

Conversões de coordenadas com o programa PROJ – Método de conversão com grelhas

José Alberto Gonçalves, jagoncal@fc.up.pt
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Resumo

O programa PROJ (PROJ.4 Cartographic Projections library), originalmente desenvolvido no USGS, é actualmente uma ferramenta standard, gratuita e de código aberto, usada, quer por utilizadores independentes, quer incorporada em programas SIG opensource.

Neste artigo aborda-se as transformações de coordenadas nacionais (projecção e datum) com este programa, configuradas com os parâmetros padrão fornecidos pelo Instituto Geográfico Português (IGP). Atendendo a que este programa disponibiliza uma forma de conversão de datum alternativa, baseada em grelhas, e que essa metodologia é já adoptada oficialmente em vários países implementou-se essa transformação para Portugal. No artigo apresenta-se a metodologia seguida na criação das grelhas de transformação, assim como um estudo da precisão conseguida por este método, fazendo comparações com outras formas de conversão de coordenadas. A precisão alcançada por este método é bastante melhor que a dos métodos baseados em transformações de Bursa-Wolf com parâmetros nacionais, sendo por isso muito mais adequada para as grandes escalas cartográficas.

Aborda-se também a definição do novo sistema de coordenadas – PTTM-06, baseado no datum ETRS89 – estabelecido pelo IGP e que virá a substituir os anteriores na produção de cartografia digital e informação geográfica.

1. Introdução

A biblioteca de programas PROJ.4 teve origem no programa PROJ desenvolvido por Gerald Evenden, no Unites States Geological Survey (USGS). Trata-se de um conjunto de programas em C, de código fonte aberto e gratuito, que se tornou muito popular e que é incorporado por diversas aplicações SIG opensource (PROJ, 2007)

O programa PROJ, inicialmente desenvolvido no sistema UNIX, destinava-se quase exclusivamente a efectuar projecções cartográficas, na forma directa ou inversa, considerando mudanças de datum apenas para os Estados Unidos da América. Com a adopção pela comunidade utilizadora de software SIG opensource, foi desenvolvido um novo programa – CS2CS – que se destina a fazer, num passo só, qualquer conversão de coordenadas que envolva projecção cartográfica ou mudança de datum. Actualmente o PROJ recorre aos códigos EPSG (European Petroleum Survey Group), para identificar um grande número de sistemas de coordenadas definidos nessa base de dados, de uma forma standard e compatível com o que é usado por outras aplicações.

Este artigo aborda as formas de efectuar conversões entre sistemas de referência geográfica e cartográfica utilizados em Portugal. Descreve também o novo sistema de coordenadas definido pelo Instituto Geográfico Português (IGP) – PTTM06 –, que se baseia no datum ETRS89, e a sua implementação no PROJ. Atendendo a que o PROJ, através do programa CS2CS incorpora também um método de conversão de datum baseado em grelhas de diferenças de coordenadas, foi desenvolvida esta conversão entre os data nacionais e o ETRS89. Analisa-se em detalhe no artigo a exactidão deste processo de conversão, comparando com as conversões baseadas em transformações de 3 e 7 parâmetros.

2. Sistemas de coordenadas geográficas – data locais e data globais

As coordenadas geográficas geodésicas, usadas na Geodesia e na Cartografia, estão associadas a um elipsóide de revolução. Contudo, dado que as observações geodésicas tradicionais recorriam à observação angular com teodolito, cujo eixo é verticalizado com níveis, a fixação de um sistema de referência geodésica (por observação astronómica) era condicionada pelas variações locais do campo gravítico terrestre. Assim, temos o conceito de datum local, associado a um determinado elipsóide no qual é calculada a triangulação geodésica, que se traduz num sistema de coordenadas geográficas (longitude e latitude) diferente de outros data fixados em diferentes locais. Em Portugal encontrávamos, por exemplo o Datum Lisboa, fixado por observação astronómica no Castelo de S. Jorge, e o datum 73, fixado no vértice Melriça. Apesar de usarem o mesmo elipsóide (Hayford, ou também designado como Internacional 1924) apresentam diferenças sistemáticas da ordem de 7.5” em longitude e 2.9” em latitude.

Com o aparecimento dos satélites artificiais, assim como outras técnicas, a Geodesia pôde passar a fazer observações a um nível global, permitindo a determinação de um datum global, através de um elipsóide que melhor se ajusta, globalmente, ao geóide. A implementação do Sistema Global de Posicionamento (GPS), pelo Departamento de Defesa Americano, implicou a definição de um sistema global que foi designado por “WGS84”. O elipsóide associado ao sistema, tem o seu centro no centro de massa da Terra e semi-eixos maior e menor, a e b , com as seguintes dimensões:

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

$$b = 6356752.3142 \text{ m}$$

Mais pormenores relativos ao sistema podem ser encontrados na documentação da *Defense Mapping Agency* (DMA) (NGA, 2000). Tornou-se frequente estabelecer a relação de um qualquer datum local com o WGS84, por diferentes formas. São frequentemente utilizadas transformações baseadas em coordenadas cartesianas geocêntricas (X, Y, Z), que se relacionam com as coordenadas geográficas geodésicas (λ, ϕ, h), longitude, latitude e altitude acima do elipsóide. Concretamente, as mais frequentes são as que envolvem

apenas translacção, $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$, de coordenadas geocêntricas (eq. 1) e as que envolvem também rotação e escala (eq. 2):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS84} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{LOCAL} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS84} = (1+s) \cdot R(\theta_x, \theta_y, \theta_z) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{LOCAL} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

Os ângulos θ são as pequenas rotações de eixos, normalmente de poucos segundos, e R é a respectiva matriz de rotação. O parâmetro s é a diferença do factor de escala para a unidade e que normalmente se exprime em partes por milhão. A transformação inversa obtém-se trocando os sinais dos parâmetros (por se tratar de pequenas quantidades).

A materialização de um sistema global de coordenadas é feita através das coordenadas de um conjunto de pontos. Devido à dinâmica da crosta terrestre as posições dos pontos podem variar, pelo que um sistema global se refere a uma época (por exemplo ITRF2005, International Terrestrial Reference Frame, para 2005). O estudo dos sistemas de referência globais é do domínio da Geodesia e encontra-se detalhado em muitas publicações (ver, por exemplo Altamimi e Boucher, 2001).

No caso da Europa foi adoptado o sistema global fixado em 1989, que se designa por ETRS89 (EUREF, 2007). É materializado por um conjunto de estações fixas na placa euroasiática, que apresenta variações da ordem do centímetro por ano em relação aos sistemas ITRF (OSGB, 2007). O facto de as coordenadas ETRS89 serem fixas é uma vantagem para as aplicações de grande escala da Cartografia e da Topografia.

Dado o uso do ETRS89, é frequente vermos a determinação das transformações de 3 e 7 parâmetros entre um datum local e o ETRS89. É o caso dos parâmetros publicados pelo IGP (IGP, 2008), dos quais os da transformação de 7 parâmetros (Bursa-Wolf) se encontram na tabela 1.

Tabela 1 – parâmetros para transformação de datum local (Datum 73 ou Lisboa) para ETRS-89 publicados pelo IGP

Datum	$\Delta X(m)$	$dY(m)$	$\Delta Z(m)$	$\theta_x (")$	$\theta_Y (")$	$\theta_Z (")$	ΔS
73	+231.034	+102.615	+26.836	+0.615	-0.198	+0.881	+1.786
Lisboa	-282.086	-72.188	+119.953	-1.529	+0.145	-0.890	-4.458

Duas convenções relativas aos sentido positivo das rotações podem ser encontradas. Uma é designada na literatura em inglês como “Coordinate Frame Rotation” e a outra como “Position Vector Rotation”, sendo que esta última é a apresentada acima.

Estes parâmetros foram determinados com observações GPS em vértices da triangulação geodésica de 1ª ordem, por um ajuste de mínimos quadrados. Os resíduos nesse ajuste são da ordem do metro (Vasconcelos et al., 2007).

Em alternativa a estas transformações podem ser consideradas transformações polinomiais de grau mais elevado ou transformações através de interpolação local com grelhas de diferenças de coordenadas. Este método usado já há bastante tempo nos EUA para converter de NAD27 para NAD83 (US-NGS, 2003), foi estudado para o caso português e encontra-se descrito mais à frente.

3. Projecções cartográficas

Habitualmente não usamos no armazenamento de informação geo-referenciada sistemas de referenciação espacial baseados em coordenadas geográficas, mas sim em sistemas de coordenadas rectangulares resultantes de projecções cartográficas.

Uma projecção cartográfica envolve a transformação de coordenadas geográficas em cartográficas, na forma directa, ou cartográficas em geográficas no caso do problema inverso. Ao contrário das transformações de datum que envolvem determinação de parâmetros com base em medições, as projecções têm uma definição matemática analítica precisa, não tendo qualquer ambiguidade na sua aplicação.

A definição de uma projecção no PROJ é feita por um *string* com um conjunto de comandos que permitem definir as características da projecção. Dois comandos obrigatórios são os que definem a projecção e o elipsóide, sendo os restantes função da projecção. Como exemplo apresenta-se a seguir o string para a projecção de Gauss, do datum 73:

```
+ellps=intl  
+proj=tmerc  
+lat_0=39d40'00.000"N  
+lon_0=08d07'54.862"W  
+x_0=180.598  
+y_0=-86.990
```

Os comandos característicos da projecção definem as coordenadas do ponto central (*lon_0*, *lat_0*) e a translacção de origem (*x_0*, *y_0*). Um outro exemplo é o do novo sistema de coordenadas PT-TM06, baseado no datum ETRS89, que é o seguinte:

```
+ellps=grs80  
+proj=tmerc  
+lat_0=39d40'05.73"N  
+lon_0=08d07'59.19"W
```

De entre o grande número de projecções disponíveis contam-se a de Mercator (*merc*), a transversa de Mercator (*tmerc*), de Lambert cónica conforme (*lcc*) e Bonne (*bonne*). Para as situações em que se pretende correr o programa sem alterações de coordenadas, isto é fazendo uma projecção identidade, existe o comando `+proj=latlong`.

Esta opção é mais frequentemente usada com o program CS2CS, que efectua conversão entre dois quaisquer sistemas de coordenadas, incorporando também mudanças de datum. Descreve-se a seguir esse tipo de conversão.

4. Conversão global de coordenadas com o programa CS2CS

Uma conversão entre dois sistemas de coordenadas projectadas, cada um deles baseado num datum geodésico diferente, obriga a vários passos de transformação. Pretendemos passar do sistema PCS1 (Projected Coordinate System) para PCS2, sendo conhecidas as relações de cada datum geodésico (GCS, Geographic Coordinate System) com um sistema global, teremos ao todo 4 transformações como se ilustra na figura 1.

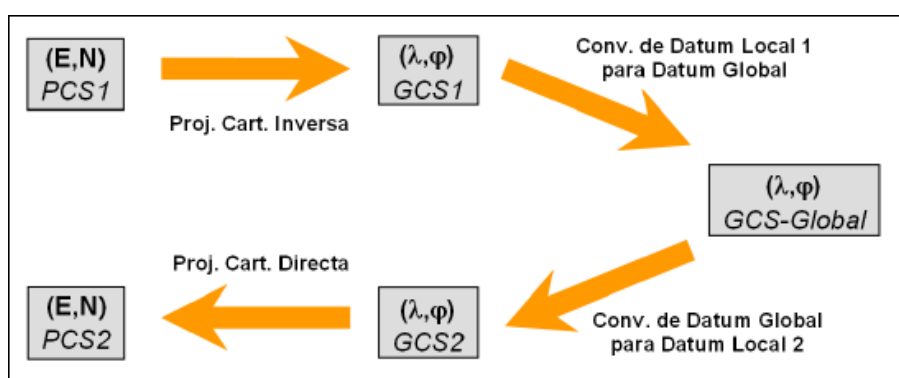


Figura 1 – Conversão geral entre dois sistemas de coordenadas cartográficas

De uma forma geral os programas de tratamento de informação geográfica lidam com as conversões de coordenadas desta maneira. Alguns poderão incluir uma transformação directa entre GCS1 e GCS2 caso existam parâmetros calculados para o efeito. É exemplo disso o ArcGIS que inclui, por exemplo, uma conversão directa de Datum 73 para Datum Lisboa.

O programa CS2CS da biblioteca PROJ usa a seguinte sintaxe de linha de comando:

```
CS2CS string1 +to string2
```

Os strings usam a sintaxe do PROJ com comandos adicionais para definir a forma de conversão para datum global. Concretamente podemos ter:

- +towgs84=... (lista de 3 ou 7 parâmetros separados por vírgulas)
- +datum=... (nomes pré-definidos: NAD27, NAD83, WGS84)
- +nadgrids=... (ficheiro com grelhas de conversão de datum)

Por exemplo a conversão de coordenadas geográficas WGS84 para coordenadas projectadas datum 73 seria efectuada com os seguintes comandos:

```
CS2CS +ellps=WGS84 +proj=latlong +towgs84=0,0,0
+to

+ellps=intl +proj=tmerc
+lat_0=39d40'N
+lon_0=08d07'54.862"W
+x_0=180.598
+y_0=-86.990
+towgs84=-282.086,-72.188,119.953,-1.529,0.145,-0.890,-4.458
```

O standard das rotações é o designado por “Position vector rotation”. Os parâmetros fornecidos actualmente pelo IGP estão nesta forma.

As linhas de comando podem ser bastante simplificadas criando um ficheiro de configurações. A documentação do programa descreve detalhadamente a forma de o fazer, em particular a necessidade de definir uma variável de ambiente, quer em sistemas Unix, quer Windows. Poderíamos ter a sintaxe seguinte:

```
CS2CS +init=pt:dlxhg +to +init=pt:d73hg
```

Estes programas usados na linha de commando fazem leitura e escrita no standard input e no standard output, respectivamente, podendo ser redireccionados para ficheiros de texto com listas de coordenadas. Alguns programas, como o programa FWTOOLS, usa esta forma de conversão de coordenadas para transformar ficheiros com informação geográfica em diferentes formatos (shapefile, dgn, formatos de imagem, etc.).

Para além do comando +towgs84 e dos nomes pre-definidos existe a conversão com grelhas, que se descreve na secção seguinte.

5. Conversões com grelhas

Numa conversão de datum pretendemos essencialmente determinar diferenças de longitude ($\Delta\lambda$) e de latitude ($\Delta\phi$). Os métodos descritos atrás baseiam-se em ajustes para regiões, por vezes grandes, e nem sempre são capazes de modelar distorsões sistemáticas que existem nas redes geodésicas que materializam os sistema de coordenadas. Qualquer cartografia é produzida com ligação à rede geodésica num ponto próximo da área de trabalho pelo que uma transformação com parâmetros locais é mais adequada.

Nos casos em que se dispõe de uma rede geodésica densa uma abordagem possível é fazer para todos os pontos da rede o cálculo das diferenças de coordenadas ($\Delta\lambda$ e $\Delta\phi$) e usá-las num processo de interpolação local. Para um procedimento sistemático gera-se por um processo de interpolação (por exemplo kriging) uma grelha dessas diferenças e posteriormente faz-se a determinação local por uma interpolação bi-linear na grelha. Este método é usado há já bastante tempo nos EUA e no Canadá para converter NAD27 para NAD83, e mais recentemente noutros países (Austrália, Nova Zelândia, França). Em

Espanha o IGN disponibiliza uma página de conversão de ED50 para ETRS89, deste tipo, estando o método detalhado em Gonzales-Matesanz, 2003.

Para Portugal criaram-se grelhas deste tipo recorrendo aos pontos da rede geodésica de 1ª e 2ª ordem (cerca de 900 marcos), usando as coordenadas ETRS89 e datum73, disponibilizadas pelo IGP (IGP, 2008). Em primeiro lugar calcularam-se as diferenças de coordenadas geográficas e aplicou-se uma interpolação por kriging (usando o programa Surfer, com opções por defeito), para criar uma grelha com espaçamento de um décimo de grau. Foi possível observar que 3 pontos apresentavam diferenças de coordenadas muito diferentes dos pontos mais próximos. Esses pontos foram excluídos e as grelhas foram geradas novamente. A extensão das grelhas é de -10 a -6 graus em longitude e 36.5 a 42.5 graus em latitude cobrindo assim todo o território do continente. As grelhas foram adaptadas ao formato esperado pelo PROJ (extensão LLA), de que se apresenta um extracto na figura 2 (valores em milionésimos de segundo).

```

PTD73
41 61 1 -10.000000 0.100000 36.500000 0.100000
0: -2994128 2706987 271 -2755 -470 -936 -648 -1048 -890 -1170
1: -2993617 2708700 -159 -978 316 -2858 -430 -1022 -632 -1168
2: -2993314 2710580 -24 -899 -82 -1028 -170 -1182 200 -2900 -
3: -2993982 2715390 190 -965 670 -3499 21 -1062 -50 -1252 307
4: -2994540 2717810 228 -814 248 -944 265 -1105 891 -3454 112

```

Figura 2 – Extracto de ficheiro ASCII (formato LLA) com grelhas de diferenças de coordenadas para mudança de datum.

Os ficheiros grelha são posteriormente convertidos para binário (programa NAD2BIN), ficando então na forma legível pelo programa CS2CS. Fizeram-se alguns testes com outros métodos de interpolação, nomeadamente “minimum tension spline”, tendo as grelhas obtidas sido muito semelhantes, não implicando diferenças práticas sensíveis.

Fizeram-se testes para avaliar a exactidão da conversão, comparando com as conversões pelas transformações de 3 e 7 parâmetros. Calcularam-se para os 948 pontos da rede geodésica (1ª e 2ª ordem) as coordenadas ETRS89 a partir de Datum73 e Datum Lisboa, por transformação pelos três métodos: transformação de 3 parâmetros, de 7 parâmetros e por grelhas. Calcularam-se os erros por subtração das coordenadas conhecidas e avaliou-se a raiz do erro médio quadrático (REMQ). As tabelas 2 e 3 contêm os resultados:

Tabela 2 – Estatística dos erros de transformações de coordenadas em 948 pontos, de Datum 73 para ETRS89, por três métodos diferentes: grelha, 7 parâmetros e 3 parâmetros.

	GRID		TR-7P		TR-3P	
	eX (m)	eY (m)	eX (m)	eY (m)	eX (m)	eY (m)
Mínimo	-0.166	-0.150	-1.470	-1.364	-2.210	-1.474
Máximo	0.256	0.171	0.683	0.576	1.374	1.786
Média	0.004	0.001	-0.021	-0.128	-0.010	-0.064
REMQ	0.033	0.031	0.383	0.383	0.852	0.575
Norma REMQ	0.046		0.541		1.028	

Tabela 3 – Estatística dos erros de transformações de coordenadas em 948 pontos, de Datum Lisboa para ETRS89, por três métodos diferentes: grelha, 7 parâmetros e 3 parâmetros.

	GRID		TR-7P		TR-3P	
	eX (m)	eY (m)	eX (m)	eY (m)	eX (m)	eY (m)
Mínimo	-0.430	-0.588	-4.530	-4.460	-3.960	-5.300
Máximo	0.350	0.280	4.820	3.220	4.390	2.861
Média	-0.008	0.001	-0.254	-0.050	0.103	0.075
REMQ	0.057	0.057	1.413	1.503	1.710	1.609
Norma REMQ	0.081		2.079		2.352	

Fez-se a representação gráfica da norma dos REMQ para os dois data locais e para os 3 métodos, como se mostra na figura 3. No caso particular do datum Lisboa o erro das transformações de 3 e 7 parâmetros são bastante grandes, quase tanto como se tivessem sido consideradas as coordenadas ETRS89 projectadas iguais às coordenadas Hayford-Gauss datum Lisboa (REMQ seria de 2.8 metros).

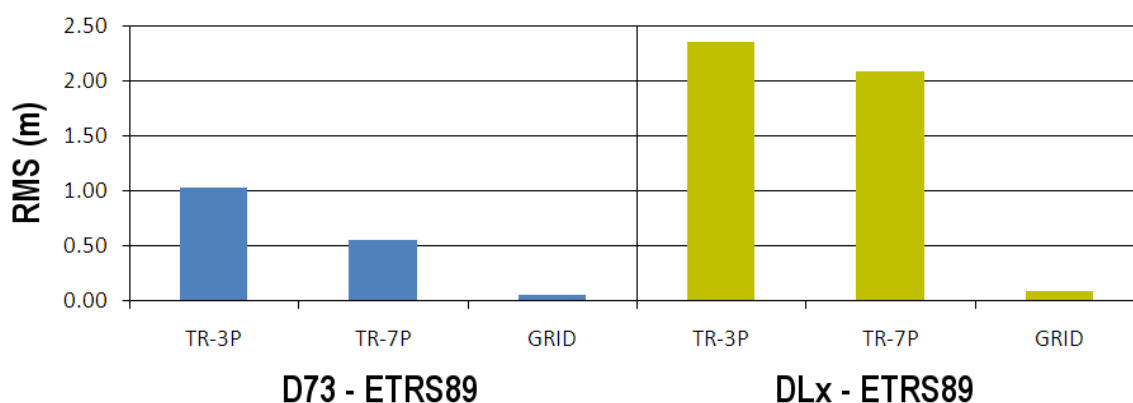


Figura 3 – Representação da raiz do erro médio quadrático (norma) para as três transformações de: Datum 73 para ETRS9 e Datum Lisboa para ETRS89.

Como era de esperar, o erro nas transformações com grelha são muito pequenos. Atendendo a que as grelhas foram geradas por métodos de interpolação exactos, se fizessemos tender o espaçamento para zero teríamos, nos pontos considerados, uma transformação exacta. De forma a termos um teste independente usaram-se os pontos da rede geodésica de 3ª ordem (cerca de 8000 pontos) para os quais são conhecidas as coordenadas datum 73 e datum Lisboa. Obtiveram-se os seguintes erros médios quadráticos:

$$REMQ_x = 0.062 \text{ m} \quad REMQ_y = 0.064 \text{ m}$$

$$\sqrt{(REMQ_x)^2 + (REMQ_y)^2} = 0.089 \text{ m}$$

7. Conclusões

Os programas da biblioteca PROJ, nomeadamente o programa CS2CS, podem ser facilmente usados para qualquer cálculo de conversões de coordenadas cartográficas e/ou geográficas. O facto de poder ser incorporado noutros programas, em particular programas opensource, dá uma grande flexibilidade de manipulação de ficheiros de informação geográfica.

O método de conversão com grelhas descrito produz uma conversão ajustada a cada local, modelando assim as deformações da rede geodésica, muito melhor que com as transformações de 3 e 7 parâmetros. Concretamente a exactidão destas transformações é em geral melhor que o decímetro e um pouco melhor para o datum 73 que para o datum Lisboa. É particularmente adequada para conversões de cartografia, e informação geográfica em geral, de grande escala ou grande rigor posicional. Será uma forma adequada de adaptar a informação referenciada nos sistemas nacionais ao novo sistema de projecção implementado pelo IGP, PT-TM06, baseado no datum ETRS89.

Referências

- NGA, 2000. National Geospatial Agency, 2000. NIMA Technical Report 8350.2; 3rd edition; amendment 1; 3 January 2000, "Department of Defense World Geodetic System 1984 - Its definition and relationships with local geodetic systems",
- Altamimi, Z. e C. Boucher, 2001. The ITRS and ETRS89 Relationship: New Results from ITRF2000, Report on the Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF), Dubrovnik, 2001.
- EUREF, 2007. European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89) web site: <http://etrs89.ensg.ign.fr/en>. Visitado em Março de 2008.
- Vasconcelos, M, Botelho, H., Kol, H. e Casaca, J., 2007. The Portuguese Geodetic Reference Frames. XXIV IUGG General Assembly. Perugia, Italia, June 2007.
- IGP, 2008. Instituto Geográfico Português: <http://www.igeo.pt>. Visitado em Março-2008.
- OSGB – Ordnance Survey, 2007. A Guide to Coordinate Systems in Great Britain. Web site <http://www.ordnancesurvey.co.uk/> (Visitado em Março-2008).
- US National Geodetic Survey, 2003. Geodetic Toolkit NADCON, 2008. Web page: http://www.ngs.noaa.gov/PC_PROD/NADCON/. (Visitado Março-2008).
- Gonzales-Matesanz, J., Dalda, A., Quirós, R., Celada, J., 2003. ED50-ETRS89 Transition models for the Spanish Geodetic Network. Report on the Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF), Toledo, 4 - 7 June 2003.
- PROJ, 2007. PROJ.4 - Cartographic Projections Library web site: <http://www.remotesensing.org/proj/> (Visitado Março-2008).