

UTILIZAÇÃO DE GPS NA DETERMINAÇÃO DE SUPERFÍCIES PIEZOMÉTRICAS

C. Antunes¹; P. Duarte²; G. Prates³; L. Santos¹; P. Sousa³;
C. A. Cupeto⁴; C. Catita¹; A. Navarro¹; J. Calvão¹

¹ Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa - FCUL

² Centro de Geologia da FCUL - Projecto ERHSA

³ Instituto das Ciências da Terra e do Espaço - ICTE

⁴ Instituto da Água - INAG

Resumo

Com o objectivo de construir superfícies piezométricas dos sistemas aquíferos carbonatados de Estremoz - Cano e Elvas - Vila Boim, foi coordenado um conjunto de pontos de água com uma precisão centimétrica, utilizando o sistema GPS como método de nivelamento. Para garantir tal precisão altimétrica, foi necessário proceder à determinação de um modelo local de geóide através da dedução das ondulações de geóide em marcas de nivelamento da rede nacional de primeira ordem, onde se efectuou também o posicionamento por GPS. Obtiveram-se, para cada ponto de observação, cotas absolutas do nível piezométrico, possibilitando a interpolação das superfícies piezométricas. Neste artigo apresenta-se a metodologia utilizada, um modelo local do geóide e a superfície piezométrica de uma zona específica.

Abstract

To determine the piezometric surfaces for the Estremoz - Cano and Elvas - Vila Boim calcareous aquifers we have coordinated a set of water points (water wells and holes) with the centimetre level of precision on the orthometric heights, using the GPS as levelling method. For this purpose, it was necessary to modulate locally the geoid by the determination of the geoid undulations on the levelling points of the national first order net, where the geodetic coordinates were determined by GPS. For each observation point, the absolute orthometric height of the piezometric level was calculated, allowing the piezometric surfaces determination. In this paper are presented the methodology used, a local geoid model and the piezometric surface of a specific area.

1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

O Instituto da Água (INAG) é a entidade responsável pelo estudo e monitorização dos Sistemas Aquíferos Estremoz-Cano e Elvas-Vila Boim no âmbito do Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA), promovido pela Comissão de Coordenação da Região do Alentejo. Os sistemas aquíferos referidos estão situados no Alto Alentejo, próximos da fronteira com Espanha (Fig. 1).

Para a coordenação dos cerca de 200 pontos de água (poços e furos artesianos) escolhidos com vista à construção das cartas piezométricas, o INAG contou com a Colaboração do Instituto das Ciências da Terra e do Espaço (ICTE).

Neste artigo apenas é referido o sistema aquífero de Estremoz, por estar dada por concluída a coordenação da rede total de pontos de água e a respectiva modelação do geóide necessária à

aplicação do método de nivelamento por GPS. O sistema está situado ao longo do anticlinal de Estremoz (Fig. 2), uma zona predominantemente calcária.

Com o objectivo de se determinarem superfícies piezométricas de qualidade por forma a retirar das respectivas cartas: sentidos de fluxo; gradientes hidráulicos; e possíveis sectorizações dos sistemas aquíferos; foi imposto o limite da precisão altimétrica de 5cm (centimétrica), para que o majorante do erro (dado para distâncias de 1Km, as mais pequenas entre os pontos de água) resultante na determinação de gradientes hidráulicos (declive da superfície piezométrica) se situasse num valor insignificante de 0.05%. Considerando a precisão planimétrica superior a 10m, obtém-se uma influência ainda menor nesse mesmo erro, pelo que não tem de haver grande preocupação neste tipo de posicionamento.

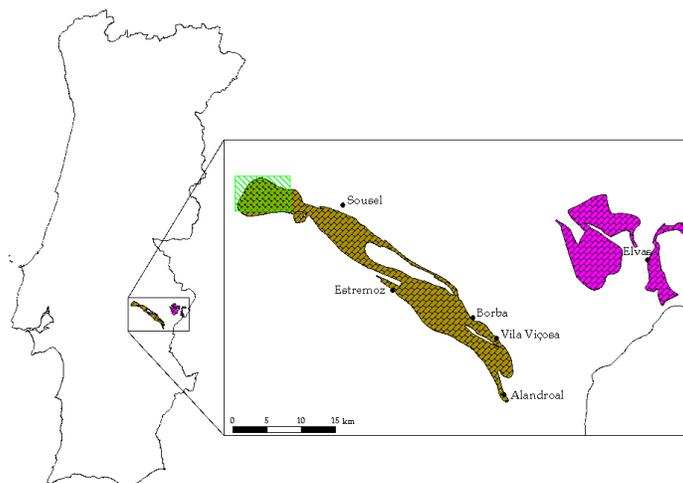


Fig. 1 - Localização dos Sistemas Aquíferos em estudo.

Fazendo uma análise pormenorizada, ao nível de precisão, de custo e de duração do trabalho envolvente, relativamente aos três métodos candidatos - nivelamento por GPS, nivelamento trigonométrico com zenitais recíprocas e nivelamento geométrico de 2ª ordem, facilmente se conclui (ver Tabela) que o método com o recurso ao GPS apresenta a melhor relação precisão/custo/duração face aos restantes métodos.

MÉTODO DE NIVELAMENTO	PRECISÃO Horiz.	PRECISÃO Vertical	DURAÇÃO (campo+gabinete)	DURAÇÃO TOTAL	CUSTO (Contos)
GPS	<2cm	<3cm	7d+1d (15Pto/Dia)	1,5 Sem	1000 (10C/Pto)
TRIGONOMÉTRICO	3cm/km	5cm/km	35d+(2)d (6Km/Dia)	1,5 Mês	2450 (70C/Dia)
GEOMÉTRICO	-	1cm/km	40d+(3)d (5Km/Dia)	2 Mês	2000 (10C/Km)

Tabela 1. Análise comparativa para 100 pontos, uma rede viária de 200Km e com uma equipa topográfica.

O trabalho foi realizado em três épocas distintas com três equipas topográficas trabalhando em simultâneo, tendo sido despendidos 5 dias úteis no total para a coordenação dos cerca de 120 pontos de água da zona de Estremoz e toda a rede de apoio à coordenação e construção do modelo local do geóide, incluindo a repetição de pontos rejeitados no pós-processamento por apresentarem uma precisão fora do limite aceitável (3cm na altitude elipsóidica).

2. METODOLOGIA

Com vista à obtenção da precisão e rapidez exigidas foi utilizado o método rápido estático com monofrequência (Antunes, 1997) no posicionamento por GPS, fazendo-se períodos de observação de 15 minutos com 5 segundos de intervalo entre registos, e com estações fixas em pontos tais que as respectivas bases não ultrapassassem os 10Km de comprimento.

Face à configuração e dimensão do anticlinal de Estremoz (Fig. 2) optou-se por definir uma rede de apoio constituída por três vértices, um no extremo NW - o vértice de 2ª ordem do Cano, outro ao centro - nas instalações do Polo Universitário de Estremoz e outro no extremo SE - no Castelo de Alandroal. Desta forma, qualquer ponto do aquífero ficará a menos de 10Km de uma estação base.

A fim de garantir a fiabilidade dos resultados foi imposta uma precisão pós-processamento de 3cm na componente altimétrica, o que levou à repetição de alguns pontos ($\approx 20\%$), não pelas condições mínimas de observacionalidade do método mas, quase sempre, por uma escolha pouco adequada do ponto de posicionamento relativamente ao meio envolvente.

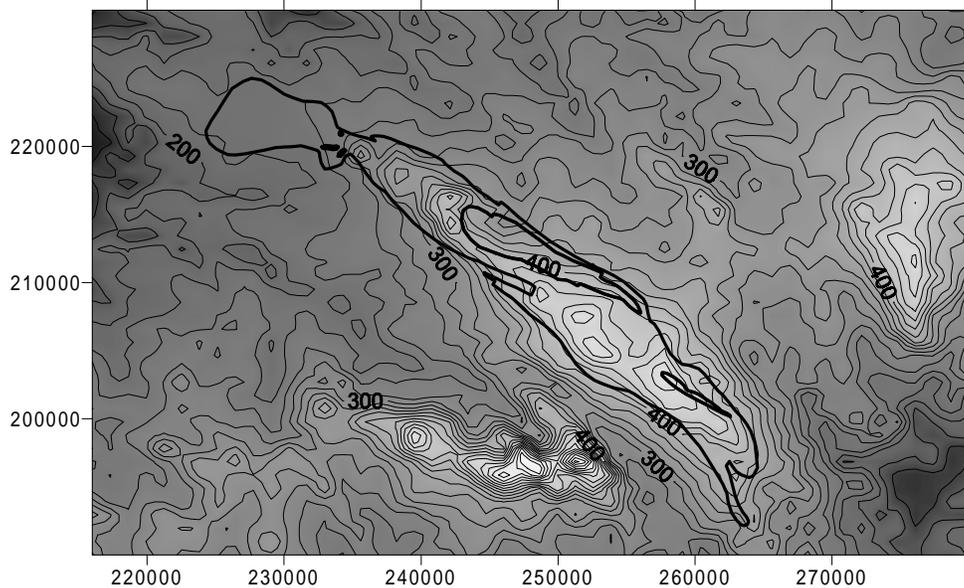


Fig. 2 - Altimetria da Zona de Estremoz (Coordenadas Hayford-Gauss Militares).

O posicionamento dos pontos de água foi sempre feito sobre o bordo do respectivo revestimento ou em pontos excêntricos quando as condições não permitiam, à partida, uma boa recepção do sinal GPS. Nestes casos, o posicionamento era transportado para o bordo do revestimento por irradiação. Os pontos estabelecidos para a coordenação dos pontos de água ficaram perfeitamente identificados por uma marca vermelha bem visível e em suporte aparentemente estável, por forma a garantir uma boa referência à repetibilidade das observações dos respectivos Níveis Piezométricos (NPI).

O sistema de coordenadas utilizado, por conveniência, foi o Hayford-Gauss Datum Lisboa com falsa origem, também designado por sistema de coordenadas militares. A ligação planimétrica à rede geodésica nacional foi feita a partir do vértice do Cano, um dos pontos utilizado no apoio, enquanto que a fixação do modelo de geóide ao sistema de referência WGS84 foi feita no vértice P4 da Base Geodésica do Instituto Português de Cartografia e Cadastro (IPCC) a NW de Estremoz. As coordenadas desse vértice (marca na base do pilar) e dos pontos P1 e P7 da mesma base foram extraídas de Pinto (1995); para P4 e no sistema

WGS84 $\phi = 38^\circ 53' 18.9''$, $\lambda = -7^\circ 38' 46.6''$, $h = 464.775\text{m}$ e $H = 409.578\text{m}$ - altitude ortométrica relativa ao sistema H50.

O método de nivelamento por GPS impõe o conhecimento de um modelo de Geóide, com precisão adequada, por forma a obterem-se as respectivas altitudes pela seguinte forma:

$$H_2 = h_1 + \Delta h_{12} - N_2 \quad (2.1)$$

onde o Δh resulta do processamento dos dados GPS da respectiva base, h_1 é a altitude elipsóidica do ponto de apoio e N_2 o valor da ondulação do geóide extraída do modelo.

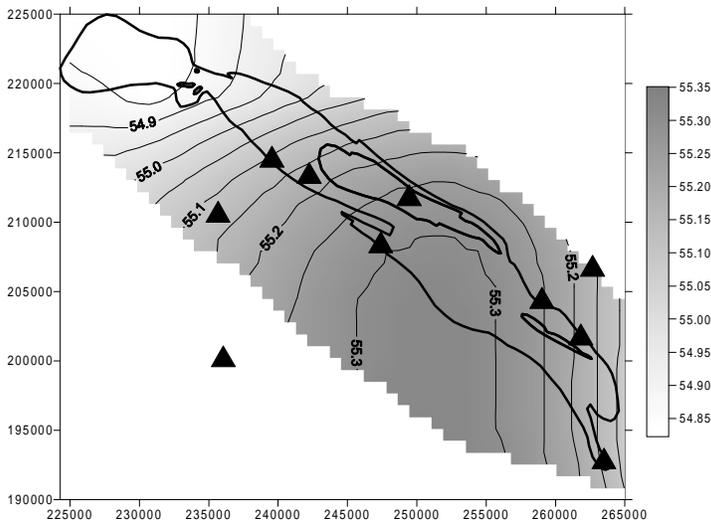


Fig. 3 - Modelo local do geóide.

A inexistência de um modelo de geóide com precisão centimétrica obrigou a respectiva determinação por integração de GPS e nivelamento geométrico de alta precisão. A localização de linhas de nivelamento de alta precisão da rede nacional do IPCC na zona do aquífero, e a proximidade da Base Geodésica proporcionaram a obtenção de uma rede de pontos de nivelamento sobre os quais foram deduzidas as respectivas ondulações do geóide. Às marcas de nivelamento de 1ª ordem (14

no total) possíveis de serem utilizadas foram adicionados dois pontos observados, um por nivelamento geométrico de média precisão e outro por nivelamento trigonométrico com zenitais recíprocas. Assim, a modelação local do geóide resultou de uma extrapolação baseada em 10 valores de ondulação do geóide deduzidos nesses pontos (ver rede de pontos na Figura 3), através de uma função polinomial ajustada pelo estimador de mínimos quadrados.

O posicionamento por GPS nas marcas de nivelamento foi feito no modo rápido estático com monofrequência, com 30 minutos de observação e 5 segundos de intervalo entre registos, tendo-se obtido uma precisão altimétrica superior ao centímetro. Na maior parte dos casos não foi possível posicionar os receptores GPS sobre as marcas de nivelamento, pelo que se teve de posicionar em pontos excêntricos para os quais foi transportada a altitude ortométrica das marcas apenas com um lance de nivelamento geométrico.

Para a construção do modelo de geóide (Fig. 3) foi utilizada a seguinte função polinomial definida sobre o plano cartográfico do sistema de coordenadas utilizado:

$$N = a + b * M + c * P + d * M * P + e * M^2 + f * P^2 + g * M^3 + h * P^3 \quad (2.2)$$

(M, P) são as coordenadas cartográficas dos pontos e os respectivos coeficientes são os que resultaram do ajustamento feito com as ondulações do geóide determinadas nos pontos de nivelamento. A escolha desta função, bem como a dos 10 pontos de nivelamento, resulta do facto de essa configuração apresentar uma solução com resíduos menores e curvatura mínima no modelo resultante. No entanto, as diferenças relativas entre os diferentes modelos

candidatos, em especial na zona mais desfavorecida ao nível da observacionalidade de ondulações do geóide - Cano (ver rede de pontos na Figura 3), não ultrapassaram 7mm/Km.

Para melhorar o modelo de geóide apresentado será necessário adensar a rede de pontos de observação de ondulações do geóide ao longo do anticlinal e na sua periferia.

Na selecção das 10 marcas de nivelamento escolhidas para a construção do modelo de geóide foram tidos em consideração os possíveis abatimentos das marcas de nivelamento indicados pelos grandes resíduos nos diferentes modelos ajustados. Esta análise teve de ser considerada, pois o nivelamento daquelas linhas data dos anos 60. A escolha recaiu sobre as marcas que aparentemente terão maior estabilidade, isto é, as marcas de nivelamento principal (NP) colocadas nas soleiras das portas das Igrejas, sempre com marcas testemunhas que confirmam essa estabilidade.

A construção das superfícies piezométricas dos aquíferos é feita à custa dos valores de medição dos níveis hidrostáticos (profundidade da água) a partir das marcas perfeitamente identificadas nos pontos de água ($\sigma=1\text{cm}$). O nível piezométrico resulta da subtracção da profundidade do nível da água ao valor da cota do ponto de referência determinado pelo método geodésico aqui apresentado. Com uma malha representativa de pontos de água são então construídas as respectivas cartas piezométricas utilizando métodos de geoestatística e considerando diferentes zonas de conexão hidráulica.

A zona do Cano a NW do sistema aquífero do anticlinal de Estremoz é a zona até agora estudada com maior rigor, por apresentar maior densidade de pontos de água (0.5 p.a./Km^2) e por geologicamente apresentar maior homogeneidade e isotropia que o restante sistema aquífero, facilitando assim o estudo hidrogeológico. Esta zona é ocupada por formação calcária pliocénica, servindo de suporte a um aquífero livre, poroso e heterogéneo (Cupeto,1991).

Para a interpolação da superfície piezométrica (Fig. 4), numa área de 40Km^2 , consideraram-se 20 pontos de água (15 poços, 4 furos e uma nascente) e dois poços fora da área (imediatamente a Este).

A fim de se definir a metodologia a utilizar na construção das cartas piezométricas foi utilizado o programa SURFER' for Windows, versão 5.02, recorrendo aos diferentes métodos disponíveis de interpolação: *Inverse*

Distance; *Kriging*; *Minimum Curvature*; *Radial Basis Functions*; e *Shepard's Method*. A escolha recaiu sobre o método *Kriging*, apesar de apresentar maiores desvios nos pontos de observação, porque do ponto de vista hidrogeológico a respectiva interpolação representa melhor a superfície piezométrica.

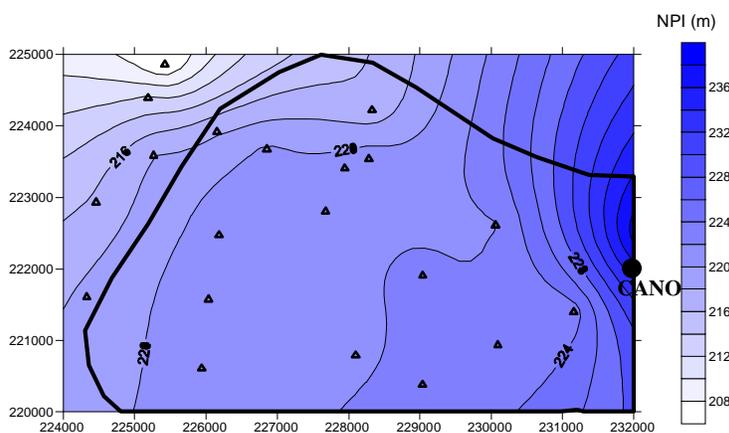


Fig. 4 - Isopiezas na zona do Cano relativas a Julho de 1997, com 22 dados piezométricos.

3. CONCLUSÕES

Apesar de qualquer modelo poder ter desvios absolutos variáveis ao longo da zona de estudo, nomeadamente na zona mais desfavorecida - Cano, as diferenças absolutas entre modelos mostraram um erro relativo não superior a 1cm/Km. Considerando a precisão relativa nos diferentes processos de determinação: 1cm para as altitudes elipsóidicas das marcas de nivelamento, 3cm para as altitudes elipsóidicas dos pontos de água e 1cm no modelo do geóide, podemos concluir que a precisão final relativa das altitudes ortométricas dos pontos de água é superior aos 5cm exigidos. Este facto resulta da escolha acertada em termos da metodologia adoptada que teve em vista a optimização do factor custo.

Tendo em conta a precisão alcançada bem como o tempo de execução do trabalho de campo, mostra-se que este método de nivelamento constitui, para grandes áreas e trabalhos de grande dimensão, um método alternativo e competitivo.

Para melhorar a precisão final basta, desde que esteja garantida a alta precisão no nivelamento geométrico das marcas de controlo, aumentar o tempo de observação GPS, principalmente nos pontos de água, e aumentar a representatividade das marcas de nivelamento necessárias na modelação do geóide. Assim, é possível obter-se a precisão milimétrica - alta precisão; e mesmo nessa situação este método será ainda competitivo, ao nível dos custos, com o nivelamento geométrico de alta precisão para trabalhos desta dimensão.

Referências Bibliográfica

Antunes, C. (1997), *Um Modo “Rápido-Estático” com GPS Monofrequência no Apoio à Cartografia*. Cartografia e Cadastro, Nº 6, I.P.C.C., Lisboa.

Cupeto, C. (1991), *Contribuição para o conhecimento hidrogeológico do maciço calcário de Estremoz (Cano - Sousel)*. Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Geologia Económica e Aplicada, Lisboa

Pinto, J. T., J. Torres, M. Lisboa e H. Ribeiro (1995), *Expansão da GEOBASE*. Cartografia e Cadastro, Nº3, Dezembro 1995, IPCC, Lisboa.