

IMPLEMENTACION INTEGRADA EN EL SIG DE LOS DIVERSOS TIPOS DE TRANSFORMACIONES DE DATUM.

Lluís Pesquer Mayos
Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAM
Edifici C, Universitat Autònoma de Barcelona UAB E-08193 Bellaterra.
l.pesquer@creaf.uab.cat

Xavier Pons Fernández
Departament de Geografia, Universitat Autònoma de Barcelona, UAB
Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAM

Joan Masó Pau
Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAM

Palabras clave: SIG, sistema de referencia, datum, ETRS89.

Resumen

Este trabajo plantea la problemática que supone para un Sistema de Información Geográfica (SIG) de propósito general, la convivencia de diversos métodos de transformación de datum; principalmente, por desplazamientos y/o rotaciones+escalado de coordenadas geocéntricas (Molodensky o Bursa-Wolf), junto a las rejillas de desplazamientos de coordenadas geográficas como la que proporciona el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España entre ED50 y ETRS89 en formato NTv2, o incluso otros métodos más particulares.

Las especificidades de la implementación de estos algoritmos geodésicos en un SIG es la principal aportación de este trabajo. En resumen, el SIG debe ser capaz incorporar a sus propias metodologías, los procedimientos y soluciones que ofrece la Geodesia, con la misma rigurosidad y precisión que ésta le proporciona, pero a la vez, no debe renunciar a sus propias características, algunas de las cuales le han permitido llegar incluso a un público no especializado. La solución que adopte el SIG debe proporcionar un diseño adecuado que enlace de forma natural con sus propios métodos, por ejemplo: procesos de estructuración topológica, superposición de capas en mismos o distintos sistemas de referencia, metodologías de análisis espacial, generación de metadatos estandarizados, etc. y, a la vez, una implementación que sea útil, comprensible y eficiente para el usuario de SIG, muchas veces no familiarizado con los conceptos y algoritmos del ámbito de la Geodesia.

Los autores exponen algunas reflexiones sobre estas cuestiones, los principales obstáculos que han debido salvar y detallan la solución finalmente adoptada. En esta solución se incluye la implementación de la transformación de la cartografía oficial del IGN e ICC (Institut Cartogràfic de Catalunya), actualmente en ED50, a ETRS89, todavía poco extendida en los entornos SIG a pesar de su inminente necesidad según las directivas de los estándares europeos.

Abstract

This article examines the problem posed for a general purpose Geographic Information System (GIS) by the coexistence of several datum transformation methods, mainly by shifts and/or rotations+scale of geocentric coordinates (Molodensky or Bursa-Wolf) together with the shift grids of geographic coordinates such as that provided by the National Geographic Institute (IGN) of Spain between ED50 and ETRS89 in NTv2 format or even more unusual methods.

The specificities of the implementation of these geodesic algorithms in a GIS are the main contribution of this study. In short, the GIS should be able to incorporate the procedures and solutions offered by Geodesy into its own methodologies with the same rigor and precision that this discipline provides, but at the same time it should not relinquish its own characteristics, some of which have even allowed it to reach a non-specialized public. The solution adopted by the GIS should provide a suitable design which links naturally with its own methods, for example: topological structuring processes, overlaying of layers in the same or different reference systems, spatial analysis methodologies, generation of standardized metadata, etc. and, at the same time, an implementation that is useful, comprehensible and efficient for the GIS user, who is often unfamiliar with the concepts and algorithms of geodesy.

The authors put forward a number of thoughts on these issues, the main obstacles that they have had to overcome and give details of the solution that was finally adopted. This solution includes the implementation of the transformation of the official cartography of the IGN and the ICC (Cartographic Institute of Catalonia), today in ED50, to ETRS89, a method that is still relatively uncommon in the field of GIS despite the fact that it will soon be necessary according to European standards directives.

Introducción

1.1. Especificidades de transformación geodésica multifuncional en un contexto SIG

Desde funcionalidades tan básicas en un SIG como la visualización en superposición de distintas capas georeferenciadas (Laurini [1]), usos tan extendidos hoy en día como la incorporación de puntos adquiridos desde un GPS, hasta determinados estudios más complejos de análisis multivariante o multicriterio (Burrough [2]) necesitan de procedimientos rigurosos de transformación entre las distintas bases cartográficas implicadas cuando éstas provienen de distintas fuentes con sistemas de referencia no comunes.

A pesar de que cada una de las transformaciones específicas asociadas a concretos cambios de sistemas de referencia está ya perfectamente resuelta por los especialistas en Geodesia en un determinado contexto geográfico, no abundan las implementaciones que abarquen en su conjunto las distintas posibilidades que nos ofrece la extensa casuística de sistemas de referencia. Por ejemplo existen aplicaciones que transforman coordenadas de forma precisa entre el datum ED50 y el datum ETRS89 (García-Asenjo [3]), pero en la gran mayoría de software SIG la reproyección de una capa (transformación más compleja que una simple repetición de transformaciones de pares de coordenadas) entre estos mismos sistemas se hace mayoritariamente de forma imprecisa a determinadas escalas de detalle (a partir de 1:5000) al asimilar, como equivalentes, ETRS89 y WGS84. Pero lo que todavía es menos extendido es la posibilidad de que un mismo entorno permita transformar una capa de un sistema S_1 a un sistema S_2 por un determinado método y de S_3 a S_4 a través de un método muy distinto, y sin embargo, que ambos usen aparentemente el mismo procedimiento, es decir, aparezcan bajo una lógica general común.

Este último requisito no debería parecer un simple peaje a la comodidad. En efecto, es importante recordar la extensa y variada tipología del usuario SIG, por ejemplo experto en métodos estadísticos pero inexperto en geodesia, o experto en análisis espacial pero ajeno a métodos fotogramétricos, etc; y, en cambio, uno de los principales éxitos del SIG ha sido posibilitar el uso de una gran variedad de métodos muy especializados a cualquier usuario con unos conocimientos generalistas, pero no necesariamente especialista en cada una de dichas materias. Para la gran mayoría de usuarios SIG no existen diferencias significativas entre una conversión de datum entre ED50 y WGS84 frente a una conversión entre ED50 y ETRS89, pero en cambio para los especialistas en Geodesia, en el primer caso es necesario una transformación analítica por Molodensky o Bursa-Wolf y en el segundo caso realizar una consulta interpolada a un fichero de desplazamientos entre coordenadas geográficas entre ambos datums. Probablemente, para un *software* dirigido a especialistas en Geodesia no es necesario un esfuerzo de unificación, el especialista ya sabrá en cada momento cual es la herramienta específica a usar, dadas las características de una determinada transformación, pero para un usuario SIG es fundamental que todos estos procesos estén agrupados bajo un mismo entorno que además le asesore en los parámetros asociados a cada transformación.

Una última característica igualmente fundamental es que este módulo de transformación tenga las mismas características formales que otras muchas herramientas del SIG, use formatos de datos comunes, sea coherente con un tratamiento integrado de los metadatos, use una interfaz común, etc., en fin, que no sea un módulo extraño al resto del SIG.

Los autores de este trabajo forman parte del equipo de desarrolladores del software MiraMon (Pons [4]), localizado en el contexto universitario y tecnológico de un Centro de Investigación (CREAF). Por consiguiente, la validez de dicha solución puede ser contrastada por la comunidad de sus usuarios, pertenecientes a diversos ámbitos geográficos y por lo tanto con una amplia diversidad de particularidades, así como procedentes de diversos orígenes académicos y profesionales. En este trabajo se expone la solución finalmente adoptada en su conjunto, aunque, en realidad, este proceso ha tenido dos etapas de implementación y desarrollo. En la primera parte se implementaron las transformaciones no singulares; esta parte ya está ampliamente verificada. En una reciente segunda parte se está implementando el grupo más heterogéneo de transformaciones singulares, que incluyen la transformación precisa por rejilla de desplazamientos de ED50 a ETRS89. La discusión pública de los métodos expuestos en este artículo y el uso diario de su implementación corroborarán su validez o implicará la corrección de algunos de sus aspectos.

1.2. Puntualizaciones previas

En todo este artículo se usa el término sistema de referencia como acepción de Sistema de Referencia Horizontal cartográfico (SRH), o sea la componente horizontal del CRS (*Coordinate Reference System*) según la denominación de EUREF [5]. Nuestra preferencia por la denominación Sistema de Referencia sobre Sistema de Coordenadas se origina en la implementación de Metadatos según las directivas estándares (ISO 19115:2003 [6]).

No forman parte de este trabajo los cambios de Sistema de Referencia Vertical (SRV), ni se analizan sistemas de referencia que no sean cartográficos. Para su implementación práctica, un SRH consta de dos elementos principales: la proyección y el datum que a la vez tienen sus elementos secundarios asociados: la proyección sus

parámetros específicos y el datum, el elipsoide y sus parámetros propios de definición (habitualmente 3 o 7 parámetros respecto a WGS84, Marqués [7]). La implementación concreta de este esquema jerárquico está explicada en el presente trabajo en la sección 2.2.

1.3. Tipos de transformaciones de sistema de referencia:

Para resolver de forma unificada la diversidad de tipos de transformaciones de sistema de referencia es necesario analizar detalladamente las distintas tipologías. Podemos clasificarlas en primer lugar como:

- Transformaciones elementales:
 - Reproyección pura: Transformación de un sistema de referencia S_1 a otro S_2 donde únicamente difieren en la proyección y en cambio son coincidentes en datum y elipsoide. Por ejemplo de *UTM 31N a Lambert Cónica Conforme ZonaIII* (ambos con datum coincidente ETRS89).
 - Cambio de parámetros de proyección: Es un caso particular de reproyección donde las proyecciones son coincidentes (también sus datums) pero no sus parámetros: Por ejemplo de *UTM 31N a UTM 30N*.
 - Cambio de datum puro: Transformación de un sistema S_1 a otro S_2 donde únicamente difiere el datum: Por ejemplo de *UTM 31N-WGS84 a UTM 31N-ED50*.
 - Cambio de elipsoide: Transformación de un sistema de referencia S_1 a otro S_2 donde únicamente difieren en el elipsoide de referencia, incluido un cambio de modelo elipsoidal a esférico o viceversa. Por ejemplo *latitud/longitud ED50 con modelo elipsoidal International 1924 a latitud/longitud ED50 con modelo esférico Normal Sphere of radius 6370997*.
 - Cambio de parámetros de datum: Caso singular del cambio de datum donde los datum origen y destino son coincidentes pero los parámetros que se aplican son distintos. Habitualmente estos parámetros son los referidos a las transformaciones Bursa-Wolf o Molodensky respecto a WGS84. En el esquema que presentamos correspondería a un cambio de datum dentro de un mismo grupo. Por ejemplo si se dispone de distintas parametrizaciones de ED50, corresponde a un cambio entre alguna de ellas. *UTM-30N-PS* (3 parámetros respecto a WGS84 que proporciona MADTRAN [8]) a *UTM-30N-ED50/IGN* (7 parámetros que proporciona el IGN [9]).
- Transformaciones combinadas:

Cualquier combinación de 2 o más de los anteriores cambios elementales. Por ejemplo la transformación de *UTM 31N-ED50 a Lambert Cónica Conforme ZonaIII-NTF* correspondería a un cambio combinado de proyección (y por extensión parámetros de proyección) de UTM a Lambert Cónica Conforme y de datum (y por extensión de parámetros del datum) de ED50 a NTF y sus correspondientes elipsoides asociados, de *Hayford* y *Clarke* respectivamente.

Las transformaciones elementales o combinadas donde esté implicado un cambio de datum podemos a la vez clasificarlas como:

- Transformaciones estándar:

Transformaciones por matrices de desplazamiento sin/con rotación+escalado a partir de parámetros definidos respecto a un datum único de referencia (en nuestro caso WGS84). Estos parámetros aplican a coordenadas geocéntricas.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(T)} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(S)} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -R_z & R_y \\ R_z & 0 & -R_x \\ -R_y & R_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(S)} + D \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(S)}$$

(T) Target Datum
 (S) Source Datum
 T_x, T_y, T_z geocentric X/Y/Z translations [m]
 R_x, R_y, R_z rotations around X/Y/Z axis [radian]
 D correction of scale [ppm]

Remark: the rotations R_x, R_y, R_z must be small

Figura 1: Transformación de Bursa-Wolf de 7 parámetros. Fuente EUREF [5].

- Transformaciones singulares: Por simple oposición al caso anterior, podemos incluir entre otras transformaciones:
 - Matrices de desplazamiento sin/con rotación +escalado a partir de parámetros respecto cualquier otro datum distinto al de referencia (WGS84 en nuestro caso), como por ejemplo respecto a ETRS89 o versiones distintas a los 3 o 7 parámetros tradicionales, por ejemplo 10 parámetros al introducir escalados anisotropos (Yun Hong [10]).

- Transformación polinómica entre coordenadas geográficas; por ejemplo el cambio de elipsoide de *Struve* a *Hayford* (Martín [11]) o el ejemplo australiano que se muestra en la figura 2.
- Rejillas de desplazamiento entre coordenadas geográficas, por ejemplo NTV2 del IGN (Matesanz [12]).
- Etc.

**Multiple Regression Equations (MREs)
for Transforming
Australian Geodetic Datum 1966 (AUA) to WGS 84**

Area of Applicability: **Australian Mainland (excluding Tasmania)**

MRE coefficients for ϕ and λ are :

$$\Delta\phi'' = 5.19238 + 0.12666 U + 0.52309 V - 0.42069 U^2 - 0.39326 UV + 0.93484 U^2V + 0.44249 UV^2 - 0.30074 UV^3 + 1.00092 U^5 - 0.07565 V^6 - 1.42988 U^9 - 16.06639 U^4V^5 + 0.07428 V^9 + 0.24256 UV^9 + 38.27946 U^6V^7 - 62.06403 U^7V^8 + 89.19184 U^9V^8$$

$$\Delta\lambda'' = 4.69250 - 0.87138 U - 0.50104 V + 0.12678 UV - 0.23076 V^2 - 0.61098 U^2V - 0.38064 V^3 + 2.89189 U^6 + 5.26013 U^2V^5 - 2.97897 U^8 + 5.43221 U^3V^5 - 3.40748 U^2V^6 + 0.07772 V^8 + 1.08514 U^8V + 0.71516 UV^8 + 0.20185 V^9 + 5.18012 U^2V^8 - 1.72907 U^3V^8 - 1.24329 U^2V^9$$

Where : $U = K(\phi + 27^\circ)$; $V = K(\lambda - 134^\circ)$; $K = 0.05235988$

Figura 2: Ejemplo de transformación singular por funciones polinómicas. Fuente National Imagery and Mapping Agency (NIMA [13]).

1.4. Problemática a resolver:

El análisis de la diversidad de sistemas de referencia y sus correspondientes transformaciones, de las soluciones que propone la Geodesia y de las características específicas que debe suponer su implementación en un SIG nos lleva a concluir que la solución adoptada debe cumplir:

- Permitir a un usuario experto elegir el método y parámetros específicos de la transformación.
- Asesorar a un usuario no experto, mediante una elección automática de método y los parámetros de una determinada transformación en función de los sistemas origen y destino de entre las posibles distintas opciones habituales.
- Permitir a un usuario experto introducir nuevas transformaciones cuya tipología ya esté prevista y/o parámetros nuevos o actualizados de transformaciones ya existentes.
- Reflejar en los Metadatos de las bases cartográficas destino los métodos y parámetros aplicados en cada transformación.

2. Metodología

La implementación en el SIG MiraMon de un motor general de cambios de sistemas de referencia consta fundamentalmente de tres elementos:

- Una base de datos relacional con los parámetros necesarios para la definición de todos los sistemas de referencia soportados.
- Una librería de funciones que realizan cada uno de los posibles procesos elementales necesarios para las transformaciones de sistema de referencia.
- Un conjunto de aplicaciones que realizan las tareas necesarias desde el punto de vista del usuario y que usan los procesos codificados en las librerías a partir de los parámetros indicados en las tablas.

El punto crucial de todo este motor de transformaciones es el protocolo que analiza los cambios implicados y construye los procesos elementales del transformador asociado al cambio de sistema. Dicho protocolo está codificado junto al resto de funciones en la librería, que describiremos en la sección 2.2.

2.1. Base de datos relacional:

El objetivo de esta base es mantener de forma organizada los distintos elementos del sistema de referencia. La tabla central (ver figura 3) es la tabla de identificadores de sistemas de referencia. Cualquier sistema que desee usarse y/o gestionarse en el SIG debe estar introducido en esta tabla. Determinados campos de esta tabla (**id_datum**, **id_prj**) tienen su correspondencia en diversas tablas asociadas: tabla para proyecciones, tabla para elipsoides, datums, etc. De ellas es interesante resaltar la última tabla introducida, *m_Tsing.db*, que permite acoplar transformaciones singulares, o sea que su protocolo de cambio de datum no pasa por una transformación Molodensky o Bursa-Wolf a través de los parámetros respecto WGS84: Entre las transformaciones singulares ya

implementadas cabe destacar la de ED50 a ETRS89 según la rejilla NTv2 que proporciona el IGN (Matesanz [12]).

También debemos indicar que uno de los elementos de este esquema relacional no es exactamente una tabla, sino que es un fichero INI (en formato texto y organizado en secciones y claves) más flexible y adaptable para la definición explícita de los parámetros concretos de una determinada proyección (sin embargo, podría implementarse un sistema tabular si se prefiriera). Una más detallada exposición de la base de datos en su primera versión se encuentra en Masó [14].

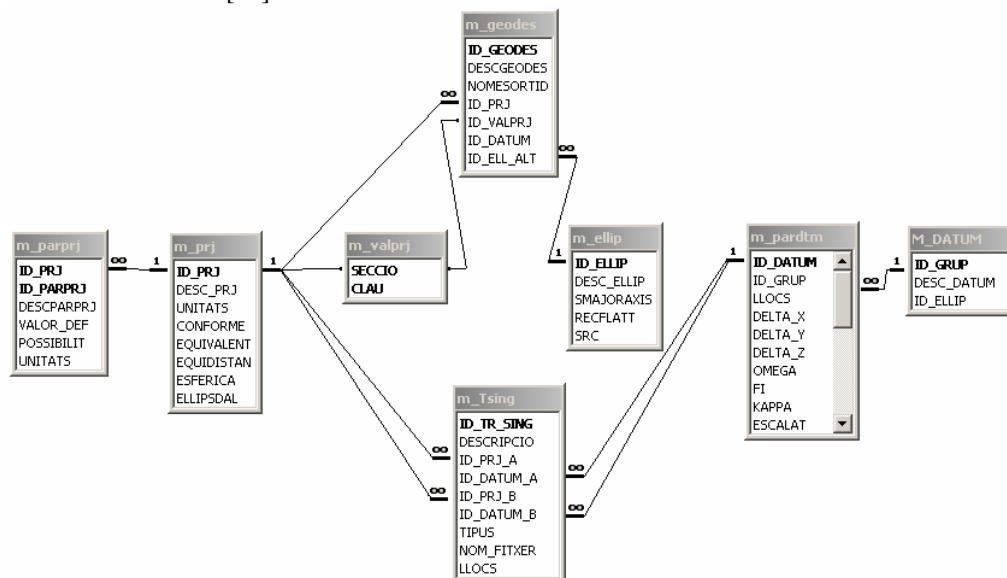


Figura 3: Esquema relacional de las distintas tablas que integran el conjunto de los parámetros de sistemas de referencia y transformaciones singulares. Fuente propia.

2.2. Librería de funciones:

La implementación realizada por los autores está codificada en lenguaje C. Este lenguaje no es orientado a objetos como su descendiente C++, pero si se programa de una forma estructurada y organizada los beneficios pueden llegar a ser similares. La librería, de nombre *f_snyder* como homenaje al profesor Snyder y sus valiosísimas compilaciones, como por ejemplo Snyder [15] y es la fuente básica de transformaciones entre proyecciones, y consta de tres tipos de elementos:

- Estructuras de tipos de datos:

Son agrupaciones conceptuales de distintos elementos o variables. Por ejemplo la estructura datum de esta librería es:

```

struct SNY_DATUM
{
    char id[MAX_ID_SNY];          /* Corresponde al pardtm.ID_DATUM */
    char id_grup[MAX_ID_SNY];    /* Corresponde al pardtm.ID_GRUP */
    char *descripcion;          /* Corresponde al datum.DESC_DATUM */
    WORD stb_desc;              /* Si datum.DESC_DATUM contiene un stb */
    char *llocs;                /* Corresponde al pardtm.LLOCS */
    WORD stb_llocs;             /* Si pardtm.LLOCS contiene un stb */
    struct SNY_PARAM_DATUM d;    /* Parámetros de la conversión a -> WGS84 */
    struct SNY_PARAM_DATUM i;    /* Parámetros de la conversión desde WGS84 -> */
    int (*Conversio_Geocen_Datum_A_WGS84)(const struct SNY_GEODESIA *geodes, /*Función de cambio de datum mapa a WGS84 */
                                           struct POINT_DOUBLE_3D *wgs_84, struct POINT_DOUBLE_3D *datum);

    int (*Conversio_Geocen_WGS84_A_Datum)(const struct SNY_GEODESIA *geodes, /*Función de cambio de datum WGS84 a mapa */
                                           struct POINT_DOUBLE_3D *datum, struct POINT_DOUBLE_3D *wgs_84);

    /*Funciones de paso de lonlat a geocentricas*/
    int (*Conversio_LonLat_A_Geocen_Datum)(const struct SNY_GEODESIA *geodes,
                                           struct POINT_DOUBLE_3D *datum, struct POINT_DOUBLE_3D *lonlat);

    int (*Conversio_Geocen_Datum_A_LonLat)(const struct SNY_GEODESIA *geodes,
                                           struct POINT_DOUBLE_3D *lonlat, struct POINT_DOUBLE_3D *datum);

    struct SNY_ELLIPSOIDE *ellip; /* Puntero la estructura elipsoide asociado al datum. */
    unsigned long int NSatellits; /* Número de satélites */
    char *FontDades;             /* Fuente de los datos */
};
  
```

Figura 4: Ejemplo de estructura codificada en lenguaje C. Fuente propia.

- Funciones

Realizan procesos muy específicos de forma individualizada. Algunas leen, verifican o cargan el contenido de las tablas, otras realizan una transformación muy concreta entre coordenadas, y entre ellas las más importantes son aquellas que analizan el tipo de transformación y construyen de forma dinámica el protocolo de transformación con todos los pasos involucrados a realizar.

```

local int OblivueMercator_Conversio_A_LonLat_Ellip(const struct SNY_GEODESIA *geodes,
          struct POINT_DOUBLE_3D *lon_lat, struct POINT_DOUBLE_3D *mapa)
{
double u, v, cos_azimuth_c, sin_azimuth_c, Qp, Sp, Tp, Vp, Up, t, sigma, cos_gamma_0, sin_gamma_0;

lon_lat->z=mapa->z;

cos_azimuth_c=cos(azimuth_c);
sin_azimuth_c=sin(azimuth_c);
cos_gamma_0=cos(gamma_0);
sin_gamma_0=sin(gamma_0);

v=(mapa->x-offset_mapa_X)*cos_azimuth_c+(mapa->y-offset_mapa_Y)*sin_azimuth_c;
u=(mapa->y-offset_mapa_Y)*cos_azimuth_c+(mapa->x-offset_mapa_X)*sin_azimuth_c;
Qp=exp(-(varB*varA));
Sp=(Qp+1.0/Qp)/2.0;
Tp=(Qp+1.0/Qp)/2.0;
Vp=sin(varB*varA);
Up=(Vp*cos_gamma_0+Sp*sin_gamma_0)/Tp;
if (DOUBLE_DIFFERENTS_DJ(Up, 1.0))
{
t=pos(varE/sqrt((1.0+Up)/(1.0-Up)), 1.0/varB);
sigma=PI/2-2.0*atan(t);
lon_lat->x=lambda_0+atan2(Sp*cos_gamma_0-Up*sin_gamma_0, cos(varB*varA))/varB;
lon_lat->y=sigma*(e2/2.0+e5.0*e4/24.0+e6/12.0+13.0*e8/360.0)*sin(2.0*sigma)
+(7.0*e4/48.0+29.0*e6/240.0+811.0*e8/11520.0)*sin(4.0*sigma)
+(7.0*e6/120.0+81.0*e8/1120.0)*sin(6.0*sigma)+(4279.0*e8/161280.0)*sin(8.0*sigma);
}
else
{
lon_lat->x=lambda_0;
lon_lat->y=(SigneDouble(Up)==SIGNE_POSITIU)?90:-90;
}
return 0;
}

```

$$v = (x - x_0) \cos \alpha_c - (y - y_0) \sin \alpha_c \quad (9-40)$$

$$u = (y - y_0) \cos \alpha_c + (x - x_0) \sin \alpha_c \quad (9-41)$$

If (u, v) are given, or calculated as just above, the following steps are performed in order:

$$Q' = e^{-iBwA} \quad (9-42)$$

where $e = 2.71828 \dots$, the base of natural logarithms

$$S' = (Q' - 1/Q')/2 \quad (9-43)$$

$$T' = (Q' + 1/Q')/2 \quad (9-44)$$

$$V' = \sin(BwA) \quad (9-45)$$

$$U' = (V' \cos \gamma_0 + S' \sin \gamma_0)/T' \quad (9-46)$$

$$t = [B/(1 + U')/(1 - U')]^{1/2} \quad (9-47)$$

But if $U' = \pm 1$, $\phi = \pm 90^\circ$, taking the sign of U' , λ may be called λ_0 , and equations (7-9) and (9-48) below are omitted.

$$\phi = \pi/2 - 2 \arctan [t/(1 - e \sin \phi)/(1 + e \sin \phi)]^2 \quad (7-9)$$

Equation (7-9) is solved by iteration, using $\phi = (\pi/2 - 2 \arctan t)$ as the first trial ϕ on the right side, and using the successive calculations of ϕ on the left side as successive values of ϕ on the right side, until the change in ϕ is less than a chosen convergence value.

$$\lambda = \lambda_0 - \arctan [(S' \cos \gamma_0 - V' \sin \gamma_0) \cos(BwA)]/B \quad (9-48)$$

Since the arctan (found as the ATAN2 function) is divided by B, it is necessary to add or subtract 360° properly, before the division.

To avoid the iteration, the series (3-5) may be used with (7-13) in place of (7-9):

$$\phi = \chi + (e^2/2 + 5e^4/24 + e^6/12 + 13e^8/360 + \dots) \sin 2\chi + (7e^4/48 + 29e^6/240 + 811e^8/11520 + \dots) \sin 4\chi + (7e^6/120 + 81e^8/1120 + \dots) \sin 6\chi + (4279e^8/161280 + \dots) \sin 8\chi + \dots \quad (3-5)$$

Figura 5: Ejemplo de función codificada en lenguaje C (izquierda) junto a la correspondiente formulación de origen (derecha). Fuentes: propia (izda.) y Snyder [15] (dcha.).

- Punteros a funciones: Aglutinan grupos de funciones tipo, o sea, funciones con el mismo número y tipo de variables. Habitualmente en un determinado paso del proceso completo, el analizador elige una de las funciones que conforman el grupo. Por ejemplo, una agrupación concreta es:

```

/* Las posibilidades de: */
int (*Conversio_Geocen_Datum_A_WGS84)(const struct SNY_GEODESIA *geodes,
          struct POINT_DOUBLE_3D *wgs_84, struct POINT_DOUBLE_3D *datum);

/* son: */
local int Conversio_mula(const struct SNY_GEODESIA *geodes,
          struct POINT_DOUBLE_3D *wgs_84, struct POINT_DOUBLE_3D *datum);
local int Conversio_BursaWolf_Geocen_Datum_A_WGS84(const struct SNY_GEODESIA *geodes,
          struct POINT_DOUBLE_3D *wgs_84, struct POINT_DOUBLE_3D *datum);
local int Conversio_Molodenski_Geocen_Datum_A_WGS84(const struct SNY_GEODESIA *geodes,
          struct POINT_DOUBLE_3D *wgs_84, struct POINT_DOUBLE_3D *datum);

```

Figura 6: Ejemplo de puntero a función y grupo de funciones codificados en lenguaje C. Fuente propia.

La función clave de esta metodología es la que identifica y analiza el tipo de transformación y construye el protocolo completo de la correspondiente conversión. A continuación detallamos los procesos que realiza dicho protocolo al realizar un cambio de sistema de referencia de unas coordenadas (X_1, Y_1) en un sistema origen S_1 a un sistema de referencia destino S_2 que dará lugar a unas nuevas coordenadas (X_2, Y_2) .

- 1) Se identifican de forma completa los sistemas S_1 y S_2 . La verificación se realiza a través de la existencia y consistencia de sus campos clave de la base de datos detallada en el apartado 2.1, por lo que quedan determinados las proyecciones, datums y sus respectivos parámetros en los sistemas S_1 y S_2 . En este punto se cargan en memoria determinadas constantes (relativas a la transformación e invariantes respecto a distintas localizaciones/coordenadas) como por ejemplo la excentricidad del elipsoide de referencia derivada de su semieje mayor e inverso del aplanamiento.
- 2) Se consulta en la tabla de transformaciones singulares si existe una transformación posible entre ambos sistemas y se decide si se usará el procedimiento estándar o se usará uno de los procedimientos singulares apuntados en dicha tabla.
 - 3) .a) Transformación estándar: Se analiza el tipo de transformación: simple o combinada y, por lo tanto, los posibles pasos necesarios: de coordenadas proyectadas a geográficas, geográficas a geocéntricas, etc., añadiendo al protocolo los métodos implicados.
 - b) Transformación singular: En función del tipo de transformación se cargan en memoria los coeficientes polinomiales o los valores de los ficheros de desplazamientos o cualquier otro tipo de parámetros particulares y se añaden al protocolo los métodos implicados.
- 4) Se apuntan los procedimientos necesarios de liberación de recursos del sistema; así una vez realizada la transformación de todas las coordenadas, se devuelve al sistema operativo los recursos utilizados, permitiendo una gestión eficiente y estable de éste.

De esta forma, una vez construido el protocolo, la obtención de las coordenadas destino (X_2, Y_2) consistirá en una concatenación rápida y automatizada de una serie de procedimientos enlazados a aplicar desde las coordenadas iniciales (X_1, Y_1).

2.3. Grupo de aplicaciones:

En la actual versión son tres los módulos relacionados con los cambios de sistema de referencia:

Un módulo de preparación de las transformaciones singulares:

- **NTv2IMG:** Esta aplicación importa los valores de desplazamiento entre coordenadas geográficas entre dos sistemas en formato NTv2 y los transforma como formato ráster propio del SIG MiraMon, ya que para este formato el SIG dispone de procedimientos optimizados para las consultas masivas de estos valores necesarios en la transformación de cualquier capa gráfica que use este método. El módulo *NTv2IMG* permite realizar una importación de todas o una rejilla específica y restringir el ámbito de aplicación a un ámbito de estudio concreto; por lo tanto los accesos repetitivos podrán ser también más ágiles. Genera a la vez dos rústers con los desplazamientos de la transformación directa y dos rústers más con los desplazamientos de la transformación inversa, imprescindibles para re proyectar un modelo ráster de forma adecuada, ya que las consultas a los desplazamientos deben realizarse de forma invertida. Sería deseable que la entidad que proporciona el fichero de desplazamientos entre los dos sistemas (el IGN español en nuestro caso) proporcionara también una malla de desplazamientos inversos para evitar arbitrariedades o confusiones entre las distintas implementaciones de este proceso inverso. Se añadirán los sufijos _X para los rústers con valores de desplazamientos en longitud e _Y para los rústers con desplazamientos en latitud respecto a los nombres propuestos.

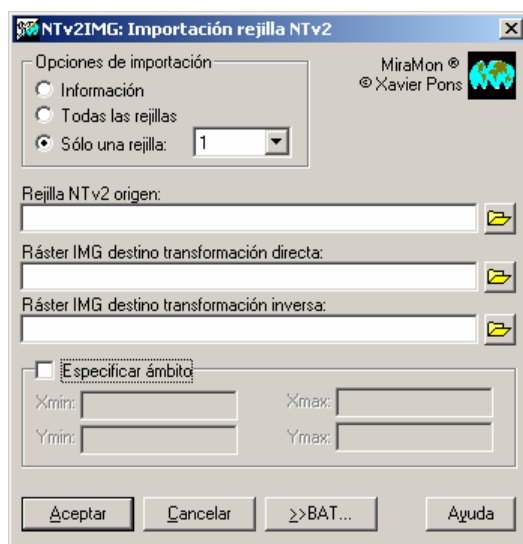


Figura 7: Interfaz de la aplicación de lectura e importación de la rejilla NTv2 al formato MiraMon.

Es importante notar que el módulo de preparación sólo se lleva a cabo una vez para cada caso singular (o en nuevas actualizaciones de los ficheros originales) siendo innecesaria su repetición a cada uso de los módulos de transformación (siguiente apartado).

Dos módulos de transformación:

- **CalcGeo:** Es una aplicación que realiza la transformación de una única coordenada de un sistema origen a otro destino. Corresponde a la herramienta que habitualmente se denomina calculadora geodésica.
- **CanviPrj:** Es una aplicación que realiza una transformación de una capa gráfica, ráster o vectorial, y en este caso de puntos, líneas o polígonos. Para la re proyección vectorial se usa la transformación directa y para la re proyección ráster es necesario usar la transformación inversa. Si los vectores son topológicamente estructurados recalcula los campos geotopológicos como longitud, perímetro, área en la nueva métrica del sistema de destino.

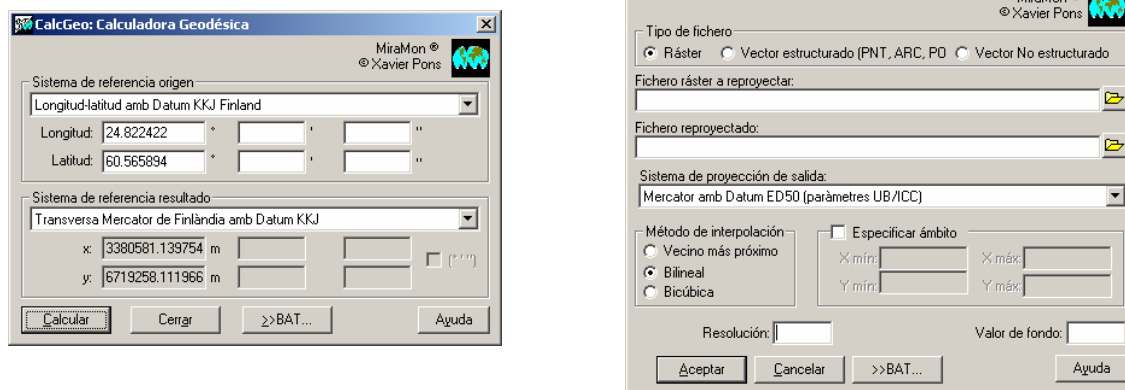


Figura 8: Ventanas de configuración correspondientes a los módulos de transformaciones de coordenadas y de capas gráficas georeferenciadas.

3. Ejemplos prácticos:

En este apartado se muestra un ejemplo práctico de cada tipo de transformación (estándar y singular) con los resultados finales validados con la calculadora geodésica del IGN (http://www.ign.es/ign/es/IGN/calculadora_geodesica.jsp) y con resultados parciales de los distintos pasos implicados.

3.1 Transformación singular ED50→ETRS89

Punto problema en coordenadas UTM-30N ED50 y en metros:

X: 585364.32	Y: 4428311.98
---------------------	----------------------

Dicho punto en coordenadas latitud/longitud datum ED50 es:

λ: -2.0000	ϕ: 40.0000
--------------------------------------	-----------------------------------

En este punto el protocolo que analiza la conversión detecta que la conversión entre longitud/latitud ED50 a longitud/latitud ED50 ETRS89 está tabulada en la tabla de conversiones singulares, determina que es una conversión por desplazamientos y carga el fichero con dichos valores.

Los desplazamientos para conversión a ETRS89 obtenidos por interpolación bilineal de los valores consultados en los ficheros IMG derivados del formato NTV2 en longitud y latitud son en segundos sexagesimales:

$\Delta\lambda$: -4.51749	$\Delta\phi$: -4.26087
---	--

Debemos resaltar que en nuestro convenio las longitudes, y por tanto sus desplazamientos, son positivos hacia el Este (en el formato original del IGN son positivos hacia el Oeste). Estos desplazamientos aplicados dan lugar a unas nuevas coordenadas geográficas en ETRS89 que son:

λ: -2.001255	ϕ: 39.998824
--	-------------------------------------

Y las correspondientes coordenadas en UTM30N-ETRS89 son:

X: 585254.82	Y: 4428103.49
---------------------	----------------------

3.2 Transformación estándar: ED50→WGS84

Partimos del mismo punto problema en coordenadas UTM-30N ED50 y por lo tanto mismas coordenadas geográficas con datum ED50

X: 585364.32	Y: 4428311.98
---------------------	----------------------

λ: -2.0000	ϕ: 40.0000
--------------------------------------	-----------------------------------

En este caso, el protocolo de la conversión detecta que no existe ninguna conversión singular y carga los valores (en este caso 7) de la correspondiente transformación por Bursa-Wolf entre coordenadas geocéntricas entre ambos datums:

translación geocéntrica X	-131.0 m
translación geocéntrica Y	-100.3 m
translación geocéntrica Z	-163.4 m
rotación eje X	-1.244"
rotación eje Y	-0.020"
rotación eje Z	-1.144"
Corrección de escala	+9.39 ppm

Fuente EUREF [5]

Para obtener las correspondientes coordenadas geográficas en datum WGS84:

λ : -2.001250	Φ : 39.998808
-----------------------	--------------------

Y las correspondientes coordenadas en UTM30N-WGS84 son:

X: 585255.17	Y: 4428102.56
--------------	---------------

Es interesante resaltar que al usar los procedimientos de la transformación singular donde no se tratan los datums ETRS89 y WGS84 como equivalentes se puede obtener una mayor precisión que en el caso de una transformación estándar, que es lo que hacen todavía la mayoría de *software* SIG.

4. Conclusiones

El previo análisis de la variada casuística de conversión entre distintos sistemas de referencia y de las variadas metodologías posibles de conversión entre ellos ha permitido a los autores realizar un diseño flexible a todas las posibilidades.

El diseño elaborado posibilita que para el usuario del SIG que exista una única metodología integrada que le facilita el uso de determinadas tecnologías del ámbito de la Geodesia. Además permite incorporar procedimientos más precisos como por ejemplo la conversión por rejilla de desplazamientos entre ETRS89 y ED50 propuesta por el IGN para la España peninsular y Baleares.

5 Agradecimientos

Agradecemos la desinteresada colaboración de Luis García-Asenjo (UPV) y Raquel Capilla (ICV) para ayudar a resolver algunas dudas puntuales planteadas por los autores.

6 Referencias

- (1) Laurini, R. y Tompson, D. (1992) "Fundamentals of Spatial Information Systems" Academic Press. Londres.
- (2) Burrough, P.A. y R.A. McDonnell (1998) "Principles of Geographical Information Systems" Oxford University Press. Oxford.
- (3) García-Asenjo L., González F.J., Hernández D. (2006) "Crs++, software libre para la gestión de sistemas de referencia coordenados" 5ª Asamblea hispano-portuguesa de geodesia y geofísica.
- (4) Pons, X. (2000) MiraMon. Sistema de Información Geográfica y software de Teledetección, Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREA. Bellaterra. ISBN: 84-931323-4-9 En Internet: <http://www.creaf.uab.cat/miramon>
- (5) EUREF: IAG Reference Frame Subcommittee for Europe. En Internet: <http://www.euref-iag.net/>
- (6) ISO 19115:2003 (2003): "International Standard: Geographic information – Metadata. ISO 19115:2003". Technical Committee 211.
- (7) Marqués, A., Berné, J. L. y Gisbert, J. M. (2006) "Transformaciones de datum en el contexto de un Sistema de Información Geográfica" XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica".

- (8) MADTRAN - Mapping Data Transformation Software. NIMA, The National Imagery and Mapping Agency. En Internet: <http://164.214.2.53/publications/guides/df/madtran.html>
- (9) IGN: Instituto Geográfico Nacional de España: En Internet: <http://www.ign.es/>
- (10) Yu Hong (2004) "Computer program for datum transformation by a 10-parameter model" Computers & Geosciences 30:777-783.
- (11) Martín Asín, F.(1990) "Geodesia y cartografía matemática" Madrid, Paraninfo
- (12) Matesanz J.G. (2005) "Formato del archivo rejilla " v 2.2. En Internet: <http://www.ign.es/>
- (13) NIMA: National Imagery and Mapping Agency (1987) "World Geodetic System 1984". Technical Report 8350.2.
- (14) Masó J, Pons X. y Pesquer L. (2000) "Criteris geodèsics en els canvis de sistema de referència en un entorn SIG" 4a Setmana Geomàtica
- (15) Snyder J.P., (1987). "Map Projections, A Working Manual", U.S. Geological Survey professional paper 1395.