

Rios Atmosféricos e precipitação na Ilha da Madeira: Análise de 10 anos *Atmospheric Rivers and precipitation in the Madeira Island: 10-years analysis*

Flavio Couto^(1*), Rui Salgado^(1,2), Maria João Costa^(1,2), e Victor Prior⁽³⁾

⁽¹⁾ Centro de Geofísica de Évora – CGE, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

⁽²⁾ Departamento de Física, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

⁽³⁾ Instituto Português do Mar e Atmosfera – IPMA, Lisboa, Portugal.

*couto.ft@gmail.com

SUMMARY

The purpose of this work is to bring more evidence about the Atmospheric Rivers (ARs) occurrence in the North Atlantic Ocean (NAO) and their relationship with significant precipitation in the Madeira Island during 10 winter seasons. In this study, the meridional water vapor transport associated to the ARs is visually identified from total precipitable water field extracted from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) data. The IPMA national meteorological network of Madeira surface stations provide the precipitation data over the island used here. The detection of long and narrow moisture plumes associated with ARs that passed over Madeira, between winter 2002/2003 and winter 2011/2012, is made over a domain covering the NAO (latitudes between 10°N and 60°N and longitudes between 5°E and 100°W). The image analysis show that moist air emanating mainly from the Caribbean Sea and central region of the Tropical Atlantic may flow northward or eastward, usually in the form of a narrow band with an intense horizontal gradient of precipitable water, and throughout the winter periods. However, large part of these filamentary structures intersects the Madeira Archipelago in a dissipating stage. In addition, the analysis also allowed for the development of a conceptual model related to this meridional transport passing over the island.

1. INTRODUÇÃO

Durante os meses de outono/inverno a passagem de sistemas meteorológicos sobre o pronunciado relevo da ilha da Madeira oferecem as condições necessárias para que os maiores registos pluviométricos anuais possam ser observados nesse período. Inúmeros aspetos podem ser descritos acerca dos sistemas meteorológicos que afetam o tempo na ilha. No presente trabalho analisamos o importante papel desempenhado pelos rios atmosféricos. Localizados no sector quente dos ciclones extratropicais, esses rios são responsáveis por grande parte do transporte meridional de vapor de água da região tropical para as latitudes médias pela baixa troposfera, sendo reconhecidos como longas (> 2000 km) e estreitas (< 1000 km) bandas com alta concentração de vapor de água (Ralph et al., 2004; Zhu e Newell, 1994; Zhu e Newell, 1998). O impacto desse transporte de vapor de água de origem tropical no desenvolvimento e intensificação de sistemas meteorológicos nas latitudes médias tem sido melhor compreendido e documentado nos últimos anos, principalmente em regiões onde a orografia é um fator determinante na formação de precipitação do tipo orográfica (e.g. Houze, 2012). Por exemplo, é reconhecido que os rios atmosféricos favorecem o desenvolvimento de tempestades associadas a extremos de precipitação e consequentes cheias na costa oeste dos Estados Unidos (Ralph et al., 2004; Ralph et al., 2006; Neiman et al., 2008). A influência desses rios também é observada sobre outras regiões, como por exemplo, estando associado a cheias no Reino Unido (e.g. Lavers et al., 2011).

A Ilha da Madeira com uma área de aproximadamente 740 km² é a maior ilha do arquipélago da Madeira, também formado pelas ilhas de Porto Santo, Desertas e Selvagens. Localizada no Oceano Atlântico Norte e centrada na latitude 32°75'N e longitude 17°00'W, a Madeira forma uma barreira orográfica com orientação Oeste-Este (58 km de comprimento e 23 km de largura) apresentando picos que ultrapassam 1800 m, favorecendo a formação de precipitação do tipo orográfica. Tal precipitação, acontece por vezes de forma intensa, dando origem a cheias, enxurradas, deslizamentos de terra e derrocadas, como exemplificado dramaticamente em 20 de Fevereiro de 2010 e que resultou em perda de vidas humanas e prejuízos económicos que somaram milhões de euros. Estudos publicados após o desastre

mostram os principais aspetos atmosféricos associados a este caso de precipitação extrema na Madeira, sendo que um inverno muito húmido e condições de larga escala favoráveis, nomeadamente devido à passagem de uma depressão, contribuíram para a ocorrência da aluvião (Fragoso et al., 2012). A orografia da ilha foi um fator determinante para converter a alta quantidade de humidade associada ao escoamento de sudoeste em precipitação (Luna et al., 2011). Por outro lado, este escoamento de sudoeste, contendo elevados valores de vapor de água no sector quente dos ciclones extratropicais foi reconhecido como “Rio Atmosférico” por Couto et al. (2012), estrutura que favorece a precipitação que é gerada e intensificada pelas condições locais de relevo, e que é particularmente forte nas terras altas da ilha da Madeira. Nesse artigo os autores verificaram que durante o inverno de 2009/2010, os rios atmosféricos que passaram sobre a ilha da Madeira desempenharam um importante papel na intensificação da precipitação nas regiões mais elevadas da ilha. Esse aspeto também foi observado num evento de cheia repentina e deslizamentos de terra observados no outono de 2012 (Couto et al., 2013). Para a identificação desses rios, os autores utilizaram imagens do total de água precipitável obtidas a partir de observações do Satélite Aqua.

O objetivo do trabalho é documentar alguns aspetos relacionados com rios atmosféricos sobre o Atlântico, buscando compreender melhor a relação entre esses rios e os eventos de precipitação na ilha da Madeira durante 10 períodos de inverno. O trabalho está dividido da seguinte maneira: Secção 2 refere-se aos dados e metodologia adotada, sendo seguida pela discussão dos resultados (Secção 3), e conclusões obtidas (Secção 4).

2. DADOS E METODOLOGIA

Para a realização deste estudo foram utilizadas imagens com valores de água precipitável obtidos por meio do Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), instrumento integrado no segundo satélite de observação da Terra (Projeto EOS-Aqua). O EOS-Aqua foi lançado em Maio de 2002, e encontra-se numa órbita circular quase polar a 705 km de altitude, com 2 observações por dia. O AIRS possui 2378 bandas espectrais no canal infravermelho (3.7 – 15.4 µm) e 4 bandas espectrais no visível e infravermelho próximo (0.4 - 1.0 µm) (Aumann et al., 2003). A área de observação seleccionada para o presente trabalho cobre grande parte do

A partir dos gráficos apresentados na Figura 2, é evidente que o ano de 2009 foi anómalo em relação à precipitação, sendo marcado por um verão, outono e inverno muito mais húmidos que os anteriores, em especial o inverno com um acumulado de 2701.9

mm. A relação entre a precipitação observada à superfície e a passagem de rios atmosféricos sobre a ilha será discutida na Secção 3.3.

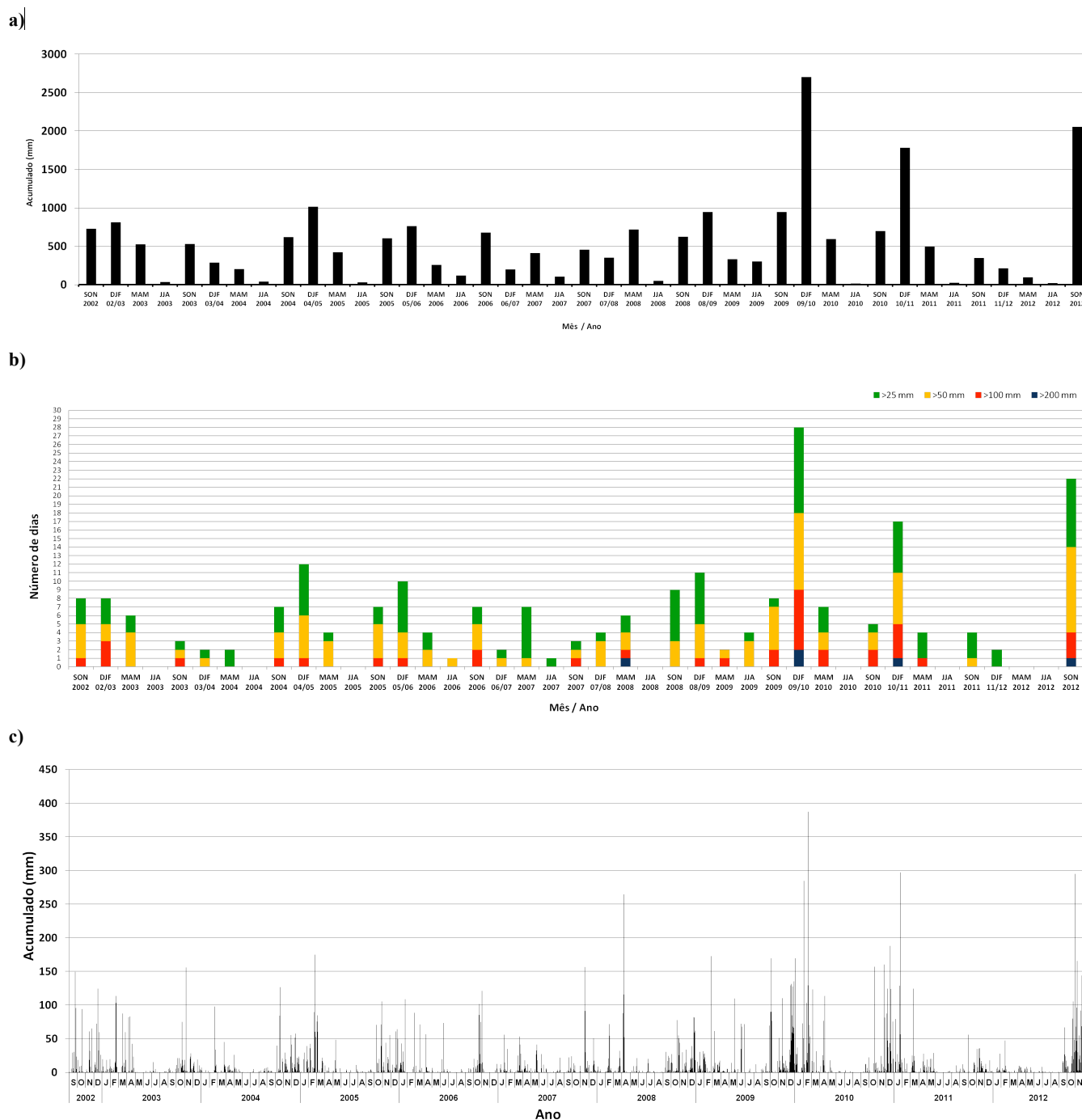


Figura 2: Registo de precipitação para a estação de Areeiro durante o período de Setembro de 2002 a Novembro de 2012: (a) Distribuição da precipitação acumulada sazonalmente, (b) Número de dias por estação do ano com precipitação diária acima de 25 mm (verde), 50 mm (amarelo), 100 mm (vermelho), e 200 mm (azul), e (c) Distribuição da precipitação acumulada diariamente.

3.2 – OBSERVAÇÕES DO AIRS

Em trabalhos anteriores observou-se que o transporte meridional de alta quantidade de vapor proveniente da região tropical para as latitudes médias, organizado sobre a forma de rios atmosféricos em direção ao continente Europeu, passa por vezes sobre o Arquipélago da Madeira, fornecendo condições necessárias para o desenvolvimento de precipitação sobre a Ilha da Madeira, que possui um relevo propício à formação ou intensificação de precipitação do tipo orográfico, (Couto et al., 2012). Nesta secção são apresentados resultados referentes à

análise do campo de água precipitável obtido por meio de observações do AIRS.

De maneira geral, a análise visual das imagens revelou que a região da Madeira é de facto atingida por estruturas filamentosas com considerável quantidade de água precipitável. Tais estruturas foram consideradas e classificadas como rios atmosféricos, uma vez que possuíam um comprimento superior à largura e representavam nitidamente o transporte meridional/latitudinal de vapor, ou seja, o transporte de alta quantidade de vapor da região tropical para as latitudes mais altas. Apresenta-se aqui a análise das

observações diárias de satélite para 10 períodos de inverno, compreendendo os meses de Dezembro, Janeiro, e Fevereiro. Considerando o critério de seleção de rios atmosféricos descrito na Secção 2 selecionaram-se os dias em que sobre a ilha da Madeira havia uma estrutura filamentar apresentando um gradiente horizontal de água precipitável, sem tomar como base qualquer limiar de quantidade desta variável.

Para os 10 períodos de inverno, foram selecionados 49 dias em que exatamente sobre a ilha ou muito próximo, se encontrava uma estrutura filamentar, muitas vezes com largura de poucas centenas de quilómetros e comprimento superior a milhares de quilómetros, e em outras situações com uma largura maior e um comprimento menor, no entanto, não suficiente para que a estrutura perdesse o carácter filamentar. A partir da evolução das observações verificou-se que muitos rios passam sobre a ilha em um estágio de dissipação, apresentando valores por vezes inferiores a 25 kg/m² e não se configurando de modo a representar um intenso transporte de vapor.

De entre os 49 dias foi possível selecionar 28 dias em que esses rios se apresentaram bem configurados antes e durante a passagem sobre o arquipélago, contabilizando 25 episódios, uma vez que 3 foram observados com duração de 2 dias. Os episódios são apresentados na Tabela 1, juntamente com os valores de água precipitável (PWAT) observados ao redor da ilha. Em 3 desses 25 episódios fez-se necessário a utilização das análises do Centro Europeu (ECMWF), uma vez que sobre a ilha não houve observação. Apesar de as análises subestimarem os valores de água precipitável em comparação com os valores estimados pelo AIRS,

o padrão do campo é semelhante, sendo suficiente para confirmar a presença de uma estrutura filamentar sobre a ilha.

Considerando os 7 primeiros períodos de inverno, os rios foram observados passando sobre a ilha de forma menos intensa, com água precipitável ao redor de 30 kg/m², e frequente, com uma ocorrência não superior a 3 casos durante os invernos de 2002/2003, 2005/2006, e 2006/2007, 1 episódio no inverno de 2008/2009 e nenhuma ocorrência nos invernos de 2003/2004, 2004/2005, e 2007/2008. A não identificação de rios sobre a ilha da Madeira nos períodos mencionados, não significa que não houve rios nesses períodos sobre o Atlântico, somente não foi observado nenhum dia em que essas estruturas filamentosas se encontrassem bem definidas sobre a ilha. Como já referido anteriormente, muitos rios passam sobre a ilha em um estágio de dissipação, o que eliminou muitos casos.

Ainda pela Tabela 1, é possível destacar que os rios atmosféricos foram mais frequentes ao longo do inverno de 2009/2010, com um total de 10 episódios, os quais também foram mais intensos com elevados valores de água precipitável nas proximidades da ilha. Este período foi marcado por rios muito mais intensos, com valores muitas vezes superior a 40 ou ainda 50 kg/m². No inverno de 2010/2011 também se verificou uma frequência maior de rios sobre a ilha (5 episódios), porém não tão intensos como no inverno de 2009/2010, com a maioria dos casos apresentando valores inferiores a 40 kg/m². Nota-se também que no inverno de 2011/2012, não se identificaram rios passando exatamente sobre a ilha.

Tabela 1 – Dias em que rios atmosféricos foram identificados sobre a ilha da Madeira considerando 10 períodos de inverno, com os respectivos valores água precipitável observados próximo da ilha, o modelo conceitual ao qual este pertence, utilização (x) ou não (-) das análises do Centro Europeu (ECMWF) para confirmação da existência do rio sobre a ilha, bem como a precipitação observada na estação de Areeiro.

Inverno		Rios atmosféricos			Precipitação	
	DIA	PWAT	MODELO	ECMWF		
2002/2003	01	16/12/2002	40-45 kg/m ²	2	-	124.30 mm
	02	21/01/2003	35-40 kg/m ²	1.a	-	4.50 mm
	03	18/02/2003	30-35 kg/m ²	1	-	16.20 mm
		19/02/2003	< 25 kg/m ²		-	0.00 mm
2005/2006	04	25/12/2005	35-40 kg/m ²	1	-	64.30 mm
	05	26/01/2006	35-40 kg/m ²	1.b	-	N/D*
	06	17/02/2006	25-30 kg/m ²	1.a	x	N/D
2006/2007	07	08/12/2006	35-40 kg/m ²	1.a	-	N/D
	08	14/02/2007	25-30 kg/m ²	1	-	0.00 mm
	09	22/02/2007	25-30 kg/m ²	1	-	1.00 mm
2008/2009	10	30/12/2008	30-35 kg/m ²	2	x	N/D
2009/2010	11	11/12/2009	30-35 kg/m ²	1	-	33.80 mm
	12	15/12/2009	35-40 kg/m ²	1	-	129.20 mm
	13	17/12/2009	> 40 kg/m ²	1	-	131.50 mm
	14	22/12/2009	N/A	1	x	127.70 mm
		23/12/2009	45-50 kg/m ²		-	N/D
	15	28/12/2009	40-45 kg/m ²	1	-	135.10 mm
	16	02/01/2010	35-40 kg/m ²	1	-	169.70 mm
	17	07/02/2010	30-35 kg/m ²	1	-	7.30 mm
	18	14/02/2010	35-40 kg/m ²	1	-	103.30 mm
	19	20/02/2010	> 50 kg/m ²	1	-	387.10 mm
	20	26/02/2010	35-40 kg/m ²	1	-	53.10 mm
		27/02/2010	35-40 kg/m ²		-	N/D
2010/2011	21	04/12/2010	45-50 kg/m ²	2	-	80.50 mm
	22	27/12/2010	35-40 kg/m ²	1	-	37.40 mm
	23	06/01/2011	30-35 kg/m ²	1	-	79.10 mm
	24	13/02/2011	30-35 kg/m ²	1.b	-	4.70 mm
	25	19/02/2011	30-35 kg/m ²	1	-	13.20 mm

*N/D – não disponível.

Neste trabalho, o objectivo principal é analisar as massas de vapor que se deslocam do Atlântico Tropical, principalmente com origem nas Caraíbas, e que na sua trajetória passam sobre a ilha da Madeira, criando um ambiente favorável à ocorrência de precipitação intensa sobre a ilha, podendo dar origem a casos da magnitude do observado em 20 de Fevereiro de 2010. Um dos pontos importantes nesta secção é observar quanto de água precipitável deve ser transportada na região da ilha em meses de inverno, no âmbito de identificar fatores precursores da ocorrência de intensa precipitação.

A análise detalhada do padrão destas bandas possibilitou a elaboração de um modelo conceptual de como essas estruturas filamentosas se dispõem sobre a região da ilha, incluindo filamentos com água precipitável desde os 20 a 25 kg/m² até valores da ordem de 50 kg/m². A análise completa das imagens permitiu observar que sobre a região da Madeira, essas estruturas filamentosas com significativos valores de água precipitável se estabelecem basicamente de 2 modos ao longo dos períodos de inverno, que designamos por modelos conceptuais ilustrados na Figura 3 e descritos abaixo, cada um com suas principais características.

MODELO 1 (Figura 3.a): estreitos corredores (largura de poucas centenas de quilómetros e comprimento de milhares de quilómetros) com valores típicos de água precipitável entre 25 a 30 kg/m², apresentando, por vezes maiores concentrações de vapor de água, com regiões de água precipitável acima de 40 kg/m². Suportando a ideia de transporte de alta quantidade de vapor a partir dos trópicos em direção ao Polo, em algumas situações verifica-se que os filamentos se estendem até latitudes superiores a 50°N. Em geral, os rios apresentam uma orientação de sudoeste-nordeste ao passar sobre a ilha. Este modelo genérico inclui diferentes configurações particulares, incluindo 2 padrões típicos que podemos identificar como *MODELO 1.a* e *MODELO 1.b*, Figuras 3.b e 3.c, respectivamente. Ambos os submodelos apresentaram-se de forma filamentar, tal como o MODELO 1, porém com variações na orientação do transporte de vapor. No MODELO 1.a, este é mais meridional e não apresentando muita variação latitudinal, ou seja, são responsáveis pelo transporte de vapor proveniente da região oeste do Atlântico, numa latitude próxima ou ligeiramente acima de 30°N. No caso do MODELO 1.b, verifica-se uma ondulação desse transporte canalizado na direção Sul, forçado basicamente pelo deslocamento de massas de ar mais secas para a região subtropical.

MODELO 2 (Figura 3.d): estrutura não tão fina como as do primeiro modelo (corredores), mas que se apresentam associadas a um tipo de circulação ciclónica, com origem numa depressão tipicamente centrada a noroeste do Arquipélago da Madeira, entre o Arquipélago dos Açores, e a costa sudoeste do continente europeu. Neste caso o transporte assemelha-se claramente a uma esteira transportadora quente, localizada no sector quente de ciclones extratropicais, a qual é responsável pelo transporte de alta quantidade de vapor. Uma vez que essas estruturas mantiveram o aspeto filamentar, com um comprimento superior à largura, podem ser considerados como rios atmosféricos, uma vez que o vapor transportado para a região extratropical tem origem na região tropical, nomeadamente, no Atlântico Tropical Oeste e Central.

Cada episódio de rio da Tabela 1 foi classificado como um desses dois tipos de modelo, também indicados na tabela, podendo destacar-se que o MODELO 1 foi mais frequente que o MODELO 2, o qual foi identificado sobre a ilha apenas 3 vezes.

3.3 RIOS ATMOSFÉRICOS, PRECIPITAÇÃO E CASOS DE EXEMPLO

Em relação à passagem desses rios e à precipitação observada sobre a ilha, no presente trabalho verificou-se que a quantidade de vapor transportada pelos rios influencia significativamente a quantidade de chuva registada sobre a ilha, em especial, na região mais elevada. A Tabela 1 mostra a precipitação observada na estação de Areiro em cada dia em que foi identificado rio atmosférico sobre a ilha, salvo alguns dias que não houve registo.

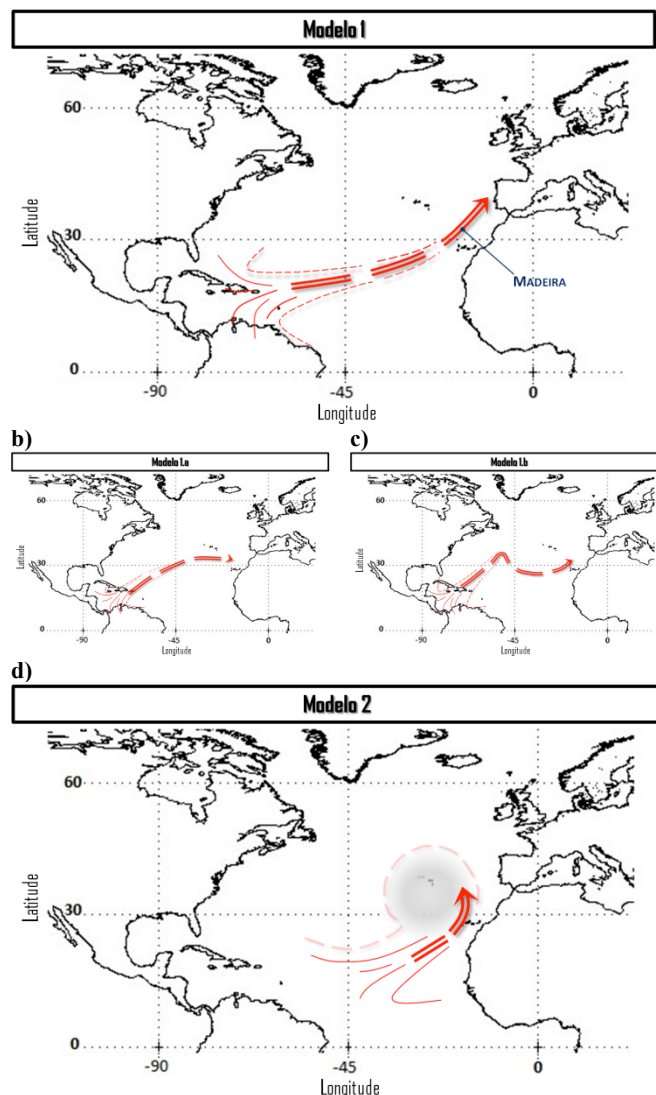


Figura 3: Modelo conceptual de dois tipos básicos de rios que foram observados passando sobre a ilha da Madeira ao longo dos períodos de inverno considerados, ambos responsáveis pelo transporte meridional de vapor. (a) MODELO 01 ou corredor, (b) MODELO 1a, (c) MODELO 1b, e (d) MODELO 02 ou tipo esteira transportadora.

Pela comparação desses resultados com os resultados discutidos na Secção 3.1, verifica-se que 1 dos 3 casos de chuva extrema esteve associado a passagem dessa estrutura sobre a ilha. Em relação às outras classes de intensidade de precipitação, destaca-se que 7 de 17 dias de chuva forte, foram favorecidos por rios, enquanto os eventos de precipitação de intensidade moderada e fraca não foram muito influenciados. Dos 34 dias com precipitação moderada, 3 estiveram relacionadas com rios, enquanto somente 2 dias dos 42 eventos classificados como de chuva fraca observados ao longo do período são associáveis à presença de rios. Destaca-se que em 6 episódios de rios não foi observada precipitação no Areiro.

Para o inverno de 2009/2010, alguns casos já tinham sido identificados por Couto et al. (2012), destacando-se o rio observado no dia 20 de Fevereiro de 2010, o qual apresentou uma quantidade de vapor de água muito superior ao observado para os rios identificados ao longo dos 10 invernos, com valores de água precipitável, igual ou superior a 50 kg/m² (Figure 4.a). A passagem desse rio favoreceu a ocorrência de extrema precipitação sobre a ilha, ocasionando enchentes repentinas e deslizamentos de terra em vários pontos, deixando dezenas de mortos e milhões de Euros em danos materiais.

Um segundo exemplo da presença de rio atmosférico sobre a ilha da Madeira é apresentado na Figura 4.b. Corresponde a um caso de precipitação de intensidade moderada (64.30 mm), em que

precipitável entre 35-40 kg/m².

Na Figura 4.c apresenta-se um outro exemplo, associado a um rio atmosférico do tipo MODELO 2, na origem de um evento de forte precipitação, observado no dia 16 de Dezembro de 2002, com um acumulado diário de 124.30 mm. É possível verificar, para além de intensos valores de água precipitável, da ordem de 40 kg/m², uma curvatura do rio no sentido anti-horário a norte do arquipélago dos Açores.

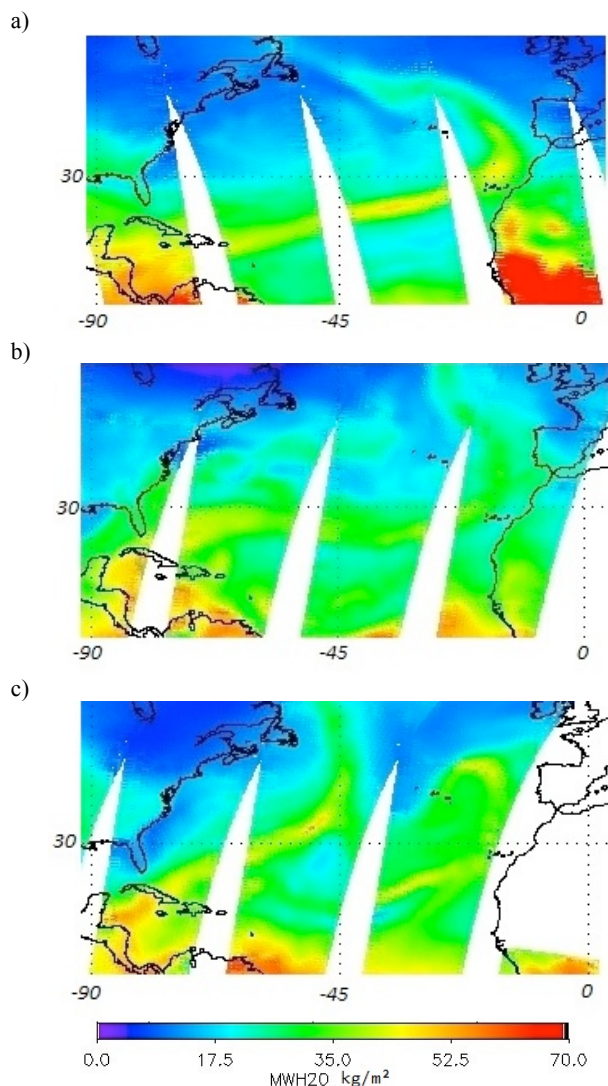


Figura 4: Fragmento das imagens de satélite para os dias em que rios atmosféricos foram identificados sobre a ilha. (a) 20 de Fevereiro de 2010 às 18:59 UTC, (b) 25 de Dezembro de 2005 às 07:41 UTC, e (c) 16 de Dezembro de 2002 às 08:41 UTC. A escala de cores representa a quantidade total de vapor de água integrada desde a superfície até ao topo da atmosfera.

É importante destacar que, para além da quantidade de água precipitável observada nos rios atmosféricos, a orientação e tipo do mesmo também deve ser considerado para o caso da Madeira. Pela análise do modelo conceptual para os dias em que houve registo de precipitação, destaca-se que dias com precipitação significativa estiveram associados a rios do Modelo 2, os quais mesmo com uma frequência muito menor que os do MODELO 1, se mostraram associados a precipitação moderada e forte. Os casos dos MODELOS 1.a e 1.b estiveram relacionados com chuva muito fraca, mesmo quando apresentavam valores de água precipitável superiores a 35 kg/m², enquanto outros exemplos de tipo MODELO 1, quando apresentando altos valores de água precipitável favoreceram a ocorrência de precipitação forte ou extrema.

4. CONCLUSÕES

com o transporte de vapor no Oceano Atlântico por meio de estreitas bandas com alta quantidade de água precipitável, relacionando-o com a precipitação observada sobre a ilha da Madeira ao longo de 10 períodos de inverno (2002-2012). Por meio do desenvolvimento deste estudo foi possível verificar e confirmar o impacto do transporte meridional de vapor na precipitação observada na ilha, o qual proporciona condições favoráveis ao desenvolvimento de precipitação, por vezes apresentando forte intensidade. A utilização dos dados de água precipitável obtidos por satélite tem sido fundamental no estudo, uma vez que os rios atmosféricos são facilmente identificados por meio desse produto.

A análise nos leva a concluir que os rios atmosféricos de facto são responsáveis por transportar para as regiões de latitudes mais altas grande quantidade de vapor proveniente da região tropical. A fonte de vapor situa-se principalmente na região das Caraíbas. Em geral, estes rios passam sobre a Madeira num estágio de dissipação, apresentando valores relativamente baixos de água precipitável. No entanto, por vezes são mais intensos o suficiente para conseguir atravessar o Atlântico e atingir a ilha ainda bem configurados, em forma e intensidade. Nestes casos, precipitação significativa na ilha é favorecida.

É evidente que quanto maior a quantidade de vapor transportada por esses filamentos com origem na região tropical, maior a possibilidade de ocorrência de chuva significativa sobre a ilha. Contudo, no presente trabalho mostra-se que os rios precisam apresentar altos valores de água precipitável para que forte precipitação seja registada. Esta característica foi verificada a partir da análise dos valores observados próximo da ilha quando da identificação dos rios. Para os casos de rios atmosféricos com valores em uma média de 35 kg/m², foi observada fraca precipitação sobre a ilha, enquanto para os rios que transportavam uma quantidade de vapor superior a 40 kg/m², estes favoreceram a ocorrência de precipitação forte a extrema na Madeira. Essa conclusão indica que os rios devem conter algo superior a 40 kg/m² durante o período de inverno, caso contrário, a orografia da ilha não é muito eficiente para conversão da água precipitável em precipitação e, portanto, eventos de precipitação com intensidade moderada ou fraca são registados. Esses corredores, ou rios quando já se encontravam em fase de dissipação sobre a ilha, geralmente não favoreceram a ocorrência de intensa precipitação.

Ambos os modelos aqui apresentados têm como objetivo clarificar e ajudar na compreensão de como o transporte meridional de vapor tem afetado a precipitação na Ilha da Madeira ao longo do período de inverno. Contudo, juntamente com o modelo, verificou-se que rios atmosféricos com água precipitável acima de 40 kg/m², favorecem a ocorrência de intensa precipitação sobre a ilha durante o inverno, principalmente se estes estiverem configurados de acordo com o MODELO 1 e 2. Salienta-se também que alguns dos casos mais significativos e até mesmo extremos de eventos de precipitação sobre a ilha ocorridos nos 10 invernos estudados, não foram favorecidos por esse tipo de estrutura o que indica ser necessário alargar o estudo a outras situações específicas, buscando compreender melhor os ambientes que favorecem a ocorrência de eventos significativos que não estão associados ao transporte meridional de vapor em larga-escala, sob a forma de rios troposféricos.

5. AGRADECIMENTOS

Esse trabalho tem sido financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito da bolsa de Doutoramento com referência SFRH/BD/81952/2011. Os autores também agradecem o financiamento do Centro de Geofísica de Évora, Portugal, a partir do contrato com a FCT Pest-OE/CTE/UI0078/2011.

6. REFERÊNCIAS

Aumann, H., M.T. Chahine, C. Gautier, M.D. Goldberg, E. Kalnay, L.M. McMillin, H.E. Revercomb, P.W. Rosenkranz, W.L. Smith, D.H. Staelin, L.L. Strow, J. Susskind, (2003): AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and

264.

- Couto, F.T., R. Salgado, e M.J. Costa, (2012): Analysis of intense rainfall events on Madeira Island during the 2009/2010 winter, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2225-2240, doi:10.5194/nhess-12-2225-2012.
- Couto, F.T., R. Salgado, e M.J. Costa, (2013): Flash flood in Madeira Island in autumn 2012. 7th European Conference on Severe Storms. Helsinki-Finland.
- Fragoso, M., R.M. Trigo, J.G. Pinto, S. Lopes, A. Lopes, S. Ulbrich, e C. Magro, (2012): The 20 February 2010 Madeira flash-floods: synoptic analysis and extreme rainfall assessment, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 715-730, doi:10.5194/nhess-12-715-2012.
- Houze, R. A. Jr., (2012): Orographic effects on precipitating clouds, *Rev. Geophys.*, 50, RG1001, doi:10.1029/2011RG000365.
- Lavers, D.A., R.P. Allan, E.F. Wood, G. Villarini, D.J. Brayshaw, e A.J. Wade, (2011): Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L23803, doi:10.1029/2011GL049783.
- Lavers, D.A., G. Villarini, R.P. Allan, E.F. Wood, e A. J. Wade, (2012): The detection of atmospheric rivers in atmospheric reanalyses and their links to British winter floods and the large-scale climatic circulation, *Journal of Geophysical Research*, 117, D20106, doi:10.1029/2012JD018027.
- Luna, T., A. Rocha, A.C. Carvalho, J.A. Ferreira, e J. Sousa, (2011): Modelling the extreme precipitation event over Madeira Island on 20 February 2010, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2437-2452, doi:10.5194/nhess-11-2437-2011.
- Neiman, P.J., F.M. Ralph, G.A. Wick, J.D. Lundquist, M.D. Dettinger, (2008): Meteorological Characteristics and Overland Precipitation Impacts of Atmospheric Rivers Affecting the West Coast of North America Based on Eight Years of SSM/I Satellite Observations. *J. Hydrometeor.*, 9, 22-47, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2007JHM855.1>.
- Ralph, F.M., P.J. Neiman, G.A. Wick, (2004): Satellite and CALJET Aircraft Observations of Atmospheric Rivers over the Eastern North Pacific Ocean during the Winter of 1997/98. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 1721-1745, doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1721:SACAOO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1721:SACAOO>2.0.CO;2).
- Ralph, F.M., P.J. Neiman, G.A. Wick, S.I. Gutman, M.D. Dettinger, D.R. Cayan, e A.B. White, (2006): Flooding on California's Russian River: Role of atmospheric rivers, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L13801, doi:10.1029/2006GL026689.
- Wick, G.A., P.J. Neiman, e F.M. Ralph, (2013): Description and validation of an automated objective technique for identification and characterization of the integrated water vapor signature of atmospheric rivers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51, 2166-2176.
- Zhu, Y., e R.E. Newell, (1994): Atmospheric Rivers and bombs. *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1999-2002.
- Zhu, Y., e R.E. Newell, (1998): A Proposed Algorithm for Moisture Fluxes from Atmospheric Rivers. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 725-735. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<0725:APAFMF>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0725:APAFMF>2.0.CO;2).