

GPS zur Bestimmung von Bodensenkungen in Recife

Sylvana Melo dos Santos und Verônica Maria Costa Romão

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil

Resumo

A subsidência de solo é um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, ou seja, redução do nível do terreno devido a remoção de suporte subterrâneo. As causas mais comuns de ocorrência de subsidência estão relacionadas às intervenções humanas, e sugerem um uso indiscriminado dos recursos naturais.

Existem registros de casos na literatura científica, em toda parte do mundo, relacionados com a exploração demasiada dos recursos hídricos subterrâneos, alguns estudos, inclusive, já vêm sendo realizados há anos. A partir desses estudos pode-se ter uma idéia da velocidade de evolução do processo e da gravidade das conseqüências quando não são tomadas medidas mitigadoras em tempo hábil. A tecnologia GPS vem sendo utilizada em muitas localidades no mundo para fins de monitoramento da subsidência, como já foi registrado nos casos apresentados por vários pesquisadores (p.ex. Sneed et al. 2003; Chang 2000; Sato et al. 2003). Com o presente estudo, deseja-se mostrar qual contribuição o GPS pode prestar na determinação de subsidência de solo. Neste estudo subsidências de solo foram simuladas através de variações na altura da antena GPS. Os resultados baseiam-se em investigações, as quais foram conduzidas na Universidade de Hannover, com o objetivo de se projetar uma rede de monitoramento para identificação de subsidência de solo em decorrência da exploração de água em Recife (Cabral et al. 2000). Uma completa descrição das investigações são apresentadas em Santos (2005). A seguir, uma parte dos experimentos é descrita.

1 Einleitung

Bodensenkungen sind ein Phänomen der Höhenänderung an der Erdoberfläche. Sie können durch Veränderungen in den tragenden Schichten des Untergrundes ausgelöst werden. Häufig führen anthropogene Einflüsse wie Grundwasserentnahme zu Senkungerscheinungen. Dies ist der Fall in Recife, wobei Modellrechnungen gezeigt haben, dass Bodensenkungen im Zentimeterbereich zu befürchten sind.

In der wissenschaftlichen Literatur werden zahlreiche Fälle in allen Teilen der Welt beschrieben, in denen Bodensenkungen durch übermäßige Ausbeutung von unterirdischen Flüssigkeitsvorkommen hervorgerufen wurden. Einige dieser Studien erstreckten sich über viele Jahre und erlauben eine Abschätzung der Senkungsgeschwindigkeiten. Die genannten Phänomene haben ökologische und ökonomische Folgen und stellen ein großes Gefahrenpotential für den Menschen dar. Um vorbeugende Maßnahmen zu ermöglichen, ist es von hoher Bedeutung, eine Kontrolle der Bodensenkungen vorzunehmen. Die GPS-Technologie eignet sich in besonderem Maße dazu, Höhenänderungen zu erfassen und wurde bereits mehrfach für die Kontrolle von Bodensenkungen eingesetzt (beispielsweise Sneed et al. 2003; Chang 2000; Sato et al. 2003).

Mit der vorliegenden Studie soll gezeigt werden, welchen Beitrag GPS zur Bestimmung von Bodensenkungen leisten kann. Im Rahmen dieser Studie wurden Bodensenkungen durch kontrollierte Höhenveränderungen der GPS Antennen simuliert. Die Ergebnisse beruhen auf

Untersuchungen, die an der Universität Hannover mit der Zielsetzung durchgeführt wurden, ein Überwachungsnetz für die Erkennung von Bodensenkungen aufgrund von Wasserentnahme aus Tiefbrunnen in Recife zu entwerfen (Cabral et al. 2000). Eine vollständige Darstellung der umfassenden Untersuchungen wird in Santos (2005) gegeben. Im Folgenden wird über ein Telexperiment berichtet.

2 Durchgeführte Untersuchungen

2.1 Beschreibung des Experiments

Das Experiment wurde auf dem Messdach des Instituts für Erdmessung der Universität Hannover durchgeführt. Die GPS-Antennen wurden auf zwei stabilen Pfeilern (msd1 und msd2) in einem Abstand von etwa 8 m eingerichtet (Abbildung 1). Zur Simulationen von Bodensenkungen wurde die Höhe der Antenne msd2 während der Messaufnahmen durch 5 aufeinander angeordnete Ringe mit verschiedenen Höhen variiert (Abbildung 2).

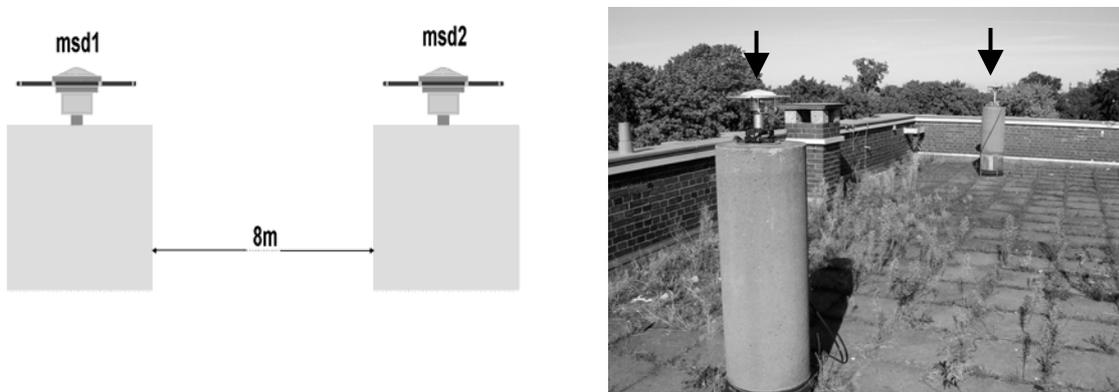


Abbildung 1: Schematische Positionen der Antennen und tatsächliche Pfeileranordnung auf dem Messdach des Instituts für Erdmessung der Universität Hannover

Insgesamt wurden 5 Beobachtungssessionen mit unterschiedlichen Antennenhöhen der Antenne msd2 (Abbildung 2) mit einer Beobachtungsdauer von 48 Stunden unter Verwendung einer 15 Grad Elevationsmaske gemessen.

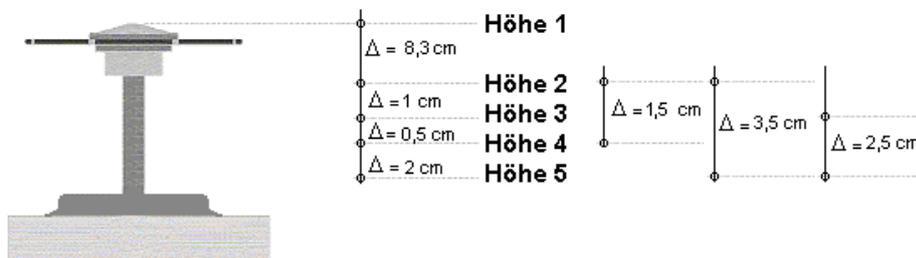


Abbildung 2: Simulierte Bodensenkungen durch Variation der Antennenhöhe

Zur Untersuchung der notwendigen Anzahl von GPS Referenzstationen, der geeigneten Entfernungen zum Deformationsgebiet sowie der erforderlichen Beobachtungsdauer zur Detektion einer Bodensenkung, wurden simultan mit den simulierten Variationen der Antennenhöhe die GPS Daten von 7 SAPOS-Stationen (Hannover, Alfed, Hameln, Hildesheim, Schwarmstedt, Nienburg und Celle) benutzt (Abbildung 3). Die Tabelle in Abbildung 3 gibt die Abstände dieser SAPOS-Stationen zur Universität Hannover an.

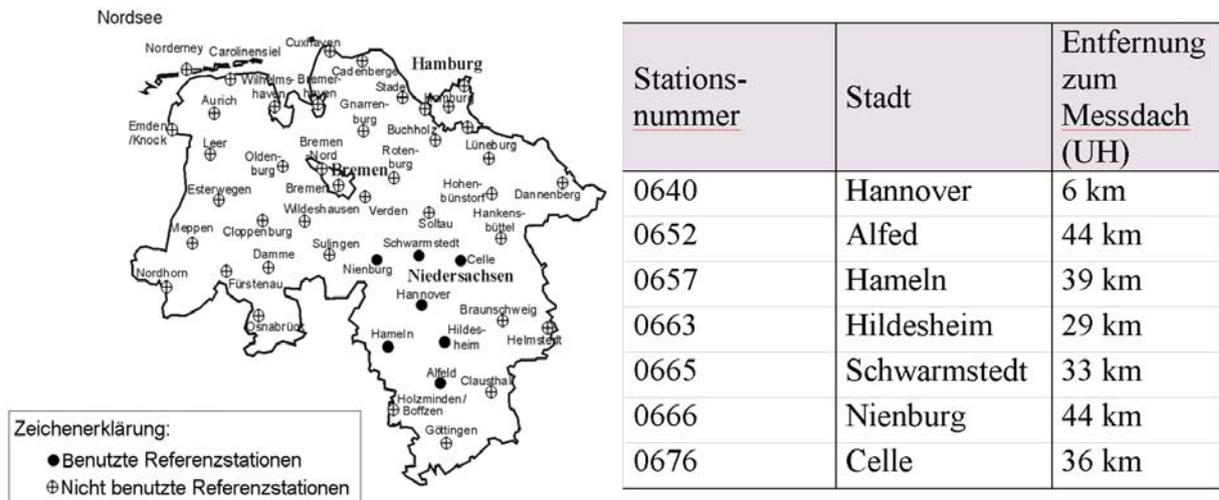


Abbildung 3: Die sieben benutzten SAPOS-Stationen und ihre jeweiligen Abstände zum Messdach (UH)

Die Auswertung der GPS Daten im Rahmen dieser Arbeit wurde mit dem im Institut für Erdmessung der Universität Hannover in der Grundversion entwickelten Programmpaket GEONAP (*GE*Odätische NAVSTAR Positionierung) vorgenommen (Wübbena 1991). Auf eine Mehrdeutigkeitsschätzung wurde verzichtet und es wurden nur sogenannte Floatlösungen erzeugt.

2.2 Berechnung der Standardlösungen

Zur Analyse der Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen wurden die GPS Daten der 7 SAPOS-Stationen (0640, 0652, 0657, 0663, 0665, 0666, 0676) und der beiden Pfeiler (msd1 und msd2) für jede Position der Antenne msd2 zunächst als Standardlösung gemeinsam ausgeglichen. Dabei wurde die Station 0640 (Hannover) mit verschwindender Standardabweichung eingeführt. Die in dieser Arbeit erzeugten Standardlösungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Position der Antenne msd2	Höhe (m)	σ_h (mm)
1	113.3189	9.7
2	113.2358	12.2
3	113.2283	5.9
4	113.2263	14.2
5	113.2069	4.9

Tabelle 1: Höhen und Standardabweichung auf jeder Position der Antenne msd2 aus den Standardlösungen.

Die vertikale Genauigkeit für die GPS Messungen aus den Standardlösungen liegt zwischen 5 und 15 mm für die fünf ausgewerteten Netzsessionen. Der Grund für die schlechtere Bestimmung einzelner Standardlösungen kann in der teils großen Entfernung zu den verwendeten Referenzstationen und damit verbundenen stärkeren systematischen Fehlereinflüssen zurückzuführen sein.

2.3 Analyse der Beobachtungsdauer

Zur Analyse des Einflusses einer verkürzten Beobachtungsdauer auf das Höhenergebnis wurden die 48stündigen Beobachtungssessionen auf 24, 12 und 4 Stunden verkürzt. Berechnet man die Einzelstationslösungen nach einer Verkürzung der Beobachtungszeit und führt man anschliessend die Netzausgleichungen mit allen teilgenommenen Stationen durch, dann ergeben sich Diskrepanzen in den Antennenhöhen auf msd2 gegenüber den Standardlösungen, die durchschnittlich 0,3 cm, 0,5 cm und 1 cm für die entsprechende Beobachtungsdauer von 24, 12 und 4 Stunden betragen (Abbildung 4).

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass bei Beobachtungslängen von 4 Stunden Differenzen gegenüber dem Sollbetrag von bis zu 1 cm auftreten. In Abbildung 4 (links) ist zu erkennen, dass für alle Sessions eine Verringerung der relativen Genauigkeit in der Höhe (durchschnittlich 4 mm, 5 mm und 1 cm für 24, 12 bzw. 4 Stunden) mit der Verkürzung der Beobachtungsdauer auftritt. Allerdings machen die Ergebnisse weiterhin deutlich, dass die relativen Genauigkeiten bei Beobachtungslängen von mehr als 12 Stunden keine wesentlichen Verbesserungen mehr erfahren und dass für eine Übereinstimmung bis zu 5 mm eine Beobachtungsdauer von 12 Stunden genügt.

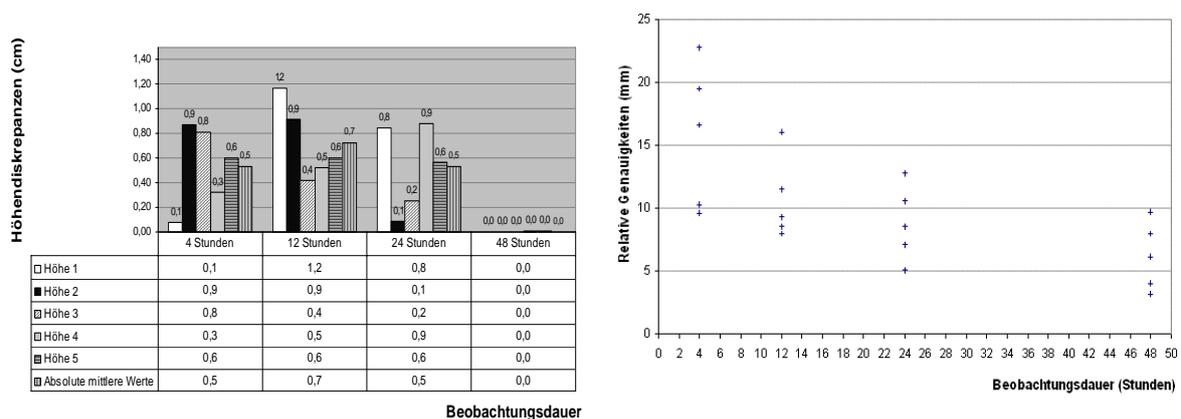


Abbildung 4: Diskrepanzen in den Höhen für die Lösungen mit unterschiedlicher Beobachtungsdauer von 24, 12 und 4 Stunden (links) sowie Positionen der Antenne msd2 gegenüber den Standardlösungen und ihre relativen Genauigkeiten (rechts).

2.4 Analyse der Entfernung zu den Referenzstationen

Für eine Untersuchung des Einflusses der Punktabstände der Referenzstationen auf die Detektionsfähigkeit bei Höhenverschiebungen wurden Netzausgleichungen mit einer Beobachtungsdauer von 24 Stunden für jede Antennenposition durchgeführt. Die beteiligten SAPOS-Stationen waren 0640, 0665, 0663, 0657 und 0652, mit einer Entfernung zur Antenne msd2 von jeweils 6 km, 29 km, 36 km, 39 km und 44 km.

Abbildung 5 zeigt die Diskrepanzen in den Höhen aus den individuellen Lösungen gegenüber den Standardlösungen und die relativen Standardabweichungen der Höhen. Man erkennt aus der Abbildung 5 zunehmende Beträge der Diskrepanzen mit der Vergrößerung der Basislinienlänge. Ein Zusammenhang zwischen den Punktabständen und den relativen Genauigkeiten wurde nicht festgestellt, wie weiterhin in Abbildung 5 bestätigt wird. Es wird jedoch festgestellt, dass bei Basislinienlängen bis zu 30 km eine Variation in der Höhe von 5 mm detektiert werden kann. Nachteilig ist dabei die lange Messdauer von 24 Stunden. Bemerkenswerterweise zeigt sich bei längeren Basislinien ein umgekehrter Trend im Verhalten der Diskrepanzen. Die Ursache dieser Tendenzänderung ist noch nicht

abschließend geklärt. Diese verfälschten Differenzen erreichen einen mittleren Wert von 1 cm. Dieser Sachverhalt wird ebenfalls in Abbildung 5 bestätigt.

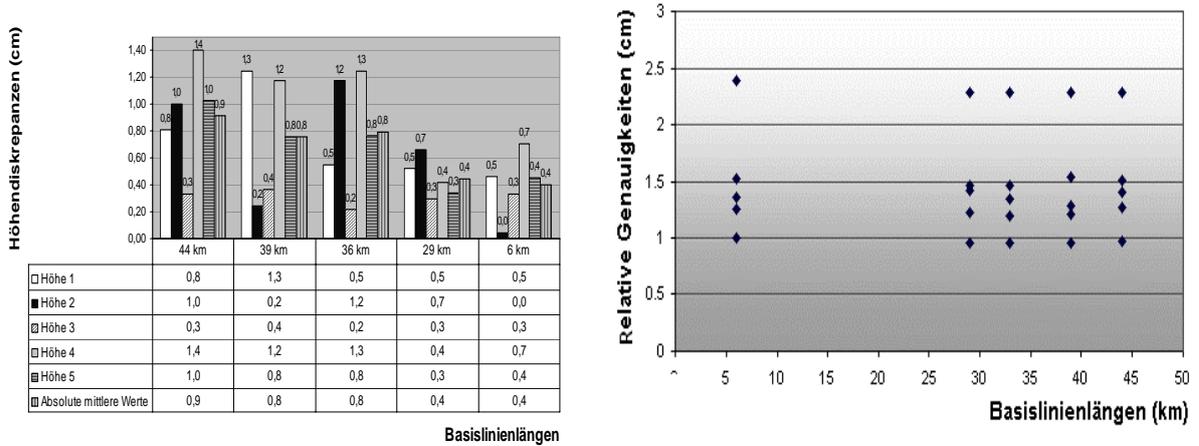


Abbildung 5: Diskrepanzen in den Höhen für die Lösungen bei verschiedenen Basislinienlängen und Positionen der Antenne msd2 gegenüber den Standardlösungen (links) und ihre relativen Genauigkeiten (rechts).

2.5 Analyse der Anzahl von Referenzstationen

Neben den Einflüssen der Beobachtungsdauer und der Basislinienlänge auf die Höhen der Antenne msd2 wurde auch der Zusammenhang zwischen der Anzahl von Referenzstationen und der Qualität der Lösungen überprüft.

Anzahl von Referenzstationen	Beobachtungsdauer (Stunden)	Diskrepanzen Position der Antenne msd2					Absolute mittlere Werte
		1	2	3	4	5	
7	24	0,8	0,1	0,0	-0,3	0,0	0,3
	12	-1,2	-0,9	-0,2	0,0	0,0	0,5
	4	-0,1	0,9	1,1	0,9	1,2	0,8
3	24	0,5	-1,1	0,0	0,4	0,5	0,5
	12	-0,9	-2,4	0,2	1,6	0,6	1,1
	4	0,2	-1,3	0,6	1,4	1,9	1,1
2	24	0,1	-0,7	0,1	0,4	0,1	0,3
	12	-0,8	-1,9	0,1	0,9	0,0	0,7
	4	0,1	-0,1	1,0	1,5	1,6	0,9
1	24	0,5	-0,7	-0,1	0,1	0,3	0,3
	12	-1,2	-2,1	0,0	0,9	0,2	0,9
	4	0,2	-0,1	0,7	1,1	1,5	0,7

Tabelle 2: Diskrepanzen in den Höhen für die Lösungen bei unterschiedlicher Anzahl von Stationen und Positionen der Antenne msd2 gegenüber den Standardlösungen

Neue Netzausgleichungen mit jeweils 7, 3, 2 und 1 Referenzstationen bei unterschiedlicher Beobachtungsdauer (24, 12 und 4 Stunden) wurden durchgeführt. Die Ergebnisse in Tabelle 2 zeigen deutlich für alle Sessions, dass der wesentliche Parameter für die erzielbare Qualität der Lösung die Beobachtungsdauer ist und nicht die Anzahl von eingeführten Referenzstationen. Der Vergleich dieser Lösungen mit dem Ergebnis der Standardlösung jeder Antennenposition (msd2) ergibt bei 24stündiger Beobachtungsdauer durchschnittliche Diskrepanzen um etwa 3 mm.

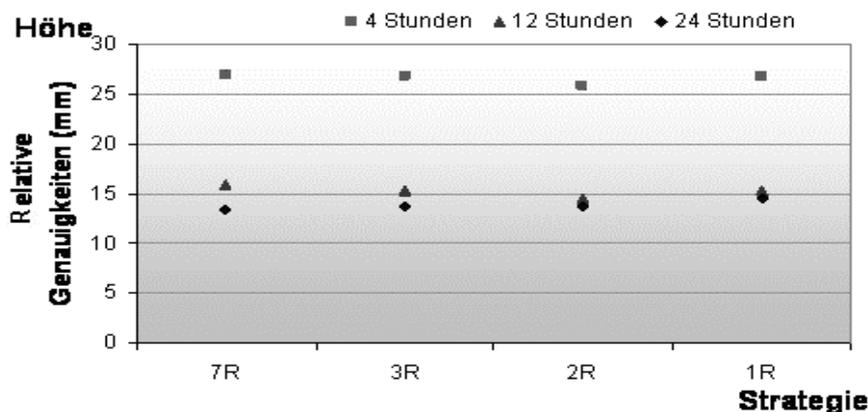


Abbildung 6: Standardabweichungen in der Höhe bei unterschiedlicher Anzahl von Referenzstationen und unterschiedlicher Beobachtungsdauer

3 Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Studie soll gezeigt werden, welchen Beitrag GPS zur Bestimmung von Bodensenkungen leisten kann. Sie beruht auf der Durchführung verschiedener Untersuchungen an der Universität Hannover mit der Zielsetzung, ein Überwachungsnetz für Bodensenkungen in Recife bereitzustellen.

Die vertikale Genauigkeit der GPS Messungen aus den Standardlösungen liegt zwischen 5 und 15 mm für die fünf ausgewerteten Netzsessionen. Der Grund für die ungünstigeren Bestimmungen kann auf stärkere systematische Fehlereinflüsse bei zunehmender Entfernung der verwendeten Referenzstationen zurückgeführt werden.

Um den Einfluss der Beobachtungsdauer und Basislinienlänge auf die Genauigkeitsschätzung der Höhe zu untersuchen, wurden die 48stündigen Beobachtungssessionen auf 24, 12 und 4 Stunden verkürzt und neu ausgewertet. Es zeigt sich, dass eine deutliche Verringerung der relativen Genauigkeit in der Höhe nach einer Verkürzung der Beobachtungsdauer ab 12 Stunden Messdauer auftreten und dass für eine Übereinstimmung bis zu 5 mm mit den Sollwerten eine Beobachtungsdauer von 12 Stunden ausreicht.

In Beziehung auf die Basislinienlänge erkennt man zunehmende Beträge der Diskrepanzen in der Höhe mit der Erhöhung der Basislinienlänge. Es wird jedoch festgestellt, dass bei Basislinienlängen bis zu 30 km eine Variation in der Höhe von 5 mm detektiert werden kann. Nachteilhaft ist dabei die etwa 24-stündige Messdauer.

Neben den Einflüssen der Beobachtungsdauer und der Basislinienlängen auf die Höhenbestimmung der Antenne msd2 wurde auch der Zusammenhang zwischen der Anzahl von Referenzstationen und der Qualität der Lösungen überprüft. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der wesentliche Parameter für die erzielbare Qualität der Lösung die Beobachtungsdauer ist und nicht die Anzahl von eingeführten Referenzstationen. Der Vergleich dieser Lösungen mit dem Ergebnis der Standardlösung zeigt bei 24stündiger Beobachtungsdauer durchschnittliche Diskrepanzen von 3 mm.

Literatur

- AdV - Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (2005). Grundlagen – SAPOS... bringt Sie in Position! Hannover.
- Cabral, J.J.S.P., Santos, S.M., Demetrio, J.G.A., Montenegro, S.M.G.L. (2000). A Groundwater Information System for Recife Metropolitan Region. In: International Conference on Management Information Systems Incorporating GIS & Remote Sensing, Lisboa.
- Chang, C. (2000). Estimation of Local Subsidence Using GPS and Levelling Combined Data. In: Surveying and Land Information Systems, Vol. 60, N. 2, p. 85-94.
- Santos, S.M. (2005). Investigações Metodológicas sobre o Monitoramento da Subsidência do Solo devido à Extração de Água Subterrânea – Caso da Região Metropolitana de Recife. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Sato, H.P., Abe, K, Ooraki, O. (2003). GPS-Measured Land Subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan. In: Engineering Geology: 67, p. 379-390.
- Sneed, M., Ikehara, M.E., Stork, S.V., Amelung, F., Galloway, D.L. (2003). Detection and Measurement of Land Subsidence Using Interferometric Synthetic Aperture Radar and Global Positioning System, San Bernardino County, Mojave Desert, California. In: U.S.Geological Survey Water Resources Investigations Report 03-4015, 69p.
- Wübbena, G. (1991). Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover.