal recibida, que puede ser tan importante en algunas de las bandas del espectro que hace que estas bandas sean inútiles para teledetección.

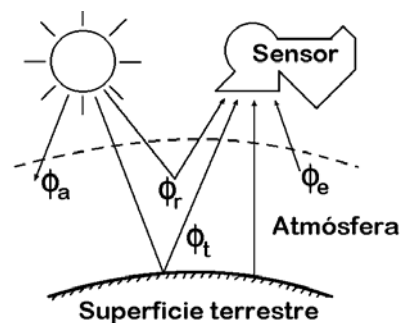


Fig. 6.9. Interacción de la radiación con la atmósfera

6.2.3.- Tratamiento digital de imágenes; aplicaciones

Una imagen está constituida por celdas cuadradas (pixels) y la información consiste en uno o varios valores numéricos, que caracterizan la respuesta del terreno correspondiente a cada pixel ante la radiación electromagnética en una o varias zonas del espectro.

Normalmente, interesará que las imágenes estén *georreferenciadas*, es decir referidas a alguno de los sistemas de coordenadas empleados habitualmente. La georreferenciación se realiza dando las coordenadas reales, en el sistema elegido, de una serie de puntos (pixels) claramente identificables en la imagen. Además, la información

numérica puede tratarse digitalmente con ayuda de un ordenador, realizando operaciones como:

- filtrado, realce, suavizado, etc.
- composición de colores
- técnicas de clasificación
- análisis de componentes principales
- elaboración de índices
- combinación de imágenes obtenidas por distintos satélites

Muchas son las aplicaciones prácticas de las imágenes digitales obtenidas en Teledetección. Entre ellas podemos citar:

- aplicaciones meteorológicas
- cartografía a pequeña escala
- medio ambiente
- oceanografía
- agricultura; geografía agraria
- usos del suelo; densidad de población, etc.
- aplicaciones didácticas

En geología y minería:

- la detección de estructuras geológicas se facilita con ayuda de imágenes satélite, tales como las de Radar de Apertura Sintética (SAR), debido a su geometría de vista lateral
- en regiones áridas y semiáridas, donde la cubierta vegetal es escasa, los datos hiperespectrales, con el apoyo de la biblioteca espectral de minerales puros, se han aplicado con éxito para la identificación de minerales y el mapeo de la abundancia de los mismos

6.3.- MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

Un *Modelo Digital del Terreno* (MDT) es una estructura numérica que representa determinadas características de la superficie del terreno (pendientes, orientaciones, etc.) relacionadas con la posición geográfica de los puntos que lo constituyen y con su altitud. La base de un MDT es un *Modelo Digital de Elevaciones* (MDE) que representa la distribución geográfica de la altitud del terreno.

Existen distintos formatos para gestionar numéricamente la información altimétrica. Los más habituales son:

- Curvas de nivel: Cada curva está constituida por pares de puntos cuya posición está definida por sus coordenadas X, Y y cuya coordenada Z es la misma para todos ellos.
- Red irregular de triángulos: La superficie real del terreno se sustituye por una serie de triángulos, cuyos vértices son puntos conocidos y

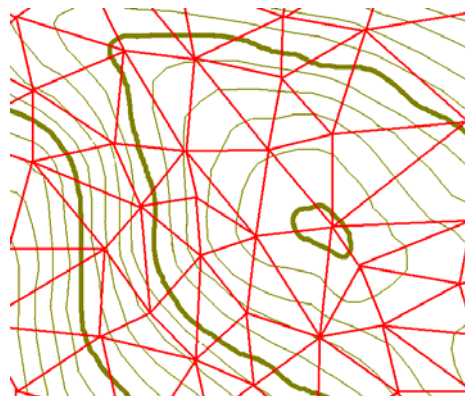


Fig. 6.10. Curvas de nivel y red irregular de triángulos

definidos por sus coordenadas X , Y y Z . La malla de triángulos puede adaptarse al terreno con más o menos detalle, dependiendo de la complejidad del mismo y de la información disponible.

- **Modelo ráster:** Basado en una estructura matricial similar a la que hemos visto en los SIG. El terreno se divide en celdas cuadradas regulares, cada una identificada por las coordenadas planas de su centro, X e Y . En este caso, la variable numérica a considerar es la altitud Z propia de cada celda, que tomará un valor medio de las de los correspondientes puntos del terreno.



Fig. 6.11. MDE ráster, zona de Cartagena (fuente: IGN)

6.3.1.- Generación de un MDE

La información necesaria para construir un MDE está constituida por las coordenadas X , Y y Z de una serie de puntos, tan densa como requiera la precisión del modelo y que debe representar adecuadamente al terreno. Los modelos ráster suelen generarse por interpolación, estimando el valor de la coordenada Z en cada celda a partir de las de los puntos conocidos más próximos.

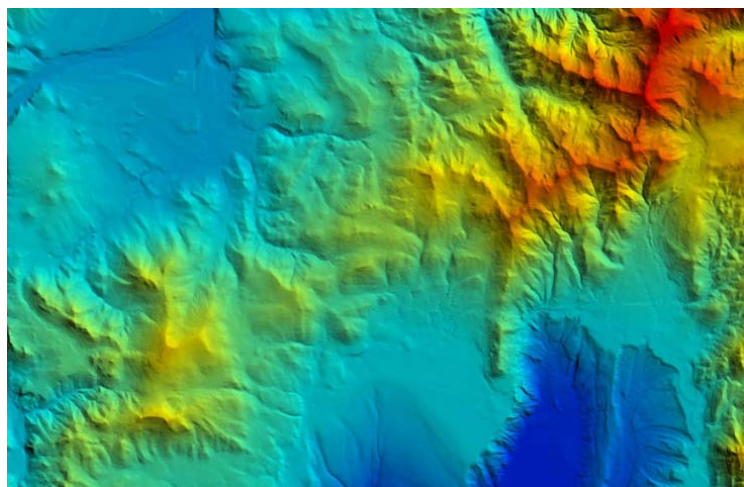


Fig. 6.12. MDE ráster (fuente: Satellite Imaging Corporation)

La información de base puede obtenerse:

- digitalizando información cartográfica previamente existente
- a partir de un levantamiento topográfico convencional
- a partir de un levantamiento por GPS
- mediante Fotogrametría
- mediante Teledetección (interferometría rádar)

6.3.2.- Aplicaciones de los MDT

En proyectos mineros es muy habitual trabajar con modelos numéricos tridimensionales de la zona del subsuelo estudiada, de manera que ésta queda dividida en bloques a los que se asigna por interpolación los valores de las variables de interés geológico-minero (véase 15.3.2). La topografía superficial se representará en un MDE, basado en una estructura de celdas orientada como la de bloques y que será un submúltiplo de ella.

En el diseño de una mina a cielo abierto, el MDE nos permitirá emplear algoritmos automáticos de optimización del vaso de explotación. Estos algoritmos trabajan a partir del cálculo automático de volúmenes de mineral y de estéril que implica cada posible diseño, por cómputo de los bloques incluidos en él y teniendo en cuenta su interacción con la topografía superficial.

Estos modelos también se emplean para la cubicación automática de los avances realizados en explotaciones a cielo abierto. El proceso consiste en determinar las diferencias entre la situación del modelo en dos momentos determinados.

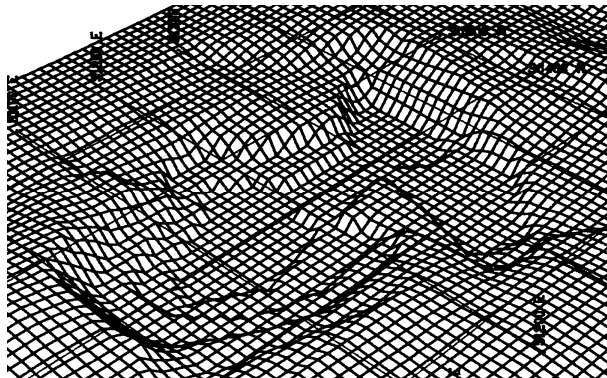


Fig. 6.13. Representación en perspectiva del MDE ráster de una explotación minera

Como aplicaciones de los MDT, y sin ánimo de ser exhaustivos, también podemos citar las siguientes:

- realización de análisis estadísticos sobre variables del terreno, como la altitud, la pendiente, etc.
- en los SIG, para cualquier aplicación en la que intervenga la altimetría
- generación de modelos hidrológicos: trazado de líneas de flujo, determinación de cuencas fluviales, etc.
- modelos de visibilidad: para la ubicación de infraestructuras y para el diseño de sistemas de control
- modelos climáticos: determinación de los valores de variables climáticas dependientes del relieve (como la insolación) y estimación de los de otras derivadas (vegetación, etc.)