

## RESULTADOS PRELIMINARES DA ESTIMATIVA DE SUBSIDÊNCIA NO CAMPUS UFPE ATRAVÉS DO MONITORAMENTO COM USO DO GNSS

*Rejane Luna<sup>1\*</sup> & Jaime Cabral<sup>2</sup> & Silvio Garnés<sup>3</sup> & Haroldo Marques<sup>4</sup> & Sylvana Santos<sup>5</sup>*

**RESUMO** – O uso de águas subterrâneas vem aumentando constantemente, nas últimas décadas, no Brasil e em outras localidades em todo o mundo. As causas para esse aumento são, entre outras, maior demanda de água, poluição de vários rios, melhor utilização dos aquíferos, emprego da água superficial para diversos fins, modernização das empresas de perfuração de poços, entre outros. A subsidência do solo, muitas vezes, tem uma forte ligação com o processo de desenvolvimento urbano, por causa do aumento de áreas edificadas, e crescimento da população, de atividades econômicas e industriais, e da extração de águas subterrâneas. Métodos geodésicos, para quantificar a deformação vertical do solo, devido à retirada de águas subterrâneas, têm sido utilizados em registros do fenômeno em todo o mundo, dentre os quais se recomenda o uso do GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), em pontos distribuídos dentro e fora da área em que se investiga os movimentos do solo, compondo, assim, uma rede de monitoramento de subsidência. Através da comparação das alturas desses pontos, realizados em diferentes épocas, pode-se ter um indício de estimativa para quantificar o fenômeno.

**Palavras-Chave** – subsidência do solo, superexploração de água subterrânea, posicionamento preciso.

## PRELIMINARY RESULTS OF ESTIMATING SUBSIDENCE IN UFPE CAMPUS BY GNSS MONITORING

**ABSTRACT** - The use of groundwater has been increasing steadily in recent decades, in Brazil and elsewhere around the world. The causes for this increase are, among others, greater water demand, pollution of various rivers, better use of aquifers, use of surface water for various purposes, upgrading of drilling, among others. The subsidence of the soil often has a strong link with the urban development process, because of the increase in built-up areas, and population growth, economic and industrial activities, and the extraction of groundwater. Geodetic methods to quantify the vertical deformation of the soil due to the withdrawal of groundwater, have been used in records of the phenomenon worldwide, among which recommends the use of GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) in distributed points within and outside the area in which investigates the movements of the ground, forming thereby a network monitoring subsidence. By comparing the times of these points, performed at different times, one may have an indication estimated to quantify this phenomenon.

<sup>1</sup> Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Centro de Tecnologia e Geociências – CTG, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, 50670-901 – Recife, PE, Brasil. E-mail: rejane\_luna@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Professor do PPGEC/CTG/UFPE. E-mail: jcabral@ufpe.br

<sup>3</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – PPGCGTG, CTG/UFPE. E-mail: sjgarnes@gmail.com

<sup>4</sup> Professor do PPGCGTG/CTG/UFPE. E-mail: haroldoh2o@gmail.com

<sup>5</sup> Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECAM, Centro Acadêmico do Agreste – CAA, UFPE. E-mail: sylvana.ufpe@gmail.com

**Keywords** – soil subsidence, groundwater overexploitation, precise positioning.

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos problemas que compromete a sustentabilidade do uso de água subterrânea é o risco de subsidência do solo, que precisa ser analisado com cuidado para prevenir ou mitigar prejuízos em edificações e pavimentos. Uma das causas de subsidência do solo é a retirada de fluido de vazios subterrâneos (poros ou cavidades). Nos grandes centros urbanos e em áreas destinadas à agricultura e às atividades industriais, a exploração demasiada de água subterrânea, que resulta num ritmo de extração superior à capacidade de recarga, constitui a causa mais comum de subsidência, como pode ser observado na grande quantidade de registros do fenômeno em todo o mundo (Galloway et al. 2008; Carreón-Freyre et al. 2010; Galloway and Burbey 2011). A discussão sobre os mecanismos de ocorrência indica a necessidade de maior investigação sobre o tema, para o desenvolvimento de ferramentas de previsão e simulação de cenários, de estratégias de monitoramento e de técnicas de mitigação do problema. Neste contexto, métodos geodésicos, para quantificar a deformação vertical do solo, devido à retirada de águas subterrâneas, têm sido utilizados em registros do fenômeno avaliados em todo o mundo, dentre os quais se destaca o uso do GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), em pontos distribuídos dentro e fora da área em que se investiga os movimentos do solo, compondo, assim, uma rede de monitoramento de subsidência. Através da comparação das alturas desses pontos, realizados em diferentes épocas, pode-se ter um indício de estimativa para quantificar o fenômeno.

Segundo Santos, Cabral & Pontes Filho (2012), em geral, o fator que afeta a acurácia obtida para as coordenadas utilizando o GNSS é a qualidade da geometria da constelação de satélites e a posição da antena do receptor no ponto escolhido. A melhor geometria na constelação de satélites é identificada por uma quantidade chamada PDOP (*Positional Dilution of Precision*), de modo que os menores valores de PDOP estão associados às melhores configurações geométricas e conseqüentemente às melhores precisões na determinação da posição. A geometria dos satélites tem um maior impacto quando o receptor GNSS é usado em áreas urbanas (próximo a edifícios), em vales e regiões montanhosas, já que a presença de obstrução pode provocar distorção no sinal enviado pelo satélite, aumentando o valor do PDOP. Hoje em dia, devido à quantidade favorável de satélites, o valor do PDOP fica em torno de 5, para curtos períodos de rastreamento. Assim, na situação descrita, é necessário checar os valores de PDOP e fazer uma análise crítica dos resultados obtidos.

Entre as três coordenadas determinadas a partir do sistema GNSS, a altitude geométrica se destaca devido à sua maior sensibilidade à influência de erros na sua determinação. Dentre as fontes de erro que mais interferem na determinação da altitude geométrica, causando assim um condicionante para obtenção de sua precisão, estão: a configuração geométrica dos satélites, a refração da ionosfera e troposfera e a variação do centro de fase da antena. De acordo com Santos (2005), a minimização desses erros depende de algumas circunstâncias operacionais decisivas para o posicionamento GNSS, tais como: o comprimento da linha de base, a duração da sessão, a disponibilidade de equipamentos de dupla frequência, a quantidade de receptores GNSS, a quantidade de satélites rastreados e a qualidade da geometria da constelação de satélites.

No estudo da técnica GNSS para detecção de pequenos deslocamentos verticais, como os que ocorrem no início do fenômeno da subsidência, Santos (2005) realizou um experimento para simular um deslocamento vertical semelhante ao observado com a ocorrência de subsidência do solo. De acordo com Santos (2005), observações GNSS foram utilizadas na análise da influência que os edifícios podem ter nos arredores das estações GNSS, situação comum nos centros urbanos. Para este fim, foram realizados processos de simulação da existência de obstáculos. O experimento descrito por Santos (2005) foi realizado no telhado da Universidade de Hannover, na Alemanha, entre os dias 10 e 21 de setembro de 2004. Segundo a autora, foi feito um levantamento estático utilizando dois receptores GNSS, com sessões de no mínimo 48 horas e sete pontos pertencentes à rede de monitoramento contínuo da Alemanha (SAPOS). Em um dos receptores, a antena sofreu variações de altura, ao longo do rastreamento, simulando uma subsidência, tendo sido possível, ao final do experimento, detectar os deslocamentos introduzidos na antena, provando que a tecnologia pode ser aplicada para detecção de pequenos deslocamentos verticais (Santos, 2005).

Este trabalho tem por objetivo validar a utilização de métodos geodésicos, em particular o GNSS na medição de pequenos deslocamentos verticais do solo no *campus* da UFPE, em Recife, aplicando a sugestão do experimento realizado na Universidade de Hannover por Santos (2005).

## 2 RISCOS DE SUBSIDÊNCIA

Segundo Cabral, Santos & Pontes Filho (2006), considerando as demandas existentes e a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos é necessário realizar a gestão adequada desses recursos para que a captação da água do aquífero seja realizada de forma compatível com a capacidade de recuperação do mesmo. Caso contrário, é preciso avaliar os riscos geotécnicos resultantes da exploração dessa área. De acordo com os autores, a exploração da água subterrânea pode ser considerada demasiada quando provoca danos ao meio ambiente ou para o próprio recurso, como aumento nos custos de bombeamento, escassez de água, inundação de água contaminada e problemas geotécnicos de subsidência.

Galloway & Burbey (2011) afirmam que, a subsidência é um fenômeno sutil que pode ser observado pelo movimento do solo através de deformações e falhas. As deformações provocadas por deslocamentos verticais e horizontais são os principais riscos associados à retirada de águas subterrâneas. Sendo assim, o controle geodésico, além de modelos matemáticos (simulações numéricas), são importantes para avaliar esses riscos e estabelecer previsões futuras. Ainda de acordo com os mesmos autores, para o estudo da subsidência geralmente são implantados *bench marks* através de nivelamentos de primeira ou segunda ordem. De acordo com Tusat, Ustun & Yalvac (2010), a subsidência é um dos riscos, em potencial, que possam surgir como resultado de serem retiradas quantidades excessivas de água subterrânea. Deslocamentos verticais da ordem de 12 a 52 mm, foram observados, através de métodos geodésicos, na bacia de Konya na Turquia, durante os últimos 40 anos. O fenômeno de subsidência nessa região tem sido observado em áreas onde a água subterrânea tem sido intensivamente utilizada na irrigação e para uso diário das comunidades.

### 3 MECANISMOS DE SUBSIDÊNCIA

De acordo com Cabral, Santos & Pontes Filho (2006), a subsidência é um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, ou seja, redução do nível do terreno devido à remoção de suporte subterrâneo. Os autores discutiram as principais características do mecanismo causador da subsidência e destacaram a subdivisão do mesmo apresentada por Mingnorange (2000) em cinco grupo: hidrocompactação, dissolução de rochas e sais, extração de água subterrânea, extração de petróleo ou gás e atividade mineira. A subsidência associada à extração de águas subterrâneas em aquíferos sedimentares constitui o objetivo do presente trabalho e, segundo Cabral, Santos & Pontes Filho (2006), é resultante do bombeamento do fluido que reduz a pressão dos poros que ajudam a suportar as camadas subjacentes do solo, como consequência do rebaixamento do nível da água. Os autores descreveram a ocorrência de tal mecanismo do ponto de vista da distribuição de pressões e do Princípio das Tensões Efetivas – PTE proposto por Terzaghi (1925).

De acordo com Santos (2005), o PTE constitui o elo entre a exploração de água subterrânea e o fenômeno de subsidência e considerando que dentro do aquífero a pressão neutra  $u$ , ou seja, a pressão no poro preenchido com água equivale à carga hidráulica, quando a água é explorada do aquífero, a carga piezométrica e a pressão neutra diminuem e a tensão efetiva no aquífero aumenta, uma vez que a pressão total permanece constante. Isso é esquematizado na Figura 1, onde num determinado ponto P dentro do aquífero, antes do bombeamento, o solo está sujeito às tensões iniciais  $(\sigma_0, \sigma'_0, u)$ , tal que o peso das camadas de solo é suportada pela matriz sólida e pelo fluido simultaneamente (Santos, 2005). Segundo a autora, com a contínua retirada dos recursos hídricos subterrâneos e o rebaixamento do nível da água, verifica-se que, no mesmo ponto P, a carga geostática passa a ser suportada apenas pela matriz sólida, e este aumento na tensão efetiva resulta na compressão do solo e conseqüente subsidência. De acordo com Scott (1979 *apud* SANTOS, 2005), considerando que a contração volumétrica de materiais granulares é quase irreversível, a superfície de subsidência que ocorre como resultado da redução na pressão do fluido em uma camada subjacente pode raramente ser revertida. Ainda no que se refere à distribuição de pressões, esse fenômeno pode acontecer tanto em aquíferos confinados quanto em aquíferos não confinados, para essa segunda situação a Figura 2 apresenta um esquema da ocorrência do fenômeno, em que ao rebaixar o nível do aquífero inferior, a camada de argila drena a água e ocorre um recalque que acarreta um rebaixamento do nível do terreno – NT (Santos, 2005). O comportamento do solo observado com a exploração de água subterrânea também está relacionado com sua granulometria, e de acordo com Santos (2005), os solos de granulação fina registram “na memória” as máximas tensões experimentadas por sua estrutura, que são comumente conhecidas como tensão de pré-consolidação. A autora destaca que a tensão de pré-consolidação constitui o fator condicionante do comportamento da estrutura sólida do solo, nesse tipo de material, em resposta às solicitações de carga e quando a tensão efetiva reduz e a pressão neutra aumenta, e o solo expande elasticamente. Por outro lado, quando a tensão efetiva aumenta e a pressão neutra diminui duas situações podem ser esperadas: a tensão efetiva é inferior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um deslocamento vertical recuperável ou elástico, ou, ao contrário, a tensão efetiva é superior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um significativo re-arranjo que resulta num deslocamento vertical irreversível ou inelástico (Santos, 2005).

Fonte: Santos (2005).

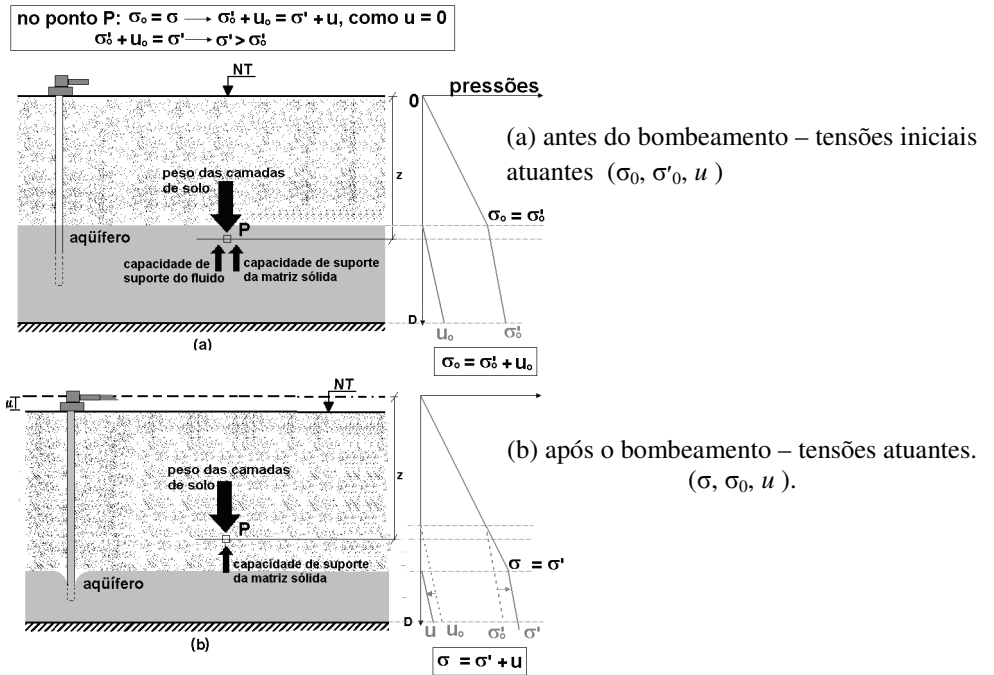


Figura 1 – Esquema da distribuição de pressões em um aquífero sedimentar não-confinado submetido à sobreexploração.

Fonte: Santos (2005).

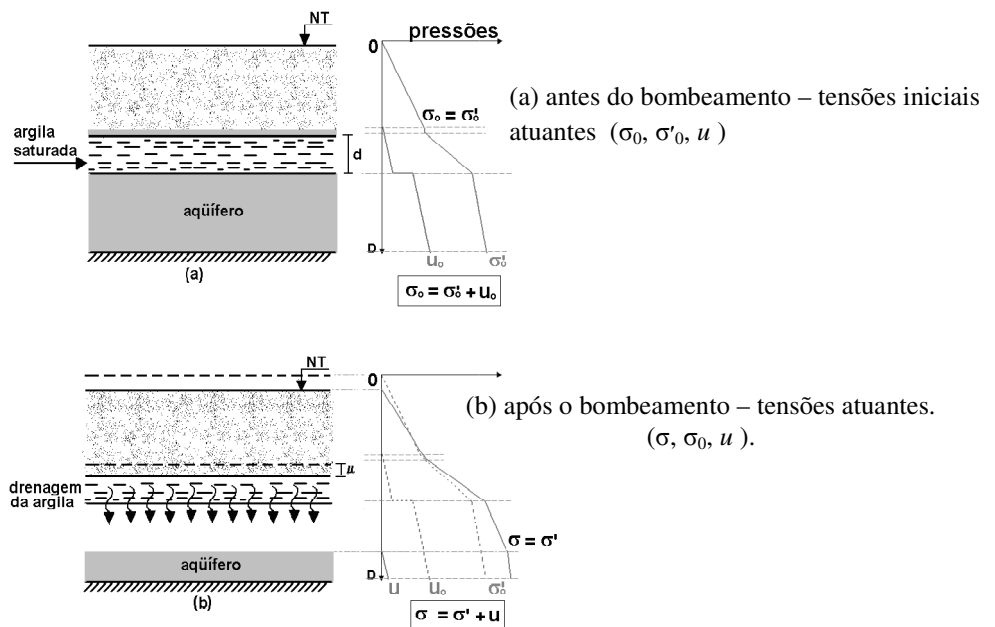


Figura 2 – Esquema da distribuição de pressões em um aquífero sedimentar confinado submetido à sobreexploração.

## 4 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Como rede de referência para o processamento dos dados GNSS, foram utilizados quatro pontos localizados no *campus* da UFPE: RBMC (no terraço da biblioteca central do *campus*), os pontos localizados no terraço do Laboratório de Astronomia do CTG (LAASTRO-C e LAASTRO-E) e um ponto da rede geodésica do *campus* da UFPE (EPS-04), conforme esquema apresentado na Figura 3.

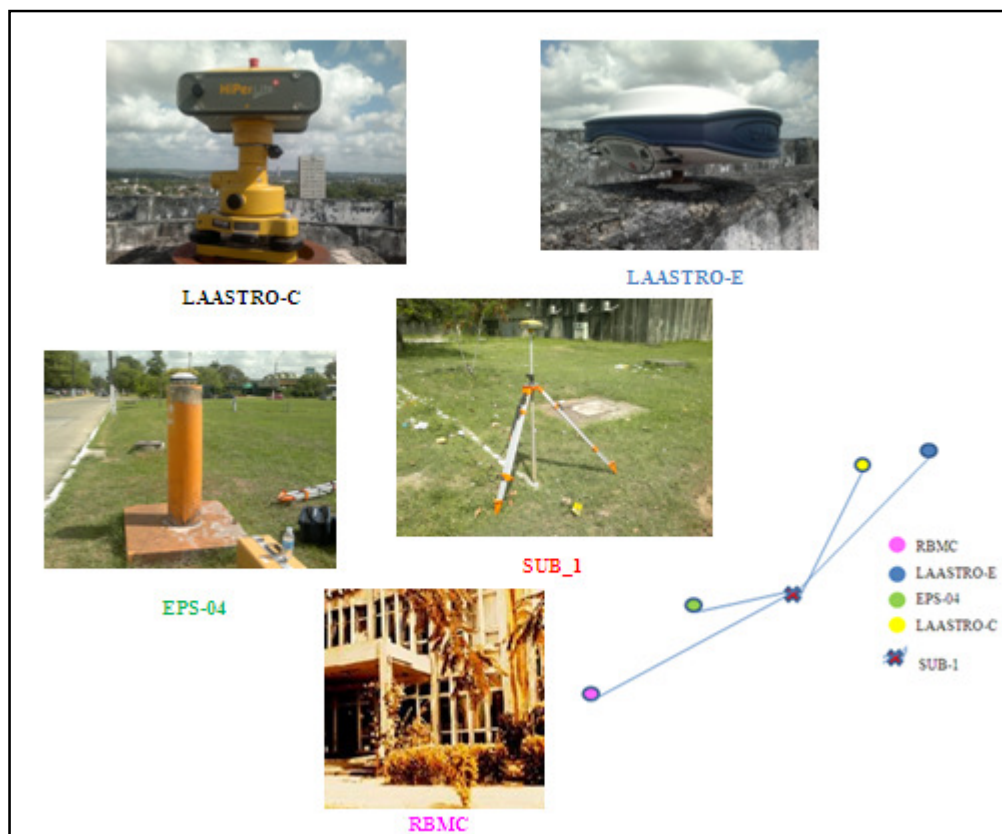


Figura 3 – Esquema com a configuração geométrica da rede utilizada - *campus* UFPE

Para simulação do fenômeno da subsidência foi utilizado o ponto localizado entre os quatro pontos da rede de referência, denominado SUB-1, cuja configuração geométrica para o experimento está explicitada na Figura 3. O rastreamento foi realizado no dia 22 de janeiro de 2013, no *campus* da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) em Recife. Foram utilizados 02 (dois) pares de rastreadores GNSS, da Topcon e Ashtech, ambos com dupla frequência (L1 e L2), sendo que o primeiro rastreou as constelações de satélites GPS e GLONASS. O método de rastreamento aplicado foi estático com duração de aproximadamente 5 horas. Para o ponto SUB-1, no qual se simulou a subsidência, o tempo de rastreamento foi de 2 horas para cada uma das posições. O experimento consistiu em serem instalados inicialmente os receptores nas estações de referência LAASTRO-C, LAASTRO-E e EPS-04, além da RBMC, conforme Quadro 1, com as informações de início e término do rastreamento, tipo de receptor e altura da antena. Em seguida, instalou-se o receptor no ponto SUB-1, fixado a um bastão de altura regulável. Inicialmente a altura do bastão foi regulada em 1,50m, conforme mostra a Figura 4. O receptor permaneceu nessa posição por 2 horas. Ao término desta sessão, o receptor foi desligado, a altura foi alterada para 1,49m e iniciou-se uma nova sessão,

também com duração de 2 horas. Para esta segunda posição do bastão o ponto foi chamado de SUB1\_2, conforme mostram o Quadro 2 e a Figura 4.

Quadro 1- Informações das estações de referência.

Estação	Alt. Antena (cm)	Início	Término	Receptor
LAASTRO-C	13,65	8 h 46 min	13 h 15 min	Hiper (base)
LAASTRO-E	0,00	8 h 50 min	13 h 15 min	Ashtech
EPS-04	0,00	9 h 02 min	13 h 15 min	Ashtech
RBMC	0,071	8 h 46 min	13 h 15 min	Trimble

Quadro 2 - Informações do ponto de simulação da subsidência.

Estação	Alt. Antena (cm)	Início	Término	Receptor
SUB-1	1,50	9 h 13 min	11 h 13 min	Hiper (rover)
SUB1_2	1,49	11 h 15min	13 h 15 min	Hiper (rover)



Figura 4 – Posições do bastão na simulação da subsidência.

Para o processamento dos dados de rastreamento utilizou-se o software Topcon Tools. Sendo que os dados rastreados com os receptores Ashtech foram convertidos para o formato RINEX, para que pudessem ser processados com o mesmo programa. Utilizou-se como ponto de referência fixa apenas a RBMC (RECF – estação de Recife pertencente à brasileira de monitoramento contínuo), os demais pontos serviram para oferecer estabilidade à configuração geométrica do experimento. As informações relativas ao ponto de controle da RBMC em SIRGAS 2000, bem como os resultados após o processamento dos dados, estão explicitadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Resultados do processamento

PONTO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTURA ELIPSOIDAL (m)
LAASTRO_C	08° 03' 10,89721" S	34° 57' 16,95435" W	49,213
SUB1_1	08° 03' 05,87946" S	34° 57' 12,24261" W	3,434
SUB1_2	08° 03' 05,87952" S	34° 57' 12,24271" W	3,442
RECF	08° 03' 03,46970" S	34° 57' 05,45910" W	20,180
EPS04	08° 03' 05,84152" S	34° 57' 11,62481" W	4,912

Comparando-se as alturas elipsoidais para os pontos Sub1\_1 (SUB-1) e Sub1\_2 (SUB1\_2), constata-se que a metodologia conseguiu detectar o deslocamento de 1 cm (um centímetro), simulado para o ponto do experimento. Essa verificação foi feita considerando-se um baixo índice de obstrução para a área de estudo com valores de PDOP aceitáveis, abaixo de 2.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Algum tempo atrás a idéia de bombeamento sustentável de águas subterrâneas analisava apenas quanto poderia ser bombeado indefinidamente de um aquífero, no entanto o conceito atualizado de sustentabilidade do uso dos aquíferos requer que sejam levadas em conta as influências sobre os ecossistemas e o meio ambiente como um todo. A aplicação deste conceito atual de sustentabilidade deve requerer que sejam considerados os riscos de subsidência. Em regiões de bacias sedimentares, o bombeamento excessivo reduz a pressão de suporte exercida pela água nos poros, conseqüentemente aumenta o esforço sobre os grãos de solo acarretando uma redistribuição dos grãos e a subsidência da superfície, que pode atingir alguns centímetros por ano numa extensão de vários quilômetros. Existem poucos registros ou relatos de subsidência devido à captação de águas subterrâneas no Brasil. Na planície de Recife, até a presente data, ainda não foi detectado nenhum registro, o que não significa que o fenômeno não esteja acontecendo. Considerando-se os estudos realizados com respeito à diminuição dos níveis de água subterrânea na planície de Recife, faz-se necessário um monitoramento, nessas áreas, para detecção de possíveis deslocamentos verticais da superfície do solo, através de levantamentos geodésicos como o GNSS, aliado a outras metodologias para fins comparativos de investigação.

## **AGRADECIMENTOS**

Os dois primeiros autores agradecem a FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos – Ministério da Ciência e Tecnologia) e ao CNPq e a CAPES pelos recursos financeiros disponibilizados permitindo a realização das atividades de campo e ao LACCOST (Laboratório de Cartografia Costeira do Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE) pelo espaço físico para realização das atividades de cálculo desse experimento.



## REFERÊNCIAS

- BALDI ,P. et al. *GPS – Based monitoring of land subsidence in the Po plain (Northern Italy)*. **Earth and Planetary Science Letters** – Elsevier p.204-212. 2009.
- CABRAL, J.J.S.P.; SANTOS, S. M., PONTES FILHO, I.D.S. Bombeamento intensivo de água subterrânea e riscos de subsidência do solo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, 147-157, 2006.
- COSTA, W. D. et al. Zoneamento de exploração das águas subterrâneas na cidade do Recife-PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10.; 1998, São Paulo. **Anais do X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. São Paulo, 1998.
- GALLOWAY, D. L.; BURBEY, T.J. *Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction*. **Hydrogeology Journal** 19:[ s.n.] 1459–1486. 2011.
- GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. UFPR Curitiba-PR:[s.n.], 2 ed. 1999.
- IBGE. **Banco de dados geodésicos**. Disponível em:  
< [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/bdgpesq\\_googlemaps.php#tabela\\_dados](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/bdgpesq_googlemaps.php#tabela_dados)>.  
Acesso em março 2013.
- LUZ, T. R. **Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao Sirgas**. 2008. Tese - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2008.
- MINGORANCE, F. *Manifestaciones de subsidência superficial en el Pastal, Norte de Mendoza, Argentina*. **Revista de la Facultad de Ingeniería**, Argentina 41, p.5-16. 2000.
- SANTOS, S. M. **Investigações metodológicas sobre o monitoramento da subsidência do solo devido à extração de água subterrânea - caso da Região Metropolitana de Recife**. 2005.231 p. Tese – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.
- SANTOS, S. M. , CABRAL, J. J. S. P. ; PONTES FILHO, I. D. S. *Monitoring of soil subsidence in urban and coastal areas due to groundwater overexploitation using GPS*. **Natural Hazards – Dordrecht, Online**, v. 64, p. 421-439, 2012.
- SCOTT, R.F. *Subsidence – A Review. Evaluation and Prediction of Subsidence*. **ASCE**, New York, p.1-25. 1979.
- SILVA, S. R.; MONTEIRO, A. B.; FRANÇA, A. E. O gerenciamento das águas subterrâneas no Estado de Pernambuco In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS,13.; 1999. Belo Horizonte. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, 1999.

TERZAGHI, K.T. *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*. Deuticke, Wien, 399 p. 1925.

TUSAT, E.; USTUN, A.; YALVAC, S. *Preliminary results of land subsidence monitoring project in Konya Closed Basin between 2006-2009 by means of GNSS observations*. **Natural Hazard**. [s.n.] p.10-1151.2010.