

# CONVERSÕES DE SISTEMAS DE COORDENADAS NACIONAIS PARA ETRS89 UTILIZANDO GRELHAS

José A. Gonçalves<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Ciências da Universidade do Porto – Rua Campo Alegre, 687, 4069-007 Porto  
(jagoncal@fc.up.pt)

---

## RESUMO

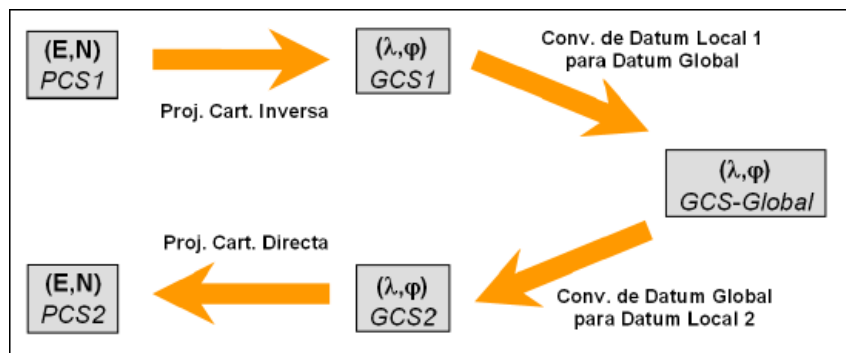
As conversões de datum são frequentemente efectuadas por transformações de 3 ou 7 parâmetros, que são as que encontramos para os data nacionais na generalidade dos programas de processamento de informação geográfica. Por usarem parâmetros ajustados a todo o território, normalmente conduzem a erros que podem ser de alguns metros, não sendo adequadas para muitas aplicações. As transformações locais, em que são determinados parâmetros ajustados a pontos de controlo envolventes da área de trabalho têm normalmente uma precisão muito superior. No caso da rede geodésica nacional ajustes locais conseguem uma precisão de alguns centímetros. Este tipo de transformações requer uma rede geodésica densa, com coordenadas conhecidas nos dois sistemas entre os quais se pretende a transformação. Vários países adoptam desde há muito transformações locais como standard. É o caso dos EUA e do Canadá que usam grelhas de diferenças de coordenadas na transformação do NAD27 para o NAD83. Neste artigo aborda-se esta metodologia, que foi implementada para Portugal, usando os vértices das redes geodésicas de 1ª e 2ª ordem, num total de mais de 900 pontos, fornecidos pelo IGP. Fez-se a geração de grelhas de diferenças de latitude e longitude (de Datum 73 para ETRS89 e de Datum Lisboa para ETRS89), com espaçamento de um décimo de grau. Estimou-se a precisão deste método em cerca de 5 cm para o Datum 73 e 8 cm para o Datum Lisboa. As grelhas foram criadas no formato NTV2, que é um standard utilizado por diversos programas, quer comerciais, como é o caso do ArcGIS, quer gratuitos ou open-source, que recorrem à biblioteca PROJ.4. Ficam assim disponíveis nos programas mais frequentemente usados transformações de coordenadas compatíveis com aplicações que requerem precisão posicional elevada.

---

## 1. Introdução

Na utilização habitual de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é frequente os utilizadores necessitarem de efectuar conversões de coordenadas entre diferentes sistemas de referência espacial, cartográficos e/ou geográficos.

Na transformação mais geral entre dois sistemas de coordenadas cartográficas, cada um deles baseado num datum geodésico diferente, teremos ao todo 4 transformações, duas de projecção e duas de datum. A figura 1 representa a passagem do sistema PCS1 (*Projected Coordinate System*) para o sistema PCS2, sendo conhecidas as relações de cada datum geodésico (GCS, *Geographic Coordinate System*) com um sistema global. A transformação de datum (GCS1 para GCS2) poderia ser directa, contudo são normalmente estabelecidas transformações de datum local para datum global, de forma a reduzir o número de combinações.



**Figura 1** – Conversão geral entre dois sistemas de coordenadas projectadas (E,N): PCS1, no datum local1, para PCS2, no datum local 2.  $(\lambda, \varphi)$  são as coordenadas geográficas nos diferentes GCS.

Em Portugal tem sido habitual fazer uso da transformação de 7 parâmetros, ou Bursa-Wolf, que envolve rotação, translacção e factor de escala em coordenadas cartesianas terrestres. O Instituto Geográfico Português (IGP) disponibiliza parâmetros que são utilizados pelos fabricantes de software para configurar as transformações que envolvam sistemas de coordenadas nacionais. Juntamente com os parâmetros é fornecida uma análise da precisão das transformações de 7 e 3 parâmetros (IGP, 2008). O quadro 1 resume os erros máximos e médios quadráticos das transformações para Datum Lisboa e Datum 73, nos 833 vértices da rede de 2ª ordem.

**Quadro 1** – Erros em M e P encontrados nas transformações (Bursa-Wolf e Molodensky) de datum ETRS89 para os data Lisboa e 73, nos pontos da rede geodésica, usando os parâmetros do IGP (fonte: IGP, 2008).

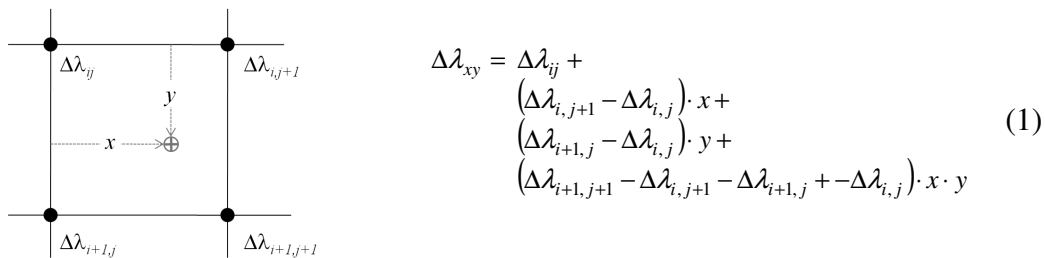
Transformação	Erro	Datum Lisboa		Datum 73	
		eM (m)	eP (m)	eM (m)	eP (m)
Bursa-Wolf	Médio quadrático	1.40	1.49	0.38	0.36
	Máximo Absoluto	5.10	4.15	1.35	1.08
Molodensky	Médio quadrático	1.69	1.60	0.84	0.56
	Máximo Absoluto	4.47	5.03	2.11	1.87

Claramente os erros introduzidos na transformação não são adequados para as aplicações associadas a escalas cartográficas grandes. É esse o caso de escalas usadas em cartografia urbana, como 1:1000 e 1:2000, que toleram erros máximos inferiores aos que ocorrem nestas transformações. Também no caso de ortofotos é cada vez mais frequente encontrarmos resoluções de 25 cm e superiores, gerando-se facilmente conflitos de sobreposição de dados vectoriais que tenham passado por estas transformações de coordenadas. Com a introdução do Datum ETRS89 como sistema base de georreferenciação nacional (Vasconcelos et al., 2007), surge a necessidade de conversão de informação geográfica de Datum 73, e alguma de Datum Lisboa, para o novo sistema. Esta conversão deverá ser feita por processos mais rigorosos que as transformações referidas.

Uma possível alternativa é o estabelecimento de transformações polinomiais de grau 2 ou superior, que poderão modelar deformações sistemáticas das redes geodésicas (Gonzales-Matesanz et al., 2003). Outra alternativa é a transformação local com pontos de controlo. Nos

dois casos levanta-se o problema de implementação destas transformações na generalidade dos softwares SIG, ou outros para processamento de informação geor-referenciada.

A alternativa mais adequada, por se tratar de um standard aceite por muitos programas, e que tem sido adoptada em muitos países, é o uso de grelhas de diferenças de coordenadas geográficas entre um datum local e o datum global. Para cada vértice da grelha são conhecidas as diferenças ( $\Delta\lambda_{ij}$ ,  $\Delta\phi_{ij}$ ). Para um qualquer ponto a transformar são identificados os 4 nós da grelha que o enquadram, como se mostra na figura 2 para o caso da longitude, sendo o valor pretendido dado pela expressão (1), correspondente à interpolação bi-linear. As coordenadas ( $x,y$ ) estão em unidades de intervalo da grelha, e com origem no canto superior esquerdo.



**Figura 2** – Interpolação bilinear de diferença de longitude na grelha para o ponto de coordenadas ( $x,y$ ).

A grelha deverá ser densa, de forma a permitir uma interpolação ajustada ao local, e deverá ser obtida a partir de pontos de referência conhecidos nos dois sistemas. Este método é usado há já bastante tempo nos EUA e no Canadá para converter NAD27 para NAD83 (NGS, 2003), e mais recentemente em Inglaterra (OSGB, 2008), na Austrália, na Nova Zelândia e em França (PROJ, 2008) entre outros. Em Espanha o IGN disponibiliza uma página de conversão, deste tipo, de ED50 para ETRS89, estando o método detalhado em Gonzales-Matesanz, 2003.

Em Portugal o IGP já concluiu a coordenação de mais de 900 pontos das redes de 1ª e 2ª ordem com GPS, sendo essa informação disponibilizada na sua página na internet ([www.igeo.pt/produtos/geodesia/vg/rgn/rgn.asp](http://www.igeo.pt/produtos/geodesia/vg/rgn/rgn.asp)). Tendo em conta a disponibilidade de coordenadas dos mesmos pontos ([www.igeo.pt/produtos/geodesia/vg/rgn/docs/osys.asp](http://www.igeo.pt/produtos/geodesia/vg/rgn/docs/osys.asp)) nos sistemas antigos – Datum Lisboa, Datum 73 e outros – dispõe-se assim de dados com grande densidade que permitem a geração de grelhas com boa precisão para uma interpolação local. Descreve-se a seguir a análise efectuada dos dados da rede geodésica e a geração de grelhas de diferenças de coordenadas. Faz-se também a análise de precisão da transformação.

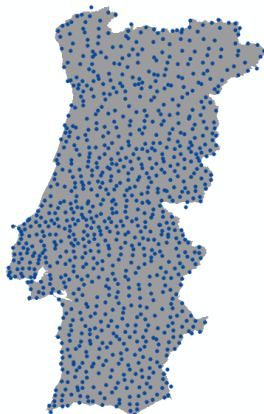
## 2. Consistência local da rede geodésica

Obtiveram-se da página do IGP as coordenadas geográficas ETRS89 de 958 pontos das redes geodésicas de 1ª e 2ª ordem. As coordenadas Datum 73 e Datum Lisboa projectadas foram também obtidas da página do IGP e convertidas para geográficas. Dos 958 pontos alguns não foram considerados por não estarem disponíveis coordenadas nos data locais, por se tratarem de pontos recentes (por exemplo: CASCAIS-TGGS). Outros não foram considerados por terem um ponto muito próximo (pilar auxiliar, como por exemplo ROMÃ-PSW) em que dos dois só um foi considerado.

Finalmente eliminaram-se 4 pontos por se ter detectado que as suas coordenadas no ETRS89 e nos data locais não serem concordantes, apresentando diferenças muito afastadas das dos

pontos vizinhos. É o caso dos vértices Castelo (341), Estevens (441), Leiria (538) e Santana (816), que poderão ter sofrido alterações na sua localização.

Ficaram ao todo 940 pontos, que apresentam uma distribuição muito uniforme pelo país, e que correspondem a uma densidade média de 1 ponto por 95 km<sup>2</sup>. A figura 3 mostra a localização dos pontos.



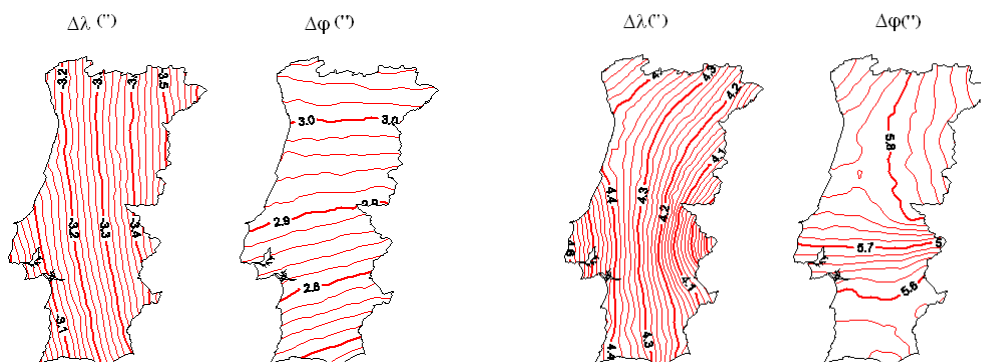
**Figura 3** – Distribuição dos 940 pontos da rede geodésica utilizados para geração de grelhas.

Calcularam-se as diferenças de longitudes e latitudes, de datum local para ETRS89. No quadro 2 mostra-se um extracto das diferenças de coordenadas para 4 pontos próximos entre si.

**Quadro 2** – Extracto da tabela de diferenças de coordenadas, para Datum 73 e Datum Lisboa, em segundos

VG_ID	NOME	LON (°)	LAT (°)	dLON_73 (")	dLAT_73 (")	dLON_LX (")	dLAT_LX (")
2	AIRE-TF6	-8.63659867	39.53579664	-3.1626	-2.9062	4.3913	-5.7664
188	ASNO	-8.65098147	39.45613886	-3.1588	-2.9027	4.3966	-5.7564
373	CHOUPO	-8.72132783	39.43396694	-3.1469	-2.9021	4.4156	-5.7544
.....							

A figura 4 mostra uma representação em isolinhas das diferenças de coordenadas, para o Datum 73 (duas primeiras imagens) e para o Datum Lisboa.



**Figura 4** – representação de isolinhas das diferenças de coordenadas (D73-ETRS89 e DLX-ETRS89).

No caso do Datum 73 as diferenças de coordenadas têm um sistematismo grande: diferença de longitude variando de este para oeste e diferença de latitude variando aproximadamente de norte para sul. Pode observar-se que as diferenças para o Datum Lisboa mostram irregularidades espaciais superiores às do Datum 73, o que explica o pior ajuste da transformação de 7 parâmetros, como indicado no quadro 1 (análise de precisão do IGP).

Antes de se proceder à geração de grelhas de diferenças de coordenadas fez-se uma análise de concordância de coordenadas entre pontos vizinhos. A análise efectuada consistiu em tomar um ponto e considerar todos os outros numa vizinhança de 20 km. Desde que o número de pontos nestas condições seja de 4 ou mais, determinou-se uma transformação afim de ajuste entre as diferenças de coordenadas e a posição  $(\lambda, \varphi)$ , de acordo com a expressão (2).

$$\begin{cases} \Delta\lambda = a\lambda + b\varphi + e \\ \Delta\varphi = c\lambda + d\varphi + f \end{cases} \quad (2)$$

Os parâmetros  $a$  a  $f$  caracterizam a transformação afim. Em cada transformação existem resíduos, que são avaliados pela raiz do erro médio quadrático (REM<sub>Q</sub>), cujas expressões são as seguintes (3):

$$REM_{Q_\lambda} = \sqrt{\frac{\sum r_\lambda^2}{n-3}}, \quad REM_{Q_\varphi} = \sqrt{\frac{\sum r_\varphi^2}{n-3}}. \quad (3)$$

Esta análise fez-se para 938 dos pontos, já em que em 2 dos casos só existiam 3 pontos, não permitindo o ajuste pelo método dos mínimos quadrados. Os REM<sub>Q</sub> foram calculados, quer para o Datum Lisboa, quer para o Datum 73, resumindo-se os seus valores médios e máximos no quadro 3.

**Quadro 3** – Valor médio e valor máximo dos REM<sub>Q</sub> (em metros) encontrados em 938 ajustes de transformações afins para Datum Lisboa e Datum 73

	Datum Lisboa		Datum 73	
	e-Longitude (m)	e-Latitude (m)	e-Longitude (m)	e-Latitude (m)
Média dos REM <sub>Q</sub>	0.082	0.080	0.048	0.048
Maior REM <sub>Q</sub>	0.311	0.280	0.164	0.164

O ajuste de transformações afins tem, em geral, precisão de alguns centímetros. No caso do Datum 73 o ajuste é melhor, contudo, embora pior, no caso do Datum Lisboa a média dos REM<sub>Q</sub> é ainda inferior ao decímetro. Como seria de esperar ajustes locais têm uma precisão muito superior às transformações nacionais de 7 ou 3 parâmetros e como tal são muito mais adequados para as grandes escalas.

### 3. Geração das grelhas de diferença de coordenadas

Numa conversão de datum pretendemos essencialmente determinar diferenças de longitude ( $\Delta\lambda$ ) e de latitude ( $\Delta\varphi$ ). Qualquer cartografia é produzida com ligação à rede geodésica num ponto próximo da área de trabalho, como é o caso de um levantamento topográfico apoiado numa poligonal iniciada num vértice geodésico ou de uma triangulação aérea com pontos de controlo coordenados a partir dos vértices locais.

Assim, ao fazermos conversões de datum num dado local, as diferenças de coordenadas geográficas nos vértices geodésicos próximos deverão ter um peso tanto maior quanto

menores são as distâncias a que se encontram. Este facto aponta para a criação de grelhas de diferenças de coordenadas com base nos métodos de interpolação espacial normalmente disponibilizados nos programas de SIG. Atendendo ao facto de que a transformação afim (que é linear) se mostrou muito adequada para ajustes locais, poderíamos considerar o método de criação de uma rede irregular de triângulos (TIN, na designação inglesa) seguida de interpolação linear. Este método tem a limitação de a região de interpolação não conseguir cobrir todo o território nacional. Assim, utilizou-se a técnica da krigagem, que no caso presente levanta muito poucas dificuldades devido à distribuição muito regular dos pontos. Decidiu-se criar grelhas com espaçamento de 1 décimo de grau, por se tratar de uma densidade semelhante à dos pontos da rede geodésica e ser também o espaçamento usado em grelhas de vários outros países, como França e Nova Zelândia (PROJ, 2008).

Foi utilizado o programa ArcGIS, com a extensão Spatial Analyst. Dado o ficheiro com posições dos marcos e diferenças de coordenadas para o Datum 73 e para o Datum Lisboa foram criadas duas grelhas (por datum) com o espaçamento de 0.1 graus, recorrendo a krigagem ordinária, com todas as opções propostas por defeito pelo programa (*lag size* igual ao espaçamento da grelha, modelo esférico para o variograma, 12 pontos para interpolação). As grelhas foram restringidas a uma região de interpolação definida pelo limite do país, com um buffer de 0.15 graus.

Algumas experiências de geração de grelhas usando outros modelos para o variograma ou outras formas de procura de pontos para interpolação, deram origem a grelhas cuja diferença não ultrapassava dimensões milimétricas (décima milésima de segundo de arco), a não ser esporadicamente nas extremidades da região de interpolação.

Fez-se também uma comparação entre grelhas geradas por krigagem e por TIN com interpolação linear. As diferenças entre os valores de  $\Delta\lambda$  e  $\Delta\phi$  foram calculadas para o interior do país, assim como as respectivas médias e desvios padrão. O quadro 4 apresenta esses valores convertidos para distâncias em metros, para o Datum 73 e para o Datum Lisboa.

**Quadro 4** – Estatística das diferenças entre grelhas geradas por krigagem e por TIN com interpolação linear, expressas em metros, para o Datum 73 e Datum Lisboa

	Datum Lisboa		Datum 73	
	e-Longitude (m)	e-Latitude (m)	e-Longitude (m)	e-Latitude (m)
Média	0.001	0.000	0.001	0.000
Desvio padrão	0.017	0.009	0.026	0.013

Como se pode observar, a escolha de diferentes métodos de interpolação tem um efeito muito pequeno nas grelhas resultantes. No entanto, atendendo à maior cobertura e maior suavidade das grelhas resultantes, deu-se preferência às geradas pela krigagem.

Foram também experimentados os métodos de geração de grelhas que usam splines. De uma forma geral os valores interpolados são muito próximos dos gerados pela krigagem. Observou-se na comparação das grelhas que nos limites do país, devido ao menor número de pontos, os valores gerados tendiam a não ser concordantes com a tendência das funções. Observou-se também, num local em que existem dois pontos muito próximos, que as grelhas resultantes das splines geravam à volta valores muito diferentes dos pontos próximos. Assim deu-se preferência mais uma vez às grelhas resultantes da krigagem.

As grelhas foram finalmente adaptadas ao formato NTv2 (Junkins and Farley, 1995), em ficheiros binários com extensão GSB. Este formato é admitido por diversos programas, nomeadamente pela biblioteca PROJ.4, cujos programas foram usados nas análises de

precisão descritas na secção seguinte. Os mesmos ficheiros podem ser usados em vários programas de código aberto, nomeadamente os programas FWTools, Quantum GIS e GVSIG. Programas comerciais, como o ArcGIS a partir da versão 9.2, admitem também grelhas deste formato, podendo ser muito facilmente configuráveis.

#### 4. Avaliação da precisão da transformação com grelhas

A avaliação da precisão do método foi feita com diferentes conjuntos de pontos. Dado um ponto cujas coordenadas são conhecidas em Datum ETRS89 e num dos data locais calculam-se os erros como sendo as diferenças entre coordenadas conhecidas e coordenadas calculadas pela transformação. No caso presente em que as coordenadas se encontram em graus decimais fez-se uma conversão para distâncias em metros. Para um conjunto de erros calcularam-se a média, o desvio padrão e os valores extremos.

Em primeiro lugar foram considerados os 940 pontos utilizados na geração das grelhas. O quadro 5 contém as estatísticas dos erros encontrados, na transformação de Datum Lisboa e de Datum 73 (valores em metros).

**Quadro 5** – Estatísticas dos erros da transformação de Datum Lisboa e de Datum 73 para ETRS89, nos 940 pontos da rede geodésica usados na geração das grelhas.

	Datum Lisboa		Datum 73	
	e-Longitude (m)	e-Latitude (m)	e-Longitude (m)	e-Latitude (m)
Média	0.001	0.000	0.001	0.000
Desvio padrão	0.057	0.057	0.034	0.031
Mínimo	-0.358	-0.285	-0.250	-0.178
Máximo	0.411	0.589	0.141	0.145

Esta não é uma avaliação independente porque foram esses pontos que deram origem à grelha. Atendendo a que o método de interpolação usado é exacto, se o espaçamento da grelha tendesse para zero os erros tenderiam também para zero. Contudo, atendendo a que o espaçamento da grelha (0.1 graus) é da ordem da distância média entre os pontos da rede geodésica usados, esses erros não são nulos, mas deverão ser inferiores aos erros em pontos independentes.

Uma avaliação totalmente independente foi efectuada com um conjunto de 147 pontos da rede de 3ª. ordem, entretanto observados pelo IGP e disponibilizados na sua página (IGP, 2008). Esses pontos não foram considerados na geração das grelhas e distribuem-se uniformemente pelo país. As estatísticas dos erros estão apresentadas no quadro 6. O total de pontos disponíveis era de 150, contudo 3 não foram considerados por terem erros muito superiores aos restantes, devendo provavelmente tratar-se de pontos que sofreram alterações.

**Quadro 6** – Estatísticas dos erros da transformação com grelhas de Datum Lisboa e de Datum 73 para ETRS89, em 147 pontos da rede geodésica não utilizados na geração das grelhas.

	Datum Lisboa		Datum 73	
	e-Longitude (m)	e-Latitude (m)	e-Longitude (m)	e-Latitude (m)
Média	-0.005	0.004	0.004	-0.008
Desvio padrão	0.073	0.087	0.052	0.047
Mínimo	-0.336	-0.391	-0.387	-0.318
Máximo	0.314	0.479	0.228	0.267

Numa comparação com os erros encontrados em ajustes locais de transformações afins (quadro 3) encontramos valores próximos.

Finalmente fez-se uma análise de transformação de todos os pontos da rede geodésica – 1ª, 2ª e 3ª ordem, num total de 8232 pontos – cujas coordenadas eram conhecidas em Datum 73 e Datum Lisboa. Fizeram-se duas transformações, com passagem intermédia pelo Datum ETRS89, pelo que os erros encontrados incorporam os erros das duas grelhas assim como o efeito de alguma correlação entre as coordenadas nestes dois sistemas. A estatística dos erros encontrados encontra-se resumida no quadro 7 (erros em metro, nas coordenadas projectadas). Nesta análise foram eliminados 3 pontos que tinham erros de vários metros tratando-se provavelmente de pontos alterados.

**Quadro 7** – Estatística dos erros da transformação de Datum Lisboa para Datum 73 (passando por ETRS89), em 8229 pontos de toda a rede geodésica (até 3ª ordem)

	e-M (m)	e-P (m)
Média	-0.011	-0.002
Desvio padrão	0.061	0.064
Mínimo	-1.091	-1.429
Máximo	0.775	0.661

## 5. Conclusões

O método de conversão de coordenadas baseado em grelhas de diferenças de coordenadas, entre os data locais tradicionais usados em Portugal (Datum 73 e Datum Lisboa), revelou-se muito mais rigoroso que os métodos de Bursa-Wolf ou Molodensky, normalmente implementados nos programas comerciais e outros. Com base na análise de erros com pontos independentes, assim como no ajuste de transformações afins locais, pode-se concluir que a transformação de ETRS89 para datum 73 e para datum Lisboa terá, respectivamente, precisão de 5 e 8 centímetros, nas duas coordenadas.

Optou-se pela geração das grelhas pelo método de krigagem. Contudo, devido à distribuição muito regular dos pontos usados, ao seu grande número e à suavidade da variação espacial das diferenças de coordenadas, a escolha do método não é determinante, já que outros métodos geram grelhas muito semelhantes.

As grelhas geradas foram criadas no formato NTV2, podendo ser utilizadas para configurar vários programas muito populares, quer comerciais, quer gratuitos e de código aberto.



Em termos de trabalho futuro poderá ser efectuada uma análise sobre os locais onde os erros foram maiores, o que poderá ajudar a detectar alguns marcos geodésicos que tenham sofrido alterações entre as observações actuais as observações antigas.

### **Referências Bibliográficas**

Vasconcelos, M, Botelho, H., Kol, H. e Casaca, J., 2007. The Portuguese Geodetic Reference Frames. XXIV IUGG General Assembly. Perugia, Italia, June 2007.

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 Subcommission for Europe (EUREF), Toledo, 4 - 7 June 2003.

Junkins D., Farley, S., 1995. National Transformation Version 2 - NTv2 User's Guide. Natural Resources Canada, Geodetic Survey Division

OSGB, 2008. A Guide to Coordinate Systems in Great Britain. Publicação do Ordnance Survey, v1.9 Mar 2008 D00659 © Crown copyright.

### **Referências a páginas na internet**

IGP, 2008. Instituto Geográfico Português: <http://www.igeo.pt> (Visitado em Outubro-2008).

NGS, 2003. US National Geodetic Survey - Geodetic Toolkit NADCON, 2008. Web page: [http://www.ngs.noaa.gov/PC\\_PROD/NADCON/](http://www.ngs.noaa.gov/PC_PROD/NADCON/) (Visitado em Março-2008).

PROJ, 2008. PROJ.4 - Cartographic Projections Library. Web page: <http://www.remotesensing.org/proj/> (Visitado em Outubro-2008).