



ConCoor

Utilidad para la
Conversión de ***Co***ordenadas
entre los sistemas
ED50 y ETRS89



Consejería de Obras Públicas y Transportes

Instituto de Cartografía de Andalucía

ConCoor

Utilidad para la
Conversión de ***Co***ordenadas
entre los sistemas
ED50 y ETRS89

Consejería de Obras Públicas y Transportes
Instituto de Cartografía de Andalucía

Patio de Banderas no 14
Sevilla 41.004

Tel: 95 057600
Fax: 954219024

<http://www.copt.junta-andalucia.es/ica>

Grupo de Investigación en Ingeniería Cartográfica
Escuela Politécnica Superior
Universidad de Jaén

C/ Virgen de la Cabeza nº 2
E-23.071-Jaén

Tel: 953 00 24 69
Fax: 953 01 23 43

http://www.ujaen.es/dep/ingcar/Investigacion/Grupo_inv_Ing_Cartografica/

ÍNDICE

INDICE.....	3
ADVERTENCIA LEGAL.....	5
INTRODUCCIÓN.....	7
RECURSOS REQUERIDOS E INSTALACIÓN.....	7
VISIÓN GENERAL.....	8
EJECUCIÓN	9
PÁGINA DE ENTRADA.....	9
VENTANA PRINCIPAL	9
PROCESO DE TRABAJO.....	10
Determinación del sistema de partida.....	11
Determinación del sistema de llegada	11
Introducción de datos.....	12
Carga de ficheros de datos.....	13
Introducción manual de datos.....	14
Edición de datos.....	15
Eliminación de puntos	15
Parámetros de la transformación	15
Ejecución de la Transformación	17
Visualización de resultados	18
Listado de coordenadas	18
Mapa de situación.....	19
Metadatos.....	20
Archivo de resultados	21
CONVERSIÓN DE FICHEROS GRÁFICOS	21
SALIR DEL PROGRAMA	22
AYUDA.....	22
ACERCA DE.....	22
FORMATO DE LOS FICHEROS DE PUNTOS DE ENTRADA / SALIDA	23
BASE DE DATOS DE VÉRTICES	24
ELEMENTOS TÉCNICOS DEL PROGRAMA	25

ANEJOS	27
SISTEMAS DE REFERENCIA	28
Sistema de coordenadas geográficas	29
APROXIMACIONES A LA FORMA DE LA TIERRA	31
El Geoide	32
DATUMS LOCALES Y REGIONALES	35
Marcos internacionales de referencia terrestre	36
Transformaciones entre marcos de referencia	37
SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS).....	38
Posicionamiento GPS en código.....	39
Posicionamiento GPS en fase	40
Resumen de métodos y Precisiones GPS	41
PROYECCIONES	42
Proyección UTM	43
TRANSFORMACIONES	45
Traslación	45
Cambio de escala	46
Transformación de similaridad	46
Transformación afin bidimensional	47
Transformación de Molodenski	47
Transformación 3D de 7 parámetros	47
Polinomios de segundo orden y superior	48
Consideraciones generales sobre los métodos de transformación polinómica.....	48
BIBLIOGRAFÍA Y RECURSOS	50

ADVERTENCIA LEGAL

PARA USO PERSONAL

Este es un acuerdo legal entre usted, el usuario, y el Instituto de Cartografía de Andalucía en relación al uso del programa ConCoor. Si usted instala, copia y/o usa este programa, muestra su aceptación a este contrato en todos sus términos. Si no está de acuerdo, no instale ni use este programa.

El programa ConCoor se suministra sin coste, y el Instituto de Cartografía de Andalucía (ICA) le concede permiso de uso personal, no exclusivo, para su instalación y uso.

El programa, y cualquier material suministrado en este paquete, no podrán ser modificados de manera alguna. Usted no podrá distribuir este programa sin permiso escrito del ICA. Usted no podrá colgar este programa en ningún sitio de la red destinado a programas de tipo *freeware* o *shareware* sin permiso escrito del ICA.

Ninguna parte del programa, ni de los ficheros que se proveen en el paquete, podrán ser reproducidos en parte, ni en su totalidad. Usted no podrá eliminar ningún *Copyright* o cualquier otra indicación de propiedad y autoría del programa. Usted no podrá decompilar o desensamblar el programa, ni emplear cualquier otro mecanismo de ingeniería inversa.

SOBRE EL *COPYRIGHT*

Este programa está registrado *Copyright* © 2003, por el Grupo de Investigación en Ingeniería Cartográfica de la Universidad de Jaén, quedando protegido por las leyes nacionales e internacionales.

ADVERTENCIA

Este programa se facilita tal y como es. Usted acepta esta condición cuando acepta esta licencia de uso. Usted expresa su reconocimiento de esta circunstancia desde el momento en que lo copia, lo instala o lo usa. Igualmente, Usted reconoce que el uso de este programa lo realizará por su cuenta y riesgo, no pudiendo exigir ninguna responsabilidad a sus autores ni al Instituto de Cartografía de Andalucía.

Ni el Instituto de Cartografía de Andalucía, ni los autores del programa dan garantía de ningún tipo, ni explícita ni implícita, ni para el programa, ni para cualquier documentación que lo acompañe, incluyendo, pero sin limitar, cualquier tipo de garantía implícita por comercio o para un uso determinado.

Bajo ningún concepto o causa, ni el Instituto de Cartografía de Andalucía, ni los autores del programa, podrán ser culpados por cualquier tipo de daño (incluyendo daños por pérdida de beneficios de negocio, interrupción del negocio, pérdida de información, pérdidas económicas, o cualquier consecuencia negativa) que se derive del uso del programa o de sus resultados, aún cuando el ICA o sus autores hayan sido avisados de la posibilidad de esos daños.

MARCAS:

Cualquier producto o marca mencionado en este programa o en sus manuales, documentos o ficheros asociados, se reconocen como marcas o registros de marcas de sus propietarios.

NOTA FINAL:

USTED RECONOCE QUE HA LEIDO ESTE ACUERDO, QUE LO ENTIENDE, QUE ESTÁ DE ACUERDO CON TODOS SUS TÉRMINOS Y CONDICIONES. USTED RECONOCE QUE ESTE ACUERDO POSEE CARÁCTER EJECUTIVO Y EXCLUSIVO PARA ESTA RELACIÓN, Y QUE ANULA CUALQUIER PROPUESTA O ACUERDO PREVIO, ORAL O ESCRITO, O CUALQUIER OTRA COMUNICACIÓN ENTRE LAS PARTES RELACIONADA CON LA MATERIA OBJETO DE ESTE ACUERDO.

ConCoor se facilita como un programa libre por lo que es un producto sin soporte.

No obstante, si usted desea, o necesita de soluciones y soporte geodésico, contacte con el Instituto de Cartografía de Andalucía en la siguiente dirección:

Instituto de Cartografía de Andalucía
Patio de Banderas no 14
Sevilla 41.004
Tel: 95 057600
Fax: 954219024
<http://www.copt.junta-andalucia.es/ica>

INTRODUCCIÓN

El proceso de integración europea y, en general, de globalización, junto con la posibilidad de aplicar a la cartografía técnicas espaciales como el GPS, establecen la necesidad de cartografías unificadas y con continuidad. Para ello se hace indispensable el conversión de las coordenadas expresadas en los marcos establecidos por los sistemas geodésicos nacionales a otros marcos más generales como el WGS84 o el ETRF89.

El programa ConCoor es una aplicación informática diseñada para favorecer este proceso de conversión de la coordenadas entre el sistema propio de la cartografía oficial, sistema ED50, y el sistema ETRF89. Con ello se pretende dos objetivos básicos; por un lado, favorecer la integración cartográfica que se apuntaba en el párrafo anterior, y por otro, con una perspectiva más práctica, poner a disposición de los andaluces una herramienta que, en sus necesidades particulares, les facilite el paso, en ambos sentidos, entre los sistemas ED50 y ETRF89.

Este Manual pretende mostrar la manera de uso y capacidades del programa ConCoor, para ello se atiende fundamentalmente a presentar el proceso de trabajo y las peculiaridades técnicas del programa. Como complemento al propio Manual se ha incluido un anejo con contenidos teóricos donde, de una manera sucinta, se explican algunos de los elementos y conceptos que fundamentan las aplicaciones geodésicas y cartográficas sobre las que se basa el propio programa.

RECURSOS REQUERIDOS E INSTALACIÓN

Este programa para su instalación requiere que el sistema operativo base sea Windows (95, 98, 2000, Me, XP). ConCoor no tiene requerimientos de memoria o almacenaje significativos, por lo que puede ejecutarse en cualquier ordenador personal, sin preocupación de limitación de memoria o disco.

Para su ejecución utiliza los siguientes recursos del sistema:

- ▢ ADVAPI32.DLL
- ▢ GDI32.DLL
- ▢ KERNEL32.DLL
- ▢ MFC42.DLL
- ▢ MSVBVM50.DLL
- ▢ MSVCRT.DLL
- ▢ OLE32.DLL
- ▢ OLEAUT32.DLL
- ▢ USER32.DLL

Junto a los anteriores recursos, que suelen estar disponibles en todos los sistemas basados en Windows, se requiere el fichero Transformacion.OCX.

Como cualquier otro programa de Windows, la instalación del programa ConCoor puede hacerse mediante su utilidad de instalación. No obstante, dado que este programa no requiere muchos recursos específicos, su instalación también puede hacerse copiando los ficheros:

- Concoor.exe
- Transformacion.OCX

- AyudaConCoor.pdf¹

en un directorio cualquiera de su ordenador. En este caso se recomienda que le cree un acceso directo.

Junto a los ficheros anteriores también se distribuyen dos ficheros de ejemplo cuyo interés se centra en conocer los formatos de entrada, entre estos ficheros de ejemplo están:

- ▢ ejemplo_geodesicas.txt
- ▢ ejemplo_utm.txt

También se incluye un fichero DXF que se corresponde con la distribución de las hojas del MTN50 en Andalucía.

VISIÓN GENERAL

El programa ConCoor es una utilidad orientada a la transformación de coordenadas entre los distintos sistemas cartográficos actuales que se utilizan para la expresión de aquellas.

Dado que el marco de referencia de la cartografía oficial es el Datum Europeo de 1950 (ED50) y que la tendencia, debido al uso del sistema GPS, y a los avances en la determinación de la forma de la Tierra, es el uso de marcos como el WGS84, este programa se ha pensado para facilitar a los usuarios de cartografía el paso del sistema ED50 al ETRS89 (*European Terrestrial Reference System* año 89) y viceversa

Junto a la posibilidad de cambio de marco de referencia también se facilita el cambio entre distintos sistemas de coordenadas (UTM, cartesianas y geográficas). Por tanto, otra finalidad del programa es la transformación entre estos sistemas de coordenadas, sin efectuar ninguna transformación entre marcos de referencia y por tanto sin cálculo de parámetros de transformación.

El soporte de estas transformaciones se encuentra en la Geodesia. Al respecto, ConCoor incorpora las transformaciones conocidas como Helmert 3D, o de siete parámetros, y la transformación de Molodensky. Para los casos en que el usuario considere su uso adecuado, también se incluye la transformación Afin 2D. Las transformaciones pueden realizarse mediante: a) el uso de parámetros globales, adecuados para el centro y sur peninsular, b) de parámetros optimizados para Andalucía, o c) de parámetros optimizados localmente. En este último caso, dado el conjunto de puntos a transformar, se determina una vecindad de puntos de la Red REGENTE que son los que han de alimentar el sistema de cálculo minimocuadrático para derivar los parámetros de la transformación.

El sistema gestiona la transformación de puntos introducidos por teclado o por ficheros de tipo ASCII. También se posibilita la transformación completa, punto a punto, de ficheros gráficos de tipo DXF.

¹ Para acceder a la ayuda que se suministra con ConCoor se necesita la instalación previa del programa Adobe Acrobat Reader.

Los resultados de la transformación se pueden almacenar en ficheros ASCII o DXF, si la entrada era por teclado o por fichero, o exclusivamente en formato DXF, si se utilizó este mismo formato para la entrada.

ConCoor dispone de un visualizador geográfico que permite ver la zona de interés marcada por los puntos de entrada y que también permite visualizar los vértices de la Red Regente utilizados en el cálculo de parámetros para transformaciones locales.

ConCoor no incorpora ningún modelo de geoide para Andalucía.

Para conservar el conocimiento de las transformaciones realizadas sobre un conjunto de datos, ConCoor genera un fichero ASCII autoexplicativo de metadatos que registra los aspectos más importantes para conocer el linaje de los resultados del proceso de transformación.

EJECUCIÓN

La ejecución del programa se consigue con un doble click sobre el icono del mismo, como en cualquier programa basado en Windows.

PÁGINA DE ENTRADA

Tras la demanda de ejecución aparece la página de entrada que se muestra en la Figura 1. Para pasar al proceso de datos se debe pulsar el botón *ENTRAR* con el ratón.



Figura 1.- Página de entrada al programa

VENTANA PRINCIPAL

ConCoor se organiza en torno a una ventana principal en la que se presentan y organizan todas las opciones de trabajo y cálculo. La Figura 2 presenta una visión de la misma.

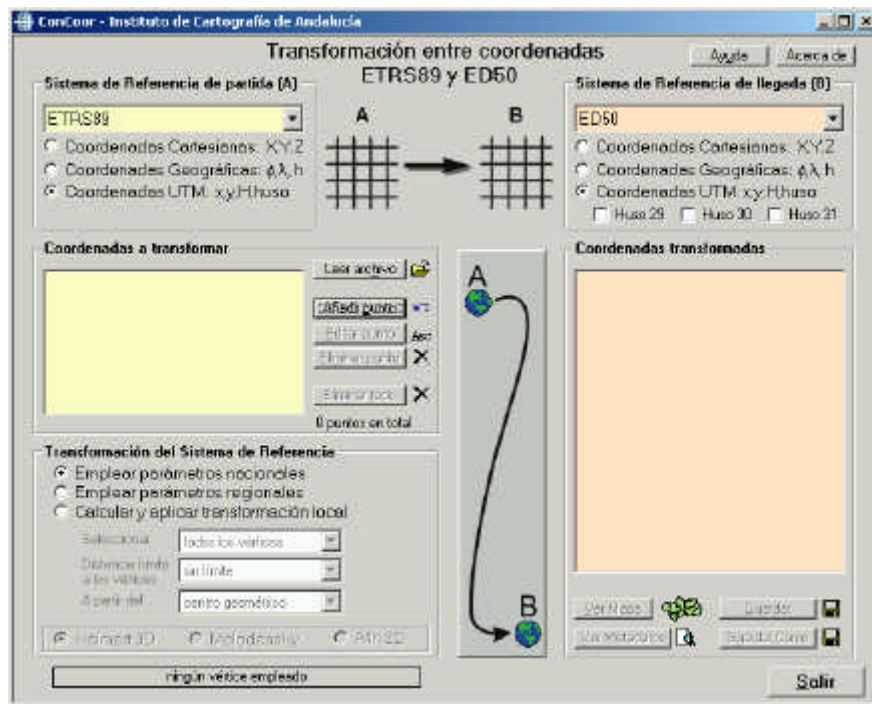


Figura 2.- Ventana principal ConCoor

Básicamente esta ventana se organiza en las siguientes secciones:

- Sección para la selección del sistema de referencia de partida (A) como de llegada (B) y sus correspondientes sistemas de coordenadas.
- Sección de entrada de datos a transformar.
- Sección para la selección del método de transformación y parámetros a usar.
- Sección de resultados: presentación gráfica, literal, y archivo de datos.

Junto a las secciones anteriores, la ventana principal posee botones para entrar en la ayuda (AYUDA), ver los créditos del programa (ACERCA DE), para la ejecución (A→B) y salir del mismo (SALIR).

En la parte inferior izquierda muestra una línea de comentarios enmarcada.

PROCESO DE TRABAJO

El proceso de trabajo con ConCoor es el siguiente:

- Selección del marco propio de los datos de partida y de su sistema de coordenadas.
- Selección del marco deseado para los resultados y de su sistema de coordenadas.
- Introducción de datos, por teclado o desde ficheros.
- Selección de método de transformación y parámetros de la transformación.
- Ejecución de la transformación.
- Visualización de los resultados.
- Archivo de los resultados.

A continuación se comenta el proceso.

Determinación del sistema de partida

Esta gestión se realiza en el marco de la ventana principal denominado *Sistema de Referencia de partida (A)* (Figura 3).

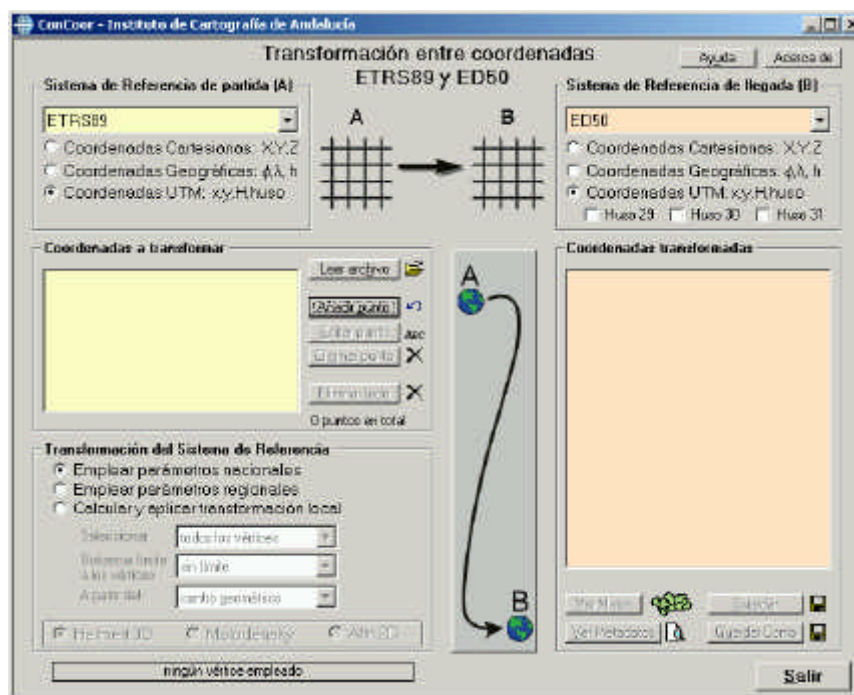


Figura 3.- Determinación del Sistema de partida. Ubicación en la ventana principal

Esta determinación se realiza eligiendo el marco geodésico de partida (ED50 o ETRS89) en la ventana de opciones de la parte izquierda, que en muestra un sombreado amarillo. Con la lista de opciones se determina el marco geodésico de partida (ED50 o ETRS89), y con los botones de opción el sistema de coordenadas de los datos de origen (cartesianas, geográfica ó UTM). Al elegir un sistema de coordenadas concreto, en la parte central de esta sección, indicada como A, aparecerá alguno de los símbolos que se presentan en la Figura 4.

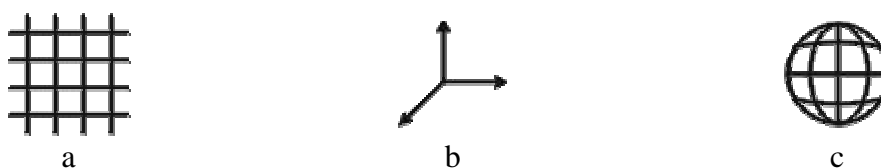


Figura 4.- Iconos evocadores del sistema de coordenadas: a) Sistema Coordenadas UTM, b) Sistema Coordenadas Cartesiano, c) Sistema Coordenadas Geográficas

Determinación del sistema de llegada

La gestión se realiza en el marco la ventana principal denominado *Sistema de Referencia de llegada* (Figura 5).

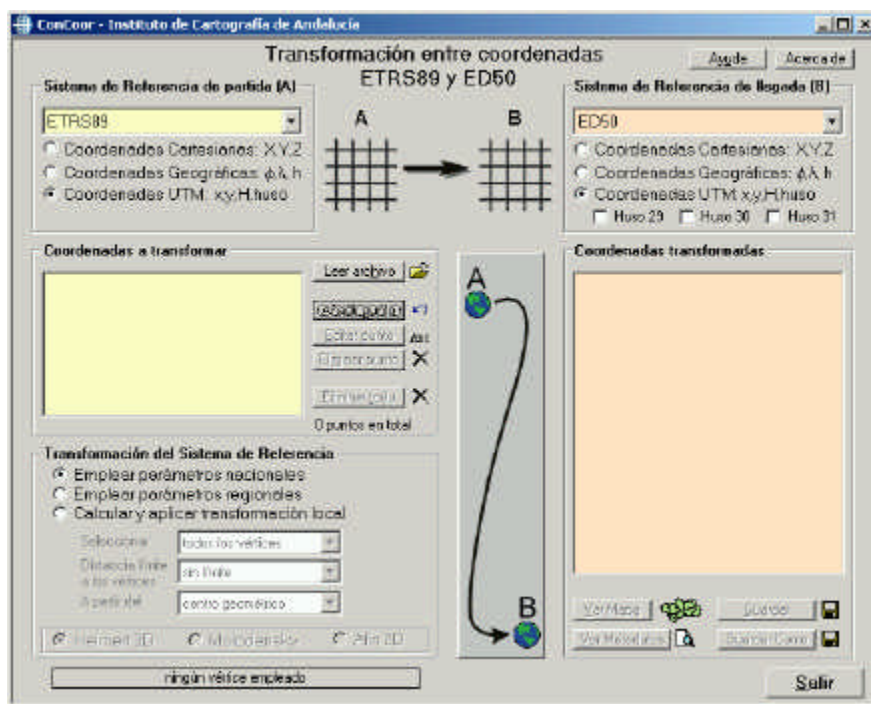


Figura 5.- Determinación del Sistema de Llegada. Ubicación en la ventana principal

La selección del marco geodésico de los resultados, o de llegada, (B), se realiza sobre la ventana de opciones de la parte derecha, que en este caso muestra un sombreado asalmonado. Con la lista de opciones se determina el marco geodésico de llegada (ED50 o ETRS89), y con los botones de opción el sistema de coordenadas para los datos de salida (cartesianas, geográfica ó UTM). Al elegir un sistema de coordenadas concreto, en la parte central de esta sección, indicada como B, aparecerá algunos de los símbolos que se presentaban en la Figura 4.

En el caso de que se elija como sistema de coordenadas de llegada la proyección UTM, ConCoor también permite forzar la conversión de coordenadas a los husos 29, 30 ó 31. Esto se indica marcando el huso deseado para la coordenadas de salida en los botones de opciones de esa sección.

Introducción de datos

La introducción de datos se realiza en la sección de la ventana principal *Coordenadas a transformar* (Figura 6). Las opciones son leer un archivo de puntos o añadir puntos mediante teclado. Si se utilizan archivos de puntos, deberán adherirse a los formatos que se indican en el apartado de esta ayuda denominado: *Formato de los Ficheros de Puntos de Entrada / Salida*.

Es importante reseñar que el programa está diseñado para efectuar las transformaciones de puntos del territorio andaluz, por lo que señalará los puntos que no cumplen esta condición, añadiendo el símbolo "#" a cada uno de ellos en el listado de coordenadas a transformar, justo en el instante en que se demande la ejecución de la transformación.

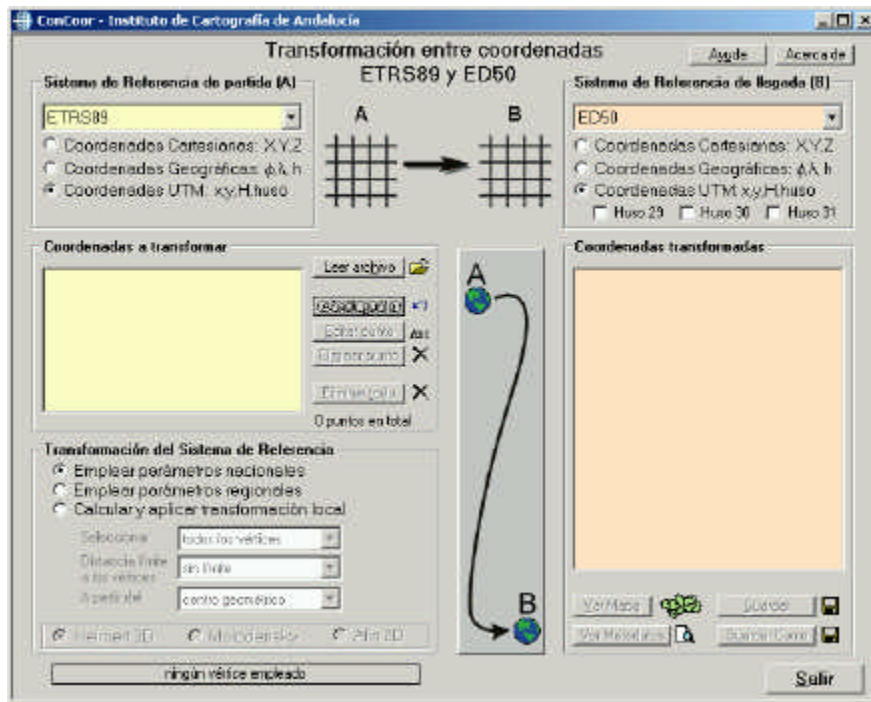



Figura 6.- Introducción de coordenadas a transformar. Ubicación en la ventana principal

Carga de ficheros de datos

La selección de datos desde fichero se realiza pulsando el botón de *LEER ARCHIVO* , que da acceso a una ventana convencional de *ABRIR* del sistema operativo Windows como la que muestra la Figura 7.

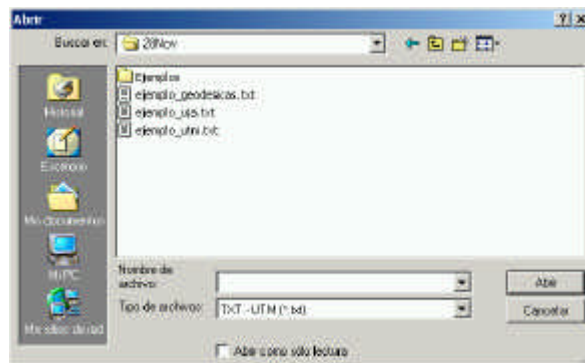


Figura 7.- Ventana para selección del fichero de entrada

Como tipos de archivo se puede elegir entre tres de ellos:

- TXT - no UTM. Es el propio de ficheros ASCII de puntos en coordenadas cartesianas geocéntricas (X,Y,Z) o geodésicas (latitud, longitud, altitud).
- TXT - UTM. Es el adecuado para ficheros ASCII de puntos en proyección UTM (x, y, H, huso).
- Autocad DXF. Indicado para ficheros en formato DXF en cualquiera de los sistemas de coordenadas disponibles (cartesianas geocéntricas, geodésicas o UTM). En caso de contener puntos en coordenadas UTM, el programa preguntará el número de huso (29, 30 ó 31) en el que están definidos. La opción de transformación de este tipo de

ficheros se indica más detalladamente en el apartado de *Conversión de Ficheros Gráficos*.

Si se decide abrir un fichero cuyos datos no se adhieren al formato esperado para el sistema de referencia marcado en las opciones de entrada, el sistema dará un aviso de error y no procederá a cargar estos datos. Cuando el fichero supera el control lógico sobre el tipo de coordenadas, éstas aparecerán en forma de listado en la zona dedicada a la visualización de los datos de entrada (Figura 8).

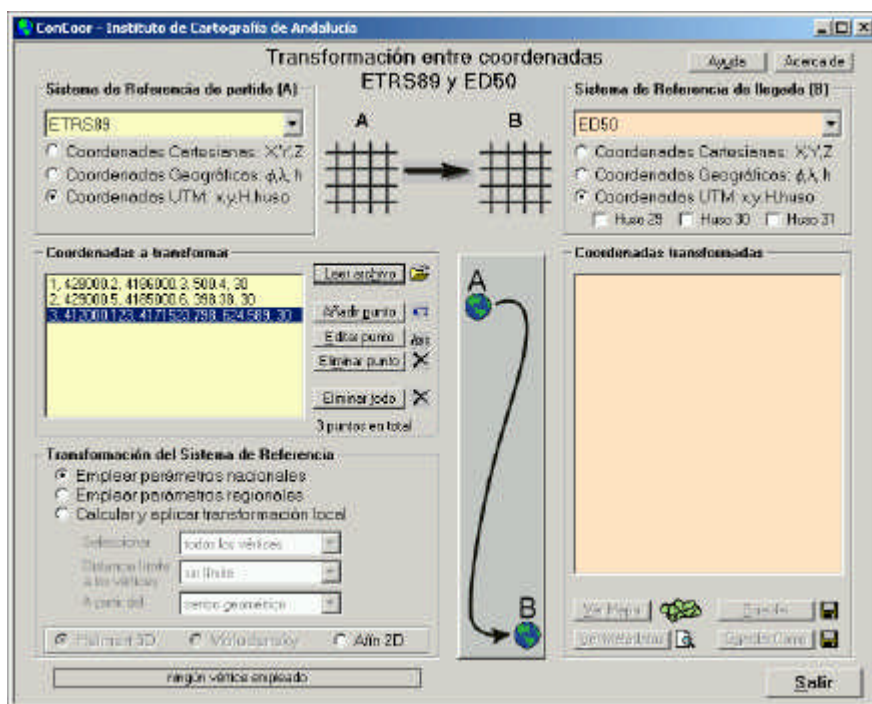



Figura 8.- Listado de coordenadas introducidas

Introducción manual de datos

Se pueden introducir manualmente datos. Para ello basta con pulsar el botón **AÑADIR PUNTO**  que se muestra en la Figura 6. **AÑADIR PUNTO** tiene la funcionalidad de permitir añadir nuevos datos desde teclado, independientemente de que se hayan introducido previamente otros datos desde esta vía o a partir de un fichero.

La ventana de *Añadir puntos* es la que se presenta en la Figura 9. En este caso es para coordenadas UTM pues es la opción habilitada en la sección de Sistema de Referencia de partida (A). Cada sistema de coordenadas dispone de una ventana propia.

Al invocar esta utilidad, la ventana se presenta sobre la ventana principal. No se requieren separadores de miles y la introducción de los valores decimales debe hacerse tras un punto. La tecla *Enter* del teclado permite pasar de entrada a entrada y dar el visto bueno para añadir el dato, que aparecerá inmediatamente en el listado de puntos de la sección *Coordenadas a transformar*.

Añadir punto

COORDENADAS U.T.M.

Código: 4

X UTM: 412100

Y UTM: 4171500

Altitud H: 600

Huso: 30

Cerrar Añadir

Figura 9.- Ventana de añadir puntos

Edición de datos

La edición de datos está disponible en el botón de comandos *EDITAR PUNTO* . La edición se realiza sobre el dato cuyo registro se encuentra marcado, como es el caso del tercer registro de los que aparecen en la Figura 8 anterior.

La utilidad de edición consiste en una ventana similar a la que se muestra en la Figura 10 que permite reescribir cada uno de los campos que forman el registro de un punto. Como se puede observar, la estructura de esta ventana es similar a la mostrada para *Añadir punto*.

Editar punto

COORDENADAS U.T.M.

Código: 4

Y UTM: 412100

X UTM: 4171500

Altitud H: 600

Huso: 30

Cancelar Aceptar

Figura 10.- Ventana de edición de coordenadas de entrada

Eliminación de puntos

Se puede eliminar un punto o registro del listado que se encuentra como entrada del proceso. Para ello basta pulsar el botón de comando cuyo título es *ELIMINAR PUNTO* . Se elimina el registro marcado.

También se puede eliminar todo el conjunto de datos de entrada. Para ello se pisa el botón *ELIMINAR TODO* .

Parámetros de la transformación

Los parámetros deseados para la transformación que se pretende se indican en la sección *Transformación del Sistema de Referencia* (Figura 11).

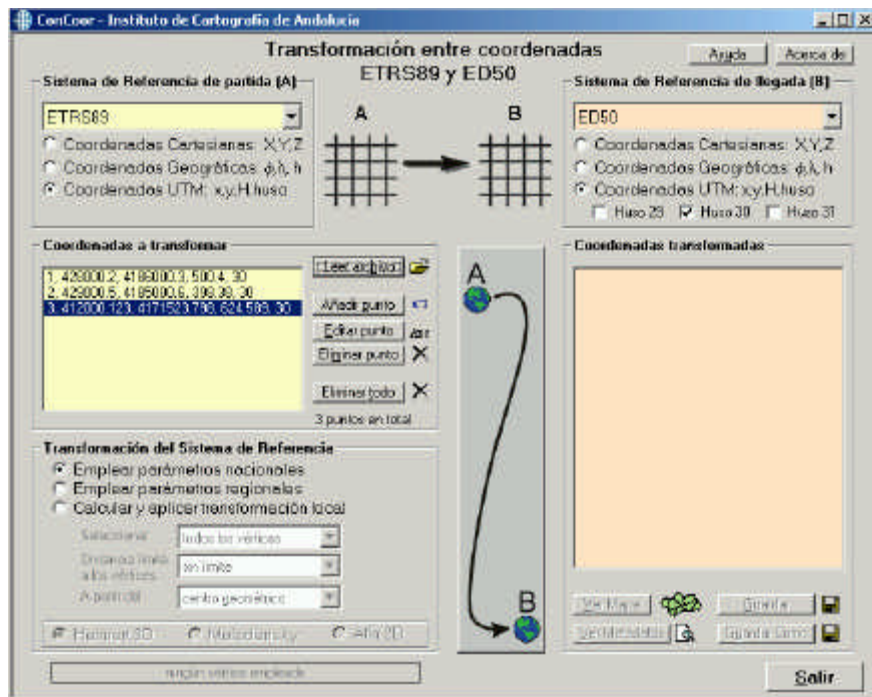


Figura 11.- Transformación del Sistema de Referencia. Ubicación en la ventana principal

Si el sistema de referencia de partida y llegada fueran el mismo, no estará habilitada esta sección de la ventana principal, puesto que no sería necesario aplicar parámetro de transformación alguno.

Las opciones de cálculo disponibles son las siguientes:

- Cálculo de una transformación de tipo Helmert tridimensional, es decir, con siete parámetros.
- Cálculo de una transformación de Molodensky.
- Cálculo de una transformación Afín bidimensional².

La selección de las mismas se realiza mediante los botones de opciones que están al pie de esta sección (Figura 12). No obstante, estas opciones no se habilitan hasta que no se indica qué parámetros se van a usar (Figura 13). Por defecto, se marcan el uso de parámetros nacionales y el cálculo por medio de un Helmert 3D.

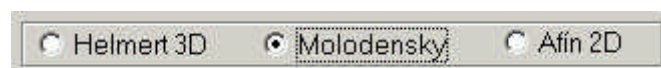


Figura 12.- Selección del método de cálculo

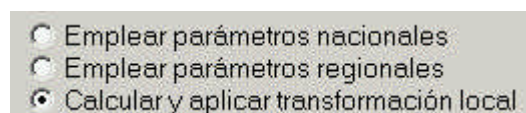


Figura 13.- Selección de los parámetros de ajuste

² Se advierte que, por su propia definición, la transformación Afín tiene un uso muy limitado en Geodesia, por lo que el usuario debe utilizarla sólo en zonas de poca extensión, próxima a los vértices geodésicos empleados para la misma y si los requerimientos de precisión son bajos. En general se recomienda el uso de cualquiera de las otras dos transformaciones.

Para alimentar los procesos de cálculo de los parámetros de dichas transformaciones se presentan diversas opciones:

- ▢ Usar los parámetros nacionales, cuyos valores se presentan en la Tabla 1, en cuyo caso el método de cálculo es obligatoriamente el de Helmert 3D, estando las demás opciones deshabilitadas.
- ▢ Usar parámetros regionales, cuyos valores se presentan en la Tabla 1. Estos valores se basan en un ajuste minimocuadrático sobre los 180 vértices de la red REGENTE que se encuentran en territorio andaluz. Cuando se marca esta opción se puede elegir cualquier método de cálculo para la transformación de coordenadas (se habilitan los botones de opción).
- ▢ Transformación local. En este caso se realizará una transformación local cuyos parámetros se derivarán de un subconjunto de los vértices de la Red REGENTE. Este subconjunto se puede elegir en función de dos criterios. Un primer criterio consiste en determinar un cierto número n de vértices (todos, 5, 10, 20, etc.), seleccionando los n vértices más cercanos. El otro criterio consiste en acotar la distancia de búsqueda de esos vértices (25 km, 50 km, 100 km...), de tal manera que se considerarán en el ajuste todos los vértices que se encuentren a una distancia menor, o igual, a la marcada. Para ambos casos es necesario señalar una opción adicional para indicar si la búsqueda ha de realizarse respecto al centro geométrico del rectángulo mínimo encuadrante de los puntos de entrada o respecto al centro de masas de estos mismos puntos.

La Figura 14 presenta un detalle de las listas de opciones que permiten determinar la forma de cálculo de los parámetros locales.

Figura 14.- Opciones para el cálculo de parámetros locales

Tabla 1.- Parámetros utilizados en las transformaciones de carácter nacional y regional (ED 1950 a ETRS 1989)		
Parámetro	Nacional (*)	Regionales (**)
I	-9.38994 ppm	-11.885 ppm
R _x	1.243976749''	-48.207798''
R _y	0.020006524''	0.741924''
R _z	1.143978637''	-31.561826''
T _x	130.9982295 m	0 m
T _y	100.2987993 m	0 m
T _z	163.3990579 m	0 m
(*) La fuente de los parámetros nacionales es ISO/CD 19111, Annex D, D3 Datum transformationen.		
(**) Los parámetros regionales han sido obtenidos por el propio programa, realizando una transformación a partir de los centros de masas de ambos sistemas de coordenadas.		

Ejecución de la Transformación

La ejecución de la transformación sólo será posible cuando todos los elementos de entrada (datos, método de cálculo, etc.) esté determinados. La ejecución se consigue mediante el botón que se encuentra entre las ventanas de *Coordenadas a Transformar* y

Coordenadas Transformadas. La Figura 15 muestra este botón de ejecución, cuyos iconos hacen referencia al paso del sistema A al sistema B.



Figura 15.- Botón para la ejecución de la transformación

Como ya se ha referido previamente, el programa está diseñado para efectuar las transformaciones de puntos del territorio andaluz, por lo que señalará los puntos que no cumplen esta condición, añadiendo el símbolo "#" a cada uno de ellos en el listado de coordenadas a transformar, justo en el instante en que se pulse el botón de ejecución.

Visualización de resultados

Listado de coordenadas

Los resultados de la transformación pueden verse en forma de listado en la ventana denominada *Coordenadas Transformadas* que se encuentra en la mitad derecha de la ventana principal y cuyo fondo es de color asalmonado (Figura 16).

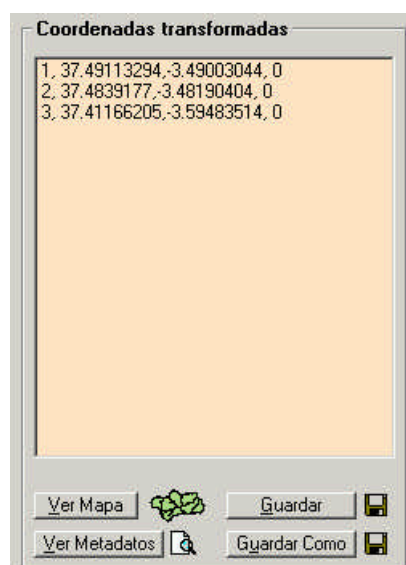



Figura 16.- Ventana de visualización de coordenadas transformadas

Las coordenadas se muestran en el formato propio del sistema de salida. En la Figura 16 anterior, se muestran expresadas en coordenadas geográficas (latitud, longitud, altura) por ser la elección determinada para este caso.

Mapa de situación

ConCoor incluye una utilidad de visualización de los vértices REGENTE utilizados para el cálculo de parámetros en transformaciones locales. Se accede a esta utilidad con el botón *VER MAPA*  de la ventana de *Coordenadas Transformadas*.

Para el caso de la transformación que se ha indicado anteriormente la Figura 17 presenta el mapa de situación que se muestra al pisar esta opción.

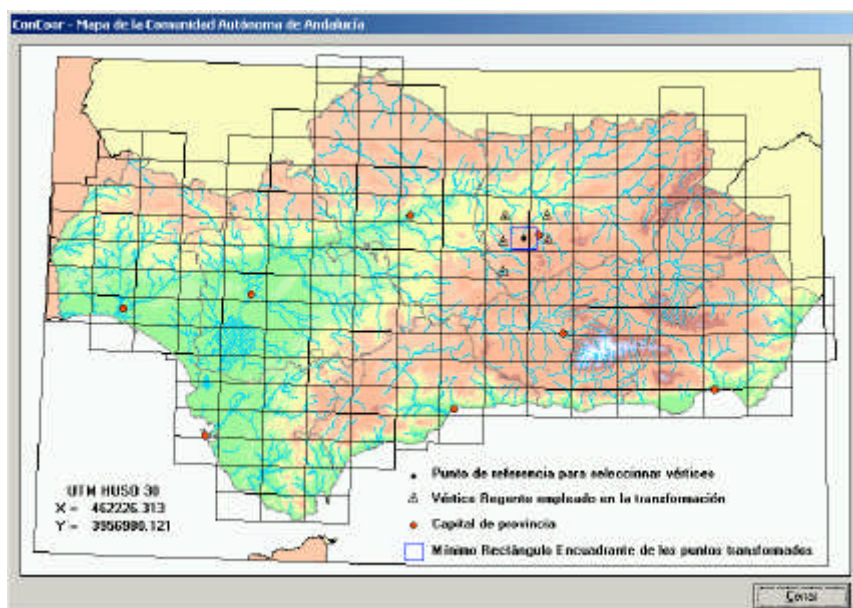



Figura 17.- Mapa de situación de la ventana geográfica de trabajo y de los vértices utilizados en la transformación

Este mapa presenta una visión fisiográfica de la Comunidad Autónoma de Andalucía en proyección UTM y Huso 30, con su división en provincias, posición de las capitales de provincia, principales cursos de agua, y la distribución de las hojas del MTN50. Las coordenadas del cursor en la citada proyección se reflejan en la esquina inferior izquierda.

En este mapa de situación se presenta un rectángulo azul que indica la ventana geográfica (definida por el Rectángulo Mínimo Encuadrante) cubierta por las coordenadas que se transforman. También se indican, con la simbología habitual, todos los vértices de la Red REGENTE que se han incluido en el cálculo para el ajuste de los parámetros de las transformaciones locales.

Para salir de esta ventana se ha de presionar el botón *Cerrar* que se encuentra en su parte inferior derecha.

Metadatos

ConCoor dispone de una utilidad que genera de manera automática un fichero de registro de las operaciones, tal que puede considerarse como un pequeño registro de metadatos para conocer el proceso al que se han sometido unos datos (linaje). La Figura 18 presenta la ventana a la que se accede tras pulsar la opción indicada por el botón *VER METADATOS*  que se encuentra en la parte inferior de la ventana *Coordenadas Transformadas*.

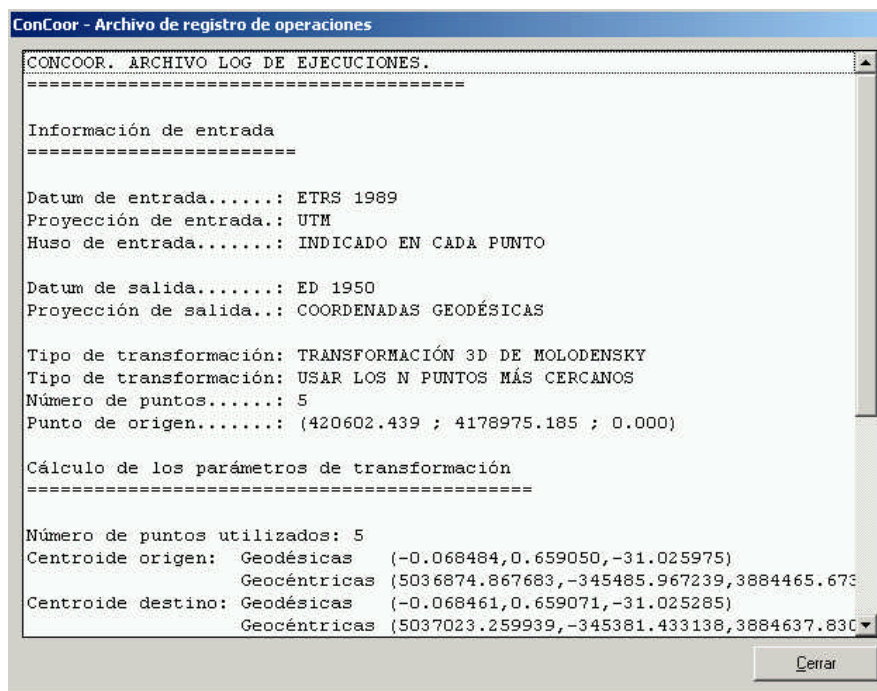


Figura 18.- Ventana de visualización de Metadatos

La ventana de visualización de metadatos dispone de una barra de desplazamiento con la que se puede acceder a todo su contenido. En los metadatos se incluye la siguiente información estructurada en 3 apartados:

1. Información de entrada:
 - Datum, proyección y huso (éste último sólo en caso de ser necesario), del sistema de entrada.
 - Datum, proyección y huso (éste último sólo en caso de ser necesario) del sistema de salida.
 - Tipo de transformación solicitada e información de los puntos a emplear o de la distancia máxima de búsqueda.
2. Información de los parámetros de transformación:
 - Número de puntos utilizados para calcular la transformación.
 - Centro de masas de las coordenadas origen.
 - Centro de masas de las coordenadas de destino.
 - Parámetros de transformación obtenidos, cuyas unidades se muestran en la Tabla 2.
 - Bondad del ajuste (S_0^2), en metros.
3. Información de salida:
 - Tipo de formato de archivo de salida.
 - Número de puntos (elementos) transformados.



Los metadatos se almacenan en un fichero ASCII automáticamente al guardar el fichero con las coordenadas de los puntos transformados. El nombre del fichero de metadatos se corresponde con el de aquel, añadiéndole la terminación "_metadatos.txt".

Para salir de esta ventana se ha de pulsar el botón *CERRAR* que se encuentra en su parte inferior derecha.

Tabla 2.- Listado de los parámetros indicados en el archivo de metadatos y las unidades en las que se encuentran.			
Orden	Parámetro [Unidades]		
	Helmert	Molodensky	Afin
1	λ [-]	dX [m]	a [m]
2	Ex [m]	dY [m]	b [m]
3	Ey [m]	dZ [m]	c [m]
4	Ez [m]	da [m]	d [m]
5	Tx [m]	df [-]	Tx [m]
6	Ty [m]	a [m]	Ty [m]
7	Tz [m]	f [-]	

Nota: Los parámetros cuyas unidades se denotan con [-] son adimensionales.

Archivo de resultados


El archivo de resultados se realiza mediante las opciones *GUARDAR*  y *GUARDAR COMO*  que se incluyen en los botones de comando situados en la parte inferior derecha de la ventana *Coordenadas transformadas*. El empleo de ambos botones es similar al de cualquier aplicación basada en Windows.

GUARDAR COMO es la opción indicada para seleccionar el nombre y directorio de destino del fichero de resultados, mediante el acceso a una ventana equivalente a la mostrada en la Figura 7, y para ejecutar el almacenamiento de los datos transformados en dicho fichero.

GUARDAR es la opción indicada para guardar los puntos transformados sobrescribiendo el archivo creado previamente en caso de haber pulsado *GUARDAR COMO*. Si aún no se ha pulsado dicho botón, se ejecutará automáticamente la opción *GUARDAR COMO*.

CONVERSIÓN DE FICHEROS GRÁFICOS

ConCoor posee de una utilidad muy interesante que permite la conversión, punto a punto, de fichero gráficos en formato DXF (V10, V11, V12, V14 y V2000). Como se ha indicado, esta conversión se realiza punto a punto, lo que significa que se convierten las posiciones realmente indicadas en el fichero, aspecto que hay que tener en cuenta pues los resultados pueden no ser los esperados si dicho fichero incluye descripciones paramétricas de curvas.

De forma similar a la carga de ficheros de puntos, los ficheros DXF se cargan mediante la opción *LEER ARCHIVO* , que da acceso a una ventana convencional de *ABRIR* como la que muestra la Figura 19. En esta ventana hay que entrar en la lista de opciones de *Tipo de Archivo* e indicar Autocad DXF como opción válida.

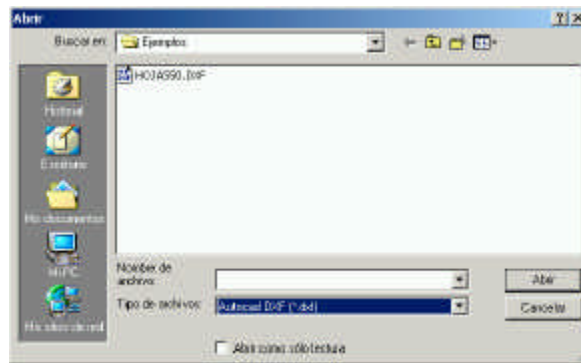


Figura 19.- Ventana para abrir archivos DXF

Si el fichero supera cierto tamaño, aparecerá una barra de progreso indicando que se está trabajando en la conversión.

Para esta conversión también se genera un fichero de metadatos. En este caso, junto a la información propia de la conversión también se indica el tipo y número de elementos convertidos (por ejemplo, textos, puntos o polilíneas).

SALIR DEL PROGRAMA

Para salir del programa se ha de pisar el botón *SALIR* situado en la parte inferior derecha de la ventana principal o, como en todos los programas basados en Windows, pisar el aspa que se muestra en la parte superior derecha de la ventana principal.

AYUDA

Se accede a la ayuda mediante el botón *AYUDA* situado en la parte superior derecha de la ventana principal del programa. De esta forma se accede a la página índice de la ayuda, con la que se puede acceder a cualquiera de los ítems de la misma.

La ayuda está contenida en el fichero *AyudaConCoor.pdf* por lo que se debe tener instalado el programa *Adobe Acrobat Reader* para poder acceder a la misma.

ACERCA DE

Los créditos del programa se pueden consultar mediante el botón *ACERCA DE* situado en la parte superior derecha de la ventana principal del programa. La Figura 20 presenta la ventana que se muestra tras esa operación.

Mediante el botón *LICENCIA* de esta ventana se tiene acceso a la información relativa a las advertencias legales y de Copyright del programa.

Esta ventana se coloca sobre la ventana principal del programa y se sale de ella mediante un click del ratón en el botón *ACEPTAR* que se encuentra en el medio de la misma.

Figura 20.- Ventana *Acerca de*

FORMATO DE LOS FICHEROS DE PUNTOS DE ENTRADA / SALIDA

Los ficheros de entrada/salida son ficheros ASCII con una estructura muy simple para que puedan ser generados con cualquier programa (base de datos, hoja de cálculo, procesador de textos o programa).

La estructura del fichero es la siguiente:

```
Encabezado o Línea de comentarios
Registro 1
Registro 2
....
Registro N
```

Los registros adoptan una forma diferente en función del tipo de datos de que se trate. Los tipos de datos son:

- ▢ Valores expresados en UTM.
- ▢ Valores expresados en cartesianas geocéntricas.
- ▢ Valores expresados en latitud/longitud.

Todo registro empieza por un identificador del punto (cualquier cadena de texto) al que le siguen tantos valores se requieran por el tipo de dato:

- ▢ Los puntos expresados en UTM requieren cinco datos:

Identificador, X_{utm} , Y_{utm} , H, Huso

En este caso cada dato puede estar en un huso distinto.

- ▢ Los puntos expresados en cartesianas geocéntricas requieren cuatro datos:

Identificador, X, Y, Z

- ▢ Los puntos expresados en geográficas requieren cuatro datos:

Identificador, Latitud, Longitud, Altura

A modo de ejemplo para el caso de las coordenadas en UTM:

EJEMPLO DE LISTADO UTM PARA TRANSFORMAR

1,	428000.2,	4186000.3,	500.4,	30
2,	429000.5,	4185000.6,	398.38,	30
3,	412000.123,	4171523.798,	624.589,	30

Para el caso de las coordenadas geográficas

EJEMPLO DE LISTADO PARA TRANSFORMAR (geodésicas)

1,	37.491598,	-3.430587,	490.596
2,	37.48498745,	-3.42296894,	502.1236

Las coordenadas geográficas han de expresarse en formato pseudosexagesimal (GG.MMSSDDDD), donde GG son los grados, MM los minutos, SS los segundos y DDDD las décimas, centésimas, milésimas y diezmilésimas de segundo

Los separadores de decimales son puntos (.) y los separadores de datos son comas (,).

No existe limitación en el número de datos a transformar.

El formato de los ficheros que contienen los datos de salida es similar al anterior, con la salvedad de que el sistema incluye en la línea de comentarios indicación a qué se refiere cada una de las columnas del fichero, por ejemplo, para el caso de generar una salida en coordenadas geodésicas:

ID	Latitud	Longitud	h
1,	37.49113294,	-3.49003044,	0
2,	37.4839177,	-3.48190404,	0
3,	37.41166205,	-3.59483514,	0

BASE DE DATOS DE VÉRTICES

Para la determinación de los parámetros locales de transformación se utilizan las coordenadas UTM ED'50 y UTM ETRS'89. Estos vértices pertenecen a diversas redes geodésicas previas, pero han sido observados formando una nueva red denominada Red REGENTE (*Red GEodésica Nacional por Técnicas Espaciales*) (Regidor y col., 2001; IGN 2002). En Andalucía se dispone de 180 vértices de este tipo.

Dada la composición de vértices que conforman REGENTE (vértices de la red geodésica de primer orden y de la red de orden inferior) las precisiones de las coordenadas de los mismos en UTM ED'50 son muy variables debido a los métodos de observación y compensación utilizados en el pasado. Para el caso de coordenadas REGENTE, se pretende que EUREF la valide³ como red de clase C, es decir, con precisiones mejores de 5 cm en las tres coordenadas. Por tanto, las precisiones de un

³ Dado que todavía el proyecto REGENTE no se ha cerrado ni validado la red por parte de EUREF, las coordenadas deben ser consideradas como provisionales.

mismo vértice pueden ser muy distintas en cada uno de los sistemas en los que se exprese. Las precisiones generales para cada uno de los sistemas son las que se muestran en la Tabla 3.

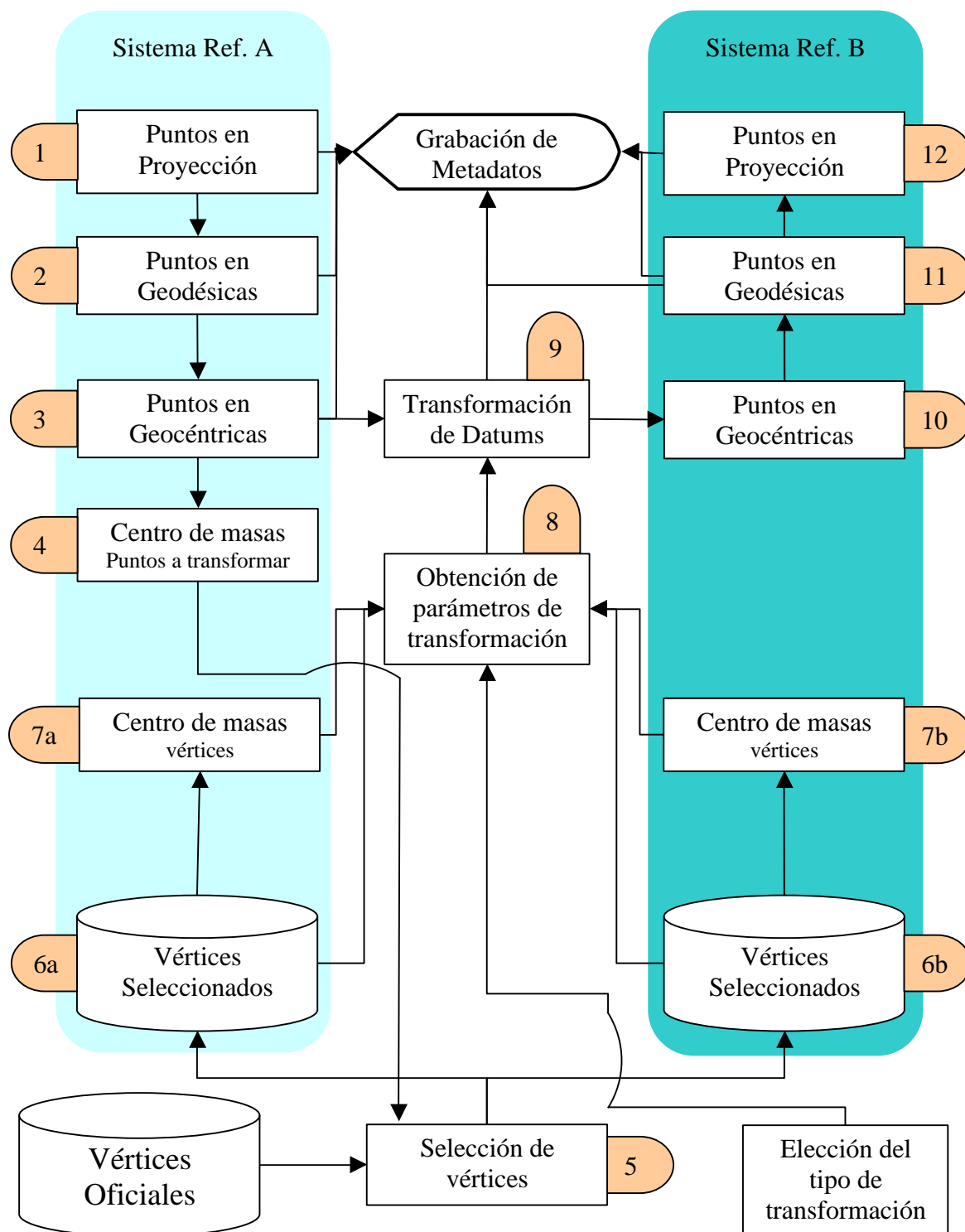
Tabla 3.- Precisiones de los vértices de la base de datos utilizada para los cálculos			
ED50 (*)		ETRF89 (**)	
Planimetría:	30 cm	Planimetría:	5 cm
Altimetría:	50 cm	Altimetría:	5 cm
NOTAS: (*) Estos valores son orientativos y con carácter general, pues por los métodos de observación, y compensación por bloques, pueden existir vértices con precisiones aún peores, pero se considera que la mayoría de ellos tienen precisiones mejores que las arriba indicadas. (**) El valor de 5 cm se considera para un nivel de confianza del 95%.			

Fuente: Regidor (2003)

ELEMENTOS TÉCNICOS DEL PROGRAMA

A continuación se presenta el esquema general de cálculo que se sigue para la realización de las conversiones. Todo el proceso queda descrito en la Figura 21, donde el orden de ejecución de los cálculos es el que se muestra con las etiquetas numeradas. De forma resumida los pasos son los siguientes:

- Los datos de entrada pueden tener una proyección (1), estar en coordenadas geodésica (2) o en geocéntricas (3).
- En el caso en que se utilice una proyección, el programa de transformación la elimina realizando una conversión de todos los datos a transformar al elipsoide origen.
- A continuación, se calcula el centro de masas del conjunto de puntos a transformar (4). De esta manera se puede realizar la búsqueda (5) de los vértices ED50/REGENTE en función de los criterios de selección marcados en el apartado *Parámetros de la Transformación*.
- Con las parejas de vértices ED50/REGENTE que cumplan con los criterios de selección (6a y 6b), y sus centros de masas (7a y 7b), se calculan los parámetros de transformación (8) en función de la elección del tipo de transformación a realizar.
- Una vez se dispone de los parámetros de transformación, se aplican a todos los datos de entrada expresados sobre su elipsoide original (9), obteniendo dichos datos sobre el elipsoide de destino (10).
- Posteriormente, si es el caso, estos datos se convierten a la proyección de destino (12).



ANEJOS

SISTEMAS DE REFERENCIA

Un sistema de referencia no es mas que una forma para referir posiciones. La indexación del espacio, el dar coordenadas a los puntos del mismo, se consigue una vez que se establece un punto como origen y una base vectorial asociada al mismo. De esta forma, y tras convenir unos sentidos de crecimiento positivos y negativos de los valores, se dispone pues de un método para expresar cualquier punto del espacio con un vector de posición que es combinación lineal de vectores que forman la base.

En función de cómo se especifiquen las componentes que permiten determinar la posición de un punto, los sistemas se pueden clasificar en:

- Sistemas polares: Se conjuga el uso de valores o distancias angulares y distancias rectas (Figura 1.a). Son el caso más general. En cierta forma, aunque tal vez implícita, es el que el hombre ha utilizado desde la antigüedad (distancia y dirección) para referenciar unos puntos con respecto a otros. Son adecuados para representaciones planas y de carácter más general. El sistema queda definido mediante la determinación de un plano de referencia, un punto origen perteneciente al anterior, y que sirve para referir las distancias y ángulos, y el sentido (positivo o negativo) de esas dos magnitudes.
- Sistemas rectangulares: La posición de un punto se expresa como distancias ortogonales medidas sobre unos ejes (Figura 1.c). Es adecuado para determinar posiciones sobre un plano o en espacios n-dimensionales. Son una evolución del sistema de coordenadas cartesianas aplicadas a necesidades militares. En el caso de la cartografía se utiliza fundamentalmente en zonas reducidas, en las que la influencia de la curvatura terrestre es inapreciable y que, por tanto, permiten representaciones planas.
- Sistemas esféricos: La posición se determina con dos valores angulares (p.e. latitud y longitud) dado que los puntos se encuentran siempre a una distancia dada del origen, sobre una esfera (Figura 1.b). Es el sistema de coordenadas más antiguo, ya utilizado por filósofos y matemáticos griegos. Es un sistema de coordenadas polares donde se prescinde de las distancias en magnitud lineal dado que se supone que todos los puntos están sobre una superficie de distancia constante o aproximadamente constante ($r = R$).

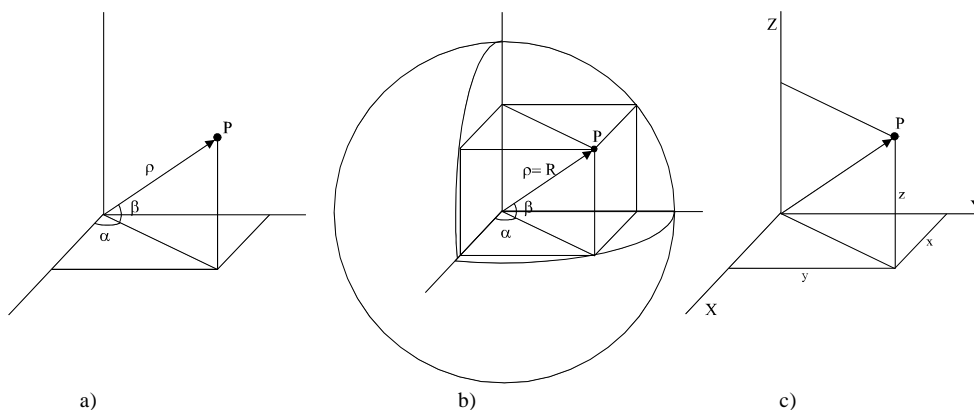


Figura 1.- Sistemas de referencia: a) polar, b) esférico, c) rectangular

Como se puede observar cualquier sistema de referencia se debe apoyar en los conceptos de dirección y distancia. Además, mediante el uso de relaciones matemáticas conocidas es posible pasar de un sistema de referencia a otro, por lo que el uso de uno u otro se determina por las ventajas o inconvenientes que muestran frente a una aplicación concreta.

Sistema de coordenadas geográficas

La forma más sencilla y tradicional de referirse a una posición sobre la Tierra es utilizar un sistema esférico denominado de coordenadas geográficas conocidas con los nombres de Longitud y Latitud.

El origen de la palabra latitud y longitud se halla en los antiguos mapas de las zonas que rodean el Mediterráneo (el Mundo Antiguo de los romanos) que, por su forma alargada, tenía unas dimensiones que podían llamarse largas (*longus*) de Este a Oeste y anchas (*latus*) de Norte a Sur.

La latitud de un punto sobre la esfera puede definirse como el ángulo formado por la vertical, línea normal o dirección de la gravedad en este punto y el plano del Ecuador.

La forma de determinar esta coordenada ha sido sencilla, pues con sólo observar la elevación de un determinado astro sobre el horizonte, junto con la ayuda de las efemérides, se puede determinar la latitud del lugar. Cualquier punto situado al Norte del Ecuador se dice que tiene latitud Norte, y cualquier punto situado al Sur del Ecuador se dice que tiene latitud Sur.

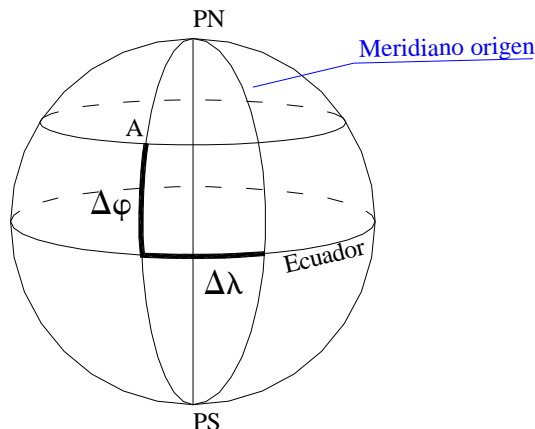


Figura 2.- Sistema de coordenadas geográficas

La longitud es la coordenada esférica homóloga a la X que se desarrolla sobre el eje de abscisas o eje horizontal cartesiano. La longitud se mide por el menor arco de Ecuador que existe entre los meridianos que pasan por los dos puntos entre los que se pretende obtener la longitud (). El inconveniente es que no existe un meridiano origen a partir del cual se puedan referir las longitudes. De hecho, durante mucho tiempo las longitudes en los mapas se referían al meridiano central de cada país, el cual solía pasar por la capital de cada uno de ellos (p.e. en el caso de España los mapas tomaban longitudes referidas a Madrid, los mapas franceses referían la longitud al meridiano de París, los portugueses a Lisboa, etc.). Fue por convenio internacional alcanzado en 1884 que se decidió adoptar como meridiano origen de longitudes el meridiano que pasa por

el observatorio inglés de Greenwich, al este de Londres. Las longitudes hacia el oeste se consideran positivas y las este negativas. El motivo principal por el cual se decidió que el meridiano origen pasara por ahí, fue que en el momento de la decisión el mayor número de cartas náuticas existentes eran de origen inglés y estaban referidas a este meridiano.

Según esto, el origen de las coordenadas geográficas se establece realmente en un punto cercano al Golfo de Guinea y el opuesto, el meridiano 180° está situado en el Pacífico y de forma más convenientemente, puesto que no divide en dos grandes territorios como lo hace el meridiano 0° con Europa y África.

La determinación de la longitud ha sido desde siempre un problema de difícil solución puesto que requiere de la medida del tiempo, algo difícil de conseguir hasta que se introdujo el uso del cronómetro como instrumento de navegación en el siglo XVIII.

Hoy en día la diferencia de longitud entre dos puntos se obtiene de forma más sencilla gracias a las señales horarias emitidas por las emisoras de radio (facilitadas por los observatorios astronómicos) y que dan la hora en Tiempo Universal Coordinado (TUC), lo cual permite calcular la hora sidérea local en Greenwich y, finalmente, obtener la diferencia de longitud.

APROXIMACIONES A LA FORMA DE LA TIERRA

Tras el conocimiento de cómo se puede referenciar la posición de un punto sobre la Tierra, en este apartado se van a analizar las distintas aproximaciones que, a lo largo de la historia, se han considerado para referirse a la forma real de la Tierra, dejando a un lado todas las consideraciones que la tratan como plana. Estas aproximaciones son pues modelos de la forma de la Tierra, generalizaciones que presentan ciertas ventajas para el tratamiento de los datos geográficos.

Una primera hipótesis permite considerar la Tierra como una esfera perfecta con un radio aproximado de 6.366 Km y un desarrollo de meridiano de 40.000 Km. No obstante, esta hipótesis se demuestra que no es del todo acertada, dado que las observaciones y las teorías desarrolladas sobre la forma de la tierra detectan y advierten de la existencia de una cierta anomalía o aplastamiento polar respecto a las dimensiones de un planeta considerado como una esfera perfecta. Esto lleva directamente a una segunda hipótesis que supone que nuestro planeta tiene forma de elipsoide de revolución ensanchado en el Ecuador y aplastado en los Polos. De esta forma se consideran unas dimensiones diferentes para cada eje: un radio ecuatorial a aproximado de unos 6.380 Km y un radio polar b aproximado de 6.359 Km. La diferencia entre estas dimensiones se denomina aplanamiento α :

$$\alpha = \frac{a - b}{a}$$

Han sido muchos los científicos e ingenieros que han aportado trabajos de campo para la definición de estos elipsoides, especialmente en a lo largo del siglo XIX. La Tabla 1 presenta algunos de ellos.

Tabla 1.- Elipsoides y geodestas que los determinaron				
Año	Autor	Semieje Mayor (Km)	Aplanamiento	Países en que se utilizó
1830	Everest	6.377,276345	1/300,8017	India, Burma, Ceylan, Malasia
1841	Bessel	6.377,397155	1/299,1528	Europa Central, Chila y China
1849	Airy	6.377,563396	1/299,3249	Gran Bretaña
1858	Clarke	6.378,294	1/294,261	Australia
1860	Struve	6.378,2983	1/294,73	España, Rusia
1866	Clarke	6.378,2064	1/298,97866982	Norte América
1876	Andrae	6.377,10443	1/300,0	Dinamarca, Islandia
1880	Clarke	6.378,24917	1/293,465	Francia y África

A partir de la observación en la discrepancias existentes entre los elipsoides, una conclusión a la que llegaron diversos científicos es que la forma real, o al menos la más próxima a la real, debería ser un elipsoide de tres ejes, es decir, la sección del Ecuador no sería una circunferencia con radio igual al valor del semieje ecuatorial sino que sería una elipse donde existiría un tercer semieje. Se trata pues de un modelo de elipsoides triaxiales. Algunos de los geodestas que calcularon elipsoides de esta forma son: Schubert (1848-1911) , Clarke (1819-1890), Helmert (1843-1917), Krasovski (1878-1948), etc.

No obstante, el elipsoide que se adoptó internacionalmente como mejor aproximación a la verdadera forma de la Tierra es el denominado elipsoide de Hayford (1909). Hayford basándose en una metodología de cálculo conocida como método de las áreas, determinó los parámetros más probables para el elipsoide:

- Semieje mayor (radio ecuatorial) = 6.378, 388 Km.
- Aplanamiento = 1/297.
- Semieje menor (radio polar) = 6.356,909 Km.

Este elipsoide comenzó a ser conocido como “Elipsoide Internacional” a raíz de la resolución tomada por el Comité Ejecutivo de la Sección de Geodesia, integrada en la Unión Geodésica y Geofísica Internacional, reunido en Madrid el 24 de Septiembre de 1924.

Fue a partir de la II Guerra Mundial cuando se estableció el sistema de referencia europeo ED-50. Este sistema fue calculado a partir de los datos terrestres disponibles en aquella época. La solución se basaba en el elipsoide de Hayford para el que se había seleccionado la Torre de Helmert en Postdam como estación fundamental. La posición del elipsoide coincidía con el geocentro verdadero, con una incertidumbre de unos 100 m en x, y, z.

A nivel europeo, en décadas posteriores se han sucedido intensas actividades internacionales con el fin de mejorar el ED-50. Tal es el caso del proyecto realizado por la Comisión Permanente RETrig (*Réseaux Européens de la Triangulation*) de la Asociación Internacional de Geodesia cuya solución final es el ED-87 que ya incluía un número limitado de datos de satélite, aunque sigue siendo una red predominantemente terrestre.

El Geoide

La progresión de los conocimientos y de las observaciones sobre el planeta para la determinación exacta de su forma demostraron, como se sospechaba, que la forma tampoco se acomoda exactamente a ningún tipo de elipsoide. Existen anomalías gravitatorias que indican que la forma del planeta es una forma propia, y a ésta se ha venido llamando Geoide.

Se considera que la verdadera forma de la Tierra es la que se corresponde con aquella superficie que es perpendicular a la dirección de la gravedad en todo punto de su superficie, por tanto se trata de una superficie equipotencial.

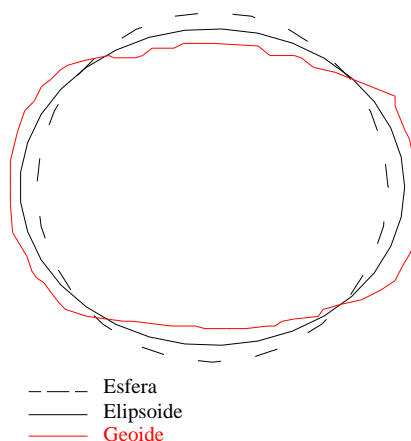


Figura 3.- Figura del Geoide junto al Elipsoide y Esfera

Por tanto, las esferas y elipsoides no son mas que modelos o aproximaciones a la forma de la Tierra. El nivel medio del mar sí se puede considerar como una superficie equipotencial, por lo que la verdadera forma - el geoide- se puede aproximar bastante bien mediante dichos niveles. Según Iliffe (2000), a nivel mundial, las diferencias entre geoide y el nivel medio del mar están en la mayoría de los casos en torno a 1 m.

Los elipsoides son buenas aproximaciones al geoide, pero siempre existen discrepancias, éstas se denominan separación y se denotan por N . Algunos autores denominan a este mismo concepto como ondulación.

Nos podemos preguntar si se puede considerar constante esta discrepancia geoide-esferoide. La respuesta es inmediata, depende de la exactitud que se pretenda en el trabajo. Para el caso de proyectos con requerimientos de exactitud centimétricos, no se pueden considerar valores constantes para distancias mayores de 200m (Iliffe, 2000). Cuando los requerimientos de exactitud son del orden de los 2m, la distancia se puede extender varios kilómetros, pero esto depende muy mucho de la variabilidad particular del geoide en la zona concreta.

Por otra parte, las normales al geoide y al elipsoide no coinciden, como norma general, y por ello se considera la existencia de desviaciones de la vertical, la cual se puede separar en dos componentes: norte-sur x y este-oeste h .

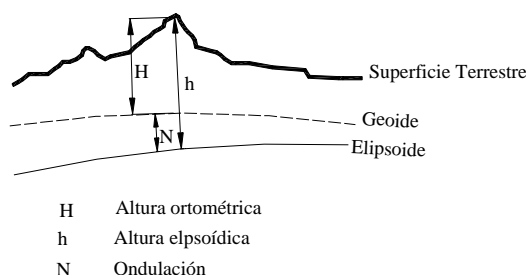


Figura 4.- Representación de las diferentes altitudes

Considerando que el ángulo entre la vertical del lugar y la normal al geoide es despreciable, la relación entre las alturas elipsoidal y ortométrica es la siguiente:

$$h = H + N$$

donde:

h	Altura elipsoidal.
H	Altura ortométrica.
N	Separación entre geoide y elipsoide.

Los sistemas GPS dan altura referida a su sistema de referencia, por ello se trata de una h (referida al WGS84). H es la altura respecto al geoide; su determinación es más compleja debido a la necesidad de medidas de la gravedad terrestre. Por tanto, la separación N es el parámetro que se precisa para pasar de H a h , y viceversa.

La Figura 5 presenta las discrepancias del geoide respecto al elipsoide para el caso de España (Sevilla, 1995).

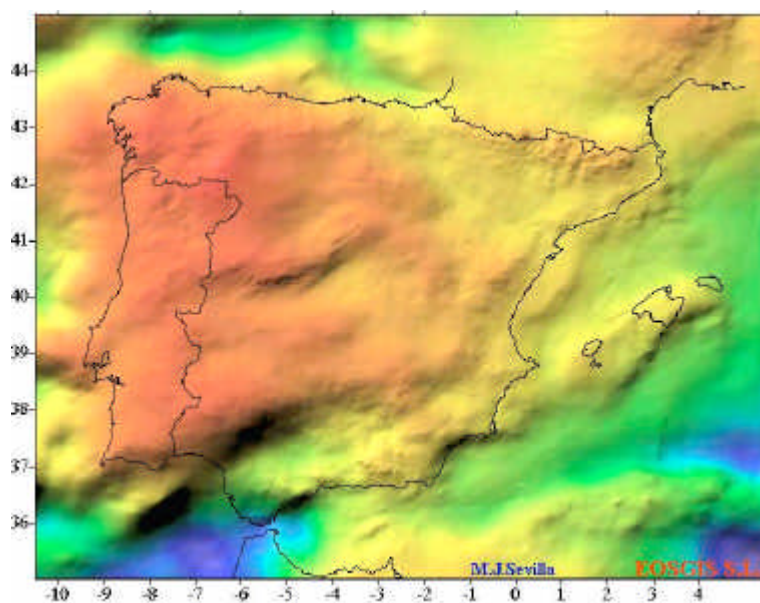


Figura 5.- Modelo Digital representativo las ondulaciones del Geoide
<http://www.eosgis.com/IBERGE095.html>

DATUMS LOCALES Y REGIONALES

Dado que existe un gran número de elipsoides se hace necesario conocer la relación entre cada elipsoide y el geoide. Para ello se utiliza un punto arbitrariamente determinado que se denomina Datum o punto fundamental⁴. El Datum es un punto concreto que se utiliza para hacer coincidir el geoide y un modelo del mismo (esfera o elipsoide). Por tanto, es un punto con la propiedad de que la vertical geodésica y la astronómica coinciden, anulándose pues la desviación relativa de la vertical. Sobre un mismo Datum se pueden utilizar diversos elipsoides, que se diferenciarán en los valores de a y f , y sobre distintos puntos (datums) se podrán utilizar los mismos elipsoides (iguales valores de a y f).

Tradicionalmente cada nación determinaba un datum sobre el que refería todos sus sistemas de referencia geodésicos, y por ende, cartográficas. En estos puntos se hacía coincidir el geoide con el esferoide adoptado (Figura 6) (por ejemplo Hayford), de tal forma la separación geoide-elipsoide se hace cero ($N = 0$). Otro de los cálculos a realizar era orientar adecuadamente el elipsoide respecto al geoide. Para esto último se utilizaban las observaciones de Laplace. Es importante advertir que el sistema formado por un elipsoide y un datum no tiene por qué ser un sistema geocéntrico; aspecto este último que toma gran relevancia en la actualidad debido a la preponderancia de los sistemas de posicionamiento global.

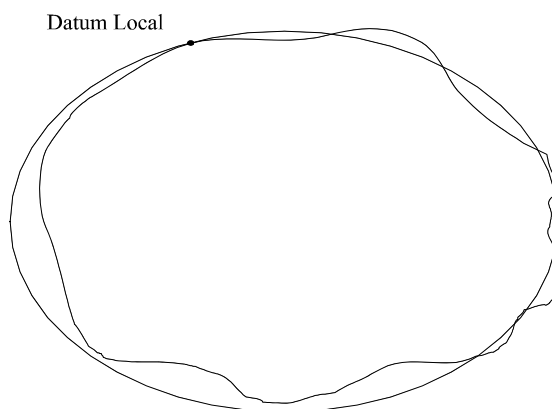


Figura 6.- Coincidencia geoide/elipsoide en el datum local

El uso de satélites (GPS y GLONASS) ha llevado a la utilización de datums globales del tipo geocéntrico, es decir, posicionados en el centro de masas de la tierra, dado que con ello se modeliza mejor el comportamiento de estos cuerpos y permiten disponer de un sistema de carácter global. A partir de este punto fundamental, que es el Centro de masas de la Tierra, se considera un elipsoide cuyos parámetros son (Seebar, 1993):

$$a = 6378137 \text{ m}$$

$$f = 1 / 298.257223563$$

⁴ En el caso del sistema de referencia europeo ED-50, el punto fundamental es la Torre de Herlmer de Postdam, con origen de longitudes en el meridiano de Greenwich, utilizando el elipsoide Internacional de Hayford. A pesar de ser éste el sistema de referencia asumido por la cartografía oficial en España, todavía existe cartografía basada sobre el sistema antiguo utilizado en la edición del Mapa Topográfico Nacional. En este caso se tomaba como elipsoide el de Struve y el punto fundamental era la señal de nivelación NP-25 situada en la rotonda del "Edificio Villanueva" del observatorio astronómico de Madrid, siendo este punto también, el origen de longitudes del sistema de referencia nacional.

Estos valores, junto con otros relativos a la velocidad de rotación de la Tierra y a su campo de gravedad forman la definición del sistema WGS84 (*World Geodetic System 1984*) (Tabla 2).

Tabla 2.- Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS- 84)	
⌞	Sistema geocéntrico, con origen en el centro de masas de la Tierra (geocentro).
⌞	El eje OZ es paralelo a la dirección del polo CIO (polo medio de 1900 a 1905).
⌞	El eje OX es la intersección del Ecuador medio con el meridiano origen de Greenwich.
⌞	El eje OY es también ecuatorial, de manera que forme con los otros dos un triedro trirrectangular “dextrorsum”.
⌞	El modelo terrestre es un elipsoide de revolución cuyos ejes son: $a=6.378.137 \text{ m} \pm 2 \text{ m}$, $b = 6.356.752,3 \text{ m} \pm 2 \text{ m}$, $\alpha = 1/298,257223563$.

Marcos internacionales de referencia terrestre

Debido a la utilidad de los sistemas de navegación y a que su aplicación se extiende por toda la Tierra, surge la necesidad de establecer algún marco internacional de referencia terrestre. Existe pues una actividad coordinada, de carácter internacional, que se materializa en un numeroso conjunto de estaciones de referencia, determinadas con precisiones milimétricas, que se usan para establecer este marco y que se denomina ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*).

Los sistemas WGS84 y PZ90, éste último el utilizado por GLONASS, son sistemas basados en estas redes de estaciones.

El mantenimiento del ITRF es responsabilidad del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (*International Earth Rotation Service, IERS*).

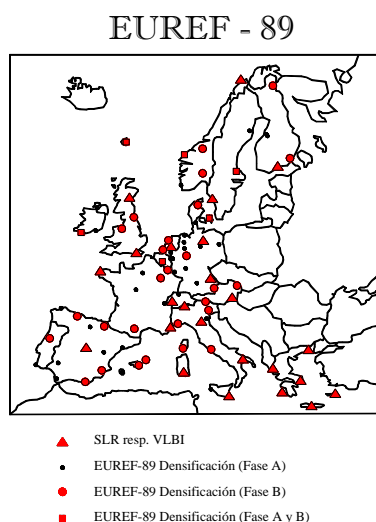


Figura 7.- Disposición de la Red EUREF-89

El pretender un marco de referencia de gran precisión lleva a la necesidad de incluir el tiempo como variable en el sistema. Ello es debido a que la corteza terrestre tiene movimientos que afectan a las posiciones de las estaciones de referencia. Este es el motivo por el cual todos los sistemas de referencia se denominan con una fecha o referencia a una época concreta, por ejemplo: ITRF92, ITRF93, ITRF94, WGS72, WGS84, etc. La última materialización de los cálculos de un sistema es el sistema ITRF2000.

A pesar del interés de un sistema de carácter global, existen iniciativas que pretenden soluciones mejores de carácter más regional. Un ejemplo de ello es el Marco Europeo de Referencia Terrestre (*European Terrestrial Reference Frame*, ETRF), que se forma como un subconjunto de estaciones ITRF que permiten un mejor ajuste a la zona europea. En la actualidad se utiliza el sistema ETRF89 (Figura 7).

Transformaciones entre marcos de referencia

El rigor en la realización de transformaciones de datums depende del uso que se pretenda dar a la información posicional, dado que no será lo mismo que se vayan a utilizar en un proyecto de ingeniería, con exigencias en el orden del centímetro que en una aplicación de inventario ambiental con exigencias en el orden del metro.

Para realizar la transformación se requiere determinar una serie de parámetros (traslaciones, cambios de escala, giros...) que se podrán derivar si se dispone de un conjunto de puntos cuyas posiciones son conocidas en ambos sistemas. Este conjunto de puntos debe poseer una disposición espacial adecuada tal que encierre el área de interés. Además su número debe ser tal que permita un ajuste estadístico adecuado, con suficiente redundancia.

Aquí es interesante introducir el concepto de datum quasi-WGS84. Con él nos referimos a puntos GPS cuyas coordenadas poseen todas un mismo orden de precisión (p.e. 10m). Por tanto no son coordenadas WGS84 precisas - lo cual supone un ahorro en trabajos de observación-. Así las cosas, se puede considerar que estas coordenadas están en un datum propio, y que éste se utilizará en todo el trabajo. Bajo las condiciones anteriores, se pueden aplicar y ajustar ecuaciones de transformación desde ese datum a cualquier otro.

En el cambio entre datums puede ocurrir que no se conozca la separación N o la altura H . Esto puede ser un problema en trabajos de gran precisión pero puede ser obviado en otros casos. Veamos esto con un ejemplo numérico; el orden de magnitud del error planimétrico que se introduce cuando se desconoce la separación es:

$$e = N z$$

donde:

e	Error posicional planimétrico (metros).
N	Separación (metros).
z	Ángulo entre normales (radianes).

Si se considera que $N = 100\text{ m}$ y $z = 20''$ segundos de arco, valores muy conservadores por exceso, el efecto de suponer $h = H$ en las coordenadas de longitud y latitud toma un valor de 1 cm ($e = 1\text{ cm}$).

Y para el caso de desconocer la altura:

$$e = H z$$

Tomando en este caso $H = 1000\text{ m}$, el orden de los errores está en 10 cm.

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

La obtención de la posición de un punto se ha realizado tradicionalmente mediante observaciones. Estas observaciones podían ser astronómicas o de tipo geodésico/topográfico, en las que, conocida la posición de un punto, mediante procedimientos geométricos se determinaba la posición del punto de interés. El sistema GPS consiste básicamente en lo mismo. Se determinan las coordenadas de puntos de interés mediante la observación de otros puntos, en este caso satélites, cuyas coordenadas son conocidas con gran precisión.

Existe una red de estaciones terrestres que se encargan de controlar el sistema formado por los 24 satélites GPS que orbitan a 20.200 km de altura sobre la Tierra. Esta red se encarga del seguimiento preciso y control de la posición de los satélites, y de las señales que emiten. Este sistema es capaz de predecir, con gran aproximación, la posición inmediata de cada uno de los satélites en sus trayectorias. De esta forma, si se envía dicha posición al satélite, y éste la difunde con su señal, se está dando su posición instantánea con gran precisión. Este conjunto de datos se denomina efemérides.

La observación GPS consiste en la obtención de ciertas informaciones que difunden desde los satélites GPS, y el uso de dicha información en cálculos. Los satélites GPS emiten en dos radiofrecuencias base que son 1575,42 MHz, equivalente a una longitud de onda de 19,05 cm, y 1227,60 MHz, que equivale a una longitud de onda de 24,45 cm. Estas frecuencias se denominan L1 y L2, respectivamente, y actúan como portadoras de toda la información que difunden los satélites.

La información que se inyecta a esas portadoras es diversa; sobre ellas van las efemérides y otras informaciones de interés, pero cabe destacar que, de forma modulada, se incorporan dos códigos binarios. Estos códigos se denominan C/A (código grosero de adquisición, *course acquisition*) y P (código de adquisición preciso, *precise code*). La longitud de las modulaciones de ambos códigos es de 300 m y de 30 m, respectivamente, lo que permite obtener unas resoluciones como las que se indican en la Tabla 3.

Tabla 3.- Errores de medida en función del tipo de medición		
	Longitud onda	Resolución aproximada
Código C/A	300 m	3 m
Código P	30 m	0.3 m
Fase	0.2 m	0.02 m

Dado que el sistema GPS es de origen militar, el código *P* puede ser encriptado, es decir, cifrado de tal manera que no pueda ser aprovechado por los receptores civiles. Por otra parte, el código C/A sólo se modula sobre la L1, mientras que el código P se monta sobre L1 y L2, con lo que se obtienen además las ventajas de un sistema de frecuencias dual.

El tiempo es la base fundamental del sistema GPS; por ello, los satélites y los receptores GPS disponen de relojes. Los relojes de los satélites son relojes atómicos de rubidio y de cesio, y por tanto de gran precisión. En los receptores existe gran variedad de relojes, siendo éste uno de los factores principales de coste de los equipos.

Si los relojes de los satélites y receptores estuvieran perfectamente sincronizados, conocido el momento de la emisión de un paquete de información por parte de un satélite (cosa que se hace a tiempos fijos), se podría conocer el retraso debido a la distancia satélite-punto de observación y, con ello, determinar la posición de ese punto.

Posicionamiento GPS en código

Es la forma más elemental de posicionarse. Se suele realizar con los códigos C/A que van sobre la portadora L1. El receptor tiene que recibir la señal de los satélites, escuchar los mensajes incluidos en L1 y leer el código de cada uno de ellos. Es decir, obtener la información de tiempo.

Por otra parte, cada receptor tiene un sistema que le permite generar los mismos códigos que genera el satélite, por lo que puede deducir el retraso que ha sufrido la señal desde el satélite al punto de observación y, con ello, la distancia entre ambos⁵. La observación a un satélite GPS determina una esfera de posibles soluciones, la observación a dos satélites GPS un círculo de posibles soluciones y la observación a tres satélites GPS un único punto como solución posible (Figura 8).

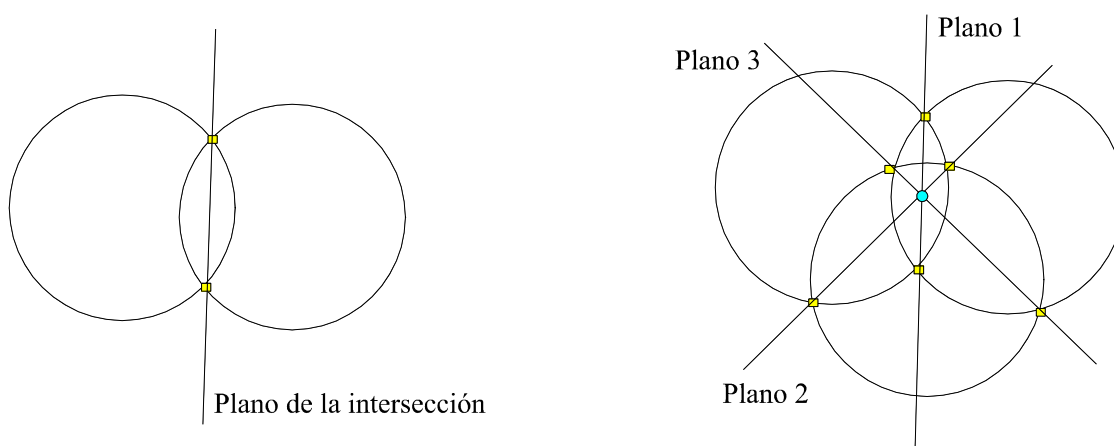


Figura 8.- Principio geométrico de la determinación de la posición con GPS

Según lo anterior, para deducir la posición X,Y,Z de un punto basta con hacer una trilateración, es decir, con recibir tres satélites GPS. No obstante, dado que los relojes del receptor y del satélite no están sincronizados, aparece una nueva incógnita, desfase de sincronización, y por ello hace falta un mínimo de cuatro observaciones simultáneas a los satélites GPS.

Las fuentes de error en este proceso son (Langley, 1997):

- ⊃ Errores de efemérides: Son las diferencias entre las posiciones reales y las radiadas en las efemérides. Aquí también se pueden incluir los errores de reloj de satélite. El orden es de 3-4 m.
- ⊃ Retardos: Se refiere a la diferencia en la velocidad de transmisión de las ondas entre la asumida y la real para unas condiciones atmosféricas concretas. Se consideran dos componentes de retraso, el ionosférico y el troposférico. Los retrasos ionosféricos son difíciles de modelizar, pero se pueden corregir en observaciones con dos frecuencias. En el caso de observaciones con una frecuencia se estima que el valor

⁵ Se supone que la velocidad de la propagación de las ondas es la de la luz.

está en el orden de 7 m. Los retrasos troposféricos se deben a las condiciones de presión, humedad y temperatura. Su aportación como fuente de error está en el orden de 1 m, y su modelización es más compleja que la de los errores ionosféricos.

- Multicamino: Rebote de las ondas del satélite y llegada por caminos no directos a la antena receptora. Su valor puede ser muy diverso y debe minimizar mediante la selección del sitio de observación.
- Ruido del receptor: Errores aleatorios en las medidas del sistema de recepción, están en el orden de 1,5 m.

Además, como ya se ha avanzado, las transmisiones de los satélites GPS pueden verse afectadas por la introducción selectiva de ruido (error) por parte del propietario del sistema.

La composición de los errores anteriores y de los debidos a la disponibilidad selectiva permiten acotar los errores a 100 m en posicionamiento horizontal y 150 m en posicionamiento vertical.

Una forma de mejorar las exactitudes de las observaciones GPS es mediante la aplicación de métodos de observación diferencial. Estos se basan en utilizar dos o más receptores y determinar las posiciones relativas de los puntos observados.

Las ventajas de este método provienen de que si los puntos que se observan están relativamente cercanos, los errores existentes en las observaciones serán prácticamente los mismos. Sólo el ruido debido al multicamino no estará correlado de un punto de observación a otro.

Para utilizar esta metodología hace falta disponer de un punto de coordenadas conocidas en WGS84 sobre el que se establece lo que se denomina estación de referencia. Puesto que sus coordenadas son conocidas, se podrá calcular la corrección que hay que introducir en las observaciones realizadas en el mismo para obtenerlas. Estas correcciones se aplican a los demás puntos que se están observando. De esta forma se alcanzan exactitudes de 1-5 m.

El método diferencial expuesto se puede aplicar en posproceso o en tiempo real. En el último caso se necesita un radio enlace para transmitir las correcciones desde la estación de referencia al resto de los equipos.

Posicionamiento GPS en fase

Como ya se ha indicado, las portadoras L1 y L2 poseen unas longitudes de onda de 19.05 y 24.45 cm lo que, mediante observaciones precisas de desfases, permite obtener precisiones posicionales centimétricas.

La observación que se realiza en este caso consiste en medir el desfase existente entre una señal (onda) creada en el receptor y la recibida desde los satélites de la constelación. Si la generación de la señal en el receptor se considera perfectamente sincronizada con la que genera cada uno de los satélites, el desfase existente entre ambas será consecuencia de la distancia recorrida por la señal. Este desfase se compone de un cierto número entero de longitudes de ondas (ambigüedad entera) y de un fracción de la longitud de onda.

De esta forma, mediante complejos procesos de cálculo sobre las observaciones desarrolladas en un lapso de tiempo suficientemente largo, se puede determinar tanto la ambigüedad entera como el desfase, alcanzando precisiones centimétricas. El tiempo de observación es pues el parámetro fundamental en esta opción de trabajo. Si se trabaja con métodos diferenciales los tiempos de observación serán menores cuanto menor sea la línea base formada por los receptores.

Si la línea base es muy grande, se suele incorporar la medición en L2 al objeto de poder corregir adecuadamente el efecto de retardo ionosférico.

Resumen de métodos y Precisiones GPS

A modo indicativo, las Tablas 4, y 5 presentan un resumen de precisiones que se pueden alcanzar actualmente con equipos GPS en función del método de trabajo. Los fabricantes de equipos suelen dar información específica al respecto para cada uno de sus productos (por ejemplo, Leica 1996).

Tabla 4.- Tiempo de observación para latitudes medias, equipos bifrecuencia			
Nº Satélites (GDOP < 8)	Longitud líneas base	Tiempo de observación	
Estático rápido			
4 ó 5	Hasta 5 km	5 a 10 minutos	5 minutos
4 ó 5	5 a 10 km	10 a 20 minutos	5 a 10
4 ó 5	10 a 15 km	> 20 minutos	5 a 20 minutos
Estático			
4 ó 5	15 a 30 km	1 a 2 horas	1 hora
4 ó 5	> 30 km	2 a 3 horas	2 horas
		Día	Noche

Tabla 5.- Precisiones según método de trabajo		
	Fase diferencial	Código diferencial
Modo	L1 + L2	
Estático	5 mm + 1 ppm	30-50 cm
Cinemático	10-20 mm + 1 ppm	50-100 cm
Stop & Go	10-20 mm + 1 ppm	50-100 cm

PROYECCIONES

Las proyecciones cartográficas permiten trasladar las posiciones de los elementos de la realidad, situados sobre una esfera o elipsoide, a un papel o cualquier otro medio plano de representación (Figura 9).

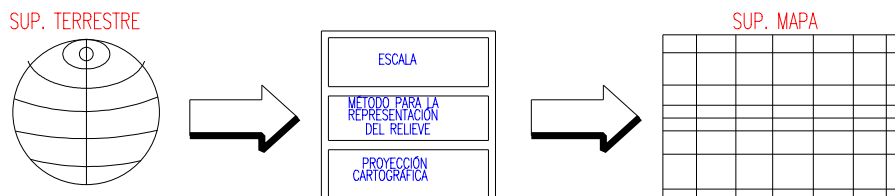


Figura 9.- Propósito de las proyecciones

Lo anterior no puede realizarse sin la ayuda de proyecciones salvo en el caso de la representación de pequeñas superficies pues, de lo contrario, la esfericidad terrestre afectará notablemente. En cuanto la superficie a representar supera unas determinadas dimensiones, el uso de las proyecciones se hace inevitable para que las deformaciones que se produzcan se minimicen en lo posible, pues nunca desaparecerán del todo.

Las proyecciones toman como partida una forma analítica - esfera o elipsoide, según la simplificación que se establezca -, desde la que se proyecta hacia el plano del papel. Así pues, cualquier medida de distancia, superficie o ángulo que se obtenga sobre la superficie de la Tierra se reducirá, en último extremo, a la medida sobre la superficie del elipsoide, o la esfera, para proyectarla posteriormente al plano de representación.

Matemáticamente se demuestra la imposibilidad de establecer una relación entre la superficie de la esfera (elipsoide) y la superficie del plano. Incluso de forma empírica, si se intenta desarrollar la superficie de una pelota, o cualquier otro elemento esférico, sobre una superficie plana se advierte que es imposible sin que en el proceso se produzcan desgarraduras o pliegues en la superficie esférica.

Esta incompatibilidad de superficies conlleva que no se puedan mantener todas las propiedades geométricas (distancias, ángulos, superficies) medidas en la esfera (elipsoide) en su representación plana. De esta forma, en las representaciones planas se intentará mantener alguna propiedad geométrica, aunque siempre en detrimento de las otras. En algunos casos se partió de una construcción geométrica pura, en otros, de construcciones obtenidas de forma empírica para la solución de alguna inquietud particular del hombre de la época. Desde las matemáticas se ha investigado en la obtención de ecuaciones que establecieran estas relaciones entre la esfera, o el elipsoide, y el plano. De hecho, en la actualidad se conocen alrededor de 400 proyecciones, algunas de ellas son geométricas y otras analíticas. En ellas la correspondencia sólo se establece por un par de ecuaciones de la forma:

$$x=f(j,l); \quad y=f(j,l)$$

Como puede entenderse, con las funciones analíticas se puede perder el sentido geométrico de proyección, pero ello lleva a una definición más amplia del término; según Robinson y col. (1997) una proyección es toda representación de cualquier objeto sobre una superficie distinta a la propia del objeto en sí.

Proyección UTM

Según Decreto 2303/1970, de 16 de Julio de 1970 (BOE, 24 de Agosto de 1970) es obligatoria para la cartografía oficial en España, por lo que interesa conocer los aspectos básicos de la misma.

Está basada sobre en las proyecciones de Gerhard Kremer (sg. XVI) y Gauss (sg. XVIII). Básicamente se trata de la versión transversa, o meridiana, de la proyección de Mercator, de ahí su nombre Universal Transversa de Mercator o UTM (el carácter universal de esta proyección se verá más adelante). Al igual que aquella, se trata de una proyección conforme, donde el cilindro se coloca con el eje situado sobre el plano del Ecuador, por lo que será tangente no al Ecuador, como en el caso de la Mercator, sino a un meridiano, que puede ser el meridiano origen o cualquier otro.

En la representación, este meridiano, conocido como meridiano central de la proyección, va a conservar las propiedades del esferoide, es decir, va a ser automecóico, y las deformaciones van a crecer conforme se aleje del meridiano de tangencia hacia el Este y hacia el Oeste en el sentido de la longitud. En consecuencia, esta proyección ha sido recomendada para la representación de países que se extienden a lo largo de un meridiano, como por ejemplo Chile o Argentina. No obstante, la utilidad que tiene esta proyección debido a su conformidad y como aplicación a problemas geodésicos, la hace recomendable para la representación de casi todos los países del globo, exceptuándose aquellas zonas situadas a $\pm 80^\circ$ de latitud, en las que debe complementarse con la proyección estereográfica polar (UPS.)

La proyección UTM emplea un artificio que consigue disminuir las deformaciones o hacerlas casi insignificantes para casi todos los puntos del globo (con la excepción antes comentada de las zonas polares), dotándola de su carácter universal. Consiste en considerar husos de 6° de amplitud colocando cilindros tangentes al meridiano central de cada huso. Para cubrir toda la Tierra con este intervalo, serán necesarios 60 cilindros, que darán lugar, cada uno de ellos, a su propio desarrollo. En todos se empleará el mismo sistema y las mismas ecuaciones de transformación de la superficie elipsoidal a la superficie plana. Las deformaciones que se producen ahora no son elevadas debido a que cada proyección representa una amplitud en longitud de 6° , no considerándose la parte de la proyección que excede de ella.

Los husos se numeran desde el 1 al 60, partiendo del meridiano con una longitud de 180° , es decir, el antimeridiano de Greenwich, en sentido de Oeste hacia el Este. A España peninsular le corresponden los husos 29, 30 y 31, y a las Islas Canarias los husos 27 y 28. Los meridianos centrales de los husos 29, 30 y 31 son el 9° W, 3° W, 3° E, respectivamente. Andalucía se encuentra entre los husos 29 y 30, pero mayoritariamente en este último (Figura 10).

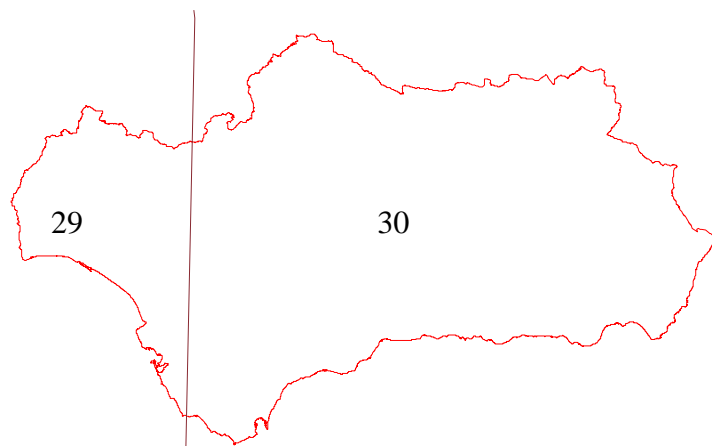


Figura 10.- Husos UTM en Andalucía

A modo de conclusión las características de la proyección Universal Transversa de Mercator para cada huso son las siguientes:

- ▢ Se trata de una proyección conforme.
- ▢ La representación del meridiano central es automecoica.
- ▢ Sobre la esfera (o elipsoide) se toma el meridiano central como origen de longitudes y el Ecuador como origen de latitudes.
- ▢ En el plano la transformada del meridiano central es el eje de ordenadas (Y), y la transformada del Ecuador es el eje de abscisas (X).

El sistema de coordenadas establecido en el plano UTM es el siguiente:

- ▢ El eje de ordenadas (Y) lo forma la transformada del meridiano central del huso, desplazado 500 Km al Oeste para evitar las coordenadas negativas.
- ▢ El eje de abscisas (X) lo forma la transformada del Ecuador.

Por ello, para proporcionar las coordenadas de un punto en el sistema UTM, primero se ha de mencionar el huso en el que se encuentra dicho punto.

Debido a que cada huso en la proyección UTM tiene una extensión de 6° en longitud, el territorio español se encuentra dividido en varios husos, lo cual rompe la uniformidad en el sistema de referencia plano. Como en cada huso se establece el sistema de coordenadas correspondiente, esto supone un problema dado que no se pueden relacionar puntos en distintos husos si no es mediante la expresión de sus coordenadas geográficas o mediante el cálculo de la transformación de coordenadas de un huso a otro.

Para soslayar parcialmente lo anterior en las zonas vecinas, existe un cierto solape entre huso y huso. En las latitudes correspondientes a España este solape es de $30'$. En estas zonas de solape se determinan las coordenadas UTM de cualquier punto, en los dos husos, formando lo que se conoce como cuadrículas de solapadas. En el caso de Andalucía, es común referir toda la información territorial al huso 30.

TRANSFORMACIONES

Las funciones polinómicas son una herramienta muy usual para transformar coordenadas desde un sistema a otro. Este tipo de transformaciones se vienen utilizando profusamente en paquetes de cartografía y CAD, y permiten el registro y georreferenciación de imágenes, la calibración de tableros digitalizadores, escáneres, etc. Su aplicación para la conversión de coordenadas entre sistemas de proyección también es posible. No obstante, conviene advertir que el uso de estas transformaciones no siempre asegura la posibilidad de pasar adecuadamente de un sistema a otro; para que esto sea posible debe existir una cierta "compatibilidad" entre los sistemas de coordenadas en los que se trabaja.

Definamos r como el ratio de los factores de escala K_A y K_B relativos a dos proyecciones A (proyección objetivo) y B (proyección de partida):

$$r = \frac{K_A}{K_B}$$

El aspecto de mayor importancia en este sentido es la variación de r en el área de interés. Si r es más o menos constante en el área de trabajo, las dos proyecciones tendrán una geometría próxima y, por ejemplo, podrá aplicarse una transformación de similitud.

Si el área es grande o la proyección presenta grandes cambios de factor de escala, se puede considerar la existencia de un rango de valores: $[r_{min}, r_{max}]$ y por ello la aplicación de un valor intermedio r_{medio} que originará unas discrepancias tales como:

$$e = D \left(\frac{r_{max}}{r_{min}} - 1 \right)$$

donde D es la distancia entre dos puntos de control o el tamaño de la zona donde se aplica el factor de escala incorrecto.

Traslación

Es la transformación más elemental, supone simplemente un desplazamiento de los puntos que están en el sistema B para alcanzar las posiciones del sistema A. Su planteamiento matemático es:

$$\begin{aligned} X &= x + a_0 \\ Y &= y + b_0 \end{aligned}$$

donde:

a_0, b_0 Constantes de desplazamiento sobre los ejes X e Y.

Este tipo de transformación elemental no suele ser muy aplicado, aunque hay algunos casos de interés, por ejemplo cuando en la proyección UTM, para una zona concreta, se decide quitar el dígito de los millones en la coordenada Y para facilitar el almacenamiento en un sistema CAD con limitaciones. Asumiendo ciertas

simplificaciones, otro caso posible es el paso de coordenadas de un sistema local a otro global, por ejemplo:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS84} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{Local}$$

En este caso $(DX, DY, DZ)^T$ es el vector de desplazamientos.

Cambio de escala

Se trata de otra transformación elemental por la que las coordenadas de origen sufren un cambio de escala, es decir, un aumento o disminución de sus dimensiones y valores. Su planteamiento matemático es:

$$\begin{aligned} X &= a_1 x \\ Y &= b_1 y \end{aligned}$$

donde:

a_1, b_1 Factores de escala que afectan a las componentes x e y de los datos originales.

Al igual que el caso anterior, se trata de una transformación elemental. Por si sola no suele ocurrir pues físicamente siempre aparece ligada a traslaciones y pequeños giros. No obstante, desde un punto de vista teórico es la que rige procesos como las ampliaciones o reducciones de escala en los procesos analógicos.

Transformación de similitud

Supone conjugar las dos transformaciones anteriores pero con cierta limitación en el comportamiento geométrico puesto que sus parámetros ligán lo que ocurre sobre los dos ejes coordenados. También se denomina transformación bidimensional conforme. Necesita de dos puntos conocidos, preserva la forma y supone un cambio de escala, una rotación y una traslación. Su planteamiento matemático es:

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1 x + a_2 y \\ Y &= b_0 + b_1 x + b_2 y \end{aligned}$$

$$\text{Con: } a_1 = b_2; b_1 = -a_2$$

Esta transformación supone un cambio de escala cuyo factor es $K = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$, una rotación cuyo ángulo de giro vale $\tan \alpha = \frac{a_1}{b_1}$, y unas traslaciones horizontal y vertical de valores a_0 y b_0 , respectivamente.

Esta transformación se denomina de similitud, o de cuatro parámetros, y es equivalente al proceso físico que se produce en una ampliación o reducción de un original analógico, por lo tanto es más adecuada que cualquiera de las dos transformaciones previamente expuestas, que sólo se incluyeron con una motivación didáctica.

Transformación afin bidimensional

Similar a la anterior pero incluye factores de escala distintos en las direcciones X e Y. Por ello supone la incorporación de dos parámetros más, con lo que se posibilita considerar un comportamiento más independiente de las componentes X e Y. En este caso la transformación se formula:

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1 x + a_2 y \\ Y &= b_0 + b_1 x + b_2 y \end{aligned}$$

Su aplicación supone un cambio de escala para cada componente:

$$K_x = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \qquad K_y = \sqrt{a_2^2 + b_2^2}$$

Un giro:

$$\tan \alpha = \frac{a_1}{a_2} = \frac{b_1}{b_2}$$

Y un factor de afinidad entre los dos sistemas dado por:

$$F_a = \frac{K_x}{K_y}$$

Se trata pues de una transformación de seis parámetros que permite corregir la presencia de ciertas distorsiones no homogéneas como son las modificaciones dimensionales de los mapas en papel cuando se digitalizan, las distorsiones debidas a la no ortogonalidad entre ejes cuando se toma una imagen de satélite, se escanea, se fotocopia, etc.

Transformación de Molodenski

La transformación de Molodenski permite calcular directamente en coordenadas geográficas el cambio entre dos sistemas de referencia cuando únicamente se considera la existencia de desplazamientos relativos entre ambos sistemas.

$$\begin{aligned} d\mathbf{j}'' &= (-dX \sin \mathbf{j} \cos \mathbf{l} - dY \sin \mathbf{j} \sin \mathbf{l} + dZ \cos \mathbf{j} + [a \, df + f \, da] \sin 2\mathbf{j}) / r \sin \mathbf{l}'' \\ d\mathbf{l}'' &= (-dX \sin \mathbf{l} + dY \cos \mathbf{l}) / (u \cos \mathbf{j} \sin \mathbf{l}'') \\ dh &= dX \cos \mathbf{j} \cos \mathbf{l} + dY \cos \mathbf{j} \sin \mathbf{l} + dZ \sin \mathbf{j} + (a \, df + f \, da) \sin^2 \mathbf{j} - da \end{aligned}$$

donde:

dX, dY, dZ	Desplazamientos en las componentes X, Y y Z.
ρ, v	Radio de curvatura para la latitud ϕ sobre el elipsoide de partida.
da	Diferencia entre los semiejes mayores de los dos elipsoides ($a_{llegada} - a_{partida}$).
df	Diferencia entre los aplastamientos de los dos elipsoides ($f_{llegada} - f_{partida}$).

Transformación 3D de 7 parámetros

La transformación 3D de 7 parámetros se conoce en el ámbito de la geodesia como Helmert 3D (también denominada como Bursa Wolf). Esta es la transformación más

adecuada para el paso entre dos sistemas geocéntricos. La formulación matemática es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \Delta \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{e}_z & -\mathbf{e}_y \\ -\mathbf{e}_z & 0 & \mathbf{e}_x \\ \mathbf{e}_y & -\mathbf{e}_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

donde:

T_x, T_y, T_z	Traslaciones.
$\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$	Rotaciones.
Δ	Factor de escala.

Polinomios de segundo orden y superior

Las transformaciones polinómicas de este tipo se utilizan cuando uno de los sistemas presenta falta de homogeneidad en orientación o escala. Dependiendo del grado de variabilidad en la distorsión, la aproximación puede realizarse polinomios de segundo o tercer grado, e incluso superiores. Por tanto, se pueden considerar como un caso más general que las transformaciones anteriores. Se incluyen los efectos de segundo grado, o superior, tanto en las variables independientes como de manera conjugada.

La formulación para un ajuste de segundo grado es:

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2 + a_5 xy \\ Y &= b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 y^2 + b_5 xy \end{aligned}$$

Desde un punto de vista físico, este tipo de polinomios son adecuados para corregir datos de escáneres y de sensores remotos pues son capaces de gestionar distorsiones de segundo orden como las causadas por el cabeceo, aleteo, rotación terrestre, etc., de una imagen de satélite.

En POSC (2000) se presentan algunos ejemplos de uso de este tipo de formulaciones utilizadas por agencias cartográficas y en la industria del petróleo.

Consideraciones generales sobre los métodos de transformación polinómica

La utilización de series emparejadas de puntos para la obtención empírica de los ajustes comentados anteriormente debe realizarse con ciertas precauciones y consideraciones.

En primer lugar conviene aclarar que la distribución de puntos debe ser tal que cubra toda la zona, lo cual significa rodearla, formando un cerramiento convexo de la zona de interés. Pero con lo anterior no basta, si la zona es suficientemente extensa, también harán falta puntos en su interior. Desde el punto de vista de los cálculos, es conveniente reducir el número de dígitos con los que se trabaja para evitar problemas de inestabilidad numérica en el cálculo (POSC, 2000).

El número N de puntos necesarios para determinar todos los coeficientes del polinomio es de $N = (g+1)(g+2)/2$, donde g es el grado del polinomio. Cuando el número de puntos es igual al número de incógnitas en la expresión polinómica, el sistema trabaja

como interpolador (no hay error en los puntos), cuando el número de puntos de control es superior al de incógnitas, los coeficientes del polinomio son aproximaciones estadísticas obtenidas por regresión mínimo cuadrática, existen $F = N - (g+1)(g+2)/2$ grados de libertad y errores residuales en cada uno de los puntos de control utilizados. Se suele recomendar utilizar en los ajustes un número de puntos que sea de dos a tres veces el número mínimo marcado por el grado del polinomio. Cuanto mayor sea el orden del polinomio, mayor capacidad del mismo de modelar comportamientos complejos, como ocurre con los polinomios bivariados.

Tabla 6.- Mínimo número de puntos según el grado del polinomio										
Grado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo de puntos	3	6	10	15	21	28	36	45	55	66

Un aspecto de gran interés práctico es saber qué tipo y grado de polinomio utilizar en las transformaciones. Para esta pregunta no existe una regla aplicable, siendo el método de prueba y error el más adecuado para tomar una decisión.

BIBLIOGRAFÍA Y RECURSOS

ARIZA, F.J. (2002). Calidad en la Producción Cartográfica. Ra-Ma, Madrid.

IGN (2002). Red geodésica Nacional Mediante Técnicas Espaciales (REGENTE). En Boletín Informativo del Instituto Geográfico Nacional. Enero-Marzo 2002, nº 9.

ILIFFE, J.C. (2000). *Datums and Map Projections for Remote Sensing, GIS and Surveying*. Whittles Publishing, CRC Press.

LANGLEY, R.B. (1997). The GPS error budget. *GPS World* 8(3), 51-56.

LEICA, (1996). *Equipo GPS, Manual de Uso*. Leica, Heerbrugg (Suiza).

POSC (2000). Epicentre Usage Guide. Geographic Coordinate System Transformations. POSC Specifications Version 2.2. <http://www.posc.org>.

REGIDOR, J. (2003). Comunicación personal.

REGIDOR, J. Y col. (2001). *El Proyecto REGENTE. En Topografía y Cartografía*. Vol XVIII, nº 105, pp. 4-10.

ROBINSON, H. y col. (1987). *Elementos de Cartografía*. Omega. Barcelona.

SEEBER, G., 1993. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods & Applications*. Walter de Gruyter, Berlin New York, 531pp.

SEVILLA, M.J. (1995). *Modelo Digital representativo las ondulaciones del Geoide*. <http://www.eosgis.com/IBERGE095.html>.

SIMEK, J. KOSTELECKY, J. (2001). *Datums y Red Geodésica Europeos modernos*. En Topografía y Cartografía, Vol XVIII, nº 103, pp. 30-40.

GPS, GLONASS y GALILEO

<http://www.gpsworld.com/gpsworld/>

<http://www.rssi.ru/SFCSIC/english.html>

<http://www.esa.int/export/esaCP/index.html>

http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/index_en.htm

ITRF, ETRF y WGS84

<http://www.wgs84.com/>

<http://www.iers.org/>

<http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/>

<http://www.epncb.oma.be/papers/euref93/igsuse.html>

<http://www.euref-iag.org/>

PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS

http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/mapproj/mapproj_f.html

<http://www.geography.hunter.cuny.edu/mp/>

<http://mac.usgs.gov/mac/isb/pubs/MapProjections/projections.html>