Aplicações de produtos de vapor de água com base em GNSS

Applications of the total column water vapor product obtained with GNSS

Tiago Machado[1,2], João Paulo A. Martins[1,3], Gonçalo Rodrigues[1], Pedro Viterbo[1,3], Rui Fernandes[4], Machiel Bos[4], Hugo Valentim[4]

(1) Universidade de Aveiro, Aveiro, tiagomachado@ua.pt
(2) Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), Lisboa
(3) Universidade de Lisboa, Instituto Dom Luiz (IDL), Lisboa
(4) Universidade da Beira Interior (UBI), Covilhã

SUMMARY

In recent years, the Global Navigation Satellite System (GNSS) estimates of vertically-integrated water vapour have been incorporated in nowcasting activities in major weather forecast centers, since they provide all-weather, high temporal and spatial resolution information. In the context of the FCT project NUVEM we intend to implement this technology operationally also at IPMA. In this work we explore the strengths and weaknesses of this type of data, by comparing these estimates against other state-of-the-art datasets of the same parameter. Local measurements may be obtained using radiosondes which are severely limited in terms of temporal and spatial sampling as they are very expensive. Satellite data from infrared sounders provide the best estimates over remote oceanic regions but they suffer from cloud contamination, large surface emissivity uncertainties over land and poor time sampling. To overcome these limitations, models are often used for nowcasting although it is well-known that they fail to represent small scale phenomena such as flash floods.

Introdução

Situações de cheias repentinas são extremamente difíceis de prever e constituem um dos maiores desafios à previsão de muito curto prazo (*nowcasting*). Os atuais sistemas de observação remota de alta resolução temporal (radar meteorológico e satélite geostacionário) apenas permitem detetar sistemas convectivos de forma fiável numa fase madura do seu ciclo de vida, quando existe água líquida. Estas situações são normalmente precedidas de um acréscimo de instabilidade atmosférica e conteúdo em vapor de água. Os perfiladores a bordo dos satélites de órbita polar como o IASI (no MetOp da EUMETSAT) e o AIRS (no Aqua, da NASA) permitem obter essa informação com uma resolução das poucas dezenas de km, no total de 4 vezes por dia. Esses instrumentos, com uma grande parte do conteúdo de informação obtido através dos canais do infravermelho, são fortemente condicionados pela presença de nuvens. É neste tipo de situações que os sistemas baseados em GNSS (*Global Navigation Satellite System*) poderão colmatar essas falhas pois funcionam na banda das micro-ondas. Os recetores do sector terrestre são também de muito barata instalação e manutenção, pelo que se torna cada vez mais comum a sua utilização.

Atualmente só em Portugal Continental as redes SERVIR e ReNEP têm uma rede de recetores GNSS de 59 estações distribuídas pelo território. As redes espanholas ANDALUCIA, CASTILLA, EXTREMADURA e o IGN (Instituto Geográfico Nacional) fornecem dados de 88 estações do lado oeste da Espanha englobando assim a metade ocidental da Península Ibérica. As estações espanholas irão permitir-nos determinar o vapor de água precipitável que chega ao território português por norte e por leste.

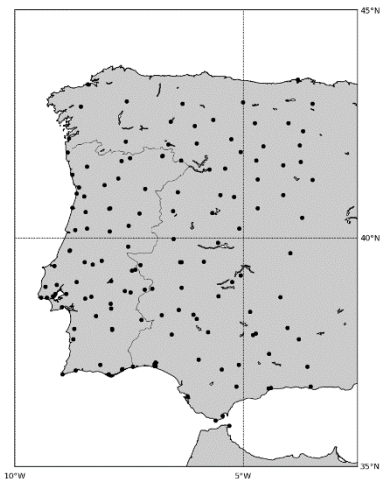

Figura 1 - Mapa de estações disponíveis para o projeto para as estimativas de PWV.

Metodologia

A determinação do PWV a partir dos recetores GNSS baseia-se no atraso devido à atmosfera na

chegada do sinal à superfície da terra. Este atraso é dividido em dois atrasos, um produzido na ionosfera e um segundo na troposfera. O atraso ionosférico é dispersivo (depende da frequência), de modo que, a fim de quantificar e remover o efeito da ionosfera na propagação do sinal, os satélites GNSS transmitem em duas frequências.

O mesmo não acontece com o atraso troposférico. O atraso depende da refratividade da atmosfera que é uma função da pressão, temperatura e conteúdo em vapor de água. Os sistemas GNSS baseiam-se na determinação do PWV através do ZTD (Atraso zenital troposférico). Aproximadamente 1 mm de PWV produz 6.35 mm de atraso troposférico mas este fator oscila sobre os 20 % dependendo da localização, altura e condições meteorológicas (Bevis et all., 1994).

Os atuais recetores não estão equipados com barómetro nem termómetro e como o atraso troposférico depende da pressão, temperatura e vapor de água, é necessário determinar o valor da temperatura e da pressão nas estações para converter em vapor de água precipitável. São fornecidos dados operacionalmente da pressão e temperatura para as estações GNSS da previsão global do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) assim que os dados chegam ao IPMA. Trata-se de dados do modelo global com uma resolução aproximada de 16 quilómetros. A qualidade de PWV obtido depende da precisão com que a pressão e a temperatura são fornecidos. Uma variação de 1 hPa na pressão à superfície corresponde a 0.33-0.37 mm no PWV. Do mesmo modo, uma variação de 5ºC corresponde a 1.7-2.0 % de PWV (Hagemann et all., 2003).

Numa perspetiva de quantificar e melhorar o erro, introduzimos no mês de abril o modelo AROME-ALADIN, que é processado no IPMA. Este modelo regional tem uma resolução espacial de 2.5 km que poderá dar-nos uma maior sensibilidade para variações espaciais pequenas. Pretende-se assim escolher até ao final do projeto qual dos modelos será utilizado para o fornecimento de pressão e temperatura.

Inúmeros trabalhos já realizados sobre as estimativas de PWV obtidas pelo sistema GNSS servem de base para os objetivos do projeto. Trata-se de validar os dados obtidos com a base nos dados das radiossondas, da previsão do ECMWF e dos satélites de orbita polar IASI e AIRS.

Procura-se mostrar a utilidade do produto obtido nas diversas situações. Iremos estudar casos de eventos meteorológicos registados em Portugal, como o Xynthia (fevereiro 2010) ou Sting Jet no nordoeste (dezembro 2009). Em geral, espera-se ainda que as medições obtidas com este sistema tragam mais-valia quando existirem fortes heterogeneidades no campo de vapor de água.

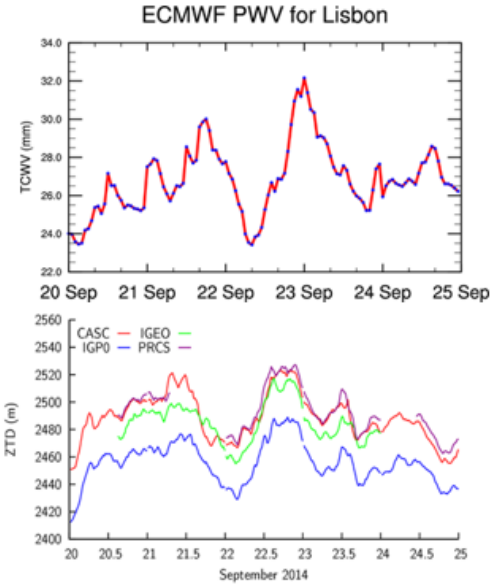

Figura 2 - Estimativas de ZTD obtidas de observações GNSS nas inundações de Lisboa de Setembro de 2014 e valor do vapor de água precipitável do ECMWF.

São disso exemplos situações de ciclogénese explosiva (com intrusão de ar estratosférico no seio de um ciclone extratropical) e os chamados rios atmosféricos, situações em que uma faixa de ar tropical muito húmida é advectada sobre uma região subtropical provocando chuva intensa e persistente.

Resultados e análise de dados

É apresentado na figura 3 os resultados preliminares onde se comparam os dados recebidos de PWV obtido através do sistema GNSS, das estimativas fornecidas pelo sensor AIRS, da previsão do ECMWF e dos dados registados pelas radiossondas, foram encontrados resultados animadores nesta fase inicial. No âmbito deste relatório, os dados de PWV referem-se apenas a Lisboa, em abril de 2015, mas serão estendidos a uma série temporal mais longa para o período 2012-presente, assim que a produção de dados esteja finalizada. As radiossondas são lançadas na estação Gago Coutinho (38,76º N 9.13º W) e o recetor GNSS mais próximo com dados disponíveis, encontra-se no Instituto Geográfico Português (38.73º N 9.16º W) aproximadamente a 5 quilómetros de distância. Os dados de PWV do ECMWF foram calculados para as coordenadas do recetor GNSS usando a interpolação bilinear. Para a estimativa de PWV do AIRS com resolução de ~45 km foi determinado usando o ponto mais próximo da estação GPS, desprezando os valores do oceano e para uma distância máxima de 45 km.

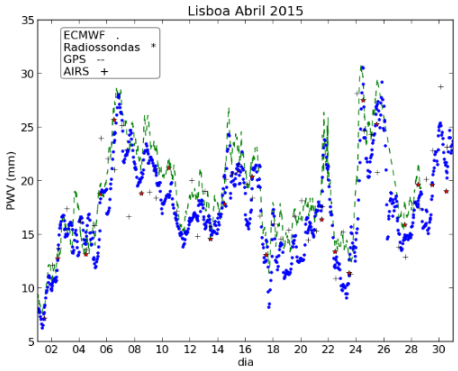

Figura 3 - Série temporal de estimativas de PWV do ECMWF, radiossondas, AIRS e estimativas 5-min GPS para o mês de Abril de 2015 com a entrada de dados de pressão e temperatura do ECMWF.

No geral os dados estimados obtidos através de GNNS mostram uma sobreavaliação dos dados em comparação com os dados disponíveis. Verifica-se que comparando os dados de GPS e de radiossondas, os dados de GPS são sempre superiores (MAE=|BIAS|). A entrada de dados de pressão e temperatura do modelo AROME também mostra sinais de sobreavaliação em relação aos dados extraídos do ECMWF. O ECMWF usa as radiossondas lançadas em Lisboa com condição inicial do modelo. É esperado que a estimativa de PWV do ECMWF coincida com o PWV das radiossondas nas horas onde elas são lançadas.

No dia 15 de abril de 2015 o IPMA colocou 18 distritos sob aviso amarelo devido a chuvas fortes. Registaram-se inundações em Coimbra e Lisboa. Os dados mostram que houve um pico de vapor de água integrado sentido pelo GNSS no dia anterior ao evento, seguido de grandes oscilações em torno ao dia do evento. Em trabalhos futuros pretende-se quantificar os acréscimos e decréscimos de PWV em relação à quantidade de precipitação sentida. A diferença de pressão ao meio dia do dia 15 de abril de 2015 é de 1.4 hPa (P_{arome}<Pecmwf) e a diferença de temperatura é de 4.2ºC (T_{arome}>T_{ecmwf}), que corresponde a uma diferença de PWV entre GPS e radiossondas de 1.59 mm (PWV_{gps}>$PWV_{radiosondas}$).

Foi necessário avaliar também qual dos modelos disponíveis fornecia melhores estimativas de pressão e temperatura. Para tal, compararam-se os valores estimados através de modelo com dados de estações sinópticas sobre Portugal Continental. Os dados estatísticos da tabela 1 mostram que por exemplo para a estação de Lisboa, o modelo ECMWF fornece dados de pressão e temperatura melhores que os dados fornecidos pelo AROME. Um dos problemas encontrados na determinação da pressão e temperatura nas estações é a interpolação bilinear. Esta, para estações próximas da costa pode conter pontos de mar, o que pode constituir uma fonte de erro não desprezável. Nessa perspetiva, pretende-se avaliar o erro induzido comparando com o método do ponto mais próximo e determinar para cada estação perto da costa qual o melhor método para determinar a pressão e temperatura. A correlação entre os dados é boa para ambos modelos.

Input P e T	Fontes PWV	RMSE (mm)	BIAS (mm)	MAE (mm)	r
ECMWF	ECMWF	2.61	-1.95	2.21	0.92
	Radiossondas	1.79	-1.53	1.53	0.98
	AIRS	2.97	-1.03	2.27	0.75
AROME	ECMWF	3.14	-2.60	2.74	0.92
	Radiossondas	2.72	-2.58	2.58	0.99
	AIRS	3.44	-1.86	2.66	0.74

Tabela 1 - Dados estatísticos da comparação dos dados de GNNS com ECMWF, Radiossondas e satélite de orbita polar AIRS com a entrada de dados de pressão e temperatura do ECMWF e AROME.

Foram escolhidas 9 estações GNSS distribuídas por Portugal continental de norte a sul (Tabela 2), e da costa para o interior e a diferentes altitudes. Usamos a estimativa da pressão e temperatura do ECMWF para o mês de Abril. Os resultados obtidos mostram uma boa correlação dos dados de GNSS com a previsão do ECMWF e na maioria das estações também com a medição do AIRS. Ainda em fase de operacionalizar o sistema, estes valores de correlação podem permitir que as estações sejam enviesadas a fim de diminuir o erro. Sendo o viés e o MAE na maior parte dos casos muito similares, observa-se que existe uma

sobreavaliação dos valores de PWV por parte do sistema de GNSS. O RMSE varia entre 2 e 3 mm quando comparado com a previsão do ECMWF, e varia entre 2 e 4 para a estimativa de AIRS. A pior estação encontra-se em Lagos, perto da linha de costa. Neste caso, as estimativas de pressão e temperatura interpoladas biliarmente tem pontos no oceano que podem explicar o erro maior. Os melhores resultados encontram-se para Fajão no conselho de Coimbra.

Conclusões

Analisando as estimativas de pressão e temperatura fornecidas por ambos os modelos, verifica-se para o caso da pressão que existem estações em que o modelo AROME apresenta melhores resultados e outras em que o ECMWF prevê melhor a pressão à superfície. O valor médio de erro considerando as 10 estações analisadas no período de Abril e Maio de 2015, apresenta-se como um bom resultado com 0.84 hPa e 0.88 hPa para o AROME e ECMWF respetivamente. Em termos de correlação são excelentes os resultados, principalmente o AROME com correlações praticamente perfeitas ($r \approx 1$). Verifica-se que ambos os modelos subavaliam a pressão atmosférica na maior parte das estações.

Na previsão da temperatura, o modelo AROME apresenta resultados ligeiramente melhores de correlação. O valor médio de erro, considerando todas as estações, foi de 1.2 ºC e 1.14 ºC para o AROME e ECMWF respetivamente.

Concluindo que ambos modelos com previsões a menos de 1 dia conseguem prever bem as variações de pressão e temperatura à superfície, dadas as altas correlações entre observações e previsões. O facto de se ter correlações quase perfeitas entre observações e modelos ($r \approx 1$) leva-nos a concluir que utilizando estimativas de pressão e temperatura a partir do modelo AROME e ECMWF, as variações de GNSS-PWV não estarão comprometidas, em relação a valores de pressão e temperatura medidos *in situ*.

Na análise estatística de validação do produto obtido, verificaram-se elevados valores de correlação entre o GNSS-PWV e alguma das fontes desta variável atualmente utilizadas, concluindo-se que as variações temporais do PWV serão bem estimadas através do sistema GNSS, tratando-se de uma mais-valia na previsão nowcasting de fenómenos de precipitação extrema, difíceis de prever pelos modelos numéricos. Na maioria dos casos temos uma sobreavaliação em grandeza das estimativas GNSS-PWV, sendo que ($|BIAS| \approx MAE$) espera-se que uns resultados mais robusta nos traga a certeza de um possível enviesamento das estimativas GNSS-PWV a fim de diminuir o erro. Conclui-se também que apesar do AROME apresentar uma maior resolução espacial, os resultados nem sempre foram melhores, quando comparados com o modelo ECMWF, nomeadamente na previsão da pressão à superfície. Uma das razões que se pensa explicar esta diferença de performance é o elevado número de níveis verticais do ECMWF (147 níveis) em relação ao AROME (46 níveis) bem como o papel fundamental desempenhado pelo sistema de assimilação de dados do ECMWF.

Como trabalhos futuros, pretende-se olha para uma base de dados maior (~3 anos) e para todas as estações para ter maior sensibilidade nos métodos e modelos a usar operacionalmente no fim do projeto quando o sistema for implementado no IPMA. Estes resultados iniciais, permitem um otimismo para uma previsão em quase tempo real, com grande resolução espacial do vapor de água integrado no IPMA através do sistema GNSS.

Estações GPS	Estações acrónimos	Latitude (N)	Longitude (W)	Altitude (m)
Bragança	BRGN	41º48'	6º46'	780
Paredes de Coura	PCOU	41º53'	8º50'	443
Águeda	AGUE	40º34'	8º26'	103
Fajão	FAJA	40º09'	7º08'	789
C. Branco	CBRA	39º49'	7º30'	437
Portalegre	PORT	39º17'	7º26'	546
Beja	BEJA	38º00'	7º52'	307
Lagos	LAGO	37º06'	8º40'	63
Vila nova de Foz Coa	FCOA	41º05'	7º08'	487

Tabela 2 - Coordenadas geográficas dos recetores GNSS em estudo.

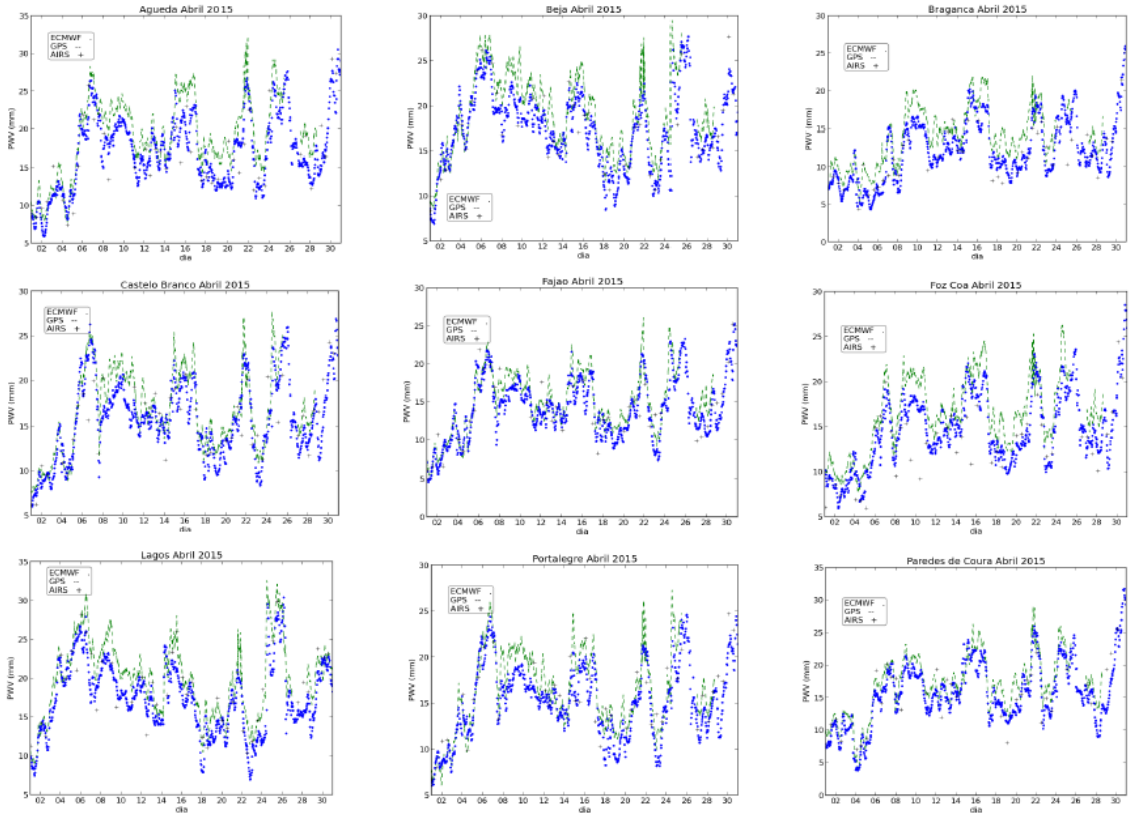

Figura 4 – Séries temporais de estimativas de PWV do ECMWF, radiossondas, AIRS e estimativas 5-min GPS para o mês de Abril de 2015 com a entrada de dados de pressão e temperatura do ECMWF para as estações acima localizadas.

Estações GPS	GPS vs	RMSE	BIAS	MAE	CORR
BRGN	ECMWF	2,85	-2,46	2,55	0,92
	AIRS	3,12	-2,45	2,65	0,82
CBRA	ECMWF	2,25	-1,52	1,8	0,93
	AIRS	2,86	-1,39	2,01	0,81
PCOU	ECMWF	2,36	-1,83	2,01	0,94
	AIRS	2,89	-1,23	2,27	0,79
FCOA	ECMWF	2,77	-2,32	2,43	0,92
	AIRS	4,16	-3,32	3,36	0,75
AGUE	ECMWF	3,08	-2,57	2,67	0,94
	AIRS	4,11	-2,65	3,25	0,78
FAJA	ECMWF	1,97	-1,28	1,56	0,93
	AIRS	2,55	-0,74	1,99	0,8
PORT	ECMWF	2,37	-1,63	1,92	0,92
	AIRS	2,3	-0,62	1,74	0,83
BEJA	ECMWF	2,79	-2,03	2,23	0,9
	AIRS	2,61	-1,85	2,13	0,9
LAGO	ECMWF	3,09	-2,45	2,59	0,92
	AIRS	2,45	-1,27	1,81	0,91

Tabela 3- Dados estatísticos da comparação dos dados de GNNS com ECMWF, Radiossondas e satélite de orbita polar AIRS com a entrada de dados de pressão e temperatura do ECMWF para as estações acima localizadas.

Referências

Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware., 1992: GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, **97**, 15,787-15,801.

Hagemann S, Bengtsson L, Gendt G. 2003: On the determination of atmospheric water vapor from GPS measurements. *J. Geophys. Res.* **108**:4678.

Heise S, Bender M, Beyerle G, Dick G, Gendt G, Schmidt T, Wickert J. 2009: Integrated water vapor from IGS groud-based GPS observations: initial results from a global 5-minute data set. *Ann. Geophys.* **27(7)**: 2851-2859.

Ortiz de Galisteo JP, Cachorro V, Toledano C, Torres B, Laulainen N, Bennouna Y, de Frutos A. 2011: Diurnal cycle of precipitable water vapor over Spain. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **137**: 948-958.

Ortiz de Galisteo JP, Bennouna Y, Toledano C, Cachorro V, Romero P, Andrés MI, Torres B. 2014: Analysis of the anual cycle of the precipitable water vapour over Spain from 10-year homogenized series of GPS data, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **140**:397-406.

Adams, David K., Rui MS Fernandes, and Jair MF Maia. 2011. GNSS precipitable water vapor from an Amazonian rain forest flux tower. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **28.10**: 1192-1198.